

화학사고 예방 및 원인규명을 위한

반응억제제의 화재·폭발 위험성 평가

서동현·최이락·정기혁·고윤현·김천동

산업재해예방

안전보건공단

산업안전보건연구원



요약문

- 평가기간 2025년 08월 27일~ 2025년 11월 18일
- 핵심단어 반응억제제, 중합방지제, 분진폭발, 화재·폭발
- 평가과제명 반응억제제의 화재·폭발 위험성 평가

1. 평가 배경

최근 국내 고분자 수지 제조 공장에서 중합 반응 제어 목적으로 사용하기 위해서, 반응억제제(페노티아진, 하이드로퀴논)를 인화성 용제에 투입하는 과정에, 화재·폭발로 노동자 1명이 화상을 입는 사고가 발생하여 중대산업사고로 보고되었다. 회분식 반응기나 혼합기에 고체 분진을 투입하다가 발생하는 화재·폭발 사고는 그간의 위험성 평가를 통해서도 알 수 있듯이 반복적으로 보고되고 있는 사고이다. 따라서 사고의 근원적인 원인을 명확히 분석하여 동종 재해 예방을 위한 노력이 필요하다.

2. 주요 평가 내용

1) 가연성 분진 투입 작업 중 발생하는 화재·폭발 사고의 원인

본 위험성 평가에서는 화재·폭발 사고가 발생하기 위해서는 특정 조건이나 특정 상황이 필요한 점을 이용해서, 가연성 분진 투입 작업 중에서 발생하는 화재·폭발 사고를 제어할 수 있는 가장 효과적인 수단이 점화원이라는 점을 확인하였다. 또한 다양한 점화원 중에서 대부분은 일정 수준 이상 제어가 가능하지만, 가연성 분진을 취급하는 작업의 특성상 정전기라는 점화원은 현재의 기술로는 완전히 제어하는 것이 불가능하다는 점을 설명하였다.

2) 가연성 분진 투입 작업 중 발생하는 화재·폭발 사고 예방

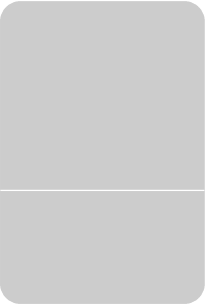
이런 유형의 화재·폭발 사고를 예방하기 위한 수단은 점화원을 제어하는 것이다. 따라서 무엇보다 취급하는 분진의 특성을 정확히 이해하고 있어야 한다. 분진폭발의 강도도 물론 중요하지만, 어느 정도 수준의 민감도를 가지고 있는지 우선 확인되어야 한다. 그래야만 정전기를 비롯한 점화원을 제어할 수 있는 동기 및 여건이 확보될 수 있다. 물론 정전기의 경우 제어하는 것이 기술적으로 한계가 있는 부분이고, 관련 연구가 시급한 것이 사실이다. 하지만 한편으로는 그만큼 더 높은 관심과 노력만이 이런 유형의 사고를 예방할 수 있는 수단이라고 판단된다.

3) 페노티아진과 하이드로퀴논의 분진폭발 특성

시험 결과 최대 분진폭발 압력이 페노티아진은 7.6 bar, 하이드로퀴논은 7.8 bar인 것으로 측정되었으며, 폭연지수는 페노티아진이 252 bar·m/s, 하이드로퀴논은 288 bar·m/s로 산정되어 2종 시료 모두 “St 2 (폭발에 의한 위험성이 큰 분진)” 분진폭발 등급으로 판정되었다. 최소점화에너지에 있어서도 페노티아진과 하이드로퀴논 모두 1 mJ ~ 3 mJ로 판정되어 정전기와 같은 점화원 제어에 보편적인 수준 이상의 관심과 노력이 필요한 것으로 확인되었다.

3. 연락처

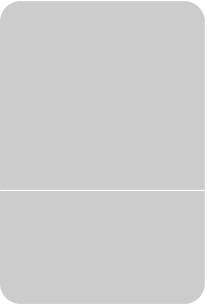
- 평가책임자 : 산업안전보건연구원 산업안전연구실 위험성시험부 연구위원 정기혁
 - ☎ 042) 869. 0333
 - E-mail : nicekihyuk@kosha.or.kr



목 차

I. 서론	1
1. 배경 및 목적	3
2. 평가 범위 및 내용	5
3. 위험성 평가 대상 물질	6
II. 반응억제제 종류와 취급 산업	9
1. 반응억제제의 종류	11
2. 반응억제제 취급 산업	16
III. 사고사례 및 가연성 분진 투입 작업의 위험성	19
1. 가연성 분진 투입 중 발생한 분진폭발 사고사례	21
2. 가연성 분진 투입 작업의 위험성 분석	23
3. 가연성 분진 투입 중 발생하는 정전기의 의미	33

IV. 시험 장비 및 방법	43
1. 입도분석 시험	45
2. 분진폭발 특성 시험	47
V. 시험 결과 및 고찰	53
1. 입도분석 시험 결과	55
2. 분진폭발 특성 시험 결과	58
VI. 결 론	67
참고문헌	71



표목차

〈표 I-1〉 위험성 평가 대상 물질	7
〈표 II-1〉 반응억제제 종류별 반응억제 메커니즘	11
〈표 II-2〉 국내 페노티아진 활용 범위	16
〈표 II-3〉 국내 하이드로퀴논 활용 범위	18
〈표 III-1〉 의약품 제조업에서 최근 7년간 화재·폭발·누출 업무상 사고 재해자	21
〈표 III-2〉 가연성 분진 투입 작업 중 발생한 화재·폭발 사고사례	22
〈표 IV-1〉 입도분석 시험 방법의 종류	45
〈표 IV-2〉 레이저 회절 입도분석 장비 사양	46
〈표 IV-3〉 20리터 구형 시험 장비 사양	48
〈표 IV-4〉 최소점화에너지 측정 장비 사양	51
〈표 V-1〉 입도분석 시험 결과	56
〈표 V-2〉 분진 폭발압력 측정 결과	60
〈표 V-3〉 BS EN 14034-2기준 분진폭발 등급	61
〈표 V-4〉 분진 폭발압력상승속도 속도 측정 결과	62



그림목차

[그림 I-1] 사고 당시 현장 상황 모사	4
[그림 I-2] 위험성 평가 대상 물질 사진	6
[그림 III-1] 원료투입으로 인한 화재·폭발사고 발생 형태	22
[그림 III-2] 탱크로리에 LPG를 주입하는 작업 예시	23
[그림 III-3] 연소에 대한 FTA 결과	27
[그림 III-4] 가연성 분진 투입 작업의 FTA 결과	30
[그림 IV-1] 레이저 회절 입도분석 장비 사진	46
[그림 IV-2] 20리터 구형 시험 장비 사진과 설명	49
[그림 IV-3] 최소점화에너지 시험 장비 사진 및 설명	51
[그림 V-1] 페노티아진의 입도 분포	56
[그림 V-2] 하이드로퀴논의 입도 분포	57
[그림 V-3] 시험 결과 설명(시간에 따른 압력변화)	59
[그림 V-4] 분진폭발 압력 측정 결과 비교	60
[그림 V-5] 페노티아진과 하이드로퀴논의 폭연지수 비교	63
[그림 V-6] 페노티아진 최소점화에너지 측정 결과	65
[그림 V-7] 하이드로퀴논 최소점화에너지 측정 결과	65

I. 서론

.....

I. 서론

1. 배경 및 목적

최근 국내 MMA¹⁾ 제조 공장에서 중합 반응 제어 목적으로 사용하기 위해서, 반응억제제(페노티아진, 하이드로퀴논)를 용제에 투입하는 과정에, 분진 및 MMA 증기의 폭발로 노동자 1명이 화상을 입는 사고가 있었다. 약 28 m³ 크기의 상압 혼합기 내에는 MMA 용제가 약 45% 정도 있는 상태였고, [그림 I-1]과 같이 20 kg 단위로 포장된 분말형 페노티아진을 혼합기 상부 맨홀로 투입하는 과정에서 발생한 사고였다. 페노티아진 투입 과정에서 발생한 정전기 방전 등으로 인한 폭발로 추정되고 있다.

사고 발생 물질인 페노티아진과 하이드로퀴논은 화장품, 제약 등 다양한 분야에서 활용되는 물질이기도 하지만, 화학공장에 있어서는 반응억제제용으로 많이 활용되고 있다. 그러므로 두 물질은 폭발반응과 같은 긴급한 상황에는 응급조치 수단으로 활용되는 경우도 많다. 따라서 자칫 잘못하면 긴급한 상황에 투입한 분말로 인해서 분진폭발을 일으킬 수도 있다는 의미라서, 이 사고가 시사하는 의미가 크다.

추가로 이런 고체 분말을 회분식 반응기나, 혼합기에 투입하다가 발생하는 폭발 사고는 그간 수없이 보고되어 왔다. 뿐만 아니라 사고 재발 방지를 위한 홍보 활동과 더불어, 수 많은 연구자들이 이런 형태의 사고에 대한 위험성을 경고해 왔다. 하지만 이런 유형의 사고가 지속적으로 보고되고 있다는 의미는 명백한 해결책이 제시되지 못하고 있다는 의미다. 따라서 이번 위험성 평가에서는 왜 이런 유형의 사고가 제어되지 못하고 지속적으로 발생하는지에 대해

1) 메틸메타크릴레이트(Methyl methacrylate)로 주로 유리를 대체하기 위한 목적으로 활용되는 고분자 물질로 사고 당시에는 반응억제제 용해를 위해서 액체 용제로 사용

서 분석하고, 사고 물질인 페노티아진과 하이드로퀴논의 분진폭발 특성 데이터를 제공하여 산업 현장에서 보다 안전하게 두 물질을 취급할 수 있도록 하고자 한다.



[그림 I-1] 사고 당시 현장 상황 모사

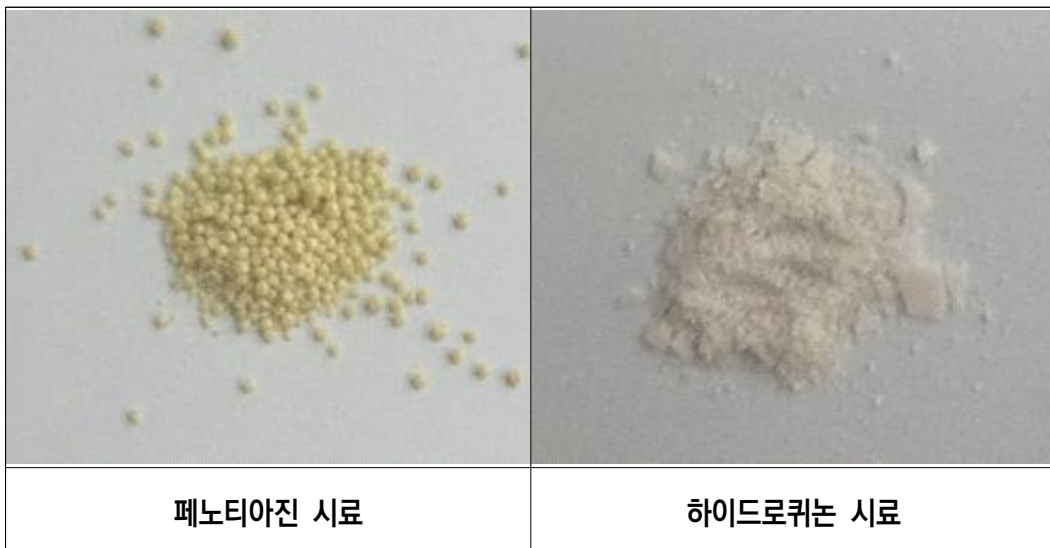
2. 평가 범위 및 내용

본 보고서의 평가 대상은 다양한 반응억제제 중에서 중합, 열분해 반응에 있어서 라디칼 또는 산소 제거 목적으로 사용되는 페노티아진과 하이드로퀴논으로 한정한다. 실제 사고 현장에서 샘플링한 시료를 대상으로 시험하였기 때문에 다른 제조사 제품이나, 입자의 크기 차이, 불순물의 함유량 정도에 따라서 시험 결과는 차이가 있을 수 있다.

이번 사고를 되돌아보면 분진폭발 관련 특성이 가장 중요한 물리적 위험성으로 작용하였다. 따라서 분진폭발 강도와 민감도를 확인하기 위한 시험을 실시하였고, 그 결과를 해당 물질 취급 현장에 전달함으로써 화재·폭발 사고 예방 활동을 도모하고자 한다.

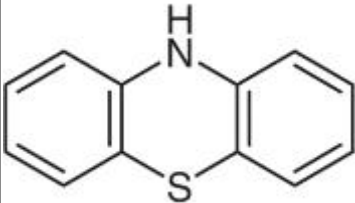

3. 위험성 평가 대상 물질

사고 현장의 작업 절차상 페노티아진을 주입한 후에 하이드로퀴논을 주입하도록 규정하고 있었으며, 페노티아진 주입 과정에서 발생한 분진폭발 사고로서 두 물질 잔량을 그대로 샘플링할 수 있었다. 입도분석과 분진폭발 시험은 샘플링 후 1개월 이내에 실시하였으며, 두 시료 모두 분쇄하여 ASTM E11(Test sieve)에 따른 눈금 크기 425 μm 체(Sieve)로 체질 후 사용하였다.



[그림 I-2] 위험성 평가 대상 물질 사진

〈표 I-1〉 위험성 평가 대상 물질

연번	관용명	페노티아진	하이드로퀴논	비고
1	물질명	10H-Phenothiazine	Benzene-1,4-diol	IUPAC
2	CAS NO.	92-84-2	123-31-9	-
3	루이스구조			-
4	녹는점	184 ~ 187 °C	172 ~ 175 °C	Pubchem
5	끓는점	약 371 °C	약 285 °C	
6	자동발화점	약 470 °C	약 515 °C	
7	독성기준	TWA 5 mg/m ³	TWA 5 mg/m ³	고용노동부
8	국내사용	76 개소	457 개소	환경부
9	활용범위	<ul style="list-style-type: none"> · 약품 원료 · 유기염료 · 고무용 향산화제 · 유기전자재료 	<ul style="list-style-type: none"> · 고무용 향산화제 · 필름 환원제 · 미백 화장품 첨가제 	-

Ⅱ. 반응억제제의 종류와 취급 산업



II. 반응억제제 종류와 취급 산업

1. 반응억제제의 종류

화학반응에 따라서 반응억제제가 결정되기 때문에 화학반응의 종류만큼 다양한 반응억제제가 있으며, 이번 위험성 평가 대상 반응억제제는 중합 반응, 열분해 반응과 같은 라디칼 생성반응을 제어하기 위한 화학물질을 의미한다. 이런 반응억제제는 크게 <표 II-1>과 같이 페놀계, 퀴논계, 아민계 3가지가 주로 취급되고 있으며, 더 넓은 범위에서는 니트록사이드계, 하이드록실아민계, 금속염까지 확장하여 설명하는 경우도 있다. 이런 반응억제제는 각각의 반응억제 메커니즘이나 화학 구조적인 차이로 인한 기능상의 차이가 있어서 혼합하여 사용하는 것이 보편화되어 있으며 혼합 제품을 브랜드화하여 직접 판매하는 사례도 많이 찾아볼 수 있다.

