

연구보고서

국내 이차전지 산업 현황 및 취급 화학물질 관리방안(Ⅲ)

이광용·장미연·전현진·김수진

산업재해예방

안전보건공단

산업안전보건연구원



요약문

- 연구기간 2024년 2월 ~ 2024년 11월
- 핵심단어 이차전지, 노출평가, NCM(리튬·니켈·코발트·망간), 카보네이트
- 연구과제명 국내 이차전지 산업 현황 및 취급 화학물질 관리방안(Ⅲ)

1. 연구배경

국제적인 탄소배출 규제로 이차전지 시장이 급성장하고 있다. 정부는 이차전지 산업을 국가 핵심 전략 산업으로 지정하였고 연구·기술개발과 생산능력 확대에 전폭적으로 투자하고 있다. 그러나 이차전지 관련 연구는 주로 기술개발 및 사고 위험성에 대한 연구가 대부분이며 노동자의 건강 보호와 관련된 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 3년에 걸쳐 이차전지 산업의 순환 구조와 공정, 취급하는 화학물질을 파악하고, 노동자의 노출 수준을 평가하여 안전한 작업 환경 관리방안을 마련하여 직업성 질병 예방을 위한 기초 자료로 활용하고자 한다.

2. 주요 연구내용

본 연구는 3년간(2022~2024) 진행된 연구로 1차년도에는 이차전지 산업을 10개 산업군(양극 활물질, 음극 활물질, 전해액, 분리막, 집전체, 리튬, 도전재, 바인더, 배터리 제조, 배터리 재생)으로 분류하고 문헌고찰 및 32개 사업장의 현장 조사를 통해 공정 및 취급 화학물질을 파악하였다.

국내 이차전지 산업에서는 입자상 형태의 금속류(리튬, 니켈, 코발트, 망간, 알루미늄 등), 흑연, 카본블랙, 카본나노튜브(CNT)와 다양한 유기용제(디클로로메탄, 디메틸카보네이트(DMC), 에틸메틸카보네이트(EMC), 디에틸카보네이트(DEC), 메틸피롤리돈(NMP) 등) 그리고 황산, 염산 등의 산 용액과 수산화나트륨 등의 염기성 용액이 사용되고 있다.

2~3차년도 연구에서는 1차년도 연구를 바탕으로 22개 사업장을 대상으로 작업환경 정밀평가를 진행하고 관리방안을 제시하였다.

1) 유해인자 노출 위해성

- ◎ **양극 활물질 산업**은 전구체 원료 제조업과 전구체 및 활물질 제조업으로 구분하여 평가하였다. 전구체 원료 제조업에서는 1개 시료가 니켈 노출 기준을 초과하였고, 코발트의 약 13%가 노출기준을 초과하였다. 전구체 및 양극 활물질 제조업에서는 리튬의 약 3 %가 ILO 노출기준을 초과하였고, 니켈과 코발트는 각각 약 28 %가 노출기준 초과이며, 망간은 1개 시료가 노출기준 초과이고 알루미늄은 노출기준 미만으로 평가되었다.
- ◎ **음극 활물질 산업**에서 호흡성 분진 중 흑연은 모두 노출기준 미만이었다.
- ◎ **전해액 산업**에서는 디메틸카보네이트(DMC)의 약 58 %와 에틸메틸카보네이트(EMC)의 약 26%가 작업자 무영향수준(wDNEL) 값을 초과하였다.
- ◎ **분리막 산업**에서 디클로로메탄 및 알루미늄은 노출기준 미만으로 평가되었다.
- ◎ **리튬 산업**에서는 리튬의 약 6 %가 ILO 노출기준을 초과하는 것으로 평가되었다.
- ◎ **바인더 산업**에서는 누출 확인을 위해 지역시료로 1.3-부타디엔, 스티렌 그리고 아크릴로니트릴을 평가하였고, 미량이 검출되는 것을 확인하였다.

- ◎ **도전재 산업**의 CNT 분진 중 EC 농도 범위는 0.0003~135.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 분산공정 중 미량의 메틸피롤리돈(NMP)이 검출되었다.
- ◎ **배터리 제조 산업**에서는 리튬과 니켈의 1개 시료와 코발트 2개 시료가 노출기준을 초과하는 것으로 평가되었다.
- ◎ **배터리 재생 산업**에서는 디메틸카보네이트(DMC)의 약 14 %와 에틸 메틸카보네이트(EMC)의 약 24%가 작업자 무영향수준(wDNEL) 값을 초과하였고, 입자상물질 중 리튬 약 10 %, 니켈 약 24 %, 코발트 약 29 %가 노출기준을 초과하였고 망간은 1개 시료가 노출기준 초과이며 알루미늄은 노출기준 미만으로 평가되었다.

2) 취급 화학물질 관리방안

이차전지 산업은 세부 산업 및 각 사업장에 따라 작업 공법 및 공정이 상이하여, 일괄된 관리방안을 제시하기에 제한점이 매우 크다. 따라서 본 연구에서는 각 사업장을 방문하여 개별 설명회를 개최하였고, 이를 통해 일부 사업장에서는 작업환경개선 활동을 추진하고 있다.

◎ 입자상 물질

- 입자상 형태의 금속과 흑연은 수 마이크로미터의 크기로 국소배기 단독으로 관리하기에는 한계점이 매우 큼
- 단기적인 관리로는 적절한 보호구 착용, 작업 주변의 청소 및 작업 방법 교육이 필요함
- 장기적으로는 입자상물질이 비산될 수 있는 공정을 최대한 밀폐하고 적절한 환기 설비 설치 등을 통해 입자상물질의 비산을 최소화하기 위한 노력이 필요함
- 수산화리튬 혹은 황산금속염 같은 산·염기성 물질을 취급할 경우 적절한 보호구를 착용하여야 함

◎ 가스상 물질

- 카보네이트 용매 사용 시 환기 장치 설치 및 적절한 호흡용 보호구 등으로 노동자의 노출을 최소화하는 선제적 관리를 하는 것이 권장됨
- 분리막 산업의 디클로로메탄 수조는 작업 공간과 분리하고 환기 설비를 설치하는 등 공학적 관리방안이 요구됨
- 분리막 산업에서 필름이 끊어지는 등의 돌발 상황 시 보호구 착용 등 단시간에 고농도 노출에 대한 관리방안이 필요함

본 연구에서는 노동자의 유해인자 노출을 최소화하기 위한 기본 방안을 제시하였고 각 사업장에서는 사업장의 공정 및 상황에 적합한 능동적인 작업환경 관리방안을 수립하고 실행하는 것이 필요하다.

3. 연구 활용방안

1) 제언

이차전지 산업의 주요 원료인 리튬과 전해액 용매로 대량 사용되는 카보네이트 용매는 법적 규제 대상이 아니며 노출기준도 설정되지 않아 관리의 사각지대에 놓여있다. 따라서, 본 연구진은 리튬, 디메틸카보네이트, 디에틸카보네이트 그리고 에틸메틸 카보네이트에 대한 노출기준을 설정하고 작업환경측정 대상 유해인자에 포함하는 것을 제언한다.

2) 활용방안

본 연구를 통해 이차전지 산업의 작업환경을 관리하여 노동자의 직업성 질환 예방을 위한 기초 자료로 활용하고자 한다.

4. 연락처

- 연구책임자 : 산업안전보건연구원 직업환경연구실 연구위원 이광용
 - ☎ 052) 703. 0882
 - E-mail : withyou123@kosha.or.kr

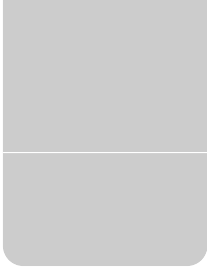
목 차

I. 서 론	1
1. 연구배경	3
2. 연구목표	5
II. 연구방법	7
1. 연구범위	9
2. 국내 이차전지 산업분류	9
3. 평가 대상	11
4. 측정·분석방법(Methods)	12
1) 입자상물질(Particulates)	12
2) 가스상 물질(Vapors)	16
III. 연구결과	19
1. 양극 활물질 산업	21

목 차

1) 공정 및 취급 화학물질	21
2) 작업환경 노출평가	29
2. 음극 활물질 산업	67
1) 공정 및 취급 화학물질	67
2) 작업환경 노출평가	69
3. 전해액 산업	77
1) 공정 및 취급 화학물질	77
2) 작업환경 노출평가	80
4. 분리막 산업	83
1) 공정 및 취급 화학물질	83
2) 작업환경 노출평가	86
5. 리튬 산업	92
1) 공정 및 취급 화학물질	92
2) 작업환경 노출평가	97
6. 집전체 산업	101
1) 공정 및 취급 화학물질	101

7. 바인더 산업	104
1) 공정 및 취급 화학물질	104
2) 작업환경 노출평가	106
8. 도전재 산업	107
1) 공정 및 취급 화학물질	107
2) 작업환경 노출평가	111
9. 배터리 제조 산업	113
1) 공정 및 취급 화학물질	113
2) 작업환경 노출평가	118
10. 배터리 재생 산업	132
1) 공정 및 취급 화학물질	132
2) 작업환경 노출평가	136
11. 취급 화학물질 관리방안	158
1) 입자상 물질	158
2) 가스상 물질	160
3) 기타 사항	160



목 차

IV. 결론	163
1. 산업별 취급 화학물질	165
2. 입자상물질 및 유기용제 노출평가	166
3. 취급 화학물질 관리방안	167
4. 제언	168
참고문헌	169
Abstract	175
부록	177

표 목차

〈표 II-1〉 이차전지 산업별 평가 대상 사업장 및 대상 물질	11
〈표 II-2〉 분석 물질 별 검출한계($\mu\text{g}/\text{sample}$)	13
〈표 II-3〉 분석 물질 별 검출한계($\mu\text{g}/\text{sample}$)	14
〈표 II-4〉 직경분립총돌기의 유효한계직경(유속 2 LPM)	16
〈표 II-5〉 분석 물질 별 검출한계($\mu\text{g}/\text{sample}$)	17
〈표 III-1〉 전구체 원료 제조업의 취급 화학물질	22
〈표 III-2〉 전구체 제조업의 취급 화학물질	25
〈표 III-3〉 양극 활물질 제조업의 취급 화학물질	27
〈표 III-4〉 황산니켈 제조 공정의 니켈 노출 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	30
〈표 III-5〉 황산코발트 제조 공정의 금속(총 분진) 노출 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	32
〈표 III-6〉 황산코발트 제조 공정의 금속(호흡성 분진) 노출 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	32
〈표 III-7〉 전구체 원료 제조업의 공기역학적 질량중위직경(μm)	34
〈표 III-8〉 전구체 원료 제조업의 질량평균직경(μm)	34
〈표 III-9〉 전구체 원료 제조업의 입자상물질 입경분포(%)	35
〈표 III-10〉 양극 활물질 제조업의 리튬 노출 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	38
〈표 III-11〉 양극 활물질 제조업 노동자의 니켈 노출 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	40
〈표 III-12〉 양극 활물질 제조업의 코발트 노출 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	41
〈표 III-13〉 양극 활물질 제조업의 망간 노출 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	43
〈표 III-14〉 양극 활물질 제조업의 알루미늄 노출 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	44
〈표 III-15〉 양극 활물질 제조업의 공기역학적 질량중위직경(μm)	47

표 목차

〈표 III-16〉 양극 활물질 제조업의 질량평균직경(μm)	48
〈표 III-17〉 양극 활물질 A사의 입자상물질 입경분포(%)	51
〈표 III-18〉 양극 활물질 B사의 입자상물질 입경분포(%)	57
〈표 III-19〉 양극 활물질 C사의 입자상물질 입경분포(%)	61
〈표 III-20〉 전구체 제조 D사의 입자상물질 입경분포(%)	65
〈표 III-21〉 음극 활물질 산업의 취급 화학물질	69
〈표 III-22〉 음극 활물질 산업의 분진 노출 농도(mg/m^3)	70
〈표 III-23〉 음극 활물질 산업의 입자상 물질 발생 크기 특성(μm)	71
〈표 III-24〉 음극 활물질 산업의 입자상물질 입경분포(%)	72
〈표 III-25〉 전해액 산업의 취급 화학물질	80
〈표 III-26〉 전해액 산업의 카보네이트 노출 농도(ppm)	82
〈표 III-27〉 분리막 산업의 취급 화학물질	83
〈표 III-28〉 분리막 산업의 디클로로메탄 노출 농도(ppm)	87
〈표 III-29〉 분리막 산업의 알루미늄 노출 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	88
〈표 III-30〉 분리막 산업의 공기역학적 질량중위직경(μm)	89
〈표 III-31〉 분리막 산업의 질량평균직경(μm)	89
〈표 III-32〉 분리막 산업의 입자상물질 입경분포(%)	89
〈표 III-33〉 리튬 산업의 취급 화학물질	92
〈표 III-34〉 리튬 산업의 리튬 노출 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	98
〈표 III-35〉 리튬 산업의 입자상 물질 발생 크기 특성(μm)	99
〈표 III-36〉 리튬 산업의 입자상물질 입경분포(%)	99

〈표 Ⅲ-37〉 집전체 산업의 취급 화학물질	101
〈표 Ⅲ-38〉 바인더 산업의 취급 화학물질	105
〈표 Ⅲ-39〉 바인더 산업의 지역 시료 농도(ppm)	106
〈표 Ⅲ-40〉 도전재 산업의 취급 화학물질	107
〈표 Ⅲ-41〉 도전재 산업의 탄소 노출 범위($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	112
〈표 Ⅲ-42〉 도전재 산업의 NMP 지역 시료 농도(ppm)	112
〈표 Ⅲ-43〉 배터리 제조 산업의 취급 화학물질	118
〈표 Ⅲ-44〉 배터리 제조 산업의 금속 노출 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	120
〈표 Ⅲ-45〉 배터리 제조 산업의 음극 활물질 노출 농도(mg/m^3)	121
〈표 Ⅲ-46〉 배터리 제조 산업의 카보네이트 노출 농도(ppm)	122
〈표 Ⅲ-47〉 배터리 제조 산업의 공기역학적 질량중위직경(μm)	124
〈표 Ⅲ-48〉 배터리 제조 산업의 질량평균직경(μm)	125
〈표 Ⅲ-49〉 배터리 제조 E사의 입자상물질 입경분포(%)	126
〈표 Ⅲ-50〉 배터리 제조 F사의 입자상물질 입경분포(%)	128
〈표 Ⅲ-51〉 배터리 재생 산업의 취급 화학물질	132
〈표 Ⅲ-52〉 재생 산업의 카보네이트 노출 농도(ppm)	137
〈표 Ⅲ-53〉 재생 산업의 리튬 노출 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	139
〈표 Ⅲ-54〉 재생 산업의 니켈 노출 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	141
〈표 Ⅲ-55〉 재생 산업의 코발트 노출 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	143
〈표 Ⅲ-56〉 재생 산업의 망간 노출 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	145
〈표 Ⅲ-57〉 재생 산업의 알루미늄 노출 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	146

표 목차

〈표 III-58〉 재생 산업의 공기역학적 질량중위직경(μm)	148
〈표 III-59〉 재생 산업의 질량평균직경(μm)	148
〈표 III-60〉 배터리 재생 G사의 입자상물질 입경분포(%)	149
〈표 III-61〉 배터리 재생 H사의 입자상물질 입경분포(%)	153
〈표 III-62〉 배터리 재생 I사의 입자상물질 입경분포(%)	155
〈표 A-1〉 이차전지 산업 취급 화학물질 및 노출기준	179

그림목차

[그림 I-1] 전지(battery)의 분류	3
[그림 II-1] 이차전지 산업 구분	10
[그림 III-1] 전구체 원료 제조업의 공정흐름도	22
[그림 III-2] 양극 활물질 제조업의 공정흐름도	28
[그림 III-3] 황화니켈 제조 공정의 니켈 노출 농도 누적분포	31
[그림 III-4] 황산코발트 공정의 총 분진 노출 농도 누적분포	33
[그림 III-5] 황산니켈 포장 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)	35
[그림 III-6] 황산니켈 포장 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)	36
[그림 III-7] 황산코발트 원료투입 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)	36
[그림 III-8] 황산코발트 원료투입 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)	37
[그림 III-9] 양극 활물질 제조업의 리튬 노출 농도 누적분포	39
[그림 III-10] 양극 활물질 제조업의 니켈 노출 농도 누적분포	40
[그림 III-11] 양극 활물질 제조업의 코발트 노출 농도 누적분포	42
[그림 III-12] 양극 활물질 제조업의 망간 노출 농도 누적분포	43
[그림 III-13] 양극 활물질 제조업의 알루미늄 노출 농도 누적분포	44
[그림 III-14] A사 전구체 원료투입 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)	52
[그림 III-15] A사 전구체 원료투입 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)	52
[그림 III-16] A사 전구체 포장 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)	53
[그림 III-17] A사 전구체 포장 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)	53

그림목차

[그림 Ⅲ-18] A사 활물질 원료투입 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)	54
[그림 Ⅲ-19] A사 활물질 원료투입 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)	54
[그림 Ⅲ-20] A사 활물질 소성 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)	55
[그림 Ⅲ-21] A사 활물질 소성 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)	55
[그림 Ⅲ-22] A사 활물질 포장 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)	56
[그림 Ⅲ-23] A사 활물질 포장 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)	56
[그림 Ⅲ-24] B사 활물질 원료투입 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)	58
[그림 Ⅲ-25] B사 활물질 원료투입 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)	58
[그림 Ⅲ-26] B사 활물질 소성 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)	59
[그림 Ⅲ-27] B사 활물질 소성 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)	59
[그림 Ⅲ-28] B사 활물질 포장 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)	60
[그림 Ⅲ-29] B사 활물질 포장 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)	60
[그림 Ⅲ-30] C사 활물질 원료투입 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)	61
[그림 Ⅲ-31] C사 활물질 원료투입 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)	62
[그림 Ⅲ-32] C사 활물질 소성 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)	62
[그림 Ⅲ-33] C사 활물질 소성 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)	63
[그림 Ⅲ-34] C사 활물질 파쇄 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)	63
[그림 Ⅲ-35] C사 활물질 파쇄 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)	64
[그림 Ⅲ-36] C사 활물질 포장 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)	64
[그림 Ⅲ-37] C사 활물질 포장 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)	65
[그림 Ⅲ-38] D사 전구체 포장 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)	66

[그림 Ⅲ-39] D사 활물질 포장 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)	66
[그림 Ⅲ-40] 음극 활물질 산업의 공정흐름도	67
[그림 Ⅲ-41] 음극 활물질 산업의 흑연 노출 농도 누적분포	70
[그림 Ⅲ-42] 원료투입 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)	73
[그림 Ⅲ-43] 원료투입 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)	73
[그림 Ⅲ-44] 피치혼합 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)	74
[그림 Ⅲ-45] 피치혼합 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)	74
[그림 Ⅲ-46] 소성로 투입 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)	75
[그림 Ⅲ-47] 소성로 투입 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)	75
[그림 Ⅲ-48] 포장 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)	76
[그림 Ⅲ-49] 포장 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)	76
[그림 Ⅲ-50] 전해액 산업의 공정흐름도	77
[그림 Ⅲ-51] 전해액 산업의 카보네이트 노출 농도 누적분포	82
[그림 Ⅲ-52] 분리막 산업의 공정흐름도	84
[그림 Ⅲ-53] 분리막 산업의 디클로로메탄 노출 농도 누적분포	88
[그림 Ⅲ-54] 원료투입 공정(A사)의 알루미늄 입경 크기별 질량 분포(%)	90
[그림 Ⅲ-55] 원료투입 공정(A사)의 알루미늄 입경 크기별 입자 수 분포(%)	90
[그림 Ⅲ-56] 원료투입 공정(B사)의 알루미늄 입경 크기별 질량 분포(%)	91
[그림 Ⅲ-57] 원료투입 공정(B사)의 알루미늄 입경 크기별 입자 수 분포(%)	91
[그림 Ⅲ-58] 리튬 산업의 공정흐름도	93
[그림 Ⅲ-59] 전기투석막을 이용한 수산화리튬 제조	95

그림목차

[그림 Ⅲ-60] 리튬 산업의 리튬 노출 농도 누적분포	98
[그림 Ⅲ-61] 수산화리튬 포장 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)	100
[그림 Ⅲ-62] 수산화리튬 포장 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)	100
[그림 Ⅲ-63] 집전체 산업의 공정흐름도	102
[그림 Ⅲ-64] SBR 바인더 산업의 공정흐름도	104
[그림 Ⅲ-65] 바인더 산업의 원료물질 노출 농도 누적분포	106
[그림 Ⅲ-66] 도전재 산업의 공정흐름도	108
[그림 Ⅲ-67] 도전재 산업의 CNT 노출 농도 누적분포	112
[그림 Ⅲ-68] 배터리 제조 산업의 공정흐름도	114
[그림 Ⅲ-69] 극판 적층 방법 (좌) Z스태킹 (중) 스택킹 (우) 와인딩	116
[그림 Ⅲ-70] 배터리 제조 산업의 금속 노출 농도 누적분포	120
[그림 Ⅲ-71] 배터리 제조 산업의 흑연 노출 농도 누적분포	121
[그림 Ⅲ-72] 배터리 제조 산업의 카보네이트 노출 농도 누적분포	123
[그림 Ⅲ-73] E사 양극 원료투입 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)	126
[그림 Ⅲ-74] E사 양극 원료투입 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)	127
[그림 Ⅲ-75] E사 음극 원료투입 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)	127
[그림 Ⅲ-76] E사 음극 원료투입 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)	128
[그림 Ⅲ-77] F사 양극 원료투입 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)	129
[그림 Ⅲ-78] F사 양극 원료투입 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)	129
[그림 Ⅲ-79] F사 양극 재단 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)	130
[그림 Ⅲ-80] F사 양극 재단 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)	130

[그림 Ⅲ-81] F사 음극 원료투입 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)	131
[그림 Ⅲ-82] F사 음극 원료투입 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)	131
[그림 Ⅲ-83] 배터리 재생 산업의 공정흐름도	133
[그림 Ⅲ-84] 재생 산업의 카보네이트 노출 농도 누적분포	137
[그림 Ⅲ-85] 재생 산업의 리튬 노출 농도 누적분포	139
[그림 Ⅲ-86] 재생 산업의 니켈 노출 농도 누적분포	141
[그림 Ⅲ-87] 재생 산업의 코발트 노출 농도 누적분포	143
[그림 Ⅲ-88] 재생 산업의 망간 노출 농도 누적분포	145
[그림 Ⅲ-89] 재생 산업의 알루미늄 노출 농도 누적분포	146
[그림 Ⅲ-90] G사 파·분쇄 투입 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)	150
[그림 Ⅲ-91] G사 파·분쇄 투입 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)	150
[그림 Ⅲ-92] G사 블랙파우더 포장 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)	151
[그림 Ⅲ-93] G사 블랙파우더 포장 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)	151
[그림 Ⅲ-94] G사 침출 투입 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)	152
[그림 Ⅲ-95] G사 침출 투입 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)	152
[그림 Ⅲ-96] H사 원료투입 공정의 입경 크기에 따른 농도 분포(%)	153
[그림 Ⅲ-97] H사 원료투입 공정의 입경 크기에 따른 입자 수 분포(%)	154
[그림 Ⅲ-98] H사 포장 전 분급기의 입경 크기에 따른 농도 분포(%)	154
[그림 Ⅲ-99] H사 포장 전 분급기의 입경 크기에 따른 입자 수 분포(%)	155
[그림 Ⅲ-100] 원료투입 공정의 입경 크기에 따른 농도 분포(%)	156
[그림 Ⅲ-101] 원료투입 공정의 입경 크기에 따른 입자 수 분포(%)	156



그림목차

[그림 Ⅲ-102] 황산니켈염 포장공정의 입경 크기에 따른 농도 분포(%) 157

[그림 Ⅲ-103] 황산니켈염 포장공정의 입경 크기에 따른 입자 수 분포(%) ... 157

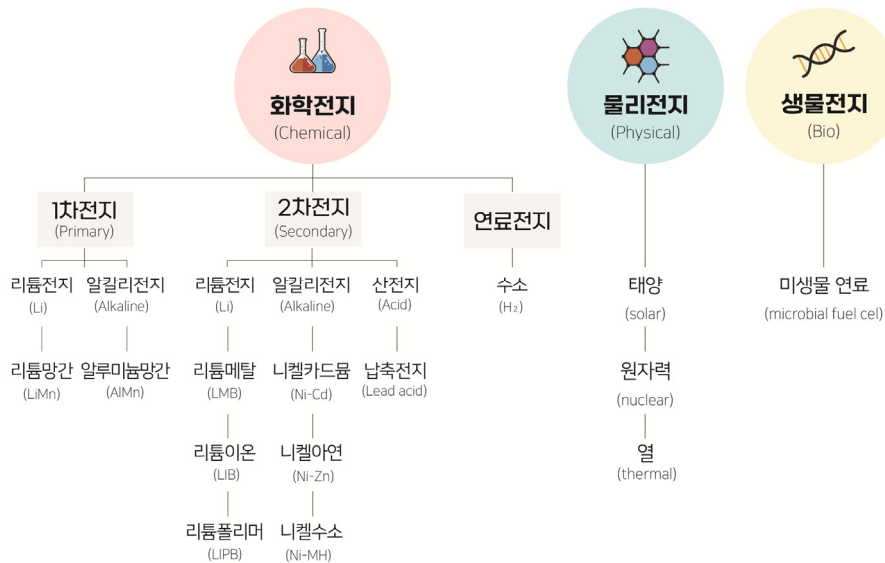
I. 서론



I. 서론

1. 연구배경

전지(battery)는 물리적 전지, 생물학적 전지, 화학적 전지로 분류할 수 있다. 물리적 전지는 태양열 혹은 원자력 등의 열에너지를 이용하여 전기에너지를 생산하며, 생물학적 전지는 미생물이나 효소를 바이오 촉매로 사용하여 전기에너지를 생산한다. 화학적 전지는 물질의 산화환원 반응을 이용하여 전기에너지를 생산하는 방식으로 연료전지(fuel cell), 일차전지(primary battery) 그리고 이차전지(secondary battery)로 구분하고 있다(그림 I-1). 연료전지의 대표적인 예로는 수소연료 전지를 들 수 있으며 일차전지는 흔히 사용하는 건전지와 같은 일회용 전지이다. 이차전지는 반복적인 충·방전을 통해 반영구적으로 사용이 가능한 전지로 충전식 전지로도 불린다.



[그림 I-1] 전지(battery)의 분류

전 세계적으로 노트북, 스마트폰 등 IT 기기에 사용되는 소형 이차전지 시장의 성장과 더불어 국제적인 탄소배출 규제로 인해 전기자동차 및 에너지 저장장치(ESS)와 같은 중대형 이차전지 시장이 급성장하고 있다. 또한 유럽연합(EU)에서는 2031년부터 배터리에 재활용 원료를 일정 비율 이상 사용하도록 의무화하여 배터리 재활용 산업의 중요성이 커질 것이다.

정부에서는 이차전지 산업을 국가 핵심 전략 산업으로 지정하였고 산업통상자원부에 따르면 기술 초격차를 위해 2030년까지 민·관에서 연구개발에 20조 원을 투자한다고 발표하였다(산업통상자원부, 2022, 산업통상자원부, 2023). 하지만 산업의 성장 속도와 달리 노동자의 건강 보호와 같은 산업보건학 측면에서 이차전지 산업의 연구는 매우 미흡한 실정이다.

미국산업안전보건청(Occupational Safety and Health Administration, OSHA)에서는 2019년 리튬 배터리(lithium battery)의 화재·폭발 위험성 및 안전조치 사항(OSHA, 2019)을 배포하였고, 중국에서도 2019년 리튬이온 배터리(lithium-ion battery)에 대한 산업표준을 발표하였다(Pu G, 2021). 하지만 대부분이 생산 공정의 안정성 및 사고 예방 방안 등에 대한 내용이며 보건학적 측면의 자료는 거의 없다. 1995년 미국의 NREL(National Renewable Energy Laboratory)에서 이차전지의 화학물질 및 건강상의 위험성에 대해 언급하였으나 해당 자료는 약 30년 전 자료로 현재 사업장의 실정을 반영하지 못할 수 있다(Vimmerstedt LJ, 1995).

하지만 최근 국내·외에서 발표된 일부 논문에서 이차전지 산업의 환경·사회적 위험을 파악하여 선제적 대응을 할 필요성이 있으며, 배터리 제조에 사용하는 화학물질과 배터리 재활용을 위한 셀 해체 시 발생하는 가스 혼합물에 대한 관리의 중요성을 언급한 바 있다(임소영, 2022, Sobianowska- Turek, 2021).

2023년에 핀란드 산업보건연구원(Finnish Institute of Occupational Health)에서 발표한 리튬이온배터리 산업의 위험성 관리에 관한 보고서에

따르면 리튬이온배터리 산업은 다양한 산업으로 구성되어 있으며 각 산업에서는 다양한 화학물질이 사용되고 있음을 언급하고 있다(Perttula P, 2023).

국내 이차전지 관련 산업은 정부와 민간의 투자 등으로 매우 빠르게 발전하고 있으나 현재까지 이차전지 산업의 연구는 연구개발 혹은 화재·폭발과 같은 사고 위험성에 대한 연구가 주로 이루어져 왔다. 이차전지 산업과 같이 고도의 기술력이 요구되는 산업은 제품 기술력 등의 기업비밀로 인해 작업환경 및 취급하는 화학물질을 파악하기 어려우며, 공정이 급속도로 변화하기 때문에 직업병이 발생한 후 과거 작업환경을 확인하기 어렵다.

따라서 이차전지 산업의 안전한 작업환경을 조성하고 직업성 질환을 예방하기 위해 산업의 순환구조와 공정, 취급 화학물질 등의 정보를 확보하고 작업환경 중 노동자의 유해인자 노출 실태를 파악하는 연구가 필요하다.

2. 연구목표

본 연구는 이차전지 산업의 벨류체인(value chine), 산업별 공정 및 취급 화학물질을 파악하여 노동자의 유해인자 노출 실태를 평가하고 작업환경 관리방안을 제시하여 직업성 질환 예방을 위한 기초 자료로 활용하고자 한다.

II. 연구방법



II. 연구방법

1. 연구범위

본 연구는 국내 이차전지 산업의 현황을 파악하고 취급 화학물질에 대한 평가 및 관리방안을 제시하기 위해 2022년부터 2024년까지 3년간 진행한 연구이다.

1차년도 연구에서는 문헌 고찰 및 국내 32개의 사업장 현장 조사를 통해 이차전지 산업을 산업보건학 측면에 따라 10개 산업군으로 분류하고 각 산업의 공정 및 취급 화학물질을 파악하였다.

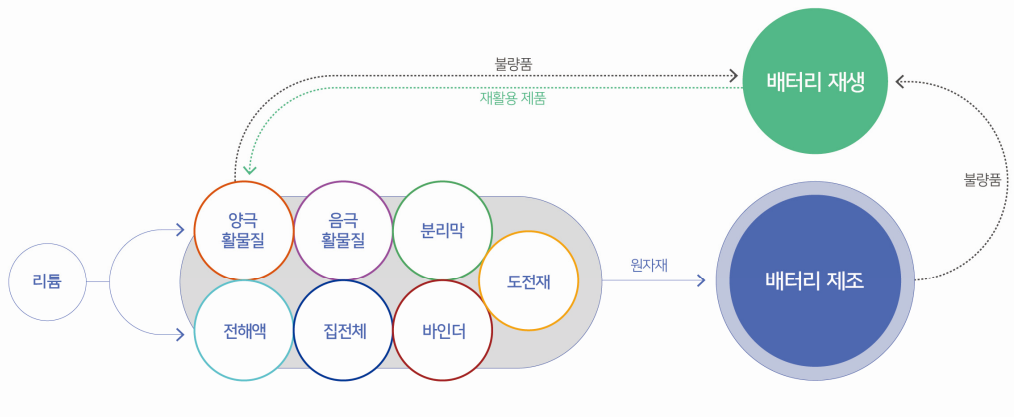
2~3차년도 연구에서는 1차년도 연구를 바탕으로 10개 산업군에 종사하는 노동자의 유해인자 노출 수준과 주요 원료인 금속 및 흑연 분말 등 입자상 물질을 대상으로 입자 크기 분포를 확인하여 노동자의 노출 특성을 평가하였고, 일부 사업장에 대하여 노출 결과 및 작업환경 관리방안 등에 대한 개별 설명회를 개최하였다.

2. 국내 이차전지 산업분류

이차전지 산업은 일반적으로 4개의 핵심 소재산업(양극재, 음극재, 분리막, 전해질)과 배터리 제조 산업으로 분류한다. 양극재는 배터리의 용량과 출력을 결정하며 배터리 생산원가의 약 40 %를 차지하는 핵심 소재로 양극 활물질, 도전재, 바인더를 혼합하여 양극 집전체에 코팅하여 생산하며, 음극재는 양극에서 충전 시 방출되는 리튬이온을 저장했다가 다시 방출하며 전기에너지를 발생시키는 역할을 하며 음극 활물질, 도전재, 바인더를 혼합하여 음극 집전체에 코팅하여 생산한다(김근중 2019, 나성민 2020, 정영민 2010). 분리막은

배터리 내부에서 양극과 음극을 분리하고 리튬이온만 이동할 수 있는 통로의 역할을 하며 주로 폴리올레핀계의 다공성막을 사용한다(이윤주 2013, 정영민 2010). 전해질은 리튬이온의 이동 통로로 현재 이차전지 산업에서는 전해질 염을 비수계 유기용매에 혼합하여 제조한 전해액을 주로 사용한다(조원일 2003, 정영민 2010). 배터리 제조는 양극재와 음극재 사이에 분리막을 넣어 케이스에 삽입 후 전해액을 주입하여 제조하며 배터리 재생은 배터리에 사용된 유가 금속을 회수하는 산업이다(Liu Y 2021).

국내 산업 현황 및 산업보건학적 측면을 고려하여 이차전지 산업을 리튬(lithium), 양극 활물질(cathode active material), 음극 활물질(anode active material), 전해액(electrolyte), 분리막(separator), 집전체(current collector), 바인더(binder), 도전재(conductor), 배터리 제조(battery manufacturing) 그리고 배터리 재생(battery recycling)으로 세분화하여 총 10개 산업으로 분류하였다(그림 II-1).



[그림 II-1] 이차전지 산업 구분

3. 평가 대상

1차 년도 연구에서 32개 사업장을 방문하여 공정과 취급 화학물질을 조사하였고, 이를 바탕으로 2~3차 년도 연구에서는 일부 사업장을 대상으로 사업장 작업환경 노출평가를 진행하였다. 평가는 각 사업장에서 2~3일간 반복하여 진행하였다. 대상 물질은 각 사업장에서 사용하는 원료물질이며, 추가로 일상 작업에서 노동자에게 노출 가능성이 있는 유기용제(디클로로메탄, 카보네이트 용매, 메틸피롤리돈(NMP) 등)에 대해서도 평가하였다(표 II-1).

〈표 II-1〉 이차전지 산업별 평가 대상 사업장 및 대상 물질

산업분류	사업장 수		노출평가 대상 물질
	방문조사 (2022)	노출평가 (2023~24)	
리튬*	2	2	• 금속(총 분진)
양극 활물질*	8	6	• 금속(총 분진, 호흡성 분진)
음극 활물질*	2	1	• 흑연(총 분진, 호흡성 분진)
전해액	6	2	• 카보네이트 용매
분리막*	3	2	• 금속(총 분진) • 디클로로메탄
집전체†	2	-	-
바인더	1	1	• 1,3-부타디엔, 스티렌 등
도전재	2	2	• 카본나노튜브(CNT) • 메틸피롤리돈(NMP)
배터리 제조*	2	2	• 금속(총 분진, 호흡성 분진) • 카보네이트 용매
배터리 재생*	4	4	• 금속(총 분진, 호흡성 분진) • 카보네이트 용매
합계	32	22	-

* 입자상물질(금속 및 흑연 등)의 입자상물질 특성 평가

† 제조공법에 따른 입자상물질 발생 특성과 제조사 상황을 고려하여 평가대상에서 제외

4. 측정·분석방법(Methods)

1) 입자상물질(Particulates)

(1) 음극 활물질

음극 활물질의 원료는 흑연과 석유계 피치이며, 노출평가는 중량법을 사용하였다.

공기 중 흑연 및 음극 활물질은 NIOSH(The National Institute for Occupational Safety and Health) 500(총 분진) 및 OSHA PV2121의 측정·분석법에 따라 시료를 채취하였다(NIOSH, 1994 & OSHA, 2003). 채취 매체는 37 mm PVC 여과지(pore size: 5.0 μm , SKC Inc., USA)를 사용하였으며, 여과지를 3단 카세트에 패드와 함께 장착한 후 고유량 공기채취용 펌프(High volume air sampler)를 이용하여 시료를 채취하였으며, 펌프의 유량은 2.0 ± 0.1 LPM으로 하였다. 공기채취용 펌프는 유량계(Dry cal, Defender 520-M, MesaLabs, USA)를 이용하여 시료채취 전·후의 유량을 측정하였다.

공기 중 호흡성 흑연 및 음극 활물질의 채취는 NIOSH Method 600 방법에 따라 3단 카세트에 패드와 37 mm PVC 여과지를 넣고 알루미늄 사이클론(Aluminum cyclone, SKC Inc., USA)을 장착하여 2.5 LPM의 유량으로 채취하였으며, 유량계로 시료채취 전·후의 유량을 측정하였다(NIOSH, 1998).

흑연 및 음극 활물질은 NIOSH Method 500 및 600에 따라 전자저울(XP2U, Mettler toledo, Switzerland)을 사용하여 시료채취 전·후 여과지의 무게를 $1\mu\text{g}$ 단위까지 분석하였다.

(2) 금속

이차전지 산업에서 주로 사용되는 금속은 리튬, 니켈, 코발트, 망간 및 알루미늄 등이 있으며, 리튬, 양극 활물질, 배터리 제조 및 재생 산업이 주요 평가 대상 사업장이다. 그 외에도 분리막 산업에서도 노동자가 금속에 노출될 가능성이 있다고 판단되어 추가로 평가를 진행하였다.

공기 중 금속은 측정은 NIOSH Method 7303에 따라 37 mm MCE 여과지 (pore size: 0.8 μ m, SKC Inc., USA)를 3단 카세트에 패드와 함께 장착한 후 고유량 공기채취용 펌프를 이용하여 시료를 채취하였으며, 펌프의 유량은 2.0 ± 0.1 LPM으로 하였다(NIOSH, 2003). 공기채취용 펌프는 유량계를 이용하여 시료채취 전·후의 유량을 측정하였다.

공기 중 호흡성 금속 채취는 NIOSH Method 600을 참조하였다(NIOSH, 1998). 해당 분석방법에서는 분진의 무게를 전자저울로 측정하기 위해 PVC 여과지를 사용하고 있으나, 본 연구에서는 전처리용 산(질산)으로 유기물 분해가 용이한 MCE 여과지를 사용하였다. 시료를 채취하기 위해 37 mm MCE 여과지를 3단 카세트에 패드와 함께 넣고 알루미늄 사이클론을 장착하였다. 공기채취용 펌프의 유량은 2.5 LPM으로 하였으며, 유량계를 이용하여 시료 채취 전·후의 유량을 측정하였다.

공기 중 금속 시료의 분석은 NIOSH Method 7303을 참고하여 마이크로 웨이브파 회화기로 전처리한 후, 유도결합플라즈마-분광분석기(Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy, ICP-OES, Thermo scientific, England)로 분석하였다(NIOSH, 2003). 검출한계 미만 값은 검출한계의 1/2 값을 사용하였고, 물질별 검출한계는 표 II-2와 같다.

〈표 II-2〉 분석 물질 별 검출한계(μ g/sample)

물질명	리튬	니켈	코발트	망간	알루미늄
검출한계(LOD)	0.01	0.02	0.02	0.01	0.08

(3) 카본나노튜브(Carbon Nano Tube, CNT)

이차전지 산업에서 도전재로 사용되는 카본나노튜브(Carbon Nano Tube, CNT)는 NIOSH Method 5040 및 KOSHA GUIDE A-162-2016의 측정·분석법에 따라 시료를 채취하였다(NIOSH, 2016 & 한국산업안전보건공단, 2016).

채취 매체는 37 mm 석영 여과지(quartz, Inc., USA)가 장착된 3단 카세트와 고유량 공기채취용 펌프(high volume air sampler)를 이용하였고 펌프의 유량은 2.0 ± 0.1 LPM로 시료를 채취하였다. 공기채취용 펌프는 유량계(Dry cal, Defender 520-M, MesaLabs, USA)를 이용하여 시료채취 전·후의 유량을 측정하였다. 공기 중 시료의 분석은 원소탄소분석기(OCEC Analyzer Model 5L, Sunset Lab. Inc., USA)로 유기탄소(organic carbon, OC), 원소탄소(elemental carbon, EC), 총 탄소(total carbon, TC)를 분리하여 분석하여 CNT를 평가하였다. 검출한계는 공시료 값의 표준편차에 3배로 계산하여 표 II-3에 제시하였고, 검출한계 미만 값은 검출한계의 1/2 값을 사용하였다.

〈표 II-3〉 분석 물질 별 검출한계($\mu\text{g}/\text{sample}$)

물질명	유기탄소(OC)	원소탄소(EC)	총 탄소(TC)
검출한계(LOD)	5.99	0.001	5.99

(4) 입자상 물질의 특성 평가

이차전지 산업에서 사용하는 입자상 물질의 특성을 평가하기 위해 질량 농도 및 입자 수 농도에 따른 입경분포와 공기역학적 질량중위직경(Mass Median Aerodynamic Diameter, MMAD)¹⁾ 및 질량평균직경(Mass Mean Diameter, MMD)²⁾을 평가하였다(Hinds, 1999).

1) MMAD는 질량을 기준으로 공기역학적 크기 분포에서 입자의 50%가 해당 직경 위·아래에 있다는 것을 의미함

2) 입자의 질량 분포를 기준으로 산출된 전체 입자 질량의 평균값 직경

입자상 물질의 특성 평가에는 8단(stage)의 시료채취단과 1단의 백 필터(back filter)로 구성된 직경분립충돌기(marple personal cascade impactor, model 298, Anderson Sampler Inc., USA)를 사용하였다.

흑연 및 음극 활물질 분진의 측정을 위해 8단 직경분립충돌기의 1에서 8단에는 34 mm 스테인리스 스틸 여과지(6 slots, TISCH, USA)를 장착하고 마지막 9단은 백 필터(back filter)로 34 mm PVC 여과지(pore size: 5 μm , SKC Inc., USA)를 장착하여 2 LPM의 유량으로 측정하였으며, 시료는 전자저울을 사용하여 시료채취 전·후 무게를 1 μg 단위까지 분석하였다.

금속 분진의 측정을 위해 8단 직경분립충돌기의 1에서 8단에는 34 mm MCE 여과지(6 slots, TISCH, USA)를 장착하고 마지막 9단에는 백필터(back filter)로 34 mm MCE 여과지(pore size: 0.8 μm , Millpore, USA)를 장착하였다. 시료채취 유량은 2.0 LPM으로 하였으며, 금속 시료의 분석은 유도결합플라즈마-분광분석기(ICP-OES)를 사용하였다.

직경분립충돌기의 각 단에서 채취되는 입자의 유효한계직경은(effective cut-point diameter, ECD)은 표 II-4와 같다. 채취된 입자의 특성을 평가하기 위하여 각 단에 채취된 시료 농도는 표 II-4의 보정계수(stage effect)로 보정하여 누적확률 50% 지점의 유효한계직경을 MMAD로 하였고, MMAD는 식 1을 사용하여 입자 직경(d_i)값에 시료채취기의 하한값인 유효 한계 직경을 대입하여 산출하였다(Hinds, 1999).

$$\text{Mass mean diameter} = \frac{\sum m_i d_i}{M} \dots\dots\dots \text{식 1}$$

- m_i = 각 단의 입자 무게, μg
- d_i = 각 단의 유효 한계 직경, μm
- M = 총 입자 무게, μg

〈표 II-4〉 직경분립충돌기의 유효한계직경(유속 2 LPM)

직경분립충돌기 (Impactor stage no.)	유효한계직경 (Cut-point diameter, μm)	보정계수 (Stage effect)
1	>21.3	0.52
2	14.8	0.61
3	9.8	0.78
4	6.0	0.89
5	3.5	0.95
6	1.55	0.96
7	0.93	0.97
8	0.52	0.99
백 필터	0	1.00

직경분립충돌기의 각 단계에 포집된 입자상 물질의 입자 수(particles)를 평가하기 위하여 ICP로 분석한 금속의 농도(μg)와 유효한계직경을 아래의 식 2로 계산하여 각 단계의 분포 비율(%)을 평가하였다(Hinds, 1999).

$$Number\ of\ particles = \frac{mass}{\frac{4}{3}\pi r^3} \dots\dots\dots \text{식 2}$$

mass = 입자 무게, μg
 $r^3 = (d/2)^3$
 d = 유효한계직경, μm

2) 가스상 물질(Vapors)

가스상 물질은 전해액, 분리막, 바인더, 도전재, 배터리 제조 및 재생 산업에서 사용하거나 노출되고 있다.

전해액 산업 및 배터리 제조와 재생 산업에서 노출 가능성이 있는 카보네이트 용매는 측정·분석 방법이 제정되어 있지 않아 연구진에서 개발한 측정·분석

방법을 참고하였다(장미연, 2023). 시료 채취 매체는 산업안전보건연구원에서 개발한 수동식시료채취기를 사용하였으며, 저유량 시료채취기를 사용하여 0.5 LPM으로 시료를 채취하였고 불꽃이온화 검출기가 장착된 가스크로마토그래피(Gas chromatography/Flam Ionization Detector, GC/FID, Agilent 7890N, USA)로 분석하였다.

분리막 산업에서 노출 가능성이 있는 디클로로메탄은 국내 보급형 수동식 시료채취기 개발 연구(Ⅲ)(산업안전보건연구원, 2021)를 참고하여 산업안전보건연구원에서 개발한 수동식시료채취기로 평가하였고 NIOSH Method 1005와 OSHA Method 80, OVSG-1 등을 참조하여 GC/FID로 분석하였다(NIOSH, 1998, OSHA 1990, OSHA 2021).

바인더 산업에서 노출 가능성이 있는 가스상 물질(1,3-부타디엔, 스티렌 등)은 NIOSH Method 1501 및 OSHA Method 56 등에 따라 측정된 후 GC/FID로 분석하였다(NIOSH, 2003, OSHA 1985).

도전재 산업에서 사용되는 메틸피롤리돈(N-Methyl-2-pyrrolidone, NMP)는 NIOSH Method 1302에 따라 활성탄관을 사용해 측정된 후 GC/FID로 분석하였다(NIOSH, 1998).

검출한계 미만 값은 검출한계의 1/2 값을 사용하여 계산하였고, 각 분석 물질별 검출한계 값은 표 II-5와 같다.

〈표 II-5〉 분석 물질 별 검출한계($\mu\text{g}/\text{sample}$)

물질명	검출한계(LOD)
디메틸카보네이트(DMC)	1.0
디에틸카보네이트(DEC)	1.1
에틸메틸카보네이트(EMC)	1.1
디클로로메탄(DCM)	2.2
1,3-부타디엔	0.7
스티렌	1.2
아크릴로니트릴	1.1
메틸피롤리돈(NMP)	0.3

Ⅲ. 연구결과



Ⅲ. 연구결과

1. 양극 활물질 산업

양극 활물질 산업은 전구체³⁾(precursor) 원료, 전구체 및 활물질 제조업으로 분류할 수 있으며 제조된 양극 활물질은 배터리 제조업체로 공급되어 양극재의 원료로 사용되고 배터리 제조업체에서 발생하는 폐배터리의 재생을 통해 다시 원료를 공급받는 순환구조를 이루고 있다. 양극 활물질은 전지의 양극에서 전극반응에 관여하는 물질로 리튬 산화물과 전구체의 혼합물로 구성된다. 국내 양극 활물질 산업은 제련, 배터리 재생업 및 화학 산업에서 원료를 공급받아 전구체 원재료인 황산니켈, 황산코발트, 황산망간 등과 같은 황산금속염을 제조하고 이를 혼합하여 NCM(Nickel cobalt manganese), NCMA(Nickel cobalt manganese aluminium) 그리고 NCA(Nickel cobalt aluminium) 등의 전구체를 제조한다.

1) 공정 및 취급 화학물질

(1) 전구체 원료 제조업

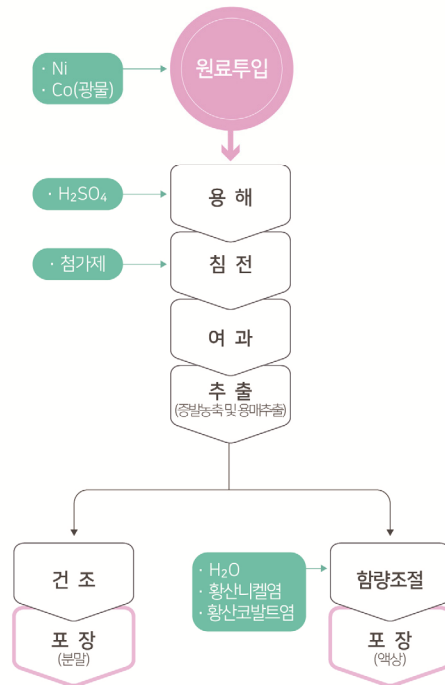
전구체 원료인 황산금속염은 원료 금속을 황산에 용해시킨 후 염(salt) 형태로 결정화하여 제조한다. 원료 금속은 해외 수입으로 공급되며 전구체 원료인 황산금속염은 분말 혹은 액상으로 제조되며 취급 화학물질과 공정흐름도는 표 Ⅲ-1 및 그림 Ⅲ-1과 같다.

3) 전구체란 최종물질이 만들어지기 이전 단계의 물질을 의미한다.

〈표 III-1〉 전구체 원료 제조업의 취급 화학물질

산업분류	양극 활물질
제조 물품	전구체 원료(황산금속염)
취급 화학물질	• 니켈
	• 코발트
	• 망간
	• 황산
	• 염산
	• 수산화나트륨
	• 탄산나트륨
	• 탄산칼슘
	• 수소처리된 경질 정제유(석유)
• 첨가제(영업비밀)	

※ 부록 〈표 A-1〉 이차전지 산업 취급 화학물질 및 노출기준 참조



[그림 III-1] 전구체 원료 제조업의 공정흐름도

- 원료투입 (raw material input)
 - 원료 금속은 해외에서 수입 혹은 국내에서 제련된 금속을 사용한다.
- 용해 (dissolution)
 - 황산 용액에 원료 금속을 투입하여 용해한다.
- 침전 (precipitation)
 - 첨가제를 주입하여 불순물을 침전시킨다.
- 여과 (filtration)
 - 필터프레스를 사용하여 액상은 다음 공정으로 이송시키고 남은 침전물은 재생하거나 폐기한다.
- 추출 (extraction)
 - 니켈은 증발·농축하여 결정체를 제조하고 코발트는 용매추출방법으로 추출시켜 농축하여 결정체를 제조한다.
- 건조 (drying)
 - 제조된 결정체를 탈수·건조하여 분말(금속 염) 형태로 제조한다.
 - ※ 액상 제조는 해당 공정을 거치지 않음
- 함량조절 (adjust of proportion)
 - 액상 제품은 물 혹은 황산금속염을 추가하여 함량을 조정한다.
 - ※ 분말 제조는 해당 공정을 거치지 않음
- 포장 (packaging)
 - 분말 제품은 알루미늄 이중포장용기에 포장하며, 액상 제품은 탱크로리로 납품한다.

