

연구보고서

석탄화력발전소의 공정별 유해인자 노출 위험도 평가 및 작업환경관리방안 마련 연구

권지운·장광명·김성호·김세동·장미연·노지원·정은교·박승현

산업재해예방
안전보건공단
산업안전보건연구원



요 약 문

연구기간

2020년 1월 ~ 2020년 11월

핵심 단어

석탄화력발전소, 석탄분진, 결정체 산화규소

연구과제명

석탄화력발전소의 공정별 유해인자 노출 위험도 평가 및
경관리방안 마련 연구

1. 연구배경

- 석탄화력발전소의 노동자는 설비의 운영과 정비작업 시 석탄분진 및 석탄재분진과 석탄에 함유된 결정체 산화규소와 금속 등에 노출될 수 있으나, 현재까지 우리나라 석탄화력발전소 노동자의 유해인자 노출 수준에 대한 지식은 제한적이다.
- 본 연구는 우리나라 석탄화력발전소에서 설비의 운전, 운영, 경상 정비작업 시 노동자의 석탄분진 및 석탄재와 관련된 유해인자 노출 위험성과 작업환경 관리 실태를 평가하고, 노동자를 유해인자 노출로부터 보호하기 위한 개선방안을 제시하였다.

2. 주요 연구내용

□ 유해인자 노출 위해성

- 호흡성분진과 결정체 산화규소는 석탄설비의 운영공 중 낙탄청소 작업자에게서 노출기준을 초과하는 값이 측정되었다. 호흡성분진이 노출기준을 초과한 측정값 4개 중 상위 3개는 분탄이 많은 낙탄을 건조한 상태에서 삼질하여 청소한 작업자에게서, 나머지 하나는 낙탄을 물청소한 작업자에게서 측정되었다. 결정체 산화규소의 농도가 노출기준을 초과한 측정값 4개는 모두 건조한 상태에서 분탄이 많은 낙탄을 삼질하여 청소한 작업자에게서 측정되었다. 유사노출군별 노출기준 초과 가능성을 통계적으로 예측한 결과 호

흡성분진은 석탄설비 운영공의 95% 상한값이 노출기준을 초과하였고, 석탄설비 전기공의 95% 상한값은 노출기준의 1/2를 초과하였다. 결정체 산화구소는 석탄설비 운영공의 95% 상한값이 노출기준을 초과하였다.

- 석탄에 함유된 주요 유해 금속 11종(비소, 카드뮴, 코발트, 크롬, 수은, 망간 니켈, 납, 탈륨, 우라늄, 바나듐)에 대한 작업자의 개인 노출농도는 노출기준의 1% 미만이었다. 석탄의 금속함유율이 본 연구결과에 비해 크게 높지 않은 경우 금속의 유의미한 작업 중 노출은 발생하지 않을 것으로 판단된다.
- 옥내저탄장과 배탄기실의 작업환경에서 벤젠, 톨루엔, 자일렌, 노말헥산은 검출되지 않았다. 휘발성 유기화합물의 유의미한 작업 중 노출은 발생하지 않을 것으로 판단된다.
- 일산화탄소와 이산화황은 옥내저탄장과 탈황공정의 누설 가능 부위에서 측정한 결과 검출되지 않았다. 석탄의 자연발화나 설비의 누설이 없는 경우 유의미한 작업 중 노출은 발생하지 않을 것으로 판단된다.
- 소음은 노출기준을 초과한 측정값은 없었으나, 보일러 오퍼레이터와 회처리장 운전원에게서 특수건강진단 실시 기준을 초과하는 값이 측정되었다. 보일러/터빈설비의 기계공, 전기공, 발전기술원, 운영감독원과 탈황설비 운영공, 회처리설비 운영공은 95% 신뢰수준의 95% 상한값이 노출기준을 초과하여 작업상황에 따라 노출기준을 초과할 가능성이 있을 것으로 예측되었다. 보일러/터빈설비의 전기공, 발전기술원과 탈황설비 운영공, 회처리설비 운영공의 95% 상한값은 특수건강진단 실시 기준을 초과하였다.
- 고열은 석탄설비 중 한 사업장의 배탄기실의 측정값이 계속작업 기준을 초과하였다. 이송탑의 고열 스트레스 지수는 외부온도와 습도의 영향을 많이 받을 수 있으므로 폭염 시에 측정할 경우 본 연구결과와 달리 계속작업 기준을 초과할 가능성이 있을 것으로

판단된다. 보일러/터빈설비는 한 사업장의 보일러 미분기 앞을 제외한 모든 측정값이 계속작업 기준을 초과하였고, 더운 공기가 높은 고열 스트레스 지수의 주요 원인이었다.

□ 작업환경 관리실태 및 개선방안

- 석탄화력발전소의 작업환경 관리실태에 대하여 실태조사 시 관찰된 사항, 발전소 관계자 및 작업자 문답 내용, 석탄과 석탄재 별크시료 분석결과, 작업자의 유해인자 노출 위해성 평가 결과를 바탕으로 청소, 환기, 분무/살수장치, 격리, 개인보호구, 물질안전보건자료, 작업환경측정, 기타사항으로 구분하여 개선방안을 제시하였다. 작업환경관리를 위해 발전소 상호간에 벤치마킹할 수 있는 사례를 확인하여 제시하였다.
- 석탄분진 및 석탄재분진과 석탄에 함유된 결정체 산화규소 및 금속에 대한 노출을 최소화하기 위해 설비의 개선과 주기적인 점검 및 관리를 통해 낙탄 발생 및 분진 비산을 최소화하고, 운탄 또는 회반출 후 작업장에 축적된 낙탄과 분진을 물청소나 진공청소와 같은 분진의 비산을 최소화할 수 있는 방식으로 지체 없이 청소하며, 수집된 분진이 다시 작업환경 중에 비산되지 않도록 하는 것이 중요하다. 또한 환기설비와 분무/살수설비의 설치 및 개선 등 공학적 관리방안을 시행하고, 노출 수준에 적합한 성능의 호흡보호구를 올바르게 착용하도록 하며, 물질안전보건자료의 정확한 작성을 통해 석탄분진과 석탄재분진의 유해·위험성을 작업자에게 인지시키고, 작업자의 유해인자 노출수준을 주기적으로 모니터링하여 개선조치에 반영할 필요가 있다.
- 소음에 대한 노출을 최소화하기 위해 보일러와 터빈 건물 내 고소음 발생구역에서 작업자가 귀마개 등 방음보호구를 올바르게 착용하도록 지속적으로 관리할 필요가 있다. 고열 노출로 인한 건강영향을 최소화하기 위해 보일러와 터빈 건물 내부 고열지역과 폭

염기의 이송탑 및 컨베이어 작업자가 시원하게 쉴 수 있는 냉방장치
치가 있는 적절한 휴게공간을 주된 작업 장소에서 가까운 위치에
설치하고 음용수를 제공할 필요가 있다.

□ 시사점

- 우리나라 석탄화력발전소의 발전설비 운영 및 경상정비작업 시 일부 노동자가 노출기준 이상의 석탄분진, 결정체 산화규소, 소음, 고열에 노출될 수 있으며, 향후 적절한 관리방안의 개선이 필요하다.

3. 연구 활용방안

□ 제 언

- 석탄화력발전소는 유해인자의 노출 변이가 크므로, 노동자의 유해인자 노출을 최소화하기 위하여 석탄화력발전소 관계자는 본 연구에 제시된 작업환경개선방안과 벤치마킹 사례를 참고하여 각 발전소의 상황에 맞게 자율적으로 능동적인 작업환경개선활동을 추진할 필요가 있다.

□ 활 용

- 본 연구보고서를 우리나라 석탄화력발전소 및 관련 사업장에 배포하여 노동자의 유해인자 노출 저감에 활용
- 관련 국내외 학술지 및 학술대회에 발표

4. 연락처

- 연구책임자 : 산업안전보건연구원 연구위원 권지운
 - Tel: 052-703-0884
 - E-mail: jwk@kosha.or.kr

차례

I. 서론	1
1. 연구배경	1
2. 연구목표	4
3. 선행연구 검토	4
II. 연구방법	10
1. 노출 시나리오	10
1) 석탄화력발전소 현황	10
2) 석탄화력발전소 공정	11
2. 평가방법	15
1) 평가대상	15
2) 평가전략	17
3) 시료채취 및 분석방법	22
4) 평가기준 및 방법	24
III. 연구결과	26
1. 석탄과 석탄재의 유해물질	26
1) 결정체 산화규소	26

2) 금속	26
3) 휘발성 유기화합물	34
2. 유해인자 노출수준	35
1) 석탄설비	35
2) 보일러 및 터빈설비	41
3) 탈황설비	44
4) 회처리설비	46
5) 분석실험실	48
3. 작업환경관리	50
1) 청소	50
2) 환기	51
3) 분무/살수장치	52
4) 격리	52
5) 개인보호구	53
6) 작업환경측정	54
7) 물질안전보건자료	55
8) 기타	56
IV. 고찰	57
1. 석탄과 석탄재의 유해물질	57
2. 유해인자 노출 위해성	60
1) 석탄분진 및 결정체 산화규소	60
2) 금속	68
3) 휘발성 유기화합물	70

4) 일산화탄소, 이산화황	70
5) 소음	71
6) 고열	73
3. 작업환경관리	75
1) 청소	75
2) 환기	78
3) 분무/살수장치	79
4) 격리	79
5) 개인보호구	81
6) 작업환경측정	85
7) 물질안전보건자료	89
8) 기타	91
9) 작업환경관리 참고 사례	92
V. 결론	94
1. 유해인자 노출 위해성	94
2. 작업환경 관리실태 및 개선방안	95
3. 연구의 제한점	97
참고문헌	111
Abstract	118

부록	121
부록 1. 국내 석탄화력발전소 현황	121
부록 2. 유해인자별 평가기준	127
부록 3. 작업환경 관련 사진	132
부록 4. 작업환경관리 참고 사례 관련 사진	140

표 차례

〈표 I-1〉 석탄화력발전소 특조위 보고서 중 유해화학물질 관리방안 개선 권고사항	3
〈표 I-2〉 석탄화력발전소의 작업환경 유해물질 노출 관련 국내외 선행 연구	6
〈표 II-1〉 노출평가 대상 사업장 특성	15
〈표 II-2〉 유사노출군 분류	16
〈표 II-3〉 벌크시료의 분석방법	18
〈표 II-4〉 발전소별 작업환경시료 채취 수	21
〈표 II-5〉 작업환경시료의 채취 및 분석방법	22
〈표 III-1〉 석탄과 석탄재의 결정체 산화규소 함유율 분석 결과	29
〈표 III-2〉 석탄의 주요 원소 함유율 분석결과	30
〈표 III-3〉 석탄재의 주요 원소 함유율 분석결과	31
〈표 III-4〉 석탄의 미량 원소 함유율 분석결과	32
〈표 III-5〉 석탄재의 미량 원소 함유율 분석결과	33
〈표 III-6〉 사업장에서 수집된 석탄 및 석탄재의 미량 원소 함유율 분석 결과	34
〈표 III-7〉 석탄설비 작업자의 호흡성분진 노출 농도	38
〈표 III-8〉 석탄설비 작업자의 결정체 산화규소 노출 농도	38
〈표 III-9〉 석탄설비 작업자의 금속 노출 농도	39
〈표 III-10〉 석탄설비 작업자의 소음 노출 수준	40
〈표 III-11〉 석탄설비의 고열 스트레스 지수 측정 결과	41