<표 II-1> 반응억제제 종류별 반응억제 메커니즘

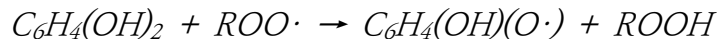
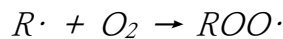
연번	구분	페놀계	퀴논계	아민계
1	주요 물질	하이드로퀴논, BHT ¹⁾ , 부틸카테콜 ²⁾	파라벤조퀴논 ³⁾	페노티아진, 다이페닐아민 ⁴⁾
2	메커니즘	$R\cdot + O_2 \rightarrow ROO\cdot$ $ROO\cdot + RH \rightarrow ROOH + R\cdot$	$R\cdot + RO \rightarrow ROR\cdot$	$R\cdot + O_2 \rightarrow ROO\cdot$ $ROO\cdot + RH \rightarrow ROOH + R\cdot$
3	주요특성	산소 제거 목적으로 퍼옥시라디칼 생성반응에 특화	알킬 라디칼을 직접 제거	산소 제거 목적으로 퍼옥시라디칼 생성 반응 과정과 촉매재생 사이클을 거침

- 1) Butylated hydroxytoluene (Cas no. 128-37-0)
 2) 4-tert-butylcatechol (Cas no. 98-29-3)
 3) 1,4-Benzoquinone (Cas no. 106-51-4)
 4) Diphenylamine (Cas no. 122-39-4)

이번 사고에서도 페놀계 하이드로퀴논과 아민계 페노티아진을 혼합하여 사용하려 하였듯이, 같은 라디칼을 포획하는 방식이라도 반응억제 메커니즘이 다르다 보니 반응억제 시간 등에 차이가 있어서 전략적으로 혼합하는 경우가 많다⁵⁾. 여기에 더해 반응억제제의 종류에 따라서는 제품의 색깔 등 추가적인 차이가 나타나는 경우도 현상도 있어서, 이런 부가 기능까지 고려해서 반응억제제의 종류는 최종적으로 선택되게 된다.

1) 페놀계 반응억제제

화학반응 중에 라디칼이 발생하게 되면 즉각적으로 비공유전자쌍이 많은 쪽을 공략하게 된다. 용제 내에 있는 산소가 이런 라디칼의 공격에 가장 취약하다. 따라서 즉각 ROO·와 같은 퍼옥시라디칼을 형성하게 된다. 하이드로퀴논, BHT, 부틸카테콜과 같은 페놀계 반응억제제는 구조적으로 라디칼에 수소를 제공하는데 적합한 물질로 수소를 제공하고도 전자공명 상태가 되는 페놀계 특성을 이용한 반응억제제라고 할 수 있다.



따라서 초기 산소 존재하에서 반응억제제로서 굉장히 유용한 작용을 하게 된다. 반대로 산소가 소진되고부터는 반응억제제 기능을 할 수 없는 한계점이 있다. 다만 하이드로퀴논의 경우에는 페놀계 반응억제 메커니즘이 완료된 후에 다음과 같이 하이드로퀴논간의 반응으로 파라벤조퀴논이 생성되게 된다.

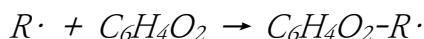
5) Maafa, I. M. (2023). Inhibition of free radical polymerization: a review. *Polymers*, 15(3), 488.

따라서 파라벤조퀴논에 의해서 퀴논계 반응억제 메커니즘에 따라 추가적인 반응억제 기능을 한다⁶⁾.

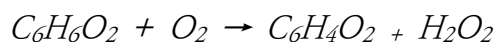
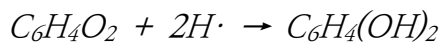


2) 퀴논계 반응억제제

앞서 설명한 바와 같이 라디칼이 발생하게 되면 산소가 공격에 가장 취약하다. 따라서 산소를 충분히 가지고 있으면서도 안정된 화학구조를 가지고 있는 파라벤조퀴논과 같은 물질들이 주로 퀴논계 반응억제제로 활용된다. 이런 파라벤조퀴논은 다음과 같이 라디칼을 받아들이고 공명구조를 형성한다. 이런 반응을 라디칼 트랩(Radical trap)이라고 하며, 반응속도 자체가 중합반응보다 빨라서 반응억제 메커니즘으로 많이 활용되고 있다⁷⁾.



이런 반응이 주요 반응억제 메커니즘이고, 추가적으로는 수소 라디칼 존재 하에서는 환원반응을 통해서 하이드로퀴논 생성 반응까지 이어질 수 있다고 보고되고 있다.

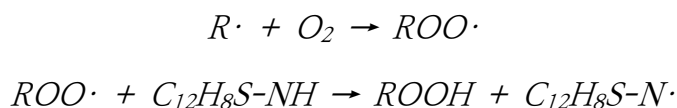


6) Solomons, T. W. Graham (1989). Organic chemistry 4th edition, John wiley & Sons, Inc., 380.

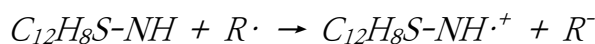
7) Robert V. Hoffman (2004). Organic chemistry 2nd edition, John wiley & Sons, Inc., 274-275.

3) 아민계 반응억제제

페노티아진과 같은 아민계 반응억제제의 경우 상대적으로 결합력이 약한 질소, 수소 결합을 가지고 있는 물질이다. 따라서 다음 반응식과 같이 알킬라디칼로부터 형성된 퍼옥시라디칼은 질소·수소 결합을 공격하여 라디칼 연쇄 반응을 중단시킨다. 산소 조건에서는 이런 반응이 주요 반응억제 메커니즘이 된다고 할 수 있다.

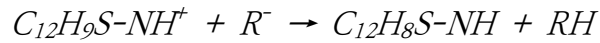
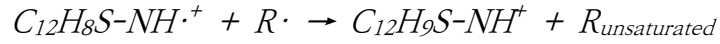


한편 페노티아진이 반응억제제로 많이 활용되는 이유는 앞서 설명한 산소 조건 외에도 촉매 반응 사이클과 같이 스스로가 보존되면서 라디칼을 제거하는 메커니즘으로도 작용할 수 있기 때문이다. 다음 반응식과 같이 우선 페노티아진은 형성된 알킬라디칼에 전자를 주고 자신은 라디칼 양이온이 되게 된다. 이런 라디칼 양이온은 다른 알킬라디칼로부터 수소를 공급받아 양이온으로 존재하게 된다. 이때 수소를 공급해준 알킬라디칼은 불포화상태로 돌아가게 된다. 그리고 양이온 상태의 페노티아진은 초기 형성된 알킬음이온에 수소를 공급해주면서 본래의 페노티아진으로 돌아가게 된다⁸⁾⁹⁾.



8) Hölter, N., Rendel, N. H., Spierling, L., Kwiatkowski, A., Kleinmans, R., Daniliuc, C. G., ... & Glorius, F. (2025). Phenothiazine Sulfoxides as Active Photocatalysts for the Synthesis of γ -Lactones. *Journal of the American Chemical Society*, 147(15), 12908-12916.

9) Tanaka, K., Takamura, H., & Kadota, I. (2025). Recent progress on phenothiazine organophotoredox catalysis. *Tetrahedron Letters*, 155745.



4) 반응억제제 성능

폭주반응이 발생할 수 있는 반응은 산·염기 중화반응, 산화·환원반응, 프리델·크래프트 알킬화 반응(Friedle-Craft alkylation), 가수분해 반응, 열분해 반응, 중합 반응까지 굉장히 다양한 반응이 있다. 이런 범주에서도 각각의 반응억제 메커니즘이 각기 다르겠지만, 각각의 범주 안에서도 어떤 반응인가에 따라서 반응억제 메커니즘과 성능은 크게 달라질 수 있다. 따라서 앞서 소개한 반응억제 메커니즘은 라디칼 환경에 투입한다고 해서 절대적으로 반응억제 효과가 있다고 할 수 있는 것은 아니다.

2. 반응억제제 취급 산업

1) 페노티아진 취급 산업

페노티아진은 향정신성 의약품 원료로 개발되어 현재까지 의약품으로 많이 활용되고 있는 물질로서, 최근에는 유기염료, 유기전자재료 산업에 많이 활용되고 있는 것으로 보고되고 있다. 2023년 환경부 화학물질 유통량 조사 결과에 따르면, 국내에서는 76개 사업장에서 취급하고 있으며, <표 II-2>와 같이 화학, 기계, 도매, 페인트 등 다양한 산업 분야에서 취급하고 있는 것으로 확인되었다. 업종은 다르지만 페노티아진의 라디칼 소거, 산화 방지 기능을 이용하고 있는 점은 유사하다고 할 수 있다.

<표 II-2> 국내 페노티아진 활용 범위

구분	합계	화학	기계*	도매	페인트	계면활성제	유기전자재료	유기염료	플라스틱 필름
개소	76	25	16	12	8	7	4	2	2
용도	-	중합방지 산화방지	윤활유 산화방지	-	중합방지 산화방지	중합방지 산화방지	중합방지 산화방지	중합방지 산화방지	산화방지

* 항공, 우주, 제철, 자동차 산업계에서 윤활유의 산화 방지 목적으로 취급

이번 위험성 평가 대상 사고의 점화원은 분진으로 인한 정전기 방전일 가능성이 가장 큰 것으로 추정하고 있다. 뒤에서 상세히 소개하겠지만, 이런 형태의 사고가 발생하기 위해서는 분진을 취급하는 양이 일정 수준 이상이어야만 한다. 물론 이런 현상에 대한 정량적 기준을 산정할 수는 없는 부분이지만, 유기전자재료, 유기염료, 플라스틱 필름 제조 사업장과 같은 곳에서는 소포장 형

태로 페노티아진을 취급할 수밖에 없는 조건이다. 또한 <표 II-2>의 기계 관련 업종의 경우에도 산화 방지 목적으로 윤활유에 주입하는 양은 0.5 wt% 이하이며¹⁰⁾, 계면활성제 제조 과정에 투입되는 양 또한 2.0 wt% 미만이다¹¹⁾. 따라서 사실 다양한 업종에서 취급하고 있지만 분진폭발이 위험성이 높은 공정은 다음과 같은 세 가지로 특정할 수 있다.

「페노티아진 대량 취급으로 분진폭발 위험이 높은 공정」

- ① 선박 외부에 해양 생물부착 방지를 위한 페인트 제조 공정
- ② 페노티아진 혼합·용해 작업을 하는 공정
 - ※ 대규모로 취급하는 사업장이 아닌 이상 용제에 혼합된 페노티아진을 구매하여 취급
- ③ 반응폭주 발생 시 고체 형태 페노티아진을 투입하는 공정

2) 하이드로퀴논 취급 산업

하이드로퀴논은 필름 현상액으로 개발된 물질로 실제로 아직도 인쇄 산업에서 많이 활용되고 있는 물질이다. 최근에는 강한 환원제라는 특성 때문에 멜라닌 생성 세포(Melanocyte) 내에서 티로시나제(Tyrosinase)라는 효소의 활성을 차단하는 효과로 인해서, 미백 화장품 첨가제로 대중들에게 잘 알려진 물질이기도 하다. 2023년 환경부 화학물질 유통량 조사 결과에 따르면, 하이드로퀴논은 도매, 페인트, 석유화학 등 국내 457개 사업장에서 취급하고 있으며, <표 II-3>과 같이 등 다양한 산업 분야에서 취급하고 있는 것으로 확인되었다. 산업의 형태가 다양해서 모든 산업 분야를 검토할 수는 없겠지만, 페노티아진과 같이 라디칼 소거, 산화 방지 성능 때문에 주로 취급하고 있는 것으로

10) Booser, L. R. (1981). Lubricant additives: Chemistry and application 2nd edition, Elsevier, 421-423.

11) Jianwei Yu (2002). Composition and method for reducing adverse interactions between phenothiazine derivatives and plasma using cyclodextrins, US7008934B2.

확인된다. 석유화학은 물론이고, 모노머 원료의 페인트가 급격하게 경화되는 현상을 제어하거나, 인쇄회로기판(Printed circuit board, PCB)의 속성 경화 현상 등을 제어하기 위한 목적으로 주로 사용되고 있는 것으로 확인된다.

〈표 II-3〉 국내 하이드로퀴논 활용 범위

구분	합계	도매	페인트	석유화학	PCB	철강/금속	인쇄	합성수지	기타*
개소	457	49	35	35	31	27	27	21	232
용도	-	-	중합방지 산화방지	중합방지 산화방지	중합방지 산화방지	중합방지 산화방지	중합방지 산화방지	중합방지 산화방지	-

* 자동차 부품, 도금, 기타화학, 접착제, 제판 및 조판업 등 41개 이상의 업종을 의미함

이런 하이드로퀴논은 페노티아진 취급 산업에서 언급한 것과는 달리 산업적 활용 범위가 넓어서, 분진폭발 위험성이 높다고 예상되는 공정을 특정한다는 것 자체가 한계가 있다. 다만 취급 과정에서 어떤 이유에서든지 하이드로퀴논 분진운을 형성하는 작업이나 공정이 있다면, 해당 공정에서 분진폭발 위험성이 있다고 판단하고 정전기 제어 등 화재·폭발 사고 예방을 위한 노력이 필요하다.

Ⅲ. 사고사례 및 가연성 분진 투입 작업의 위험성



Ⅲ. 사고사례 및 가연성 분진 취급 작업의 위험성

1. 가연성 분진 투입 중 발생한 분진폭발 사고사례

페인트, 의약품, 점착제 등 화학제품 다품종 소량 생산하는 산업에서는 회분식 반응기나 상압 혼합기 이용해 제품을 제조하는 것이 보편적인 방식이다. 이런 반응기나 혼합기 운용으로 인한 화재·폭발 위험성을 검토하고자, ‘의약품 제조업’을 대상으로 최근 7년간(2018년~2024년) 화재·폭발·누출로 인해 발생한 산업재해 통계를 <표 Ⅲ-1>과 같이 정리하였다¹⁾. 밸브나 용기를 무리하게 개방하다가 화학물질 누출로 인해 피해를 입은 업무상 사고 재해자가 30명으로 가장 많았고, 이어서 실험 도중에 24명, 원료 투입 과정에 10명 순서로 재해자가 많은 것으로 집계되었다.

<표 Ⅲ-1> 의약품 제조업에서 최근 7년간 화재·폭발·누출 업무상 사고 재해자

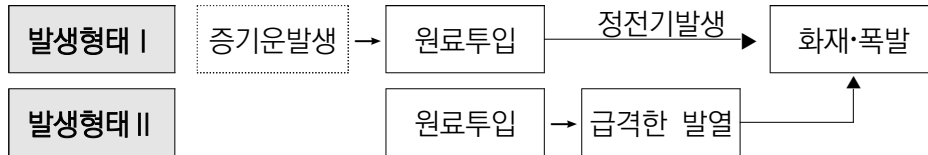
구분	합계	무리한 개방	실험	원료 투입	세척 작업	호스 파열	정상 운전	전기 누전	기타
재해자 수(명)	81	30*	24	12	6	4	2	1	2

* 업무상 사고 사망자 1명 포함
 ** 자료출처: 2018년부터 2024년 사이에 발생한 산업재해 통계(고용노동부)

‘무리한 개방’으로 인한 사고는 고온으로 인한 화상, 질식과 같은 유형의 피해자가 많았으며, 의약품 제조업이라는 특성상 실험실에서 발생한 사고가 많았던 것으로 추정된다. 아울러 이번 중대산업사고와 같이 원료를 투입하다가 발생하는 화재·폭발 사고는 [그림 Ⅲ-1]과 같이 크게 두 가지 형태로 구분할 수 있었다. 하나는 용제의 가열로 증기가 있는 상태에서 고체·액체 원료를

1) 회분식 반응기, 혼합기를 이용하는 업종 범위가 넓어서 의약품 제조업으로 업종을 제한

투입하다가 발생하는 경우이고, 다른 케이스는 원료를 투입한 후에 반응폭주 등으로 인해서 화학물질이 반응기나 혼합기 밖으로 흘러넘치다가 발생하는 화재·폭발 사고이다.