(2) 양극 활물질 제조업

양극 활물질 제조업은 전구체 제조와 양극 활물질 제조로 분류할 수 있다. 전구체는 원료인 황산금속염을 물에 용해시킨 후 수산화나트륨과 수산화암모늄을 이용하여 복합전이금속산화물로 침전시켜 제조하며 입자 크기에 따라 소 입경($<5 \mu\text{m}$)과 대 입경($10\sim 20 \mu\text{m}$)으로 분류하여 두 종류를 혼합하여 사용한다. 양극 활물질은 리튬과 전구체를 혼합하여 제조하며 현재 국내에서는 NCM, NCMA, NCA가 주로 생산되며, 리튬은 분말 형태의 수산화리튬과 탄산리튬을 혼합하여 사용한다. 전구체 제조와 양극 활물질 제조의 취급 화학물질과 공정 흐름도는 표 III-2 및 표 III-3, 그림 III-2와 같다.

■ 전구체 제조

○ 원료투입 (raw material input)

- 전구체 원료물질은 액상 혹은 분말 형태로 입고된다.
- 액상 원료는 파이프라인으로 자동 투입되며, 분말 원료는 벌크백(bulk bag)으로 입고되어 투입된다.

○ 용해 (dissolution)

- 투입된 원료(황산금속염)과 물을 교반하며 용해시킨다.

○ 침전 (precipitation)

- 금속이 용해되어 있는 용액에 수산화나트륨과 암모니아수를 투입하며 교반시켜 금속을 침전시킨다.

○ 탈수 (dehydration)

- 슬러리 형태의 침전물을 필터프레스로 압착하여 수분을 제거하고 케이크 형태로 제조한다.

- 건조 (drying)
 - 케이크 형태의 전구체를 건조하여 분말 형태로 제조한다.
- 분급/탈철 (sieving/magnetic separator)
 - 건조된 전구체 분말을 체(mash)로 분급하고 자석을 사용하여 탈철 작업을 한다.
 - 분급이나 탈철에서 나오는 규격 이상의 큰 입자 혹은 이물질은 별도로 용기에 분류하여 폐기한다.
- 포장 (packaging)
 - 전구체 분말은 공기와 차단할 수 있도록 설계된 이중 포장 벌크백(bulk bag)에 포장한다.

〈표 III-2〉 전구체 제조업의 취급 화학물질

산업분류	양극 활물질	
제조물품	전구체(수산화 코발트 망간 니켈)	
취급 화학물질	소재	부재
	• 황산니켈	• 수산화나트륨
	• 황산코발트	• 수산화암모늄
	• 황산망간	

※ 부록 〈표 A-1〉 이차전지 산업 취급 화학물질 및 노출기준 참조

■ 양극 활물질 제조

○ 원료투입 (raw material input)

- 전구체와 리튬 그리고 미량의 도펀트⁴⁾(dopant)를 함께 투입한다.
- 배터리의 구조적 안정성 및 성능향상을 위해 제품에 따라 다양한 도펀트제(영업비밀)가 사용된다. 문헌상에 제시된 하이니켈 제조에 사용되는 도펀트는 알루미늄(Al), 지르코늄(Zr), 마그네슘(Mg), 티타늄(Ti), 붕소(B) 등이 있다 (나성민, 2020).

○ 혼합 (mixing)

- 투입된 재료를 기계적 방법으로 혼합하여 저장탱크에 저장한다.

○ 소성 (sintering)

- 리튬과 전구체를 산화시켜 물리적으로 결합 되도록 하는 공정으로 저장탱크에서 자동으로 소성 도가니에 원료가 투입되며 컨베이어로 소성로에 이송된다.
- 원료물질에 혼합된 도펀트는 소성과정에서 산화되며 단단히 결합하여 양극 활물질 성능을 높이는 역할을 한다.
- 냉각이 완료된 혼합물의 소성되며 뭉친 부분을 풀어주기 위해 분쇄한다.

○ 수세 (washing)

- 제품의 특성에 따라 추가되는 공정으로 전구체와 반응하지 못하고 남아있는 잔류 리튬을 세척한다.

○ 건조 (drying)

- 세척된 활물질을 필터프레스를 사용해 1차로 수분을 제거하고 건조기에서 남아있는 수분을 제거하고 냉각한다.

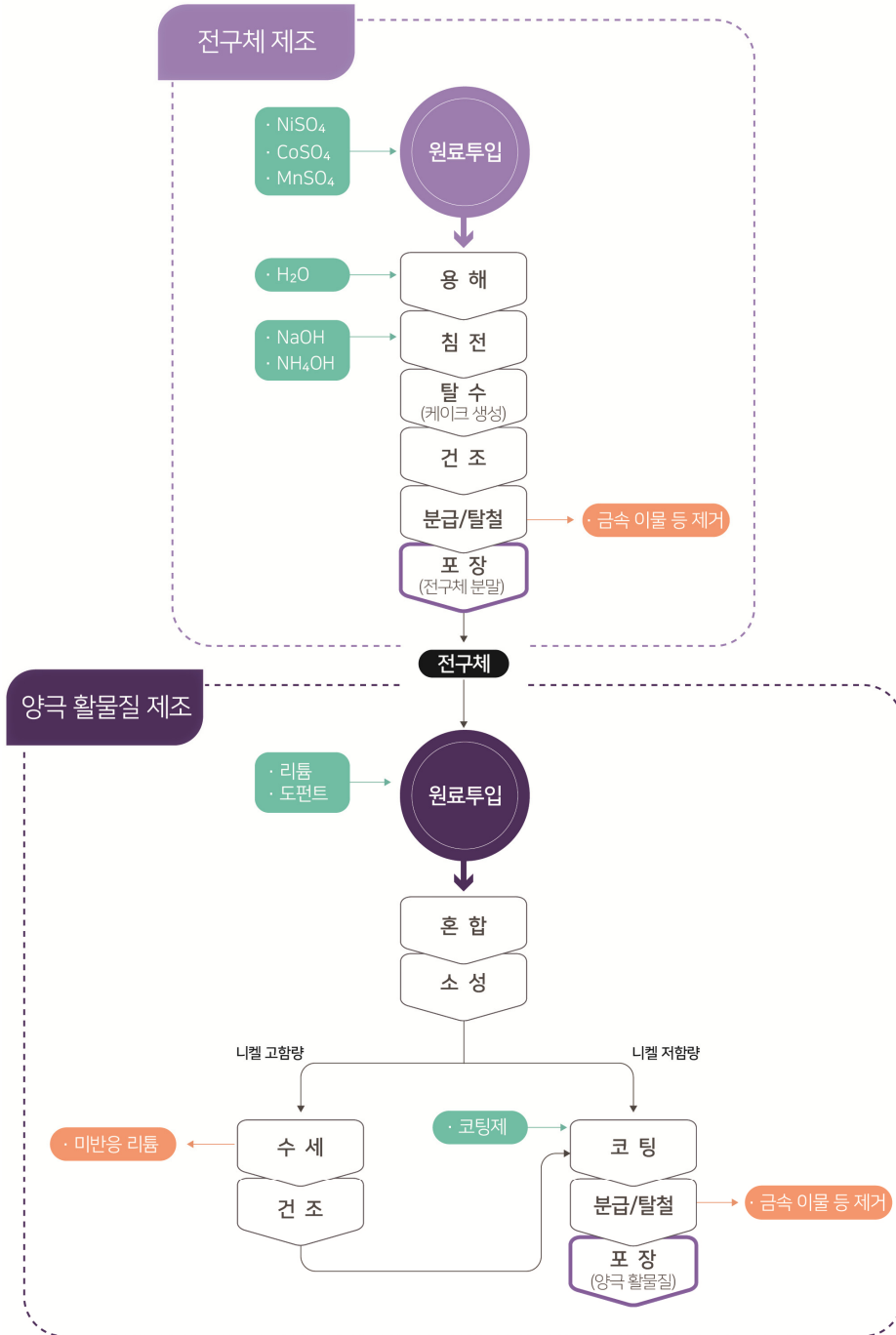
4) 원재료와 함께 첨가재로 사용하여 원재료가 가지는 전기적 또는 광학적 특성에 영향을 주는 미량의 불순물 원소

- 코팅 (coating)
 - 제품의 표면처리를 위해 코팅제(영업비밀)를 투입하여 교반시키며 혼합한 후 열을 가하여 재료를 서로 고착시킨다.
 - 문헌상 하이니켈 NCM에 사용되는 코팅 재료는 금속산화물은(Al_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 , B_2O_3 , MoO_3), 인산염(phosphates), 불소화합물(fluoride), 붕산(boric acid) 및 전도성 폴리머이다(나성민 외, 2020).
- 분급/탈철 (sieving/magnetic separator)
 - 건조된 양극 활물질을 체로 분급하고 자석을 사용하여 탈철 작업을 한다.
 - 분급이나 탈철에서 나오는 큰입자 혹은 이물질은 별도로 통으로 떨어진다.
- 포장 (packaging)
 - 양극 활물질을 이중 포장 벌크백(bulk bag)에 포장한다.

〈표 III-3〉 양극 활물질 제조업의 취급 화학물질

산업분류	양극 활물질
제조물품	양극 활물질
취급 화학물질	<ul style="list-style-type: none"> • 전구체(수산화 코발트 망간 니켈) • 탄산리튬 • 수산화리튬 • 수산화니켈 • 수산화코발트 • 수산화망간 • 수산화알루미늄 • 도펀트(영업비밀) • 코팅제(영업비밀)

※ 부록 〈표 A-1〉 이차전지 산업 취급 화학물질 및 노출기준 참조



[그림 III-2] 양극 활물질 제조업의 공정흐름도

2) 작업환경 노출평가

양극 활물질 산업은 이차전지 소재 중 가장 큰 산업으로 전구체 원료 제조, 전구체 제조 그리고 활물질 제조로 분류할 수 있으며 국내에서는 활물질 제조 사업장에서 전구체를 함께 제조하고 있다. 현재 국내에서는 니켈, 코발트, 망간을 혼합한 NCM(Nickel Cobalt Manganese)의 생산량이 가장 많으며 최근 들어 알루미늄을 혼합한 NCMA(Nickel Cobalt Manganese Aluminium), NCA(Nickel Cobalt Aluminium)의 생산량도 증가하는 추세이다. 본 연구에서는 전구체 원료 제조업 2개 사업장과 전구체와 활물질을 제조하는 사업장 4곳을 방문하여 금속 분진을 대상으로 작업환경을 평가하였다.

(1) 전구체 원료 제조업

가) 개인노출평가

전구체 원료 제조업의 개인 노출평가는 생산 제품에 따라 구분하여 평가하였다. 황산니켈염 제조업에서는 모든 노동자를 대상으로 니켈(총 분진/호흡성 분진)을 평가하였고 황산코발트염 제조업에서는 코발트의 경우 모든 노동자를 대상으로 진행하였으나 그 외 금속은 원료투입 공정에서만 평가하였다. 황산망간염은 수입을 통해 공급받고 있으며 국내 생산업체가 확인되지 않아 평가 대상에서 제외하였다.

현재 니켈의 고용노동부 노출기준(이하 노출기준)은 가용성화합물(soluble compounds) $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 불용성무기화합물(insoluble inorganic compounds) $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 금속(metal) $1,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 분류되어 있다. 황산니켈염의 원료는 니켈 금속 또는 니켈 분말이며, 황산니켈옥수화물의 형태로 제품이 생산되므로 원료투입 공정과 포장 공정에서의 니켈 노출기준이 다르게 적용되어야 한다.

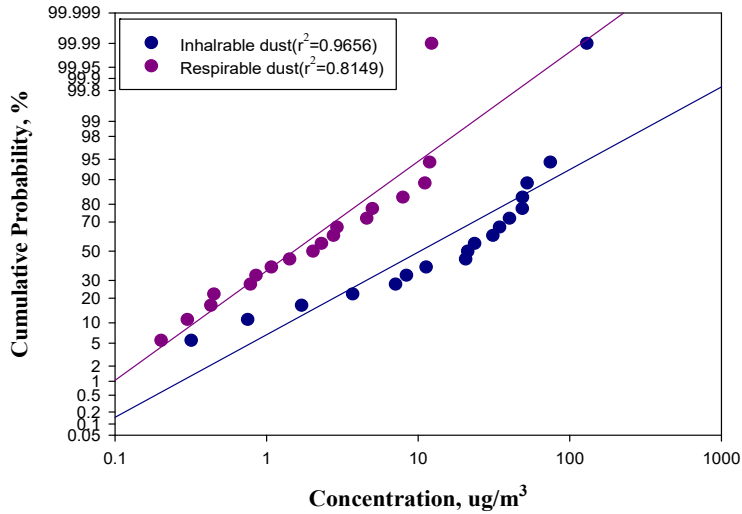
황산니켈염 제조업은 4개의 공정으로 분류하여 평가하였으며 그 결과는 표 III-4 및 그림 III-3과 같다. 니켈의 노출 수준($n=18$)은 $0.3 \sim 129.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며,

호흡성 분진 중 니켈(n=18)은 0.2~12.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다.

노동자가 니켈 금속에 노출되는 원료투입 공정의 니켈 노출 수준(n=2)은 34.4~74.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: 54.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: 50.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 노출기준(1,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)을 초과하는 시료는 없었다. 호흡성 분진의 농도(n=2)는 1.4~11.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 가용성 니켈의 노출기준(100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)을 적용해야 하는 포장 공정의 니켈의 농도(n=6)는 8.4~129.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: 40.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: 26.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이었으며 1개 시료가 노출기준을 초과하였으며, 호흡성 분진 중 니켈의 농도(n=6)는 0.4~11.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다.

〈표 III-4〉 황산니켈 제조 공정의 니켈 노출 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

구분	공정	시료 수	산술 평균	표준 편차	기하 평균	기하 표준편차	범위
총 분진	전체	18	31.0	32.5	14.2	5.1	0.3 ~ 129.4
	현장관리	3	0.9	0.7	0.7	2.3	0.3 ~ 1.7
	원료투입	2	54.4	28.2	50.6	1.7	34.4 ~ 74.3
	생산	7	28.6	18.6	20.7	2.8	3.7 ~ 48.8
	제품포장	6	40.9	46.1	26.0	2.8	8.4 ~ 129.4
호흡성 분진	전체	18	3.8	4.2	1.9	3.7	0.2 ~ 12.2
	현장관리	3	0.3	0.1	0.3	1.5	0.2 ~ 0.4
	원료투입	2	6.7	7.4	4.1	4.5	1.4 ~ 11.9
	생산	7	4.9	4.1	3.4	2.8	0.8 ~ 12.2
	제품포장	6	3.3	3.9	2.0	3.0	0.4 ~ 11.1



[그림 III-3] 황화니켈 제조 공정의 니켈 노출 농도 누적분포

황산코발트염 제조 공정 노동자의 금속(총 분진 및 호흡성 분진)의 개인노출 평가 결과는 표 III-5 및 표 III-6에 나타내었으며 원료투입 공정의 누적분포는 그림 III-4와 같다. 황산코발트 제조 공정에서 사용되는 원료에는 코발트 이외의 금속이 포함되어 니켈, 망간, 알루미늄을 함께 평가하였고 최종 제품은 대부분 액상 형태로 제조되고 있었고 평가 일에 입자상 제품의 생산이 이루어지고 있지 않아 포장 공정의 평가는 이루어지지 않았다.

황산코발트염 제조 공정의 코발트 노출 수준(n=23)은 0.1~3292.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 작업공정에 따라 노출되는 수준의 폭이 매우 넓었으며 노출기준(20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 초과 비율은 약 13%이었다. 원료투입 공정의 코발트 농도수준(n=3)은 1330.3~3292.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: 2540.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: 2360.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 호흡성 분진은 231.9~438.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: 329.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: 318.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이었으며 총 분진 중 가장 높은 노출 농도는 노출기준에 비해 160배 이상 높은 수준으로 나타났다. 원료물질에 코발트 이외에 니켈, 망간 등의 미량의 금속이 포함되어 있어 평가한 결과(n=3)는 니켈 33.4~85.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 망간 194.6~450.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 알루미늄 43.2~84.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 평가되었다.

원료투입 공정은 벌크백(bulk bag)에 담긴 원료가 저장조로 투입 되는 과정에서 별도의 국소 배기 시설이 설치되어 있지 않았으며, 또한 투입된 원료가 컨베이어벨트를 통해 이송되는 과정에서 분진이 비산되어 노출되고 있었다.

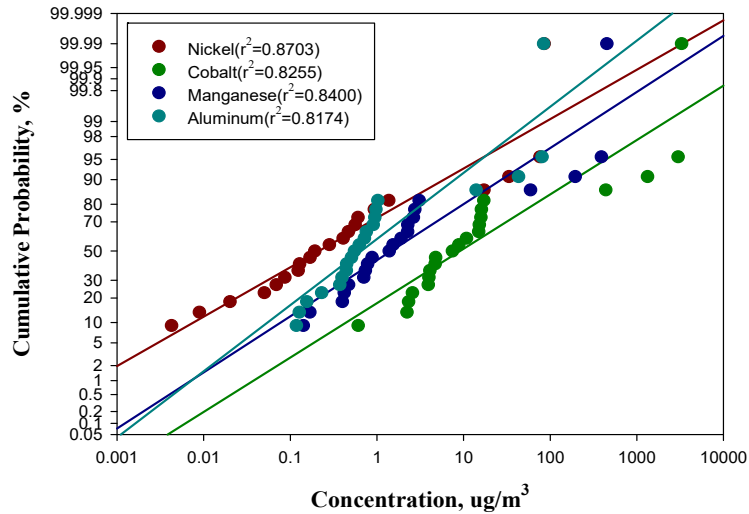
원료를 용해하여 용매추출 작업을 하는 생산공정 노동자의 코발트 농도수준 (n=15)은 0.2~17.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: 7.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: 5.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 노출기준 미만이었다. 해당 공정에서는 pH 조절을 위해 부원료를 반응조에 투입하는 과정에서 노동자가 코발트에 노출될 수 있었다.

〈표 III-5〉 황산코발트 제조 공정의 금속(총 분진) 노출 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

구분	공정	시료 수	산술 평균	표준 편차	기하 평균	기하 표준편차	범위
코발트	전체	23	338.0	930.0	7.5	16.1	0.1 ~ 3292.4
	현장관리	5	4.3	6.8	0.8	10.7	0.1 ~ 15.8
	원료투입	3	2540.0	1060.0	2360.0	1.7	1330.3 ~ 3292.4
	생산	15	7.6	5.8	5.0	3.3	0.2 ~ 17.2
니켈	원료투입	3	65.1	27.8	60.2	1.7	33.4 ~ 85.4
망간	원료투입	3	345.0	134.0	324.0	1.6	194.6 ~ 450.6
알루미늄	원료투입	3	69.4	22.7	66.5	1.5	43.2 ~ 84.3

〈표 III-6〉 황산코발트 제조 공정의 금속(호흡성 분진) 노출 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

구분	공정	시료 수	산술 평균	표준 편차	기하 평균	기하 표준편차	범위
코발트	원료투입	3	329.0	104.0	318.0	1.4	231.9 ~ 438.8
니켈	원료투입	3	11.3	5.3	10.6	1.6	7.1 ~ 17.2
망간	원료투입	3	46.4	12.3	45.3	1.3	34.7 ~ 59.2
알루미늄	원료투입	3	10.6	3.1	10.3	1.3	8.1 ~ 14



[그림 III-4] 황산코발트 공정의 총 분진 노출 농도 누적분포

나) 입자상물질 특성 평가

전구체 원료 제조업에서는 입자상물질에 노출될 가능성이 높은 공정을 대상으로 MMAD와 입경 크기에 따른 질량 및 입자 수 분포를 평가하였다. 황산니켈염 제조업에서는 제품포장 공정을 대상으로 하였고, 황산코발트염 제조업에서는 원료투입 공정을 대상으로 평가하였다.

① 공기역학적 질량중위직경(MMAD) 및 질량평균직경(MMD)

황산니켈염 제품포장 공정과 황산코발트염 원료투입 공정에서 발생하는 입자상 물질의 MMAD와 MMD를 분석한 결과는 표 III-7, 표 III-8과 같다. 황산니켈염 포장 공정에서 발생하는 입자의 MMAD는 5.72 μm 이었으며, 황산코발트염 원료투입 공정에서 발생하는 입자의 MMAD는 니켈 2.58 μm , 코발트 2.69 μm , 망간 2.66 μm 그리고 알루미늄 2.04 μm 이었다. MMD는 황산니켈염 제조사업장 포장 공정이 16.19 μm 이었으며, 황산코발트염 제조사업장은 원료투입 공정에서 니켈 7.91 μm , 코발트 8.13 μm , 망간 8.03 μm 그리고 알루미늄 7.90 μm 이었다.

〈표 III-7〉 전구체 원료 제조업의 공기역학적 질량중위직경(μm)

공정		니켈	코발트	망간	알루미늄
황산니켈 포장	MMAD*	5.72	-	-	-
	GSD**	2.94	-	-	-
황산코발트 원료투입	MMAD	2.58	2.69	2.66	2.04
	GSD	0.67	2.25	1.40	0.71

* MMAD: 공기역학적 질량중위직경, ** GSD: 기하표준편차

〈표 III-8〉 전구체 원료 제조업의 질량평균직경(μm)

공정		니켈	코발트	망간	알루미늄
황산니켈 포장	MMD*	16.19	-	-	-
	GSD**	3.19	-	-	-
황산코발트 원료투입	MMD	7.91	8.13	8.03	7.90
	GSD	0.73	2.32	1.47	0.77

* MMD: 질량평균직경, ** GSD: 기하표준편차

② 입경분포

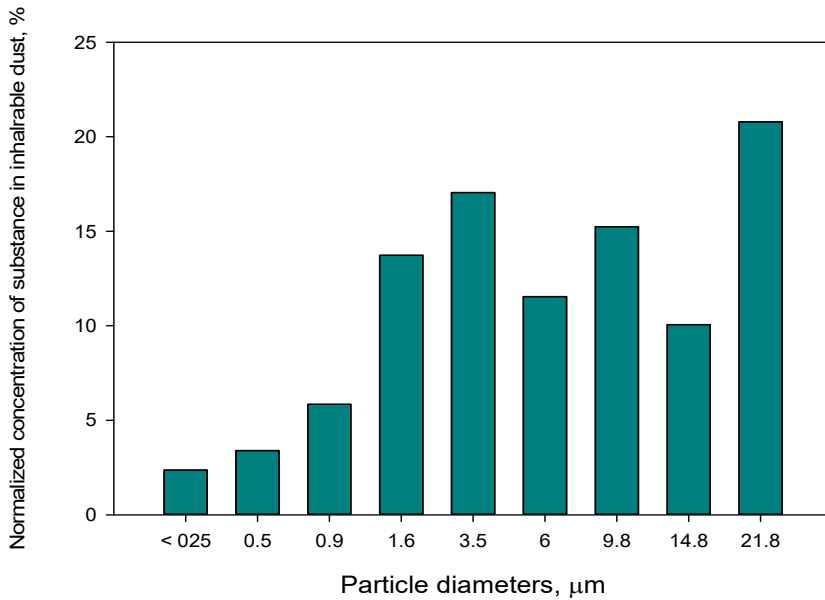
황산니켈염 포장 공정의 입경 크기에 따른 질량 및 입자 수 분포(%)는 표 III-9, 그림 III-5 및 그림 III-6과 같다. 황산니켈염의 경우 질량 분포에서는 9.8 μm 를 초과하는 크기가 69.2 %이며 9.8 μm 이하가 30.8 %로 입경이 큰 분진의 농도가 높게 나타났으나 입자 수 분포에서는 9.8 μm 이하의 입자가 99.9 % 이상으로 평가되었다.

황산코발트염 원료투입 공정의 입경 크기에 따른 질량 분포(%)와 입자 수 분포(%)는 표 III-9, 그림 III-7, 그림 III-8과 같다. 황산코발트염의 원료는 금속분말 형태로 9.8 μm 이하 크기의 입자가 전체 농도의 77.9 %를 차지하고

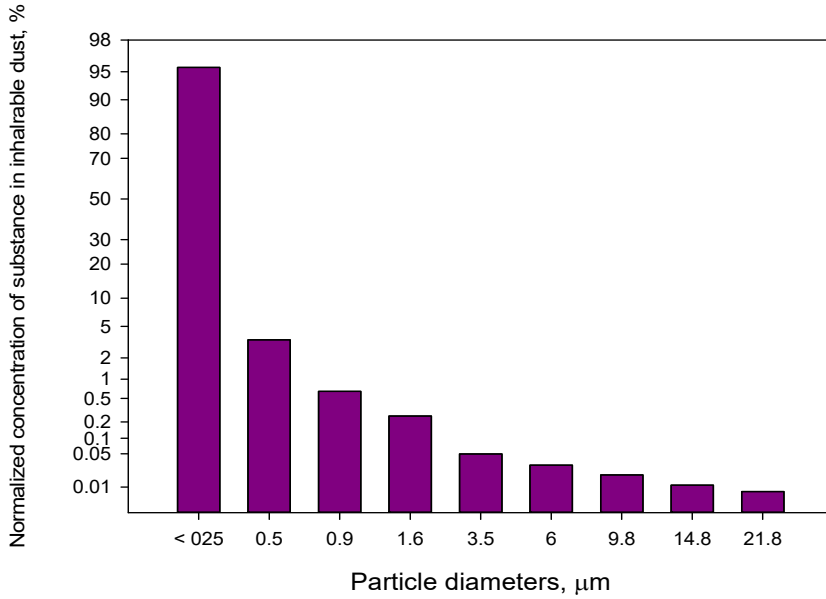
있으며, 9.8 μm 를 초과하는 입자는 22.1 %이었다. 입자 수 분포에서는 9.8 μm 이하의 입자가 99.9 % 이상인 것으로 평가되었다.

〈표 III-9〉 전구체 원료 제조업의 입자상물질 입경분포(%)

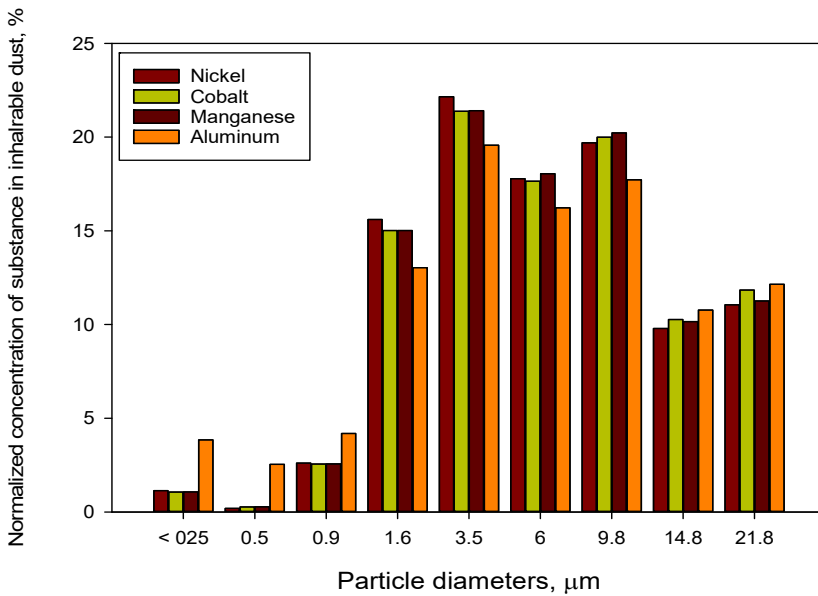
공정	질량 분포, %		입자 수 분포, %	
	9.8 μm 이하	9.8 μm 초과	9.8 μm 이하	9.8 μm 초과
황산니켈 포장	30.8	69.2	99.98	0.02
황산코발트 원료투입				
니켈	79.2	20.8	99.99	0.01
코발트	77.9	22.1	99.99	0.01
망간	78.6	21.4	99.99	0.01
알루미늄	77.1	22.9	99.99	0.01



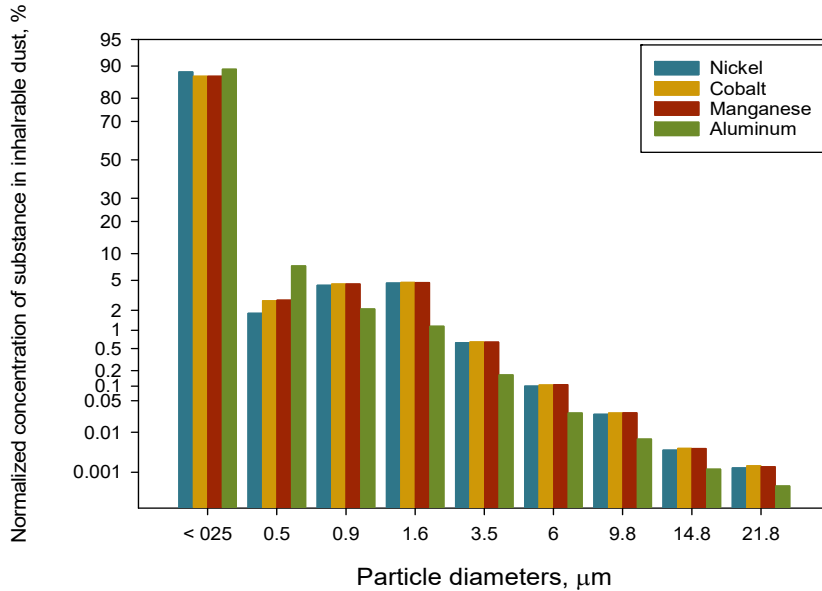
[그림 III-5] 황산니켈 포장 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)



[그림 III-6] 황산니켈 포장 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)



[그림 III-7] 황산코발트 원료투입 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)



[그림 III-8] 황산코발트 원료투입 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)

(2) 양극 활물질 제조업

가) 개인노출평가

양극 활물질 산업의 개인 노출평가를 위해 전구체 제조 및 양극 활물질 제조 사업장 3개소에서 1개 라인의 노동자를 대상으로 총 분진과 호흡성 분진을 평가하였다. 해당 산업의 공정은 현장관리, 원료투입, 생산(소성, 분급/탈철, 수세, 코팅 등), 생산지원(미화, 지게차 운전 등), 제품 포장으로 분류하였다. 총 분진은 총 294개 시료를 평가하였고 호흡성 분진은 297개 시료를 평가하였다.

리튬의 노출 수준(n=294)은 $<0.01 \sim 1745.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: $40.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: $6.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이었으며, 호흡성 분진은 $0.01 \sim 49.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: $2.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: $0.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$)로 나타났다(표 III-10, 그림 III-9). 리튬은 노출기준이 제정되어 있지 않아 ILO(International Labour Organization) 노출기준 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (inhalable fraction)을 사용하여 평가하였다. 양극 활물질

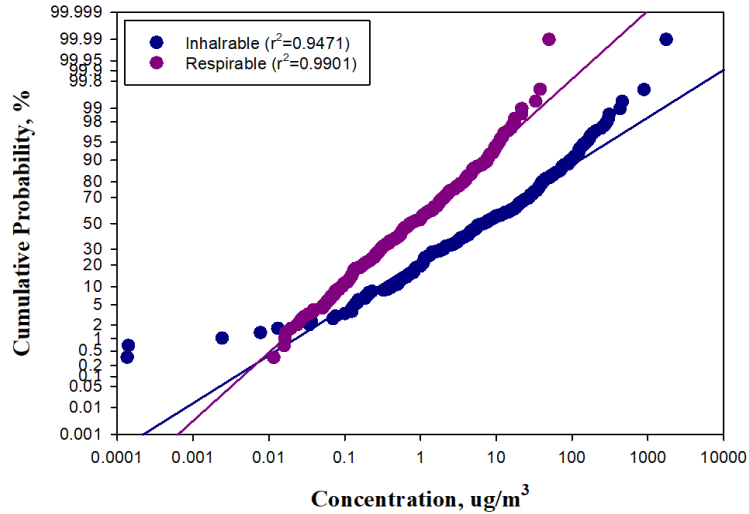
제조업의 리튬의 ILO 노출기준 초과 비율은 약 3.4 %이었다.

원료투입 공정(n=63)의 리튬 노출 농도는 0.15~428.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: 36.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: 8.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 2개 시료가 ILO 노출기준을 초과하였고, 제품포장 공정(n=70)의 리튬 노출 농도는 0.01~1745.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: 93.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: 19.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 약 10%가 ILO 노출기준을 초과하였다.

생산공정(n=118) 에서는 1명의 노동자가 ILO 노출기준을 초과하였고, 현장관리(n=28) 및 생산지원(n=15) 공정의 리튬 노출 농도는 ILO 노출기준 미만으로 평가되었다.

〈표 III-10〉 양극 활물질 제조업의 리튬 노출 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

구분	공정	시료 수	산술 평균	표준 편차	기하 평균	기하 표준편차	범위
총 분진	전체	294	40.4	127.2	6.1	10.4	< 0.01 ~ 1745.0
	현장관리	28	2.3	5.7	0.5	7.9	< 0.01 ~ 30.5
	원료투입	63	36.1	69.5	8.8	6.6	0.15 ~ 428.2
	생산	118	24.1	43.6	4.7	10.4	< 0.01 ~ 241.0
	생산지원	15	9.5	8.8	5.1	4.4	0.18 ~ 30.9
	제품포장	70	93.6	239.0	19.6	8.3	0.01 ~ 1745.0
호흡성 분진	전체	297	2.7	5.3	0.8	5.3	0.01 ~ 49.5
	현장관리	27	0.4	0.4	0.2	3.9	0.02 ~ 1.9
	원료투입	62	4.5	7.8	1.2	6.0	0.04 ~ 49.5
	생산	121	1.9	4.0	0.6	4.8	0.01 ~ 37.9
	생산지원	15	1.2	0.9	0.7	3.8	0.04 ~ 3.3
	제품포장	72	3.6	5.4	1.3	4.7	0.07 ~ 33.1



[그림 III-9] 양극 활물질 제조업의 리튬 노출 농도 누적분포

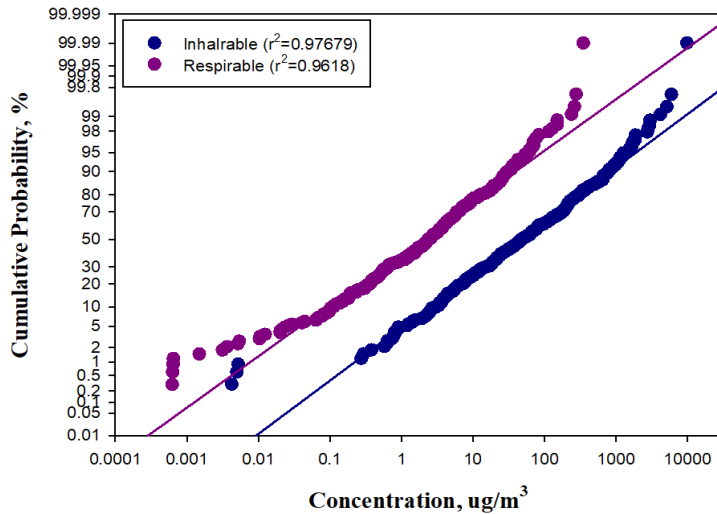
니켈은 리튬이온 이차전지의 양극 활물질 중에서 가장 높은 함량이 사용되고 있으며, 다른 금속 성분에 비해 노출 농도가 높은 수준으로 나타났다. 양극 활물질 산업의 니켈 농도(n=333)는 <0.01~9798.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: 305.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: 45.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이며 노출기준 초과 비율은 약 28 %이다(표 III-11, 그림 III-10). 호흡성 분진 중 니켈 농도(n=336)는 <0.01~348.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: 13.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: 1.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 평가되었다.

원료 투입 노동자의 노출 농도(n=63)는 0.58~2988.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: 209.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: 43.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 약 33%가 노출기준(가용성, 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 불용성, 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)을 초과하였다. 제품포장 공정의 니켈 농도(n=78)는 <0.01~9798.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: 749.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: 179.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 약 53 %가 불용성 니켈 노출기준을 초과하였다. 생산 공정(n=146)은 0.01~5120.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: 196.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: 34.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)으로 약 21 %가 불용성 니켈 노출기준을 초과하는 것으로 나타났다. 생산지원 공정(n=15)은 3.92~197.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: 54.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: 32.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 노출기준 미만 이었고, 현장관리 공정(n=31)의 농도는 0.27~207.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: 22.8

$\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: $6.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$)로 1개 시료가 노출기준을 초과하고 있다. 이러한 원인은 관리자가 현장 관리를 위해 각 공정을 방문하며 고농도의 입자상물질에 노출되었기 때문으로 판단된다.

<표 III-11> 양극 활물질 제조업 노동자의 니켈 노출 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

구분	공정	시료 수	산술 평균	표준 편차	기하 평균	기하 표준편차	범위
총 분진	전체	333	305.5	835.4	45.6	9.5	$< 0.01 \sim 9798.5$
	현장관리	31	22.8	45.7	6.9	5.1	$0.27 \sim 207.6$
	원료투입	63	209.0	454.0	43.3	7.5	$0.58 \sim 2988.4$
	생산	146	196.0	508.0	34.7	8.8	$0.01 \sim 5120.9$
	생산지원	15	54.4	55.2	32.7	3.1	$3.92 \sim 197.2$
	제품포장	78	749.0	1440.0	179.0	9.3	$< 0.01 \sim 9798.5$
호흡성 분진	전체	336	13.2	36.1	1.9	10.3	$< 0.01 \sim 348.5$
	현장관리	30	1.5	1.6	0.8	4.0	$0.01 \sim 5.8$
	원료투입	62	10.0	36.2	1.6	7.9	$< 0.01 \sim 276.9$
	생산	149	11.3	38.4	1.2	13.3	$< 0.01 \sim 348.5$
	생산지원	15	2.3	1.3	1.8	2.4	$0.19 \sim 4.8$
	제품포장	80	25.5	38.8	7.7	6.7	$0.06 \sim 238.9$



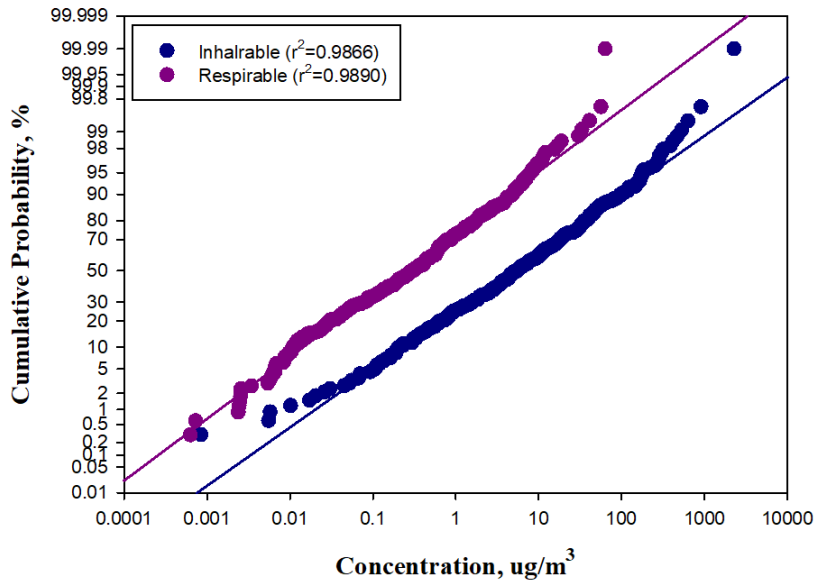
[그림 III-10] 양극 활물질 제조업의 니켈 노출 농도 누적분포

코발트 노출 농도(n=333)는 <0.01~2277.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: 43.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: 5.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이며 호흡성 분진(n=336)은 <0.01~63.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: 2.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: 0.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이고 결과는 표 III-12 및 그림 III-11과 같다. 총 분진 중 코발트의 노출기준(20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 초과 비율은 약 28 %이었다.

코발트는 양극 활물질 산업의 제품포장 공정(n=78)에서 <0.01~2277.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: 116.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: 22.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)으로 가장 높게 평가되었고 시료의 약 58 %가 노출기준을 초과하는 것으로 나타났으며 가장 높은 시료의 경우 노출기준에 비해 100배 이상 높은 농도를 보였다. 원료투입 공정의 경우 코발트 노출 농도(n=63)는 0.01~631.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: 27.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: 3.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 약 24 %가 노출기준을 초과하였고 생산 공정의 코발트 농도(n=146)는 0.01~390.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: 23.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: 3.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 약 21 %가 노출기준 초과였다. 코발트의 경우 생산지원(n=15)과 현장관리(n=31) 시료에서도 각각 1개와 2개의 시료가 노출기준을 초과하였다.

〈표 III-12〉 양극 활물질 제조업의 코발트 노출 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

구분	공정	시료 수	산술 평균	표준 편차	기하 평균	기하 표준편차	범위
총 분진	전체	333	43.2	153.5	5.0	10.5	< 0.01 ~ 2277.3
	현장관리	31	3.8	7.9	0.8	6.9	0.02 ~ 32.7
	원료투입	63	27.5	86.9	3.8	8.8	0.01 ~ 631.5
	생산	146	23.1	52.5	3.8	9.0	0.01 ~ 390.1
	생산지원	15	6.6	7.5	3.3	3.5	0.63 ~ 22.3
	제품포장	78	116.0	288.0	22.2	10.4	< 0.01 ~ 2277.3
호흡성 분진	전체	336	2.0	6.1	0.3	9.3	< 0.01 ~ 63.4
	현장관리	30	0.2	0.3	0.1	4.7	0.01 ~ 1.3
	원료투입	62	1.6	7.2	0.2	6.5	0.01 ~ 56.5
	생산	149	1.6	6.4	0.2	10.2	< 0.01 ~ 63.4
	생산지원	15	0.3	0.2	0.2	2.2	0.05 ~ 0.8
	제품포장	80	3.8	5.9	1.0	8.7	< 0.01 ~ 33.3



[그림 III-11] 양극 활물질 제조업의 코발트 노출 농도 누적분포

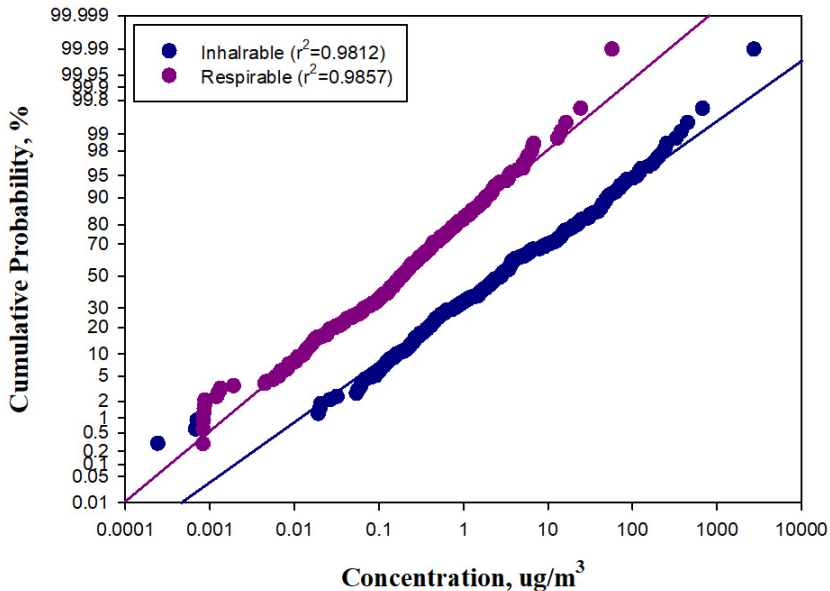
망간과 알루미늄은 다른 금속에 비해 소량 첨가되는 금속으로 다른 금속에 비해 노출 수준이 낮은 편이었다. 망간의 노출 농도 결과는 표 III-13 및 그림 III-12, 알루미늄의 노출 농도 결과는 표 III-14와 그림 III-13에 나타내었다.

망간의 노출 농도(n=333)는 <0.01~2734.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: 30.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: 2.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이고 제품 포장의 1개 시료(2734.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에서 노출기준 (1,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 높은 수치를 보였다. 알루미늄의 농도(n=217)는 <0.01~50.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: 3.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: 0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 모두 노출기준 미만으로 나타났다.

양극 활물질 산업에서 노출 농도가 높은 공정은 제품 포장, 원료 투입, 생산, 생산지원, 현장관리 순으로 나타났으며, 각 사업장별 공정의 형태와 노동자 개인의 작업 방식에 따라 노출 수준에 차이가 있어 노출 수준의 범위가 넓은 것으로 판단된다.

〈표 III-13〉 양극 활물질 제조업의 망간 노출 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

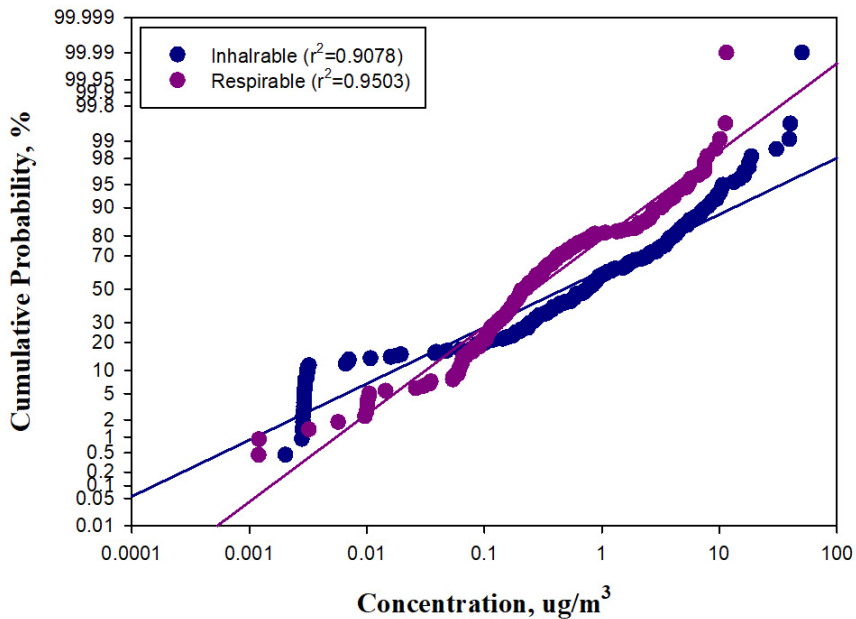
구분	공정	시료 수	산술 평균	표준 편차	기하 평균	기하 표준편차	범위
총 분진	전체	333	30.2	161.2	2.8	10.2	< 0.01 ~ 2734.0
	현장관리	31	1.8	3.3	0.7	4.8	0.02 ~ 14.2
	원료투입	63	24.5	88.7	2.7	9.0	0.02 ~ 673.6
	생산	146	14.1	39.4	1.8	9.3	< 0.01 ~ 325.6
	생산지원	15	5.1	5.0	3.1	3.1	0.36 ~ 14.6
	제품포장	78	80.9	315.0	10.3	11.5	< 0.01 ~ 2734.0
호흡성 분진	전체	336	1.0	3.8	0.2	7.3	< 0.01 ~ 57.2
	현장관리	30	0.2	0.2	0.1	5.0	< 0.01 ~ 1.0
	원료투입	62	1.4	7.3	0.2	5.3	0.01 ~ 57.2
	생산	149	0.6	2.3	0.1	8.4	< 0.01 ~ 24.4
	생산지원	15	0.2	0.2	0.2	1.9	0.06 ~ 0.7
	제품포장	80	1.7	2.8	0.5	6.2	0.01 ~ 16.3



[그림 III-12] 양극 활물질 제조업의 망간 노출 농도 누적분포

〈표 III-14〉 양극 활물질 제조업의 알루미늄 노출 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

구분	공정	시료 수	산술 평균	표준 편차	기하 평균	기하 표준편차	범위
총 분진	전체	217	3.0	6.3	0.5	12.2	< 0.01 ~ 50.5
	현장관리	15	1.4	1.6	0.7	3.4	0.09 ~ 4.4
	원료투입	51	5.5	9.5	0.5	20.1	< 0.01 ~ 40.2
	생산	96	2.4	5.8	0.4	11.8	< 0.01 ~ 50.5
	생산지원	7	2.3	1.8	1.8	2.2	0.76 ~ 5.3
	제품포장	48	2.3	3.1	0.6	11.3	< 0.01 ~ 14.8
호흡성 분진	전체	219	1.0	2.0	0.3	5.2	< 0.01 ~ 11.5
	현장관리	14	1.0	1.3	0.3	5.9	0.01 ~ 3.3
	원료투입	50	2.5	3.3	0.7	6.2	0.01 ~ 11.5
	생산	99	0.6	1.2	0.2	4.3	< 0.01 ~ 9.3
	생산지원	7	0.9	1.1	0.4	4.1	0.08 ~ 2.6
	제품포장	49	0.5	0.7	0.2	4.6	< 0.01 ~ 3.6



[그림 III-13] 양극 활물질 제조업의 알루미늄 노출 농도 누적분포

나) 입자상물질 특성 평가

양극 활물질 제조업에서는 공정에 따라 입자 크기가 변동될 가능성이 있는 공정인 원료투입(전구체 및 활물질), 소성, 파쇄 그리고 포장(전구체 및 활물질) 공정을 대상으로 MMAD, MMD와 입경 크기에 따른 농도 및 입자 수 분포를 평가하였다.

① 공기역학적 질량중위직경(MMAD) 및 질량평균직경(MMD)

양극 활물질 제조업에서 발생하는 입자의 MMAD와 MMD는 사업장에서 사용하는 원료 및 생산하는 제품의 종류에 따라 상이하였으며 결과는 표 III-15, III-16과 같다.

사업장 A의 전구체(NCM) 원료투입 공정에서 발생하는 입자의 MMAD는 1.10~2.07 μm 이었고, 전구체(NCM) 포장 공정에서는 5.61~5.85 μm 이었으며, MMD는 원료투입 공정이 7.86~10.92 μm , 포장 공정 16.42~16.93 μm 의 입자 크기 특성을 보였다.

활물질 원료투입 공정의 리튬, 니켈, 코발트, 망간의 MMAD는 약 3 μm 이며, MMD는 약 11 μm 로 물질간 입자크기는 비슷한 분포를 보였으며, 활물질 소성 공정의 MMAD는 1.99~2.75 μm , MMD는 5.61~8.02 μm 로 평가되었다. 소성 공정에서는 소성로가 밀폐된 상태에서 제품을 생산하는 공정으로 입자상물질이 소성로 외부에서 검출되는 직접 노출보다 2차 비산으로 인한 노출로 추정된다. 활물질 포장공정의 MMAD는 8.24~8.97 μm 이며 MMD는 16.16~18.52 μm 로 다른 공정에 비해 입자 크기가 크게 나타났다.

사업장 B의 활물질 원료투입 공정에서 발생하는 입자 크기는 리튬의 MMAD는 3.69 μm 이고 MMD는 12.93 μm 이었으며, 전구체(NCM)로 사용되는 니켈, 코발트, 망간의 MMAD는 7.69~8.40 μm , MMD는 약 16~17 μm 의 일정한 크기로 나타났다. 알루미늄은 전구체(NCM)와 별도로 투입되며 MMAD와 MMD는 각각 1.71 μm 와 8.90 μm 이었다.

소성 공정의 MMAD는 리튬 2.92 μm , 니켈, 코발트, 망간은 6.03~6.82 μm 그리고 알루미늄은 1.84 μm 이었으며, MMD는 리튬 11.26 μm , 니켈, 코발트, 망간은 약 14~16 μm , 알루미늄은 7.79 μm 로 원료투입 공정과 비슷한 양상을 보였다. 이러한 원인은 소성 도가니의 폐 분말을 처리하는 작업을 대상으로 평가하여 다른 사업장에 비해 입자 크기가 큰 것으로 판단된다.