<표 III-12> 보일러 및 터빈설비 작업자의 호흡성분진 노출 농도	42
<표 III-13> 보일러 및 터빈설비 작업자의 소음 노출 수준	43
<표 III-14> 보일러 및 터빈설비의 고열 스트레스 지수 측정 결과	43
<표 III-15> 탈황설비 작업자의 호흡성분진 노출 농도	45
<표 III-16> 탈황설비 작업자의 소음 노출 수준	45
<표 III-17> 회처리설비 작업자의 호흡성분진 노출 농도	47
<표 III-18> 회처리설비 작업자의 금속 노출 농도	47
<표 III-19> 회처리설비 작업자의 소음 노출 수준	48
<표 III-20> 분석실험실 작업자의 호흡성분진 노출 농도	49
<표 III-21> 석탄과 석탄재의 물질안전보건자료 중 발암성과 결정체 산 화규소 함유 기재 현황	55
<표 IV-1> 석탄에 함유된 주요 광물	57
<표 IV-2> 석탄설비 작업자의 호흡성분진 및 결정체 산화규소 노출농도 상위 10위 내 작업 내용	65
<표 IV-3> 유사노출군별 호흡성분진 노출 농도의 대수정규분포 통계 결 과	66
<표 IV-4> 유사노출군별 결정체 산화규소 노출 농도의 대수정규분포 통 계 결과	67
<표 IV-5> 유사노출군별 소음측정값의 대수정규분포 통계 결과	73
<표 V-1> 작업환경관리 개선 권고사항	98

그림 차례

[그림 I -1] 연도별 석탄 발전연료 사용량	1
[그림 I -2] 석탄과 석탄 연소물의 생애주기	12
[그림 III-1] 석탄의 엑스선회절분석 패턴	27
[그림 III-2] 비산재의 엑스선회절분석 패턴	28
[그림 IV-1] 유사노출군별 호흡성분진 노출 농도	63
[그림 IV-2] 유사노출군별 결정체 산화규소 노출 농도	64
[그림 IV-3] 지역시료의 호흡성분진과 금속의 공기 중 농도 비교	69
[그림 IV-4] 유사노출군별 소음 노출 수준	72
[그림 IV-5] 85 dBA 초과 측정값의 시간별 음압수준	74
[그림 IV-6] 호퍼에 연결된 공압식 분진 이송장치	76
[그림 IV-7] 호퍼에 연결된 펠렛 제조장치(pin mixer)	77
[그림 IV-8] 펠렛 제조장치로 펠렛화된 분탄	77
[그림 IV-9] 삼중 구조의 스킵트보드 실링	80
[그림 IV-10] 중기 케빈 상부에 설치된 HEPA필터 공기 공급 장치	80
[그림 IV-11] 호흡성분진과 결정체 산화규소의 공기 중 농도의 회귀분석 결과	88

I. 서론

1. 연구배경

우리나라의 전력 생산은 주로 원자력, 화력, 양수, 신재생 에너지에 의존한다. 화력발전소란 연료의 연소 시 발생하는 열에너지를 이용해 발전기의 터빈을 구동시켜 전기를 생산하는 발전소를 말한다. 화력발전소의 주요 연료는 석탄, 중유, LNG이며, 그 중에서 석탄을 연료로 사용하는 발전소를 석탄화력발전소라고 한다. 2019년을 기준으로 우리나라의 석탄화력 발전량은 216,945 GWh(무연탄 2,466 GWh, 유연탄 214,479 GWh)로, 석탄은 우리나라 전체 발전량 563,040



[그림 | -1] 연도별 석탄 발전연료 사용량: 한국전력공사(2020)의 자료를 그림으로 재구성

GWh 중 가장 큰 비중(38.5%)을 차지한 발전 에너지원이었다(한국전력공사, 2020). 2020년도 한국전력공사의 통계자료에 따르면 2019년 한 해 동안 화력발전소에 사용된 석탄은 84,486,191 t(무연탄 1,164,840 t, 유연탄 83,321,351 t) 이었다(그림 I-1).

석탄화력발전소의 작업은 발전설비를 가동하여 전력을 생산하는 기간의 작업과 발전을 중단한 기간에 실시되는 작업으로 분류할 수 있다. 발전설비를 운전하여 전력을 생산하는 기간에는 설비의 운전 및 운영과 일상점검 전기, 기계, 제어계측장치 등에 대한 경상정비작업이 실시된다. 설비의 발전을 중단하는 시기에는 터빈과 보일러 내부 등을 해체하여 주요 부위를 점검하고 정비하는 계획예방정비(‘대정비’라고도 한다)작업이 주로 전력의 비수기인 봄과 가을에 실시된다. 본 연구에서는 전력 생산 시 수행되는 발전설비의 운전 및 운영과 경상예방정비 시의 작업을 합쳐서 ‘일상운영정비작업’으로 칭하였다.

석탄화력발전소 발전설비의 운전과 정비작업 시 노동자는 석탄분진과 석탄재에 노출될 수 있다. 석탄분진의 흡입은 진행성 거대섬유화증과 만성폐쇄성폐질환 등 폐질환을 일으킬 수 있다(ACGIH, 2001). 석탄재는 현재까지 그 자체의 직업적 노출에 대한 건강 유해성 명확하지 않으며(Borm, 1997), 관련 노출기준이 제안된 바 없다. 그러나 석탄분진과 석탄재분진에 함유된 결정체 산화규소의 한 종류인 석영은 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)가 인체발암물질인 그룹 1로, 미국 산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)는 인체발암성 의심물질인 그룹 A2로, 우리나라 고용노동부는 사람에게 충분한 발암성 증거가 있는 물질인 1A로 분류한 인체발암물질이다(IARC, 2012; ACGIH, 2020; 고용노동부, 2020). 또한 석탄에는 탄소성분 외에도 비소와 같은 유해한 금속과 벤젠 등 유기용제가 함유되어 있다. 해외에서 보고된 소수의 학술논문과 평가사례 보고서에 따르면 석탄화력발전소 작업환경에서 노동자는 석탄분진, 결정체 산화규소, 비소와 납 및 크롬 등 미량함유 금속, 벤젠 등 휘발성 유기화합

<표 1-1> 석탄화력발전소 특조위 보고서 중 유해화학물질 관리방안 개선 권고사항

세부 권고방안	이행주체	비고
탄 및 회분진이 주로 문제되는 작업에 대해 유리규산과 비소, 납 등의 중금속 노출 평가 실시	발전회사 협력사	즉시 개선
정비작업 대상 특화된 작업환경 관리방안 수립(이동형 환기장치 설치, 작업환경 수치 평가, 작업자 이력관리 등)	발전회사 협력사	6개월 이내
옥내 지단장의 특화된 작업환경 관리방안 수립(CO 가스 개인모니터링 기준 마련, 벤젠 측정, 출입 통제기준 강화 등)	발전회사 협력사	6개월 이내
화학물질 구매시스템에 위험성 평가과정 도입과 보건관리자 참여	발전회사 협력사	즉시 개선
입탄성적서에 명시된 유해물질 함량 정보 공유(보건관리자 및 해당 작업자)	발전회사 협력사	즉시 개선
발전소 및 협력사 간 통합적인 작업환경 관리(측정, 개선, 보호구 관리 등)체계 구축	발전회사 협력사	1년 이내
결정형 유리규산 고노출자 건강관리수첩 교부대상자 포함	고용노동부	1년 이내

* 자료출처 : 고 김용균 사망사고 진상규명과 재발방지를 위한 석탄화력발전소 특별노동안전조사위원회, 2019.

물, 일산화탄소 등 가스상 물질, 소음과 고열에 노출될 가능성이 있다(NIOSH, 1978; NIOSH 1984; Yager 등, 1997; Bird 등, 2004; Hicks와 Yager, 2006; Engelbrecht 등, 2012). 우리나라에서 고 김용균 사망사고 진상조사결과 종합보고서(이하 ‘석탄화력발전소 특조위 보고서’라 한다)에 따르면 우리나라 석탄화력발전소 환경 중에 결정체 산화규소와 비소 등 인체 발암물질이 존재하나 적절한 관리가 이루어지지 않았으며, 관련 노동자의 작업환경 관리를 위한 평가와 개선조치가 필요하다고 권고되었다(고 김용균 사망사고 진상규명과 재발방지를 위한 석탄화력발전소 특별노동안전조사위원회, 2019). 석탄화력발전소 특조위 보고서는 특별조사 기간 동안 실시된 소수의 측정 자료와 해외의 관련 문헌에 근거한 것으로, 국내 석탄화력발전소에서 작업하는 노동자의 작업환경 중

유해인자 노출 수준을 파악하기 위해서는 더 많은 평가 자료가 필요하지만 현재까지 우리나라 석탄화력발전소 노동자의 유해인자 노출에 대한 자세한 평가 결과는 알려진 바 없다. 이에 우리나라 석탄화력발전소의 작업환경 중 유해인자 노출로 인한 노동자의 위험성을 구체적으로 밝히고 작업환경관리실태를 평가하여, 노동자를 유해인자 노출로부터 안전한 수준으로 보호하기 위한 개선방안 마련이 필요한 시점이다.

2. 연구목표

이 연구는 우리나라 석탄화력발전소 노동자가 작업 중에 석탄분진과 석탄재와 관련된 유해인자에 노출되는 위험성과 작업환경의 관리실태를 평가하여 유해인자 노출로부터 노동자를 보호하기 위한 개선방안을 제시하는 것을 목표로 하였다. 세부적인 연구목표는 다음과 같다.

첫째, 석탄화력발전소 노동자의 공정별 작업환경 중 유해인자 노출수준과 위험성을 평가하였다. 각 공정별 노출 가능한 유해인자를 파악하고 노출수준과 노출기준 초과 위험성을 평가하였다.

둘째, 노동자의 유해인자 노출 저감을 위해 각 공정에 적용된 작업환경관리 실태를 조사하였다.

셋째, 석탄분진과 관련 유해인자 노출을 최소화함으로써 위험성을 낮추기 위한 작업환경관리방안을 도출하였다. 공학적 수단과 개인보호구를 중심으로 개선방안을 제시하였으며, 석탄분진과 석탄재분진 노출공정의 적절한 작업환경측정 전략과 물질안전보건자료 작성방안을 검토하여 제시하였다.

3. 선행연구 검토

석탄화력발전소 노동자의 작업환경 중 유해인자 노출과 관련하여 소수의 학

술논문과 평가사례가 보고되었다(표 I-2). 석탄화력발전소의 작업환경 중 주요 위험요인은 높은 농도수준의 석탄분진 및 석탄재분진과 그 중에 함유된 결정체 산화규소(석영)에 대한 노출이었다. 석탄과 석탄재에는 미량의 비소, 납, 크롬, 니켈 등 유해한 금속이 함유되어있고, 유연탄에는 벤젠과 톨루엔 등 휘발성 유기화합물이 함유되어 있으므로 관련 작업 시 노동자가 노출될 가능성이 있었다. 석탄을 저장하는 저탄장에서는 석탄의 자연발화 시 일산화탄소에 노출될 가능성이 있었으며, 탈황작업 시에는 황산화물 제거를 위해 사용되는 석회석의 분진, 황산 및 이산화황에 노출될 가능성이 있었다. 정비작업 시에는 취급하는 설비의 보온재나 개스킷 등에 석면이나 유리섬유가 함유된 경우에 노동자가 노출될 가능성이 있었다. 물리적인자 중에서는 보일러와 터빈 가동 시 발생하는 소음과 고열에 노동자가 노출될 가능성이 있었다. 유해인자의 노출수준은 계획예방정비작업이 일상운영정비작업에 비해 호흡성분진과 결정체 산화규소에 대한 노출 농도가 높았고, 노출 수준은 노동자의 직종에 따라 차이를 보였다. 같은 직종에서도 연료로 사용되는 석탄의 종류에 따라 유해인자의 함유율의 차이로 인해 작업 중 노출 농도에 차이를 보였다. 관련된 주요 선행연구의 내용은 다음과 같다.

우리나라 정부의 고 김용균 사망사고 진상규명과 재발방지를 위한 석탄화력발전소 특별노동안전조사위원회(2019)는 당진/태안발전본부의 일부 작업에 대해 예비조사 수준의 작업환경측정을 실시한 결과를 보고하였다. 석탄재 처리작업 시 결정체 산화규소의 농도는 0.408 mg/m^3 로 현행 노출기준의 약 8 배 수준이었다. 옥내저탄장 지역시료에서 결정체 산화규소, 비소, 납, 크롬, 니켈, 벤젠, 톨루엔, 일산화탄소가 검출되었으며, 계획예방정비작업 시 고농도의 유해물질 노출 가능성을 제기하였다.