[그림 III-1] 원료투입으로 인한 화재·폭발사고 발생 형태

이처럼 회분식 반응기나 혼합기를 운용하는 과정에서 반응폭주로 인한 사고도 다수 보고되고 있지만, 본 보고서의 검토 대상인 중대산업사고와 같이 가연성 분진을 투입하다가 발생하는 화재·폭발 사고 또한 지속적으로 보고되어 온 화재·폭발 사고이다. <표 III-2>에서와 같이 지난 10년간의 중대산업사고를 살펴봐도 가연성 분진을 투입하다가 발생한 화재·폭발 사고사례를 5건 확인할 수 있었다. 따라서 왜 이런 사고가 지속적으로 발생할 수밖에 없는지 현재의 위험성을 정확히 진단하고, 좀 더 명확한 해결 방안을 찾아보고자 한다.

<표 III-2> 가연성 분진 투입 작업 중 발생한 화재·폭발 사고사례

구분	연도	지역	사고 내용	피해(명)	비고
1	2021	경북 경산	점착제 제조 공정에서 회분식 반응기에 약 20 kg 크기의 첨가제를 투입하는 과정에서 폭발	부상1	-
2	2020	충남 아산	의약품 제조 공정에서 회분식 반응기에 약 20 kg 크기의 원료를 투입하던 중 화재 발생	부상1	-
3	2018	충남 천안	페인트 제조 공정에서 혼합기 내부에 약 25 kg 크기의 부원료를 투입하는 과정에서 인화성액체 증기가 폭발	부상2	-
4	2017	부산	페인트 제조 공정에서 혼합기에 1톤 크기의 톤백으로 배합 원료를 투입하는 과정에서 화재가 발생	부상2	-
5	2016	충남 아산	의약품 제조 공정에서 반응기에 약 40 kg 원료를 투입하던 중 폭발사고 발생	부상2	-

※ 최근 10년간 중대산업사고 기준

2. 가연성 분진 투입 작업의 위험성 분석

1) FTA를 이용한 위험성 분석

가연성 분진 투입 작업의 위험성이 어느 정도 수준인지 검토하기 위해서 FTA(Fault tree analysis)를 이용해서 간단한 정량적 위험성 평가를 실시하였다. 상대적인 위험성 비교를 통해 이해를 돕고자 LPG 저장탱크에서 탱크로리로 LPG를 이송하는 도중에 발생할 수 있는 화재·폭발 사고의 발생 확률을 먼저 산정하여, 가연성 분진 투입 작업에서의 화재·폭발 사고의 발생 확률과 비교하였다.



[그림 Ⅲ-2] 탱크로리에 LPG를 주입하는 작업 예시

연소의 3요소는 가연물, 점화원 그리고 산소로 정의된다. 따라서 [그림 III-3]과 같이 연소라는 사건이 발생하기 위한 첫 번째 이벤트(Primary event)는 가연물, 점화원, 산소에 대한 AND 게이트로 정의하고, 연소의 발생 확률은 (III-1)과 같이 화재·폭발 사고의 발생 확률과 유사하다고 가정하였다.

$$P_{combustion} \approx P_{fire \& \text{explsoion}} \quad (\text{III-1})$$

$P_{combustion}$: 연소 발생 확률

$P_{fire\&explosion}$: 화재·폭발사고 발생 확률

먼저 FTA의 실시 범위를 LPG를 취급하는 계의 내부로 한정하면, 가연물은 베이직 이벤트(Basic event)로 정의할 수 있으며, $P_{combustible \text{ material}}$ 은 1.0에 가까운 것으로 가정할 수 있다. 보편적으로 점화원은 전기장치, 고온 표면, 화학반응, 기계적 스파크, 정전기 방전과 같이 5가지로 정의하므로, OR 게이트를 이용해 트리(Tree)를 구성하였다. 여기에 더해, 앞서 계 내로 범위를 한정하였으므로 점화원은 전기장치, 고온표면, 정전기 방전, 3가지로 검토 대상을 좁힐 수 있다. [그림 III-3]에서는 공기만을 산소 공급 조건으로 규정하였으며, 그 결과를 수식으로 정리하면 (III-2)와 같은 결과를 도출할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{combustion} &= \prod_i^{combustion} P_i \\ &= \sum_j^{ignition \text{ source}} P_j \sum_k^{oxygen} P_k \\ &= P_{air} \sum_{j'}^{ignition \text{ source}} P_{j'} \quad \text{none of oxydizing agent} \quad (\text{III-2}) \end{aligned}$$

- $P_{combustion}$: 연소 사건이 발생할 확률
- $P_{combustible\ material}$: 가연성 물질이 존재할 확률
- P_{air} : 연소에 충분한 공기가 존재할 확률
- P_i : 연소의 3요소 각각이 충족할 확률
- P_j : 5가지 점화원 각각의 발생 확률
- $P_{j'}$: 3가지 점화원 각각의 발생 확률
- P_k : 공기가 존재할 확률

앞서 제시한 3가지 점화원 중에 전기장치, 고온 표면은 방폭 기준 적용을 통해서 제어할 수 있는 요인으로 정의할 수 있다. 계 내부는 0종 폭발위험장 소이므로 SIL3 기준이 적용되며, 방폭 기능의 평균 실패 확률은 5.0×10^{-4} 이다²⁾. 정전기 방전으로 인해 화재·폭발이 발생할 수 있는 확률을 단정적으로 산정할 수는 없지만, 접지, 본딩과 같은 기본적인 조치를 한 상태라면 그 확률을 평균 5.0×10^{-3} 수준으로 추정할 수 있다³⁾.

결과적으로 (III-2)에 따라서 계 내에 공기가 존재하는 상태라면 화재·폭발이 발생할 수 있는 확률은 5.5×10^{-3} 수준으로 산정할 수 있으며, 이는 ALARP⁴⁾에서 의미하는 허용할 수 없는 수준 10^{-3} 이상의 확률이다. 따라서 추가적인 위험성 제어가 필요한 상황이며, (III-2)와 같은 조건이므로 공기 유입 조건(P_{air})을 독립변수로 제어하는 것이, 점화원을 제어하는 것 보다 확률상 효과적이다.

가장 보편적인 공기 유입 조건을 제어하기 위한 방법으로 이너팅(Inerting) 시스템을 도입한다고 가정하였다. 먼저 시간의 함수인 고장률을 일정한 것으

2) International Electrotechnical Commission. (2010). Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems (IEC 61508 Series). IEC.

3) Center for Chemical Process Safety (CCPS). (2010). Guidelines for chemical process quantitative risk analysis. John Wiley & Sons.

(해당 자료에서 접지와 같은 기본적인 조치를 했을 때의 정전기 발생 확률)

4) ALARP(As Low As Reasonably Practicable)는 '합리적으로 실행 가능한 가장 낮은 수준'을 의미하는 리스크 관리 원칙으로 허용 가능한 수준과 허용 불가능한 수준에 대한 기준을 제시하고 있음

로 가정하고, 표준 산정 고장률 데이터(Generic data)⁵⁾⁶⁾를 (Ⅲ-3)을 이용해서 30년간의 평균 누적 확률로 환산하면 2.4×10^{-1} 이다. 이 확률을 (Ⅲ-2)에 다시 적용하면 화재·폭발 사고가 발생할 수 있는 확률을 5.5×10^{-3} 에서 1.3×10^{-3} 으로 감소시킬 수 있다. 실질적으로 30년간 수리나 점검 한번 없이 이너팅 시스템을 사용할 수 있는 것은 현실성이 없는 설정이므로, 보수적 기준으로 5년 단위 수리 상황을 가정하면 2.9×10^{-4} 까지 화재·폭발 사고가 발생할 수 있는 확률로 감소시킬 수 있다.

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (\text{Ⅲ-3})$$

F : 시간에 따른 누적 확률

λ : 고장률

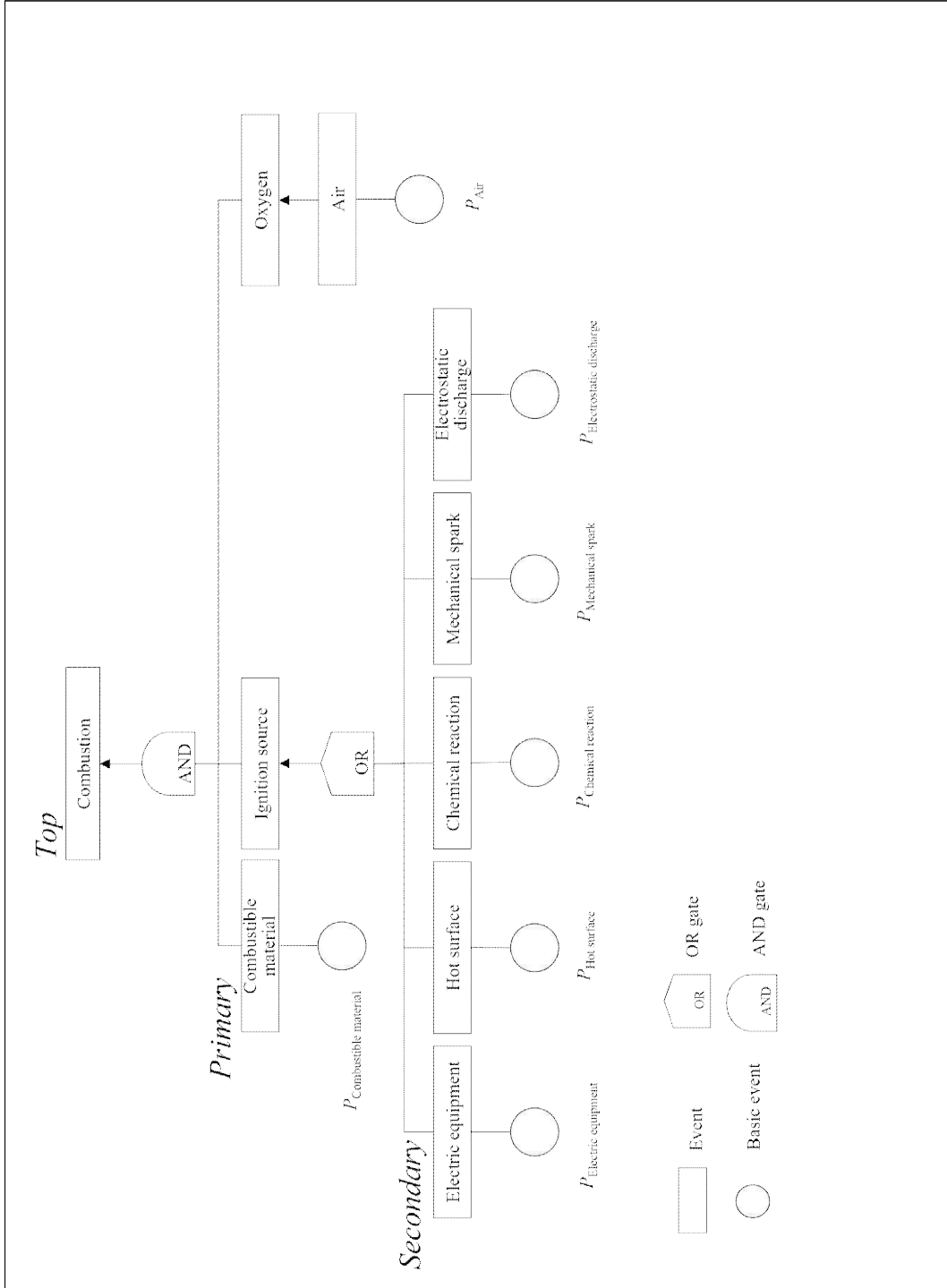
t : 시간

이런 계산 과정에서 알 수 있듯이 탱크로리에 LPG를 주입하는 작업에 있어서 화재·폭발 위험을 제어하기 위한 핵심적인 독립변수는 공기이다. 그래서 액화석유가스의 안전관리 및 사업법과 관련된 KGS 코드는 저장탱크에 LPG를 주입하는 작업을 하기 전에는 반드시 산소를 제거하도록 규정하고 있다⁷⁾. 이로써 이런 작업에 대한 위험성이 제도적으로 일정 수준 이상 관리되고 있다고 설명할 수 있다.

5) 고장이 발생하는 현상에 대한 기본적인 확률 모델에 대해서 실제 사용기간과 고장에 대한 데이터를 적용하거나 별도의 FMECA(Failure mode, effect and criticality analysis)와 같은 방법을 적용해 도출한 확률 기반의 데이터임

6) Exida. (2023). Safety equipment reliability handbook (5th ed.). Exida.

7) KGS FU331(저장탱크에 의한 액화석유가스 저장소의 시설·기술·검사 기준) 등



[그림 III-3] 연소에 대한 FTA 결과

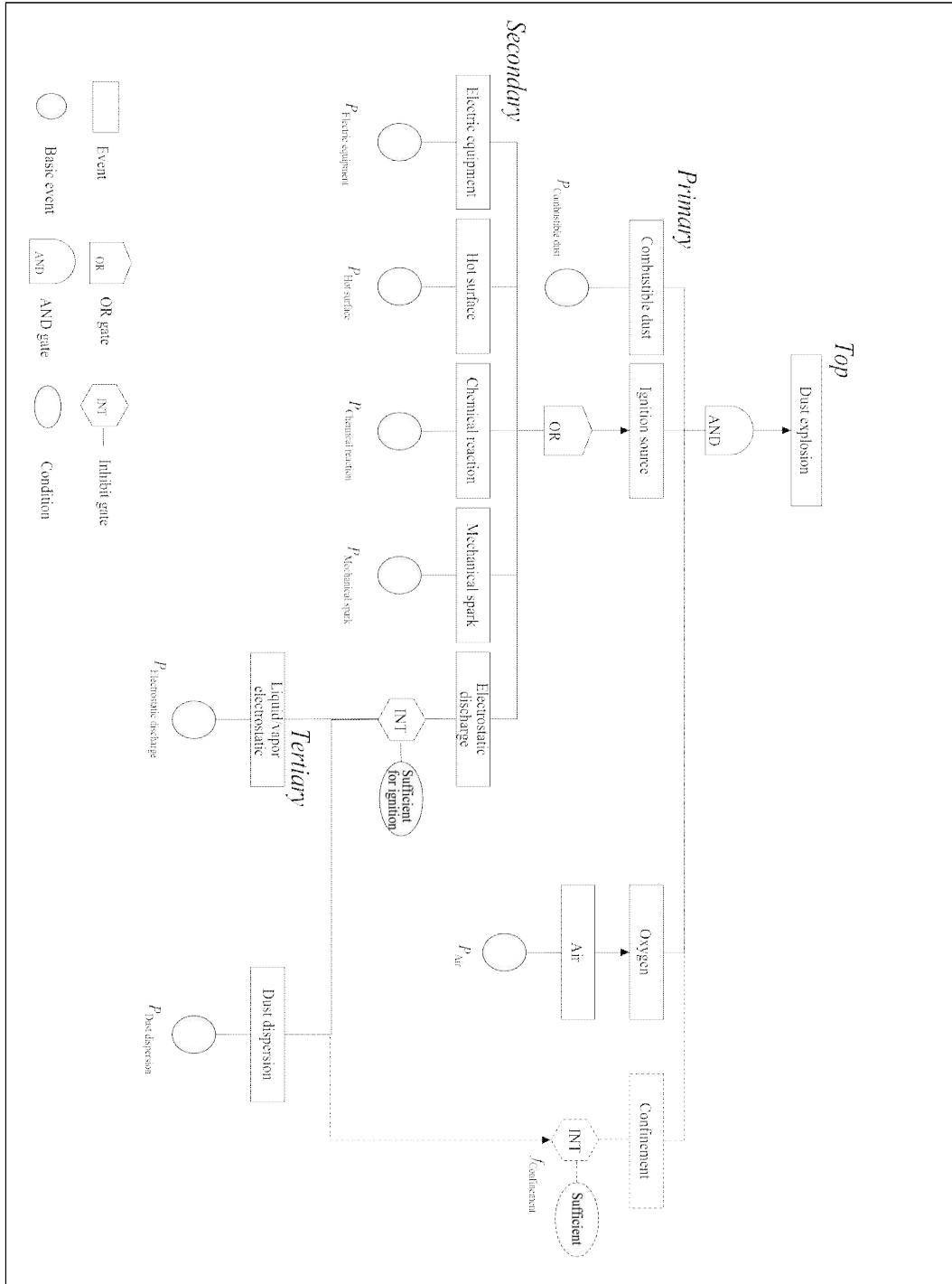
가연성 분진 투입 작업 또한 LPG 투입 작업과 같은 형태로 분석하고자 [그림 III-4]와 같이 FTA를 실시하였다. 분진폭발이 발생하기 위해서는 보편적으로 가연성 분진, 점화원, 산소, 분진운, 밀폐공간, 5가지를 필요조건으로 한다. 여기서 밀폐공간은 영어로 컨파인먼트(Confinement)라고 표현되며, 단순히 밀폐공간을 의미하는 것이 아니다. 분진폭발 뿐만 아니라 모든 폭발 현상에서 있어서, 폭발 과압을 형성할 수 있을 정도의 난류 거동을 발생시킬 수 있는 조건을 의미한다. 다시 말해서 컨파인먼트가 없다면 폭발이 아니라 플래시화재(Flash fire) 현상으로 해석하며, 이때는 폭발 과압이 없는 상태를 의미한다. 따라서 FTA 수행에 있어서 분진폭발의 범위를 플래시화재까지 확대한다면 분진폭발의 필요 조건을 [그림 III-4]와 같이 4가지로 줄일 수 있게 된다. 여기에 더해 가연성 분진 투입 작업 특성상 분진운이 형성될 수밖에 없으므로 ($P_{\text{dust dispersion}}$)은 1.0이다. 따라서 [그림 III-4]와 같은 형태로 FTA를 구성할 수 있게 되며, (III-2)는 (III-4)와 같이 다시 정리 할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P_{\text{combustion}} &= \prod_i^{\text{combustion}} P_i \\
 &= \sum_j^{\text{ignition source}} P_j \sum_k^{\text{oxygen}} P_k \quad P_{\text{combustible material}} = 1.0 \\
 &= P_{\text{air}} \sum_j^{\text{ignition source}} P_j \quad \text{none of oxydizing agent} \quad \text{(III-4)}
 \end{aligned}$$