활물질 포장 공정의 MMAD는 리튬, 니켈, 코발트, 망간이 6.73~7.87 μm 이고 MMD는 약 15~17 μm 이었으며, 알루미늄은 1.92 μm 와 7.53 μm 로 평가되었다.

사업장 C의 활물질 원료투입 공정에서 발생하는 리튬, 니켈, 코발트, 망간 입자의 MMAD와 MMD는 3.84~4.75 μm , 10.80~13.22 μm , 소성 공정의 MMAD는 2.88~11.40 μm , MMD는 10.13~17.30 μm , 파쇄 공정의 MMAD는 4.36~12.52 μm , MMD는 12.55~17.50 μm 이었고. 포장 공정의 리튬, 니켈, 코발트, 망간의 MMAD는 약 3 μm 이며 MMD는 약 10 μm 이었다. 알루미늄은 매우 미량을 제품 원료로 사용함으로써 직경분립층돌기 각 단계 재현성 있게 알루미늄을 포집할 수 없어 MMAD와 MMD를 평가하기에는 미흡하였다.

사업장 D는 전구체 포장 공정에서 평가하였다. 발생하는 입자의 MMAD는 3.89~4.37 μm 이었으며, MMD는 10.12~11.76 μm 으로 제조되는 전구체의 평균 입경(8~10 μm)과 유사하게 나타났다.

〈표 III-15〉 양극 활물질 제조업의 공기역학적 질량중위직경(μm)

사업장	공정		리튬	니켈	코발트	망간	알루미늄	
A	전구체 원료투입	MMAD*	-	1.88	2.07	1.10	-	
		GSD**	-	-0.30	-0.69	-0.73	-	
	전구체 포장	MMAD	-	5.85	5.61	5.81	-	
		GSD	-	2.14	1.37	1.01	-	
	활물질 원료투입	MMAD	3.48	2.88	2.94	3.14	-	
		GSD	0.17	0.50	-0.23	-0.27	-	
	활물질 소성	MMAD	1.99	2.61	2.65	2.75	-	
		GSD	0.34	1.08	0.41	0.47	-	
	활물질 포장	MMAD	8.83	8.97	8.84	8.24	-	
		GSD	1.81	2.62	1.81	1.44	-	
	B	활물질 원료투입	MMAD	3.69	8.26	8.40	7.69	1.71
			GSD	0.05	1.21	0.01	0.11	-0.50
활물질 소성		MMAD	2.92	6.82	6.66	6.03	1.84	
		GSD	0.05	1.21	0.01	0.11	-0.50	
활물질 포장		MMAD	6.73	7.84	7.87	7.61	1.92	
		GSD	0.79	1.69	0.47	0.57	-0.50	
C	활물질 원료투입	MMAD	3.84	4.13	4.14	4.75	2.29	
		GSD	0.20	0.76	0.62	0.22	-0.22	
	활물질 소성	MMAD	2.88	9.33	11.39	11.40	4.89	
		GSD	-0.12	0.90	-0.29	-0.50	-1.64	
	활물질 파쇄	MMAD	4.36	10.59	12.52	12.52	0.22	
		GSD	0.14	0.98	-0.20	-0.42	-1.24	
	활물질 포장	MMAD	3.39	3.41	3.17	3.16	10.88	
		GSD	1.06	1.88	1.03	0.79	-1.15	
D	전구체 포장	MMAD	-	4.37	3.89	4.21	-	
		GSD	-	1.10	0.29	-0.71	-	

* MMAD: 공기역학적 질량중위직경, ** GSD: 기하표준편차

〈표 III-16〉 양극 활물질 제조업의 질량평균직경(μm)

사업장	공정		리튬	니켈	코발트	망간	알루미늄	
A	전구체 원료투입	MMD*	-	10.90	10.92	7.86	-	
		GSD**	-	0.02	0.00	-0.34	-	
	전구체 포장	MMD	-	16.93	16.67	16.42	-	
		GSD	-	2.76	2.00	1.63	-	
	활물질 원료투입	MMD	15.03	11.52	11.60	11.79	-	
		GSD	0.49	0.85	0.12	0.09	-	
	활물질 소성	MMD	6.92	8.02	7.98	7.94	-	
		GSD	0.47	1.31	0.66	0.73	-	
	활물질 포장	MMD	18.41	18.52	16.69	16.16	-	
		GSD	2.04	3.40	2.59	2.21	-	
	B	활물질 원료투입	MMD	12.93	16.24	16.24	17.28	8.90
			GSD	0.87	1.66	0.46	0.71	0.02
활물질 소성		MMD	11.26	14.60	14.55	16.46	7.79	
		GSD	0.67	1.25	0.04	0.23	-0.17	
활물질 포장		MMD	17.20	15.23	15.21	17.46	7.53	
		GSD	1.45	2.19	0.97	1.21	-0.24	
C	활물질 원료투입	MMD	12.44	13.22	9.68	11.10	6.86	
		GSD	0.51	1.13	0.62	0.22	-0.22	
	활물질 소성	MMD	14.93	17.19	17.30	17.27	10.13	
		GSD	0.37	1.37	0.18	-0.04	-1.64	
	활물질 파쇄	MMD	16.44	17.42	17.50	17.50	12.55	
		GSD	0.62	1.46	0.28	0.06	-1.07	
	활물질 포장	MMD	11.11	11.10	9.90	9.95	18.46	
		GSD	1.23	2.05	1.15	0.91	-0.65	
D	전구체 포장	MMD	-	11.76	10.12	11.75	-	
		GSD	-	1.10	0.29	-0.71	-	

* MMD: 질량평균직경, ** GSD: 기하표준편차

② 입경분포

양극 활물질 제조업에서 발생하는 입자의 입경 크기에 따른 질량 및 입자 수 분포(%)는 표 III-17~20, 그림 III-14~39와 같다. 입경 크기에 따른 질량과 입자 수 분포는 각 사업장과 공정의 특성에 따라 서로 상이하게 나타났으며 평가일의 작업환경이나 원로나 제품의 입자 특성에 따라서도 변이가 있을 수 있다.

사업장 A의 전구체 제조 공정에서는 원료투입과 제품포장 공정에서 평가를 진행하였다. 원료투입 공정에서는 황산니켈, 황산코발트, 황산망간이 원료로 투입되므로 입자 크기에 따른 농도 분포도 금속 별로 다르게 평가되었다. 하지만 전체적으로 호흡성 분진 크기에 해당하는 9.8 μm 이하 입자의 질량이 약 50~80%이고 입자 수 분포에서도 9.8 μm 이하 입자가 99.9 % 이상으로 평가되었다. 포장 공정에서의 질량 분포는 6 μm 이상의 입자가 대부분으로 전구체의 소입경이 4~5 μm , 대입경이 10~20 μm 인 것과 비교하였을 때 비슷한 양상을 보인다고 할 수 있다. 하지만 입자 수 분포에서는 9.8 μm 이하의 입자가 99.9 % 이상으로 나타났다.

사업장 A의 활물질 제조 공정에서는 원료투입, 소성 그리고 제품포장 공정에서 입경 크기에 따른 분포를 평가하였다. 활물질 원료 투입에서 질량 분포는 9.8 μm 초과가 약 54.9~79.2 %로 높은 비율을 보였고 입자 수 분포는 9.8 μm 이하에서 99.9% 이상으로 평가되었다. 소성 공정에서는 리튬, 니켈, 코발트, 망간 모두 약 9.8 μm 를 초과하는 입자의 질량 분포가 약 80 % 이상으로 대부분을 차지 하였으나 입자 수 분포에서는 9.8 μm 이하가 99.9 % 이상으로 나타났다. 활물질 포장 공정의 질량 분포는 코발트의 경우 9.8 μm 이하 입자의 농도가 약 80%이었으나 리튬, 니켈, 망간은 9.8 μm 초과가 85% 이상으로 평가되었고, 입자 수는 모든 금속이 9.8 μm 미만 입자가 약 99.7% 이상으로 평가되었다.

사업장 B에서는 활물질 원료투입, 소성, 제품포장 공정에서 평가를 진행하였다. 원료투입 공정에서 전구체(NCM) 주요 금속인 니켈, 코발트, 망간의 질량 분포는 9.8 μm 초과가 약 80 % 이상이었고 리튬과 알루미늄은 9.8 μm 이하에서

약 43.9 %, 65.1 %의 농도 분포를 보였다. 입자 수 분포에서는 모든 금속이 9.8 μm 이하에서 99.7 % 이상의 분포를 보였다. 소성 공정에서 리튬과 알루미늄은 모든 입경에서 비슷한 질량 분포를 보였으며 니켈, 코발트, 망간의 경우 9.8 μm 를 초과하는 입자가 약 75 % 이상이었다. 입자 수 분포에서는 9.8 μm 이하의 입자가 99.8 % 이상으로 나타났다. 포장 공정에서는 리튬, 니켈, 코발트, 망간에서 9.8 μm 를 초과하는 입자의 질량 분포가 84~92 % 범위였고 알루미늄은 모든 크기에서 비슷한 질량 분포를 보였다. 하지만 입자 수 분포에서는 모든 금속이 9.8 μm 이하의 입자가 99.9 % 이상으로 평가되었다.

사업장 C의 활물질 제조 공정에서는 원료투입, 소성, 파쇄 그리고 포장 공정에서 평가를 진행하였다. 평가대상 모든 공정에서 리튬을 제외하고는 6 μm 이상에서만 입자상물질이 검출되었다. 이러한 분포를 보이는 것은 제품을 생산하는 과정에서 입자상물질에 대한 관리가 매우 잘되고 있기 때문이다.

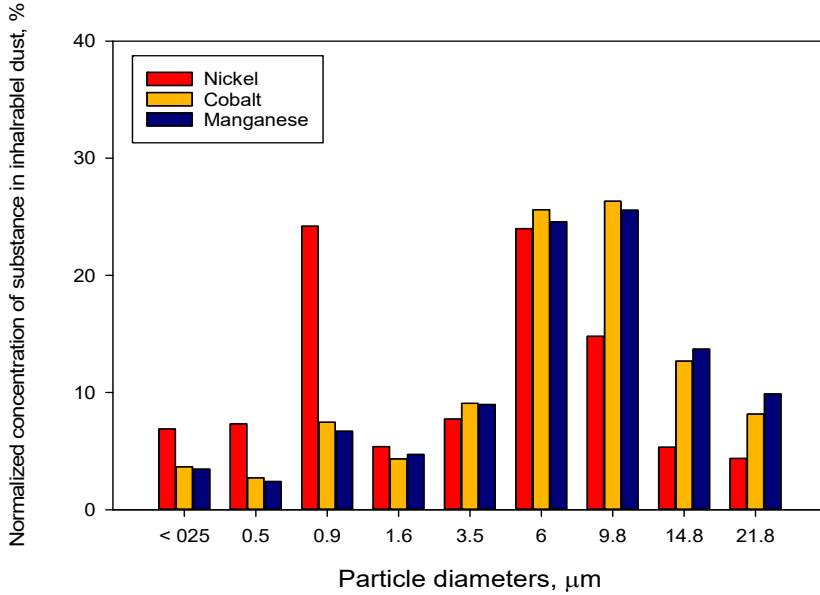
원료투입 공정의 질량 분포에서 리튬은 9.8 μm 초과가 약 38.6 %이고 니켈, 코발트, 망간은 약 79 % 이상을 차지하고 있다. 입자 수 분포는 리튬이 9.8 μm 이하에서 99.9 % 이상이고 니켈과 망간은 약 71 %이며 코발트는 9.8 μm 초과와 이하가 비슷한 분포를 보였다. 소성공정의 리튬, 니켈, 코발트 그리고 망간의 질량 분포는 9.8 μm 초과에서 78.4~94.2 % 범위이고 알루미늄은 약 65.6 %로 다른 물질에 비해 낮은 편이었다. 입자 수 분포는 리튬, 망간, 알루미늄이 9.8 μm 이하에서 약 99% 이상이고, 니켈과 코발트는 각각 61.7 %, 27.1 %로 평가되었다. 파쇄 공정에서 리튬, 니켈, 코발트, 망간의 질량 분포는 9.8 μm 초과에서 85% 이상이 분포하며 알루미늄은 60 %이었다. 리튬과 알루미늄의 입자 수 분포는 9.8 μm 이하의 크기에서 99.9 % 이상으로 분포하고 있으며 니켈, 코발트, 망간은 9.8 μm 초과가 약 65 % 이상을 차지하고 있었다. 포장공정의 리튬, 니켈, 코발트, 망간의 질량 분포는 9.8 μm 이하의 크기가 60~70 % 범위이고 알루미늄은 9.8 μm 초과에서 99.6 %가 분포하였다. 입자 수 분포는 모든 물질이 9.8 μm 이하에서 약 85 % 이상이 분포하였다.

사업장 D는 전구체 제조 공정으로 포장 공정에서만 평가를 진행하였다. 입경

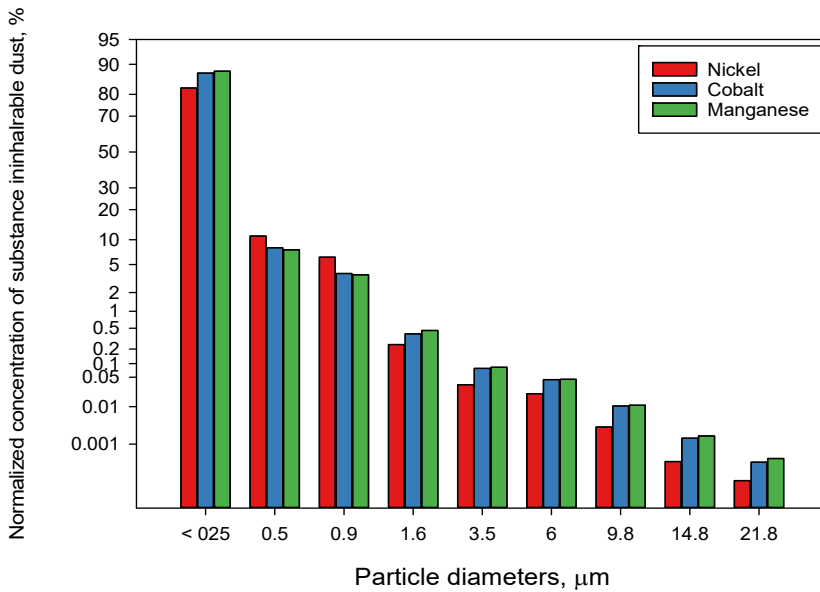
크기별 질량 분포는 물질별로 함유 비율은 다르나 9.8 μm 를 초과하는 비율이 64.9~52.6 %로 평가되었다. 입자 수 분포에서는 9.8 μm 이하의 입자가 99.9 % 이상으로 타 사업장과 비슷한 양상을 보였다.

〈표 III-17〉 양극 활물질 A사의 입자상물질 입경분포(%)

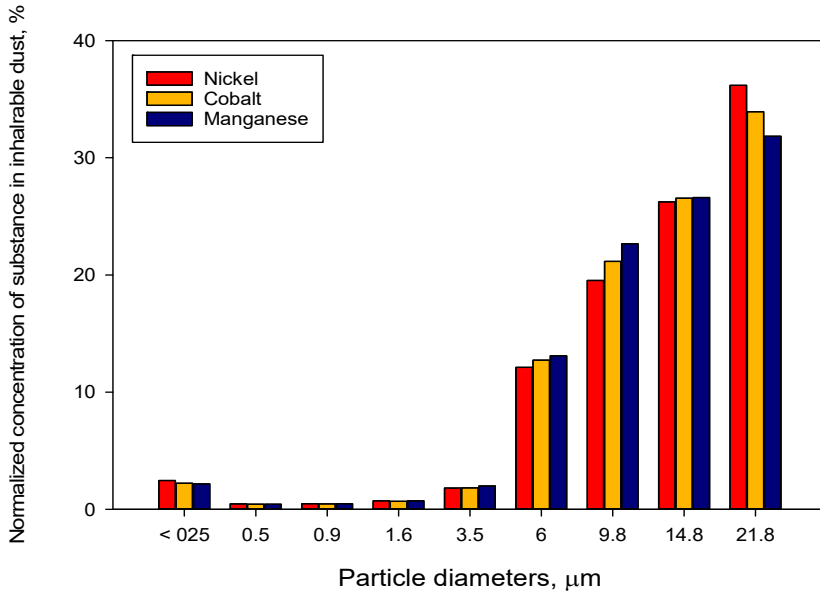
공정	물질	질량 분포		입자 수 분포	
		9.8 μm 이하	9.8 μm 초과	9.8 μm 이하	9.8 μm 초과
전구체 원료투입	리튬	-	-	-	-
	니켈	77.7	22.3	99.99	0.01
	코발트	62.6	37.4	99.99	0.01
	망간	48.5	51.5	99.99	0.01
전구체 포장	리튬	-	-	-	-
	니켈	23.2	76.8	99.98	0.02
	코발트	79.2	20.8	99.98	0.02
	망간	26.9	73.1	99.98	0.02
활물질 원료투입	리튬	56.1	43.9	99.98	0.02
	니켈	56.9	43.1	99.99	0.01
	코발트	79.2	20.8	99.99	0.01
	망간	54.9	45.1	99.99	0.01
활물질 소성	리튬	94.3	5.7	99.99	0.01
	니켈	82.5	17.5	99.99	0.01
	코발트	79.2	20.8	99.99	0.01
	망간	84.8	15.2	99.99	0.01
활물질 포장	리튬	15.5	84.5	99.79	0.21
	니켈	7.3	92.7	99.80	0.20
	코발트	79.2	20.8	99.79	0.21
	망간	9.3	90.7	99.81	0.19



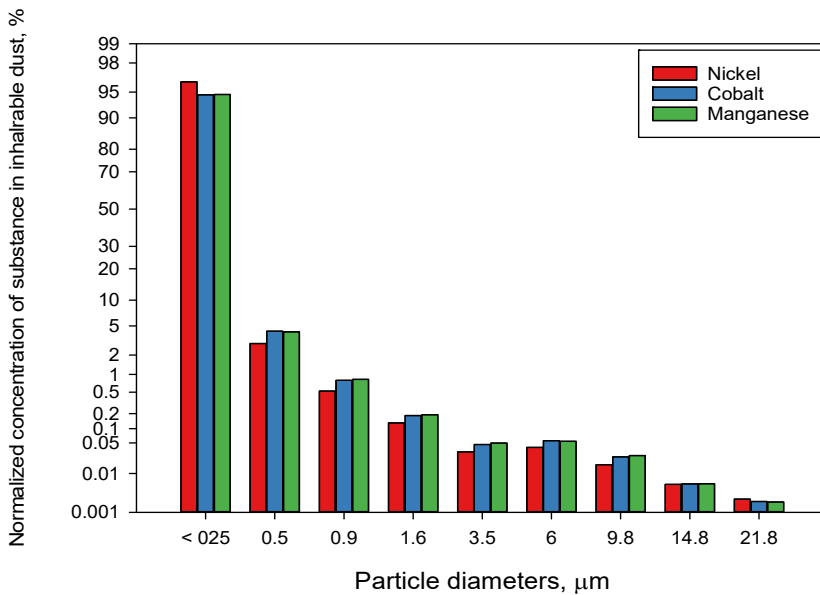
[그림 III-14] A사 전구체 원료투입 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)



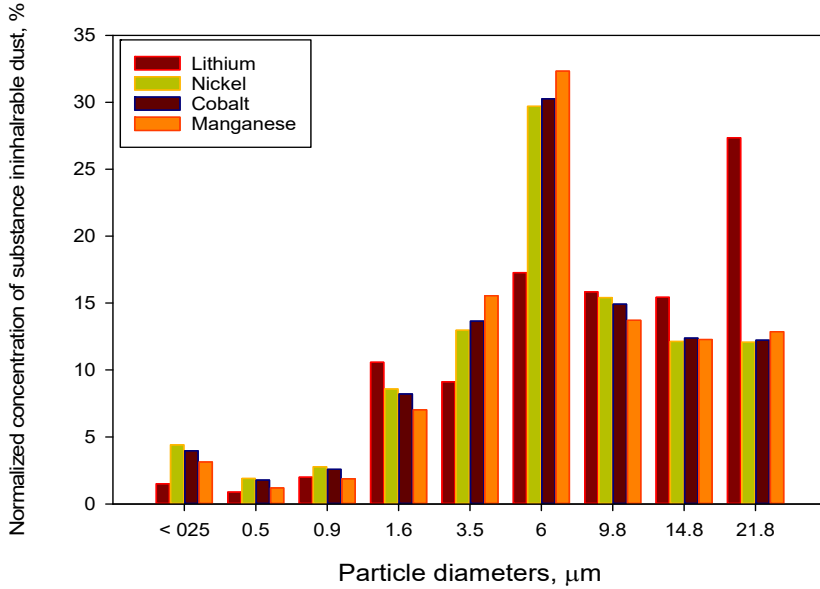
[그림 III-15] A사 전구체 원료투입 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)



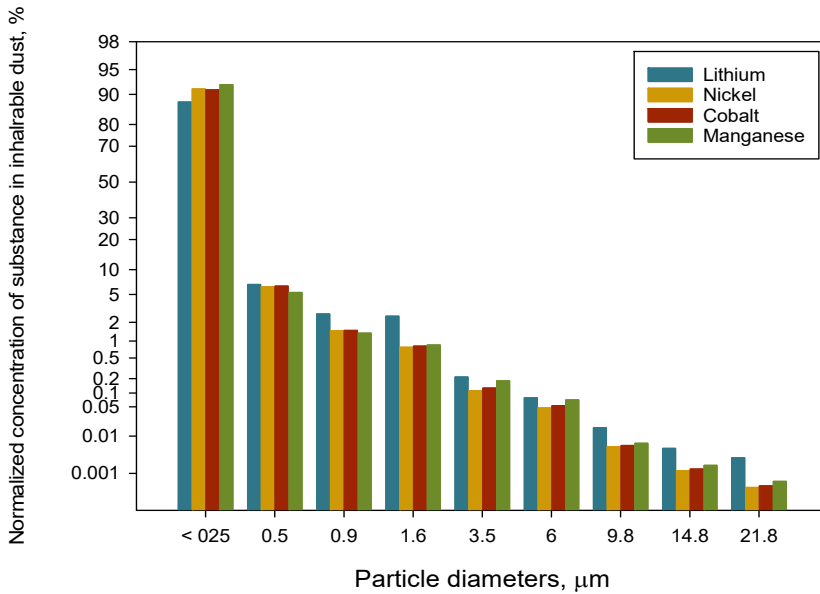
[그림 III-16] A사 전구체 포장 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)



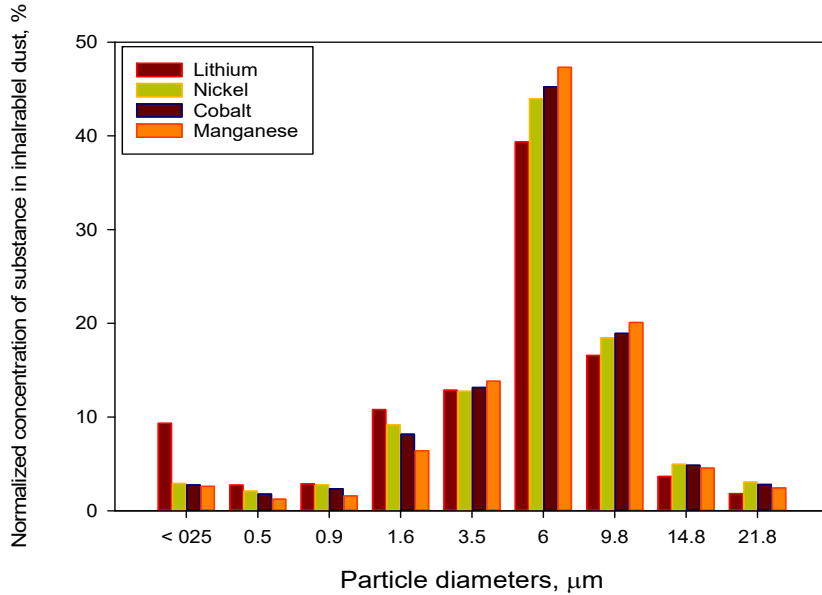
[그림 III-17] A사 전구체 포장 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)



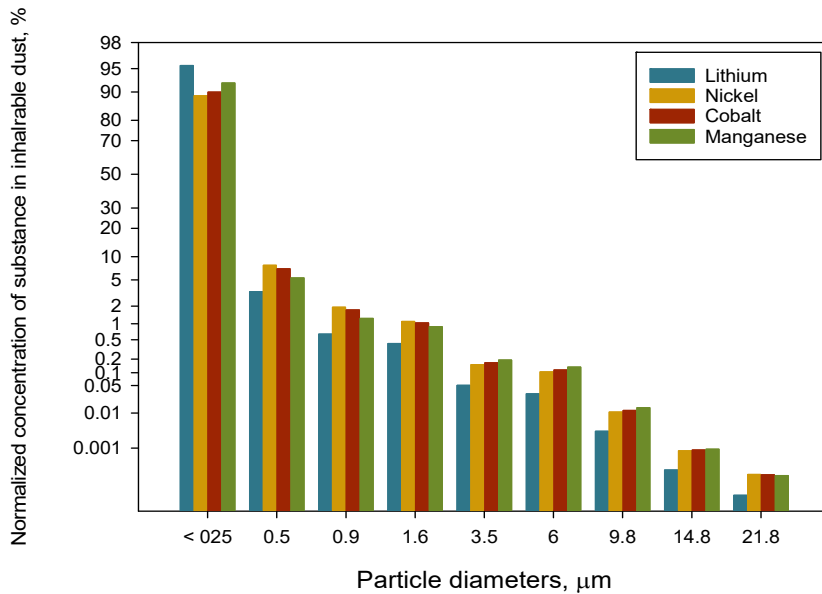
[그림 III-18] A사 활물질 원료투입 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)



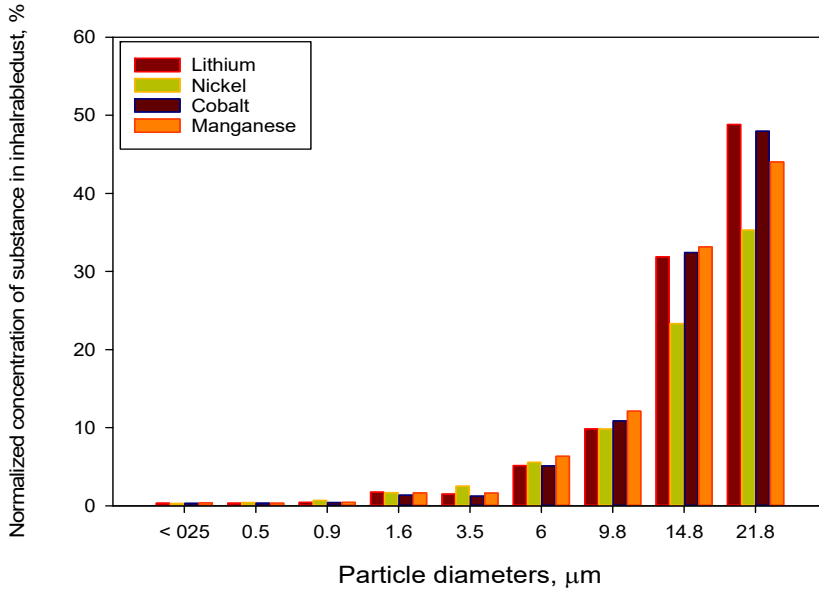
[그림 III-19] A사 활물질 원료투입 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)



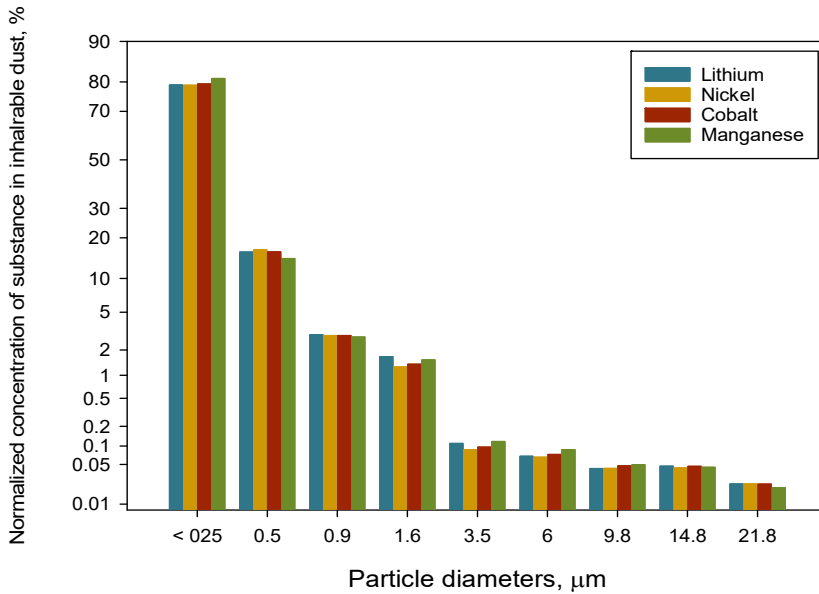
[그림 III-20] A사 활물질 소성 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)



[그림 III-21] A사 활물질 소성 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)



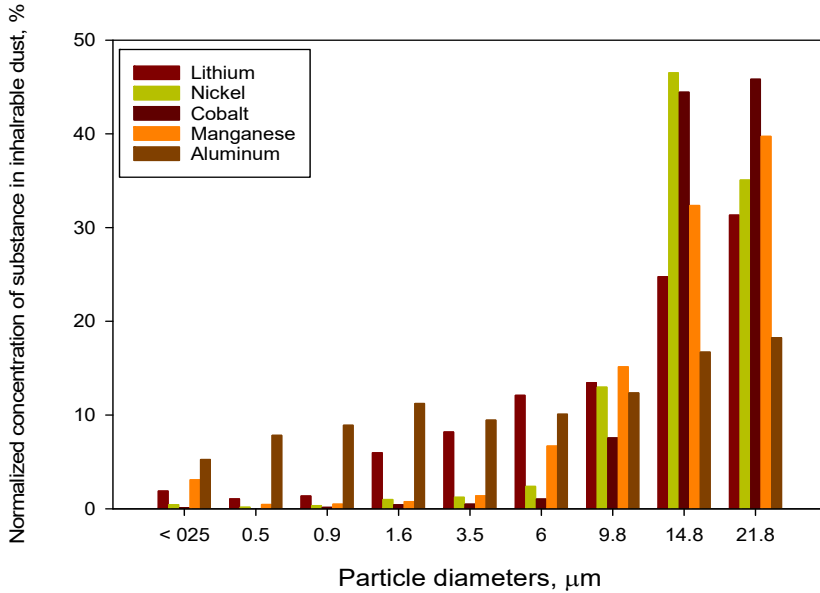
[그림 III-22] A사 활물질 포장 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)



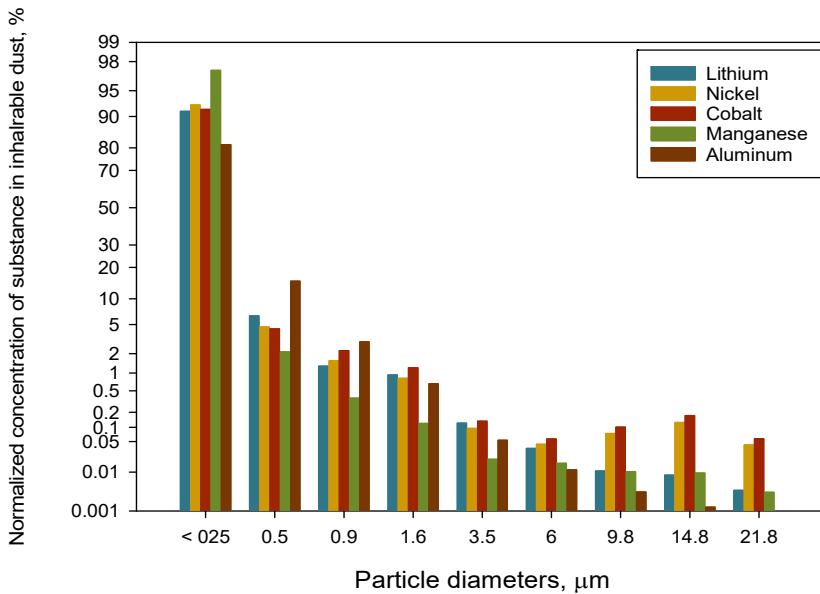
[그림 III-23] A사 활물질 포장 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)

〈표 III-18〉 양극 활물질 B사의 입자상물질 입경분포(%)

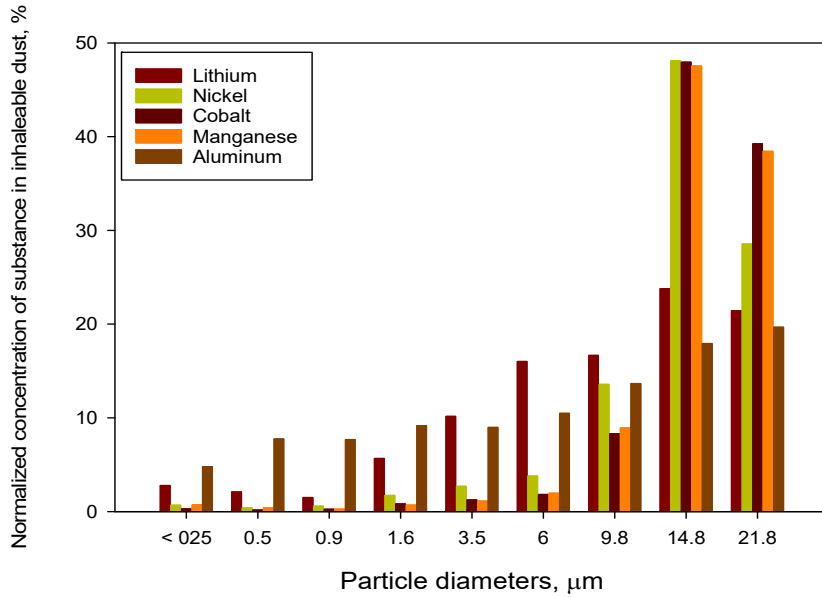
공정	물질	질량 분포		입자 수 분포	
		9.8 μm 이하	9.8 μm 초과	9.8 μm 이하	9.8 μm 초과
활물질 원료투입	리튬	43.9	56.1	99.99	0.01
	니켈	18.4	81.6	99.83	0.17
	코발트	9.7	90.3	99.77	0.23
	망간	27.9	72.1	99.99	0.01
	알루미늄	65.1	34.9	99.99	0.01
활물질 소성	리튬	54.8	45.2	99.99	0.01
	니켈	23.3	76.7	99.89	0.11
	코발트	12.8	87.2	99.90	0.10
	망간	14.0	86.0	99.96	0.04
	알루미늄	62.4	37.6	99.99	0.01
활물질 포장	리튬	9.8	90.2	99.96	0.04
	니켈	16.8	83.2	99.93	0.07
	코발트	8.3	91.7	99.93	0.07
	망간	8.2	91.8	99.94	0.06
	알루미늄	60.6	39.4	99.99	0.01



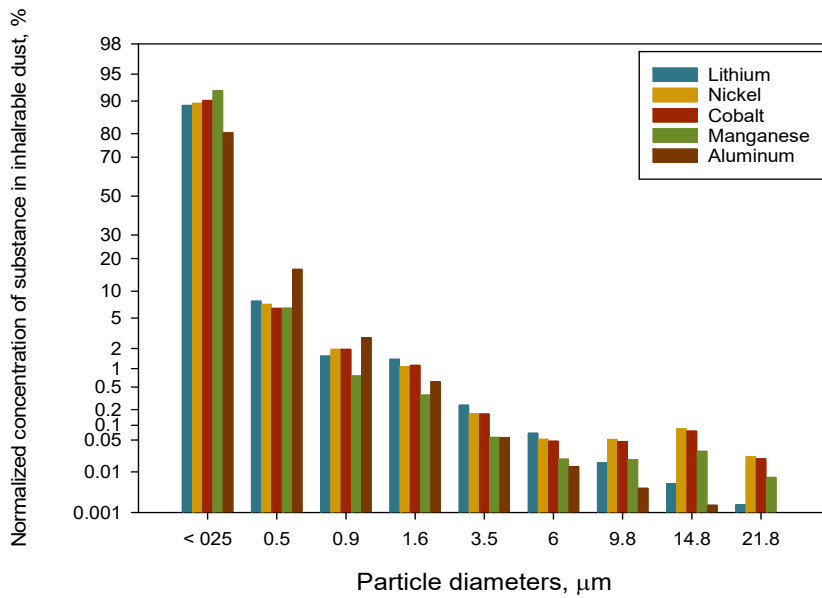
[그림 III-24] B사 활물질 원료투입 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)



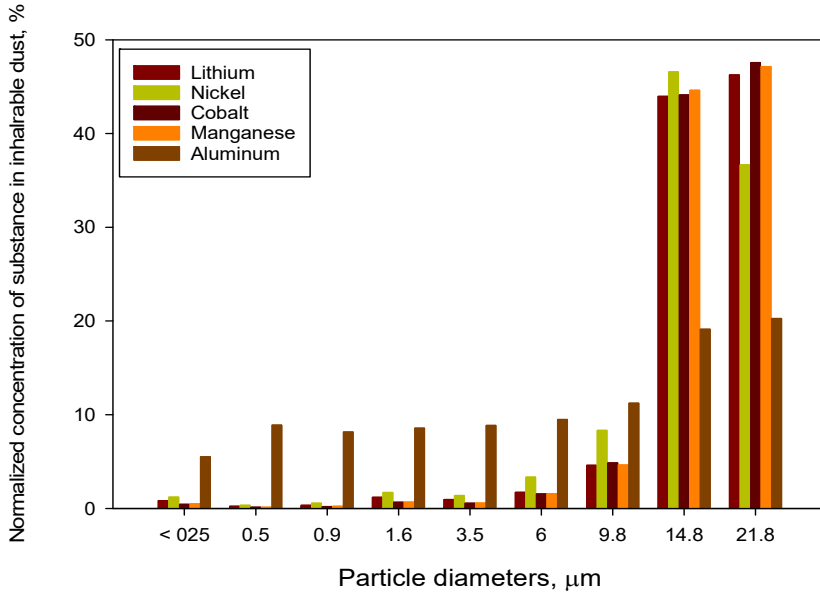
[그림 III-25] B사 활물질 원료투입 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)



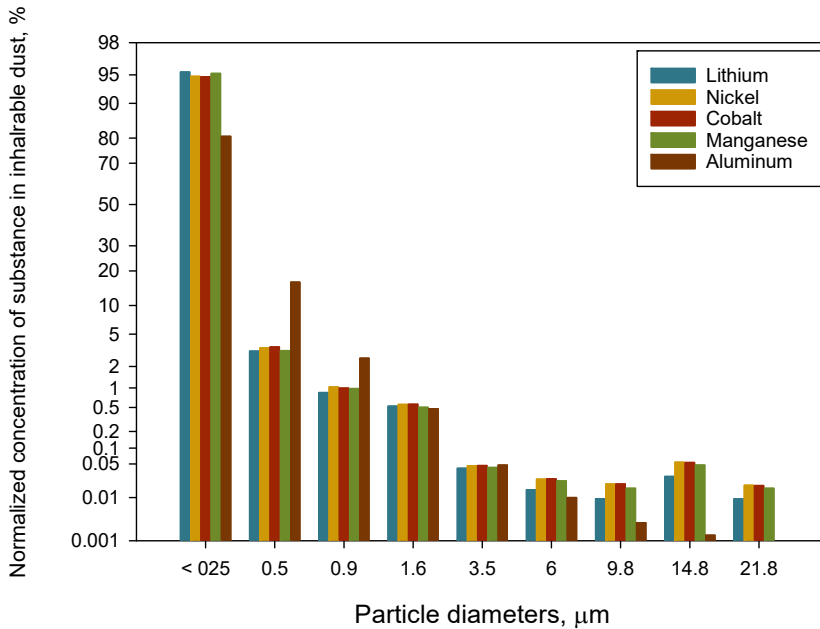
[그림 III-26] B사 활물질 소성 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)



[그림 III-27] B사 활물질 소성 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)



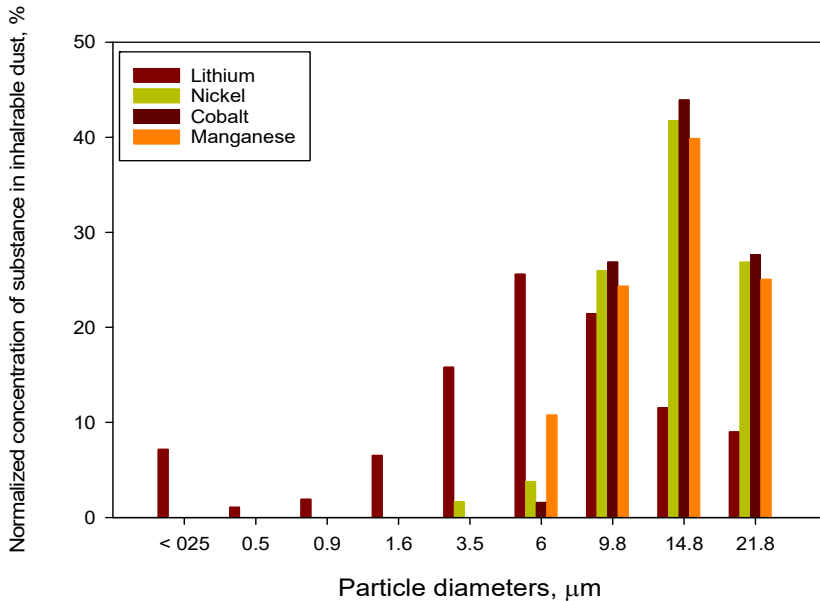
[그림 III-28] B사 활물질 포장 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)



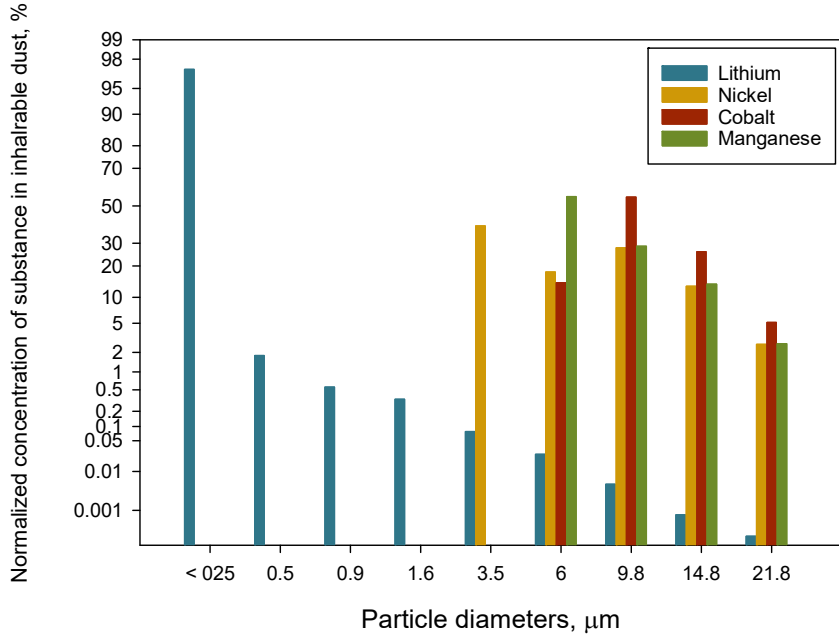
[그림 III-29] B사 활물질 포장 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)

〈표 III-19〉 양극 활물질 C사의 입자상물질 입경분포(%)

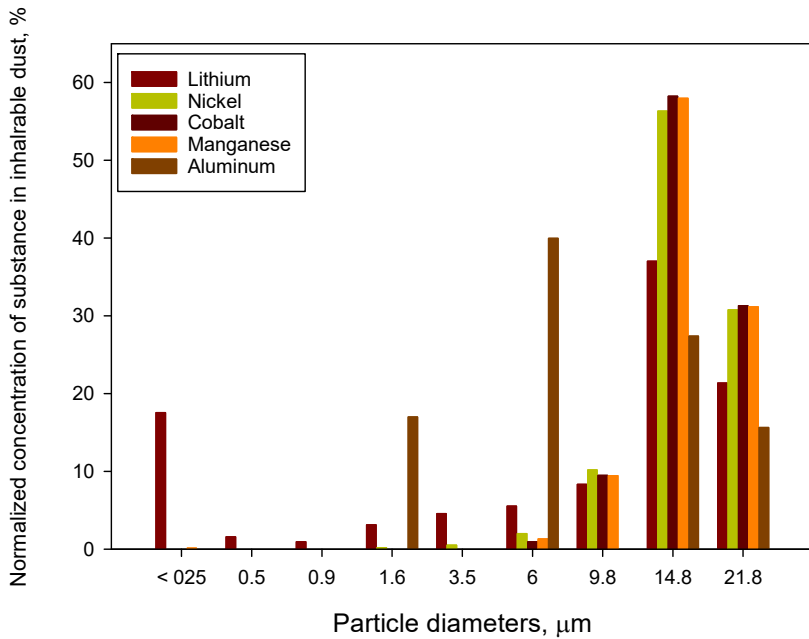
공정	물질	질량 분포		입자 수 분포	
		9.8 μm 이하	9.8 μm 초과	9.8 μm 이하	9.8 μm 초과
활물질 원료투입	리튬	61.4	38.6	99.99	0.01
	니켈	18.9	81.1	71.38	28.62
	코발트	17.3	82.7	54.82	45.18
	망간	21.1	78.9	71.51	28.49
	알루미늄	-	-	-	-
활물질 소성	리튬	21.6	78.4	99.99	0.01
	니켈	7.0	93.0	61.74	38.26
	코발트	5.8	94.2	27.14	72.86
	망간	6.0	94.0	99.25	0.75
	알루미늄	34.4	65.6	99.41	0.59
활물질 파쇄	리튬	12.9	87.1	99.99	0.01
	니켈	7.5	92.5	34.47	65.53
	코발트	6.6	93.4	26.34	73.66
	망간	6.6	93.4	26.27	73.73
	알루미늄	39.8	60.2	99.99	0.01
활물질 포장	리튬	60.2	39.8	99.99	0.01
	니켈	60.7	39.3	99.99	0.01
	코발트	70.5	29.5	99.99	0.01
	망간	70.0	30.0	99.99	0.01
	알루미늄	0.4	99.6	84.93	15.07



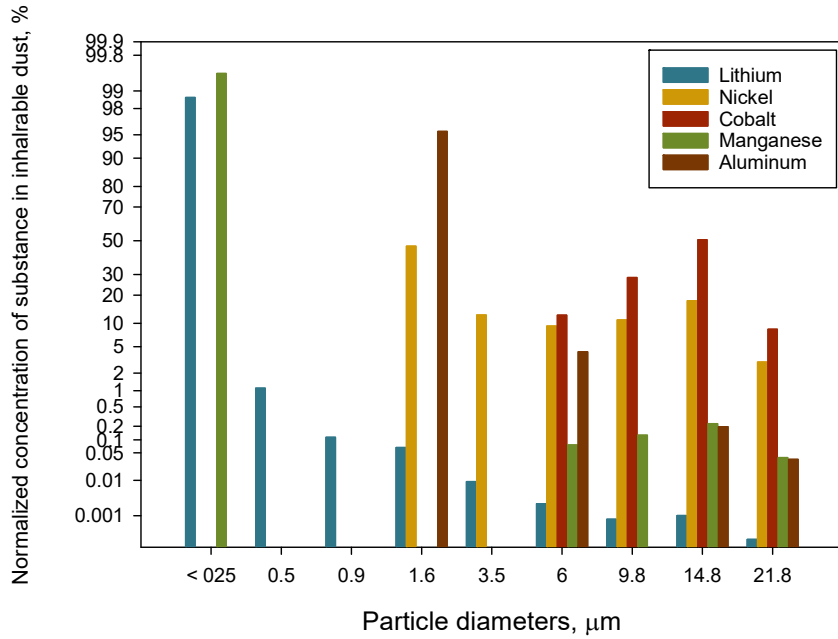
[그림 III-30] C사 활물질 원료투입 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)



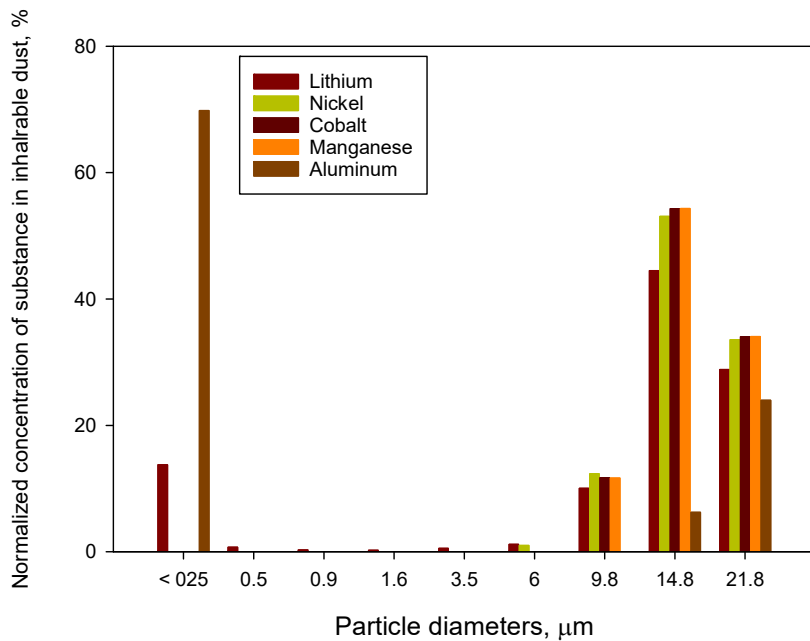
[그림 III-31] C사 활물질 원료투입 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)



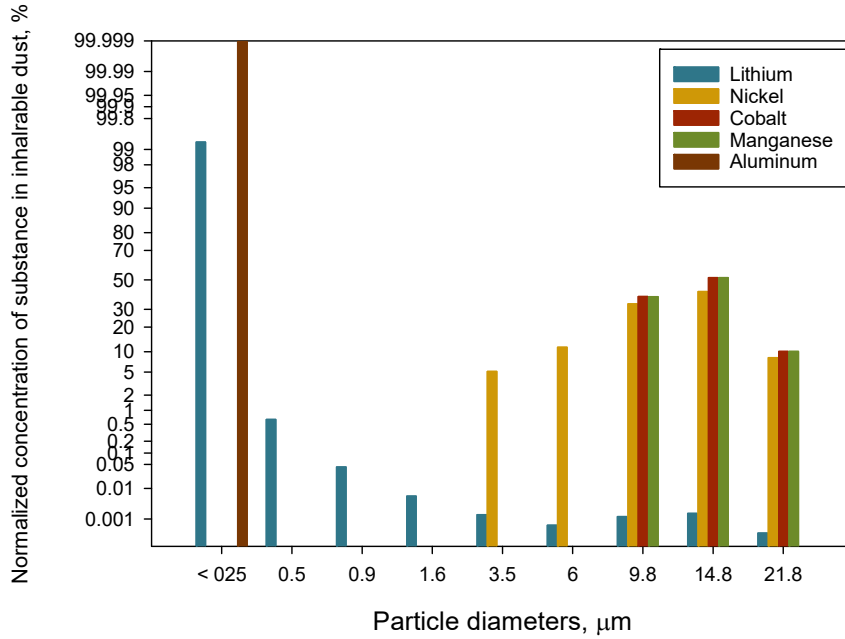
[그림 III-32] C사 활물질 소성 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)