Hicks와 Yager(2006)는 미국 내 6개 석탄화력발전소를 대상으로 비산재 취급 작업자의 일상운영정비작업과 계획예방정비작업 시 결정체 산화규소와 호흡성분진 노출수준을 평가한 결과를 보고하였다. 유연탄(역청탄, 아역청탄)을 연

<표 | -2> 석탄화력발전소의 작업환경 유해물질 노출 관련 국내외 선행 연구

연구자(연도)	대상	주요내용
US NIOSH(1978)	일상운영정비작업	<ul style="list-style-type: none"> · 콜로라도주 석탄화력발전소 노동자의 석탄과 비산재 노출수준을 평가 · 작업자가 노출되는 개인시료의 결정체 산화규소 농도는 노출기준(0.05 mg/m³)을 초과할 위험이 있었음
US NIOSH(1984)	계획예방정비작업	<ul style="list-style-type: none"> · 미주리주 석탄화력발전소 노동자의 정규작업 시 유해인자 노출을 평가 · 모든 석탄분진, 비산재, 결정체 산화규소, NO₂, NO, 황산은 노출기준 미만이었음 · SO₂는 8개중 4개 시료가 노출기준을 초과하였으며 이는 스크리버 누출 부위에서 채취된 것이었음 · 소음은 17개 측정값 중 7개가 85 dBA를 초과
Yager <i>et al.</i> (1997)	계획예방정비작업	<ul style="list-style-type: none"> · 저질갈탄(비소 800 ppm 함유)을 사용하는 석탄화력발전소의 보일러와 전기집진장치 내부 석탄재 청소작업(진공청소 후 습식작업) 시 작업자의 비소노출을 평가 · 개인시료의 비소노출 8시간 시간가중평균농도는 평균 48.3 µg/m³(0.17-375.2 µg/m³)이었음
Bird <i>et al.</i> (2004)	일상운영정비작업	<ul style="list-style-type: none"> · 미국 남서부 5개 석탄화력발전소 노동자를 대상으로 여름 3개월간 일상상운영작업 시 유해인자 노출수준을 평가 · 발전소에서 연료로 사용한 석탄의 석영 함유율은 ≤0.6-4.4%이었음 · 호흡성분진은 203개 공기시료 중 4개가 검출한계 이상(0.15, 0.19, 0.84, 5.3 mg/m³), 비소는 128개 시료 측정 결과 모두 검출한계(0.37-0.72 µm/m³) 미만, 석면은 61개 지역시료 측정 결과 12 개가 검출한계(0.003 개/cm³) 미만이었으며 농도 범위는 0.003-0.007 개/cm³이었음 · 소음은 측정값의 18%가 85 dBA 이상이었고 4%가 90 dBA 이상이었으며, 공정별로 화석연료서비스 지역이 70-108 dBA, 보일러 하우스 내부는 74-104 dBA로 일부 지역에서 85 dBA를 초과 · 온열은 측정된 자료의 26%가 1시간 TWA 권고기준을 초과

* 작업환경 노출평가와 관련된 내용에 한하여 발췌

<표 | -2> 석탄화력발전소의 작업환경 유해물질 노출 관련 국내외 선행 연구-계속

연구자(연도)	대상	주요내용
Hicks & Yager(2006)	일상운영정비작업, 계획예방정비작업	<ul style="list-style-type: none"> 미국 내 6개 석탄화력발전소를 대상으로 비산재 취급 작업자의 일상작업과 정비작업 시 결정체 산화규소와 호흡성분진 노출수준을 평가 유연탄을 연료로 사용하는 발전소의 계획예방정비작업 시 다른 작업에 비해 높은 결정체 산화규소 농도(0.008-96 mg/m³, 평균 1.8 mg/m³)를 보였으며, 측정된 시료의 60%가 노출기준(0.05 mg/m³)을 초과 유연탄을 연료로 사용하는 발전소의 일상운영작업 시 결정체 산화규소 농도는 ND-0.18 mg/m³, 평균 0.048 mg/m³이었으며, 측정된 시료의 54%가 노출기준을 초과 벌크시료 분석 결과 갈탄에서 결정체 산화규소가 불검출 또는 매우 적게 검출되었으며 갈탄을 연료로 사용하는 발전소에서 측정된 시료의 20%가 노출기준을 초과 석탄 비산재 중 결정체 산화규소 함유율은 벌크시료가 공기 중에서 채취한 시료에 비해 낮았으며 최대 함유율은 10%이었음
Engelbrecht <i>et al.</i> (2012)	계획예방정비작업	<ul style="list-style-type: none"> 석탄화력발전소의 정비작업 시 백하우스 내 백필터 교체 작업자의 비산재 노출수준을 평가 비산재의 호흡성분진 노출수준은 개인시료 평균 101.2 mg/m³ (20.7-477.2 mg/m³)이었음 금속 노출수준은 낮은 노출기준에 근접하는 농도를 보였으며, 그 외 금속의 농도는 노출기준에 비해 매우 낮았고 비소는 검출되지 않았음
고 김용균 사망사고 진상규명과 재발방지를 위한 석탄화력발전소 특별노동안전조사위원회(2019)*	일상운영정비작업, 계획예방정비작업	<ul style="list-style-type: none"> 당진/태안발전본부의 일부 작업에 대해 예비조사 수준의 작업환경측정을 실시 석탄재 처리작업 시 결정체 산화규소의 농도는 0.408 mg/m³으로 현행 노출기준의 약 8배 수준 옥내저탄장 지역시료에서 결정체 산화규소, 비소, 납, 크롬, 니켈, 벤젠, 톨루엔, 일산화탄소가 검출 계획예방정비작업 시 고농도의 유해물질 노출 가능성을 제기

* 작업환경 노출평가와 관련된 내용에 한하여 발췌

료로 사용하는 발전소의 계획예방정비작업 시 다른 작업에 비해 높은 결정체 산화규소 농도(0.008-96 mg/m³, 평균 1.8 mg/m³)를 보였으며, 측정된 시료의 60%가 노출기준(0.05 mg/m³)을 초과하였다. 유연탄을 연료로 사용하는 발전소의 일상운영정비작업 시 결정체 산화규소 농도는 ND-0.18 mg/m³, 평균 0.048 mg/m³이었다. 벌크시료 분석 결과 갈탄에서는 결정체 산화규소가 불검출 또는 적게 검출되었으며 갈탄을 연료로 사용하는 발전소에서 측정된 시료의 20%가 노출기준을 초과하였다. 석탄 비산재 중 결정체 산화규소 함유율은 벌크시료가 공기 중에서 채취한 시료에 비해 낮았으며 최대 함유율은 10%였다.

Bird 등(2004)은 미국 남서부 5개 석탄화력발전소 노동자를 대상으로 여름 3개월간 일상운영정비작업 시 유해인자 노출수준을 평가한 결과를 보고하였다. 발전소에서 연료로 사용한 석탄의 결정체 산화규소 함유율은 ≤0.6-4.4%였다. 호흡성분진은 203개 공기시료 중 4개가 검출한계 이상(0.15, 0.19, 0.84, 5.3 mg/m³)이었다. 비소는 128개 시료 측정 결과 모두 검출한계(0.37-0.72 μm/m³) 미만이었다. 석면은 61개 지역시료 측정 결과 12개가 검출한계(0.003 개/cm³) 이상이었으며 농도 범위는 0.003-0.007 개/cm³이었다. 소음은 측정값의 18%가 85 dBA 이상이었고 4%가 90 dBA 이상이었으며, 공정별로 화석연료서비스 지역이 70-108 dBA, 보일러 하우스 내부는 74-104 dBA였다. 고열은 측정된 자료의 26%가 1시간 TWA 권고기준을 초과하였다.

Engelbrecht 등(2012)은 석탄화력발전소의 정비작업 시 백하우스 내 백필터 교체 작업자의 비산재 노출수준을 측정한 결과를 보고하였다. 비산재의 호흡성분진 노출수준은 개인시료 평균 101.2 mg/m³ (20.7-477.2 mg/m³)였다. 금속에 대한 노출수준은 납이 노출기준에 근접하는 농도를 보였으며, 그 외 금속의 농도는 노출기준에 비해 매우 낮았고, 비소는 검출되지 않았다.

Yager 등(1997)은 저질갈탄(비소 800 ppm 함유)을 사용하는 석탄화력발전소의 보일러와 전기집진장치 내부 석탄재 청소작업(진공청소 후 습식작업) 시 작업자의 비소에 대한 노출수준을 측정한 결과, 개인시료의 비소에 대한 8시간

시간가중평균농도는 평균 $48.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($0.17\text{--}375.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이었다.

미국 국립산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)은 석탄화력발전소에 대해 두 차례의 작업환경유해도평가를 실시하였다(NIOSH, 1978; NIOSH 1982). 콜로라도주 석탄화력발전소 노동자의 석탄분진과 비산재분진 노출수준을 평가한 결과, 개인시료의 결정체 산화규소 노출 농도는 노출기준($0.05 \text{mg}/\text{m}^3$)을 초과할 위험이 있었다. 미주리주 석탄화력발전소 노동자의 일상운영정비작업 시 유해인자 노출을 평가한 결과, 모든 석탄분진, 석탄재분진, 결정체 산화규소, 이산화질소, 일산화질소, 황산에 대한 측정값은 노출기준 미만으로 나타났다. 이산화황은 8개 중 4개 시료가 노출기준을 초과하였으며, 스크러버의 누출 부위에서 측정되었다. 소음은 17개 측정값 중 7개가 85 dBA를 초과하였다.

II. 연구방법

1. 노출 시나리오

1) 석탄화력발전소 현황

한국전력거래소 장기수급처의 2018년도 발전설비현황의 자료를 참고하여 국내 석탄화력발전소를 운영하는 발전사, 사업장, 발전기 수, 설비용량, 준공년도, 연료 종류에 대한 기초자료를 작성하였다(전력거래소, 2019). 이후 국내에서 석탄화력발전소를 운영하는 발전사에 요청하여 2020년 5월 기준 석탄화력발전소의 현황을 정해진 양식에 기입하여 엑셀파일로 제출받아 자료를 최신화하였다. 조사항목은 발전사, 사업장, 발전기 수, 설비용량, 준공년도, 석탄종류, 발전사 및 협력사 근로자 수¹⁾, 사용연료의 주요 수입국, 보일러의 연소방식, 집진방식, 바닥재와 비산재의 회처리(이송) 방식, 2020년 및 2021년 계획예방정비작업 일정, 2020년 작업환경측정 기관 및 측정기간, 발전사 및 사업장 담당자, 기타사항이었다.

2020년 5월을 기준으로 국내에서 석탄을 연료로 사용하는 발전기는 61기로, 한전의 발전자회사 5개소와 민간 발전사 1개소의 발전소 12개소에서 운영되는 것으로 조사되었다(부록 1 참조).²⁾ 사용 연료별로는 동해발전소가 운영하는 2기가 국내산을 일부 포함한 무연탄을 사용하였고, 나머지 59기는 해외에서 수입되는 유연탄을 사용하였다. 석탄의 주요 수입국은 호주, 인도네시아, 러시아, 미국, 콜롬비아, 캐나다, 남아프리카공화국이었다. 발전소 현장 관계자에 따르면

1) 협력사의 근로자 수는 경상정비 등을 위해 사업장에서 상시적으로 근무하는 협력사의 근로자 수를 조사하였다. 따라서 조사된 협력사 근로자 수는 계획예방정비작업이나 일시적인 정비작업 등을 위해 출입하는 근로자는 포함되지 않은 수이다.

2) 영동발전소는 2020년에 연료전환(무연탄→우드펠릿) 예정으로 파악되어 명단에서 제외하였다.

고열량탄은 주로 호주, 저열량탄은 주로 인도네시아에서 많이 수입한다고 하였다. 보일러의 연소방식은 미분탄연소방식 54기, 순환유동층연소방식 6기, 석탄가스화복합발전방식 1기였다. 집진방식은 모두 건식전기집진기(electrostatic precipitator, ESP)방식이었다. 바닥재의 처리방식은 습식연속기계방식 38기, 건식처리방식 16기, 회재순환처리방식 6기였으며, 비산재의 처리방식은 모두 압력이송방식이었다.³⁾ 전국의 석탄화력발전소에 종사하는 근로자 수는 총 13,518명이었으며, 발전사(원청) 소속 근로자는 5,645명, 협력사(하청)⁴⁾ 소속 근로자는 7,873명이었다. 이 중에서 상대적으로 석탄분진과 석탄재분진의 노출 위험성이 높은 석탄설비와 회처리설비의 운영, 정비, 중기운전과 관련된 작업자는 조사된 협력사 소속 직원의 약 50%로 가정하면 3,936명으로 추정되었다.