- $P_{\text{combustion}}$: 연소 사건이 발생할 확률
- $P_{\text{combustible material}}$: 가연성 물질이 존재할 확률
- P_{air} : 연소에 충분한 공기가 존재할 확률
- P_i : 연소의 3요소 각각이 충족할 확률
- P_j : 5가지 점화원 각각의 발생 확률
- P_k : 공기와 산화제 각각의 존재할 확률

탱크로리에 LPG를 주입하는 작업에서 분석했던 것과 같이 접근하면, 가연성 분진 투입 작업은 P_{air} 를 제어할 수 없는 한계에 부딪히게 된다. 결국 가연성 분진 투입 작업에 있어서 점화원이 위험성을 제어할 수 있는 유일한 수단이라는 점이다. 만약 두 작업에 대한 점화원의 발생할 확률이 동일하다면 어떤 조치를 하더라도 가연성 분진을 투입하는 작업이 더 위험할 수밖에 없다는 의미이기도 하다. 그래서 집진기와 같은 설비는 설비 내부에서의 폭발을 전제 조건으로 하고, 폭발 상황을 고려해서 설비의 내압 성능을 고려해서 설계하게 된다⁸⁾. 하지만 가연성 분진 투입 작업은 폭발을 전제 조건으로 할 수 없는 여건이다. 따라서 화재·폭발 사고 예방을 위해서는 유일한 제어 수단인 점화원을 보편적인 수준으로 관리해서는 화재·폭발로 인한 위험성을 원하는 수준까지 제어할 수 없다. 이런 의미에서 가연성 분진 투입 작업 중 발생하는 화재·폭발 사고를 막기 위해서는 보다 고도화된 형태의 점화원 관리 방법이 필요하다.

8) National Fire Protection Association. (2023). NFPA 68: Standard on explosion protection by deflagration venting.



[그림 III-4] 가연성 분진 투입 작업의 FTA 결과

2) 점화원에 대한 분석

가연성 분진 투입 작업은 표준에 따라 최소 21종 분진폭발 위험장소로 설정되어야 하며⁹⁾, 관련 전기설비는 표준에 따라서 설계, 선정, 설치되고¹⁰⁾, 표준에 따라 유지관리 되어야 한다¹¹⁾. 따라서 앞서 언급한 점화원 5가지 중에 ‘전기설비’, ‘고온표면’, ‘기계적 스파크’는 표준에 따라서 제어된다고 할 수 있다. 해당 표준에서는 전기설비에 대한 기준뿐만 아니라 전기설비의 온도, 작업 시의 작업허가 및 작업 시의 방폭형 도구(Non sparking tool)의 사용까지 상세하게 다루고 있다.

물론 산업 현장에서 어느 정도 표준을 준수하는지에 대한 문제를 제기할 수 있겠지만, 이번에 검토하고자 하는 것은 위험성을 제어할 수 있는 수단이 있는지, 없는지를 검토하는 것이다. 따라서 현장에서의 표준 준수 여부와는 별개의 문제로 본다.

다음으로 ‘화학반응’과 관련된 점화원은 노동자 실수로 작업 절차와는 다른 물질을 투입하여 화학반응이 발생하는 경우를 의미하는데, 사실 가연성 분진을 투입하는 행위가 종료되어야 발생하는 문제이기 때문에 사실상 가연성 분진 투입 작업과 직접적인 관련성은 없다고 본다. 물론 잘못된 물질을 투입하거나 물질의 투입 순서가 엇갈리면서 폭발반응이 발생하는 사고는 다수 보고되고 있는 것이 사실이다. 하지만 이번에 위험성 평가 대상 사고와는 거리가 있어 제외하였다.

마지막으로 정전기 방전 현상이 점화원으로 작용하는 부분에 대해서 설명하고자 한다. 흔히 일상의 범위에서 정전기라고 하면 정전기가 방전되는 현상을 의미한다. 사실 보편적으로 사람이 느끼기에 살짝 따끔한 수준의 굉장히

9) 국가기술표준원. (2021). KS C IEC 60079-10-2: 폭발성 분위기 — 제10-2부: 폭발 위험장소의 구분 - 가연성 분진 분위기.

10) 국가기술표준원. (2022). KS C IEC 60079-14: 폭발성 분위기 — 제14부: 전기설비 설계, 선정 및 설치.

11) 국가기술표준원. (2021). KS C IEC 60079-17: 폭발성 분위기 — 제17부: 전기설비 검사 및 유지보수.

작은 양의 에너지이며 겨울에나 발생하는 것 정도로 생각하기 마련이다.

한편 실제로 사람이 느끼는 정전기 방전 현상은 인체 표면이나 의류에서 발생하는 셀 수없이 많은 정전기 방전 현상 중에 극히 일부만 느끼고 있을 뿐이다. 이처럼 대부분의 사람들은 본인이 인지한 정전기 방전 현상을 기준으로 정전기 방전 현상을 이해하고 있어서, 실제로 정전기에 대한 잘못된 인식을 가지고 있다는 것을 아는 사람은 많지 않다. 산업 현장에서도 마찬가지로 정전기를 제어해야 한다고 하면, 통상 접지를 우선 생각하게 되고, 좀 더 경험이 있는 사람이면 본딩(Bonding), 그리고 좀 더 나아가서는 제전복, 제전화 등을 상기하는 것이 보편적인 접근으로 여겨지고 있는 것이 사실이다.

더군다나 관련 법규나 가이드에서도 사실 이 이상을 권장하고 있지는 않다. 물론 작업 특성에 따라서는 제전 스트랩을 사용하거나, 포장재의 경우에도 제전 재질을 사용할 것을 권장하고 경우도 있으나 어디까지나 접지를 하는 것과 유사한 수준이다. 이 정도 수준을 우리는 정전기로 인한 화재·폭발 위험성을 제어하고 있다고 판단한다. 하지만 지속적인 화재·폭발 사고를 통해 알수 있듯이 앞서 언급한 정전기 위험성 제어 방법으로 제어할 수 있는 위험성은 실제로 극히 일부일 뿐이다.

이런 결과는 일상생활의 범위에서의 정전기에 대한 잘못된 인식이 산업 현장에까지 영향을 미친 결과이기도 하겠지만, 더욱 아쉬운 점은 인터넷 검색 결과나 관련 전문 서적도 사실 정전기 대전과 방전 현상을 보편적으로 생각하는 수준 이상으로 설명하고 있지 못하다는 점이다. 무엇보다 사고 예방을 위해서는 이런 잘못된 인식 개선이 우선되어야 한다고 판단되며, 사고 예방을 위해서는 어떤 방향으로 접근해야하는지 설명하기 위해서, 가연성 분진을 투하하는 과정에 정전기와 관련하여 어떤 물리적 현상이 발생하는지 가능한 상세히 설명해보고자 하였다.

3. 가연성 분진 투입 중 발생하는 정전기의 의미

1) 정전기 대전과 방전 현상

인터넷이나 대부분의 정전기 관련 저서에서 제시하는 자료에서는 정전기가 대전되는 현상을 크게 이온설¹²⁾과 전자설¹³⁾을 기반으로 설명하고 있다. 이온설은 말 그대로 이온의 이동으로 인해서 정전기가 대전된다는 의미인데, 이 가설은 고체 입자, 특히 금속 입자에 대해서는 전혀 설명이 되지 않는다. 전자설은 볼프강 파울리(Wolfgang Pauli)의 에너지띠 이론¹⁴⁾에 기반하여 일함수¹⁵⁾가 작은 물질이 일함수가 큰 물질과 접촉·마찰하는 경우, 일함수가 큰 쪽으로 전자가 이동하면서 전기적 성질(전하)을 띠게 된다는 설명이다. 금속이나 반도체에 있어서 실제로 많이 활용되고 있는 이론이지만 절연체에서 전자가 이동한다는 것은 에너지띠 이론과 맞지 않다.

사실 2012년 유럽입자물리연구소(CERN¹⁶⁾)에서 힉스 보손¹⁷⁾이 입증되는 등 현대 물리학에는 큰 발전이 있어 왔다. 하지만, 원자 모형에서 출발해서 다분자 모형까지 설명하는 것에는 아직 한계가 있다. 물론 밀도 범함수 이론¹⁸⁾이나 위상 물리학¹⁹⁾을 이용해 접근한다면 다분자 모형이 설명은 가능하겠지만, 접촉·마찰과 같은 동적인 상황까지 설명하는 것이 사실상 현재는 불가능하

12) 정전기 대전 현상에 있어서 이온이 직접 이동하면서 전하를 형성한다는 이론

13) 정전기 대전 현상에 있어서 에너지띠 이론에 기반한 일함수의 차이에 따라서 대전이 된다는 이론

14) 고체에서 전자의 에너지 준위는 서로 겹칠 수 없어서 일종의 띠를 형성한다는 이론

15) 고체 입자에 있어 전자가 전도대를 벗어나 진공 상태로 나가기 위한 최소 에너지

16) Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire로 세계 최대 규모의 입자가속기를 보유하고 있으며, 힉스 입자 이론을 입증함

17) 입자가 힉스장과 상호작용하여 질량을 얻게 하는 힉스 메커니즘을 설명하기 위한 반드시 필요한 기본 미립자

18) 다분자계는 사실상 복잡한 전자 파동으로 얽혀 있는 상태이지만 실제 계산상의 어려움으로 파동을 대신해 전자 밀도라는 개념으로 다분자계를 설명하는 이론

19) 위상 수학의 개념과 같이 물질의 성질을 위상적 특성으로 구분하여 설명하는 이론

다. 다시 말해서 원자가 이런 특성이 있고, 그래서 분자가 이런 특성이 있으며, 그 결과 입자는 어떤 특성이 있다까지는 설명이 가능하지만, 정전기가 대전되는 현상은 설명할 수 있는 것은 아니다. 그래서 정전기 대전 현상을 이온설이나 전자설로 설명하거나, 때로는 혼합해서 설명하고는 있지만, 엄밀하게는 정전기가 대전되는 현상을 현대 물리학으로 명확하게 설명할 수 있는 것은 아니다.

수치해석을 이용해서 정전기가 대전되는 현상을 시뮬레이션하고 있는 시대에 어림없는 이야기처럼 들릴 수도 있겠지만, 안타깝게도 시뮬레이션 또한 정전기가 대전되는 원리를 시뮬레이션하는 것은 아니다. 시뮬레이션의 경우에는 나비에-스톡스(Navier-Stokes) 방정식²⁰⁾을 기반으로 유체 이동 현상에 대해서 계산하고, 푸아송 방정식²¹⁾을 이용해서 전하 밀도와 유전율에 대해서 전위장을 산정하는 방식이다. 결과적으로 입자가 대전되는 미케니즘(Mechanism)을 근거로 시뮬레이션하는 것이 아니라, 특정 도메인에 대해서 초기·경계조건을 기준으로 전기장의 변화하는 상태를 시뮬레이션하는 것이 전부이다.

결과적으로 현재의 과학과 기술로는 정전기 대전 현상을 현상학적으로 이해하고 있다고 설명할 수밖에 없다. 현상학적인 접근으로 가장 대표되는 이론은 트라이보일렉트릭(Triboelectric) 효과²²⁾라고 할 수 있다. 에너지피 이론의 일함수 이론으로 설명하는 이론이지만, 절연체에 대해서도 트라이보일렉트리시리즈라는 대전서열을 제시하고 있어서 실질적으로 광범위하게 활용되고 있는 이론이다. 물론 같은 물질 간의 마찰이나 온도, 습도 등에 따라서 크게 변하는 한계점이 있지만, 현실적으로 접촉·마찰로 인한 정전기 대전 현상을 정량적으로 산정할 수 있는 거의 유일한 이론이다.

20) 점성을 가진 유체의 운동현상을 설명하는 방정식

21) 푸아송 방정식은 통상 장(Field)를 설명하는데 유용한 방정식으로 전위, 전하밀도, 유전율 등에 대해 적용한 방정식임

22) 두 물체가 접촉 마찰할때 전자가 이동하는 현상을 설명한 이론

따라서 가연성 분진을 투입하는 과정에 발생하는 정전기적 현상 또한, 현상학적인 방법으로 설명하고자 한다. 이해를 돕기 위해서 한 개의 폴리에틸렌(Polyethylene) 입자에서부터 시작하고자 하였다. 절연성 폴리에틸렌 입자가 증력장에서 자유낙하 운동을 하게 되면, 일단 완전한 구형을 하고 있지 않는 이상 회전운동을 하면서 낙하하게 된다. 이때는 트라이보일렉트릭 효과에 의해서 공기는 양전하로, 입자는 음전하로 대전되게 된다. 물론 이때는 입자 표면의 거칠기나 입자의 변형으로 인한 대전 효과 즉, 플렉소 효과(Flexo effect)²³⁾²⁴⁾에 의해서 대전 속도는 달라질 수 있다. 그리고 회전하는 입자는 사실 공기와의 마찰로 인해 일정 속도에 다다르기 전까지는 불균질하게 대류 냉각되면서, 절연체에서의 열전효과²⁵⁾로 인해 정전기 대전이 가속될 것이다.

이런 운동·대전 상황과 동시에 입자는 크게 2가지 현상으로 인해서 전자기파를 방출하게 된다. 하나는 맥스웰 방정식(Maxwell's equation)에서 유도된 라모 포물러(Larmor formula)²⁶⁾에 따라서 전하의 가속 운동으로 인해서 전자기파를 방출하는 현상이고 또 하나는, 입자 자체가 가질 수 있는 전하가 포화²⁷⁾되면서 전자기파 형태의 에너지를 공기 중으로 방출하게 된다. 이때 입자는 이런 대전과 방전 현상을 지속 반복하면서 추락하게 될 것이다. 그리고 추락하는 동안 습도, 온도, 압력은 물론이고, 높이에 따른 지구 자기장의 차이, 통신 전파, 심지어 주변에 전기케이블이 있다면 그 전기장의 영향까지 받으면서 추락하게 될 것이다. 그리고 최종적으로는 착지 충격으로 인한 열전효과와 트라이보일렉트릭 효과에 의해 최종적으로 대전·방전되고는 전하를 띤 상태에

23) 유전체가 물리적으로 변형됨에 따라서 분극 현상이 발생하는 현상을 설명한 이론

24) Tripathy, A., Saravanakumar, B., Mohanty, S., Nayak, S. K., & Ramadoss, A. (2021). Comprehensive review on flexoelectric energy harvesting technology: Mechanisms, device configurations, and potential applications. *ACS Applied Electronic Materials*, 3(7), 2898-2924.