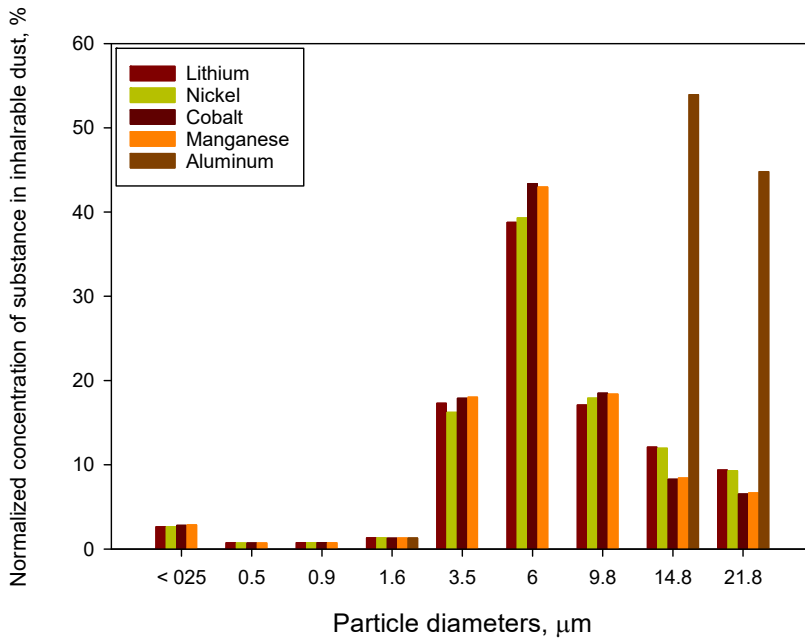
[그림 III-33] C사 활물질 소성 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)



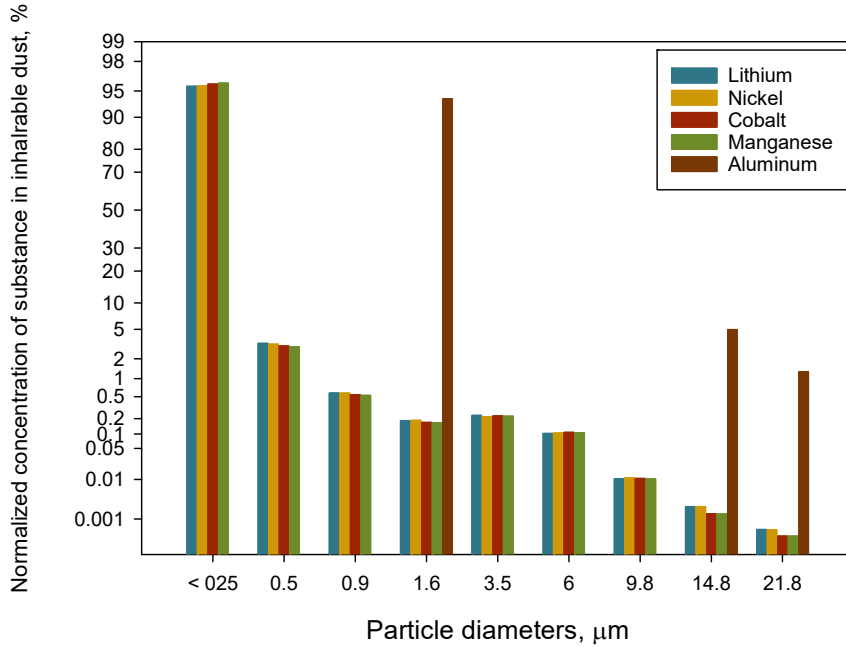
[그림 III-34] C사 활물질 파쇄 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)



[그림 III-35] C사 활물질 파쇄 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)



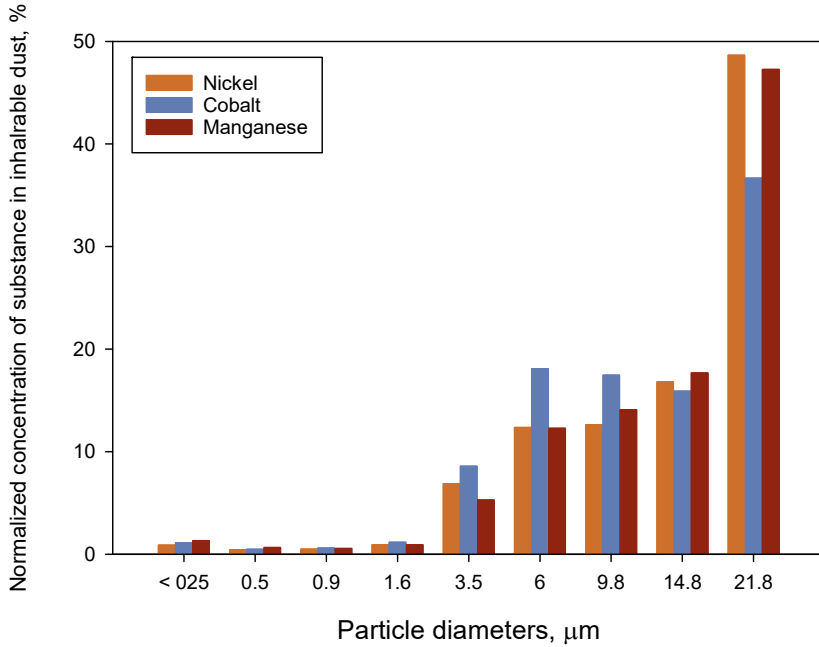
[그림 III-36] C사 활물질 포장 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)



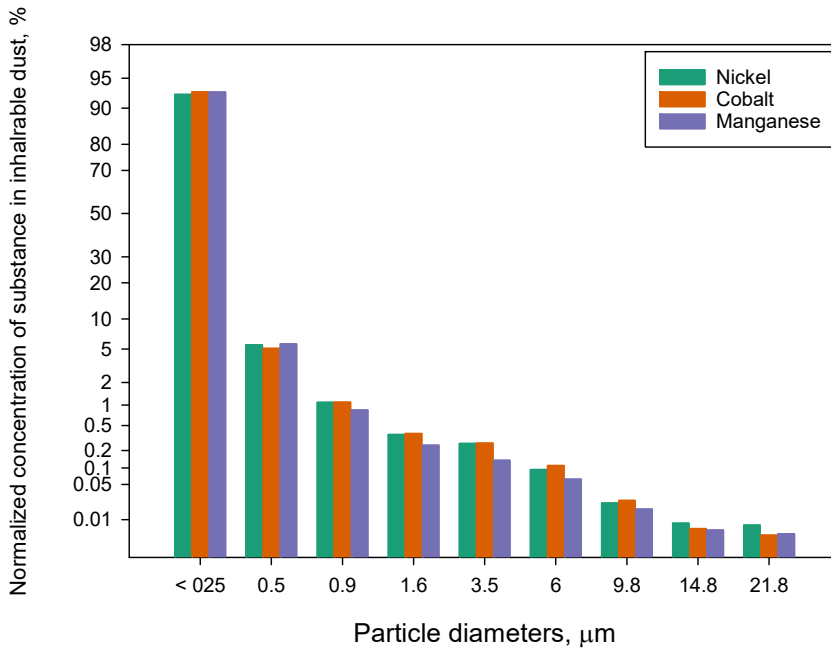
[그림 III-37] C사 활물질 포장 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)

<표 III-20> 전구체 제조 D사의 입자상물질 입경분포(%)

공정	물질	질량 분포		입자 수 분포	
		9.8 μm 이하	9.8 μm 초과	9.8 μm 이하	9.8 μm 초과
전구체 포장	니켈	34.6	65.4	99.98	0.02
	코발트	47.4	52.6	99.99	0.01
	망간	35.1	64.9	99.99	0.01



[그림 III-38] D사 전구체 포장 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)

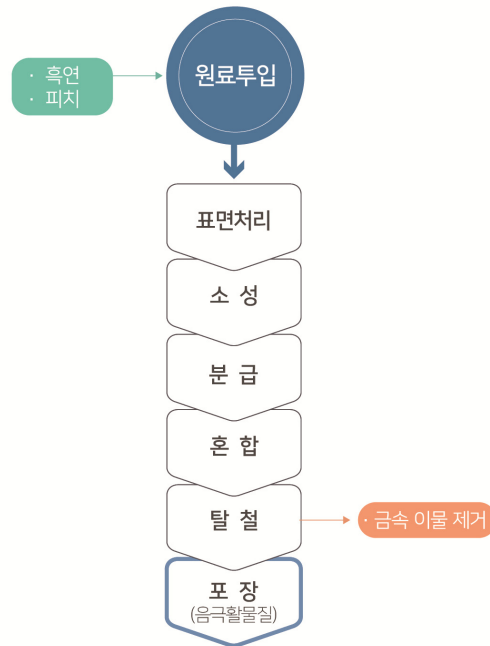


[그림 III-39] D사 활물질 포장 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)

2. 음극 활물질 산업

1) 공정 및 취급 화학물질

리튬이온전지용 음극 활물질은 탄소계(C₆)와 실리콘계(Si)로 나뉘며 탄소계는 천연흑연이나 인조흑연을 소재로 사용한다. 현재 국내의 음극 활물질 산업에서는 주로 천연흑연을 사용하며 인조흑연을 사용한 음극 활물질은 상용화를 추진 중이고 실리콘계의 소재는 소량 생산되고 있다. 천연흑연은 광산에서 채굴된 흑연(graphite, C₆)을 원료로 하여 석유계 피치(pitch)와 혼합하여 음극 활물질을 제조하여 공정 및 취급 화학물질은 그림 III-40 및 표 III-19와 같다.



[그림 III-40] 음극 활물질 산업의 공정흐름도

- 원료투입 (raw material input)
 - 흑연과 피치는 벌크백(bulk bag)에 입고되어 투입한다.
 - 천연흑연의 충·방전 효율을 증가시키기 위해 표면 코팅 재료로 석탄계 혹은 석유계 피치를 사용한다.
- 표면처리 (dry particle coating)
 - 흑연과 피치를 혼합하는 공정으로 입자 크기가 큰 흑연 표면에 작은 입자의 피치(pitch)를 붙여준다.
- 소성 (sintering)
 - 흑연 표면의 피치에 고온의 열을 가해 피치가 견고하게 흑연을 감싸도록 하는 공정이다.
- 분급 (sieving)
 - 음극 활물질의 입자 크기를 일정하게 만들기 위해 체를 이용하여 분급한다.
- 혼합 (mixing)
 - 제품의 품질 균일성을 위해 분급된 음극 활물질을 혼합해준다.
- 탈철 (magnetic separator)
 - 흑연에 존재하는 미량의 금속 성분을 제거하기 위해 자석을 사용하여 이물질을 제거한다.
- 포장 (packaging)
 - 음극 활물질은 공기와 차단할 수 있도록 설계된 이중 포장 벌크백(bulk bag)에 포장한다.

〈표 III-21〉 음극 활물질 산업의 취급 화학물질

산업분류	음극 활물질
제조물품	음극 활물질
취급 화학물질	<ul style="list-style-type: none"> • 흑연 • 석유계 피치

※ 부록 〈표 A-1〉 이차전지 산업 취급 화학물질 및 노출기준 참조

2) 작업환경 노출평가

국내 음극 활물질 산업에서는 주로 천연 흑연과 석유계 피치를 혼합하여 음극 활물질을 생산하며 국내 사업장은 천연 흑연 1개소, 인조 흑연 1개소가 있다. 본 연구에서는 천연 흑연을 사용하는 사업장 1개소를 대상으로 흑연 및 음극 활물질에 대해 평가를 진행하였다.

(1) 개인노출평가

음극 활물질 산업에서 개인 노출평가를 위해 1개 생산라인의 모든 노동자를 대상으로 총 분진과 흑연(호흡성 분진)을 동시에 평가하였으며 소성로 대정비 작업 노동자를 대상으로 총 분진과 흑연(호흡성 분진)을 함께 평가하였다(표 III-22, 그림 III-41).

평가대상 노동자의 흑연 노출 수준(n=57)은 0.01~0.74 mg/m³로 노출기준 (2 mg/m³) 미만이었으며, 제품생산 공정(n=32)과 소성로 대정비 작업(n=25)의 흑연 산술평균 농도는 각각 0.12 mg/m³, 0.16 mg/m³로 평가되었다.

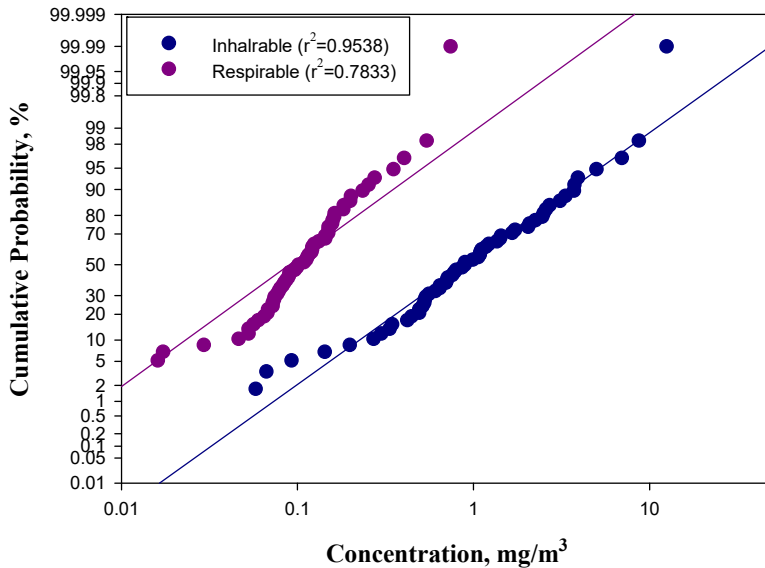
총 분진의 노출 수준(n=58)은 0.06~12.49 mg/m³(산술평균: 1.69 mg/m³, 기하평균: 0.96 mg/m³)로 약 1.7%가 노출기준(10 mg/m³)을 초과하였다. 제품생산 공정의 노출 수준(n=33)은 0.06~12.49 mg/m³, 소성로 대정비 작업(n=25)은 0.49~3.74 mg/m³로 제품생산 공정이 소성로 대정비 작업에 비해

높은 농도에 노출되고 있었다.

총 분진으로 평가할 경우, 노출기준을 초과하거나 노출기준의 50 %를 초과한 시료는 원료투입과 포장작업의 노동자에게서 평가 되었다.

〈표 III-22〉 음극 활물질 산업의 분진 노출 농도(mg/m³)

구분	공정	시료 수	산술 평균	표준 편차	기하 평균	기하 표준편차	범위
호흡성 분진	전체	57	0.14	0.12	0.10	2.20	0.01 ~ 0.74
	제품생산	32	0.12	0.13	0.09	2.45	0.01 ~ 0.74
	소성로 대정비	25	0.16	0.11	0.13	1.75	0.06 ~ 0.54
총 분진	전체	58	1.69	2.18	0.96	3.03	0.06 ~ 12.49
	제품생산	33	2.02	2.77	0.88	4.02	0.06 ~ 12.49
	소성로 대정비	25	1.27	0.87	1.07	1.76	0.49 ~ 3.74



〔그림 III-41〕 음극 활물질 산업의 흑연 노출 농도 누적분포

(2) 입자상물질 특성 평가

음극 활물질 산업에서 흑연, 석유계 피치 및 음극 활물질의 입경분포와 MMAD, MMD를 평가하기 위해 원료투입 공정, 피치혼합 공정, 소성로 투입 공정 및 포장 공정을 대상으로 분진의 크기별 분포를 평가하였다.

가) 공기역학적 질량중위직경(MMAD) 및 질량평균직경(MMD)

음극 활물질 제조 공정에서 발생하는 입자의 MMAD는 3.06~5.22 μm , MMD는 11.29~14.60 μm 로 표 III-23과 같다. 원료투입, 소성로 투입 그리고 포장 공정의 MMAD가 약 4~5 μm , MMD는 약 14 μm 로 생산하고자 하는 제품의 규격과 MMD의 크기가 유사하였으며, 피치는 흑연 입자 사이에 혼합되어 고온에서 흑연을 코팅하는 물질로 MMAD는 3.06 μm , MMD는 11.29 μm 로 다른 공정에 비해 상대적으로 크기가 작게 평가되었다. 음극 활물질 제조과정에서 입자 간 응집력, 부착력, 정전기력 등의 영향으로 입자들이 서로 뭉치는 현상이 발생하여 원료 또는 제품의 입자 크기보다 평가된 자료의 크기가 다르게 평가 될 수 있다.

〈표 III-23〉 음극 활물질 산업의 입자상 물질 발생 크기 특성(μm)

공정	공기역학적 질량중위직경	기하표준편차	질량평균직경	기하표준편차
원료투입	4.43	2.57	14.60	2.57
피치혼합	3.06	2.23	11.29	2.23
소성로 투입	5.22	3.51	14.22	3.51
포장	4.05	2.69	13.57	2.69

나) 입경분포

음극 활물질 산업의 공정 별 질량 및 입자 수 분포는 표 III-24와 같다. 원료 투입 공정의 질량 분포는 9.8 μm 이하 분진이 35.9%, 9.8 μm 를 초과하는 분진이 64.1 %이었으나 입자 수 분포에서는 9.8 μm 이하의 분진이 99.98 %이며 9.8 μm 초과 분진이 0.02 %로 평가되었다. 각 입자 크기별 분포는 그림 III-42와 III-43과 같다.

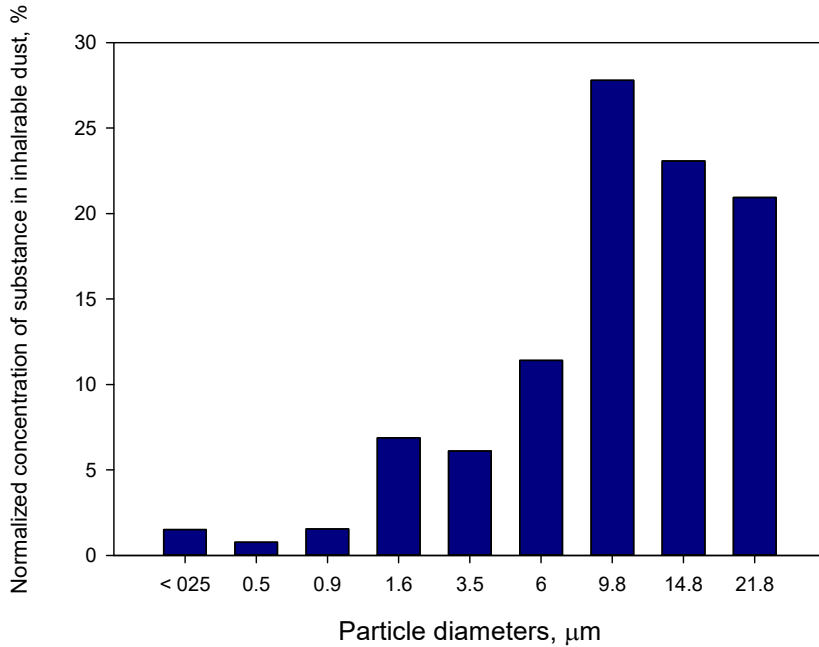
피치혼합 공정에서는 질량 분포는 9.8 μm 이하 56.8 %, 9.8 μm 초과 43.2 % (그림 III-44, 45), 소성로 투입 공정은 9.8 μm 이하 39.5 %, 9.8 μm 초과 60.5 % (그림 III-46, 47), 포장공정은 9.8 μm 이하 43.5 %, 9.8 μm 초과 56.5 % (그림 III-48, 49)이었다. 하지만 피치혼합, 소성로 투입 그리고 포장 공정의 입자 수 분포는 9.8 μm 이하의 입자가 99.9 % 이상으로 발생하고 있다.

음극 활물질 산업에서 9.8 μm 를 초과하는 입자의 질량 분포가 높으나 입자 수 분포는 9.8 μm 이하가 99.9 % 이상의 비율을 차지하는 것을 알 수 있다. 따라서 대부분의 노동자는 작업 중 호흡성 분진에 노출되어 영향을 받을 것으로 판단된다.

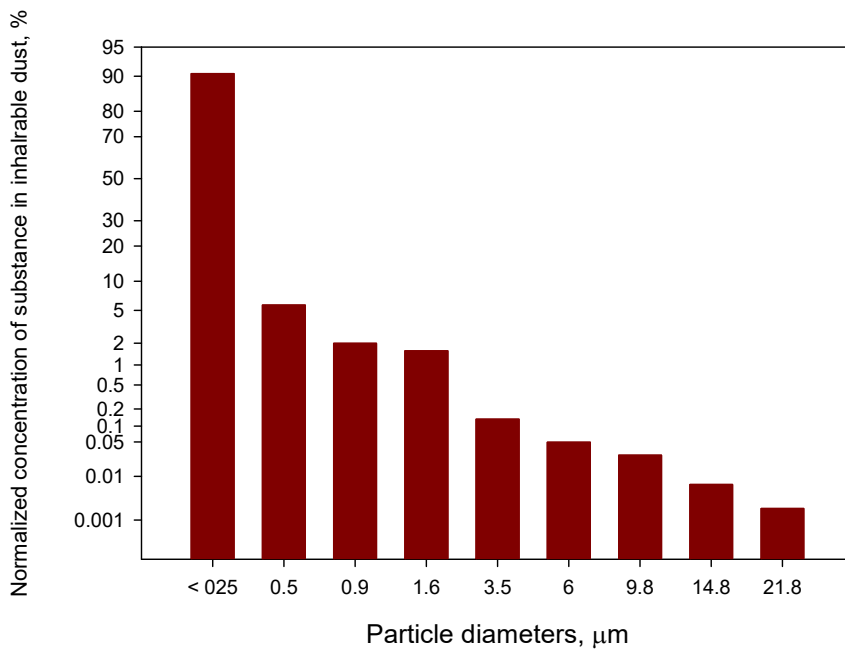
음극 활물질 사업장에서는 작업환경측정을 실시할 때 흑연(호흡성 분진)으로 노동자 노출평가를 진행하는 것이 법적 요건을 충족시키는 평가방법이지만, 사업장의 개선을 위한 관리적인 측면에서는 법적 평가 이외에 총 분진도 평가하여 관리하는 것이 필요하다고 판단된다.

〈표 III-24〉 음극 활물질 산업의 입자상물질 입경분포(%)

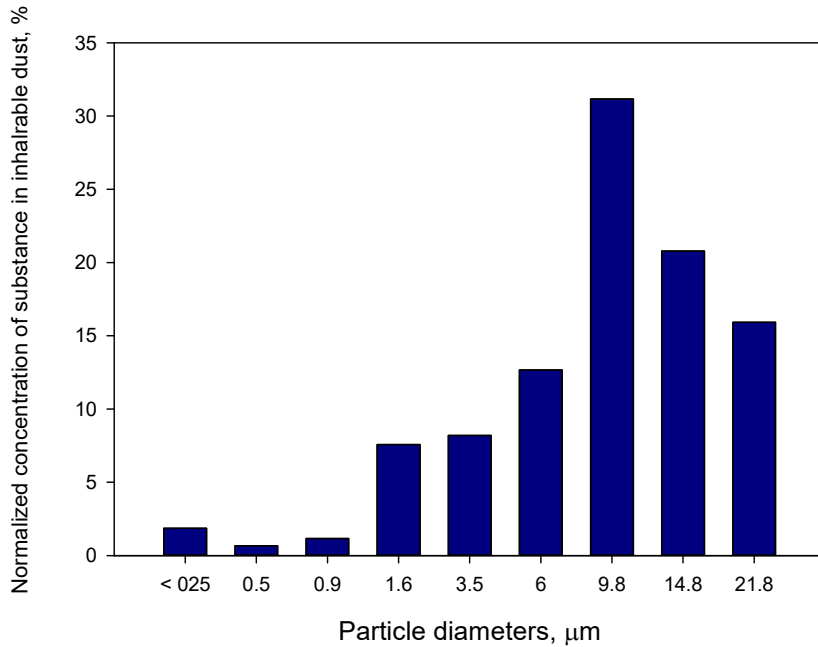
공정	질량 분포		입자 수 분포	
	9.8 μm 이하	9.8 μm 초과	9.8 μm 이하	9.8 μm 초과
원료투입	35.9	64.1	99.98	0.02
피치혼합	56.8	43.2	99.99	0.01
소성로 투입	39.5	60.5	99.91	0.09
포장	43.5	56.5	99.98	0.02



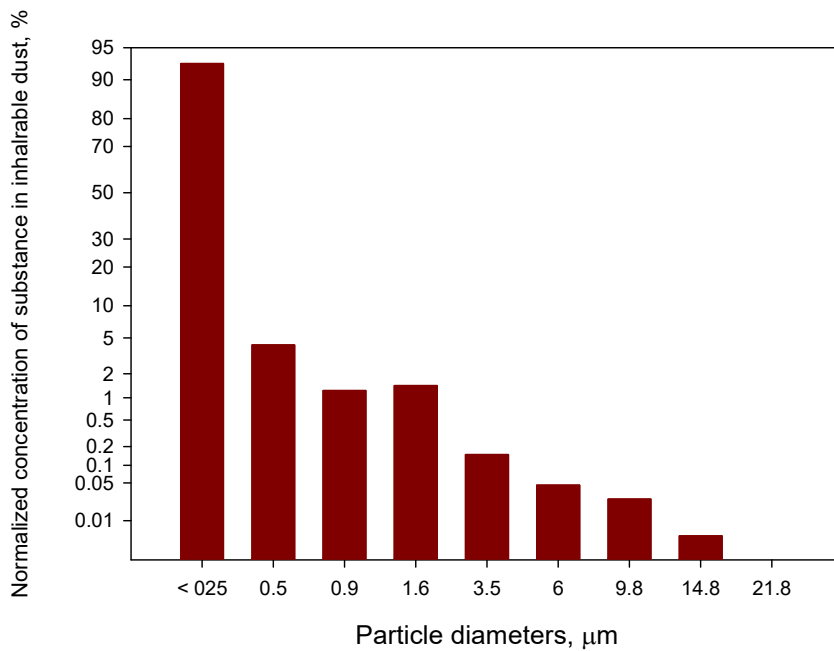
[그림 III-42] 원료투입 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)



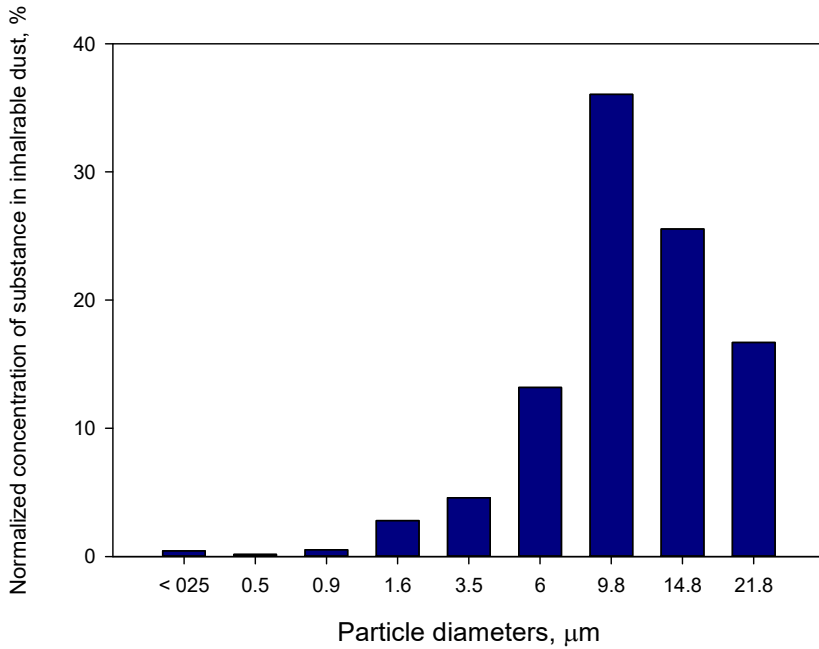
[그림 III-43] 원료투입 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)



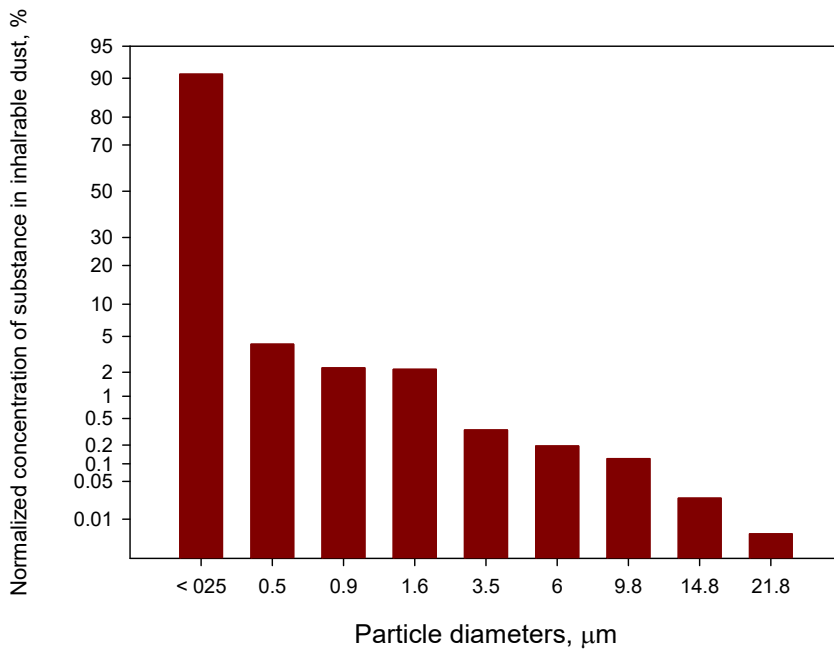
[그림 III-44] 피치혼합 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)



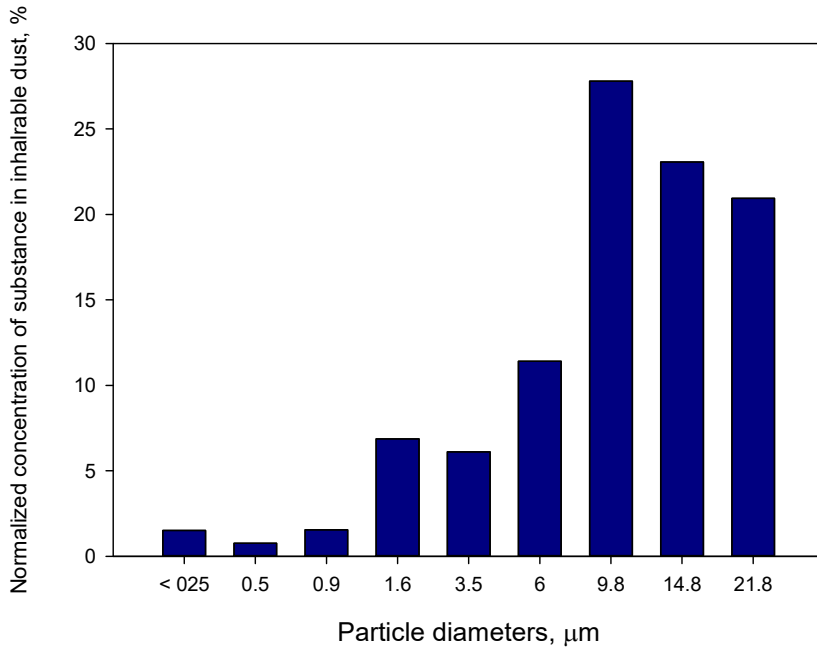
[그림 III-45] 피치혼합 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)



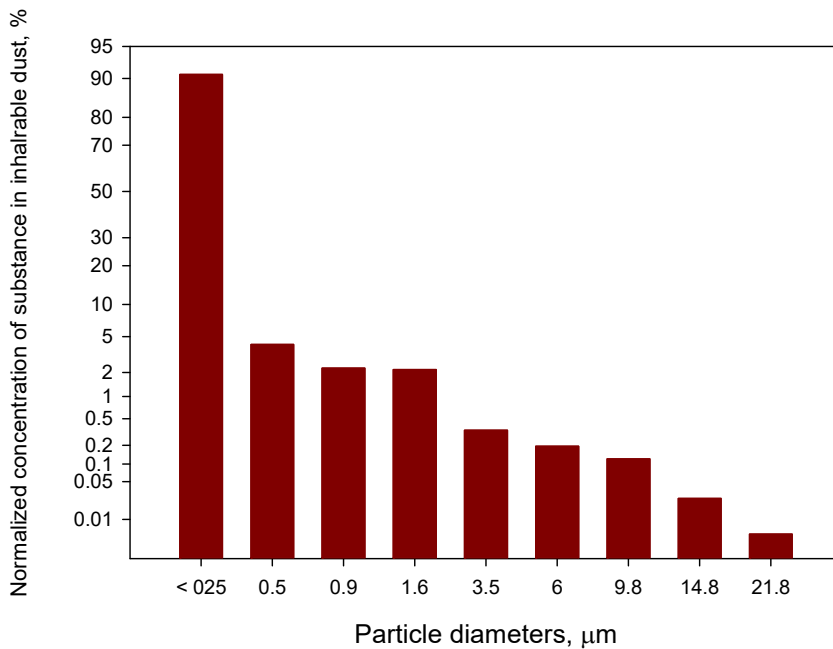
[그림 III-46] 소성로 투입 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)



[그림 III-47] 소성로 투입 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)



[그림 III-48] 포장 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)

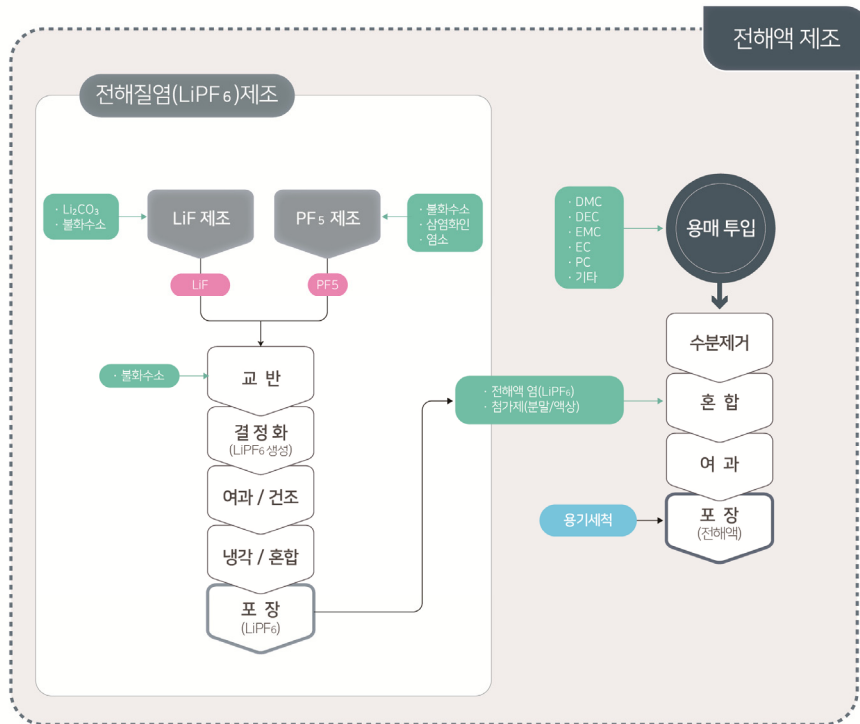


[그림 III-49] 포장 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)

3. 전해액 산업

1) 공정 및 취급 화학물질

전해액은 카보네이트(carbonate) 용매(70~80%), 육불화인산리튬염(lithium hexafluorophosphate, LiPF_6) 등 전해질 염(10~20%), 그리고 첨가제(0.1~0.2%)로 구성된다. 육불화인산리튬염은 수산화리튬 혹은 탄산리튬에 불화수소와 다양한 용매를 혼합하여 제조하고 첨가제(additive)는 유기용매나 다양한 리튬염(LiFSI , LiPO_2F_2 , LiDFOP , LiBOB 등)이 사용된다. 전해액 산업의 공정과 취급 화학물질은 표 III-25 및 그림 III-50과 같다.



[그림 III-50] 전해액 산업의 공정흐름도

■ 육불화인산리튬염(LiPF₆) 제조공정

- 플루오르화리튬(LiF) 제조 (lithium fluoride, LiF)
 - 탄산리튬과 불화수소를 혼합하여 LiF를 제조한다.
- 오불화인 제조 (phosphorus pentafluoride, PF₅)
 - 불화수소, 삼염화인, 염소(Cl₂)를 혼합하여 기체상태의 PF₅를 제조한다.
- 교반 (agitation)
 - 반응조에서 LiF와 불화수소를 교반하며 혼합한다. 반응 시간동안 PF₅는 일정하게 공급을 유지한다.
- 결정화 (crystallization)
 - 슬러리 형태의 LiF와 기체상태의 PF₅이 혼합되며 LiPF₆가 결정으로 석출된다.
- 여과/건조 (filtration/drying)
 - 여과필터를 사용하여 LiPF₆를 걸러내고 건조시킨다.
- 냉각/혼합 (cooling/mixing)
 - LiPF₆를 냉각한 뒤 제품이 균일한 상태를 유지하도록 혼합한다.
- 포장 (packaging)
 - 포장 작업은 개별 드라이 룸에서 캐니스터 혹은 바틀 단위로 포장한다.

■ 전해액 제조공정

○ 용매투입 (solvent input)

- 용매는 각각 개별탱크에 저장되어 있으며 라인을 통해 공정에 주입된다.

○ 수분제거 (moisture filter)

- 각각의 원료탱크에 수분제거용 필터가 연결되어 있어 수분을 제거한 뒤 혼합 탱크로 이송한다.

○ 혼합 (mixing)

- 용매에 전해액염(LiPF₆)과 첨가제(분말/액상)를 혼합하는 공정이다.
- 전해액염(LiPF₆)은 주로 질소퍼징 된 압력용기로 입고되어 호퍼에서 바로 투입된다.
- 첨가제는 질소 퍼지된 라인으로 투입되는데 분말의 경우 글로브박스를 사용하여 액상은 진공펌프를 사용한다.

○ 여과 (filtration)

- 전해액의 이물질 제거를 위해 마이크로 필터를 통해 여과한다.

○ 포장 (packaging)

- 캐니스터에 질소 퍼지하여 포장한다.

○ 세척 (cleaning)

- 캐니스터는 카보네이트 용매로 세척하여 재사용한다.

〈표 III-25〉 전해액 산업의 취급 화학물질

산업분류	전해액	
제조물품	전해질염(LiPF ₆)	전해액
취급 화학물질	• 수산화리튬	• 육불화인산리튬염(LiPF ₆)
	• 탄산리튬	• 디메틸카보네이트(DMCD)
	• 불화수소	• 디에틸카보네이트(DEC)
	• 삼염화인	• 에틸메틸카보네이트(EMC)
	• 염소	• 에틸렌카보네이트(EC)
		• 프로필렌카보네이트(PC)
	• 첨가제(리튬염 혹은 용매)	

※ 부록 〈표 A-1〉 이차전지 산업 취급 화학물질 및 노출기준 참조

2) 작업환경 노출평가

전해액 산업은 전해질 염을 제조하는 공정과 전해액을 제조하는 공정으로 구분할 수 있다. 현재 국내에서 가장 많이 사용되는 전해질 염은 육불화인산 리튬염(LiPF₆)이며 국내 1개 업체에서 제조 중이나 현재 생산라인이 중단되어 노출평가를 진행하지 못하였으며, 첨가제로 사용되는 리튬염을 제조하는 사업장 1개소와 전해액을 제조하는 사업장 1개소를 대상으로 작업환경을 평가하였다.

전해액 산업에서는 카보네이트 계열 용매 중 사슬형 카보네이트인 디메틸카보네이트(DMC, dimethyl carbonate), 에틸메틸카보네이트(EMC, ethylmethyl carbonate), 디에틸카보네이트(DEC, diethylcarbonate)를 대상으로 평가를 진행하였다.

(1) 개인노출평가

전해액 산업은 전해액 제조업체와 전해질 염 제조업체를 대상으로 사슬형 카보네이트 용매(DMC, EMC, DEC)를 평가하였고 그 결과는 표 III-26 및

그림 III-51과 같다.

전해액 산업의 DMC 취급 노동자의 노출 수준(n=77)은 0.07~146.4 ppm(산술평균: 30.20 ppm, 기하평균: 8.98 ppm)로 나타났다. 제품생산 공정에서 일부 노동자에게 높은 농도 수준을 보였으나, 전반적으로 제품생산 공정(산술평균: 12.40 ppm, 기하평균: 3.27 ppm)보다 용기 세척(산술평균: 53.90 ppm, 기하평균: 34.60 ppm)에서 높은 노출 수준을 보였다. 이는 캐니스터(canister) 용기 세척 시 DMC가 주요 세척 용매로 사용되고 있는 것이 원인이라 판단된다.

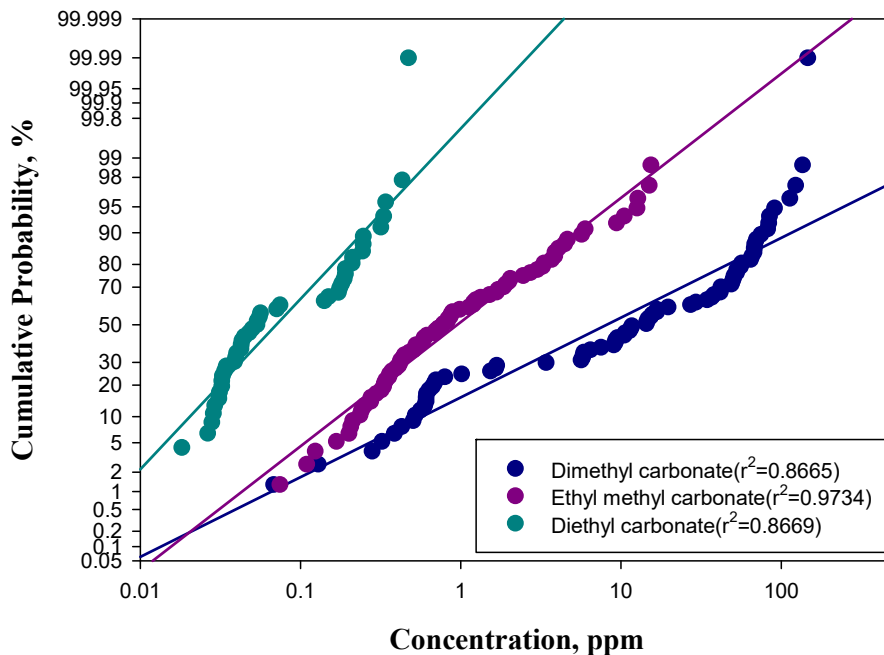
EMC의 노동자 노출 수준(n=77)은 0.07~40.8 ppm(산술평균: 2.69 ppm, 기하평균: 1.00 ppm)으로 나타났으며 해당 물질은 제품생산 공정이 용기세척 공정보다 높은 농도 수준을 보였다. 이는 EMC가 제품 생산 시 사용되며 세척 용매로 사용되지 않기 때문이다. 다만 캐니스터(canister) 용기 내부에 제품의 일부가 남아있어 세척 시 일부 노출이 되는 것으로 판단된다.

DEC는 제품생산 시 함유량 및 사용 빈도가 낮기 때문에 취급량이 다른 물질에 비해 적었으며, 노동자의 노출 수준(n=46)도 0.004~0.5 ppm으로 가장 낮은 수치를 나타냈다.

카보네이트 용매는 현재 국내·외에서 노출기준이 마련되어 있지 않은 물질로 법적 관리대상 물질에서 제외된다. 유럽화학물질청(European Chemicals Agency, ECHA)에서는 작업자 무영향 수준(Derived No Effect Level for worker, wDNEL)으로 DMC 9.48 ppm (34.9 mg/m³), EMC 2.42 ppm (10.3 mg/m³), DEC 14.46 ppm (69.792 mg/m³)을 제시하고 있다. 다만 제시된 wDNEL 값은 무영향 관찰용량(No Observed Adverse Effect Level, NOAEL)을 사용하여 계산된 값이기 때문에 노출수준과 직접 비교하는 수치로 사용할 수는 없으며 참고 기준치로 제시하고자 한다.

〈표 III-26〉 전해액 산업의 카보네이트 노출 농도(ppm)

구분	공정	시료 수	산술 평균	표준 편차	기하 평균	기하 표준편차	범위
DMC	전체	77	30.20	35.50	8.98	7.45	0.07 ~ 146.4
	제품생산	44	12.40	29.20	3.27	5.22	0.28 ~ 146.4
	용기세척	33	53.90	28.80	34.60	5.06	0.07 ~ 123.1
EMC	전체	77	2.69	5.55	1.00	3.74	0.07 ~ 40.8
	제품생산	44	4.37	6.90	2.15	3.19	0.30 ~ 40.8
	용기세척	33	0.44	0.31	0.36	1.94	0.07 ~ 1.5
DEC	전체	46	0.12	0.12	0.07	2.82	0.004 ~ 0.5
	제품생산	15	0.26	0.10	0.25	1.41	0.15 ~ 0.5
	용기세척	31	0.05	0.04	0.04	2.01	0.004 ~ 0.3



[그림 III-51] 전해액 산업의 카보네이트 노출 농도 누적분포

4. 분리막 산업

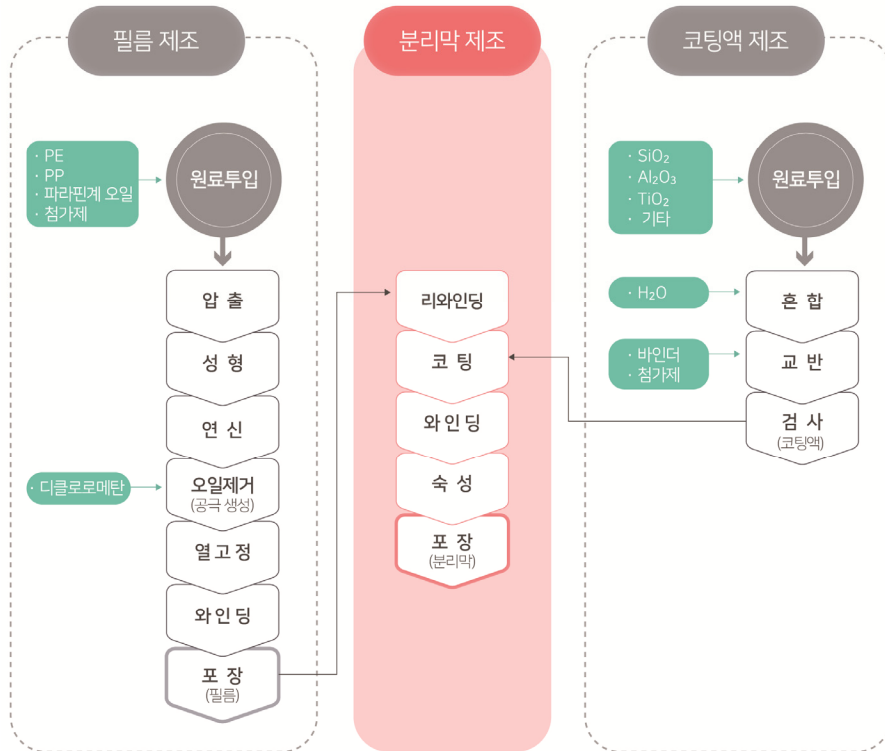
1) 공정 및 취급 화학물질

분리막은 리튬이온이 이동할 수 있는 미세기공이 있는 다공성 폴리올레핀계의 필름으로 국내에서는 대부분 습식법을 사용하여 필름을 제조한다. 습식법은 폴리에틸렌과 폴리프로필렌 등의 고분자 소재 원료에 파라핀계 오일 또는 왁스를 혼합하여 필름을 제조하고 디클로로메탄 수조에서 오일이나 왁스를 제거하여 기공을 생성하는 방법이다. 배터리용 분리막은 제조된 필름의 경도를 높이기 위해 코팅액을 도포하여 사용한다. 분리막 산업의 공정은 그림 Ⅲ-52와 같으며 취급 화학물질은 표 Ⅲ-27과 같다.

〈표 Ⅲ-27〉 분리막 산업의 취급 화학물질

산업분류	분리막	
제조물품	배터리 분리막 필름	
취급 화학물질	소재	부재
	• 폴리에틸렌	• 디클로로메탄
	• 폴리프로필렌	• 바인더(영업비밀)
	• 파라핀계 오일	• 첨가제(영업비밀)
	• 보헤마이트	
	• 산화알루미늄	

※ 부록 〈표 A-1〉 이차전지 산업 취급 화학물질 및 노출기준 참조



[그림 III-52] 분리막 산업의 공정흐름도

- 압출 (extrusion)
 - 혼합기에 열을 가하며 원료를 용융수지로 만든 후 스크류 타입의 압출기로 용융수지를 혼합하며 압출기 후단으로 밀어준다.
- 성형 (casting)
 - 용융된 수지는 얇은 시트 형태로 밀려나와 냉각 롤에서 고체화되며 필름 형태로 성형된다.
 - 공정 후단에서 방사선 장치를 사용해 필름의 두께를 검사한다.
- 연신 (stretching)
 - 롤러를 사용하여 필름을 길이방향과 너비방향으로 연신 작업을 반복한다.

- 오일제거 (extraction)
 - 디클로로메탄을 사용하여 필름에서 왁스를 제거하여 기공을 만들어 주는 공정이다.
 - 수조의 온도는 일정온도 이하로 관리하며 증기화 된 디클로로메탄은 상부의 배관을 통해 흡착탑으로 이송하여 회수한다.
- 열고정 (annealing)
 - 왁스가 제거된 필름이 상온에서 열수축이 일어나는 것을 방지하기 위해 한번 더 연신 후 수축한 후 와인더를 사용해 롤 형태로 감아준다.
 - 제조된 분리막은 바로 제품화 하거나 코팅 공정을 거쳐 제품화한다.
- 와인딩 (winding)
 - 방사선 장비로 두께를 검사하고 필름을 롤 형태로 감아준다.
- 리와인딩 (rewinding)
 - 롤 형태의 필름을 풀어주는 공정이다.
- 코팅 (coating)
 - 코팅액을 필름에 도포한 뒤 열처리를 한다.
- 와인딩 (winding)
 - 방사선 장비로 두께를 검사하고 불량을 제거하며 필름을 다시 롤 형태로 감아준다.
- 숙성 (aging)
 - 제품의 수분을 제거하고 원료를 경화시키기 위해 일정 온·습도에서 보관한다.
- 포장 (packaging)
 - 제품에 규격에 따라 재단한 뒤 포장한다.

■ 코팅액 제조

- 원료투입 (raw material input)
 - 세라믹 코팅에 사용되는 코팅제는 실리카, 알루미나, 이산화티타늄 등이 주로 사용된다(김정환 외, 2016).
 - 세라믹 코팅 공정의 원료는 약 10~20 kg의 포장용기에 입고되어 투입한다.
- 혼합 (mixing)
 - 투입된 원료와 물을 교반하며 혼합한다.
- 교반 (agitation)
 - 코팅제를 경화시키는 용도로 바인더를 첨가제로 투입한다.
 - 코팅제와 바인더를 교반시키며 혼합하여 코팅 공정에 투입한다.
- 검사 (inspection)
 - 제조된 코팅액을 검사한 후 코팅 공정으로 이송한다.