일부 발전소에 대한 예비조사 결과, 석탄화력발전소에서 석탄분진에 대한 노출은 석탄을 하역하여 보일러 사일로에 공급하기까지의 과정인 석탄설비에서 주로 발생되었으므로, 석탄설비의 운영 및 관리방법이 작업 중 석탄분진 노출의 중요한 변수로 파악되었다. 석탄이 보일러의 사일로에 투입된 이후 회처리 전까지의 과정은 밀폐된 공정이었으므로, 보일러의 연소방식은 작업자 석탄분진 및 석탄재 노출과 관련된 중요한 변수가 아닌 것으로 판단되었다. 집진방식과 석탄재의 처리방식은 작업자의 비산재 노출과 관련이 있으나 국내 석탄화력발전소는 모두 동일한 방식(건식전기집진기, 압력이송방식)을 사용하였으므로 유해물질 노출의 중요 변수가 아니었다.

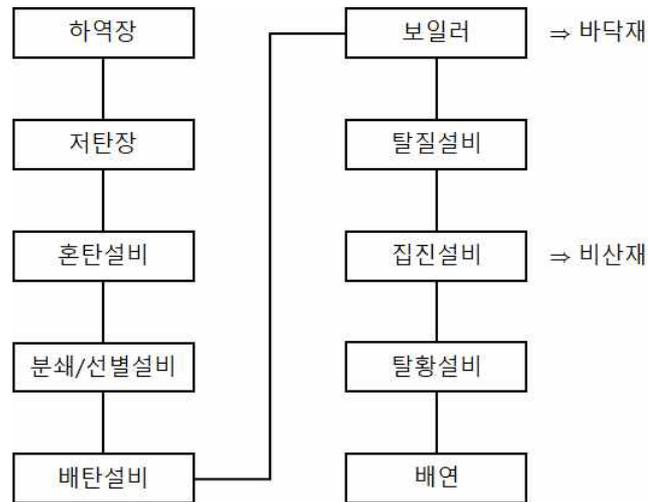
2) 석탄화력발전소 공정

국내에서 운영되는 석탄화력발전소의 보일러 61기를 사용 연료와 연소방식으로 구분 시 가장 대표적인 방식은 유연탄을 연료로 사용하는 미분탄연소방식의

3) 집진방식, 바닥재 및 비산재 처리방식은 석탄가스화복합발전기를 제외하고 조사된 수치이다.

4) 재하청을 포함한다.

보일러(54기)였다. 미분탄연소방식 보일러를 사용하는 석탄화력발전소에서 석탄의 생애주기와 관련된 공정은 그림 I-2와 같다.



[그림 I-2] 석탄과 석탄 연소물의 생애주기(미분탄연소방식 보일러 기준)

(1) 하역장

선박, 열차 또는 트럭으로 운반된 석탄이 발전소로 들어오는 공정이다. 석탄 발전량의 대부분을 차지하는 유연탄은 해외에서 벌크선을 통해 수입되어 부두로 입탄되며, 양화기(하역기)가 선박의 홀드 내부에 있는 석탄을 컨베이어 벨트 위로 옮긴다.

(2) 저탄장

하역된 석탄은 컨베이어를 타고 이동된 후 저탄장 내의 하탄기를 통해 하탄되어 연료로 사용되기 전까지 5-30일 동안 저탄장에 저장된다. 저탄장의 형태

는 석탄에 야외에 파일로 쌓아 저장하는 옥외저탄장과 새드 내부에 저장하는 옥내저탄장으로 구분된다. 저장된 석탄은 연료로 활용되기 위해 상탄기를 통해 컨베이어로 옮겨져서 혼탄설비로 이동된다.

(3) 혼탄설비

혼탄설비로 이동된 석탄은 연소 시 보일러의 사양에 맞는 적절한 열량이 발생되도록 고열량탄과 저열량탄이 일정한 비율로 혼합된다. 컨베이어 위에 일정한 비율로 옮겨진 탄은 분쇄/선별설비로 이송된다.

(4) 분쇄/선별설비

석탄은 분쇄/선별기에서 분쇄되고 일정한 크기 이하로 분리되어, 큰 석탄은 분쇄기에서 분쇄되어 작은 탄과 합쳐져서 배탄설비로 이송된다.

(5) 배탄설비

적절한 비율과 크기로 혼합된 석탄은 컨베이어를 통해 배탄실로 이동되어 배탄기를 통해 각 보일러의 사일로에 투입된다.

(6) 보일러

보일러 사일로에 투입된 석탄은 미분탄연소방식 보일러의 경우 미분기에서 작은 입경으로 분말화되어 보일러에서 연소된다. 보일러 사일로부터 회반출 및 배연 시까지 밀폐된 공정이다. 이때 석탄 중 연소되지 않고 보일러 하부 호퍼에서 포집되는 유리질의 입자를 바닥재(저회 또는 바텀애쉬라고도 불린다)라고 한다. 바닥재는 처리방식에 따라 세 가지 방식으로 구분된다. 회재순환처리방식은 바닥재를 분쇄 후 보일러로 재순환시켜 비회로 전환시킨다. 건식처리방식은 바닥재를 공기로 냉각시킨 후 분쇄하여 호퍼에 저장하였다가 배출하는 방식이다. 습식연속기계방식은 바닥재를 냉각수로 냉각하고 파쇄하여 호퍼에 저장하

였다가 배출하는 방식이다.

(7) 탈질설비

석탄 중 질소성분의 산화 시 발생하는 질소산화물을 제거하는 공정이다. 주로 암모니아를 주입해 질소와 물로 전환시키는 공법이 사용된다.

(8) 집진설비

석탄 중 보일러에서 연소되지 않고 연소가스에 섞인 가벼운 재인 비산재(비회 또는 플라이애쉬라고도 불린다)를 정전기인력을 이용하여 제거하는 공정이다. 우리나라에서 비산재는 대부분 시멘트의 원료로 재활용된다. 연소가스의 흐름에서 제거된 비산재는 공기압으로 이송되어 사일로에 저장되었다가 탱크로리차를 통해 반출된다. 회정제공장이 있는 경우 입경에 따라 정제된 후 반출되기도 한다.

(9) 탈황설비

석탄 중 황성분의 산화 시 발생하는 황산화물을 제거하는 공정이다. 석고 슬러리를 아황산가스와 반응시켜 석고로 만들어 제거한다. 이 과정에서 생산되는 석고를 탈황석고라고 하며 석고보드 등 건축자재 생산에 활용된다.

상기 공정 설명은 일반적인 미분탄연소방식의 보일러를 기준으로 한 것으로, 유동층연소방식의 보일러는 보일러에 석회석과 석탄을 함께 투입하여 연소 중 탈황이 이루어지므로 탈황설비가 생략된다. 석탄가스화복합발전방식은 석탄이 가스화 반응 중 고온에서 용융되어 석탄재가 슬래그 형태의 바닥재로 제거되므로 비산재가 발생되지 않는다. 석탄화력발전소에서 석탄은 하역장부터 배탄설비까지 컨베이어를 통해 이동되며 컨베이어와 컨베이어는 이송탑을 통해 연결된다. 이때 하역장부터 석탄 컨베이어, 이송탑, 저탄장, 혼탄설비, 분쇄/선별설비,

배탄설비 등 보일러 사일로 전단까지 석탄을 직접 취급하는 설비를 석탄설비라고 한다. 석탄화력발전소 노동자의 석탄분진 노출의 대부분은 석탄설비에서 발생된다.

2. 평가방법

1) 평가대상

노출평가 대상 발전소를 정하기 위해 2020년 5월 기준 국내 석탄화력발전소 현황을 바탕으로 각 발전사별로 1개소씩 발전소 6개소를 예비조사 대상으로 선정하였다. 2020년 5월 20일부터 5월 28일까지 각 발전소를 방문하여 예비조사를 실시하였다. 예비조사 결과를 바탕으로 사용하는 석탄의 종류, 석탄설비 청소방식, 보일러 연소방식을 고려하여 국내 석탄화력발전소에 대한 대표성이 확보되도록 발전소 4개소를 노출평가 대상으로 선정하였다(표 II-1).

평가대상 작업은 발전설비의 운전과 경상정비를 포함한 일상운영정비작업을

<표 II-1> 노출평가 대상 사업장 특성

	발전소 A	발전소 B	발전소 C	발전소 D
연료	유연탄	무연탄	유연탄	유연탄
입탄방식	선박	트럭/퀘도차*	컨베이어†	선박
저탄방식	옥외+옥내	옥내	옥내	옥내
보일러 연소방식	미분탄연소	유동층연소	미분탄연소	유동층연소
석탄컨베이어, 이송탑 주요 청소방식	습식	건식	건식	습식

* 수입탄은 다른 사업장 소유의 항만 하역장에서 트럭을 통해 발전소로 운반되며, 국내탄은 국내 광업사로부터 퀘도차량으로 운반됨.

† 석탄은 항만 내 다른 사업장 소유의 하역장에서 컨베이어를 통해 발전소로 운반됨.

대상으로 하였다. 평가대상 공정은 석탄의 생애주기를 따라 석탄이 발전소에 하역되어 운반, 저장, 연소된 후 석탄재가 되어 외부로 반출되는 과정의 공정을 대상으로 하였다. 따라서 석탄분진 또는 석탄재분진에 대한 직접적인 노출이 없는 수처리, 화학분석, 공무 등의 공정은 본 연구의 평가대상에서 제외하였다.

평가결과를 일반화하여 집단별 노출수준에 대한 비교가 가능하도록 예비조사 결과와 과거 작업환경측정 결과를 참고하여 작업자를 5개 공정과 7개 직종으로

<표 II -2> 유사노출군 분류

직무	주요 직무 내용	작업장소	유사노출군
운영공	설비 운영, 점검, 낙탄 청소, 침전조 청소, 석탄 시료채취 등	석탄설비 탈황설비 회처리설비	석탄설비-운영공 탈황설비-운영공 회처리설비-운영공
기계공	기계설비 점검 및 정비	석탄설비 보일러/터빈설비 탈황설비 회처리설비	석탄설비-기계공 보일러/터빈설비-기계공 탈황설비-기계공 회처리설비-기계공
전기공	전기설비, 계측기 점검, 조정, 정비	석탄설비 보일러/터빈설비 탈황설비 회처리설비	석탄설비-전기공 보일러/터빈설비-전기공 탈황설비-전기공 회처리설비-전기공
중기운전원	양화기, 포크레인, 페이로더, 상탄기, 하탄기 등 중장비 운전	석탄설비 탈황설비	석탄설비-중기운전원 탈황설비-중기운전원
발전기술원	보일러, 터빈 등 발전설비 운전, 현장 순회점검	보일러/터빈설비	보일러/터빈설비-발전기술원
운영감독원	설비의 운영과 관련된 사무, 현장 순회점검, 협력사 및 외주업체 작업 감독	석탄설비 보일러/터빈설비 탈황설비 회처리설비	석탄설비-운영감독원 보일러/터빈설비-운영감독원 탈황설비-운영감독원 회처리설비-운영감독원
시료분석원	입하탄, 소비탄, 미연탄소, 석탄재 시료 분석 및 석탄연료 관련 사무	분석실험실	분석실험실-시료분석원

분류하고 이를 조합하여 전체 작업자를 19개의 유사노출군으로 분류하였다(표 II-2).