25) 금속 또는 반도체에 온도 차가 있을때 전압이 발생하는 현상을 설명한 이론

26) 가속하는 대전 입자가 전자기파 형태로 방출하는 복사 에너지의 일률을 계산한 공식

27) Cruise, R. D., Starr, S. O., Hadler, K., & Cilliers, J. J. (2023). Triboelectric charge saturation on single and multiple insulating particles in air and vacuum. *Scientific Reports*, 13(1), 15178.

(그간 추상적인 개념으로 접근되고 있던 절연체의 포화 전하를 설명한 연구)

서 입자와 바닥에 있는 수분층에 의해서 전기적 성질을 잃어가게 된다²⁸⁾.

한 개의 입자가 추락하는 현상을 가연성 분진 투입 작업으로 확대하게 되면, 기본적으로 입자 간의 충돌과 더불어 입자의 깨짐 현상을 예상할 수 있다. 물론 이런 과정에서도 수만 개의 입자가 동시다발적으로 충돌하고 깨지면서 정전기 대전과 방전이 연속되겠지만, 무엇보다 이런 현상을 설명하기 어렵게 하는 점은 상호 간의 전자기파 방출로 인한 영향이다. 실제로 가연성 분진을 투입하는 동안은 그 공간 자체가 전자기파로 가득 차게 된다. 다시 말해서 그 주변의 접지된 도체를 제외한 모든 물체가 전자기유도 현상의 영향을 받는다는 의미이다. 물론 전자기파의 세기가 인체에 영향을 미칠 정도로 강한 수준은 아니지만, 전자기 유도현상으로 인해서 대전 전위와 전하량은 점화원으로 작용하기에는 충분한 수준이다.

Osada의 실험 결과는 가연성 분진 투입과정에서 발생하는 전자기 유도로 인한 영향이 어느 정도 수준인지 상세히 제시하고 있다²⁹⁾. 실험은 국내에서 흔히 톤백이라고 불리는 FIBC³⁰⁾에 담긴 폴리프로필렌 펠렛(Polypropylene Pellet)을 하부의 호퍼로 투입하는 과정에 FIBC와 주변에 있는 절연된 도체에 대전되는 전하량과 표면전위를 측정하는 실험이었다. 실험결과 폴리프로필렌 재질의 FIBC는 약 +100 kV까지 대전되었으며, 접지 전극으로 방전 실험을 한 결과 최대 +108 nC까지도 방전이 발생하였다. 주변에 설치된 절연도체의 표면전위는 최대 +35 kV까지 대전되었으며, 최대 방전 전하량은 +306 nC인 것으로 측정되었다. 이런 수준의 정전기 방전은 브러시 방전과 스파크 방전으

28) Shin, E. C., Ko, J. H., Lyeo, H. K., & Kim, Y. H. (2022). Derivation of a governing rule in triboelectric charging and series from thermoelectricity. *Physical Review Research*, 4(2), 023131.

(국내 연구진에 의해서 규명된 내용으로 열전효과와 트라이보일렉트릭간의 상관관계를 설명)

29) Osada, Y., Shoyama, M., Suzuki, T., & Choi, K. (2024). Experimental study on charge transfer measurement of electrostatic discharges generated on surface of insulative flexible intermediate bulk container using novel Coulomb meter. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 89, 105314.

30) Flexible intermediate bulk container

로 분류하며 실제로 방전 에너지 또한 3 mJ 이상이다. 다시 말해서, IEC에서 분류하는 IIC, IIB, IIA 가스(증기) 그룹의 점화원으로 작용하기에 충분한 에너지이며, 다수의 가연성 분진까지도 점화하기에 충분한 에너지라는 의미이다³¹⁾³²⁾.

문제는 여기가 끝이 아니라는 점이다. 전자기장에 노출된 상태에서는 상식의 범위에서 이해하고 있던 물질의 물리적 성질, 끓는점, 유전율, 증기압, 최소점화에너지 등 대부분의 특성이 화재·폭발에 취약한 방향으로 변화한다. 끓는점은 낮아지고³³⁾, 유전율은 변화하고³⁴⁾, 증기압은 증가하고³⁵⁾, 최소점화에너지도 변화한다³⁶⁾. 더군다나 가연성 분진을 혼합기/반응기로 투입할 때는 내부에 일정 수준 이상 가열된 용제가 있는 상태에서 실시하는 경우가 대부분이다. 이런 가열된 용제에서 발생한 증기로 인해서 혼합기/반응기 내부의 도전성이 크게 상승한다. 톨루엔을 예로 27 °C에서 전기전도도는 1.0×10^{-12} S/m인데 반해 100 °C에서는 1.0×10^{-10} S/m로 증가한다³⁷⁾. 참고로 공기의 전기전도도가 $10^{-14} \sim 10^{-13}$ S/m 범위이다. 물론 농도에 따른 영향이 있겠지만, 대전

-
- 31) International Electrotechnical Commission. (2017). IEC 60079-0: Explosive atmospheres - Part 0: Equipment - General requirements (IEC 60079-0). International Electrotechnical Commission.
- 32) Eckhoff, R. K. (2003). Dust explosions in the process industries (3rd ed.). Elsevier Science.
- 33) Ramezani, A., Faghieh Khorasani, A., & Ayoobi, A. (2023). An investigation of pool boiling under alternating magnetic field and steady-state conditions. *AUT Journal of Mechanical Engineering*, 7(1), 135-146.
- 34) Wang, Y., & Chung, D. D. L. (2017). Effect of the fringing electric field on the apparent electric permittivity of cement-based materials. *Composites Part B: Engineering*, 126, 192-201.
- 35) Xu, X., Yu, C., & Ma, L. (2025). Variations of saturation vapor pressure and evaporation rate of liquids with their vaporization enthalpy. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2501.10683>
- 36) Ngo, M. (2009). Determination of the minimum ignition energy (MIE) of premixed propane/air (Master's thesis, The University of Bergen).
- 37) National Institute of Standards and Technology. (2007). Toluene thermophysical properties. NIST Chemistry WebBook. <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C108883&Mask=7>

된 입자가 갑자기 전기전도도가 높은 증기층을 만난다는 의미는 방전 전극과의 절연파괴 거리가 줄어드는 것이고 다른 말로는 방전에 취약한 전계에 노출된다는 의미이다. 조금 과장을 보태면 마치 대전이 잘되는 곳에서 충분히 대전을 시킨 다음에 방전이 잘되는 곳으로 보내는 형태이다.

결론적으로 가연성 분진을 투입하는 작업에서 화재·폭발 사고 예방을 위해서 접지, 제전복, 제전화 등의 안전조치는 사실 의미있는 활동이겠지만, 실제로 이런 조치로 제어되는 위험 요인은 극히 일부라는 것이다. 다시 말해서, 노동자의 금속제 벨트, 금속제 단추는 물론이고, 절연된 바닥에 떨어진 작은 금속 조각조차 유전체로 작용할 수 있으며, 이외에도 수십, 수백 가지의 추가적인 점화 요인이 있을 수 있는 상태라는 의미이다. 결과적으로 현재의 가연성 분진 투입 작업은 언제든지 정전기 방전으로 화재·폭발이 발생할 수 있는 상태에서, 단지 점화원이 될 만한 수준의 방전이 발생하지 않기를 바라면서 작업을 하는 상태라고 설명하는 것이 오히려 타당하다고 여겨진다.

2) 현재의 제전 기술

앞서 설명한 바와 같이 실제로 접지, 제전복 착용과 같은 제전 조치는 가연성 분진을 투입하는 작업에 있어서 화재·폭발 사고 예방을 위해서 반드시 필요한 부분이지만, 현장에 있는 모든 물체의 정전기 대전 현상을 제어할 수 있는 방법은 아니다. 실질적으로 완전히 정전기를 제어하기 위해서는 가연성 분진을 투입하는 그 공간을 제어하기 위한 제전 기술이 필요하다. 이런 의미에서 현재의 제전 기술에 대해서 간략하게 검토하였다.

현재의 제전 기술은 크게 3가지 유형으로 구분된다. 하나는 고전압을 이용해 인위적으로 코로나 방전을 일으키고 이때 여기된 이온풍을 공급하는 방식이고, 둘째는 유체가 도전성 관을 통해 흐르면서 발생하는 전류를 이용하여 관의 끝단에 설치된 방전침에서 코로나 방전을 일으키는 방식이다. 마지막으로 방사선을 이용한 방식인데, 첫 번째로 소개한 이온풍을 공급하는 방식과 같

은 원리이다.

첫 번째 이온풍 기술은 실제 산업계에서 많이 활용되고 있는 기술이다. 국내에서는 반도체 제조 공정 위주로 보급·확산되고 있으나, 정전기를 심각한 점화 요인으로 간주하는 문화가 있는 미국·일본의 경우에는 제조업 사업장 전반적으로 보편화된 기술이다. 그 결과 제전기 제조 시장 또한 두 국가의 기업들이 주도적으로 활동하고 있는 실정이다³⁸⁾.

한편 문제는 이온풍을 활용한 제전기로 가연성 분진을 투입하는 작업에 적용할 경우 어느 정도 효과가 있을지 알 수 없다는 것이 문제이다. 실제로 공기라는 유체를 이온 전달 매체로 하기 때문에, 포장재나 구조물 등을 통과해 유효한 제전효과를 기대하기가 상식적으로 어렵기 때문이다.

둘째로 소개한 자기 유도 대전식의 제전 기술³⁹⁾은 사실 사이로(Silo)와 같은 저장설비에 공기 등을 이용해서 분체를 이송하는 장치에서는 굉장히 효율적이다. 실제 Shoyama의 연구 결과에서는 사이로 내부에 누적된 분체 상부에서 발생하는 전파 브러쉬 방전(Propagation brush discharge)뿐만 아니라 브러쉬 방전 현상까지 상당수 제어할 수 있는 것으로 확인되었다⁴⁰⁾. 하지만 작동 원리상 가연성 분진을 투입하는 작업에 적용하기에는 한계가 있다.

사실 명확한 제전 기술이 확인되지 않는 상황이라면, 세계 각국에서는 어떻게 가연성 분진 투입 작업 중의 정전기를 어떻게 제도적으로 관리하고 있는지 검토할 필요가 있다. 미국은 과거 PSM⁴¹⁾ 제도의 출발이 되었던 화학공장 전

38) 물론 국내에도 제전기를 제조하는 기업들이 있으나, 규모면에서 키엔스(일본), 가스가 전기(일본), 프레이저(미국), 암스텝 인더스트리즈(미국), SMC(일본), 트랜스포밍 테크놀로지스(미국), 시시도 일렉트로스테틱(일본), 오프론(일본), 코가네이(일본) 등과 같은 기업들과는 규모면에서는 차이가 있다는 의미임

39) 최상원. (2016). 자기 유도 대전 방식의 자가 발전형 제전 장치 (대한민국 특허 제 10-1594916호). 대한민국 특허청.

40) Shoyama, M., Osada, Y., & Choi, K. (2025). Electrostatic elimination effect of multiple metal rods on loading powder. Powder Technology, 452, 120543.

41) Process safety management

수조사 프로그램과 유사한 성격의 프로그램을 2011년 부터 가연성 분진을 대상으로 적용하여 현재까지 운영하고 있다. 그리고 일본은 가연성 분진폭발 사고 예방을 목적으로 개발된 위험성 평가 기법이 법제화되면서 이미 보급이 완료되어 사회적으로 정착된 상태이다.

이런 제도들은 국내의 제도와는 정성적인 부분에서 차이가 있는 것은 명확하겠지만, 이런 제도가 가연성 분진을 투입하는 작업에 얼마나 효과가 있는지는 알 수 없다고 본다. 오히려 앞서 설명한 바와 같이 점화원을 제어하는 것이 해당 작업의 핵심이고, 점화원 중에 많은 부분이 제어할 수 없는 정전기 방전으로 인한 것이라는 점이 명확한 이상, 다시 말해 기술적 한계가 명확한 상황에서 미국이나 일본의 제도가 효과가 있을 것이라고 예상되지는 않는다.

정리하면 가연성 분진 투입 작업 중 화재·폭발 사고 예방을 위해서 제어할 수 있는 독립변수는 사실상 점화원 뿐이다. 그런 의미에서 점화원은 노동자 실수나 어떤 오류로 물질을 잘못 투입하여 발생하는 반응폭주나, 정전기 방전, 2가지로 좁힐 수 있다. 반응폭주는 이번 위험성 평가 대상 사고와는 거리가 있으므로 제외한다고 할지라도, 현실적으로 가연성 분진 투입 중 정전기를 효과적인 수준으로 제어할 수 있는 기술적인 접근 방법은 현재로서는 확인되지 않는다.

가연성 분진 투입 작업에서의 정전기 제어의 핵심은 그 작업 공간 자체의 전자기장을 제어해야 한다는 것인데, 전자기장이라는 것이 시각적으로 확인할 수 없는 부분일 뿐만 아니라, 워낙 미세한 힘이라서 전문 장비가 없으면 3차원으로 측정하는 것조차 불가능한 것이 현실이기 때문에 더욱 어려운 문제로 여겨진다. 그렇다고 해서 이런 기술 개발의 방향성까지 전혀 제시되지 못하고 있는 것은 아니다. 사실 누군가는 강한 자기장을 이용한 방법을 생각할 수도 있을 것이고, 또 누군가는 스텔스 기술에 이용되는 전하 흡수 소재를 생각할 수도 있을 것이다. 하지만 이런 접근 방향보다 경제성있고, 간편하면서, 일상생활의 범위에서 접근 가능한 기술이 필요하다고 본다.

그런 의미에서 최근 메타물질 즉, 자연계에 존재하는 물질이 아니라 인공적으로 설계된 물질 관련 연구를 살펴보면, 음향과 광학을 이용하여 전자기파를 제어할 뿐만 아니라, 물질의 구조까지 바꾸는 기술이 개발되고 있다⁴²⁾⁴³⁾. 이런 기술을 응용한다면, 앞서 언급한 것과 같이 경제성있고, 간편하면서, 일상 생활의 범위에서 접근 가능한 제전 기술 개발이 가능할 수 있을 것으로 예상된다.

42) Chen, Z., Liu, Y., & Ma, G. (2016). A tunable acoustic metamaterial with double-negativity driven by electromagnets. *Scientific Reports*, 6, 30254.

43) Wen, X., Chen, H., & Liu, Z. (2021). Realizing spatiotemporal effective media for acoustic metamaterials. *Physical Review B*, 104(6), L060304.

IV. 시험 장비 및 방법



IV. 시험 장비 및 방법

1. 입도분석 시험

입도분석 시험 방법은 입자를 현미경으로 관찰하면서 측정하는 이미지 분석법 등 <표 IV-1>과 같이 다양한 방식이 있으나, 주로 마이크로미터 단위의 분진 입도 분포를 측정할 때는 레이저 회절 방식이 보편적으로 이용되고 있다.