2) 작업환경 노출평가

분리막 산업은 폴리에틸렌(polyethylene)이나 폴리프로필렌(polypropylene)을 원료로 하여 다공성 필름을 제조한 후 세라믹 코팅을 하는 공정으로 되어 있다. 국내 분리막 산업에서는 다공성 필름을 제조하기 위해 폴리에틸렌이나 폴리프로필렌에 파라핀계 왁스나 오일을 첨가하여 필름을 제조한 후 이를 디클로로메탄 수조에 침전시켜 왁스나 오일을 녹여내는 습식 방법을 사용한다. 본 연구에서는 분리막 2개 사업장을 대상으로 디클로로메탄과 세라믹 코팅의 원료인 산화알루미늄을 대상으로 평가를 진행하였다.

(1) 개인노출평가

분리막 산업에서는 필름 및 분리막 제조 공정에서 디클로로메탄의 노출 농도와 코팅액 제조 공정에서 코팅액의 원료로 사용되는 알루미늄의 노출 농도를 평가하였다.

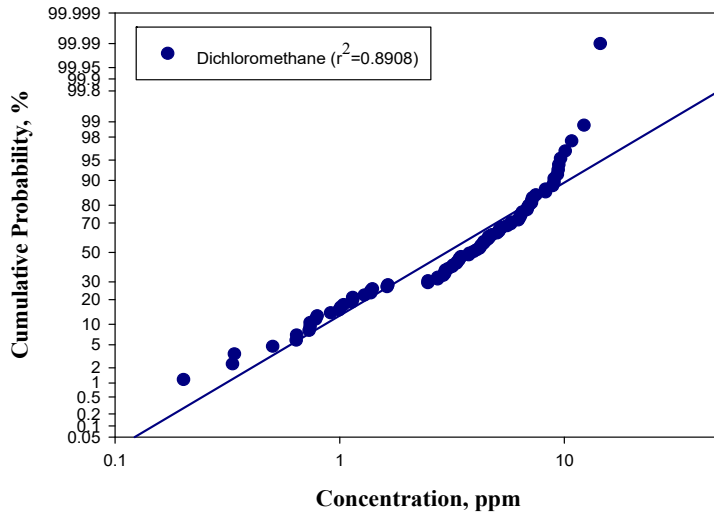
디클로로메탄의 노출 수준을 파악하기 위해 필름 제조 및 와인딩(winding) 공정 노동자의 개인시료 및 디클로로메탄 수조 근처에서 지역시료를 평가한 결과 디클로로메탄의 노출 농도는 모두 노출기준(50 ppm) 미만이었다(표 III-28, 그림 III-53).

디클로로메탄 평가 결과 개인시료의 농도수준(n=85)은 0.202~14.44 ppm (산술평균: 4.40 ppm, 기하평균: 3.12 ppm), 지역 시료(n=35)는 0.002~31.95 ppm (산술평균: 4.11 ppm, 기하평균: 0.37 ppm)로 나타났다. 디클로로메탄의 개인시료 농도는 노출기준(50 ppm)에 비해 낮은 수치를 보였다.

지역 시료의 경우 작업환경에 따라 농도 수준에 변이가 있었다. 디클로로메탄 수조를 별도의 공간 안에 위치시킨 경우 농도는 0.002~2.11 ppm이고 그렇지 않은 작업 환경에서의 농도는 21.07~30.95 ppm으로 디클로로메탄 수조를 배치한 환경에 따른 차이가 있었다.

〈표 III-28〉 분리막 산업의 디클로로메탄 노출 농도(ppm)

공정	시료 수	산술 평균	표준 편차	기하 평균	기하 표준편차	범위
개인	85	4.40	3.14	3.12	2.59	0.202 ~ 14.44
지역	35	4.11	9.02	0.37	15.49	0.002 ~ 30.95



[그림 III-53] 분리막 산업의 디클로로메탄 노출 농도 누적분포

코팅액 제조 공정에서 알루미늄의 노출 수준을 파악하기 위하여 코팅액 원료를 투입하는 노동자를 대상으로 14개의 시료를 채취하였다. 알루미늄의 노출 농도는 0.28~3.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: 1.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: 0.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 나타났다(표 III-29).

<표 III-29> 분리막 산업의 알루미늄 노출 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

공정	시료 수	산술 평균	표준 편차	기하 평균	기하 표준편차	범위
원료 투입	14	1.14	1.21	0.73	2.58	0.28 ~ 3.77

(2) 입자상물질 특성 평가

분리막 산업에서는 코팅액 원료투입 공정에서 MMAD, MMD, 입경 크기에 따른 농도 및 입자 수 분포를 평가하였다.

가) 공기역학적 질량중위직경(MMAD) 및 질량평균직경(MMD)

분리막 산업의 코팅액 원료투입 공정에서 발생하는 입자의 MMAD와 MMD를 분석한 결과는 표 III-30, III-31과 같다. 원료로 사용되는 알루미늄의 MMAD는 1.96 μm , 1.88 μm 이었으며 MMD는 5.11 μm , 6.67 μm 로 크기로 발생되고 있었다.

〈표 III-30〉 분리막 산업의 공기역학적 질량중위직경(μm)

사업장	공정	공기역학적 질량중위직경	기하표준편차
A	원료투입	1.96	1.46
B	원료투입	1.88	0.18

〈표 III-31〉 분리막 산업의 질량평균직경(μm)

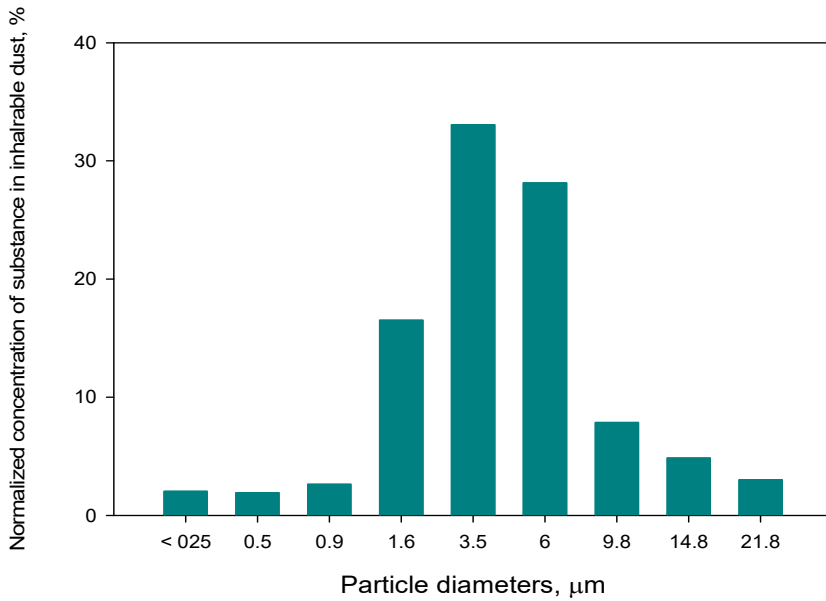
사업장	공정	질량평균직경	기하표준편차
A	원료투입	5.11	0.23
B	원료투입	6.74	1.62

나) 입경분포

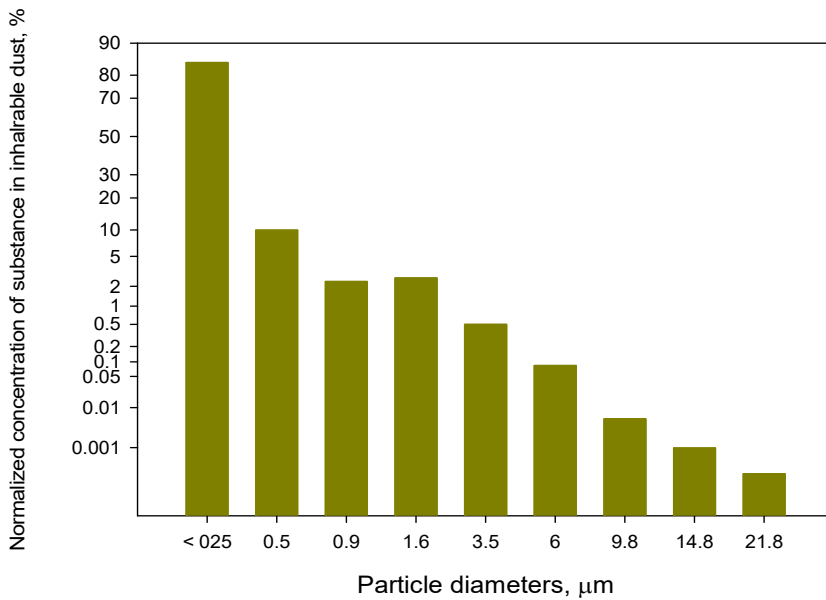
분리막 산업의 코팅액 원료투입 공정에서는 알루미늄을 주요 원료로 사용하고 있었으며 사업장에 따라 사용하는 원료는 상이하였으나 입경분포에 따른 질량과 입자 수의 결과는 표 III-32와 그림 III-54~57과 같다. 코팅액 원료의 질량 분포는 약 85 % 이상이 9.8 μm 이하이며, 그림 III-54는 1.6~6 μm , 그림 III-56은 1.6~9.8 μm 의 비율이 다른 입자 크기보다 상대적으로 높게 평가되었다. 이는 배터리 제조에 필요한 입자 크기의 특성이 반영된 것으로 판단된다. 입자 수 분포는 평가대상 사업장 모두 9.8 μm 이하의 입자가 99.9 % 이상으로 평가되었다.

〈표 III-32〉 분리막 산업의 입자상물질 입경분포(%)

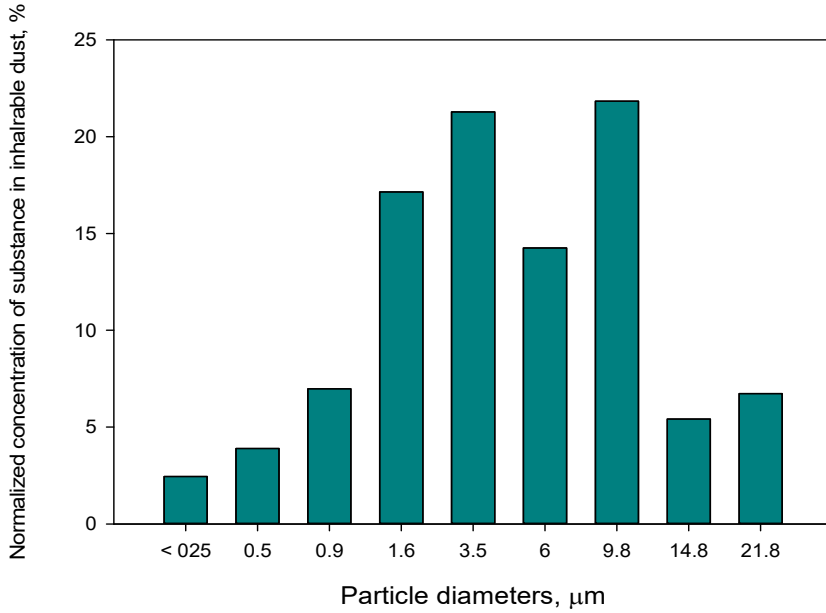
공정	질량 분포		입자 수 분포	
	9.8 μm 이하	9.8 μm 초과	9.8 μm 이하	9.8 μm 초과
원료투입(A사)	92.1	7.9	99.99	0.01
원료투입(B사)	87.8	12.2	99.99	0.01



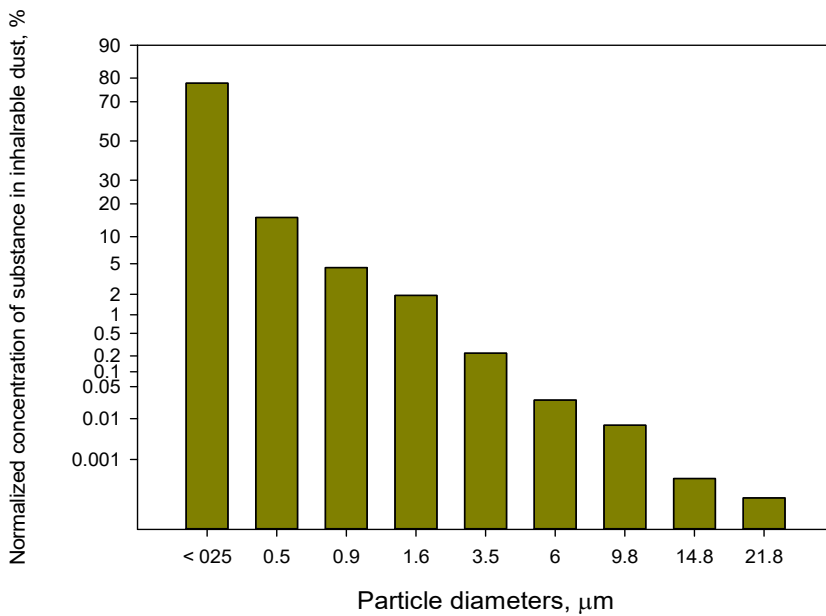
[그림 III-54] 원료투입 공정(A사)의 알루미늄 입경 크기별 질량 분포(%)



[그림 III-55] 원료투입 공정(A사)의 알루미늄 입경 크기별 입자 수 분포(%)



[그림 III-56] 원료투입 공정(B사)의 알루미늄 입경 크기별 질량 분포(%)



[그림 III-57] 원료투입 공정(B사)의 알루미늄 입경 크기별 입자 수 분포(%)

5. 리튬 산업

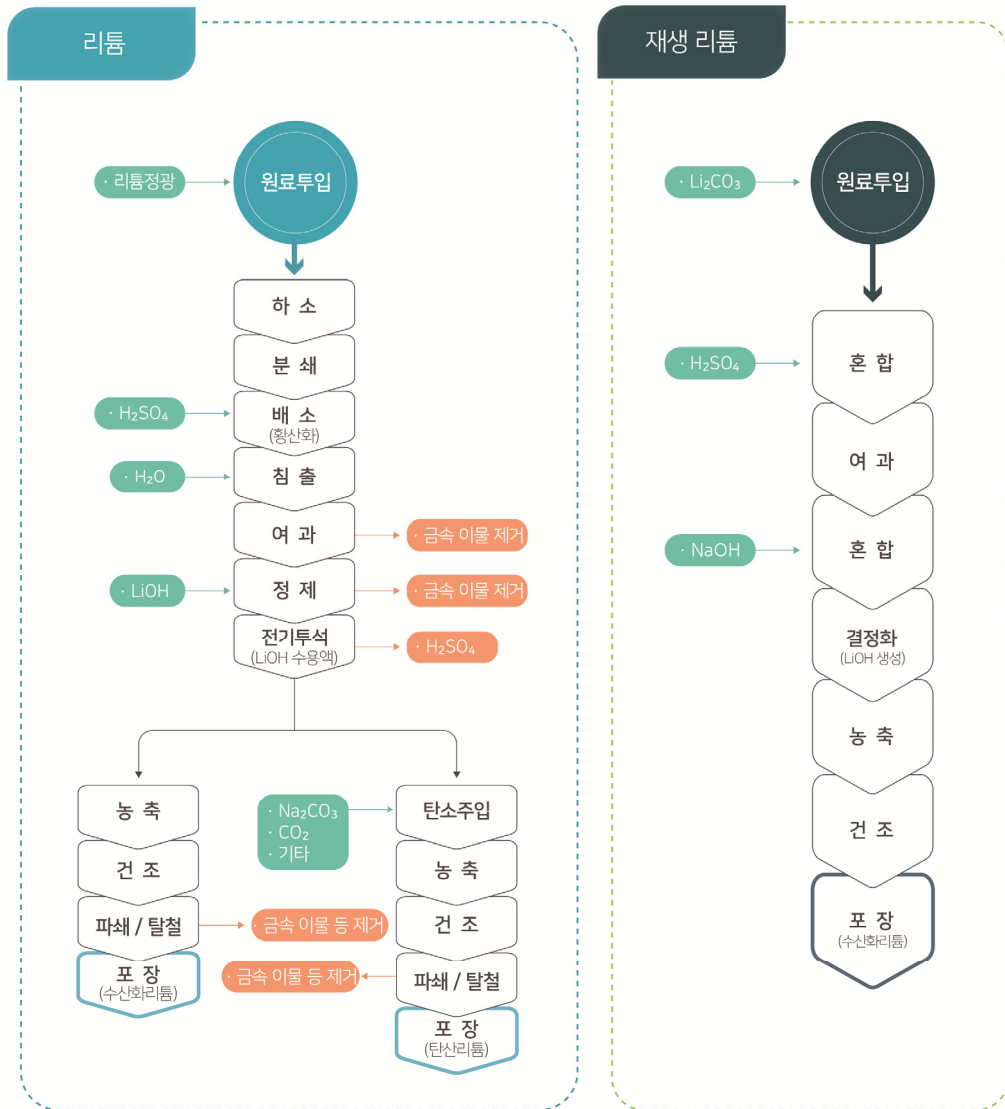
1) 공정 및 취급 화학물질

리튬을 회수하는 기술은 경암형(hard rock), 염수형(brine), 점토형(rich clay)으로 구분할 수 있다. 경암형은 광석에서 리튬을 회수하는 방법이며 호주와 중국에서 주로 생산되고 있으며 현재 국내에서도 스포듀민(spodumene, $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$) 정광에서 리튬을 회수하여 수산화리튬과 탄산리튬을 제조하고 있다. 염수형 방식은 염수를 증발·농축하여 리튬을 침출하는 방법으로 국내에서는 상용화 준비 단계에 있다. 점토형은 아직 상업화된 처리방법이 아니며 분쇄 과정을 제외한 나머지 공정은 경암형과 유사 할 것으로 예상된다(김대원 외, 2019). 현재 국내에서 리튬을 생산하는 공법은 경암형으로 공정 및 취급 화학물질은 아래 표 Ⅲ-33 및 그림 Ⅲ-58과 같다. 경암형 공법을 이용한 공정 이외에 일부 재생 산업에서 회수된 리튬을 가공하여 수산화리튬 형태로 제조하고 있다.

〈표 Ⅲ-33〉 리튬 산업의 취급 화학물질

산업분류	제조물품	취급 화학물질
리튬	리튬 (수산화리튬, 탄산리튬 등)	• 스포듀민 정광
		• 황산
		• 수산화나트륨
		• 탄산나트륨
		• 수산화리튬
		• 탄산리튬
		• 액화탄소

※ 부록 〈표 A-1〉 이차전지 산업 취급 화학물질 및 노출기준 참조



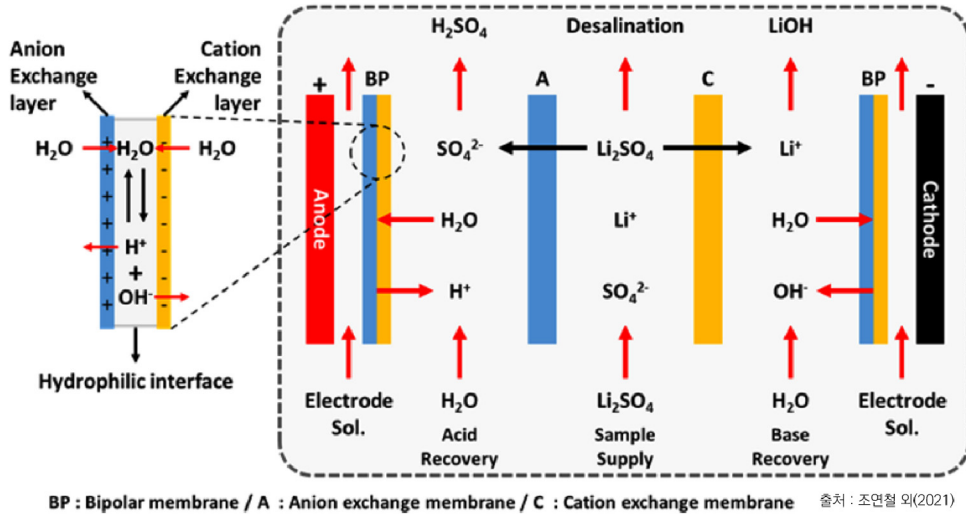
[그림 III-58] 리튬 산업의 공정흐름도

(a) 리튬 제조(리튬 정광 원료)

○ 원료투입 (raw material input)

- 리튬정광(스포듀민 분말)은 원료창고에서 컨베이어 라인으로 투입된다.

- 하소 (calcination)
 - 스포듀민 분말이 황산과 잘 반응하도록 광석의 구조를 풀어주기 위해 가열하여 알파-스포듀민에서 베타-스포듀민으로 형태를 변환시킨다. 베타형은 황산에 쉽게 분해되며 분쇄작업이 용이하다(김대원 외 2019).
 - 가열된 베타-스포듀민 분말을 냉각한다.
- 배소 (roasting and sulfation)
 - 베타-스포듀민이 황산에 잘 용해될 수 있도록 분쇄한 후 황산과 혼합하여 슬러지 형태로 만든다.
- 침출 (leaching)
 - 슬러지에 물을 가하여 액상의 황산리튬 (Li_2SO_4)을 만든다.
- 여과 (filtration)
 - 침출 공정에서 생성된 침전물은 잔사로 분리하여 처리하고 여액은 정제 공정으로 이송한다.
- 정제 (purification)
 - 수산화리튬을 투입하여 용액의 리튬 함량을 높이는 치환법을 이용하여 이 물질을 제거한다.
- 전기투석 (electrodialysis)
 - 전기투석막 (bipolar membrane)을 이용하여 황산리튬 용액을 수산화리튬 용액으로 전환시킨다.
 - 황산리튬 용액과 물을 투입하고 전극에 전류를 흘려주면 이온교환막을 통해 Li^+ 와 SO_4^- 로 분리가 되고 바이폴라 막에서 물이 H^+ 와 OH^- 로 분해된다. Li^+ 는 양이온 교환 막을 통과하여 OH^- 와 결합함으로써 수산화리튬 (LiOH)이 제조되고, SO_4^- 는 음이온 교환 막을 통과하여 H^+ 와 결합함으로써 황산이 만들어진다(그림 III-59)(조연철 외 2021).



[그림 III-59] 전기투석막을 이용한 수산화리튬 제조

- 탄소주입 (carbonation)
 - 탄산리튬을 제조하기 위한 공정으로 수산화리튬 용액에 액화탄소를 주입 후 교반시켜 혼합한다.
- 농축 (concentration)
 - 수산화리튬 및 탄산리튬을 증발·농축시킨다.
- 건조 (drying)
 - 농축된 수산화리튬 및 탄산리튬을 건조하여 분말 형태로 만든다.
- 파쇄/탈철 (milling/magnetic separator)
 - 수산화리튬의 입도 균질성을 확보하기 위해 건조된 수산화리튬을 파쇄 후 자석을 사용하여 이물질을 제거한다.
 - 공기와 차단할 수 있도록 설계된 이중 포장 벌크백(bulk bag)에 포장한다.

(b) 재생 리튬 제조

- 원료투입 (raw material input)
 - 폐배터리에서 회수된 탄산리튬을 원료로 투입한다.
- 혼합 (mixing)
 - 황산과 탄산리튬을 혼합하여 저장탱크에 저장한다.
- 여과 (filtration)
 - 여액은 다음 공정으로 이송하고 침전물을 걸러준다.
- 혼합 (mixing)
 - 여액에 수산화나트륨을 혼합하여 저장탱크에 저장한다.
- 결정화 (crystallization)
 - 용액을 냉각하여 결정체를 분리하고 수산화리튬 용액을 다음 공정으로 이송한다.
- 농축 (concentration)
 - 수산화리튬 용액을 농축하여 분말 형태로 제조한다.
- 건조 (drying)
 - 수산화리튬 분말을 건조한다.
- 포장 (packaging)
 - 제조된 수산화리튬을 공기와 차단할 수 있도록 설계된 이중 포장 벌크 백(bulk bag)에 포장한다.

2) 작업환경 노출평가

이차전지에 사용되는 리튬은 수산화리튬과 탄산리튬이다. 국내에서는 스포듀민 정광이나 탄산리튬을 원료로 사용해 수산화리튬을 제조하고 있으며, 일부 재생 공정에서 회수된 리튬을 가공하여 수산화리튬 형태로 제조한다. 본 연구에서는 리튬 제조 사업장 2개소를 대상으로 리튬 노출평가를 진행하였다.

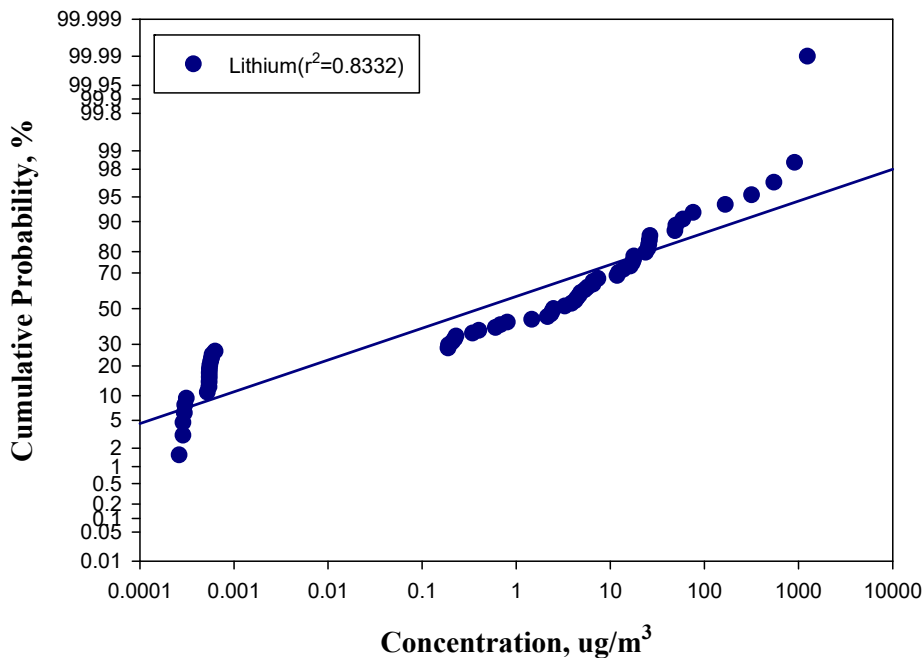
(1) 개인노출평가

리튬 제조 산업에서는 개인 노출평가를 위해 1개 라인의 노동자를 대상으로 총 분진 중 리튬을 평가하였다. 리튬은 현재 국내에서 노출기준이 제정되어 있지 않아 ILO에서 제시한 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 평가 기준으로 하였다.

리튬의 노출 수준($n=64$)은 $\langle 0.01\sim 1242.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: $58.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: $0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)로 나타났다(표 III-34, 그림 III-60). 운전실($n=12$)의 노출 농도는 $\langle 0.01\sim 0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 대부분의 시료가 검출한계($0.01 \mu\text{g}/\text{sample}$) 미만으로 평가되었으며, 원료투입 공정($n=4$)의 노출 농도는 $3.27\sim 5.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: $4.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: $4.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이었다. 생산라인($n=33$)의 노출 농도는 $\langle 0.01\sim 545.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: $25.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: $0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$)으로 1개 시료가 노출기준을 초과하였다. 해당 공정은 여과된 잔사를 정리하는 공정으로 당시 설비의 막힘 현상을 방지하기 위해 관리용 문을 개방하고 작업한 것이 원인으로 판단된다. 제품포장 공정($n=15$)의 노출 농도는 $\langle 0.01\sim 1242.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: $191.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: $17.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$)로 3개 시료가 노출기준을 초과하는 것으로 평가되었다.

〈표 III-34〉 리튬 산업의 리튬 노출 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

구분	공정	시료 수	산술 평균	표준 편차	기하 평균	기하 표준편차	범위
총 분진	전체	64	58.1	203.0	0.6	112.4	< 0.01 ~ 1242.8
	운전실	12	0.1	0.1	0.002	16.7	< 0.01 ~ 0.2
	원료투입	4	4.4	1.1	4.3	1.3	3.27 ~ 5.7
	생산라인	33	25.3	94.7	0.7	67.3	< 0.01 ~ 545.6
	제품포장	15	191.0	374.0	17.2	34.0	< 0.01 ~ 1242.8



[그림 III-60] 리튬 산업의 리튬 노출 농도 누적분포

(2) 입자상물질 특성 평가

리튬 산업에서 수산화리튬의 입경분포와 MMAD, MMD를 평가하기 위해 수산화리튬에 직접적으로 노출되는 포장공정을 대상으로 분진의 크기별 분포를 평가하였다.

가) 공기역학적 질량중위직경(MMAD) 및 질량평균직경(MMD)

포장공정에서 발생하는 수산화리튬의 MMAD는 2.72 μm , MMD은 8.87 μm 이며, 직경분립충돌기 9단의 농도 분포간 기하표준편차는 0.01과 0.09로 편차가 매우 작았다. 수산화리튬의 MMD 입자 크기 8.87 μm 는 양극 활물질 산업에서 요구하는 크기에 해당한다(표 III-35).

〈표 III-35〉 리튬 산업의 입자상 물질 발생 크기 특성(μm)

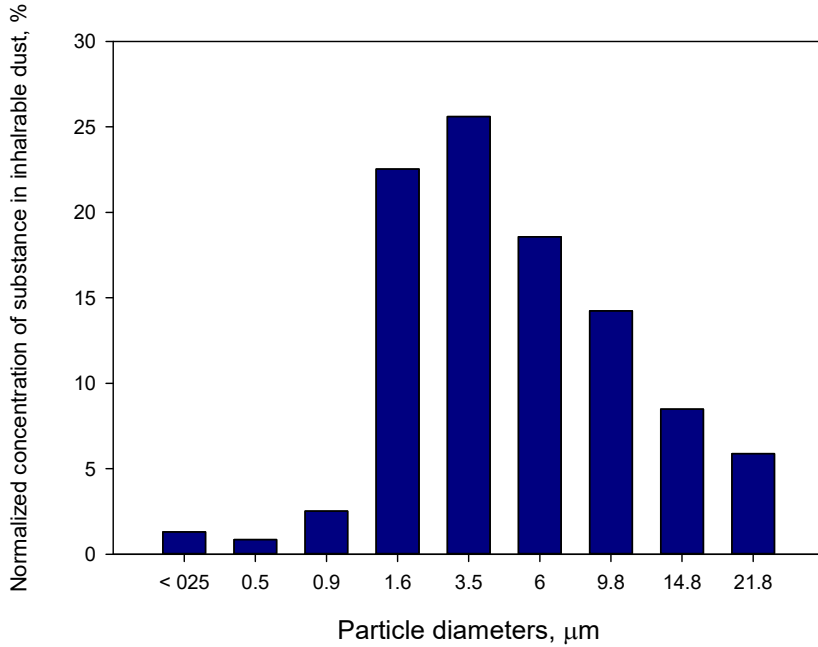
공정	공기역학적 질량중위직경	기하표준편차	질량평균직경	기하표준편차
포장	2.72	0.01	8.87	0.09

나) 입경분포

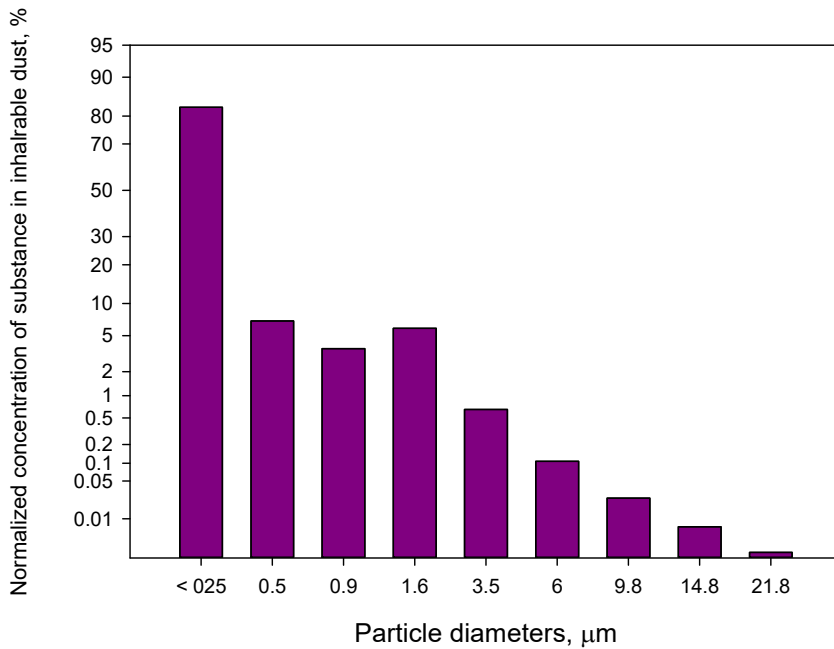
포장 공정의 입자 분포는 표 36 및 그림 III-61~62와 같다. 입경 크기에 따른 질량 농도 분포는 9.8 μm 이하 분진이 85.64 %, 9.8 μm 를 초과하는 분진이 14.36 %로 평가되었다. 평가된 결과로 볼 때 포장공정에서는 호흡성 분진 크기의 수산화리튬이 발생하는 것을 알 수 있다. 다단형분립장치 각 단에서 평가된 질량 농도를 입자수로 변환하여 평가한 결과 9.8 μm 이하에서 99.9 % 이상의 비율을 차지하는 것을 알 수 있다. 따라서 대부분의 포장 작업자는 작업 중 호흡성 분진에 노출되어 영향을 받을 것으로 판단된다.

〈표 III-36〉 리튬 산업의 입자상물질 입경분포(%)

공정	질량 분포, %		입자 수 분포, %	
	9.8 μm 이하	9.8 μm 초과	9.8 μm 이하	9.8 μm 초과
제품포장	85.64	14.36	99.99	0.01



[그림 III-61] 수산화리튬 포장 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)



[그림 III-62] 수산화리튬 포장 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)

6. 집전체 산업

1) 공정 및 취급 화학물질

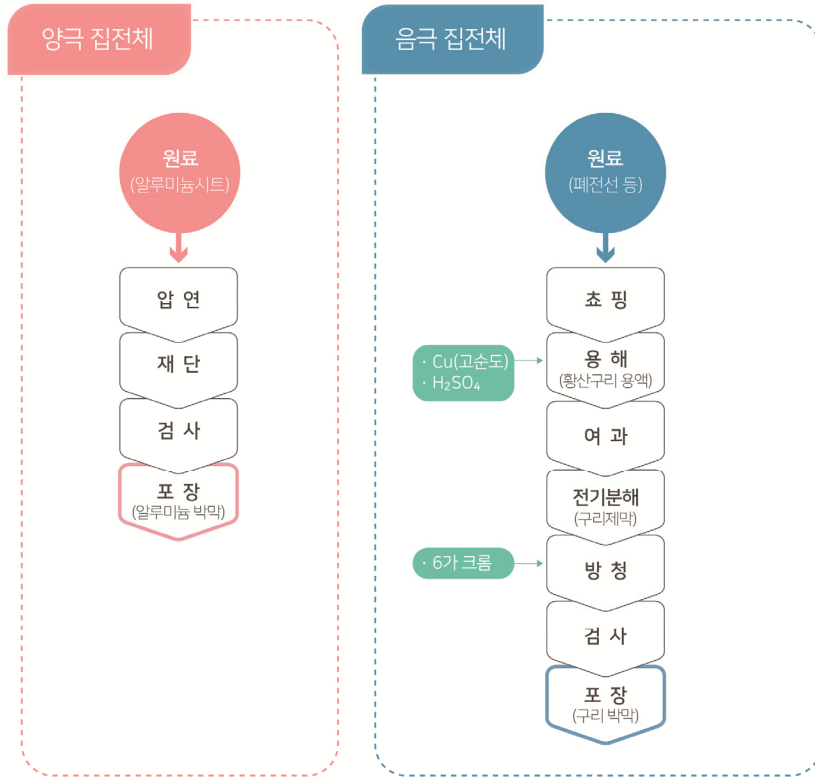
양극용 알루미늄 박막은 알루미늄 원재료를 정제 및 가공하여 얇은 알루미늄판으로 만든 후 압연을 반복하여 약 10~25 μm 두께로 제조한다. 동박과 달리 전기분해와 도금이 수월하지 않은 알루미늄 특유의 물성 때문에 압연 방식으로 제조한다. 알루미늄 판은 대부분 국내에서 공급되며 일부 부족분만 중국에서 수입한다.

음극용 구리 박막은 황산구리 용액을 전기분해 공법을 사용하여 약 10 μm 두께로 제조한다. 원재료는 폐전선 등을 주로 활용하며 순도를 맞추기 위해 구리를 수입하여 사용하며 제조공정에서 표면처리제로 6가 크롬이 사용된다. 박막 제조업의 공정흐름도 및 취급 화학물질은 그림 Ⅲ-63 및 표 Ⅲ-37과 같다.

〈표 Ⅲ-37〉 집전체 산업의 취급 화학물질

산업분류	제조물품	취급 화학물질
집전체	알루미늄 박막	<ul style="list-style-type: none"> • 알루미늄 시트 • 압연유
	구리 박막	<ul style="list-style-type: none"> • 원료 (폐전선 등) • 구리 • 황산 • 6가크롬

※ 부록 〈표 A-1〉 이차전지 산업 취급 화학물질 및 노출기준 참조



[그림 III-63] 집전체 산업의 공정흐름도

(a) 알루미늄박 제조

○ 압연 (rolling)

- 롤 형태로 입고된 알루미늄판을 반복해서 압연하며 두께를 조절한다.

○ 재단 (cutting)

- 제품의 규격에 맞게 재단한다.

○ 검사 (inspection)

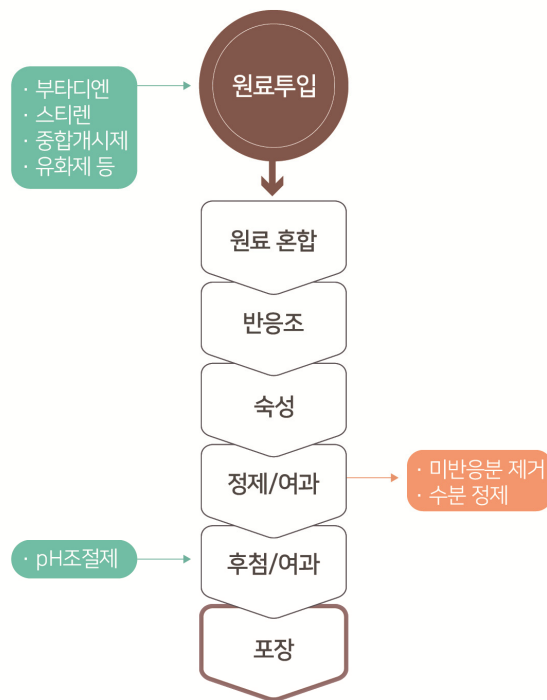
- 박막의 두께 및 제품 표면의 압연유의 건조 정도를 확인하기 위해 표면 장력 등을 확인한다.

- 불량품은 다른 제품으로 재활용하며 이차전지용으로는 사용하지 않는다.
- 포장 (packaging)
 - 롤 단위로 포장한다.
- (b) 동박 제조
 - 초핑 (chopping)
 - 입고된 원료(폐전선 등)를 잘게 잘라준다.
 - 용해 (dissolution)
 - 원료(폐전선 등) 및 고순도 구리와 황산을 주기적으로 투입하여 황산 구리용액을 제조한다.
 - 물성 조절 및 불순물 제거를 위해 첨가제를 투입하고 여과 필터를 거쳐서 제박공정으로 이송한다.
 - 전기분해 (electrolytic copper foil)
 - 전기분해를 통해 황산구리 용액의 구리 이온(Cu^+)이 음극(-)을 떠는 드럼으로 이동하여 구리금속의 얇은 막을 제조한다.
 - 방청 (corrosion control)
 - 구리 박막에 방청 기능을 부여하기 위해 6가 크롬용액에 통과시킨다.
 - 제조된 구리 박막은 롤 형태로 말려서 다음 공정으로 이송된다.
 - 검사 (inspection)
 - 롤을 풀어서 방사능으로 두께를 검사하고 제품의 크기에 맞게 재단한다.
 - 포장 (packaging)
 - 롤 형태의 구리 박막은 산화를 방지하기 위해 질소 포장하여 납품한다.

7. 바인더 산업

1) 공정 및 취급 화학물질

SBR 바인더는 부타디엔(butadiene)과 스티렌(styrene)의 중합반응으로 제조한다. 각각의 원료는 탱크에서 라인을 통해 이송되며 SBR 바인더의 공정 흐름도 및 취급 화학물질은 그림 Ⅲ-64 및 표 Ⅲ-38과 같다. 바인더 제조업은 전 공정이 라인으로 이어져 있으며 일반적인 작업 상황에서 노동자가 원료나 제품에 노출될 가능성이 낮은 산업이다.



[그림 Ⅲ-64] SBR 바인더 산업의 공정흐름도

〈표 III-38〉 바인더 산업의 취급 화학물질

산업분류	제조물품	취급 화학물질
바인더	SBR 바인더	• 부타디엔
		• 스티렌
		• 중합개시제 (영업비밀)
		• 유화제 (영업비밀)
		• pH 조절제 (영업비밀)

※ 부록 〈표 A-1〉 이차전지 산업 취급 화학물질 및 노출기준 참조

- 원료혼합 (mixing)
 - 주원료는 부타디엔과 스티렌이며 그 외 바인더의 종류에 따라 모노머, 중합개시제, 유화제, pH조절제 등을 첨가하여 사용한다.
 - 모든 원료는 저장탱크에서 자동으로 라인을 통해 혼합탱크로 투입된다.
- 반응조 (reactor)
 - 각 원료는 혼합탱크에서 반응조로 정량 투입된다.
 - 투입된 원료를 교반시키고, 개시제가 활동하며 중합반응이 일어난다.
- 숙성 (aging)
 - 일정 시간 숙성하며 미반응 된 것들을 반응시킨다.
- 정제/여과 (purification/filtration)
 - 미반응된 모노머와 수분을 정제하고 필터를 사용해 응집된 부분을 제거한다.
- 후첨/여과 (addictive/filtration)
 - pH 조절제를 첨가하여 물성을 맞춰주고 필터를 사용해 응집된 부분을 제거한다.
 - 포장 전 저장탱크에서 교반하여 물성이 고르게 퍼지도록 한다.
- 포장 (packaging)
 - 바인더는 물 60 %와 바인더 40 %로 구성된다.
 - 약 20 kg의 용기에 포장한다.

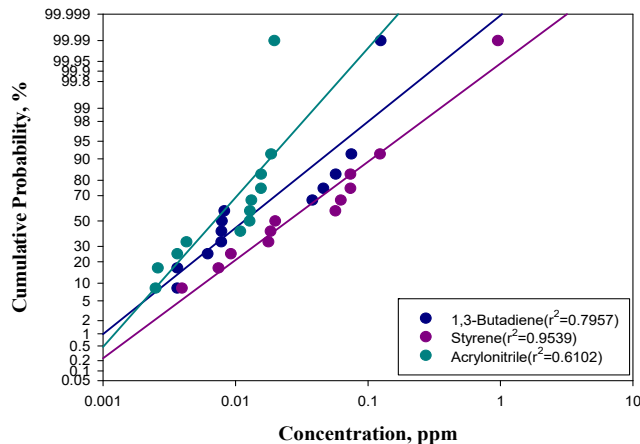
2) 작업환경 노출평가

본 연구에서는 SBR 바인더를 제조하는 사업장 1개소를 대상으로 작업장에서 사용하는 1,3-부타디엔, 스티렌, 아크릴로니트릴을 평가하였다. 해당 사업장은 일반적인 작업 시 노동자가 작업장에 근무하고 있지 않아 개인 노출평가를 실시하지 않았으며, 바인더 제조과정에서 원료물질의 누출 여부를 확인하기 위해 지역시료를 채취하여 작업장의 농도를 확인하고자 하였다.

원료의 저장탱크와 혼합탱크 하단에서 측정을 진행하였고 그 결과는 표 III-39 및 그림 III-65와 같다. 1,3-부타디엔(n=12)의 농도는 <0.01~0.12 ppm, 스티렌(n=12)은 <0.01~0.95 ppm 그리고 아크릴로니트릴(n=12)은 <0.01~0.95 ppm이었다. 이는 밀폐형 반응조에서 제품을 생산하는 과정에서 가스상 물질이 작업공간으로 누출되고 있음을 말해준다. 따라서 작업자가 일상점검 등을 실시할 때 호흡용 보호구 착용이 요구된다.

〈표 III-39〉 바인더 산업의 지역 시료 농도(ppm)

구분	시료 수	산술 평균	표준 편차	기하 평균	기하 표준편차	범위
1,3-부타디엔	12	0.03	0.04	0.02	3.51	< 0.01 ~ 0.12
스티렌	12	0.12	0.27	0.04	4.43	< 0.01 ~ 0.95
아크릴로니트릴	12	0.01	0.01	0.01	2.19	< 0.01 ~ 0.02



[그림 III-65] 바인더 산업의 원료물질 노출 농도 누적분포

8. 도전재 산업

1) 공정 및 취급 화학물질

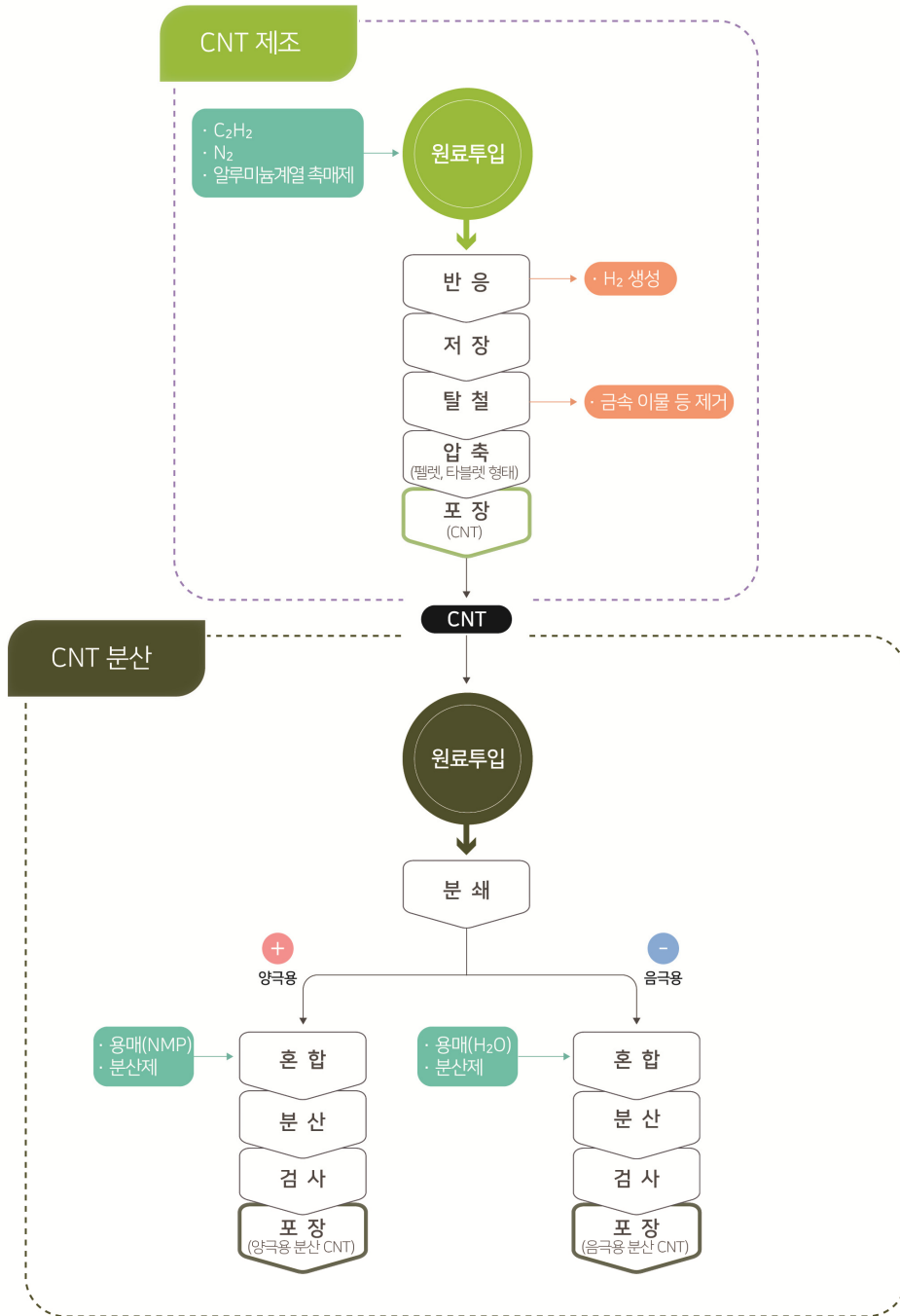
도전재는 주로 카본블랙을 사용하였으나 최근에는 전기 전도도가 높은 CNT 도전재의 사용이 증가하고 있다. CNT 도전재 제조는 CNT 제조와 CNT 분산으로 구분할 수 있다. 현재 국내에서도 CNT 제조와 분산을 하고 있으며, CNT 분산에 사용되는 CNT는 국내 제조업체에서 수급하거나 중국, 러시아에서 수입한다. 도전재 제조업의 공정흐름도 및 취급 화학물질은 표 III-40 및 그림 III-66과 같다.

CNT 제조는 에틸렌과 코발트 및 알루미늄과 촉매방법을 이용하여 제조한다. 에틸렌의 탄소와 수소를 분리시킨 후 촉매제를 이용하여 CNT를 성장시켜 제조하고 있다. CNT는 생산과정에서 단일 입자로 성장하나 제조과정을 거치면서 CNT 입자가 뭉쳐지며, 제품화 과정에서 연필심 형태의 펠릿(pellet)이나 둥근 원형의 타블렛(tablet)로 제조된다.

〈표 III-40〉 도전재 산업의 취급 화학물질

산업분류	제조물품	취급 화학물질
도전재	CNT	<ul style="list-style-type: none"> • 에틸렌 가스 • 질소 • 알루미늄 (촉매) • 코발트 (촉매)
	분산 CNT	<ul style="list-style-type: none"> • CNT • NMP • 분산제 (영업비밀)

※ 부록 〈표 A-1〉 이차전지 산업 취급 화학물질 및 노출기준 참조



[그림 III-66] 도전재 산업의 공정흐름도

(a) CNT 제조

○ 원료투입 (raw material input)

- 에틸렌 (ethylene) 가스와 질소 그리고 알루미늄계열의 촉매제를 주로 사용한다.
- CNT 생산은 모든 공정이 자동화되어 라인을 통해 이송된다.

○ 반응 (fluidization)

- 모체가 되는 BED CNT가 채워진 반응기에 질소를 주입한 후 고온에서 촉매와 에틸렌가스(C_2H_2)를 주입하면 C는 촉매와 결합하고 H는 태워지면서 CNT가 자라나는 고온유동층 반응으로 제조한다.
- 생성된 CNT는 저장탱크로 이송시키며 일부는 다음 공정의 bed CNT로 남겨둔다.

○ 저장 (storage)

- 저장 사일로에 CNT 분말을 저장한다.

○ 탈철 (magnetic separator)

- 자석을 사용해 CNT 내의 이물을 제거한다.

○ 압축 (compression)

- CNT 분말과 물을 혼합하여 진흙처럼 만들어주며 펠릿 혹은 타블릿 형태로 압축한다.

○ 포장 (packaging)

- 흡습방지 포장재를 사용하여 CNT를 포장한다.

(b) CNT 분산

○ 원료투입 (raw material input)

- 분산 CNT는 음극재에서는 물을 용매로 사용하며 양극재에서는 NMP를 용매로 사용한다.

○ 분쇄 (crush)

- 펠릿 혹은 타블릿 형태의 CNT는 분쇄하여 용매와 혼합한다.