2) 평가 전략

(1) 벌크시료

발전소에서 석탄, 비산재, 바닥재의 벌크시료를 채취하여 함유된 유해인자의 종류와 함유율을 분석하였다(표 II-3). 석탄과 석탄재 시료는 미국재료시험협회(American Society of Testing Materials, ASTM)의 공정시험법인 ASTM D2013과 D2013M-20에 따라 시료를 건조 및 분쇄 후 분석하였다(ASTM, 2013). 석탄과 석탄재에 함유된 결정체 산화규소의 종류를 확인하기 위해 석탄 3종과 비산재 2종을 대상으로 엑스선회절분석기(X-ray diffractometer, XRD, XRD-6000, SHIMADZU)를 이용하여 측정각(2θ) 5-70° 범위를 0.02° 간격으로 분당 2°의 속도로 측정하였다. 분석대상은 석탄은 유연탄 중 국내에서 사용량이 많은 호주산 고열량탄 및 인도네시아산 저열량탄과 국내산 무연탄이었으며, 비산재는 미분탄연소방식과 유동층연소방식의 보일러에서 연소된 유연탄의 비산재 각 1종이었다. 결정체 산화규소는 노출되는 온도조건에 따라 다른 다형체로 변형될 수 있는데, 보일러의 연소방식에 따라 석탄이 연소되는 온도조건에 차이가 있으므로 두 보일러 연소방식으로 연소된 비산재를 분석대상으로 선정하였다. 석탄과 석탄재의 결정체 산화규소의 함유율은 NIOSH 7500의 분석법에 따라 PVC여과지에 채취된 분진을 은막여과지에 재침전시킨 후 XRD로 분석하였다.

석탄과 석탄재에 함유된 소량 원소 중 황을 제외한 12종⁵⁾의 분석은 ASTM D6349-13에 따라 유도결합플라스마 분광분석기(Inductively Coupled Plasma, ICP spectrophotometer, Optima 5300 DV, Perkin Elmer)를 사용하였으며, 황은

5) 알루미늄(Al), 바륨(Ba), 칼슘(Ca), 철(Fe), 마그네슘(Mg), 망간(Mn), 인(P), 칼륨(K), 실리콘(Si), 나트륨(Na), 스트론튬(Sr), 티타늄(Ti)

<표 II-3> 벌크시료의 분석방법

분석물질	분석항목	분석방법
결정체 산화규소	종류 및 함유율	NIOSH 7500 준용
원소분석	종류 및 함유율	ASTM D6349-13(소량 금속) ASTM D6357-19(미량 금속) ASTM D6722-19(수은) ASTM D5016-16(황)
유기화합물	종류	NIOSH 2549 준용

ASTM D5016-16에 따라 적외선 흡수법으로 ICP로 분석하였다(ASTM, 2013; ASTM, 2016). 수은을 제외한 미량 원소 12종⁶⁾은 ASTM D 6357-19에 따라 ICP로 분석하였으며, 수은은 ASTM D6722-19에 따라 수은분석기(MA-3000, NIC)로 분석하였다(ASTM, 2019; ASTM, 2020). 석탄과 석탄재의 원소분석은 한국인정기구로부터 해당 분석분야에 대해 KOLAS(Korea Laboratory Accreditation Scheme) 인정을 획득한 실험실에서 분석하였다.

석탄에서 휘발되는 유기화합물은 건조되지 않은 석탄 약 1-2 g을 바이알에 넣고 헤드스페이스법을 활용하여 150℃에서 유기화합물을 휘발시켜 NIOSH 2549 분석법을 준용하여 가스크로마토그래프-질량분석기(gas chromatograph-mass spectrometer, GC-MS, 7890A, Agilent Technologies, PEGASUS4D, Leco)로 분석하였다(NIOSH, 1994).

벌크시료 분석과 별개로 일부 발전사에서 석탄과 석탄재의 성분 분석자료를 제공받아 시료의 석탄재 비율, 석탄재에 함유된 주요 원소와 일부 미량 원소의 함유율을 별도로 정리하고 본 연구결과와 비교하였다.

6) 비소(As), 베릴륨(Be), 카드뮴(Cd), 코발트(Co), 크롬(Cr), 구리(Cu), 몰리브덴(Mo), 니켈(Ni), 납(Pb), 안티몬(Sb), 바나듐(V), 아연(Zn)

(2) 작업환경 노출평가

이 연구에서 사용하는 “노출”이란 산업위생분야에서 사용되는 개념으로, 작업자의 호흡보호구 착용으로 인한 보호 효과를 고려하지 않은 작업자의 호흡영역 농도(호흡보호구 밖의 농도)를 의미한다. 따라서 본 연구에서 “노출”은 별도의 언급이 없는 한 역학이나 독성 연구 분야에서 사용되는 노출량(does)과 다른 개념이다.

작업자의 작업환경 중 유해인자에 대한 노출평가는 사업장의 발전설비 가동률을 고려하여 2020년 6월말부터 9월초 기간 중에 실시되었다. 평가대상 유해인자는 호흡성분진(석탄분진, 석탄재분진, 석회석분진), 결정체 산화규소(석영), 금속, 유기화합물, 일산화탄소 및 이산화황, 소음, 고열이었다.

호흡성분진, 결정체 산화규소, 금속, 소음에 대한 개인노출평가를 위한 시료는 작업자의 호흡영역에서 약 6시간에서 9시간 동안 채취하였다. 개인의 총분진 중 금속에 대한 노출농도를 평가하기 위해 일부 고농도 노출이 예상되는 작업자의 호흡영역에서 금속 분석을 위한 총분진 시료를 호흡성분진 시료와 동시에 포집하였다. 미국 지질조사국(U.S. Geological Survey, USGS)의 보고서에 따르면, 석탄은 자연적으로 존재하는 주기율표 상의 92종의 원소 중 최대 76종까지 함유할 수 있다(USGS, 2003). 일반적으로 석탄에 1% 이상 함유된 주요 원소는 수소, 탄소, 질소, 산소, 황이며, 0.01% 이상 소량 함유된 원소는 나트륨, 마그네슘, 알루미늄, 실리콘, 인, 칼륨 칼슘, 티타늄, 망간, 철이다. 또한 이 보고서에 따르면 미국 환경보호국(U.S. Environmental Protection Agency, EPA)은 1990년에 개정된 대기환경법에 따라 공기 오염으로 인해 잠재적으로 인체 건강에 위해성을 보일 수 있는 석탄에 함유된 원소로 15종⁷⁾을 정하여 조사한 바 있다. 국내에서 박동원 등(2013)은 우리나라의 석탄화력발전소 4개소의 바닥재 중 20종의 금속⁸⁾을 대상으로 용출 시험한 결과를 보고한 바 있다. 석탄화력발

7) 베릴륨(Be), 염소(Cl), 칼륨(K), 크롬(Cr), 망간(Mn), 코발트(Co), 니켈(Ni), 비소(As), 셀레늄(Se), 카드뮴(Cd), 안티몬(Sb), 수은(Hg), 납(Pb), 토륨(Th), 우라늄(U)

8) 구리(Cu), 카드뮴(Cd), 납(Pb), 비소(As), 아연(Zn), 니켈(Ni), 붕소(B), 바나듐(V),

전소 특조위(2019)는 옥내저탄장 지역시료에서 비소, 납, 크롬, 니켈이 검출되고, 수은은 불검출 되었다고 하였다. 작업자에게 유의미한 위해성을 보일 가능성이 있는 원소를 선별하기 위해 본 연구는 상기 세 문헌에서 평가된 금속을 합한 목록 중에서 석탄화력발전소 특조위가 평가한 금속 5종(비소, 납, 크롬, 니켈, 수은), 고용노동부 또는 ACGIH의 발암성 분류기준 상 인체 발암성이 확인된 물질 또는 인체 발암성 가능 물질로 분류된 물질 2종(카드뮴, 우라늄)과 고용노동부 또는 ACGIH의 노출기준이 입자의 크기 분률에 관계없이 하나라도 0.1 mg/m^3 미만인 금속 4종(망간, 탈륨, 코발트, 바나듐)의 순으로 모두 11종의 금속을 선별하여 개인노출 평가의 대상으로 하였다. 일부 금속은 노출기준이 입자의 크기 분률에 따라 호흡성분진 또는 흡입성분진으로 설정되어 있으며, 입자의 크기 분률에 따른 금속의 농도는 큰 차이를 보일 수 있다. 본 연구는 입자의 크기 분률별 노출평가를 위해 한 작업자에게 동시에 여러 개의 시료채취매체를 착용시킬 수 없는 현실적인 제약을 고려하여 옥내저탄장, 배탄기실, 회반출설비에서 지역시료로 호흡성분진과 흡입성분진을 총분진과 같은 위치에서 동시시료채취를 실시하였다. 수은은 공기 중에 입자상 뿐만 아니라 가스상으로 존재할 수 있으므로 가스상의 수은도 분진시료와 같은 위치에서 동시에 지역시료로 채취하였다.

유기화합물은 옥내저탄장과 배탄기실에서 지역시료로 분진시료와 같은 위치에서 동시에 지역시료로 채취하였다. 일산화탄소, 이산화황은 옥내저탄장과 탈황설비의 누설 가능 부위에서 직독식장치로 측정하였다. 고열은 석탄설비와 보일러 및 터빈건물에서 지역시료로 채취하였다. 노출평가 결과 사업장 4개소에 채취된 시료 수는 모두 290개였으며, 채취방법에 따라 개인시료 212개, 지역시료 78개였다(표 II-4).

크롬(Cr), 셀레늄(Se), 스트론튬(Sr), 몰리브덴(Mo), 안티몬(Sb), 바륨(Ba), 우라늄(U), 수은(Hg), 탈륨(Tl), 알루미늄(Al), 철(Fe), 망간(Mn)

<표 II-4> 발전소별 작업환경시료 채취 수

		발전소 A	발전소 B	발전소 C	발전소 D	합계
호흡성분진*	개인	56	31	21	36	144
	지역	6	5	3	2	16
금속(총분진)	개인	8	5	0	2	15
	지역	2	3	3	2	10
금속(호흡성분진)	지역	2	3	3	2	10
금속(흡입성분진)	지역	2	3	3	2	10
수은(가스)	지역	2	3	0	2	7
휘발성 유기화합물	지역	2	3	0	2	7
일산화탄소, 이산화황	지역	1	1	0	0	2
소음	개인	26	11	0	16	53
고열	지역	9	4	0	3	16

* 모든 호흡성분진 시료에 대해 호흡성분진의 중량을 분석한 후, XRD로 결정체 산화규소를 분석하였음.

(3) 작업환경관리실태 평가

시료채취 시 작업자의 소속⁹⁾, 당일 작업내용, 착용하는 호흡보호구의 종류를 조사하였다. 일부 작업자에 대해서 구두 인터뷰를 실시하여 작업환경 관련 애로사항을 청취하였다. 컨베이어, 이송탑, 옥내저탄장, 배탄기실, 회반출설비 등 주요 설비에 대한 분진제어방법과 청소방법을 조사하였으며, 최근 사업장의 작업환경에 대한 개선사례를 수집하였다.

9) 발전사(원청) 또는 발전사의 협력사(하청) 여부를 포함하여 조사하였다.