<표 IV-1> 입도분석 시험 방법의 종류

연번	측정방식	장비	내용	장점	단점
1	광산란법	레이저 회절방식	미산란 이론을 바탕으로 하는 프라운호퍼 회절이론을 이용하는 방식으로 빛이 입자에 대해 회절되는 각도를 이용하여 입자의 크기를 측정하는 방식	범용성	회절이용 방식으로 구형입자 가정
2		동적 광산란	입자의 크기가 클수록 브라운 모션이 작아지는 특성을 이용한 스톡스-아인슈타인식의 확산계수를 이용하여 입자크기 산정	작은입자 분석가능	액체분산 시료만 적용
3	침강법	중력방식 원심분리	입자의 크기에 따라서 가라앉거나 원심분리 되는 속도가 다르다는 스톡스의 법칙을 이용하여 빛을 조사하여 관측되는 빛의 세기를 분석	밀도가 다른 혼합물 분석 용이	온도 등 환경변수에 민감
4	이미지 분석법	현미경	현미경이나 고속카메라로 직접 입자를 촬영하여 입자의 크기를 분석하는 방식	크기 및 입자 형상에 대한 정보 제공	관측장비의 성능에 의존도가 높음
5	체분석법	크기별체	가장 고전적인 방식으로 체를 크기별로 쌓아두고 분리되는 입자별로 크기를 측정하는 방식	경제성	상대적으로 큰 입자분석에 적용
6	전기저항법	전기저항 변화측정	전해질 용액에 분산된 입자를 통과시키면서 측정된 전기 저항이 입자의 부피에 비례하는 이론을 응용하는 방식	높은 정밀도	전해질 사용, 오염에 민감

이런 레이저 회절방식의 경우는 건식, 습식 시료 모두에 적용 가능하다. 하지만 프라운호퍼(Fraunhofer)의 회절이론을 기반으로 하기 때문에, 입자의 형태를 구형으로 가정하고 산란각도 측정을 통해서 크기를 측정하는 방식이다. 따라서 긴 형상을 갖는 입자의 경우 측정상의 한계가 있을 수 있으므로 현미경을 활용한 이미지 분석을 병행하여 실시하였다.

1) 레이저 회절 입도분석 장비

〈표 IV-2〉와 같은 베크만쿨터(Beckman coulter)사의 LS 13 320 모델을 이용하여 KS A ISO 13320-1 표준에 따라 건식분산장치를 이용하여 입도분석을 실시하였다. 시험 장비는 [그림 IV-1]과 같으며, 건식 시료를 측정하도록 구성되어 있다.

〈표 IV-2〉 레이저 회절 입도분석 장비 사양

연번	구분	장비	비고
1	모델명	LS 13 320	-
2	제조사	베크만쿨터(Beckman coulter)	
3	측정방식	레이저 회절 방식	
4	측정범위	0.4 ~ 2,000 μm	
5	시험표준	KS A ISO 13320-1	



[그림 IV-1] 레이저 회절 입도분석 장비 사진

2. 분진폭발 특성 시험

화학물질의 물리적 특성이라고 하면 어떤 화학물질이 가지는 고유 특성을 의미한다. 예를 들어, 물의 삼중점이라고 하면 규정된 조건에서의 온도와 같은 값을 특정할 수 있다는 의미이다. 이와는 달리 분진폭발의 특성치는 같은 종류의 분진이라고 할지라도 다르게 나타나는 것이 일반적이다.

이는 무엇보다 분진의 입도 분포가 정확히 일치하기가 어려운 점이 가장 큰 원인이라고 할 수 있겠지만, 실질적으로는 습도 등 환경적 영향뿐만 아니라, 초기 점화에너지 등 연쇄 반응에 영향을 미치는 인자들까지 분진폭발 특성치에 영향을 미치게 되기 때문이다. 따라서 분진폭발의 특성은 절대치로 이해하고 평가하는 것이 아니라, '어느 정도 수준이다'와 같은 말로 상대적인 값으로 이해하고 활용되어야만 한다.

이런 분진폭발의 특성치를 규정하고 있는 표준은 크게 미국재료시험협회(ASTM)와 유럽표준(EN) 두 가지로 구분된다. 시험 방법, 시험 장비 등에 있어서 두 표준에 큰 차이가 있는 것은 아니지만, 일부 용어상의 정의나, 서로 다른 용어를 사용하는 경우가 있어 구분되어 사용되고 있다.

주로 사용되는 특성치로는 분진폭발의 세기성질을 대표하는 최대폭발압력(P_{max})과 폭연지수(K_{st}) 산정 기준이 되는 폭발압력최대상승속도($(dP/dt)_{max}$)가 많이 활용되고 있으며, 분진폭발에 대한 민감도 기준으로는 폭발하한농도(LEL), 최소점화에너지, 한계산소농도(LOC)가 많이 활용되고 있다.

1) 20리터 구형 시험 장비

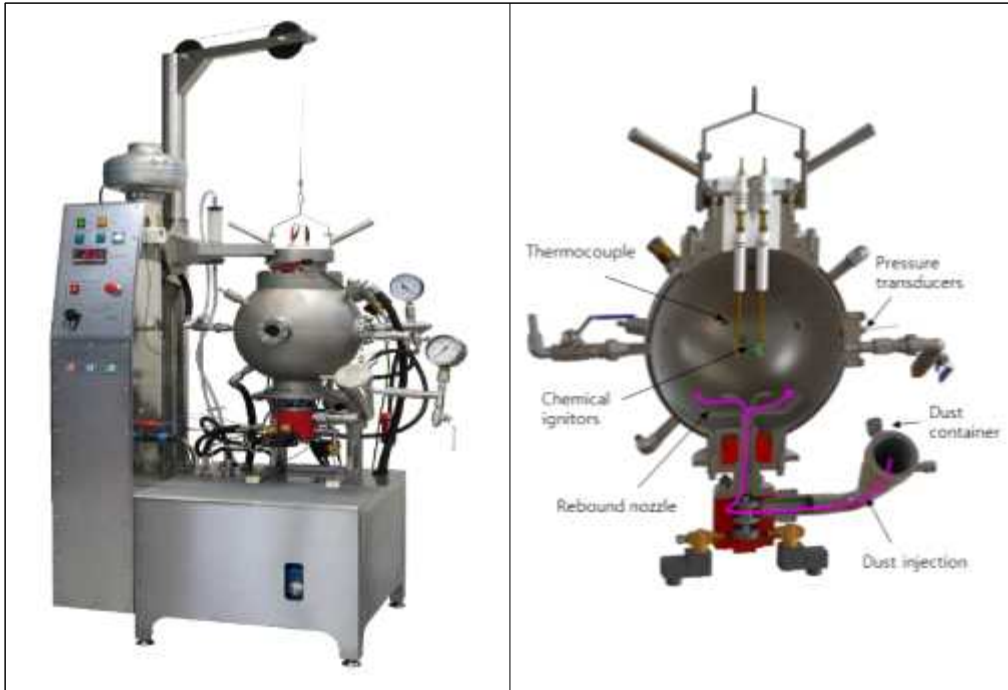
EN 14034시리즈에서는 사실상 1 m³ 부피의 시험 장비를 최대폭발압력, 폭발압력최대상승속도, 폭발하한농도, 한계산소농도 측정 시험 장비로 활용하도

록 표준화하고 있으나, 1 m³ 라는 큰 크기 때문에 운용상 어려움이 있을 뿐만 아니라, 폭발로 인한 소음, 진동 등의 문제가 있어서, 대체 장비로 <표 IV-3>, [그림 IV-2]와 같은 20리터 구형 시험 장비가 많이 활용되고 있다.

시험 방법은 분진 시료를 주입하고 20 bar 압력의 공기로 분진운을 만든 다음에 화학점화기를 이용하여 폭발시킴으로써 관련 특성을 측정하는 방식이다. 측정한 결과는 1 m³ 부피 시험 장비와 비교할 때, 화염 냉각 속도 등에서 차이가 발생하게 되므로 상대적인 값이라고 할 수 있으며, 표준에서 제시하는 방법에 따라 환산 과정을 거쳐 최종 시험 결과로 도출한다.

<표 IV-3> 20리터 구형 시험 장비 사양

연번	구분	장비	비고
1	모델명	SPD 2.3	-
2	제조사	ANKO Trading Ltd., 폴란드	
3	점화방식	화학점화기를 이용한 점화	
4	측정내용	1) 최대폭발압력 2) 폭발압력최대상승속도 3) 폭발하한농도 4) 한계산소농도	
5	시험표준	1) BS EN 14034-1:2011 (최대폭발압력) 2) BS EN 14034-2:2011 (폭발압력최대상승속도) 3) BS EN 14034-3:2011 (폭발하한농도) 4) BS EN 14034-4:2011 (한계산소농도)	



[그림 IV-2] 20리터 구형 시험 장비 사진과 설명

2) 분진 최소점화에너지 측정 장비

IEC 60079시리즈 뿐만 아니라 대부분의 표준에서 정의하는 “최소점화에너지는 지정된 시험 조건 하에서 가스, 증기 또는 분진운을 점화시키는데 필요한 전기 스파크 에너지”이다. 따라서 보편적 의미에서의 최소점화에너지, “연소나 발화를 시작하는데 필요한 최소한의 에너지”와는 다르다고 할 수 있다. 예를 들어, 화학점화기를 이용해서 최소점화에너지를 측정하였다면, 표준에는 부합하지 않는 방식이라고 할 수 있다.

이는 전기적 점화 방식이 그나마 가장 섬세하게 에너지를 제어할 수 있는 수단이기 때문에, 표준에서는 전기적 점화 방식을 표준 시험 방법으로 규정하고 있다. 한편, 캐패시터(Capacitor) 회로를 기반으로 하는 전기적 점화 방식 또한 방전되는 에너지를 실제로 mJ 단위로 섬세하게 제어할 수 있는 것은 아니다. 점화 전극에서의 방전 전하량이 전극의 곡률(날카로운 정도), 주변의 전자기계, 습도, 캐패시터 오차 등 다양한 인자의 영향을 받기 때문이다.

이런 이유에서 BS EN 13821:2002에 따르면 분진의 최소점화에너지 측정 결과를 표기할 때는 점화에너지의 범위로 표기하거나, 확률을 기반으로 하는 환산값을 기준으로 비교하도록 하고 있다.

최소점화에너지 시험 장비는 <표 IV-4>, [그림 IV-3]와 같이 하트만 튜브(Hartmann tube)에 점화기를 연결한 형태이며, Minor 3.0, Mike 3와 같이 다양한 상용 장비가 보급되고 있다. 한편 분진의 최소점화에너지의 경우 이런 상용 장비의 차이에 의해서도 다른 결과가 도출될 수 있는데¹⁾, 분진 최소점화에너지를 이해하는데 있어서는 이런 시험 상의 한계점을 이해하고 접근해야 한다.

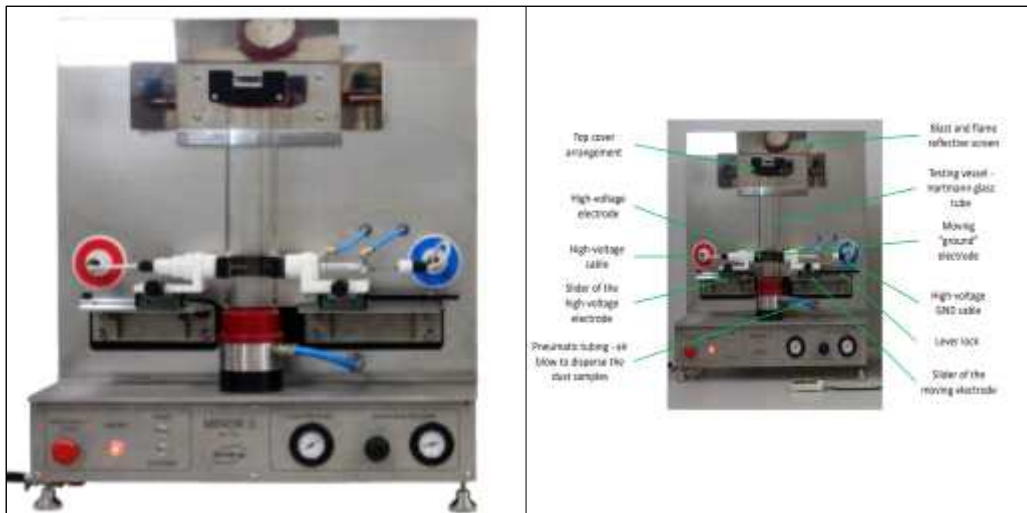
시험방법은 분진 시료를 주입하고 7 bar 내외의 공기 압력으로 분진운을 만든 다음 전기 스파크를 가해서 폭발 여부를 확인하는 방식으로, 설정 농도에서 점화에

1) Janes, A., Chaineaux, J., Carson, D., & Le Lore, P. A., “MIKE 3 versus HARTMANN apparatus: Comparison of measured minimum ignition energy (MIE)”. Journal of hazardous materials, 152(1), 32-39, 2008.

너지를 1,000 mJ > 300 mJ > 100 mJ > 30 mJ > 10 mJ > 3 mJ > 1 mJ 순서로 낮추면서 점화 횟수를 기록하는 방식이다.

〈표 IV-4〉 최소점화에너지 측정 장비 사양

연번	구분	장비	비고
1	모델명	Minor 3.0	-
2	제조사	ANKO Trading Ltd., 폴란드	
3	점화방식	전기적 아크	
4	측정범위	1 ~ 1,000 mJ	
5	시험표준	BS EN 13821:2002	



[그림 IV-3] 최소점화에너지 시험 장비 사진 및 설명

V. 시험 결과 및 고찰



V. 시험 결과 및 고찰

1. 입도분석 시험 결과

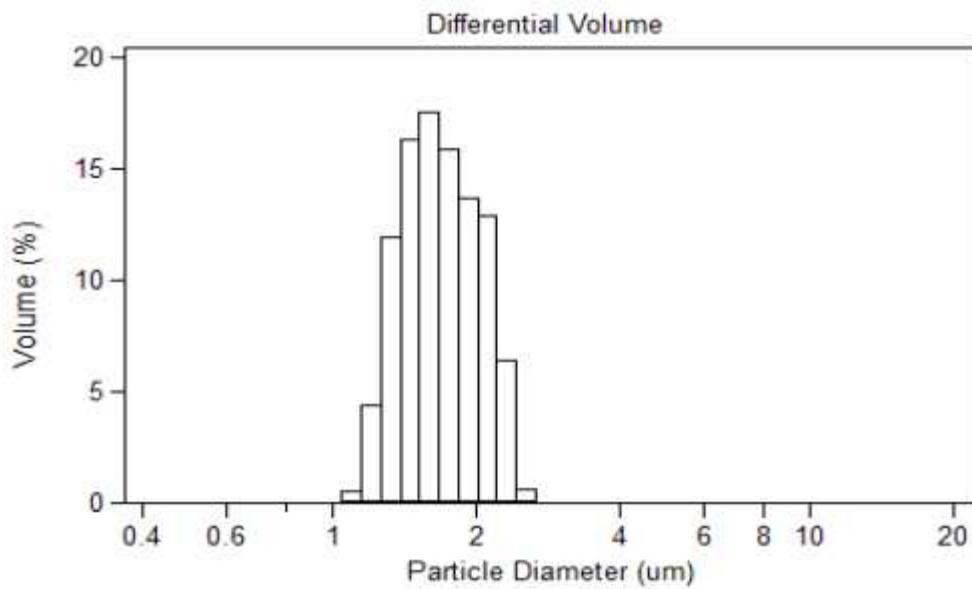
분진의 입도는 폭발 세기나 점화 민감도 등, 분진폭발의 물리적 특성에 큰 영향을 미치는 주요 인자 중 하나이다. 입도와 연소 사이의 물리 상관관계가 수학적으로 정의된 것은 아니지만, 기본적으로 입도가 작을수록 공기에 노출되는 표면적이 증가하면서, 연소속도가 증가한다고 판단하는 것이 보편적인 접근이다. 이런 상관관계는 서서히 가열하거나, 천천히 연소하는 현상에 있어서는 대체적으로 예외 없이 비례관계가 성립한다.