○ 혼합 (mixing)

- 제품의 균일화를 위해 혼합기에서 교반하며 물리적으로 혼합한다.
- 음극재용 도전재는 CNT 분말과 물을 혼합하고 양극재용 도전재는 CNT 분말과 NMP를 넣고 교반한다.
- 혼합 공정에서 분산제를 투입한다.
- 현재 사업장에서 사용 중인 분산제는 영업비밀이며 문헌에 의하면 분산제로 PVDF (polyvinylidene fluoride), PVP (polyvinyl- pyrrolidone) 등이 사용된다(Choi et al, 2022, Wang 2021).

○ 분산 (dispersion)

- 고압의 분산설비를 사용하여 분산 CNT 슬러리를 제조한다.
- 분산은 제품의 특성에 따라 반복하여 최상의 상태로 분산시킨다.

○ 검사 (inspection)

- 최종 액상형태의 제품에 대한 검사를 진행한다.

○ 포장 (packaging)

- 분산 CNT는 제조사별로 특정 용기에 주입하여 포장한다.

2) 작업환경 노출평가

도전재 산업은 도전재의 원료인 CNT를 제조하는 공정과 CNT를 분산시키는 공정으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 CNT 제조 사업장 1개소와 CNT 분산 사업장 1개소를 대상으로 CNT 노출평가를 위해 OC, EC, TC와 분산 사업장에서 양극용 분산액으로 사용하는 NMP를 평가하였다.

현재 국내에서는 공기 중 CNT의 노출기준이 설정되어 있지 않으며, 미국 NIOSH에서는 CNT 제조 사업장의 노출기준을 호흡성분진 기준 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ EC로 규정하고 있다(NIOSH, 2013). 그외 다른 연구에서는 중량 농도로 $1.1\sim 80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 권고하고 있다(Bergamaschi, 2021).

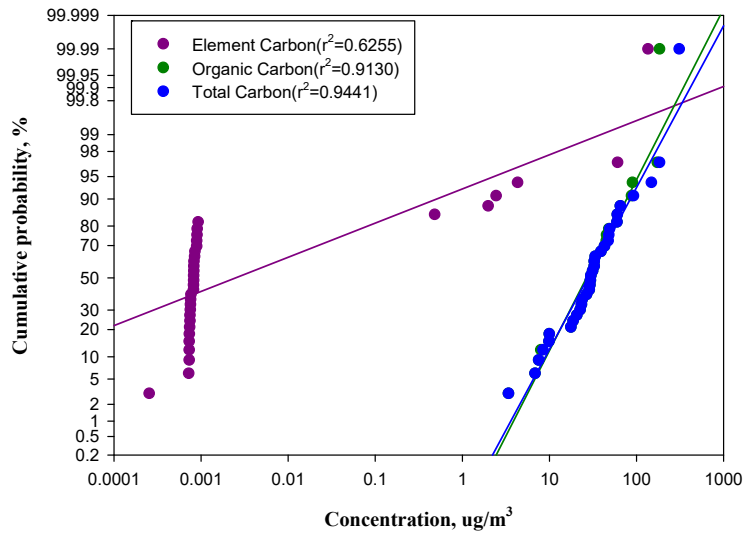
(1) 개인노출평가

도전재 산업에서 CNT의 노출 수준을 파악하기 위해 개인시료를 채취하였고 그 결과는 표 III-41 및 그림 III-67과 같다. CNT 제조 사업장의 CNT 농도 수준(n=16)은 OC의 농도 범위는 $3.4\sim 184.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, EC는 $0.0003\sim 0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 그리고 TC는 $3.4\sim 184.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. CNT 분산 사업장은(n=17) OC 농도 범위가 $20.6\sim 173.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, EC는 $0.0007\sim 135.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 그리고 TC는 $20.6\sim 308.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다.

CNT 제조 사업장에서의 EC 농도는 1개 시료를 제외하고 모두 검출한계 미만($0.001 \mu\text{g}/\text{sample}$)으로 평가되었고, CNT 분산 사업장에서 12개의 시료가 검출한계 미만으로 평가되었다. 이러한 결과는 사업장 관리가 매우 우수한 것으로 평가될 수 있다. 하지만 제품생산 과정에서 분진 발생 및 사업장의 내부 오염 등을 고려하면 부피 대비 질량의 비가 낮은 CNT의 노출평가에 EC를 측정하는 것이 타당한지 고려해 볼 필요가 있다.

〈표 III-41〉 도전재 산업의 탄소 노출 범위($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

구분	시료 수	OC 농도 범위	EC 농도 범위	TC 농도 범위
CNT 제조	16	3.4 ~ 184.2	0.0003 ~ 0.5	3.4 ~ 184.2
CNT 분산	17	20.6 ~ 173.1	0.0007 ~ 135.5	20.6 ~ 308.6



〔그림 III-67〕 도전재 산업의 CNT 노출 농도 누적분포

CNT 분산 사업장에서는 양극용 용매로 사용되는 NMP의 누출 여부를 확인하기 위해 용매의 저장 탱크와 분산기 근처에서 지역시료를 채취하였다(표 III-42). NMP 농도수준(n=6)은 0.05~0.6 ppm(산술평균: 0.25 ppm, 기하평균: 0.17 ppm)으로 평가되었다. 본 결과로 저장 탱크와 분산기에서 NMP가 누출되고 있음을 알 수 있다. 특히 샘플 채취 포트 아래에 밀폐되지 않은 폐액통에 샘플 잔액이 남아있어 작업공간으로 누출 가능성이 있었다.

〈표 III-42〉 도전재 산업의 NMP 지역 시료 농도(ppm)

구분	시료 수	산술 평균	표준 편차	기하 평균	기하 표준편차	범위
CNT 분산	6	0.25	0.21	0.17	2.74	0.05 ~ 0.60

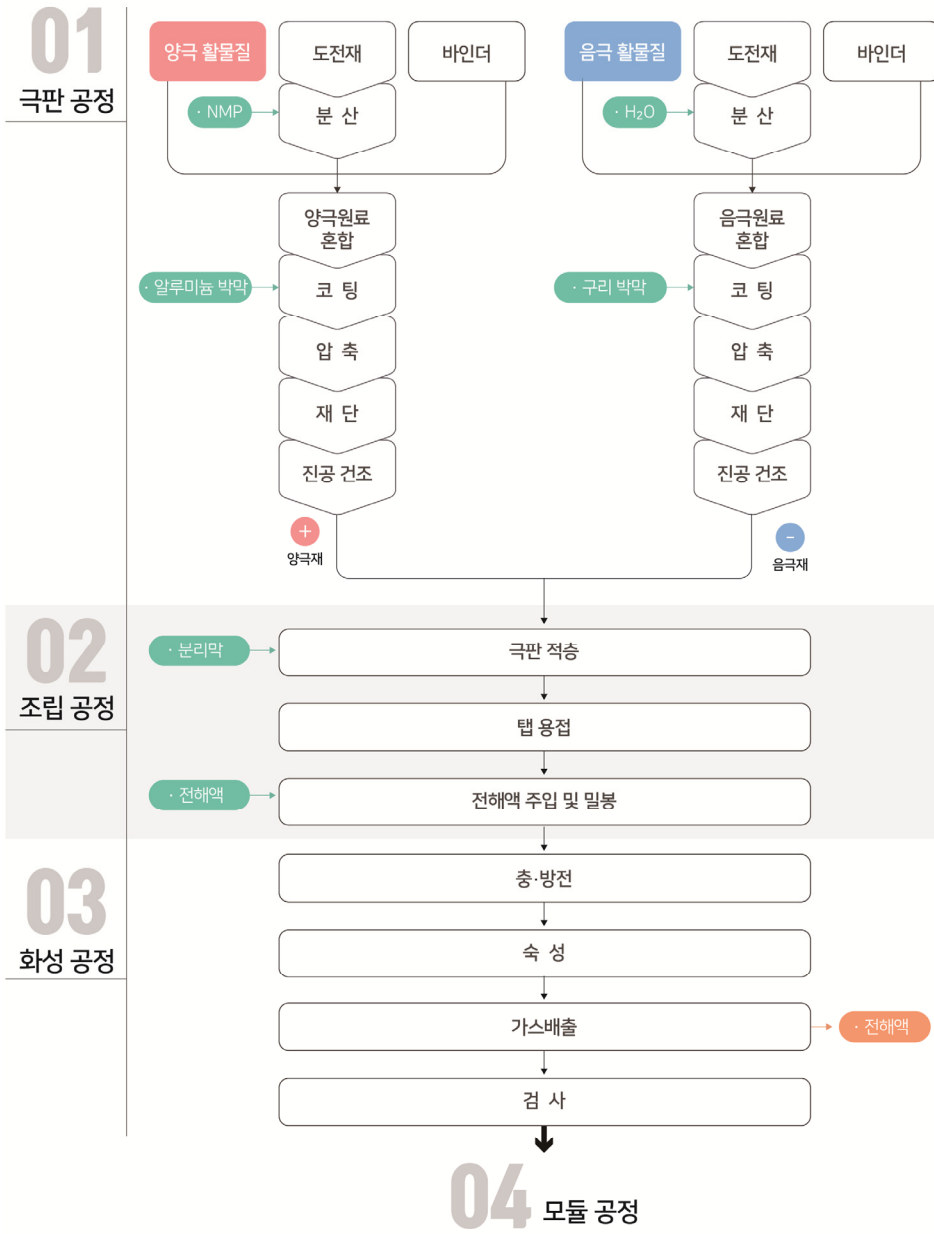
9. 배터리 제조 산업

1) 공정 및 취급 화학물질

배터리는 형태에 따라 원통형(cylindrical), 파우치형(pouch), 각형(prismatic)으로 구분할 수 있으며, 배터리를 제조하는 공정은 극판공정(electrode process), 조립공정(assembly process) 그리고 화성공정(formation process)으로 분류한다.

극판공정은 양극과 음극의 전극판을 만드는 공정이며 양극 및 음극 활물질과 도전재, 바인더 등을 혼합하여 양극은 알루미늄 박막 그리고 음극은 구리 박막에 코팅해주는 공정이다. 조립공정은 제조된 극판과 분리막을 적층하여 젤리롤을 만들어 케이스에 삽입 후 전해액을 주입하여 배터리 셀의 형태로 조립하는 공정이며, 화성공정은 제조된 배터리 셀의 충·방전을 반복하며 전기적 특성을 활성화시키고 안전성을 검사하는 공정이다.

모든 공정은 클린룸 내부에서 이루어지며 장비 조작 등을 위해 노동자가 상주하고 있다. 배터리 제조 산업의 공정흐름도와 취급 화학물질은 각각 그림 III-68 및 표 III-43와 같다.



[그림 III-68] 배터리 제조 산업의 공정흐름도

① 극판 공정

○ 원료혼합 (mixing)

- 양극 및 음극 활물질, 도전재, 바인더를 혼합하여 슬러리 형태로 만드는 공정으로 양극재와 음극재가 각각의 라인에서 제조된다.
- 양극 및 음극 활물질은 분말 형태로 벌크백(bulk bag) 단위로 입고된다.
- 바인더는 분말 및 액상 형태이며 분말로 입고된 바인더는 겔 형태로 만들어 사용한다.
- 도전재로 사용되는 CNT와 카본블랙은 분말형태로 약 10~25kg 단위의 포대로 입고되며 분산 CNT는 액상형태로도 입고된다.
- 양극용 도전재는 NMP를 사용하여 분산하며 음극용 도전재는 물을 사용하여 분산 후 혼합조에 투입된다.

○ 코팅 (coating)

- 코터기를 사용해 혼합된 슬러리를 집전체의 앞·뒷면에 얇게 코팅한다.
- 양극재는 알루미늄 박막, 음극재는 동박을 집전체로 사용한다.

○ 압축 (pressing)

- 도포된 활물질을 얇고 고르게 만들고 활물질과 집전체의 결합력을 향상시키기 위해 롤을 사용해 제품의 규격에 맞게 압축한다.

○ 재단 (slitting)

- 양극 및 음극 극판의 전지의 규격에 맞게 재단한다. 이때 탭이 부착될 무지부 부분은 남겨준다.

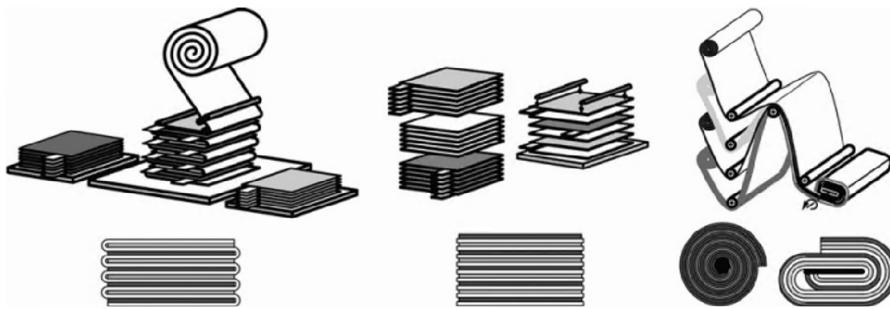
○ 진공건조 (vacuum drying)

- 양극 및 음극에 남아있는 미량의 NMP 및 수분을 제거하기 위해 진공 건조한다.

② 조립 공정

○ 극판적층 (laminating)

- 분리막/양극/분리막/음극의 순서대로 쌓아서 젤리롤을 만들어준다. 극판을 적층하는 방법은 배터리의 형태에 따라 다르다(그림 III-69).
- 와인딩 : 분리막/양극/분리막/음극을 두루마리 휴지처럼 말아주는 방법으로 원형과 각형에 사용
- 스택킹 : 분리막/양극/분리막/음극을 겹겹이 쌓는 방식으로 파우치형에 사용
- Z스택킹 : 분리막을 접으면서 양극과 음극을 쌓는 방식



출처 : Antje Schilling et al., 2016

[그림 III-69] 극판 적층 방법 (좌) Z스택킹 (중) 스택킹 (우) 와인딩

○ 탭 용접 (tab welding)

- 극판 적층 후 극판의 코팅이 되지 않은 무지부 부분에 탭을 접착한다.

○ 전해액 주입 및 밀봉 (packaging)

- 전해액 주입 및 밀봉 방법은 배터리의 형태에 따라 상이하다. 원통형은 전해액을 주입하고 밀봉하는 반면에 파우치형과 각형은 밀봉한 후 전해액을 주입한다.
- 원통형 : 알루미늄 원통 캔의 하단에 (-)극을 용접하고 젤리롤을 삽입

하고 (+)극을 넣어 용접한 뒤 캔 상부를 성형(beading)하여 젤리롤을 고정하고 전해액을 주입한다. 전해액 주입 후 상판을 넣고 밀봉(crimping)한다.

- 파우치형 : 알루미늄 파우치에 젤리롤을 삽입한 뒤 전해액을 주입하고 밀봉한다. 알루미늄 파우치에는 젤리롤이 삽입되는 본방과 배터리의 처음 충·방전시 생기는 가스를 빼내기 위한 가스방으로 나뉘어져 있다.
- 각형 : 알루미늄 사각 캔에 젤리롤을 삽입한다. 그리고 캔과 캡을 용접하여 밀봉한 후 전해액을 주입하고 주입구를 막아준다.

③ 화성 공정

○ 충·방전 (formation)

- 배터리를 일부 충전하여 SEI(solid electrolyte interphase) 막이 형성 되도록 한다.
 - ※ SEI 막은 전자의 이동을 막고 리튬이온만 이동할 수 있도록 해주며 배터리의 안전성, 성능 및 수명에 영향을 주는 요소임.

○ 숙성 (aging)

- 배터리 내부에 전해액이 고르게 분산되도록 정해진 온습도에서 일정 시간 보관한다.

○ 가스배출 (degassing)

- 파우치형 배터리의 경우 충·방전을 반복할 때 배터리 내부에 생성되는 가스를 가스방을 통해 빼내고 최종적으로 가스방 부분을 절단하여 배터리 셀을 제조한다.

○ 검사 (inspection)

- 배터리의 충·방전을 반복하며 전지의 내부저항 및 전압 등을 검사한다.

〈표 III-43〉 배터리 제조 산업의 취급 화학물질

산업분류	배터리 제조
제조물품	배터리 셀
취급 화학물질	• 양극활물질
	• 음극활물질
	• 전해액
	• 분리막
	• 집전체(알루미늄 박막, 구리 박막)
	• 바인더
	• 도전재(카본블랙, 카본나노튜브)
	• 첨가제(영업비밀)

※ 부록 〈표 A-1〉 이차전지 산업 취급 화학물질 및 노출기준 참조

2) 작업환경 노출평가

배터리 제조 산업에서는 앞선 산업의 생산품인 양극 활물질, 음극 활물질, 전해액, 분리막, 집전체, 도전재 및 바인더 등을 원재료로 사용하는 산업이다. 현재 국내에서는 원통형과 파우치형 배터리를 주력으로 생산하고 있으며, 본 연구에서는 원통형 배터리 제조 1개 사업장과 파우치형 배터리 제조 1개 사업장을 대상으로 평가를 진행하였다.

(1) 개인노출평가

배터리 제조 산업에서는 공정에 따라 금속, 흑연 및 카보네이트 용매(DMC, EMC, DEC)에 대한 평가를 진행하였다.

양극 활물질 투입 공정과 양극판을 재단(slitting)하는 공정에서는 양극 활물질의 금속(총 분진)을 대상으로 하고, 음극 활물질 투입 공정과 음극판 재단

공정에서 음극 활물질(흑연)을 대상으로 평가하였다. 카보네이트 용매는 전해액이 주입되는 패키징 공정과 전해액 가스가 방출되는 파우치형 배터리의 디게싱 공정을 대상으로 평가하였다.

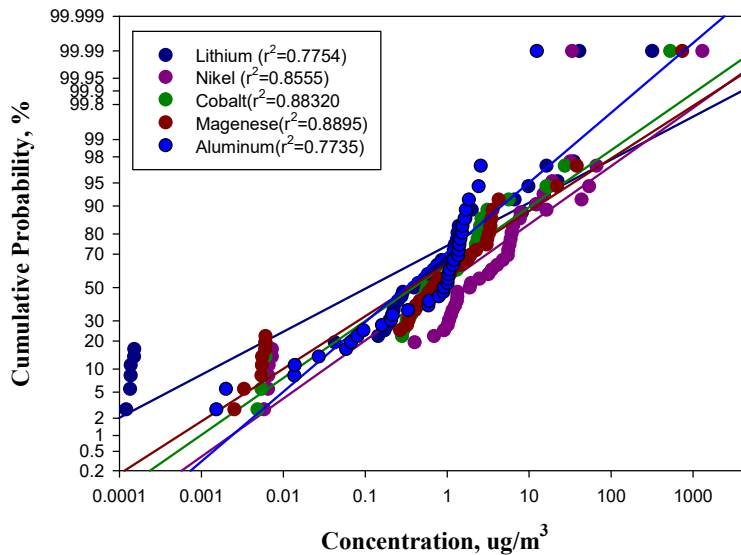
배터리 제조 산업의 총 분진 중 금속 노출 수준을 평가하기 위해 총 36개의 시료를 채취하였고 결과는 표 III-44 및 그림 III-70과 같다.

리튬의 노출 수준은 $\langle 0.01 \sim 317.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: $10.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: $0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$)로 양극 활물질 원료 투입 공정에서 1개 시료가 ILO 노출기준($200 \mu\text{g}/\text{m}^3$)을 초과하였다. 니켈의 노출 범위는 $0.01 \sim 1298.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: $43.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: $1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$)로 양극 활물질 원료 투입 공정에서 1개 시료가 노출기준(불용성, $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$)을 초과하는 것으로 평가되었다. 코발트는 $\langle 0.01 \sim 535.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: $16.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)으로 평가되었으며, 원료투입 공정에서 2개 시료가 노출기준($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$)을 초과하였다. 망간과 알루미늄은 다른 금속에 비해 상대적으로 낮은 수준으로 나타났으며 이는 배터리 양극 활물질 성분비에 따른 것으로 판단된다. 망간 노출 농도 ($n=36$)는 $\langle 0.01 \sim 737.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: $23.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이고, 알루미늄($n=36$)은 $\langle 0.01 \sim 12.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: $1.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: $0.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$)로 평가되었다.

배터리 제조 산업에서 양극 활물질 금속의 노출 수준은 사업장의 공정 형태와 노동자 개인의 작업 방식에 따라 노출 수준에 차이가 있어 농도의 범위가 넓은 것으로 판단된다.

〈표 III-44〉 배터리 제조 산업의 금속 노출 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

구분	공정	시료 수	산술 평균	표준 편차	기하 평균	기하 표준편차	범위
리튬	전체	36	10.2	52.8	0.2	37.6	< 0.01 ~ 317.5
	양극 투입	17	20.8	76.6	0.1	146.0	< 0.01 ~ 317.5
	양극 노칭	19	0.8	0.5	0.6	2.2	0.14 ~ 1.7
니켈	전체	36	43.2	216.0	1.4	17.5	0.01 ~ 1298.7
	양극 투입	17	87.5	313.0	0.7	55.5	0.01 ~ 1298.7
	양극 노칭	19	3.5	2.3	2.7	2.2	0.69 ~ 7.7
코발트	전체	36	16.8	87.3	0.5	14.4	< 0.01 ~ 525.3
	양극 투입	17	34.0	127.0	0.2	38.5	< 0.01 ~ 525.3
	양극 노칭	19	1.4	0.9	1.1	2.2	0.29 ~ 3.1
망간	전체	36	23.2	123.0	0.5	18.2	< 0.01 ~ 737.4
	양극 투입	17	47.0	178.0	0.1	43.1	< 0.01 ~ 737.4
	양극 노칭	19	2.0	1.3	1.5	2.1	0.41 ~ 4.2
알루미늄	전체	36	1.19	2.05	0.39	7.67	< 0.01 ~ 12.4
	양극 투입	17	1.23	2.94	0.16	12.69	< 0.01 ~ 12.4
	양극 노칭	19	1.15	0.70	0.85	2.64	0.07 ~ 2.6

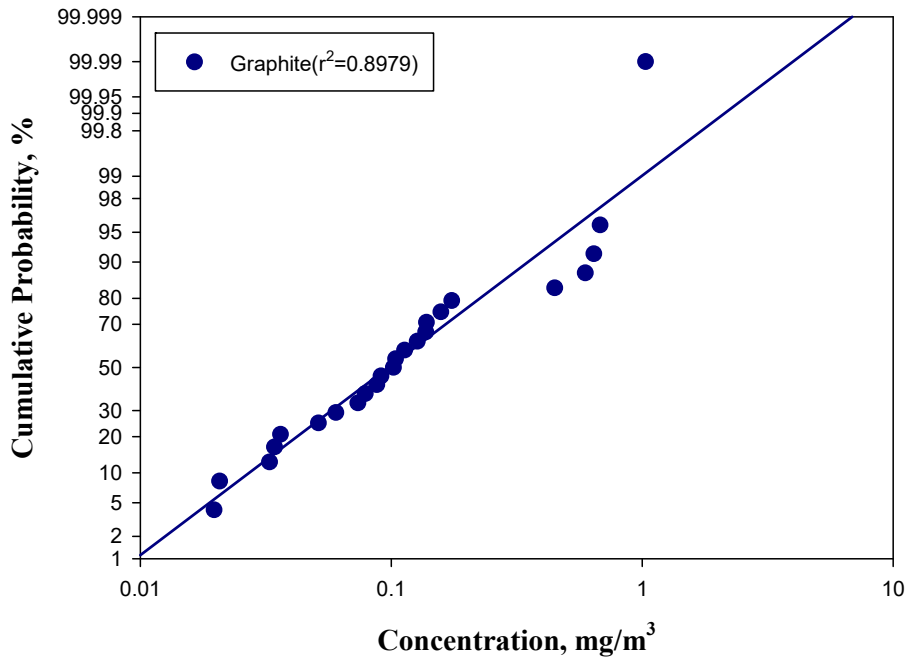


[그림 III-70] 배터리 제조 산업의 금속 노출 농도 누적분포

음극 활물질은 호흡성 분진 중 흑연을 대상으로 평가하였고 그 결과는 표 III-45 및 그림 III-71과 같다. 음극 활물질의 농도 수준은 0.02~1.0 mg/m³ (산술평균: 0.21 mg/m³, 기하평균: 0.11 mg/m³)으로 평가되었다. 모든 시료는 노출기준(2 mg/m³) 미만으로 평가되었으며, 노동자 개인의 작업 방식에 따라 노출 수준에 차이가 있는 것으로 나타났다.

〈표 III-45〉 배터리 제조 산업의 음극 활물질 노출 농도(mg/m³)

공정	시료 수	산술 평균	표준 편차	기하 평균	기하 표준편차	범위
전체	24	0.21	0.27	0.11	3.00	0.02 ~ 1.0
음극 투입	5	0.48	0.44	0.20	6.42	0.02 ~ 1.0
음극 노칭	19	0.14	0.14	0.10	2.26	0.02 ~ 0.6



[그림 III-71] 배터리 제조 산업의 흑연 노출 농도 누적분포

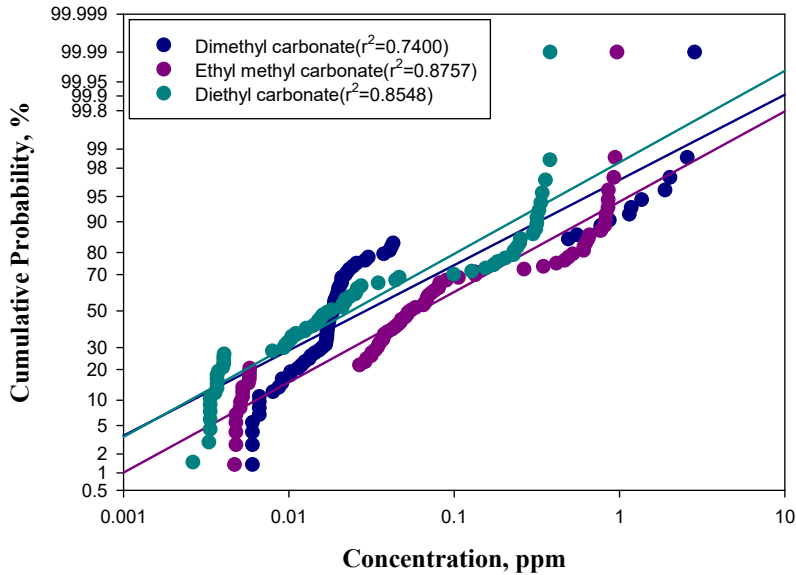
배터리 제조 산업의 카보네이트 노출 수준은 표 III-46 및 그림 III-72와 같다. 해당 공정은 배터리에 사용되는 전해액의 종류에 따라 노출되는 물질과 농도에 차이가 있을 수 있다.

카보네이트 노출 수준은 DMC 0.006~2.85 ppm (n=57, 산술평균: 0.20 ppm, 기하평균 0.03 ppm), EMC 0.005~0.96 ppm (n=57, 산술평균: 0.22 ppm, 기하평균 0.06 ppm), DEC 0.003~0.38 ppm (n=57, 산술평균: 0.08 ppm, 기하평균 0.02 ppm)으로 평가되었다.

배터리 제조 산업에서는 다른 산업이나 wDNEL 기준에 비해 노출 수준이 낮은 편이며, 주로 원통형 배터리 제조 공정에서 배터리 케이스 세척 작업 시 DMC에 노출이 되는 것으로 판단된다. 카보네이트 용매의 경우 법적 규제 물질이 아니지만 노동자에게 노출 가능성이 있으므로 지속적인 관리가 필요하다.

〈표 III-46〉 배터리 제조 산업의 카보네이트 노출 농도(ppm)

구분	공정	시료 수	산술 평균	표준 편차	기하 평균	기하 표준편차	범위
DMC	전체	57	0.20	0.60	0.03	4.61	0.006 ~ 2.85
	패키징	30	0.37	0.79	0.04	6.77	0.009 ~ 2.85
	디게싱	27	0.02	0.01	0.02	1.95	0.006 ~ 0.04
EMC	전체	57	0.22	0.32	0.06	6.05	0.005 ~ 0.96
	패키징	30	0.06	0.03	0.04	2.33	0.005 ~ 0.13
	디게싱	27	0.41	0.39	0.09	11.39	0.005 ~ 0.96
DEC	전체	57	0.08	0.13	0.02	5.45	0.003 ~ 0.38
	패키징	30	0.02	0.01	0.01	2.24	0.003 ~ 0.05
	디게싱	27	0.16	0.15	0.04	8.92	0.003 ~ 0.38



[그림 III-72] 배터리 제조 산업의 카보네이트 노출 농도 누적분포

(2) 입자상물질 특성 평가

배터리 제조 산업의 입자상물질 특성을 평가하기 위해 양극 및 음극 원료 투입 공정과 양극판을 재단하는 공정에서 평가를 진행하였다.

가) 공기역학적 질량중위직경(MMAD) 및 질량평균직경(MMD)

배터리 제조 산업의 MMAD 및 MMD 결과는 공정에 따라 표 III-47, 표 III-48과 같다.

사업장 E의 양극 원료투입 공정에서 발생하는 금속 입자의 MMAD는 약 1.54~3.32 μm 와 MMD는 모든 물질이 약 7.65~10.20 μm 로 나타났다. NCM계 양극 활물질은 리튬과 전구체(평균 입경 약 8~10 μm)를 혼합하여 제조하며, 제품 규격은 약 10~12 μm 로 알려져 있다. 음극 활물질의 MMAD는 약 4.54 μm 이었으며, MMD는 약 10.65 μm 로 양극 활물질과 비슷한 양상을 보였다.

사업장 F의 양극 원료투입 공정에서 발생하는 입자의 MMAD는 리튬, 니켈, 코발트 그리고 망간은 약 2.5 μm 이었고 MMD는 약 6.9 μm 이었다. 알루미늄은 MMAD 1.33 μm , MMD 5.33 μm 이었다.

양극재단 공정에서도 리튬, 니켈, 코발트 그리고 망간의 MMAD는 약 4.5 μm , MMD 약 12 μm 로 일정하였으나 알루미늄은 1.57 μm , 6.22 μm 로 상대적으로 작게 평가되었다. 음극 활물질 원료투입 공정의 MMAD는 약 2.96 μm , MMD는 약 8.12 μm 이었다.

〈표 III-47〉 배터리 제조 산업의 공기역학적 질량중위직경(μm)

사업장	공정		리튬	니켈	코발트	망간	알루미늄	흑연
E	양극 원료투입	MMAD*	3.17	3.32	2.68	2.27	1.54	-
		GSD**	-1.41	-0.48	-1.54	-2.73	-1.55	-
	음극 원료투입	MMAD	-	-	-	-	-	4.54
		GSD	-	-	-	-	-	2.33
F	양극 원료투입	MMAD	2.57	2.52	2.56	2.55	1.33	-
		GSD	0.04	0.65	0.27	0.41	-1.11	-
	양극 재단	MMAD	4.90	4.59	4.74	4.88	1.57	-
		GSD	-1.21	-0.55	-0.92	-0.80	-1.65	-
	음극 원료투입	MMAD	-	-	-	-	-	2.96
		GSD	-	-	-	-	-	2.08

* MMAD: 공기역학적 질량중위직경, ** GSD: 기하표준편차

〈표 III-48〉 배터리 제조 산업의 질량평균직경(μm)

사업장	공정		리튬	니켈	코발트	망간	알루미늄	흑연
E	양극	MMD*	9.87	10.20	8.40	8.68	7.65	-
	원료투입	GSD**	-1.41	-0.48	-1.54	-2.73	-2.73	-
	음극	MMD	-	-	-	-	-	10.65
	원료투입	GSD	-	-	-	-	-	2.33
F	양극	MMD	6.92	6.92	6.91	6.88	5.33	-
	원료투입	GSD	0.04	0.65	0.27	0.41	-1.11	-
	양극	MMD	12.38	12.16	12.23	12.35	6.22	-
	재단	GSD	-1.21	-0.55	-0.92	-0.80	-1.65	-
	음극	MMD	-	-	-	-	-	8.12
	원료투입	GSD	-	-	-	-	-	2.08

* MMD: 질량평균직경, ** GSD: 기하표준편차

나) 입경분포

배터리 제조 산업에서 발생하는 입경 크기별 질량 및 입자 수 분포는 각 공정에 따라 표 III-49~50 및 그림 III-73~82와 같다. 입경 크기에 따른 질량과 입자 수 분포는 각 사업장과 공정이 특성에 따라 서로 상이하게 나타났다.

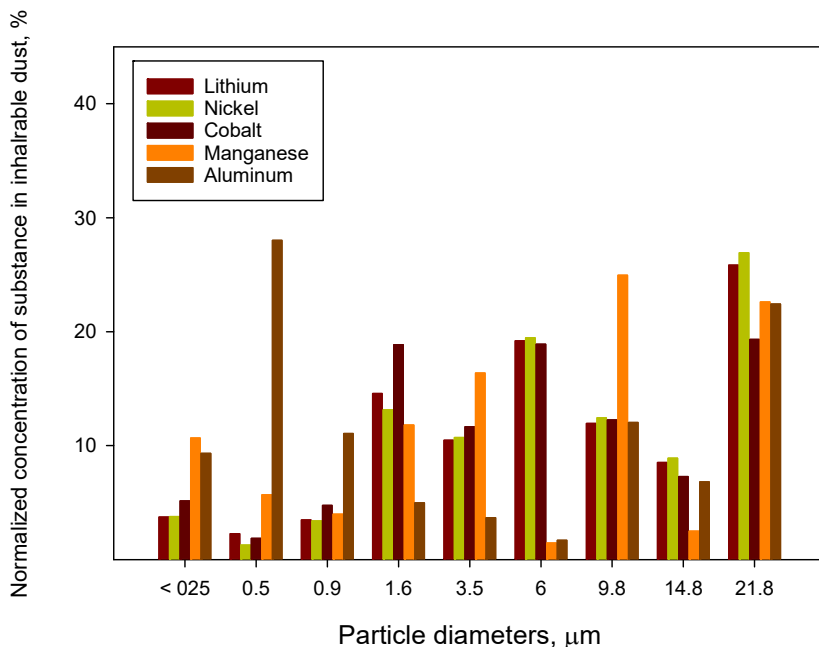
사업장 E에서는 양극 원료투입과 음극 원료투입 공정에서는 평가를 진행하였다. 양극 원료투입 공정에서 양극 활물질의 주요 성분인 리튬, 니켈, 코발트, 망간, 알루미늄을 대상으로 하였다. 질량 분포는 $9.8 \mu\text{m}$ 이하가 64.2~74.9 % 범위였고 입자 수 분포에서도 $9.8 \mu\text{m}$ 이하가 99.99 % 이상으로 나타났다. 음극 원료투입 공정 입자상물질의 질량 분포는 $9.8 \mu\text{m}$ 이하가 67.4 % 이고, 입자 수 분포는 $9.8 \mu\text{m}$ 이하가 99.98 %로 평가되었다.

사업장 F에서는 양극 원료투입과 양극 재단 공정에서 금속 물질의 입경 분포를 평가하였고, 음극 원료투입 공정에서 흑연을 평가하였다. 양극 원료투입 공정의 질량 분포는 $9.8 \mu\text{m}$ 이하가 66.9~89.0 % 범위였고 입자 수 분포에서도

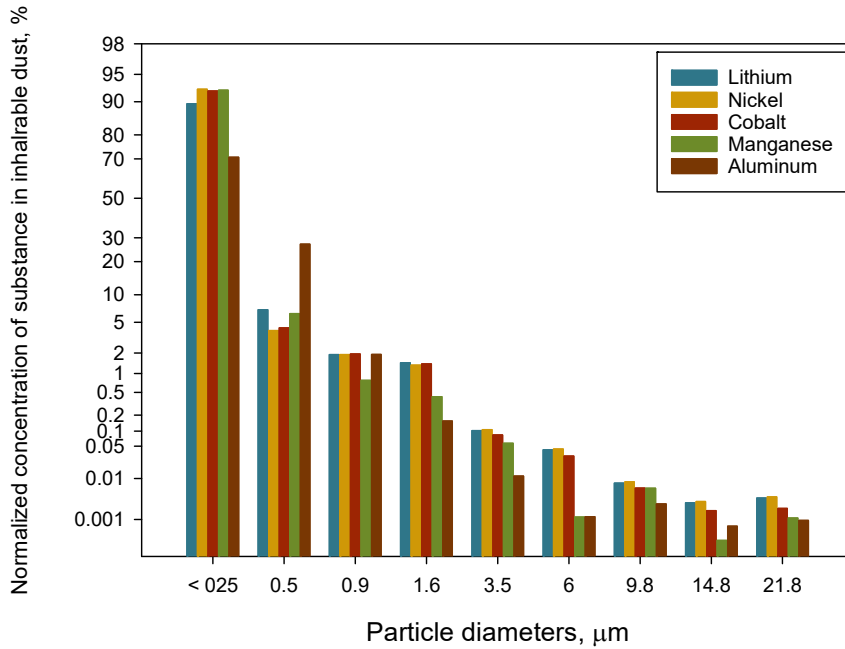
9.8 μm 이하가 99.99 % 이상으로 나타났다. 양극재단 공정의 리튬, 니켈, 코발트, 망간 MMAD는 9.8 μm 초과 크기의 크기가 65.3~66.2 %이었으며 알루미늄은 9.8 μm 이하가 59.7%로 평가되었다. 입자 수 분포는 9.8 μm 이하가 99.98 % 이상으로 평가되었다. 음극 원료투입 공정 입자상물질의 질량 분포는 9.8 μm 이하가 75.6 % 이고, 입자 수 분포는 9.8 μm 이하가 99.99 %로 평가되었다.

〈표 III-49〉 배터리 제조 E사의 입자상물질 입경분포(%)

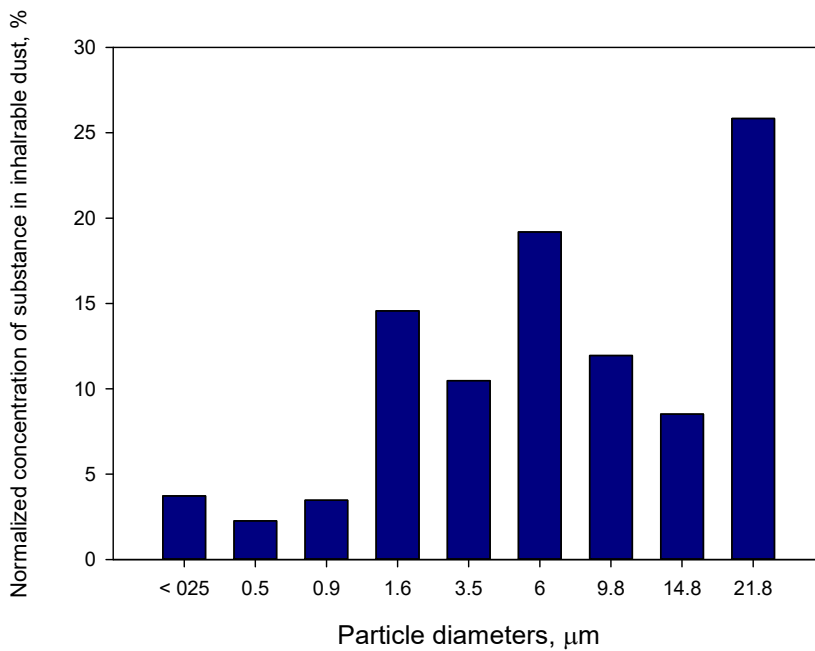
공정	물질	질량 분포		입자 수 분포	
		9.8 μm 이하	9.8 μm 초과	9.8 μm 이하	9.8 μm 초과
양극 원료투입	리튬	65.6	34.4	99.99	0.01
	니켈	64.2	35.8	99.99	0.01
	코발트	73.4	26.6	99.99	0.01
	망간	74.9	25.1	99.99	0.01
	알루미늄	70.8	29.2	99.99	0.01
음극 원료투입	흑연	67.4	32.6	99.98	0.02



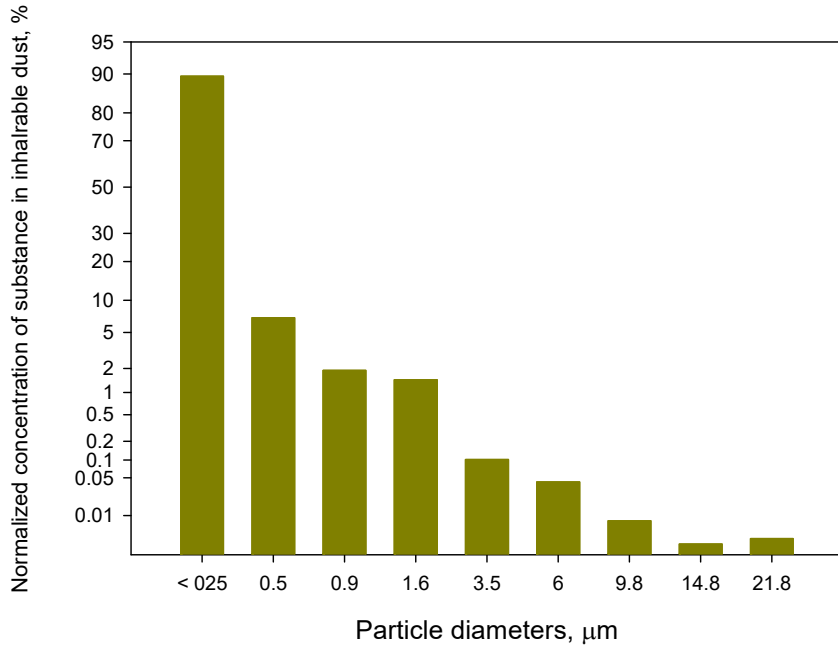
〔그림 III-73〕 E사 양극 원료투입 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)



[그림 III-74] E사 양극 원료투입 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)



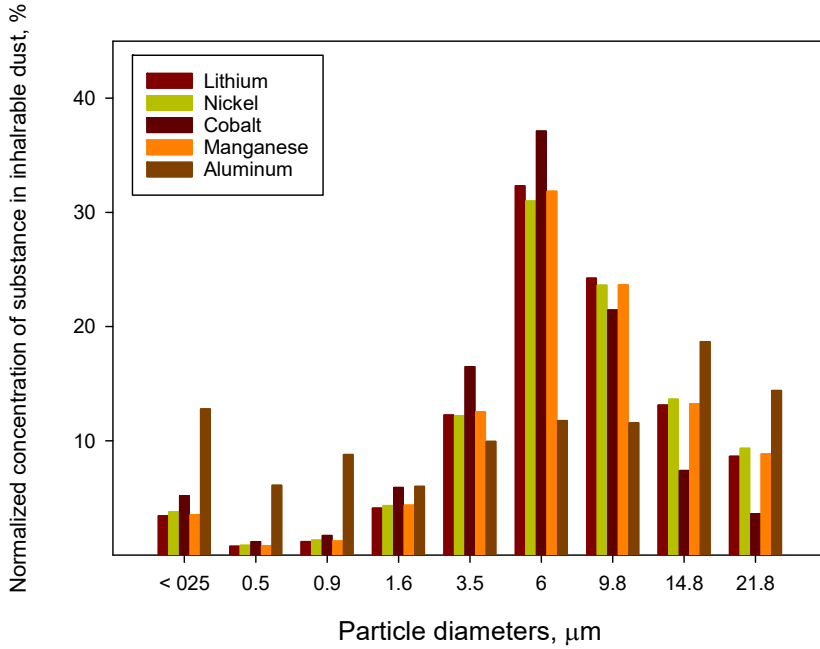
[그림 III-75] E사 음극 원료투입 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)



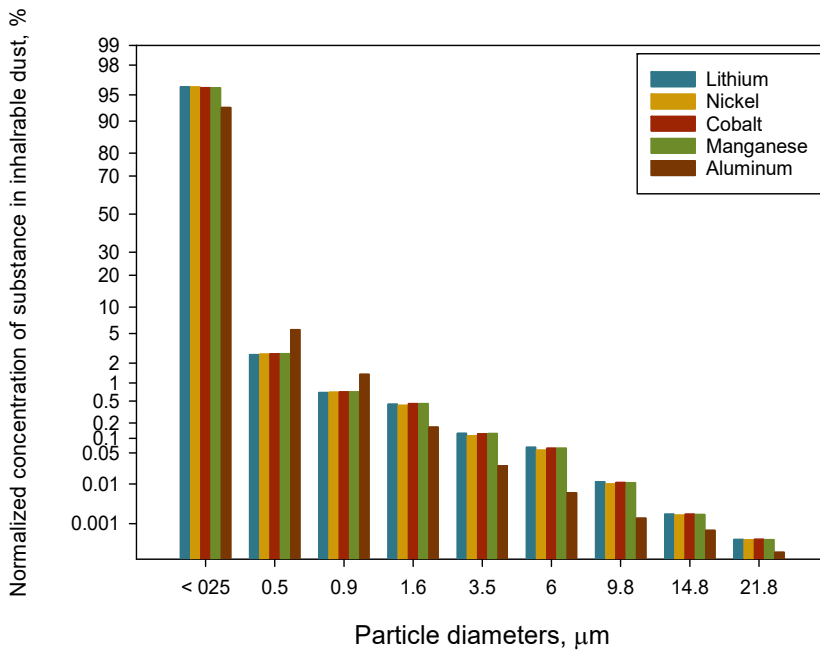
[그림 III-76] E사 음극 원료투입 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)

<표 III-50> 배터리 제조 F사의 입자상물질 입경분포(%)

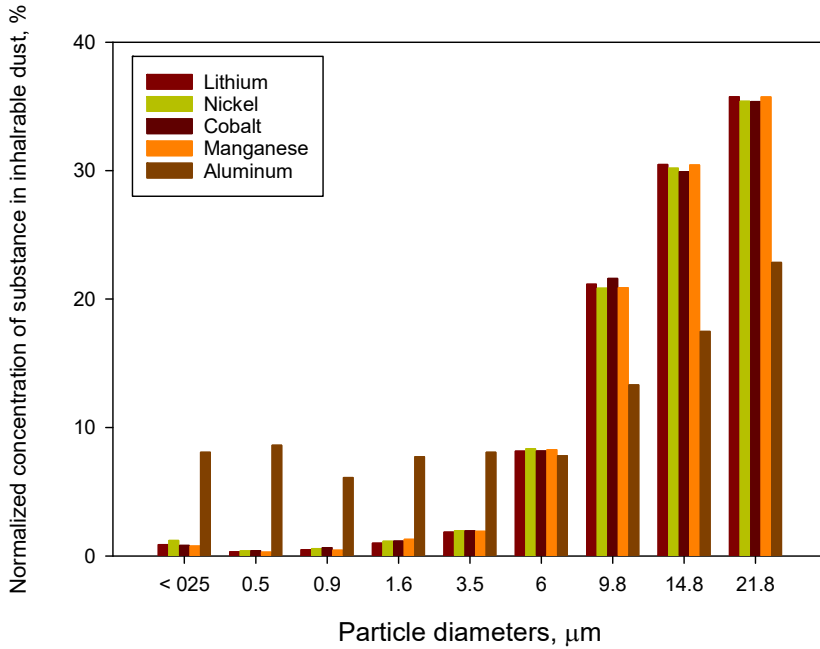
공정	물질	질량 분포		입자 수 분포	
		9.8 μm 이하	9.8 μm 초과	9.8 μm 이하	9.8 μm 초과
양극 원료투입	리튬	78.2	21.8	99.99	0.01
	니켈	77.0	23.0	99.99	0.01
	코발트	89.0	11.0	99.99	0.01
	망간	77.9	22.1	99.99	0.01
	알루미늄	66.9	33.1	99.99	0.01
양극 재단	리튬	33.8	66.2	99.98	0.02
	니켈	34.4	65.6	99.98	0.02
	코발트	34.7	65.3	99.98	0.02
	망간	33.8	66.2	99.98	0.02
	알루미늄	59.7	40.3	99.99	0.01
음극 원료투입	흑연	75.6	24.4	99.99	0.01



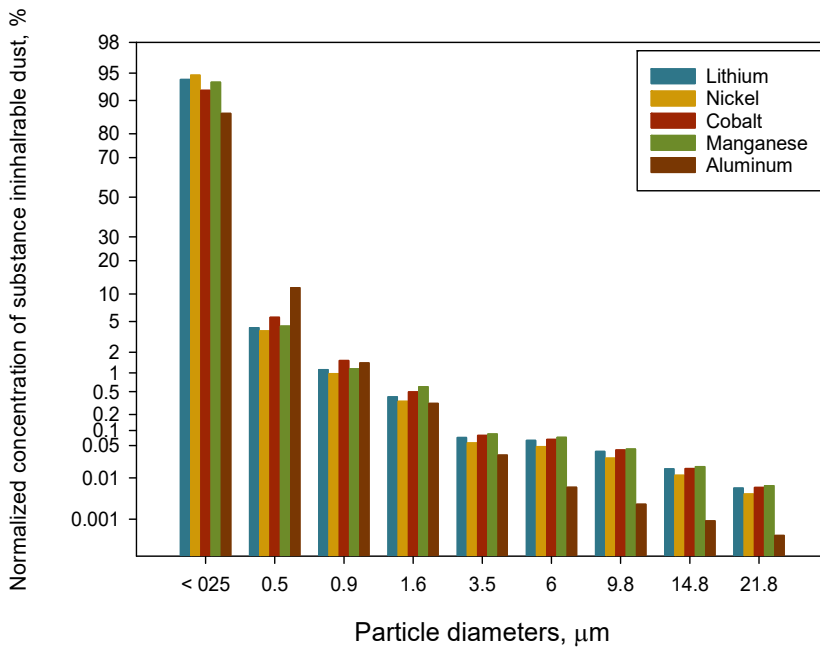
[그림 III-77] F사 양극 원료투입 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)



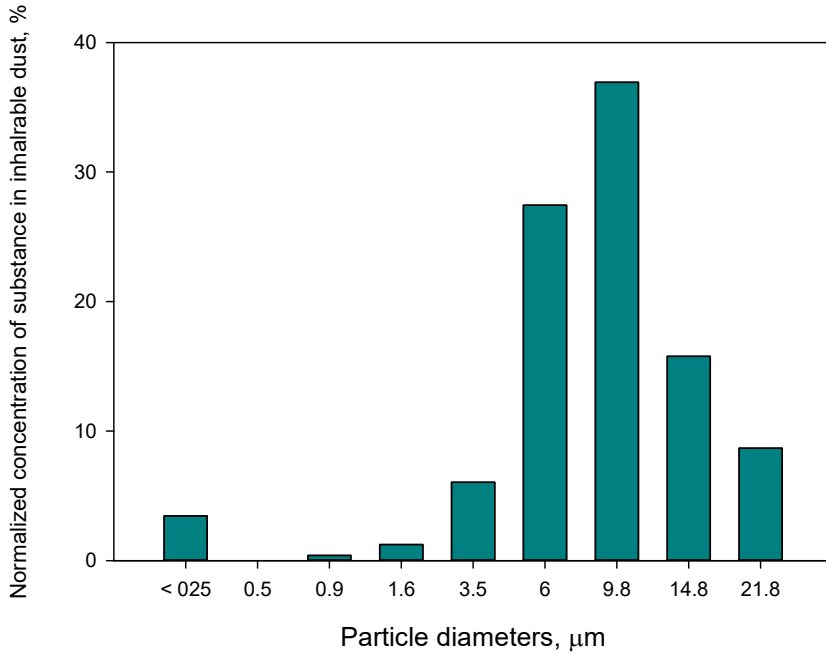
[그림 III-78] F사 양극 원료투입 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)



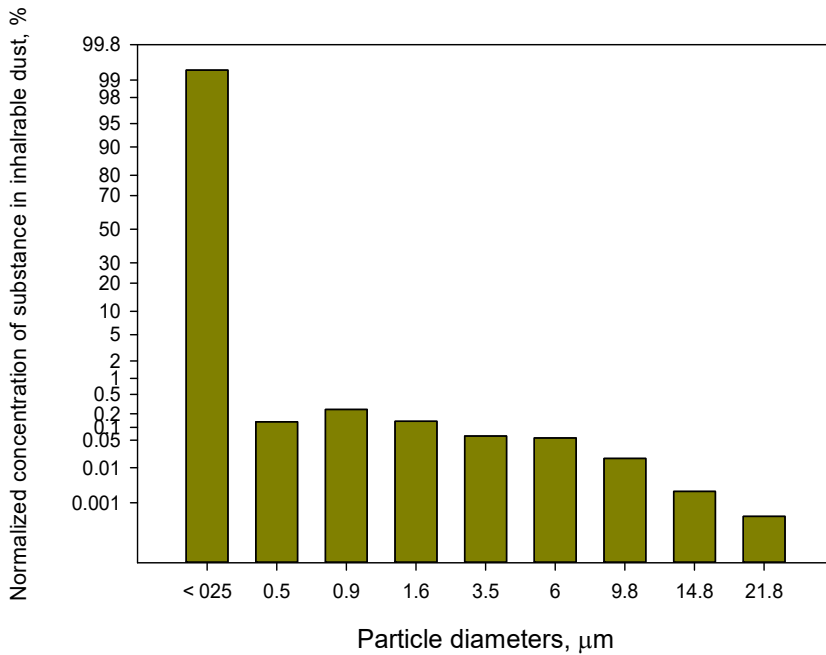
[그림 III-79] F사 양극 재단 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)



[그림 III-80] F사 양극 재단 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)



[그림 III-81] F사 음극 원료투입 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)



[그림 III-82] F사 음극 원료투입 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)

10. 배터리 재생 산업

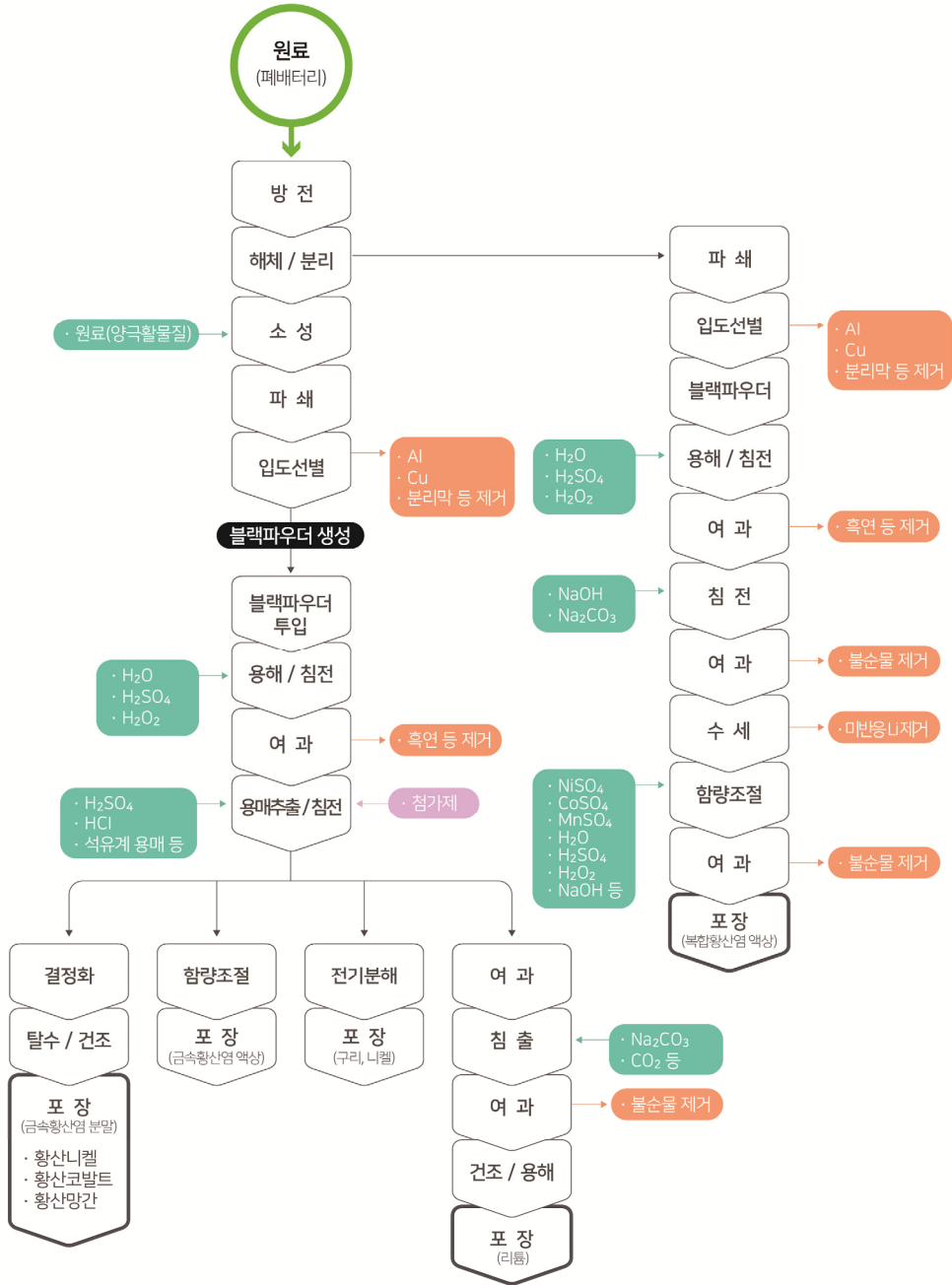
1) 공정 및 취급 화학물질

배터리 재생 산업은 폐배터리, 폐양극판 및 불량 양극 활물질의 금속 성분을 분리하여 재사용이 가능한 황산금속염 및 리튬으로 회수하는 산업이다. 원료 물질은 파·분쇄 등의 과정을 거쳐 블랙파우더(black powder, BP)로 가공한다. 블랙파우더는 양극 및 음극 활물질의 구성 성분인 리튬, 니켈, 코발트, 망간, 알루미늄, 흑연 등으로 구성된다. 블랙파우더는 산 혹은 알카리 용액에 용해한 후 용매추출, 치환, 침전 및 전기분해 등의 방법을 사용하여 황산금속염 및 리튬 등으로 재생된다. 배터리 재생 산업은 최종 생산 제품에 따라 공정이 상이하며 공정흐름도와 취급 화학물질은 표 Ⅲ-51 및 그림 Ⅲ-83과 같다.