<표 II-5> 작업환경시료의 채취 및 분석방법

유해인자	유량 (LPM)	시료채취매체	분석법	시험법
결정체 산화규소	2.5	37 mm 5 µm PVC필터+알루미늄 사이클론	XRD	NIOSH 7500
	4.2	37 mm 5 µm PVC필터+ GK2.69 사이클론		
호흡성분진	2.5	37 mm 5 µm PVC필터+알루미늄 사이클론	중량분석	NIOSH 0600
	4.2	37 mm 5 µm PVC필터+ GK2.69 사이클론		
금속(총분진)	2	37 mm 0.8 µm MCE필터	ICP/ICP-MS	NIOSH 7303
금속(호흡성분진)	2.5	37 mm 0.8 µm MCE필터+알루미늄 사이클론		
금속(호흡성분진)	2.0	25 mm 0.8 µm MCE필터+IOM시료채취기		
수은(가스)	0.2	고체흡착관	ICP	NIOSH 6009
휘발성 유기화합물	0.1	고체흡착관	GC-FID	NIOSH 1501
일산화탄소, 이산화황		직독식 가스미터	자료저장 후 출력	-
소음		누적소음측정기	자료저장 후 출력	-
고열		WBGT 온열측정기	자료저장 후 출력	-

3) 시료채취 및 분석방법

이 연구에서 활용된 작업환경시료의 채취 및 분석방법은 표 II-5와 같다. 호흡성분진과 결정체 산화규소 농도를 평가하기 위해 미리에 무게를 측정할 수 있는 PVC여과지(기공 5 µm 지름 37 mm)를 37 mm 카세트에 담아 알루미늄 사이클론(Aluminum Cyclone, SKC) 또는 GK 2.69 사이클론(GK 2.69, Mesa Labs)에 장착하여 각각 2.5 L/min 및 4.2 L/min의 유량으로 공기 중 호흡성분진을 채취하였다. 작업시간이 짧은 하역장의 집탄 작업자를 제외한 모든 개인시료는

알루미늄 사이클론으로 채취하였으며, 지역시료는 알루미늄 사이클론 또는 GK 2.69를 사용하였다. NIOSH 0600 시료채취 및 분석방법에 따라 저울(XP2U, METTLER TOLEDO)을 이용하여 호흡성분진이 채취된 PVC여과지의 무게를 1 µg 단위까지 측정하였고, NIOSH 7500에 따라 채취된 분진을 은막여과지(기공 0.45 µm 지름 25 mm)에 채침전시킨 후 결정체 산화규소를 XRD로 분석하였다(NIOSH, 1994; NIOSH, 1998). 금속의 농도를 평가하기 위해 총분진은 37 mm 카세트에 장착된 MCE여과지(기공 0.8 µm 지름 37 mm)를, 호흡성분진은 37 mm 카세트에 장착된 MCE여과지(기공 0.8 µm 지름 37 mm)와 알루미늄 사이클론 또는 GK 2.69를, 흡입성분진은 MCE여과지(0.8 µm 지름 25 mm)와 IOM 시료채취기(IOM, SKC)를 사용하여 각각 2 L/min, 2.5 L/min, 4.2 L/min, 2 L/min의 유량으로 시료채취하였다. 시료에 채취된 금속은 NIOSH 7303에 따라 유도결합플라즈마-질량분석기(Inductively Coupled Plasma-Mass, ICP-MS spectrophotometer, PEGASUS 4D, Leco)로 분석하였다(NIOSH, 2003). 가스상 수은은 고체흡착관(Anasorb C300, SKC)을 이용하여 0.2 L/min의 유량으로 채취하였으며, NIOSH 6009에 따라 ICP-MS로 분석하였다(NIOSH, 1994). 휘발성 유기화합물은 고체흡착관(Anasorb CSC, Coconut Charcoal 100/50, SKC)을 이용하여 0.1 L/min의 유량으로 채취하였으며, NIOSH 1501에 따라 가스크로마토그래프-불꽃이온화검출기(gas chromatograph-flame ionization detector, GC-FID, 7890B, Agilent Technologies)로 분석하였다(NIOSH, 2003). 일산화탄소와 이산화황은 직독식 가스미터(MultiRAE PRO, RAE SYSTEMS)를 이용하여 지역시료로 측정하였다. 시료채취 전과 후에 건식 유량보정장치(Defender 510M, Mesa Laboratories)로 시료채취에 사용한 펌프의 유량을 보정하여 채취된 공기량 계산에 사용하였다. 결정체 산화규소, 금속, 휘발성 유기화합물은 미국 산업위생전문가협회(American Industrial Hygiene Association, AIHA)의 분석 숙련도평가에서 숙련도 인정을 유지 중인 산업안전보건연구원의 실험실의 숙련된 분석자가 분석하였다.

소음은 누적소음측정기(SV 104IS, SVANTEC)를 작업자의 귀로부터 30 cm 이내의 위치에 장착하여 개인의 누적소음노출량을 측정하였다. 누적소음측정기는 고용노동부의 관련 고시에 따라 criteria 90 dB, exchange rate 5 dB, threshold 80 dB로 설정하였으며, 사전에 국가표준기관에서 검정 받은 소음보정기로 매일 측정 전에 보정하여 사용하였다(고용노동부, 2020).

고열 스트레스는 고용노동부의 관련 고시에 따라 습구흑구온도(wet-bulb globe temperature, WBGT)를 측정할 수 있는 WBGT온도계(QUESTemp° 34, 3M)를 이용하여 1.2-1.5 m 높이에서 70분 이상 측정하였다(고용노동부, 2020). WBGT온도계는 측정지점이 바뀌면 환경에서 안정되는데 시간이 소요되므로, 장비의 매뉴얼에 따라 각 측정지점에서 측정 시작으로부터 10분 이후부터의 자료를 WBGT 산출에 활용하였다. WBGT온도계는 측정 전에 국가표준기관으로부터 검정 받은 장비를 사용하였다.

4) 평가기준 및 방법

작업환경 중 유해인자 노출의 위해성 평가를 위해, 개인시료의 측정값을 2020년 1월 개정된 고용노동부의 화학물질 및 물리적 인자의 노출기준(고용노동부, 2020)과 2020년도 미국 ACGIH의 권고기준(Threshold Limit Value, TLV)과 비교하여 평가하였다(부록 2 참조). 시료채취 시 작업자에게 확인된 점심시간은 시료채취시간에서 제외하였고, 작업 중 휴식시간은 제외하지 않았다. 석탄화력발전소의 노동자는 작업시간 동안 매일 같은 위치에서 유사한 업무를 수행하지 않으므로, 매일의 작업위치와 작업내용이 변경됨에 따라 노출수준에 큰 변이가 있을 것으로 보였다. 또한 협력사 작업자의 경우 예를 들어 근무시간이 12시간인 1일 2교대 근무자는 작업시작 전에 사무실에서 당일 업무지시를 받는 시간과 작업을 마무리하고 사무실에서 작업일지를 작성하여 제출하고 샤워 및 환복하는 시간까지 근무시간에 포함되었으므로 실제 작업시간은 근무시간에 비해 짧았다. 작업준비 및 마무리 시간을 포함하여 측정값을 보정할

경우 작업자의 노출수준을 현저하게 저평가할 우려가 있었으므로, 본 연구는 측정값을 시료채취시간을 제외한 근무시간에 대해 보정하지 않고 평가에 활용하였다. 고열은 보일러 및 터빈건물에서 일상운영정비작업 시 순회점검 수준의 작업강도를 고려하여 고용노동부 관련 고시의 중등작업¹⁰⁾을 기준으로 작업휴식시간비에 따른 WBGT와 비교하여 평가하였다.

10) 시간당 200~350 kcal의 열량이 소요되는 작업을 말하며, 물체를 들거나 밀면서 걸어 다니는 일 등을 뜻함

Ⅲ. 연구결과

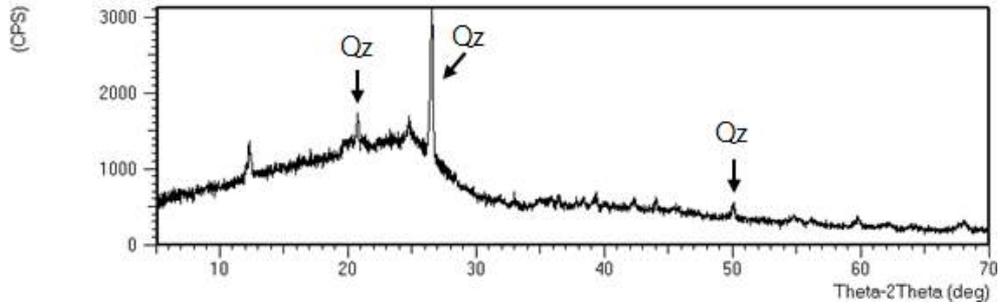
1. 석탄과 석탄재의 유해물질

1) 결정체 산화규소

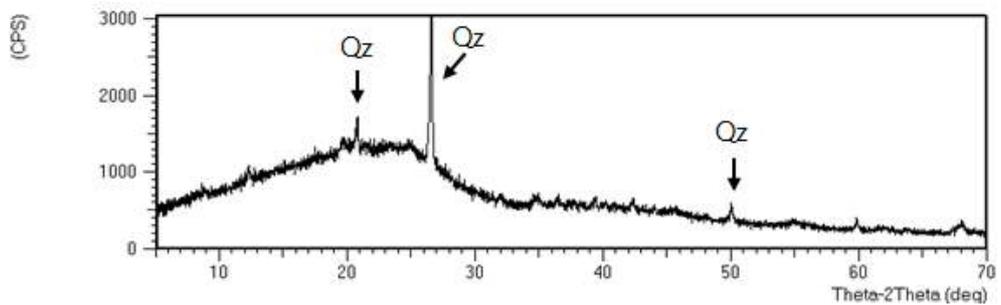
석탄(유연탄 2종, 무연탄 1종)과 비산재(미분탄연소방식 1종, 유동층연소방식 1종)의 결정체 산화규소 함유 여부와 함유된 결정체 산화규소의 종류를 XRD로 분석한 결과, 모든 시료에서 결정체 산화규소의 한 종류인 석영의 피크($2\theta=26.66^\circ$, 20.85° , 50.16°)가 확인되었다(그림 III-1; 그림 III-2). 석영 외에 결정체 산화규소의 다형체인 크리스토팔라이트($2\theta=21.93^\circ$, 36.11° , 31.46°)와 트리디마이트($2\theta=21.62^\circ$, 20.50° , 23.28°)의 피크는 확인되지 않았다(그림 III-1). 결정체 산화규소의 평균 함유율은 유연탄 2.0%(0.6%-4.3%), 무연탄 2.8%(2.1%, 3.5%), 비산재 5.8%(2.0%-9.8%), 바닥재 14.6%(5.6%-20.1%)이었다(표 III-1).

2) 금속

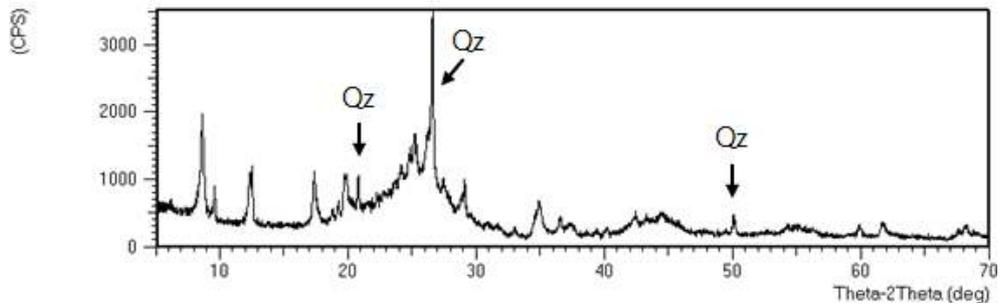
석탄과 석탄재의 주요 원소 13종과 미량 원소 13종의 함유율을 분석한 결과는 표 3-1부터 표 3-5와 같았고, 발전소로부터 수집된 석탄의 원소분석 결과는 표 3-6과 같았다. 결정체 산화규소와 관련된 실리콘의 평균 함유율은 유연탄 2.23%(0.85%-4.33%), 무연탄 7.74%(6.33%, 9.15%), 비산재 20.95%(15.21%-26.33%), 바닥재 27.65%(27.23%-28.08%)였다. 석탄화력발전소 특조위가 평가한 금속 5종의 평균 함유율은 비소는 유연탄 8 ppm(2-15 ppm), 무연탄 18 ppm(10 ppm, 25 ppm), 비산재 36 ppm(25 ppm-43 ppm), 바닥재 26 ppm(25-27 ppm)이었다. 크롬은 유연탄 9 ppm(4 ppm-21 ppm), 무연탄 81 ppm(52 ppm, 110 ppm), 비산재 59 ppm(21 ppm-87 ppm), 바닥재 56 ppm(21



(a)

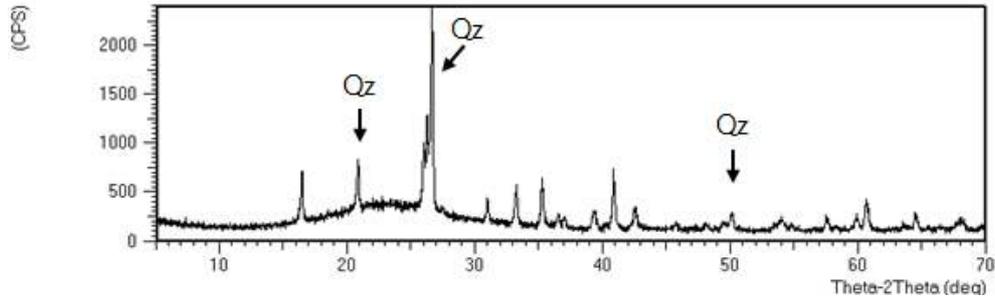


(b)

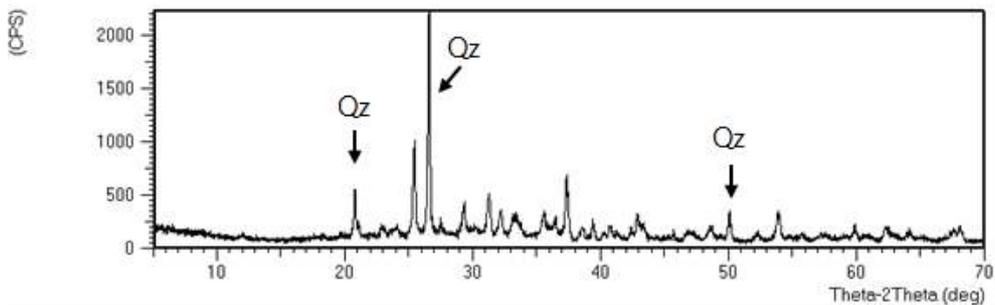


(c)

[그림 III - 1] 석탄의 엑스선회절분석 패턴: (a) 호주산 고열량탄, (b) 인도네시아산 저열량탄, (c) 국내산 무연탄. Qz=석영. 결정체 산화규소의 회절피크(2θ)는 석영 26.66° , 20.85° , 50.16° , 크리스토팔라이트 21.93° , 36.11° , 31.46° , 트리디마이트 21.62° , 20.50° , 23.28° 임.