따라서 분진폭발에 있어서도 같은 물질이라면 입도가 작아질수록 폭발 위험성이 크게 측정되는 것이 보편적인 접근이라고 할 수 있다. 하지만 어디까지나 보편적인 접근에서의 의미지, 단정적으로 입도가 작아질수록 분진의 폭발성 또한 커진다고 말할 수는 없다. 특히 입도가 작은 분진의 경우에는 입자간에 응집이 쉽게 발생하게 되므로 언제든지 예외적인 상황이 발생할 수 있기 때문에 참고할 필요가 있다.

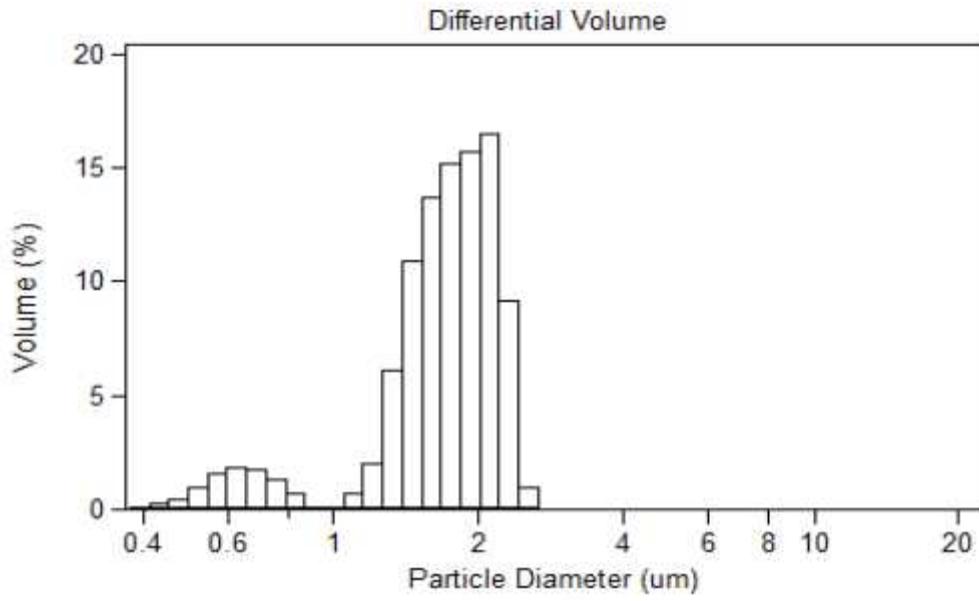
페노티아진과 하이드로퀴논, 2종에 대해서 레이저 회절 분석 방법으로 입도분석을 실시하였으며 측정 결과는 <표 V-1>, [그림 V-1], [그림 V-2]에 나타내었다. 중간값은 체적 기준의 누적 도수 분포가 50 %를 나타낼 때의 입자 지름(직경)을 의미하고 d_{50} 으로 표기하였다. 측정 결과 d_{50} 값은 페노티아진은 $1.664 \mu\text{m}$, 하이드로퀴논은 $1.749 \mu\text{m}$ 로 산정되었다.

〈표 V-1〉 입도분석 시험 결과

연번	구분	d ₁₀ (μ m)	d ₅₀ (μ m)	d ₉₀ (μ m)	비고
1	페노티아진	1.314	1.664	2.162	-
2	하이드로퀴논	1.161	1.749	2.211	-



[그림 V-1] 페노티아진의 입도 분포



[그림 V-2] 하이드로퀴논의 입도 분포

2. 분진폭발 특성 시험 결과

1) 20리터 구형 시험 장비 측정 결과

20리터 구형 시험 장비로 페노티아진, 하이드로퀴논 2종 시료에 대해서 분진폭발 압력 측정 시험을 실시하였다. 분진폭발 압력 측정 과정에서 ‘폭발압력 상승속도’를 측정할 수 있으므로, 해당 데이터로부터 폭연지수(Kst)와 분진폭발 등급을 산출하였다. 20리터 구형 시험 장비에 대한 추가 시험으로 분진 폭발하한농도 또한 측정하였다.

(1) 분진폭발 압력 측정 결과

BS EN 14034-1, ASTM E1226에서는 1 m³ 구형 시험 장비를 표준으로 사용하도록 하고 있다. 20리터의 구형 시험 장비의 경우 화염이 냉각되는 속도가 표준 시험 장비 대비 상대적으로 빠르고, 화학 점화로 인한 영향이 크기 때문에 다른 결과가 측정된다. 따라서 그간의 많은 시험 결과를 바탕으로, 20리터 구형 시험 장비로 시험한 결과를 표준 시험 장비에 대한 결과로 환산하는 방법이, 앞서 언급한 두 가지 표준에서 제시되어 있어 보편적으로 활용되고 있다. 환산 방법은 두 표준 모두 동일하며, 다음과 같이 최대폭발압력이 5.5 bar 이상과 미만인 경우로 구분하여 적용한다.

P_{ex} 가 5.5 bar 이상인 경우

$$P_{max} = 0.775 P_{ex}^{1.15}$$

P_{ex} 3회 시험결과 최대폭발압력 평균 값, bar

P_{max} 1 m³ 구형시험 장비 결과로 환산된 최대폭발압력, bar

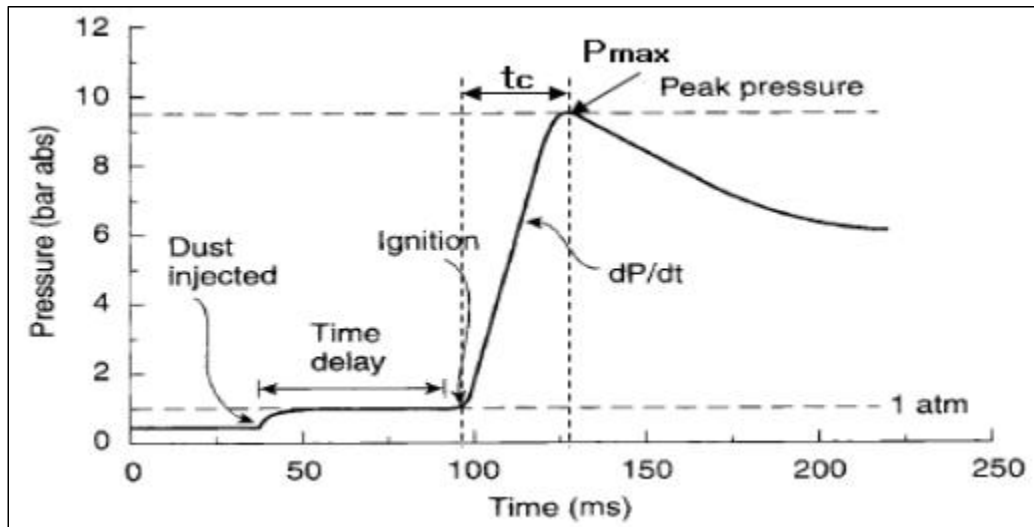
P_{ex} 가 5.5 bar 미만인 경우

$$P_{max} = \frac{5.5(P_{ex} - P_{ci})}{(5.5 - P_{ci})} \text{ (bar)}$$

$$P_{ci} = \frac{1.6 \cdot E_i}{10,000}$$

P_{ci} 화학점화기의 폭발압력, bar

E_i 화학점화 에너지, J



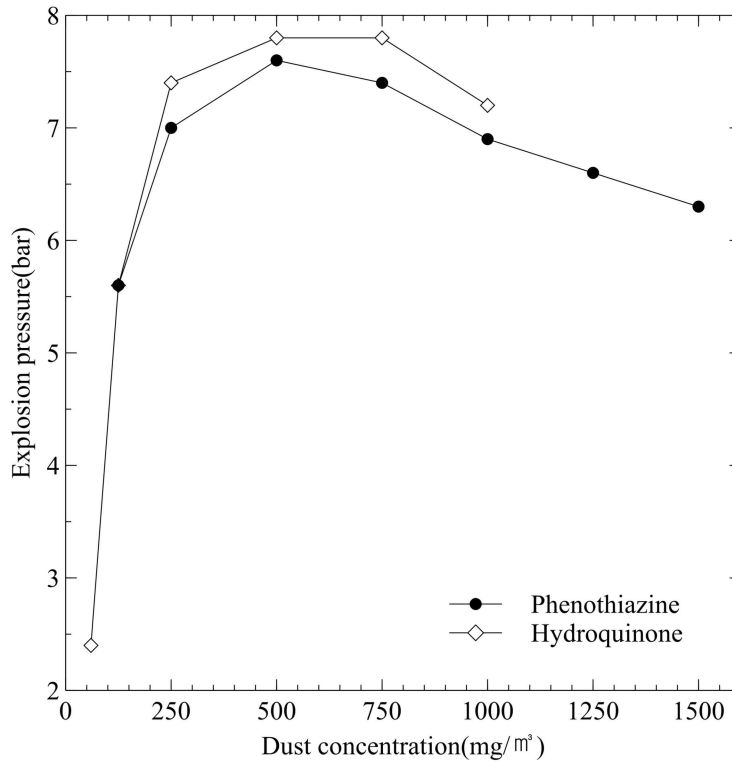
[그림 V-3] 시험 결과 설명(시간에 따른 압력변화)

〈표 V-2〉과 [그림 V-4]은 10 kJ 화학 점화기로 측정된 분진폭발 압력과 환산한 분진폭발 압력이다. 환산한 최대 분진폭발 압력으로는 페노티아진이 7.6 bar(농도 500 g/m³), 하이드로퀴논은 7.8 bar(농도 500 g/m³) 인 것으로 산정되었다.

〈표 V-2〉 분진 폭발압력 측정 결과

농도 (g/m ³)	폭발압력(bar)		비고
	페노티아진	하이드로퀴논	
60	-	2.4	-
125	5.6	5.6	
250	7.0	7.4	-
500	7.6*	7.8*	-
750	7.4	7.8*	-
1,000	6.9	7.2	-
1,250	6.6	-	-
1,500	6.3	-	-

* 최대 분진폭발 압력



〔그림 V-4〕 분진폭발 압력 측정 결과 비교

분진의 폭발등급(St 1~St 3)은 최대폭발압력상승속도 $[(dP/dt)_{\max}]$ 데이터를 폭연지수(K_{St})로 환산하여 결정하고 있다. 이런 폭연 지수는 폭연 방출구의 크기를 산정하는데 직접 활용되기도 하지만, <표 V-3>과 같이 분진폭발 등급을 결정하는 기준으로도 활용된다.

<표 V-3> BS EN 14034-2기준 분진폭발 등급

폭발 등급	K_{St} (bar·m/s)	폭발의 특징	예
St 1	> 0 to 200	폭발에 의한 위험성이 약한/보통 분진 (Weak/Moderate explosion)	곡물 분진
St 2	> 200 to 300	폭발에 의한 위험성이 큰 분진 (Strong explosion)	유기안료/에폭시수지
St 3	> 300	폭발에 의한 위험성이 매우 큰 분진 (Very strong explosion)	미세한 금속 분진

폭연지수는 BS EN 14034-2, ASTM E1226 두 표준 모두 다음과 같이 입방법칙(Cubic law)에 따라서 산정하도록 규정하고 있다.

$$K_{St} = \left(\frac{dP}{dt}\right)_{\max} \cdot V^{\frac{1}{3}}$$

$$K_{St} \quad \text{폭연지수, bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\left(\frac{dP}{dt}\right)_{\max} \quad \text{3회 시험결과 폭발압력상승속도 평균 값, bar} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$V \quad \text{구형시험장치의 부피, m}^3$$

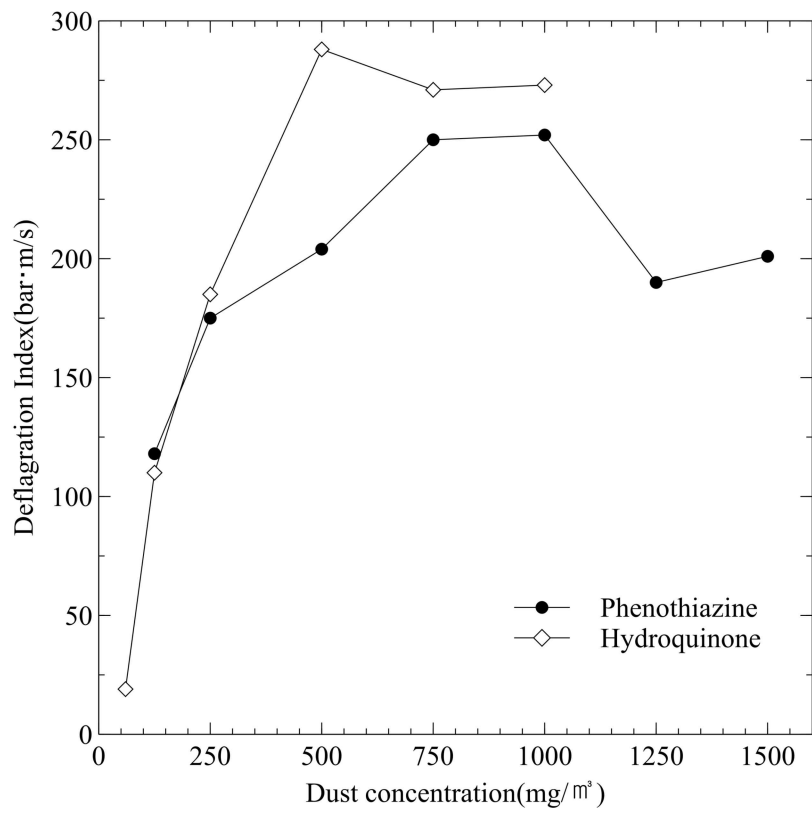
<표 V-4>는 분진폭발 시험 결과로 ‘폭발압력상승속도’, ‘폭연지수’, ‘연소 지속시간’에 대한 측정 결과이다. 폭연지수에 있어서는 페노티아진이 252

bar·m/s(농도 1,000 g/m³), 하이드로퀴논은 288 bar·m/s(농도 500 g/m³)로 산정되었다. <표 V-3>의 기준으로는 2종 시료 모두 “St 2” 분진폭발 등급에 해당하는 결과이다.

〈표 V-4〉 분진 폭발압력상승속도 속도 측정 결과

농도 (g/m ³)	폭발압력상승속도, dP/dt (bar/s)		폭연지수 K _{st} (bar·m/s)	
	페노티아진	하이드로퀴논	페노티아진	하이드로퀴논
60	-	70	-	19
125	435	404	118	110
250	646	682	175	185
500	750	1,062*	204	288*
750	919	998	250	271
1,000	927*	1,007	252*	273
1,250	698	-	190	-
1,500	742	-	201	-

* 각 시료별 최대값



[그림 V-5] 페노티아진과 하이드로퀴논의 폭연지수 비교

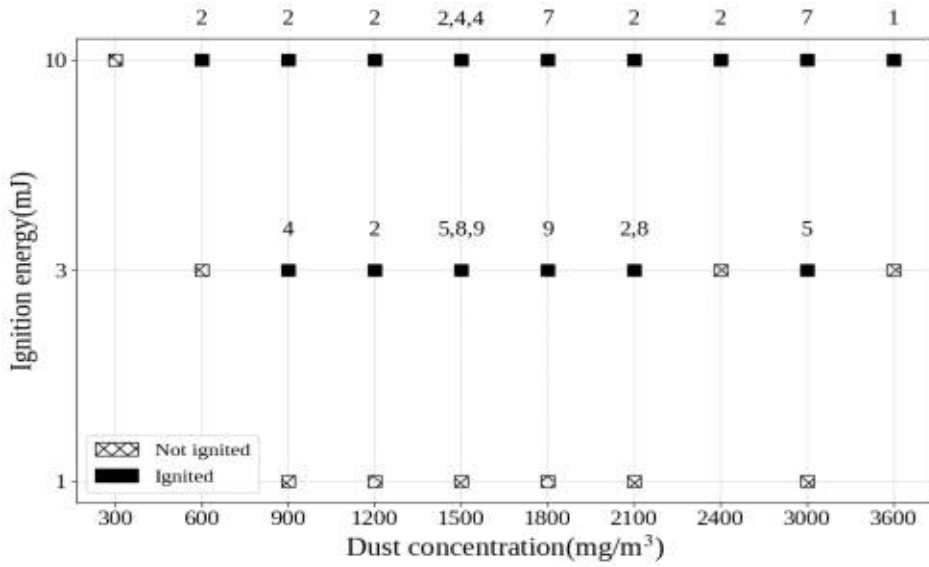
(2) 분진폭발 최소점화에너지

앞서 시험 장비 소개에서 언급한 바와 같이 분진폭발 최소점화에너지 시험 결과를 절대적인 값으로 이해하고 활용하는 것은 굉장히 위험한 일이라고 할 수 있다. 특히 관련 표준에서 제시하는 단일치(Single value)는 분진 간에 비교를 목적으로 점화 확률을 고려하여 환산한 수치일 뿐이지 절대적인 값으로 이해해서는 안된다. 분진폭발 최소점화에너지라고 하면 어디까지나 분진폭발의 민감도를 정량적으로 확인하기 위한 방법이지, 분진폭발이 발생하기 위해 필요한 최소한의 에너지가 아니라는 점 또한 이해해야 한다.