〈표 Ⅲ-51〉 배터리 재생 산업의 취급 화학물질

산업분류	배터리 재생	
제조물품	황산니켈, 황산코발트, 황산망간, 수산화리튬, 탄산리튬, 구리 등	
취급 화학물질	배터리 소재	부재
	• 양극 활물질	• 황산
	• 음극 활물질	• 염산
	• 블랙 파우더	• 과산화수소
	• 카보네이트 용매	• 수산화나트륨
		• 탄산나트륨
		• 액화 탄소
	• 수소처리 된 경질 정제유(석유)	

※ 부록 〈표 A-1〉 이차전지 산업 취급 화학물질 및 노출기준 참조



[그림 III-83] 배터리 재생 산업의 공정흐름도

- 방전 (discharge)
 - 기계적 방전 혹은 염수 방전으로 배터리를 방전시킨다.
- 해체/분리 (disassemble)
 - 폐배터리 팩을 해체하고 케이블, 모듈 및 단자 등을 분리하여 배터리 셀의 형태로 분리한다.
 - ※ 폐기된 양극판이나 폐분말의 경우 해체/분리 공정을 거치지 않는다.
- 소성 (sintering)
 - 분리된 배터리 셀을 소성 도가니에 넣고 소성한 후 상온에서 냉각한다.
 - 원료의 종류에 따라 소성과정을 거치지 않는 경우도 있다.
- 파쇄 (crush)
 - 열처리한 배터리 셀을 1~3회에 걸쳐 파쇄한다.
- 입도선별 (particle separation)
 - 입도선별기로 구리, 알루미늄, 분리막 등의 큰 입자를 걸러내고 미분만 받는다.
 - 걸러진 큰 입자는 폐기 용기로 배출된다.
- 블랙파우더 (black powder)
 - 물리적 전처리를 통해 얻어지는 금속분말은 블랙파우더로 불리며 벌크백 (bulk bag)에 포장하여 후공정으로 이송한다.
 - 벌크백(bulk bag)의 블랙파우더를 호퍼에 투입하고 물과 혼합한다.
- 용해/침전 (dissolution/precipitation)
 - 황산과 과산화수소를 사용해 물과 혼합된 블랙파우더를 용해한다.
- 여과 (filtration)
 - 블랙파우더가 용해된 용액을 필터에 여과하여 흑연 등을 걸러주고 여액만 다음 공정으로 이송한다.

- 용매추출/침전 (solvent extraction/precipitation)
 - 추출용매와 회수 금속과의 pH, 비중, 용해도 등을 이용하여 금속 수용액을 순서대로 추출한다.
 - 황산, 염산, 수산화나트륨, 석유계 용매 등이 추출용으로 사용된다.
- 유기금속 회수
 - (a) 황산금속염 분말 (metal-sulfate salts powder)
 - 금속 수용액을 냉각하여 결정화한 뒤 탈수·건조하여 분말형태의 황산 금속염을 제조하여 포장한다.
 - (b) 황산금속염 액상 (metal-sulfate salts liquid)
 - 최종용액에 물 혹은 황산금속염을 투입하여 비율을 조정한 후 액상 형태의 황산금속염 용액을 제조하여 포장한다.
 - (c) 전기분해 (electrolysis)
 - 전기분해로 구리와 니켈을 추출한다.
 - (d) 리튬 (lithium)
 - 금속 수용액에 황산, 탄산나트륨, CO₂, NaOH 등을 투입하여 리튬을 침출하고 pH를 조절하여 리튬을 생산한다.
 - (e) 복합황산염 액상 (metal-sulfate salts liquid)
 - 복합황산염은 블랙파우더를 황산에 용해시킨 후 흑연 및 리튬 등을 제거하고 고순도의 금속황산염으로 함량을 조절하여 제조한다.

2) 작업환경 노출평가

배터리 재생 산업에서는 측정 대상에 따라 공정을 분류하여 평가하였다. 배터리 해체/선별 공정에서는 사슬형 카보네이트(DMC, EMC, DEC) 3종에 대해 평가를 진행하였으며 블랙 파우더(black powder, BP) 생산을 기준으로, 배터리를 분쇄하여 블랙 파우더를 생산하고 투입하는 공정인 파·분쇄(소성, 파쇄, 입도선별 등) 및 블랙 파우더 투입 공정과 블랙 파우더에서 금속을 추출하는 금속 회수(용해/침전, 용매추출 등), 제품 포장, 현장관리 및 운전실로 분류하여 금속(총 분진/호흡성 분진)의 농도수준을 평가하였다.

(1) 개인노출평가

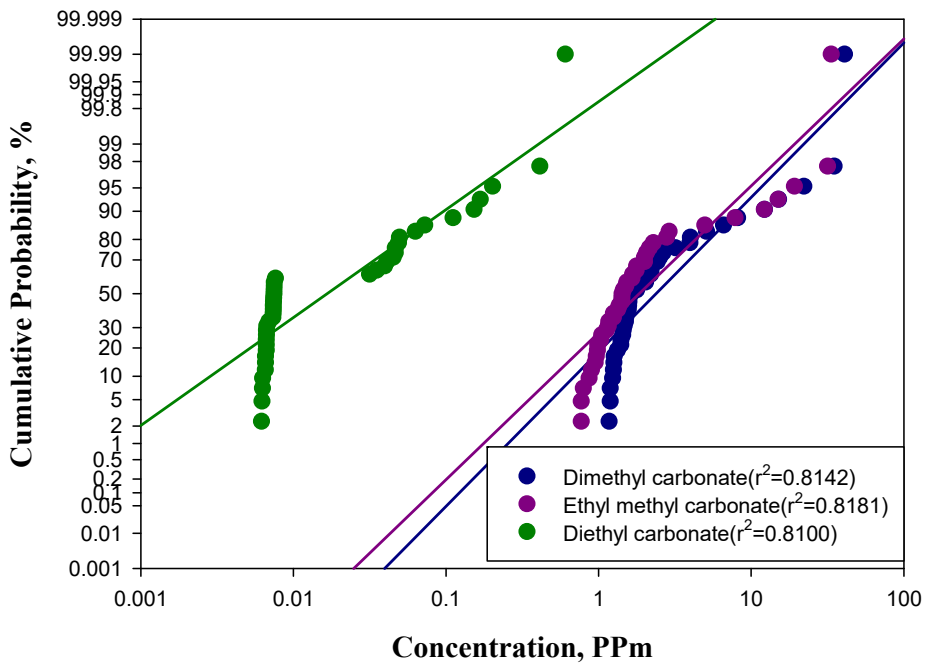
배터리 해체/선별 공정의 카보네이트 노출 수준은 표 III-52 및 그림 III-84와 같다. 해당 공정은 방전된 폐배터리를 분류하고 해체하여 소성로에 넣기 위해 바스켓에 적재하는 공정으로 배터리에 사용된 전해액의 종류에 따라 노출되는 물질과 농도에 차이가 있을 수 있다.

카보네이트 노출 수준은 DMC 1.17~40.91 ppm(n=42, 산술평균: 4.94 ppm, 기하평균: 2.58 ppm), EMC 0.77~33.41 ppm (n=42, 산술평균: 4.16 ppm, 기하평균: 2.01 ppm), DEC 0.01~0.60 ppm(n=42, 산술평균: 0.05 ppm, 기하평균: 0.02 ppm)으로 평가되었다.

배터리 해체/선별 공정의 노동자는 지속적으로 전해액의 주요 원료인 카보네이트에 노출되고 있으며 해당 공정의 카보네이트 노출 수준은 전해액의 함유량과 유사하게 DMC, EMC 그리고 DEC 순으로 평가되었다. 카보네이트 노출 농도는 배터리 해체/선별 작업 중 배터리 셀의 외부 포장재를 절단하는 작업자에게서 높은 농도 수준을 보였고, 작업 특성에 따라 노출 농도의 차이가 있었다. 카보네이트 용매의 경우 법적 규제 물질이 아니지만 노동자에게 노출 가능성이 있으므로 지속적인 관리가 필요하다.

〈표 III-52〉 재생 산업의 카보네이트 노출 농도(ppm)

공정	물질	시료 수	산술 평균	표준 편차	기하 평균	기하 표준편차	범위
배터리 해체/선별	DMC	42	4.94	8.56	2.58	2.56	1.17 ~ 40.91
	EMC	42	4.16	7.49	2.01	2.70	0.77 ~ 33.41
	DEC	42	0.05	0.11	0.02	3.70	0.01 ~ 0.60



[그림 III-84] 재생 산업의 카보네이트 노출 농도 누적분포

리튬의 노출평가 결과, 총 분진 중 리튬(n=121)은 $<0.01\sim 1329.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: $72.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: $4.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)로 ILO 노출기준($200 \mu\text{g}/\text{m}^3$)을 초과하는 비율은 전체의 약 10 %이었다. 호흡성 분진 중 리튬(n=122)은 $<0.01\sim 5292.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: $7.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: $1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$)로 평가되었다. 배터리 재생 산업에서 전반적인 리튬의 노출 수준은 파·분쇄 공정이 가장 높은 것으로 평가되었다. 금속회수 공정 노동자 1명에게서 시료(총 분진 및 호흡성 분진)가 과다 포집되어 총 분진 시료 1개가 전처리 중 손실되었다 (표 III-53, 그림 III-85).

파·분쇄 공정의 리튬 농도(n=27)는 $0.02\sim 1329.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: $238.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: $87.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$)으로 시료의 약 33 %가 ILO 노출기준을 초과하였다. 블랙파우더 투입(n=10) 공정은 $11.04\sim 189.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: $56.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: $35.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$)로 노출기준을 초과하는 시료는 없었으나 전반적인 농도가 다른 공정에 비해 높게 평가되었다.

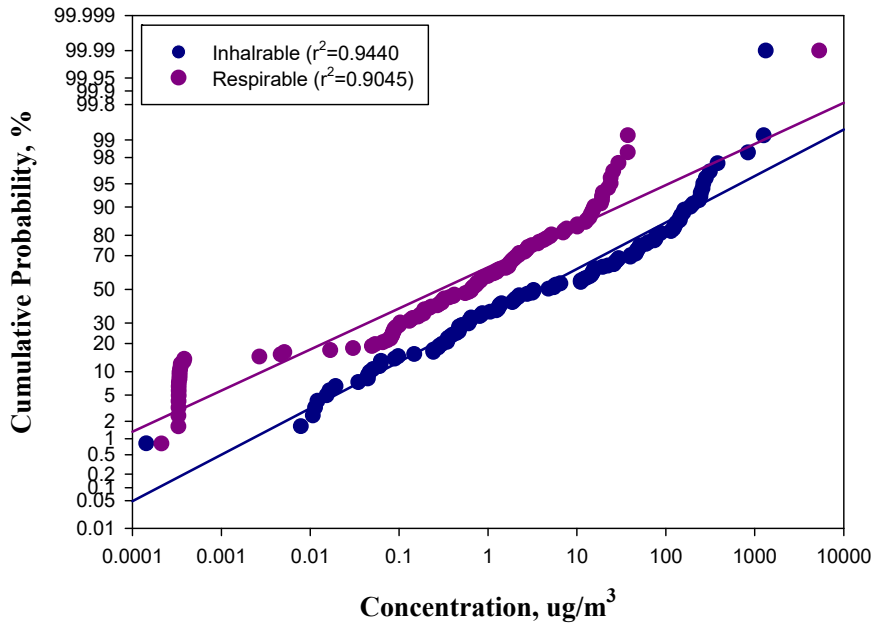
제품포장 공정(n=14)의 리튬 농도는 $0.24\sim 263.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: $54.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: $7.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 그리고 현장관리(n=7) 공정은 $0.05\sim 313.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: $62.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: $11.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이었고 제품포장에서 2개(약 14 %), 현장관리에서 1개(약 14 %) 시료가 노출기준을 초과하였다. 운전실(n=16)은 $<0.01\sim 0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 노출기준을 초과하는 시료는 없었다.

금속회수 공정(n=47)은 $0.04\sim 148.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 평가되었으며, 해당 공정 노동자 1명의 시료가 과포집되어 총 분진 시료가 분석이 불가능하였으며, 호흡성 분진 시료의 농도는 $5292.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 노출기준($200 \mu\text{g}/\text{m}^3$)의 약 26배 수준이었다.

주로 건식작업으로 진행되는 파·분쇄 및 블랙파우더 투입과 포장공정이 습식작업으로 이루어진 금속회수 공정에 비해 높은 농도로 평가되었고 현장 관리 노동자들도 정비 및 2차 비산 등으로 인해 일부 노출 수준이 높게 평가된 것으로 판단된다.

〈표 III-53〉 재생 산업의 리튬 노출 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

구분	공정	시료 수	산술 평균	표준 편차	기하 평균	기하 표준편차	범위
총 분진	전체	121	72.0	191.0	4.0	23.7	< 0.01 ~ 1329.3
	파·분쇄	27	238.0	347.0	87.1	8.2	0.02 ~ 1329.3
	BP투입	10	56.5	60.8	35.9	2.7	11.04 ~ 189.0
	금속회수	47	10.7	26.7	1.4	7.5	0.04 ~ 148.9
	제품포장	14	54.4	91.0	7.9	9.6	0.24 ~ 263.7
	현장관리	7	62.8	112.0	11.9	15.9	0.05 ~ 313.1
	운전실	16	0.2	0.3	0.04	8.9	< 0.01 ~ 0.6
호흡성 분진	전체	122	47.5	479.0	0.3	33.1	< 0.01 ~ 5292.5
	파·분쇄	27	14.6	10.8	8.0	4.9	0.03 ~ 37.4
	BP투입	10	3.5	4.3	2.3	2.4	0.88 ~ 14.2
	금속회수	48	111.0	764.0	0.1	18.5	< 0.01 ~ 5292.5
	제품포장	14	2.1	2.9	0.8	4.6	0.14 ~ 10.1
	현장관리	7	3.0	2.2	1.8	5.0	0.05 ~ 7.0
	운전실	16	0.0	0.0	0.0	9.3	< 0.01 ~ 0.1



[그림 III-85] 재생 산업의 리튬 노출 농도 누적분포

니켈 노출 농도는 금속 중 가장 높은 농도를 나타내며 이는 배터리 양극 활물질에 니켈의 함유량이 가장 높은 것이 원인으로 판단된다(표 III-54, 그림 III-86).

전체 공정의 니켈 노출 수준(n=145)은 0.01~8628.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: 308.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: 9.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이며 시료의 약 24%가 노출기준(가용성, 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 불용성, 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)을 초과하였고, 호흡성 분진(n=145)은 <0.01~1351.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: 28.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: 0.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이었다.

파·분쇄 공정의 니켈 농도(n=27)는 0.20~8628.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: 1290.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: 489.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이며 약 81 %가 노출기준(불용성, 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)을 초과하였다. 블랙파우더 투입(n=16) 공정은 11.42~704.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: 181.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: 92.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이며 약 31 %가 노출기준을 초과하였다.

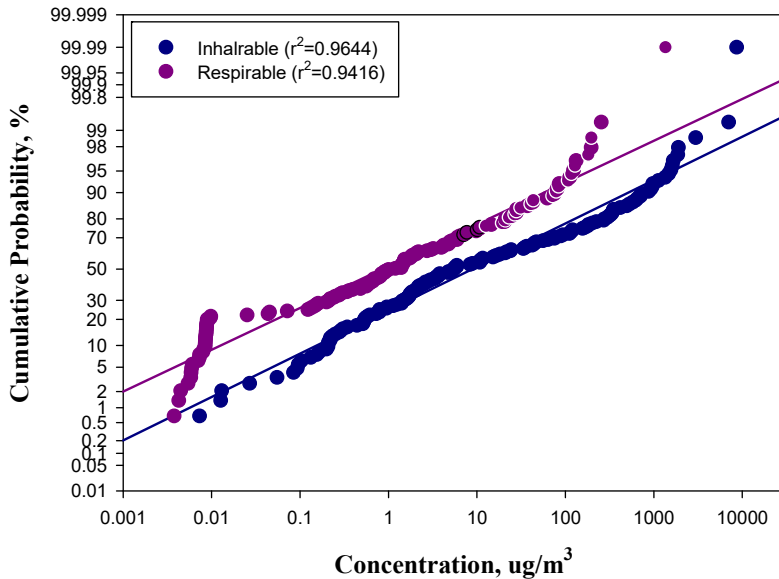
금속회수 공정의 니켈 농도(n=57)는 0.01~63.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: 5.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: 2.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이고, 노동자 1명의 시료가 과포집 되어 총 분진 시료가 분석이 불가능하였고 호흡성 분진 시료의 농도는 1351 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 노출기준(가용성, 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)의 13배 이상 초과되었다.

제품포장 공정(n=18)의 니켈 농도는 0.79~1614.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: 228.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: 27.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 약 33 %가 노출기준(가용성, 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)을 초과하였고, 현장관리(n=11)는 0.21~1892.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: 229.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: 10.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 2개 시료가 노출기준(불용성, 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)을 초과하였다.

재생 산업의 니켈 노출기준은 블랙파우더를 제조하고 투입하는 공정에서는 불용성 무기화합물(200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)의 기준을 적용하였고, 금속회수 및 제품포장 공정에서는 가용성 화합물(100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)의 기준을 적용하였으며, 그 외 현장관리와 운전실에서는 불용성 무기화합물(200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 기준을 적용하였다.

〈표 III-54〉 재생 산업의 니켈 노출 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

구분	공정	시료 수	산술 평균	표준 편차	기하 평균	기하 표준편차	범위
총 분진	전체	145	308.0	1010.0	9.6	23.7	0.01 ~ 8628.4
	파·분쇄	27	1290.0	2010.0	489.0	7.0	0.20 ~ 8628.4
	BP투입	16	181.0	213.0	92.0	3.5	11.42 ~ 704.6
	금속회수	57	5.9	11.5	2.0	4.8	0.01 ~ 63.4
	제품포장	18	228.0	473.0	27.3	9.7	0.79 ~ 1614.4
	현장관리	11	229.0	562.0	10.9	20.8	0.21 ~ 1892.3
	운전실	16	0.2	0.2	0.1	3.2	0.01 ~ 0.7
호흡성 분진	전체	145	28.1	119.0	0.9	25.7	< 0.01 ~ 1351.5
	파·분쇄	27	82.3	68.0	44.4	4.6	0.24 ~ 254.5
	BP투입	16	11.7	19.5	5.5	3.3	0.79 ~ 78.4
	금속회수	58	24.2	177.0	0.3	10.4	< 0.01 ~ 1351.5
	제품포장	18	8.2	10.5	1.5	15.1	< 0.01 ~ 28.1
	현장관리	10	11.2	14.4	1.0	34.1	0.01 ~ 43.3
	운전실	16	0.0	0.0	0.0	1.1	0.01 ~ 0.0



〔그림 III-86〕 재생 산업의 니켈 노출 농도 누적분포

코발트 노출 수준(n=145)은 0.01~4967.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: 112.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: 3.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이고, 호흡성 분진은 <0.01~135.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: 5.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: 0.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 표 III-55 및 그림 III-87과 같으며, 총 분진 중 코발트의 노출기준(20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 초과 비율은 약 29 %이었다.

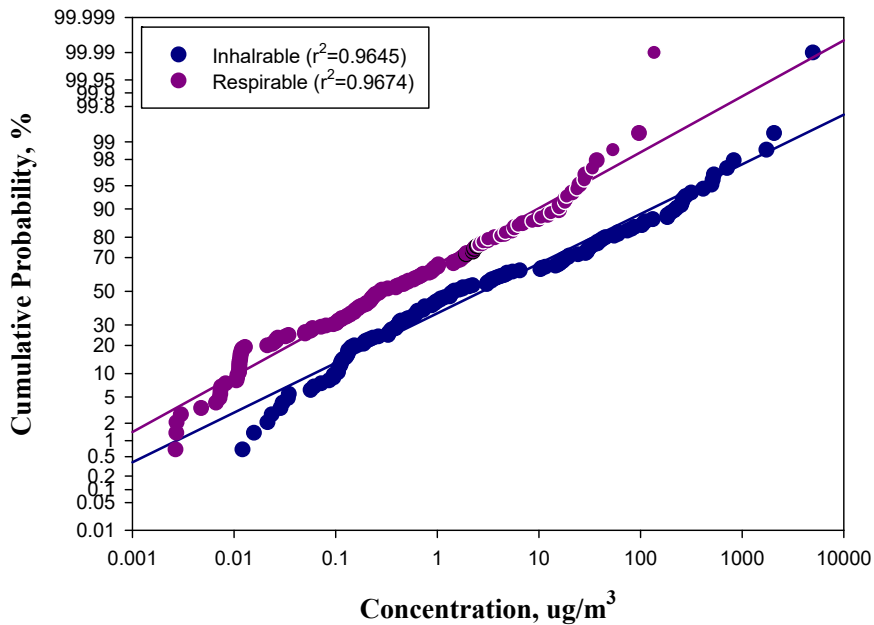
파·분쇄 공정의 코발트 농도(n=27)는 0.03~4967.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: 507.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: 129.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 시료의 약 89 %가 노출기준을 초과하였고 가장 높게 평가된 시료는 노출기준의 248배를 초과하였다. 블랙파우더 투입(n=16) 공정은 4.86~709.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: 81.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: 31.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)으로 시료의 약 13 %가 노출기준을 초과하였다.

제품포장(n=18) 공정은 0.13~262.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: 42.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: 5.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 시료의 약 33 %가 노출기준을 초과하였고, 현장관리(n=11)는 0.06~251.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: 34.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: 2.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 1개 시료가 노출기준을 초과하였다. 그 외 금속회수(n=57, 범위 0.02~14.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)와 운전실(n=16, 범위 0.01~0.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 시료는 노출기준 미만이였다.

파·분쇄 및 블랙파우더 투입 공정과 제품 포장 공정은 입자상물질을 직접 취급하고 있어 다른 공정에 비해 농도 수준이 높은 편이며 현장관리 노동자들은 공장 내부에 침착된 입자의 2차 비산 등으로 인해 일부 노출 수준이 높게 평가된 것으로 판단된다.

〈표 III-55〉 재생 산업의 코발트 노출 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

구분	공정	시료 수	산술 평균	표준 편차	기하 평균	기하 표준편차	범위
총 분진	전체	145	112.0	478.0	3.0	19.6	0.01 ~ 4967.0
	파·분쇄	27	507.0	1020.0	129.0	9.0	0.03 ~ 4967.0
	BP투입	16	81.6	175.0	31.3	3.4	4.86 ~ 709.3
	금속회수	57	1.6	2.8	0.6	4.5	0.02 ~ 14.5
	제품포장	18	42.2	83.1	5.5	9.6	0.13 ~ 262.7
	현장관리	11	34.5	75.3	2.3	16.8	0.06 ~ 251.0
	운전실	16	0.1	0.1	0.1	2.1	0.01 ~ 0.2
후흡성 분진	전체	145	5.2	15.6	0.3	14.1	< 0.01 ~ 135.9
	파·분쇄	27	23.2	30.2	9.8	5.9	0.02 ~ 135.9
	BP투입	16	3.6	5.3	1.9	2.9	0.42 ~ 18.1
	금속회수	58	0.3	0.8	0.1	5.8	0.00 ~ 5.8
	제품포장	18	1.5	1.9	0.5	7.9	< 0.01 ~ 5.7
	현장관리	10	1.9	2.4	0.4	13.8	0.01 ~ 6.9
	운전실	16	0.0	0.0	0.0	2	0.01 ~ 0.0



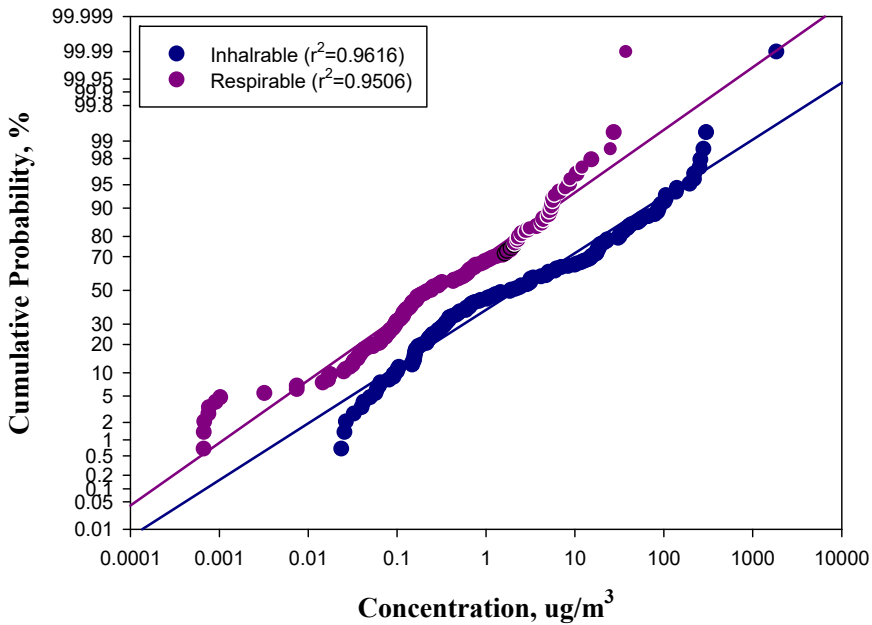
[그림 III-87] 재생 산업의 코발트 노출 농도 누적분포

망간과 알루미늄 노출 농도는 다른 금속에 비해 상대적으로 낮은 수준이며 이는 배터리 양극 활물질의 금속 함량에 따른 것으로 판단된다. 또한 공정별 분류에서 다른 금속과 동일하게 파·분쇄 공정의 노출 수준이 다른 공정의 노출 수준보다 높게 나타났다. 망간 노출 농도는 표 Ⅲ-56과 그림 Ⅲ-88과 같으며, 알루미늄의 노출 농도는 표 Ⅲ-57과 그림 Ⅲ-89와 같다.

배터리 재생 산업의 망간 노출 농도(n=145)는 0.02~1835.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (산술평균: 38.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하평균: 2.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이고, 파·분쇄(n=27) 공정의 노출 수준은 0.04~1835.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 1개 시료가 노출기준(1,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)을 초과하였고 그 외 공정에서는 모두 노출기준 미만으로 평가되었다. 알루미늄은 모든 시료가 노출기준(10,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 미만으로 평가되었다.

〈표 III-56〉 재생 산업의 망간 노출 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

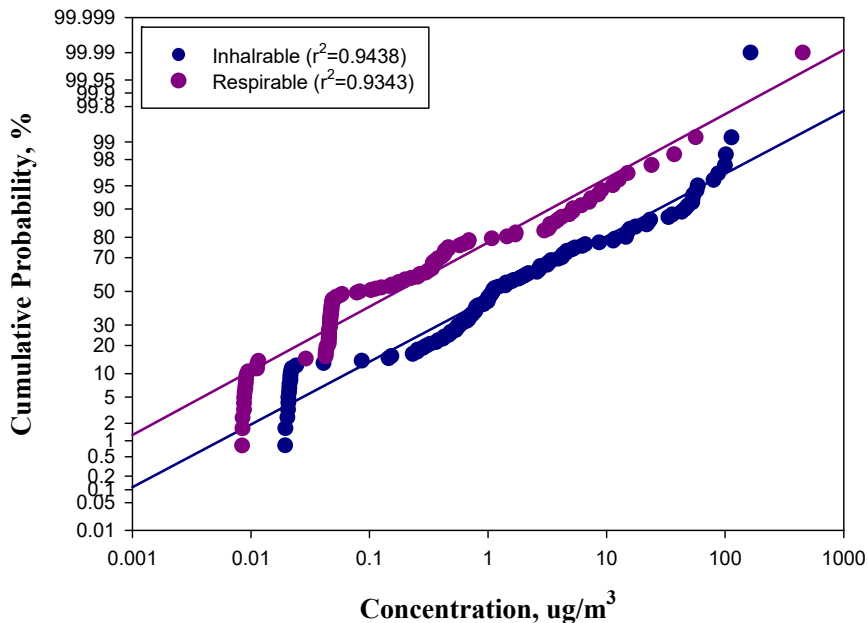
구분	공정	시료 수	산술 평균	표준 편차	기하 평균	기하 표준편차	범위
총 분진	전체	145	38.4	161.0	2.4	13.5	0.02 ~ 1835.8
	파·분쇄	27	142.0	346.0	47.2	6.0	0.04 ~ 1835.8
	BP투입	16	29.3	38.8	15.1	3.3	2.12 ~ 136.3
	금속회수	57	1.8	3.4	0.6	4.3	0.02 ~ 18.6
	제품포장	18	44.9	92.1	6.6	8.0	0.35 ~ 298.3
	현장관리	11	32.2	66.5	3.0	13.1	0.15 ~ 219.3
	운전실	16	0.1	0.1	0.1	2.0	0.03 ~ 0.2
	후흡성 분진	전체	145	2.0	4.8	0.3	10.4
파·분쇄	27	6.8	8.3	3.3	6.5	0.00 ~ 37.2	
BP투입	16	1.3	1.2	0.8	3.2	0.05 ~ 4.2	
금속회수	58	0.7	3.3	0.1	3.3	0.01 ~ 24.9	
제품포장	18	1.8	2.0	0.8	4.5	0.05 ~ 5.9	
현장관리	10	1.9	2.3	0.3	16.9	< 0.01 ~ 6.6	
운전실	16	0.0	0.0	0	5.8	< 0.01 ~ 0.1	



[그림 III-88] 재생 산업의 망간 노출 농도 누적분포

〈표 III-57〉 재생 산업의 알루미늄 노출 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

구분	공정	시료 수	산술 평균	표준 편차	기하 평균	기하 표준편차	범위
총 분진	전체	121	11.9	26.5	1.4	10.4	0.02 ~ 163.6
	파·분쇄	27	43.4	42.2	17.6	6.3	0.25 ~ 163.6
	BP투입	10	10.5	10.5	6.9	2.6	2.19 ~ 33.2
	금속회수	47	1.8	5.2	0.7	3.4	0.02 ~ 35.8
	제품포장	14	4.1	4.4	2.5	3.0	0.32 ~ 15.7
	현장관리	7	3.7	5.1	1.2	8.0	0.02 ~ 14.8
	운전실	16	0.1	0.1	0.0	2.6	0.02 ~ 0.3
호흡성 분진	전체	122	5.8	41.2	0.2	9.8	0.01 ~ 451.4
	파·분쇄	27	8.2	12.7	1.5	16.1	0.01 ~ 56.3
	BP투입	10	1.0	1.6	0.2	9.5	0.01 ~ 3.9
	금속회수	48	9.8	65.1	0.2	4.9	0.03 ~ 451.4
	제품포장	14	0.1	0.2	0.0	3.4	0.01 ~ 0.7
	현장관리	7	0.1	0.2	0.0	4.5	0.01 ~ 0.5
	운전실	16	0.0	0	0.0	1.1	0.04 ~ 0.1



[그림 III-89] 재생 산업의 알루미늄 노출 농도 누적분포

(2) 입자상물질 특성 평가

배터리 재생 산업 입자상물질의 특성은 사업의 규모와 공법에 차이가 있어 동일한 발생 특성을 가지지 않는다. 따라서 평가대상 공정은 파·분쇄 투입, 블랙파우더 포장, 블랙파우더 투입, 제품포장 등 다양한 공정에서 평가를 진행하였다.

가) 공기역학적 질량중위직경(MMAD) 및 질량평균직경(MMD)

배터리 재생 산업의 MMAD와 MMD 결과는 공정에 따라 표 III-58 및 표 III-59와 같다.

G 사업장의 파·분쇄 투입 공정에서 발생하는 입자의 MMAD는 약 2.57~3.91 μm , MMD는 약 10.61~12.03 μm 로 모든 물질이 비슷한 양상을 보였으며, 블랙파우더 포장 공정에서의 입자는 리튬, 니켈, 코발트, 망간의 경우 MMAD는 2.38~2.81 μm , MMD는 9.48~10.44 μm 로 비교적 균일한 결과를 보였고 알루미늄은 1.08 μm 와 4.80 μm 로 평가되었다. 이는 파·분쇄 과정에서 입도가 큰 알루미늄 입자를 걸러내는 과정을 거치기 때문에 상대적으로 낮은 입도의 입자가 남아있는 것이라 판단된다.

블랙파우더 투입은 벌크백(bulk bag)에 포장된 블랙파우더를 투입하는 공정으로 입자의 MMAD는 2.28~4.71 μm 이었으며, MMAD는 9.83~13.97 μm 로 입자가 서로 응집되어 포장 공정에 비해 상대적으로 입자 크기가 크게 평가된 것으로 판단된다.

H 사업장과 I 사업장의 원료투입 공정은 외부에서 블랙파우더를 공급받아 사용하며 발생하는 입자의 MMAD는 약 3~5 μm , MMD는 약 13~15 μm 로 비슷한 크기의 양상을 보였으며, H 사업장의 분급기의 MMAD는 1.58~4.88 μm , MMD는 8~15 μm 이었고, I 사업장의 니켈황산염 포장공정은 약 5 μm , 12 μm 로 평가되었다.

〈표 III-58〉 재생 산업의 공기역학적 질량중위직경(μm)

사업장	공정		리튬	니켈	코발트	망간	알루미늄
G	파·분쇄 투입	MMAD*	3.41	3.20	3.91	3.74	2.57
		GSD**	0.70	1.39	1.14	0.49	-0.06
	블랙파우더 포장	MMAD	2.38	2.47	2.54	2.81	1.08
		GSD	1.39	2.18	1.33	0.91	1.03
	블랙파우더 투입	MMAD	3.85	4.13	4.08	4.71	2.28
		GSD	0.20	0.76	0.62	0.22	-0.22
H	원료투입	MMAD	5.74	5.65	5.90	5.87	3.40
		GSD	1.13	1.94	1.29	1.24	-0.08
	포장 전 분급기	MMAD	3.98	3.82	4.68	4.88	1.58
		GSD	0.46	1.19	-0.32	-0.21	-1.05
	원료투입	MMAD	4.13	5.02	4.25	4.29	3.24
		GSD	0.17	1.01	0.13	0.15	-0.39
제품포장	MMAD	-	5.01	-	-	-	
	GSD	-	1.01	-	-	-	

* MMAD: 공기역학적 질량중위직경, ** GSD: 기하표준편차

〈표 III-59〉 재생 산업의 질량평균직경(μm)

사업장	공정		리튬	니켈	코발트	망간	알루미늄
G	파·분쇄 투입	MMD*	10.98	10.80	11.71	12.03	10.61
		GSD**	0.92	1.54	1.40	0.79	0.23
	블랙파우더 포장	MMD	9.48	9.74	9.64	10.44	4.80
		GSD	1.58	2.38	1.51	1.12	0.99
	블랙파우더 투입	MMD	12.44	13.23	12.56	13.97	9.83
		GSD	0.51	1.13	0.92	0.60	0.01
H	원료투입	MMD	15.57	15.56	15.89	15.84	12.62
		GSD	1.62	2.42	1.78	1.73	0.38
	포장 전 분급기	MMD	8.71	7.40	12.42	14.93	9.87
		GSD	0.56	1.29	0.00	0.24	-0.29
	원료투입	MMD	14.39	15.24	14.69	14.64	13.21
		GSD	0.66	1.49	0.65	0.65	0.10
제품포장	MMD	-	11.89	-	-	-	
	GSD	-	0.45	-	-	-	

* MMD: 질량평균직경, ** GSD: 기하표준편차

나) 입경분포

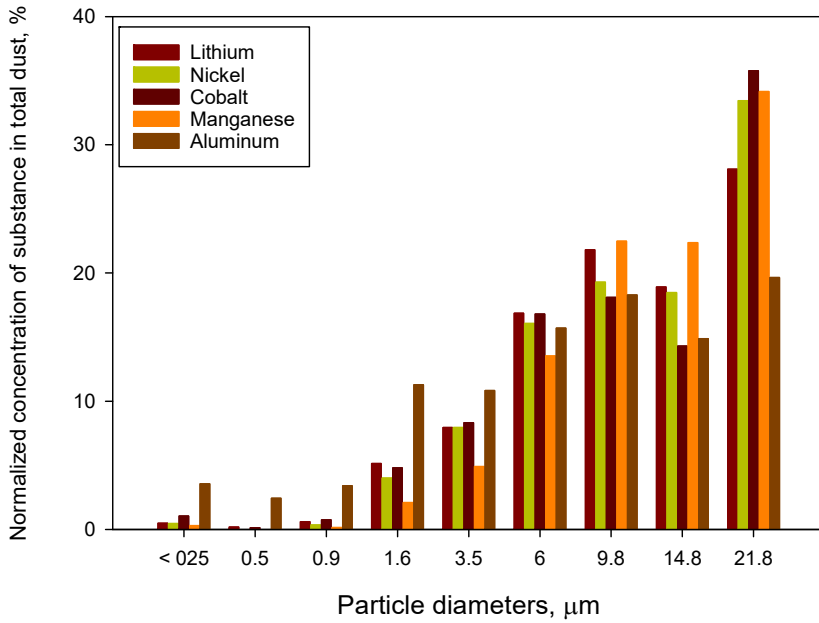
배터리 재생 산업에서 발생하는 입경 크기별 농도 및 입자 수 분포는 각 공정에 따라 표 III-60~62 및 그림 III-90~103과 같다.

파·분쇄 공정에서 입경 크기에 따른 질량 분포는 9.8 μm 이하의 입자가 53.8~64.4 %, 9.8 μm 초과는 35.6~46.2 % 이었으며 블랙파우더 포장 공정에서는 9.8 μm 이하 비율이 63.1~86.5 %, 9.8 μm 초과가 13.5~36.9 % 이었다. 침출 공정은 9.8 μm 이하에서 43.5~65.5 % 9.8 μm 초과 34.5~56.5 %로 평가되었다. 입자 수 분포는 모든 공정에서 9.8 μm 이하의 입자가 99.9 % 이었다. 이러한 결과는 9.8 μm 를 초과하는 분진의 입자 수 0.01 %가 전체 질량에 매우 큰 영향을 주는 것을 의미한다.

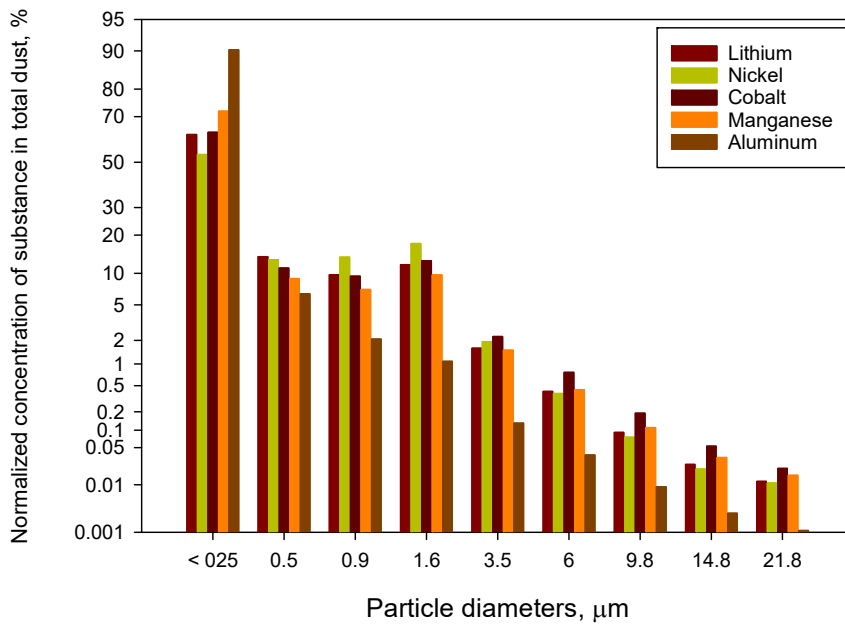
블랙파우더 포장 공정은 다른 공정에 비해 9.8 μm 이하의 입자 농도 분포가 높는데 이는 분쇄 후 큰 입자가 걸러지는 것이 원인이며 파·분쇄 투입이나 침출 투입 공정에서는 투입 전 바스켓이나 벌크백(bulk bag)에 저장되어 입자의 응집 현상이 발생하여 상대적으로 큰 입자의 질량 분포가 높은 것이라 판단된다.