(a)



(b)

[그림 III-2] 비산재의 엑스선회절분석 패턴: (a) 미분탄 연소방식 보일러에서 발생된 비산재, (b) 유동층 연소방식 보일러에서 발생된 비산재. Qz=석영. 결정체 산화규소의 회절피크(2θ)는 석영 26.66°, 20.85°, 50.16°, 크리스토팔라이트 21.93°, 36.11°, 31.46°, 트리디마이트 21.62°, 20.50°, 23.28° 임.

ppm-84 ppm)이었다. 수은은 유연탄 0.045 ppm(<0.01 ppm-0.122 ppm), 무연탄 0.252 ppm(0.068 ppm, 0.436 ppm), 비산재 0.451 ppm(0.113 ppm-0.736 ppm), 바닥재 <0.01 ppm이었다. 니켈은 유연탄 11 ppm(2 ppm-30 ppm), 무연탄 46 ppm(33 ppm, 59 ppm), 비산재 57 ppm(44 ppm-67 ppm), 바닥재 33 ppm(27 ppm-41 ppm)이었다. 납은 유연탄 4 ppm(<1 ppm-9 ppm), 무연탄 23 ppm(17 ppm, 29 ppm), 비산재 38 ppm(17 ppm-65 ppm), 바닥재 9 ppm(<5 ppm-18 ppm)이었다.

<표 III-1> 석탄과 석탄재의 결정체 산화규소 함유율 분석 결과

석탄 종류	탄 구분	함유율, %
유연탄	호주산 고열량탄	1.8
	호주산 중열량탄	4.3
	러시아산 고열량탄	2.8
	러시아산 중열량탄	1.6
	인도네시아산 중열량탄	1.6
	인도네시아산 저열량탄	0.6
	미국산 저열량탄	1.4
	평균	2.0
무연탄	국내산 무연탄	3.5
	호주산 무연탄	2.1
	평균	2.8
비산재	사업장 A	5.1
	사업장 B	6.1
	사업장 C	2.0
	사업장 D	9.8
	평균	5.8
바닥재	사업장 A	5.6
	사업장 B	20.1
	사업장 D	18.0
	평균	14.6

<표 III-2> 석탄의 주요 원소 함유율 분석결과

구분	원소	자료수	평균(%)	표준편차(%)	범위(%)
유연탄	Al	7	1.16	0.68	0.46-2.28
	Ba	7	0.02	0.01	<0.009*-0.03
	Ca	7	0.36	0.19	0.04-0.60
	Fe	7	0.61	0.47	0.15-1.59
	K	7	0.12	0.06	0.04-0.22
	Mg	7	0.10	0.04	0.04-0.17
	Mn	7	0.01	0.003	<0.007-0.01
	Na	7	0.07	0.06	0.01-0.14
	P	7	0.02	0.02	0.04-0.22
	S	7	0.15	0.09	0.02-0.33
	Si	7	2.23	1.30	0.85-4.33
	Sr	7	0.02	0.01	0.01-0.04
	Ti	7	0.06	0.03	0.02-0.11
	무연탄	Al	2	5.53	1.07
Ba		2	0.01	0.01	0.01, 0.02
Ca		2	0.44	0.38	0.16, 0.71
Fe		2	1.35	0.39	1.08, 1.62
K		2	0.58	0.61	0.15, 1.01
Mg		2	0.28	0.10	0.21, 0.35
Mn		2	0.01	0.01	0.01
Na		2	0.02	0.01	0.01, 0.02
P		2	0.03	0.02	0.02, 0.04
S		2	0.14	0.13	0.05, 0.23
Si		2	7.74	1.99	6.33, 9.15
Sr		2	0.03	0.01	0.03
Ti	2	0.25	0.03	0.23, 0.28	

* “<”는 검출한계 미만을 뜻함

<표 III-3> 석탄재의 주요 원소 함유율 분석결과

구분	원소	자료수	평균(%)	표준편차(%)	범위(%)
비산재	Al	4	11.73	3.07	3.48-14.80
	Ba	4	0.11	0.04	0.02-0.14
	Ca	4	7.02	7.09	0.70-17.14
	Fe	4	4.59	2.51	2.75-6.88
	K	4	1.00	0.16	0.61-1.17
	Mg	4	1.36	1.35	0.60-3.36
	Mn	4	0.03	0.03	0.03-0.07
	Na	4	0.32	0.22	0.04-0.50
	P	4	0.19	0.14	0.02-0.38
	S	4	0.99	1.22	0.08-2.67
	Si	4	20.95	5.45	15.21-26.23
	Sr	4	0.09	0.02	0.05-0.13
	Ti	4	0.63	0.22	0.14-0.81
바닥재	Al	3	10.57	6.21	3.48-15.02
	Ba	3	0.06	0.05	0.02-0.11
	Ca	3	3.80	4.30	0.70-8.71
	Fe	3	3.84	1.81	2.75-5.93
	K	3	1.35	0.72	0.61-2.03
	Mg	3	0.88	0.35	0.60-1.27
	Mn	3	0.05	0.04	0.03-0.09
	Na	3	0.18	0.13	0.06-0.31
	P	3	0.05	0.04	0.02-0.09
	S	3	0.91	1.39	0.08-2.51
	Si	3	27.65	0.42	27.23-28.08
	Sr	3	0.06	0.01	0.05-0.07
	Ti	3	0.49	0.32	0.14-0.77

<표 III-4> 석탄의 미량 원소 함유율 분석결과

구분	원소	자료수	평균(ppm)	표준편차(ppm)	범위(ppm)
유연탄	As	7	8	4	2-15
	Be	7	-	-	<1*
	Cd	7	-	-	<1
	Co	7	6	6	1-18
	Cr	7	9	6	4-21
	Cu	7	10	7	2-20
	Hg	7	0.045	0.039	<0.01-0.122
	Mo	7	1	1	<1-3
	Ni	7	11	9	2-30
	Pb	7	4	3	<1-9
	Sb	7	-	-	<1
	V	7	15	7	9-26
	Zn	7	16	14	4-45
	무연탄	As	2	18	11
Be		2	-	-	<2, <3
Cd		2	-	-	<2, <3
Co		2	13	6	9, 17
Cr		2	81	41	52, 110
Cu		2	45	15	34, 55
Hg		2	0.252	0.260	0.068, 0.436
Mo		2	3	2	<2, 4
Ni		2	46	18	33, 59
Pb		2	23	8	17, 29
Sb		2	-	-	<2, <3
V		2	60	35	35, 85
Zn		2	47	23	31, 63

* “<”는 검출한계 미만을 뜻함

<표 III-5> 석탄재의 미량 원소 함유율 분석결과

구분	원소	자료수	평균(ppm)	표준편차(ppm)	범위(ppm)
비산재	As	4	36	5	25-43
	Be	4	-	-	<5*
	Cd	4	-	-	<5
	Co	4	35	9	22-44
	Cr	4	59	20	21-87
	Cu	4	70	26	19-104
	Hg	4	0.451	0.257	0.113-0.736
	Mo	4	-	-	<5
	Ni	4	57	10	44-67
	Pb	4	38	24	17-65
	Sb	4	-	-	<5
	V	4	125	30	98-162
	Zn	4	91	36	59-143
	바닥재	As	3	26	1
Be		3	-	-	<5
Cd		3	-	-	<5
Co		3	27	4	23-31
Cr		3	56	32	21-84
Cu		3	37	17	19-52
Hg		3	-	-	<0.01
Mo		3	-	-	<5
Ni		3	33	7	27-41
Pb		3	9	8	<5-18
Sb		3	-	-	<5
Zn		3	50	31	21-83

* “<”는 검출한계 미만을 뜻함

<표 III-6> 사업장에서 수집된 석탄 및 석탄재의 미량 원소 함유율 분석결과*

구분	원소	자료수	평균(ppm)	표준편차(ppm)	범위(ppm)
유연탄	As	13	3.58	2.00	0.48-7.30
	B	1	78.00	-	78.00
	Cd	9	<1 [†]	-	-
	Cr	9	9.03	8.67	2.36-29.28
	Hg	13	0.04	0.03	<0.01-0.12
	Pb	9	4.08	3.55	0.46-9.73
비산재	As	1	20.52	-	-
	Cd	1	<5	-	-
	Cr	1	55.17	-	-
	Hg	1	0.26	-	-
	Pb	1	21.43	-	-
바닥재	As	2	6.10	4.24	3.10-9.10
	Cd	2	<5	-	-
	Cr	2	88.14	5.49	84.25-92.02
	Hg	2	<0.01	-	-
	Pb	2	4.60	1.50	3.54-5.66

* 발전소 2개소에서 보유한 자료를 제출받아 정리한 자료임

† “<”는 검출한계 미만을 뜻함

3) 휘발성 유기화합물

석탄 3종(호주산 고열량탄, 인도네시아산 저열량탄, 국내산 무연탄)의 벤젠, 톨루엔, 자일렌, 노말헥산 함유 여부를 분석한 결과 모든 시료에서 소량이 확인되었다. 다만, 유기화합물의 탈착 수준을 알 수 없고 매우 복잡한 피크로 인해 피크의 분리가 원활하지 않아 그 함유율을 확인할 수는 없었다.

2. 유해인자 노출수준

1) 석탄설비

(1) 작업 특성

가) 하역

노출평가 대상 발전소 중 2개소는 부두에서 벌크선이 싣고 온 석탄을 하역기로 하역장의 컨베이어로 운반하는 방식으로 하역하였다. 선박의 셀 내부에 있는 석탄을 하역기로 어느 정도 옮긴 후 남은 탄을 하역기가 옮길 수 있도록 페이로더와 작업자가 셀 내부에 들어가서 벽면 등에 붙은 탄을 긁고 남은 탄을 모으는 작업¹¹⁾을 실시하는 과정에서 작업자가 석탄분진에 노출될 우려가 있었다. 공학적 관리수단으로 환기장치는 설치되어 있지 않았으나 수입되는 석탄의 함수율이 높았고(약 10-20%), 작업 시 살수설비로 석탄을 습윤화하여 석탄분진의 비산을 억제하였다. 본 연구는 작업일정으로 인해 두 발전소 중 한 곳에서만 하역 시 집탄작업에 대한 노출평가를 실시하였다.