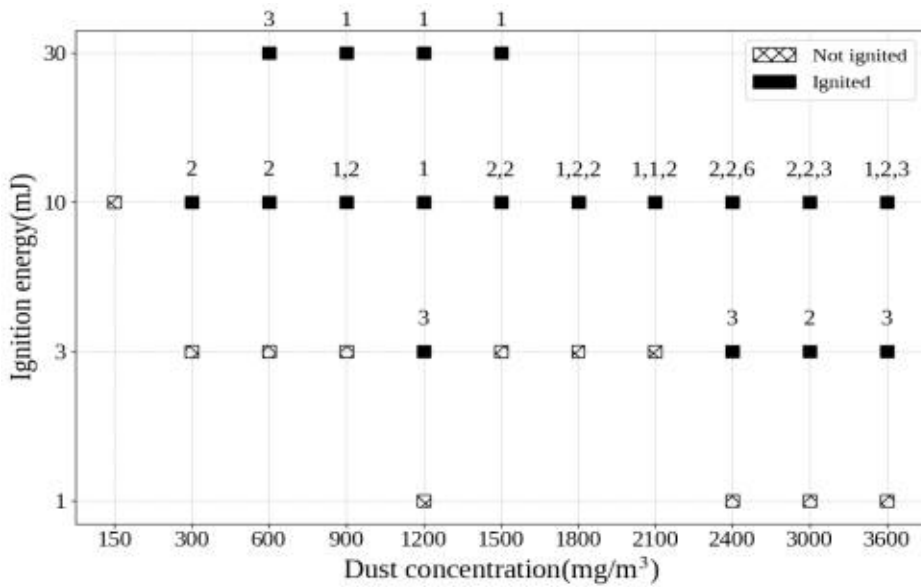
분진폭발 특성 시험에 있어서 대부분의 표준에서 1 m³ 구형 시험장치를 기본 모델로 설정한 이유는 결국 분진운이 형성되었을 때의 균질성 때문이라고 할 수 있다. 하트만 튜브 형식의 시험 장비의 경우 형상 때문에 이런 균질성 문제가 항상 제기된다. 따라서 표준에서 제시하는 방법 외로 점화 위치를 달리하여 결과를 비교하는 방식이 적용되는 경우도 다수 있다. 한편 표준에서는 이런 불균질성 문제를 해소하기 위해서 점화 지연 시간을 조정하는 방법을 주로 사용한다. 이번 시험에 있어서는 점화지연시간을 60 ms, 90 ms, 120 ms 세 단계로 조정하면서 실시하였다.

시험 결과는 [그림 V-6], [그림 V-7]로 나타내었다. E1은 10회 점화 결과 점화하지 않은 최소에너지이고, E2는 10회 점화시험 결과 1회 이상 점화한 최소에너지이다. 따라서 최소점화에너지는 E1(mJ) ~ E2(mJ) 범위로 표기한다. 그래프에서 ■ 마커는 점화한 경우이고, 마커 바로 위의 숫자는 10회 점화 결과 중 폭발한 점화 시험 번호이다. ▣ 마커는 10회 점화에서 폭발이 확인되지 않았다는 의미이다. 이런 폭발 횟수까지 고려하여 환산한 결과가 단일치(E_s)이다.

최종적으로 페노티아진은 최소점화에너지가 1 mJ ~ 3 mJ로 판정되었으며, 이때의 단일치(Single value)는 1.7 mJ로 환산되었고, 하이드로퀸은 역시 1 mJ ~ 3 mJ로 판정되었으며, 단일치는 2 mJ로 환산되었다.



[그림 V-6] 페노티아진 최소점화에너지 측정 결과



[그림 V-7] 하이드로퀴논 최소점화에너지 측정 결과

VI. 결 론

.....

VI. 결 론

라디칼 제어 및 산소 제거 기능이 있어 반응억제제로 많이 사용되는 페노티아진과 하이드로퀴논의 분진폭발 특성을 분석하고자 하였다. 사고 현장에서 샘플링한 시료를 분쇄하여 실시한 시험으로 입도분석 결과 페노티아진의 D_{50} 은 $1.664 \mu\text{m}$ 으로, 하이드로퀴논의 D_{50} 은 $1.749 \mu\text{m}$ 으로 측정되었다. ISO/IEC 80079-20-2¹⁾에서 분진의 가연성 여부를 판단하는 1차 기준인 입도가 $500 \mu\text{m}$ 인점을 고려했을 때, 두 시료는 사실 시험 전부터 분진폭발 위험성이 높을 것으로 추정되었다.

화학물질의 분진폭발 특성을 추정할 때, 니트로기(-NO₂), 아지드기(-N₃)와 같은 에너지성 작용기가 있는지, 히드록시기(-OH), 카르보닐기(-C=O)와 같은 산소 함유 작용기를 가지고 있는지, 할로젠 작용기가 있는지를 확인하고 추정하는 것이 보편적인 접근 방법인데²⁾³⁾⁴⁾, 페노티아진의 경우 아민기(-NH₂)를 가지고 있고, 하이드로퀴논의 경우 히드록시기를 가지고 있어 분진폭발 위험성이 높을 것으로 추정할 수 있었다.

시험 결과 최대 분진폭발 압력(환산 기준)이 페노티아진은 7.6 bar(농도

- 1) International Organization for Standardization, & International Electrotechnical Commission. (2016). Explosive atmospheres — Part 20-2: Material characteristics — Combustible dusts test methods (ISO/IEC 80079-20-2:2016)
- 2) Yuan, Z., Zhang, Y., Liu, K., Li, Y., & Zhang, X. (2020). QSPR studies on the maximum explosion pressure (P_{max}) and deflagration index (K_{st}) of organic dusts. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 64, 104082.
- 3) Medina, C., Dávila, Y., & Castellanos, F. (2019). Characterization of the explosion severity (P_{max} , K_{st}) of pulverized sugar. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 57, 1-7.
- 4) Lunn, G. A., & Thomson, P. F. (1987). The explosion hazards of polyvinyl chloride dusts. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1(1), 19-27.

500 g/m³), 하이드로퀴논은 7.8 bar(농도 500 g/m³) 인 것으로 산정되었으며, 폭연지수는 페노티아진이 252 bar·m/s(농도 1,000 g/m³), 하이드로퀴논은 288 bar·m/s(농도 500 g/m³)로 산정되어 2종 시료 모두 “St 2 (분진 폭발에 의한 위험성이 큰 분진)” 분진폭발 등급으로 판정되었다. 최소점화에너지에 있어서도 페노티아진과 하이드로퀴논 모두 1 mJ ~ 3 mJ로 판정되어 분진폭발 민감도 또한 높은 것으로 확인되었다.

Eckhoff의 저서에서 제공하고 있는 최대분진폭발압력 데이터와 비교하면 페노티아진과 하이드로퀴논의 최대 분진폭발 압력은 마그네슘, 아연과 같은 금속분진 수준이며⁵⁾, 최소점화에너지 또한 NFPA 77에서 의미하는 브러시 방전만으로도 폭발할 가능성이 있는 분진으로 확인되었다⁶⁾.

앞서 설명한 바와 같이 이런 가연성 분진을 투입하는 작업은 그 특성상 가연물, 공기, 컨파인먼트(Confinement), 분진운이라는 분진폭발을 위한 4가지 조건이 기본적으로 갖춰진 상태이다. 다시 말해서 분진폭발 5요소 중에 실제로 위험성을 제어할 수 있는 요소가 점화원뿐이라는 의미이다. 문제는 방폭 기준을 적용하고 기본적인 안전조치를 실시한 상태라도 정전기라는 점화원을 기술적으로 완전하게 제어할 수는 없다는 현실이다.

따라서 이런 작업에 있어서 분진으로 인한 화재·폭발 사고를 예방하기 위해서 학계에서는 제전 방법에 대해 깊이 있는 연구가 필요한 실정이며, 산업 현장에서는 정전기 제어를 위해 가능한 모든 방법을 동원해야 한다. 접지는 기본이고, 작업복, 작업복의 단추, 벨트 버클, 작업장의 작은 쇠조각 하나까지 관리하려는 노력이 필요하다고 판단된다. 또한 작업장 내의 습도를 향상하는 방법 또한 이런 유형의 작업에 있어서는 좋은 방법이 될 수 있을 것으로 판단된다.

5) Eckhoff, R. K. (2003). Dust explosions in the process industries (3rd ed.). Elsevier Science.

6) National Fire Protection Association. (2023). NFPA 77: Recommended practice on static electricity (2024 ed.).

참고문헌

국가기술표준원. (2021). KS C IEC 60079-10-2: 폭발성 분위기 — 제10-2부: 폭발위험장소의 구분 - 가연성 분진 분위기.

국가기술표준원. (2021). KS C IEC 60079-17: 폭발성 분위기 — 제17부: 전기설비 검사 및 유지보수.

국가기술표준원. (2022). KS C IEC 60079-14: 폭발성 분위기 — 제14부: 전기설비 설계, 선정 및 설치.

최상원. (2016). 자기 유도 대전 방식의 자가 발전형 제전 장치 (대한민국 특허 제 10-1594916호). 대한민국 특허청.

Booser, L. R. (1981). *Lubricant additives: Chemistry and application* 2nd edition, Elsevier, 421-423.

Center for Chemical Process Safety (CCPS). (2010). *Guidelines for chemical process quantitative risk analysis*. John Wiley & Sons.

Chen, Z., Liu, Y., & Ma, G. (2016). A tunable acoustic metamaterial with double-negativity driven by electromagnets. *Scientific Reports*, 6, 30254.

Cruise, R. D., Starr, S. O., Hadler, K., & Cilliers, J. J. (2023). Triboelectric charge saturation on single and multiple insulating particles in air and vacuum. *Scientific Reports*, 13(1), 15178.

Eckhoff, R. K. (2003). *Dust explosions in the process industries* (3rd ed.). Elsevier Science.

Janes, A., Chaineaux, J., Carson, D., & Le Lore, P. A., "MIKE 3 versus HARTMANN apparatus: Comparison of measured minimum ignition energy (MIE)". *Journal of hazardous materials*, 152(1), 32-39, 2008.

Jianwei Yu (2002). Composition and method for reducing adverse interactions between phenothiazine derivatives and plasma using cyclodextrins, US7008934B2.

Hölter, N., Rendel, N. H., Spierling, L., Kwiatkowski, A., Kleinmans, R., Daniliuc, C. G., ... & Glorius, F. (2025). Phenothiazine Sulfoxides as Active Photocatalysts for the Synthesis of γ -Lactones. *Journal of the American Chemical Society*, 147(15), 12908-12916.

International Electrotechnical Commission. (2010). Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems (IEC 61508 Series). IEC.

International Electrotechnical Commission. (2017). IEC 60079-0: Explosive atmospheres - Part 0: Equipment - General requirements (IEC 60079-0). International Electrotechnical Commission.

Maafa, I. M. (2023). Inhibition of free radical polymerization: a review. *Polymers*, 15(3), 488.

National Fire Protection Association. (2023). NFPA 68: Standard on explosion protection by deflagration venting.

National Fire Protection Association. (2023). NFPA 77: Recommended practice on static electricity (2024 ed.).

National Institute of Standards and Technology. (2007). Toluene thermophysical properties. NIST Chemistry WebBook. <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C108883&Mask=7>

Ngo, M. (2009). Determination of the minimum ignition energy (MIE) of premixed propane/air (Master's thesis, The University of Bergen).

Osada, Y., Shoyama, M., Suzuki, T., & Choi, K. (2024). Experimental study on charge transfer measurement of electrostatic discharges generated on surface of insulative flexible intermediate bulk container using novel Coulomb meter. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 89, 105314.

Ramezani, A., Faghih Khorasani, A., & Ayoobi, A. (2023). An investigation of pool boiling under alternating magnetic field and steady-state conditions. *AUT Journal of Mechanical Engineering*, 7(1), 135-146.

Robert V. Hoffman (2004). *Organic chemistry* 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc., 274-275.

Shoyama, M., Osada, Y., & Choi, K. (2025). Electrostatic elimination effect of multiple metal rods on loading powder. *Powder Technology*, 452, 120543.

Shin, E. C., Ko, J. H., Lyeo, H. K., & Kim, Y. H. (2022). Derivation of a governing rule in triboelectric charging and series from thermoelectricity. *Physical Review Research*, 4(2), 023131.

Solomons, T. W. Graham (1989). *Organic chemistry* 4th edition,

John Wiley & Sons, Inc., 380.

Tanaka, K., Takamura, H., & Kadota, I. (2025). Recent progress on phenothiazine organophotoredox catalysis. *Tetrahedron Letters*, 155745.

Tripathy, A., Saravanakumar, B., Mohanty, S., Nayak, S. K., & Ramadoss, A. (2021). Comprehensive review on flexoelectric energy harvesting technology: Mechanisms, device configurations, and potential applications. *ACS Applied Electronic Materials*, 3(7), 2898-2924.

Wang, Y., & Chung, D. D. L. (2017). Effect of the fringing electric field on the apparent electric permittivity of cement-based materials. *Composites Part B: Engineering*, 126, 192-201.

Wen, X., Chen, H., & Liu, Z. (2021). Realizing spatiotemporal effective media for acoustic metamaterials. *Physical Review B*, 104(6), L060304.

Xu, X., Yu, C., & Ma, L. (2025). Variations of saturation vapor pressure and evaporation rate of liquids with their vaporization enthalpy. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2501.10683>

연구진

평가기관 : 산업안전보건연구원 산업안전연구실

평가책임자 : 정기혁 (연구위원, 위험성시험부)

연구원 : 서동현 (부장, 위험성시험부)

연구원 : 최이락 (연구위원, 위험성시험부)

연구원 : 고윤현 (차장, 위험성시험부)

연구원 : 김천동 (차장, 위험성시험부)

연구기간

2025. 08. 27. ~ 2025. 11. 18.

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

산업안전보건연구원장

**반응억제제의
화재·폭발 위험성 평가**
(2025-산업안전보건연구원-3344)

발 행 일 : 2025년 12월

발 행 인 : 산업안전보건연구원 원장 박승현

연구책임자 : 산업안전연구실 위험성시험부 정기혁 연구위원

발 행 처 : 안전보건공단 산업안전보건연구원

주 소 : (34122) 대전광역시 유성구 엑스포로339번길 30

전 화 : 042-869-0333

팩 스 : 042-863-9003

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

공공안심글꼴 : 무료글꼴, 한국출판인회의, Kopub바탕체/돋움체