〈표 III-60〉 배터리 재생 G사의 입자상물질 입경분포(%)

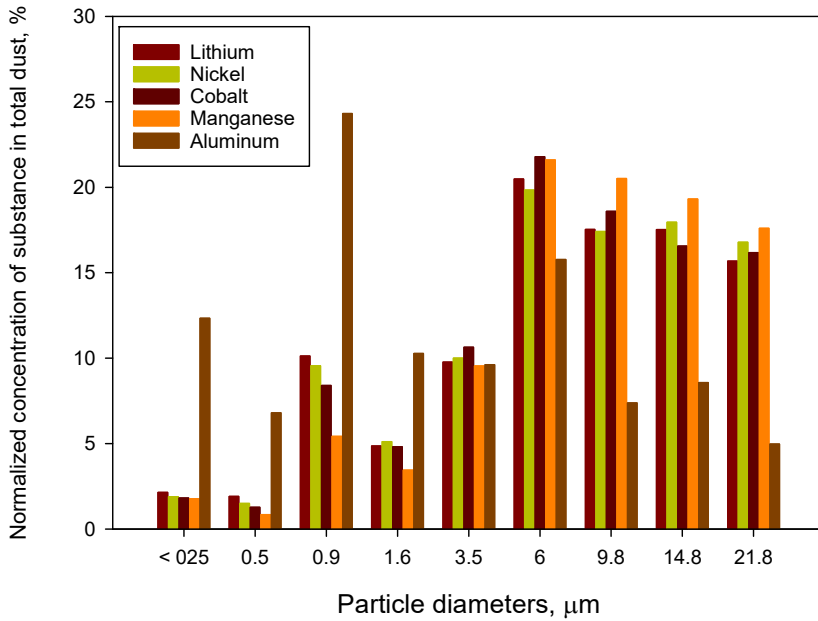
공정	물질	질량 분포		입자 수 분포	
		9.8 μm 이하	9.8 μm 초과	9.8 μm 이하	9.8 μm 초과
파·분쇄 투입	리튬	60.1	39.9	99.964	0.036
	니켈	64.4	35.6	99.969	0.031
	코발트	56.5	43.5	99.926	0.074
	망간	53.8	46.2	99.952	0.048
	알루미늄	60.7	39.3	99.996	0.004
블랙파우더 포장	리튬	66.8	33.2	99.996	0.004
	니켈	65.3	34.7	99.995	0.005
	코발트	67.3	32.7	99.995	0.005
	망간	63.1	36.9	99.994	0.006
	알루미늄	86.5	13.5	100	0
블랙파우더 투입	리튬	53.0	47.0	99.975	0.025
	니켈	48.1	51.9	99.971	0.029
	코발트	49.9	50.1	99.961	0.039
	망간	43.5	56.5	99.949	0.051
	알루미늄	65.5	34.5	99.997	0.003



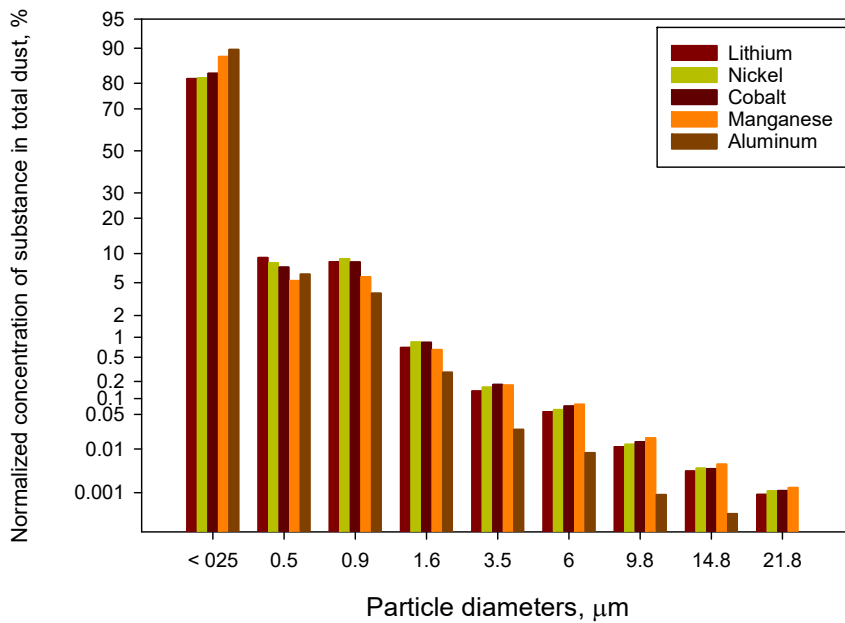
[그림 III-90] G사 파·분쇄 투입 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)



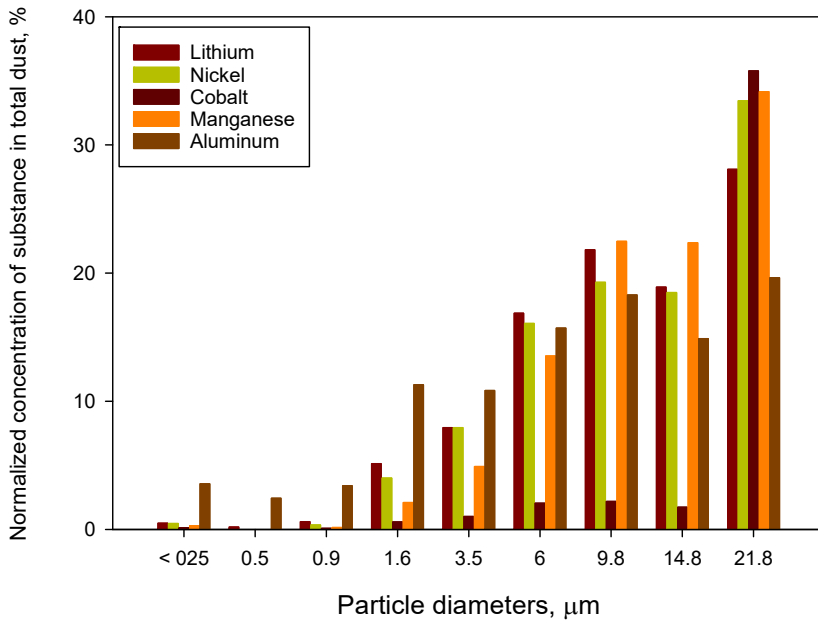
[그림 III-91] G사 파·분쇄 투입 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)



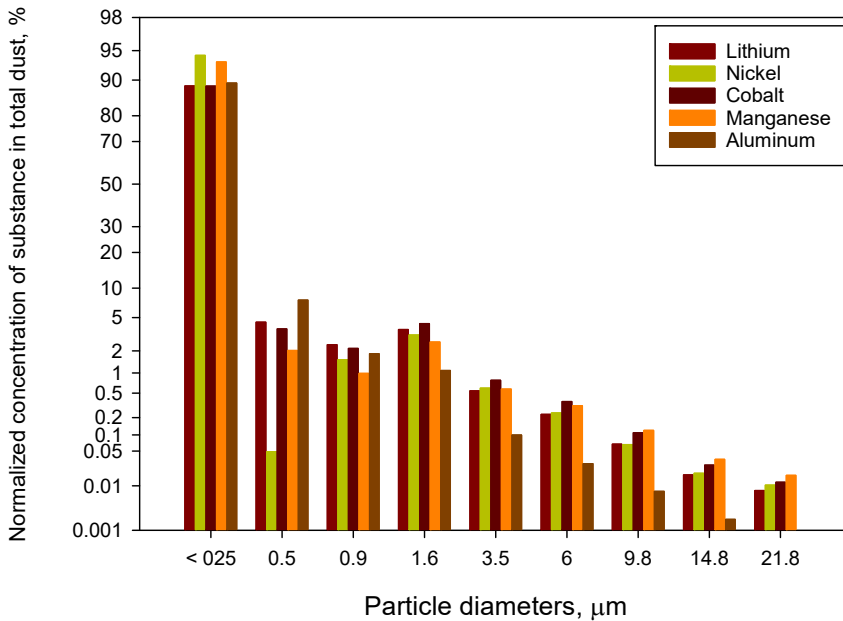
[그림 III-92] G사 블랙파우더 포장 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)



[그림 III-93] G사 블랙파우더 포장 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)



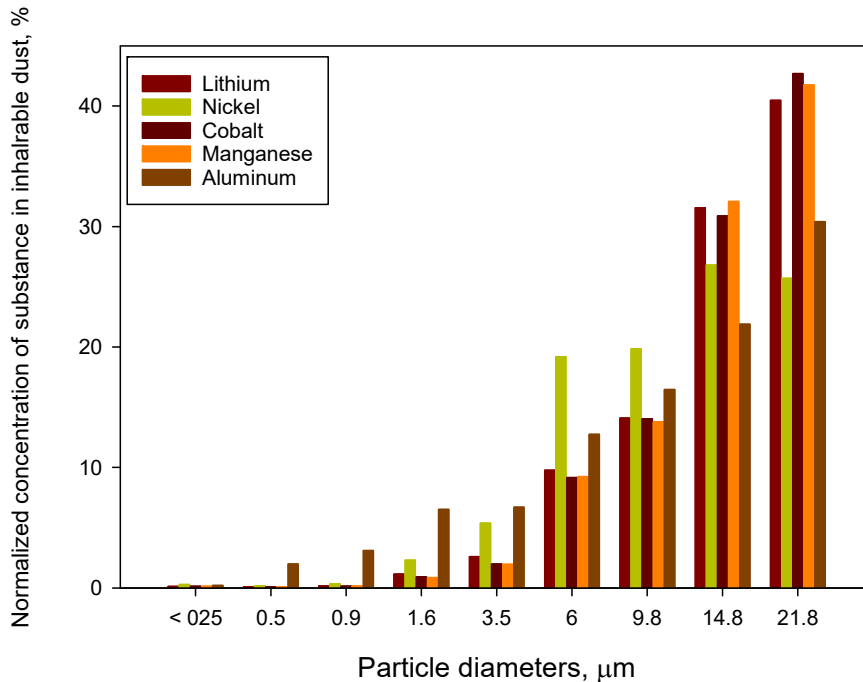
[그림 III-94] G사 침출 투입 공정의 입경 크기별 질량 분포(%)



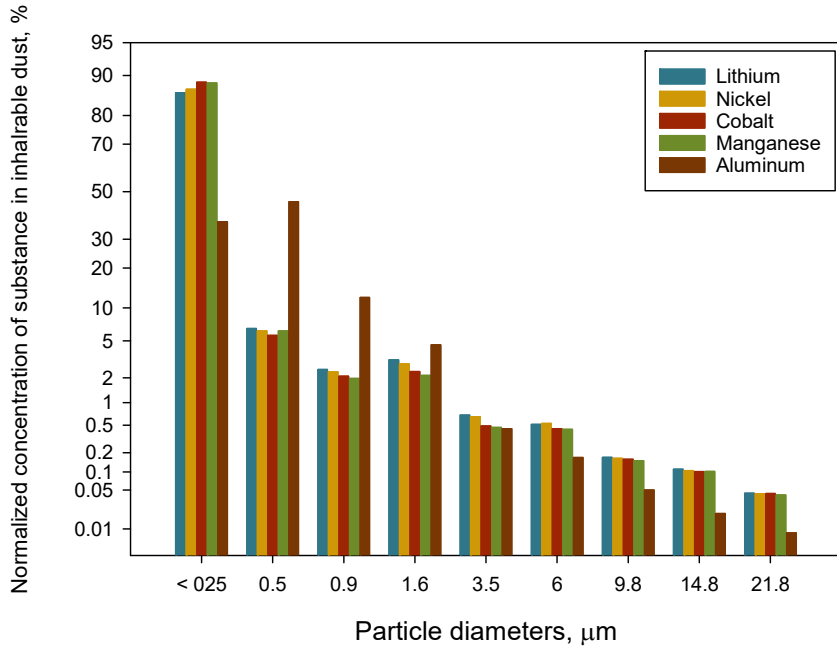
[그림 III-95] G사 침출 투입 공정의 입경 크기별 입자 수 분포(%)

〈표 III-61〉 배터리 재생 H사의 입자상물질 입경분포(%)

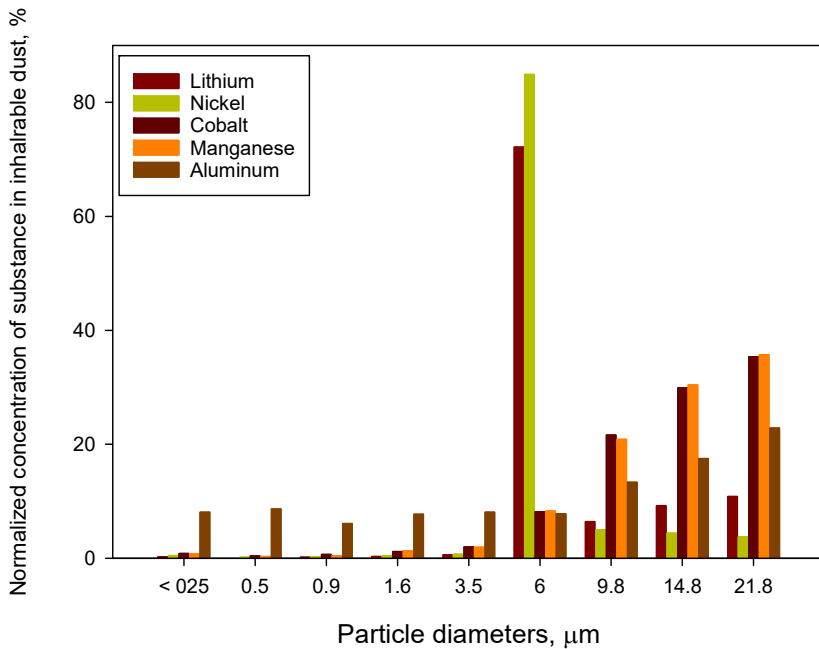
공정	물질	질량 분포		입자 수 분포	
		9.8 μm 이하	9.8 μm 초과	9.8 μm 이하	9.8 μm 초과
원료 투입	리튬	27.97	72.03	99.85	0.15
	니켈	47.49	52.51	99.85	0.15
	코발트	26.41	73.59	99.86	0.14
	망간	26.18	73.82	99.86	0.14
	알루미늄	47.70	52.30	99.97	0.03
포장 전 분급기	리튬	79.92	20.08	99.98	0.02
	니켈	91.83	8.17	99.98	0.02
	코발트	34.74	65.26	99.98	0.02
	망간	33.86	66.14	99.98	0.02
	알루미늄	59.66	40.34	99.99	0.01



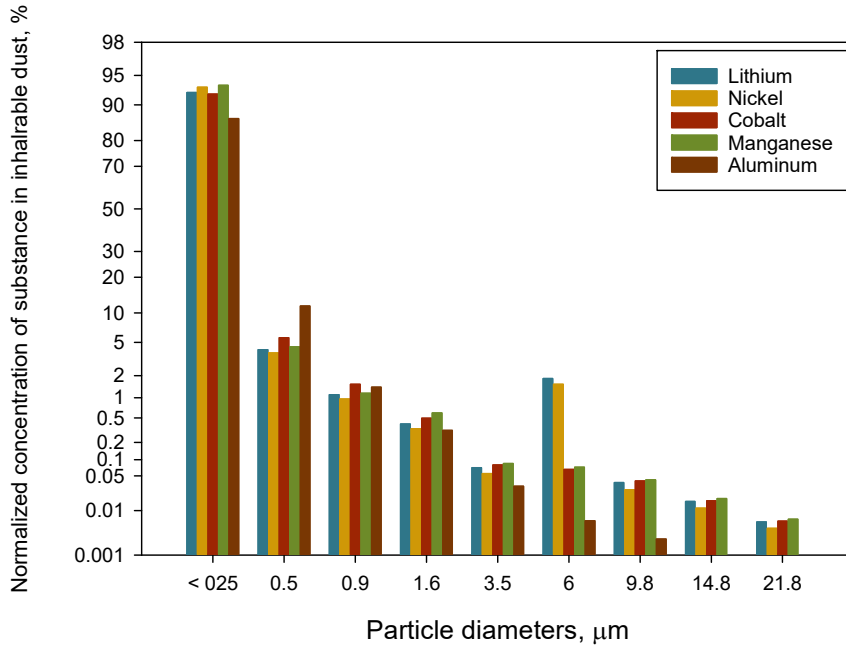
[그림 III-96] H사 원료투입 공정의 입경 크기에 따른 농도 분포(%)



[그림 III-97] H사 원료투입 공정의 입경 크기에 따른 입자 수 분포(%)



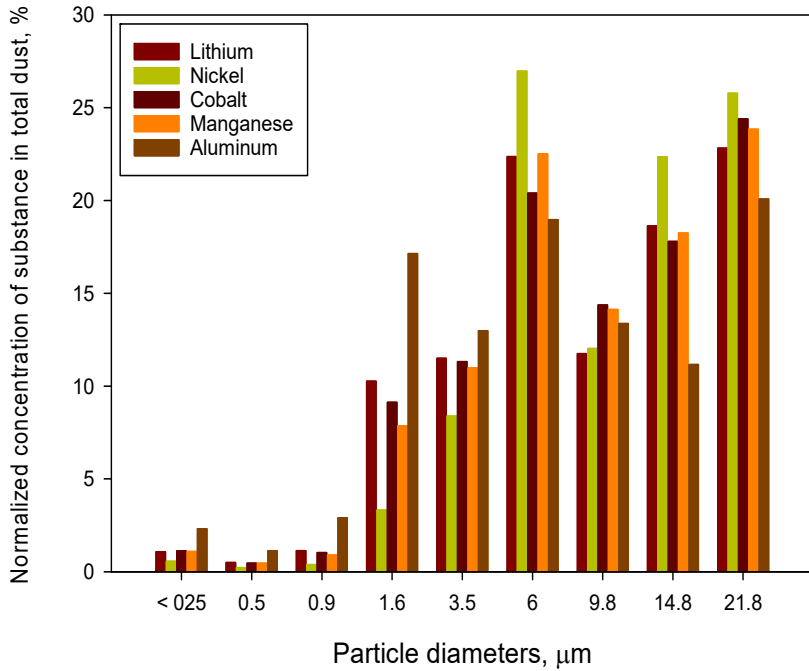
[그림 III-98] H사 포장 전 분급기의 입경 크기에 따른 농도 분포(%)



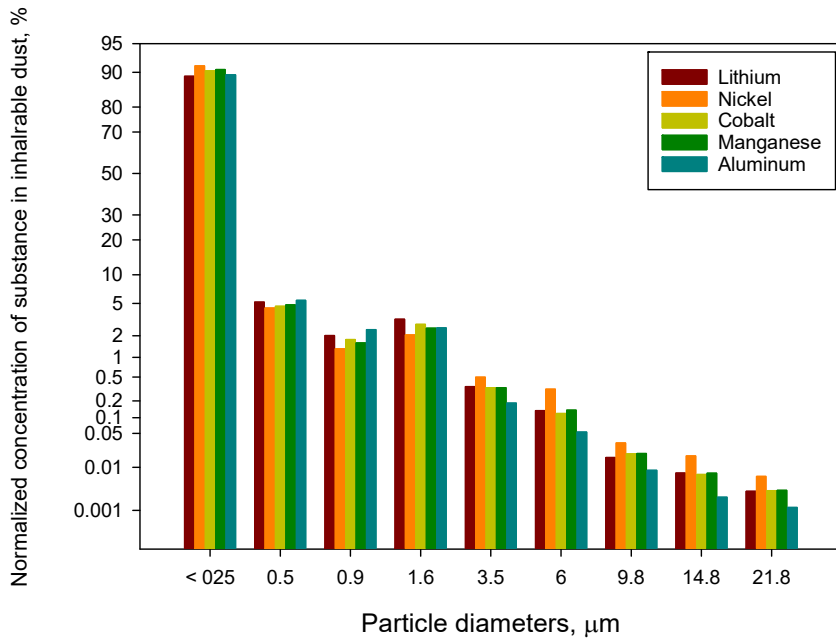
[그림 III-99] H사 포장 전 분급기의 입경 크기에 따른 입자 수 분포(%)

<표 III-62> 배터리 재생 I사의 입자상물질 입경분포(%)

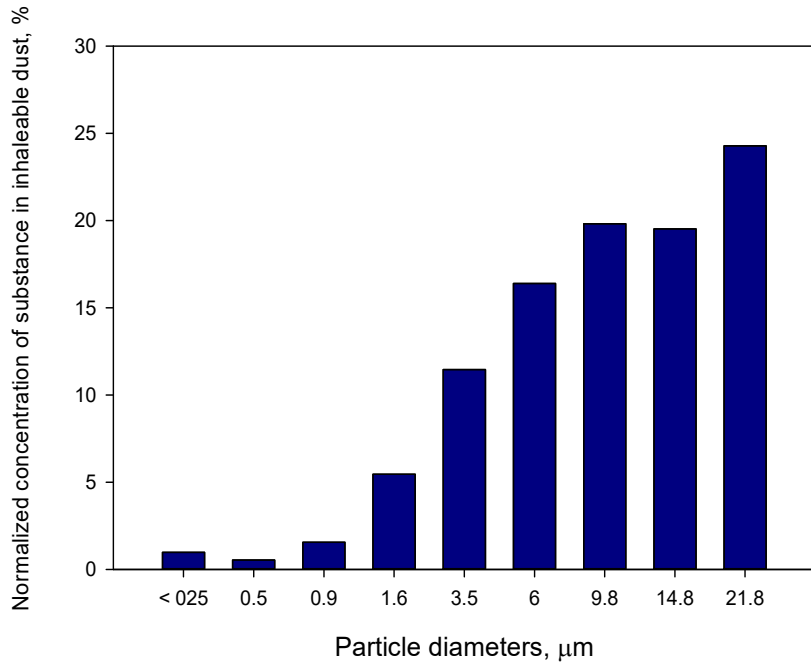
공정	물질	질량 분포		입자 수 분포	
		9.8 μm 이하	9.8 μm 초과	9.8 μm 이하	9.8 μm 초과
원료 투입	리튬	27.97	72.03	99.85	0.15
	니켈	47.49	52.51	99.85	0.15
	코발트	26.41	73.59	99.86	0.14
	망간	26.18	73.82	99.86	0.14
	알루미늄	47.70	52.30	99.97	0.03
제품포장	알루미늄	59.66	40.34	99.99	0.01



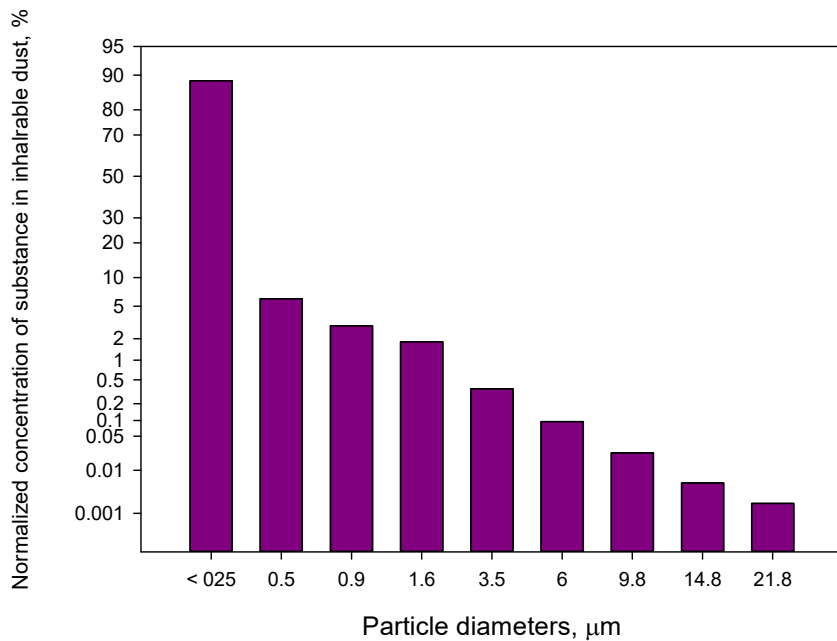
[그림 III-100] 원료투입 공정의 입경 크기에 따른 농도 분포(%)



[그림 III-101] 원료투입 공정의 입경 크기에 따른 입자 수 분포(%)



[그림 III-102] 황산니켈염 포장공정의 입경 크기에 따른 농도 분포(%)



[그림 III-103] 황산니켈염 포장공정의 입경 크기에 따른 입자 수 분포(%)

11. 취급 화학물질 관리방안

이차전지 산업은 세부 산업 및 각 사업장에 따라 작업 공법 또는 공정이 상이하여, 일괄된 작업환경 관리방안을 제시하기에는 제한점이 매우 크다.

따라서 본 연구에서는 노출 평가 후, 사업장의 노출 결과와 현장 조사를 바탕으로 19개 사업장을 대상으로 각 사업장에 맞는 작업환경 관리방안을 제시하는 설명회를 개최하였고, 일부 사업장에서는 이를 통해 공정 및 업무 변경, 인식 개선, 노동자 교육 등 작업환경개선 활동을 추진하고 있다.

본 연구에서 제시하는 관리방안은 개별 사업장의 결과를 정리한 것으로 이차전지 산업 전체에 대한 방안이 될 수는 없으며 해당 내용은 일반적인 생산 작업에 해당하는 내용으로 연구, 유지보수 및 정비, 폐기물 관리 등의 작업에 대해서는 추가 연구가 필요하다.

1) 입자상 물질

이차전지 산업에서 주로 사용되는 입자상 물질은 리튬, 니켈, 코발트, 망간, 알루미늄 등의 금속과 흑연 등의 분진이다.

- 이차전지 산업에서 주로 사용하는 리튬은 수산화리튬의 형태로, 강한 염기성을 지니고 있어 피부 노출 시 화상 또는 피부질환을 유발할 수 있다. 따라서 사업장에서는 염기성 물질로부터 호흡기와 피부를 보호할 수 있는 보호구를 지급해야 하며, 개인 감수성에 따라 증상 발현 정도가 다를 수 있으므로 작업 배치 시 주의가 필요하다. 또한, 수산화리튬이 보호장비 외부에 묻어있을 경우 2차 노출의 위험이 있으므로, 보호장비를 착용하고 탈의하는 별도의 공간을 마련하는 것이 필요하다.

- 입자상 형태의 금속 혹은 흑연은 배터리 제조 특성상 수 마이크로미터의 매우 미세한 크기로 제조 또는 사용되고 있어 작업장으로 누출되면 장기간 부유하며 작업자에 노출될 수 있으며, 작업자의 작업공간 및 이동 통로 등에 침착되어 2차 비산에 의한 노출 위험이 있다. 입자상물질을 관리하기 위해서는 제품생산과 작업자의 노출 등을 고려해야 하기 때문에 국소배기 단독으로 관리하기에는 한계점이 매우 크다. 따라서 제품의 생산성 향상과 노출 관리를 위해서 입자상물질이 비산 될 수 있는 공정은 최대한 밀폐하고 제품생산 특성에 맞는 환기 설비를 설치해야 한다. 밀폐와 환기시설은 제조공법, 제조물의 크기 등 각 사업장 특성에 맞게 설계되어야 하므로 통일된 방안을 제시할 수는 없다.
- 입자상물질을 취급하는 사업장에서 가장 취약한 부분은 오염물질 청소였다. 노동자의 업무는 제품생산이기 때문에 작업공간 및 이동통로가 오염되어도 다른 사람의 업무로 인식하고 있었다. 연구결과 사업장의 청소 유·무에 따라 노출 수준의 변이가 크게 나타났다. 일부 사업장에서는 원료 투입과 제품 포장 시 포장재 등에 묻어있는 물질을 진공 청소기 등을 사용하여 제거하고, 마그네틱 바를 사용하여 바닥 청소를 하는 등 일상 작업 시 청소 업무를 수행하고 있었다. 따라서 각 사업장에서는 작업공간 청소를 업무에 추가하여 오염물질을 수시로 제거하여 입자상물질 노출을 최소화 하고 청소 방법에 대한 교육이 필요하다.
- 일부 사업장에서는 같은 공정에서 동시에 작업을 진행하더라도 개인의 작업 방법 및 형태에 따라 노출 수준에 차이가 있었다. 따라서 사업장에서는 입자상 물질의 비산을 최소화 할 수 있는 올바른 작업 방법에 대한 지속적인 교육 등이 필요하다.

2) 가스상 물질

이차전지 산업에서 주로 사용되는 가스상 물질은 카보네이트 용매, 디클로로메탄 등이다.

- 카보네이트 용매는 전해액 원료로 대량 사용되며, 배터리 제조와 배터리 재생업에서도 노동자에게 노출 가능성이 있다. 카보네이트 용매는 눈, 피부 및 호흡기에 손상, 자극 등의 건강영향을 초래할 수 있으나 법적 규제 대상 물질이 아니므로 관리가 매우 미흡하다. 따라서 노동자의 노출을 최소화하기 위해 국소배기 등의 환기 장치를 설치하고 적절한 호흡용 보호구를 올바르게 착용하는 등의 선제적 관리가 필요하다.
- 분리막 제조용 부원료로 사용되는 디클로로메탄은 수조의 위치에 따라 누출 농도가 크게 변동하므로, 작업 공간 혹은 이동 통로와 디클로로메탄 수조를 분리할 필요가 있다. 이를 위해 수조 외부에 차단벽을 설치하고 환기 설비를 설치하는 등의 공학적 관리방안이 필요하다. 또한 필름이 끊어지는 등의 돌발 상황에서 적절한 호흡용 보호구를 착용하는 등의 관리가 필요하다.

3) 기타 사항

- 일부 산업에서는 소성로 혹은 열처리 등의 작업으로 노동자가 고열에 노출되고 있었다. 본 연구에서는 고열에 대한 노출 평가를 진행하지는 않았으나 노동자의 건강 보호를 위해 사업장에서는 고열에 대한 관리 대책이 필요하다. 장기적으로는 열원이 되는 기기에 외벽을 추가하는 등 설비개선을 추진하여 열원이 작업 공간으로 확산되지 않도록 하고, 단기적으로는 고열 작업 장소 가까운 곳에 냉방시설이 설치된 휴게장소를 확보하는 것이 권고된다.

- 배터리 재생 산업에서는 주로 폐배터리, 불량 양극재 및 블랙파우더 등을 원료로 하여 금속을 회수한다. 현재 국내에서는 폐기물의 MSDS 제공이 미흡하여 일부 사업장에서는 MSDS 확보에 어려움을 겪고 있다. 따라서 배터리 재생 산업의 노동자 건강보호를 위해 MSDS 제공 및 이에 대한 관리가 필요하다.

이차전지 산업은 각 산업에 따라 유해인자의 종류와 노출 수준이 다르다. 본 연구에서는 노동자의 유해인자 노출을 최소화하기 위한 기본 방안을 제시하였고 각 사업장에서는 공법, 공정, 취급 화학물질 그리고 사업장 상황에 적절한 능동적인 작업환경 관리방안을 수립하고 실행할 것을 권장한다.

IV. 결론



IV. 결 론

본 연구는 2022년부터 2024년까지 3년간 진행되었다.

1차 년도 연구는 문헌고찰 및 32개 사업장의 방문조사를 통해 이차전지 산업을 10개 산업군(양극 활물질, 음극 활물질, 전해액, 분리막, 리튬, 집전체, 바인더, 도전재, 배터리 제조, 배터리 재생)으로 분류하고 산업의 구조, 세부 공정 및 취급 화학물질을 파악하였다.

2~3차 년도 연구는 22개 사업장을 대상으로 노동자의 유해인자 노출 수준과 주요 원료인 금속 및 흑연 등의 입자상물질을 대상으로 입자 크기 분포를 확인하여 노출 특성을 평가하고 작업환경 관리방안을 제시하였다.

1. 산업별 취급 화학물질

현재 국내 이차전지 산업은 리튬이온배터리 중 니켈·코발트·망간·알루미늄 등이 혼합된 전구체를 사용하는 NCM(니켈·코발트·망간), NCA(니켈·코발트·알루미늄) 및 NCMA(니켈·코발트·망간·알루미늄) 계열 배터리가 주로 생산된다. 국내 이차전지 사업장에서 주로 사용하는 화학물질과 노출기준은 부록 1에 기재하였다.

이차전지 산업에서는 입자상 형태의 리튬, 니켈, 코발트, 망간, 알루미늄 등의 금속과 흑연이 주요 원료이며, 공정상에서 황산, 염산 등의 산 용액과 수산화나트륨 등의 염기성 용액 및 다양한 유기용제(디클로로메탄, 카보네이트 용매, NMP 등)가 사용된다(부록 1. 표 A-1 참조).

2. 입자상물질 및 유기용제 노출평가

본 연구에서는 이차전지 산업의 원료물질로 사용되는 입자상물질과 유기용제를 대상으로 노출평가를 실시하였다. 노출평가 대상 입자상물질은 리튬, 니켈, 코발트, 망간 알루미늄, 흑연 그리고 CNT이며, 유기용제는 디클로로메탄, 카보네이트 용매, NMP 등이다.

- **양극 활물질 산업**은 전구체 원료 제조업과 양극 활물질 제조업으로 구분하여 노출 평가한 결과,
 - 전구체 원료인 황산니켈 포장 공정과 황산코발트 제조를 위한 원료투입 공정에서 노출기준을 초과하였으며,
 - 전구체 제조 및 양극 활물질 제조업에서는 리튬 약 3%, 니켈과 코발트는 각각 약 28%가 노출기준을 초과하고 망간은 1개 시료가 노출기준 초과이며 알루미늄은 노출기준 미만이었다. 특히, 원료투입 공정과 제품포장 공정에서 다량의 입자상물질에 노동자가 노출되는 것으로 평가되었다.
- **음극 활물질 산업**의 호흡성 분진 중 흑연은 노출기준 미만이었다.
- **전해액 산업**의 DMC는 약 58% 이상의 노동자가 wDNEL 값을 초과하였고 기준값 초과된 대부분은 세척 공정 작업자이다. EMC는 약 26%가 wDNEL 값을 초과하였으며 모두 생산 공정에서 기준을 초과하는 것으로 평가되었다.
- **분리막 산업**의 디클로로메탄은 노출기준 미만이었으나, 디클로로메탄 수조의 위치에 따라 지역시료를 평가한 결과 수조의 밀폐가 완벽하지 않아 작업공간으로 누출 되는 것으로 평가되었다.
- **리튬 산업**에서는 약 6%가 ILO 노출기준을 초과하는 것으로 평가되었고,

노출기준을 초과하는 공정은 대부분 리튬 포장 공정이었다.

- **바인더 산업**에서는 원료 저장탱크와 혼합탱크의 누출 확인을 위해 1,3-부타디엔, 스티렌 그리고 아크릴로니트릴을 평가한 결과 모두 미량이 검출되어 원료물질이 누출되는 것을 확인하였다.
- **도전재 산업**의 CNT 분진 중 EC의 농도 범위는 0.0003~135.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 분산공정 중 미량의 NMP가 작업공간으로 누출되고 있었다.
- **배터리 제조산업**은 대부분 공정에서 노출기준 미만이었다. 그러나 원료 투입 공정에서 노동자의 작업형태에 따라 리튬, 니켈, 코발트가 노출기준을 초과하는 것으로 평가되었다.
- **배터리 재생산업**은 해체/선별 공정에서 DMC의 약 14%와 EMC의 약 24%가 wDNEL 값을 초과하는 것으로 평가되었고, 리튬은 약 10%, 니켈 24% 그리고 코발트의 29%가 노출기준을 초과하였다. 노출기준 초과 공정은 파·분쇄 및 블랙파우더 투입 공정이었으며, 제품포장과 현장관리에서도 일부가 초과되는 것으로 평가되었다. 공법 특성상 습식작업보다는 건식작업 노동자가 고농도의 입자상물질에 노출되고 있었다.

3. 취급 화학물질 관리방안

이차전지 산업은 세부 산업 및 각 사업장에 따라 작업 공법 또는 공정이 상이하다. 특히 국내 이차전지 산업은 국가 첨단전략 산업으로 지정되어 각 사업장의 기술(공법 및 공정), 취급 화학물질 등이 보안 사항으로 관리되고 있어 일괄된 작업환경 관리방안을 제시하기에는 제한점이 매우 크다. 따라서 본 연구에서는 평가 후 각 사업장에 맞는 관리방안을 제시하는 설명회를 개최하였고 일부 사업장에서는 이를 통해 작업환경 개선 활동을 추진하고 있다.

입자상 물질의 노출 위험 감소를 위해서는 단기적으로는 적절한 보호구

착용, 업무 분장에 청소 업무 추가 등 인식개선 및 작업 방법에 대한 교육과 장기적으로는 공정의 밀폐 및 환기방안 등의 조치가 필요하다.

가스상 물질 중 카보네이트 용매의 관리방안으로는 국소배기 등 환기 장치를 설치하고 적절한 보호구를 착용하는 등의 선제적 관리가 필요하고, 디클로로메탄은 수조를 작업 공간과 분리하여 관리하고, 필름 끊김 등의 돌발 상황 시 적절한 보호구를 착용하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 이차전지 산업의 보안 특성을 고려하여 노동자의 유해인자 노출을 최소화하기 위한 기본 방안을 기술하였고, 각 사업장에서는 연구진이 제시한 관리방안을 바탕으로 공법, 공정, 취급 화학물질 그리고 사업장 상황 등을 고려하여 능동적인 작업환경 관리방안을 수립하고 실행할 것을 권장한다.

4. 제언

이차전지 산업에서 대부분의 화학물질은 법적 관리 대상 물질이며, 각 사업장에서는 작업환경측정 등을 통해 노동자의 건강을 관리하고 있다.

그러나 이차전지 원료 중 가장 중요한 리튬과 전해액 용매로 대량 사용되는 카보네이트 용매는 법적 규제 대상이 아니며 노출기준도 설정되어 있지 않아 관리의 사각지대에 놓여있다.

따라서, 본 연구진은 리튬, 디메틸카보네이트, 디에틸카보네이트 그리고 에틸메틸 카보네이트에 대한 노출기준을 설정하고 작업환경측정 대상 유해인자에 포함하는 것을 제언한다.

참고문헌

- 김근중, 조윤지, 이종대. 리튬이차전지 음극용 석유계 피치로 코팅된 천연 흑연의 전기화학적 특성. Korean Chem. Eng. Res.. 2019;57(5):672-678 p.
- 김대원, 박재량, 안낙균 등. 리튬 함유 물질로부터 탄산리튬 회수에 대한 고찰. 한국결정성장학회지. 2019;29(3):91-106 p.
- 김정환, 이상영. 리튬이차전지용 분리막 이해 및 최신 연구 동향. 멤브레인. 2016;26(5):337-350 p.
- 나성민, 박현규, 김선욱 등. 리튬이온전지(Lithium Ion Battery) 양극 물질 연구동향. 한국공업화학전망. 2020;23(1): 3 p.
- 문희성. 리튬이온전지 전해액 기술 및 시장동향. 한국재료연구원. 2022
- 산업통상자원부. 이차전지 산업 기술 초격차를 위해 '30년까지 20조 원 민관 연구개발(R&D) 투자. 2023
- 산업통상자원부. 이차전지 산업 혁신전략. 2022
- 손정수. 리튬이차전지 재활용 기술동향. 세라미스트. 2010;13(5):45-53 p.
- 이광용, 장미연, 전현진. 국내 보급형 수동식 시료채취기 개발 연구(III). 산업안전보건연구원. 2021
- 이윤주, 최재철, 유명현 등. 리튬이온전지용 고분자 소재. 고분자 과학과 기술. 2013;24(6):603-611 p.
- 임소영. 이차전지산업 공급망의 환경·사회 위험 동향. KIET 산업연구원. 2022

- 장미연, 이광용. GC/FID를 이용한 사슬형 카보네이트 3종의 측정분석방법. 산업보건학회지. 2023;33(4):455-465 p.
- 정영민, 조원일. 리튬이온이차전지 기술동향과 미래전망. 세라미스트. 2010;13(5):7-14 p.
- 조연철, 김기훈, 안재우 등. 바이폴라 전기투석을 이용한 수산화리튬 회수에 관한 기초 연구. 대한금속·재료학회지. 2021;59(4):223-232 p.
- 조원일, 김형선, 조병원. 차세대 리튬2차전지용 재료. 전기전자재료. 2003;16(9):31-44 p.
- 한국산업안전보건공단 기술지침 KOSHA GUDIE A-162-2016. 한국산업안전보건공단. 2016
- Bergamaschi E, Garzaro G, Wilson Jones G, et al.. Occupational Exposure to Carbon Nanotubes and Carbon Nanofibres: More Than a Cobweb. Nanomaterials (Basel). 2021;11(3):745 p.
- Choi J, Lee C, Park S, et al.. Analysis of Electrochemical Performance with Dispersion Degree of CNTs in Electrode According to Ultrasonication Process and Slurry Viscosity for Lithium-Ion Battery. Nanomaterials, 2022;12(23), 4271.
- Hinds, W. C. Aerosol technology : properties, behavior, and measurement of airborne particles, 2ed edition. 1999
- Liu Y, Zhang R, Wang J, et al. Current and future lithium-ion battery manufacturing. iScience. 2021;24(4):102332-102332 p.
- National Institute for Occupational Safety and Health(NIOSH), NIOSH manual of analytical methods, NMAM 0500 4th edition.

- NIOSH. 1994
- National Institute for Occupational Safety and Health(NIOSH),
NIOSH manual of analytical methods, NMAM 0600 4th edition.
NIOSH. 1998
- National Institute for Occupational Safety and Health(NIOSH),
NIOSH manual of analytical methods, NMAM 1005 4th edition.
NIOSH. 1998
- National Institute for Occupational Safety and Health(NIOSH),
NIOSH manual of analytical methods, NMAM 1302 4th edition.
NIOSH. 1998
- National Institute for Occupational Safety and Health(NIOSH),
NIOSH manual of analytical methods, NMAM 1501 4th edition.
NIOSH. 2003
- National Institute for Occupational Safety and Health(NIOSH),
NIOSH manual of analytical methods, NMAM 5040 5th edition.
NIOSH. 2016
- National Institute for Occupational Safety and Health(NIOSH),
NIOSH manual of analytical methods, NMAM 7303 4th edition.
NIOSH. 2003
- National Institute of Occupational safety and Health(NIOSH).
Current Intelligence Bulletin 65—Occupational Exposure to
Carbon Nanotubes and Nanofibers; Department of Health and
Human Services; Centers for Disease Control and Prevention.
NIOSH. 2013

- Occupational Safety and Health Administration(OSHA). Preventing Fire and/or Explosion Injury from Small and Wearable Lithium Battery Powered Devices. OSHA. 2019
- Occupational Safety and Health Administration(OSHA). Sampling and analytical methods 56. OSHA. 1985
- Occupational Safety and Health Administration(OSHA). Sampling and analytical methods 80. OSHA. 1990
- Occupational Safety and Health Administration(OSHA). Sampling and analytical methods OVSG-1. OSHA. 2021
- Occupational Safety and Health Administration(OSHA). Sampling and analytical methods PV2121. OSHA. 2003
- Perttula P, Rodríguez Llopis I, Säämänen A, et al. Lithium-ion battery's life cycle: safety risks and risk management at workplaces. 2023
- Pu G, Zhu X, Dai J, et al.. Understand technological innovation investment performance: evolution of industry-university-research cooperation for technological innovation of lithium-ion storage battery in China. *Journal of Energy Storage*. 2021;46:103607 p.
- Sobianowska-Turek A, Urbańska W, Janicka A, Zawiślak M, Matla J. The necessity of recycling of waste li-ion batteries used in electric vehicles as objects posing a threat to human health and the environment. *Journal of Recycling*, 2021;6(2), 35.

- Vimmerstedt LJ, Ring S, Hammel C. Current Status of Environmental, Health, and Safety Issues of Lithium Ion Electric Vehicle Batteries. National Renewable Energy Laboratory. 1995
- Wang GP, Li M, Qian Y, et al. Effect of Carbon Nanotube Dispersion on Electrochemical Behavior of the CNTs/LiCoO₂ Composite Cathode. International Journal of Electrochemical Science. 2021;16(7), 210765.

Abstract

Research on chemicals and industrial status in secondary battery industries in Republic of Korea(III)

Objectives : The secondary battery industry has been growing rapidly due to international carbon emission regulations. However, most research has focused on technology development and accident risks, with limited studies addressing worker health protection. This study aims to provide fundamental data for protecting worker health by identifying processes, chemicals used and levels of worker exposure.

Method : This study was conducted over three years(2022~2024). In the first year, a literature review and field survey of 32 workplaces classified the secondary battery industry into 10 categories: cathode active material, anode active material, electrolyte, separator, lithium, current collector, binder, conductive, manufacturer and recycling. This classification aimed to identify the processes and handling of chemicals. In the second and third year, a detailed evaluation of the working environment was conducted for 22 workplaces, and a management plan was proposed.

Results : The secondary battery industry uses particulate metals

(lithium, nickel, cobalt, manganese, aluminum, etc.), graphite, carbon black, CNT, various solvents and acid/base solutions.

Metals showed a high rate of exceeding exposure limits in the cathode active material and recycling industries, and some samples were also exceed in the lithium and manufacturer industries. Carbonate solvents exposure levels were high in the electrolyte and recycling industries, and solvents used in the separator, binder, and conductive industries were present in workspaces.

The secondary battery industry faces significant challenges in establishing a consistent management plan due to process and chemicals differences across industries and workplaces. In this study, basic management plans were proposed, and each workplaces should develop and implement a management plan tailored to its specific processes and conditions.

Conclusion : In this study, the structure, processes, and chemicals handled in 10 secondary battery industries were identified, and exposure evaluations were conducted on particulate matters and organic solvents. Based on these finding, individual briefing sessions were held at each workplace, and some workplaces has been promoting work environment improvement activities.

The researchers recommend establishing exposure limits for lithium and carbonate solvents(DMC, DEC, EMC) and including them among materials subject to legal regulation.

Key words : Secondary battery, Lithium ion battery, Working environment measurement, Particle diameter distribution

부록

이차전지 산업 취급 화학물질 및 노출기준



〈표 A-1〉 이차전지 산업 취급 화학물질 및 노출기준

산업 구분	구분	물질명	CAS 번호	고용노동부 노출기준 TWA(STEL)
전구체 원료	원료	니켈	7440-02-0	1 mg/m ³ , as Ni(금속)
		코발트	7440-48-4	0.02 mg/m ³
		황산	7664-93-9	0.2 mg/m ³ (0.6 mg/m ³), 흉각성
		염산	7647-01-0	1 ppm (2 ppm)
		수산화나트륨	1310-73-2	(C) 2 mg/m ³
		탄산나트륨	497-19-8	
		탄산칼슘	1317-65-3	10 mg/m ³
		수소처리된 경질 정제유(석유)	64742-47-8	
		첨가제	영업비밀	
		황산니켈	7786-81-4	0.1 mg/m ³ , as Ni(가용성 화합물)
제품	제품	황산니켈 옥수화물	10101-97-0	0.1 mg/m ³ , as Ni(가용성 화합물)
		황산코발트	10124-43-3	0.02 mg/m ³ , as Co
		황산코발트 침수화물	10026-24-1	0.02 mg/m ³ , as Co
		황산니켈	7786-81-4	0.1 mg/m ³ , as Ni(가용성 화합물)
원료	원료	황산니켈 옥수화물	10101-97-0	0.1 mg/m ³ , as Ni(가용성 화합물)
		황산코발트	10124-43-3	0.02 mg/m ³ , as Co
		황산코발트 침수화물	10026-24-1	0.02 mg/m ³ , as Co
		황산망간	7785-87-7	1 mg/m ³ , as Mn
		황산망간 일수화물	10034-96-5	1 mg/m ³ , as Mn
		수산화나트륨	1310-73-2	(C) 2 mg/m ³
		수산화암모늄	1336-21-6	
제품	제품	전구체 (수산화 코발트 망간 니켈)	189139-63-7	- 코발트: 0.02 mg/m ³ , as Co - 니켈: 0.2 mg/m ³ , as Ni(불용성 무기화합물) - 망간: 1 mg/m ³ , as Mn

양극 활물질

산업 구분	구분	물질명	CAS 번호	고용노동부 노출기준 TWA(STEL)		
양극 활물질	원료	전구체 (수산화 코발트 망간 니켈)	189139-63-7	- 코발트: 0.02 mg/m ³ , as Co - 니켈: 0.2 mg/m ³ , as Ni, 불용성 무기화합물 - 망간: 1 mg/m ³ , as Mn		
			12054-48-7	0.2 mg/m ³ , as Ni, 불용성 화합물		
			21041-93-0	0.02 mg/m ³ , as Co		
			수산화망간	12626-88-9	1 mg/m ³ , as Mn	
			수산화리튬	1310-65-2		
			수산화리튬 일수화물	1310-66-3		
			탄산리튬	554-13-2		
			황산알루미늄	10043-01-3	2 mg/m ³ , as Al, 가용성염	
			수산화알루미늄	21645-51-2	10 mg/m ³ , as Al, 금속분진	
			도펀트	영업비밀		
			코팅제	영업비밀		
		음극 활물질	원료	양극 활물질 (코발트 리튬 망간 니켈 산화물)	182442-95-1	- 코발트: 0.02 mg/m ³ , as Co - 니켈: 0.2 mg/m ³ , as Ni, 불용성 무기화합물 - 망간: 1 mg/m ³ , as Mn
	양극 활물질 (코발트 리튬 망간 니켈 알루미늄 산화물)			-	- 코발트: 0.02 mg/m ³ , as Co - 니켈: 0.2 mg/m ³ , as Ni, 불용성 무기화합물 - 망간: 1 mg/m ³ , as Mn - 알루미늄: 10 mg/m ³ , as Al, 금속분진	
음극 활물질	원료			흑연	7782-42-5	2 mg/m ³ , 호흡성
				석유계 피지	68187-58-6	
음극 활물질	제품			음극 활물질	7782-42-5	2 mg/m ³ , 호흡성

산업 구분	구분	물질명	CAS 번호	고용노동부 노출기준 TWA(STEL)
		육불화인산리튬염	21324-40-3	
		디메틸카보네이트	616-38-6	
		에틸메틸카보네이트	623-53-0	
		디에틸카보네이트	105-58-8	
		프로필렌카보네이트	108-32-7	
		에틸카보네이트	96-49-1	
		리튬테트라플루오로보레이트	14283-07-9	
		리튬비스(옥살레이토)보레이트	244761-29-3	
		리튬디플루오로(옥살레이토)보레이트	409071-16-5	
		리튬비스(플루오로술포닐)이미드	171611-11-3	
		리튬비스(트리플루오로메탄술포닐)이미드	90076-65-6	
		플루오로로틸렌카보네이트	114435-02-8	
		비닐렌카보네이트	872-36-6	
		아세토니트릴	75-05-8	20 ppm, Skin
		프로판설통	1120-71-4	
		1,3-프로펜설통	21806-61-1	
		숙시노니트릴	110-61-2	
		황산에틸렌	1072-53-3	
		비페닐	92-52-4	0.2 ppm
		첨가제	영양비밀	
		제품	진해약	-

산업 구분	구분	물질명	CAS 번호	고용노동부 노출기준 TWA(STEL)
분리막	원료	폴리에틸렌	9002-88-4	
		폴리프로필렌	9003-07-0	
	원료	오일	-	
		디클로로메탄	75-09-2	50 ppm
		보헤마이트	1318-23-6	
		산화알루미늄	1344-28-1	10 mg/m ³ , as Al, 금속분진
		비인더	영업비밀	
		첨가제	영업비밀	
	제품	분리막	-	
	리튬	원료	스포듀민	1302-37-0
황산			7664-93-9	0.2 mg/m ³ (0.6 mg/m ³), 홍광성
수산화나트륨			1310-73-2	(C 2 mg/m ³)
탄산나트륨			497-19-8	
이산화탄소			124-38-9	5,000 ppm (30,000 ppm)
제품		수산화리튬	1310-65-2	
		탄산리튬	554-13-2	
		알루미늄	7429-90-5	10 mg/m ³ , as Al, 금속분진
		압연유	-	
		폐전선	-	
집전체	원료	구리	7440-50-8	1 mg/m ³ (2 mg/m ³), 분진 및 미스트
		황산	7664-93-9	0.2 mg/m ³ (0.6 mg/m ³), 홍광성
	제품	6가 크롬	18540-29-9	0.05 mg/m ³ , 수용성
		알루미늄 박막	7429-90-5	10 mg/m ³ , as Al, 금속분진
		구리 박막	7440-50-8	1 mg/m ³ (2 mg/m ³), 분진 및 미스트

산업 구분	구분	물질명	CAS 번호	고용노동부 노출기준 TWA(STEL)
바인더	원료	1,3-부타디엔	106-99-0	2 ppm (10 ppm)
		스티렌	100-42-5	20 ppm (40 ppm), Skin
		중합 개시제	영업비밀	
		유화제	영업비밀	
		pH 조절제	영업비밀	
도전재	원료	SBR 바인더	-	
		에틸렌 가스	74-85-1	
		질소	7727-37-9	
		산화알루미늄	1344-28-1	10 mg/m ³ , as Al, 금속분진
		산화코발트	1308-04-9	0.02 mg/m ³ , as Co
배터리 셀 제조	원료	카본나노튜브	308068-56-6	
		메틸피롤리돈	872-50-4	
		분산제	영업비밀	
		CNT 도전재	-	2 mg/m ³ , 호흡성
		양극 활물질 (코발트 리튬 망간 니켈 산화물)	182442-95-1	- 코발트: 0.02 mg/m ³ , as Co - 니켈: 0.2 mg/m ³ , as Ni, 불용성 무기화합물 - 망간: 1 mg/m ³ , as Mn
배터리 셀 제조	원료	음극 활물질	7782-42-5	2 mg/m ³ , 호흡성
		카본블랙	1333-86-4	3.5 mg/m ³ , 호흡성
		카본나노튜브	308068-56-6	
		바인더	-	
		진해약	-	
배터리 셀 제조	원료	부리만	-	
		알루미늄 박막	7429-90-5	10 mg/m ³ , as Al, 금속분진
		구리 박막	7440-50-8	1 mg/m ³ (2 mg/m ³), 분진 및 미스트
배터리 셀				

산업 구분	구분	물질명	CAS 번호	고용노동부 노출기준 TWA(STEL)
		폐배터리	-	
		양극 활물질 (코발트 리튬 망간 니켈 산화물)	182442-95-1	- 코발트: 0.02 mg/m ³ , as Co - 니켈: 0.2 mg/m ³ , as Ni, 불용성 무기화합물, - 망간: 1 mg/m ³ , as Mn
		황산리튬	10377-48-7	
		황산	7664-93-9	0.2 mg/m ³ (0.6 mg/m ³), 홍광성
		염산	7647-01-0	1 ppm (2 ppm)
	원료	과산화수소	7722-84-1	1 ppm
		수산화나트륨	1310-73-2	(C 2 mg/m ³)
		탄산나트륨	497-19-8	
		이산화탄소	124-38-9	5,000 ppm (30,000 ppm)
	배터리 재생	수소처리된 경질 정제유(석유)	64742-47-8	
		수산화리튬 일수화물	1310-66-3	
		황산니켈	7786-81-4	0.1 mg/m ³ , as Ni, 가용성 화합물
		황산니켈 육수화물	10101-97-0	0.1 mg/m ³ , as Ni, 가용성 화합물
		황산코발트	10124-43-3	0.02 mg/m ³ , as Co
		황산코발트 칠수화물	10026-24-1	0.02 mg/m ³ , as Co
	제품	황산망간	7785-87-7	1 mg/m ³ , as Mn
		황산망간 일수화물	10034-96-5	1 mg/m ³ , as Mn
		수산화리튬	1310-65-2	
		탄산리튬	554-13-2	

연구진

연구기관 : 산업안전보건연구원

연구책임자 : 이광용(연구위원, 직업환경연구실)

연구원 : 장미연(연구원, 직업환경연구실)

연구원 : 전현진(연구원, 산업보건분석부)

연구원 : 김수진(연구원, 직업환경연구실)

연구기간

2024. 02. ~ 2024. 11.

본 연구보고서의 내용은 연구책임자의 개인적 견해이며,
우리 연구원의 공식견해와 다를 수도 있음을 알려드립니다.

산업안전보건연구원장

국내 이차전지 산업 현황 및 취급 화학물질 관리방안(Ⅲ)
(2024-산업안전보건연구원-691)

발행일 : 2024년 11월 30일

발행인 : 산업안전보건연구원 원장 박승현

연구책임자 : 직업환경연구실 연구위원 이광용

발행처 : 안전보건공단 산업안전보건연구원

주소 : (44429) 울산광역시 중구 종가로 400

전화 : 052-703-0882

팩스 : 052-703-0337

Homepage : <http://oshri.kosha.or.kr>

I S B N : 979-11-94453-35-2

공공안심글꼴 : 무료글꼴, 한국출판인회의, Kopub바탕체/돋움체