다른 발전소 1개소는 수입탄은 외부 항만의 타사업장이 운영하는 하역장에서 하역된 석탄을 덤프트럭에 실어서 발전소로 운반한 후 정해진 하역장 내 호퍼에 덤핑하는 방식으로 입탄하였고, 국내탄은 광업사에서 궤도차량으로 발전소로 운반하여 하역장에서 궤도차량을 기계로 뒤집어 호퍼에 석탄을 덤핑하였다. 덤프트럭 하역장의 운영공은 가끔씩 바닥에 떨어진 소량의 낙탄을 삽으로 긁어서 호퍼에 넣거나 물청소를 하였으며, 이 과정에서 석탄분진이 발생할 수 있었다. 공학적 관리수단으로 덤프트럭과 궤도차량의 하역장에는 국소배기장치의 캐노피식 후드가 설치되어 있었고, 육안으로 관찰 시 분진이 양호하게 제어되는 것으로 보였다. 나머지 발전소 1개소는 하역설비를 보유하지 않았고, 외부 항만의 다른 사업장이 운영하는 하역장에서 하역된 석탄을 컨베이어로 들여왔

11) 집탄작업이라고 한다.

으므로 본 연구서 하역작업을 평가하지 않았다.

나) 컨베이어, 이송탑(혼탄/분쇄/선별설비 포함)

석탄을 컨베이어로 운반하는 과정에서 컨베이어라인과 컨베이어의 슈트(chute)¹²⁾에서 석탄분진이 주로 발생하였다. 컨베이어 가동 중 설비의 순회점검, 낙탄 청소, 석탄분진으로 오염된 설비의 정비, 청소과정에서 모인 낙탄의 처리, 침전조에 퇴적된 석탄분진 처리 등 다양한 작업과정에서 석탄분진에 노출될 수 있었다. 노출평가 대상 발전소 중 2개소는 석탄의 운반 과정에서 컨베이어라인과 이송탑에 오염된 분탄과 괴탄을 주로 고압의 살수장치를 이용하여 물청소하였고, 다른 2개소는 진공청소설비를 이용하여 청소하였다. 평가대상 발전소의 컨베이어의 슈트는 밀폐식 구조였고 주요 분진발생부위에 국소배기장치가 설치되어 있었다. 컨베이어라인과 이송탑에 동력을 사용하는 전체환기장치는 설치되어 있지 않았고, 작은 창이 있으나 대부분 닫혀 있었으며, 일부는 루버를 통해 약간의 전체환기가 이루어지는 것으로 보였다.

다) 저탄장

노출평가 대상 발전소 중 1개소는 옥내저탄장과 옥외저탄장을 모두 운영하고 있었고, 나머지 3개소는 옥내저탄장만 운영하고 있었다. 이 중 3개소의 옥내저탄장은 내부에 공간을 구획하는 대형 콘크리트 구조물이 설치되어 구획된 각 셀 안에 석탄을 저장하였고, 1개소의 옥내저탄장은 석탄을 바닥에 쌓는 방식으로 저장하였다. 석탄을 하탄기로 하탄 시 석탄분진이 공기 중으로 비산되었고, 상탄기로 상탄 시에도 하탄에 비해서는 적지만 석탄분진이 비산되는 것으로 관찰되었다. 옥내저탄장 작업자의 분진 노출이 옥외저탄장 작업자에 비해 클 것으로 예상되었다. 저탄장의 순회점검, 정비, 낙탄처리 등 청소, 중기운전 시 석탄분진에 노출될 수 있었다.

셀 구조물이 설치된 옥내저탄장에서는 작업자가 상하탄 후에 저탄장 통로 바

12) 컨베이어의 헤드부위에서 다음 컨베이어의 테일 부위로 석탄을 낙하시켜 이송하는 장치

다에 퇴적된 분진과 컨베이어 옆에 떨어진 낙탄을 청소하였다. 통로 바닥의 분진을 분진청소차량으로 청소하는 사업장이 있었고, 물청소를 위한 살수 및 배수 시설을 설치한 사업장도 있었다. 발전소 1개소는 양쪽 셀이 마주보는 중앙 통로에 분무장치¹³⁾와 살수장치¹⁴⁾를 설치하여 하탄 시에 발생하는 분진을 가라앉히고 석탄을 습윤화하였으며, 다른 1개소는 분무장치를 설치하여 운영하였고, 다른 1개소는 살수장치를 설치하여 운영하였다. 나머지 1개소는 분무장치나 살수장치를 갖추지 않았다. 저탄장 벽면의 루버를 통해 약간의 전체환기가 이뤄지고 있었고, 동력을 이용한 전체환기시설은 없었다.

라) 배탄기실

노출평가 대상 발전소 중 3개소는 컨베이어로 이송된 석탄을 배탄기가 각 보일러 사일로 위치로 레일을 따라 이동하여 석탄을 공급하는 방식이었으며, 1개소는 각 보일러 사일로 위에 고정된 배탄기가 석탄을 공급하는 방식이었다. 석탄을 공급 할 때 개방된 컨베이어 위와 배탄기의 슈트에서 석탄분진이 비산되었다. 배탄기실의 운전, 순회점검, 정비, 청소 시 분진에 노출될 가능성이 있었다.

이동식 배탄기를 운영하는 발전소 중 1개소에는 배탄기실에 분무장치가 설치되어 있었고, 다른 1개소에는 국소배기장치가 설치되어 있었으며, 나머지 1개소에는 분무장치나 국소배기장치와 같은 공학적 분진제어설비가 없었다. 고정식 배탄기를 운영하는 발전소의 배탄기에는 슈트에 국소배기장치가 설치되어 있었다. 청소는 3개소는 진공청소를 실시하였고 1개소는 물청소를 실시하였다. 배탄기실 내의 컨베이어는 모두 개방된 상태로 운영되었다¹⁵⁾. 일부 발전소의 배탄기실에는 작은 창이 있었으나 개방되어 있지 않았고, 동력을 이용한 전체환기 시설은 없었다.

13) Dust suppression system 또는 wetting-down system이라고도 한다.

14) 스프링클러라고도 한다.

15) 이동식 배탄기는 보일러 사일로와 사일로 사이의 배탄기가 이동하는 구간은 컨베이어의 밀폐가 가능해보이지 않았다.

<표 III-7> 석탄설비 작업자의 호흡성분진 노출 농도

직무	자료 수	산술 평균 (mg/m ³)	표준 편차 (mg/m ³)	기하 평균 (mg/m ³)	기하 표준 편차 (mg/m ³)	범위 (mg/m ³)	>노출 기준*	>½노출 기준
전체	81	0.303	1.125	0.089	3.759	<0.012-9.996	4	7
운영공	49	0.444	1.432	0.137	3.704	<0.012-9.996	4	7
기계공	9	0.093	0.126	0.051	3.016	<0.016-0.394	0	0
전기공	7	0.152	0.184	0.070	4.223	<0.016-0.475	0	0
중기운전원	9	0.074	0.069	0.050	2.691	<0.015-0.231	0	0
운영감독원	7	0.028	0.014	0.025	1.669	<0.019-0.053	0	0

* 노출기준 = 1 mg/m³

† “<”는 검출한계 미만을 뜻함

<표 III-8> 석탄설비 작업자의 결정체 산화규소 노출 농도

직무	자료 수	산술 평균 (mg/m ³)	표준 편차 (mg/m ³)	기하 평균 (mg/m ³)	기하 표준 편차 (mg/m ³)	범위 (mg/m ³)	>노출 기준*	>½노출 기준
전체	81	0.018	0.063	0.008	2.450	<0.005-0.554	4	8
운영공	49	0.025	0.080	0.009	2.841	<0.005-0.554	4	7
기계공	9	0.008	0.008	0.006	1.798	<0.006-0.028	0	1
전기공	7	0.008	0.005	0.007	1.800	<0.006-0.017	0	0
중기운전원	9	0.005	0.002	0.005	1.372	<0.005-0.008	0	0
운영감독원	7	0.004	0.001	0.004	1.218	<0.005-0.005	0	0

* 노출기준 = 0.05 mg/m³

† “<”는 검출한계 미만을 뜻함

<표 III-9> 석탄설비 작업자의 금속 노출 농도*

금속	자료수	산술 평균 (mg/m ³)	표준 편차 (mg/m ³)	범위 (mg/m ³)	>노출 기준 [†]	>½노출 기준
크롬(Cr)	9	0.0004	0.0002	<0.0001-0.0007	0	0
망간(Mn)	9	0.0002	0.0001	<0.0002-0.0004	0	0
바나듐(V)	9	0.0001	0.00003	<0.0001-0.0002	0	0

* 총분진으로 채취한 금속 농도임

† 노출기준 = 크롬 0.5 mg/m³, 망간 1mg/m³, 오산화바나듐(흡입성) 0.05 mg/m³

‡ 상기 금속 3종 외 금속 8종은 모든 시료에서 불검출되었음. 검출한계는 비소(As) 0.53 µg/sample, 카드뮴(Cd) 0.35 µg/sample, 코발트(Co) 0.16 µg/sample, 크롬(Cr) 0.10 µg/sample, 수은(Hg) 0.69 µg/sample, 망간(Mn) 0.14 µg/sample, 니켈(Ni) 0.33 µg/sample, 납(Pb) 0.18 µg/sample, 탈륨(Tl) 0.16 µg/sample, 우라늄(U) 0.19 µg/sample, 바나듐(V) 0.08 µg/sample

∇“<”는 검출한계 미만을 뜻함

(2) 노출농도

석탄설비의 작업자에서 81개의 호흡성분진 개인시료를 채취하였다(표 III-7). 모든 직종의 호흡성분진 농도의 산술평균값은 노출기준을 초과하지 않았다. 노출기준을 초과한 값은 4개, 노출기준의 1/2를 초과한 값은 7개였다. 가장 높은 측정값(9.996 mg/m³)은 운영공에서 측정되었으며, 노출기준의 약 10배 수준이었다. 직종별 산술평균값은 높은 순부터 운영공, 전기공, 기계공, 중기운전원, 운영감독원 순이었다.

모든 직종의 결정체 산화규소의 산술평균값은 노출기준을 초과하지 않았다. 노출기준을 초과한 값은 4개, 노출기준의 1/2를 초과한 값은 8개였다(표 III-8). 노출기준을 초과한 값은 모두 운영공에서 측정되었다. 노출기준의 1/2를 초과한 값 7개 중 1개는 기계공에게서 측정되었고, 나머지는 모두 운영공에서 측정되었다. 직종별 산술평균값은 높은 순부터 운영공, 전기공, 기계공, 중기운전원,

<표 III-10> 석탄설비 작업자의 소음 노출 수준

직무	자료수	산술평균 (dBA)	표준편차 (dBA)	범위 (dBA)	>85 dBA*	>90 dBA†
전체	6	79.4	3.0	74.8-83.5	0	0
운영공	4	77.9	2.1	74.8-79.4	0	0
전기공	2	82.5	1.4	81.5, 83.5	0	0

* >85 dBA = 특수건강진단 대상

† 90 dBA = 노출기준

운영감독원 순이었다.

금속은 개인시료 9개 중 크롬 8개, 망간 2개, 바나듐 1개 시료에서 검출한계 이상의 값이 측정되었다. 평가한 금속 11종 중 나머지 8종의 금속은 모든 개인시료에서 검출되지 않았다(표 III-9). 노출농도는 측정된 최고값을 기준으로 크롬은 노출기준의 0.14%, 망간은 노출기준의 0.04%, 바나듐¹⁶⁾은 노출기준의 0.4% 수준이었다.

유기용제는 발전소 3개소의 옥내저탄장과 배탄기실에서 7개의 지역시료를 유량 0.1 L/min으로 80분-320분간 채취하여 분석한 결과, 모든 시료에서 벤젠, 톨루엔, 자일렌, 노말헥산이 검출되지 않았다¹⁷⁾.

가스상 물질은 발전소 1개소의 옥내저탄장에서 287분간 직독식장치로 연속측정하였다. 일산화탄소와 이산화황 모두 검출되지 않았다.

소음은 발전소 1개소에서 물청소 및 컨베이어 점검작업, 진공차 운영작업, 석탄설비 전기정비 작업에 대해 6개의 시료를 측정하였다(표 III-10). 모든 측정

16) 바나듐의 노출기준은 없고, 검출된 바나듐(V)이 모두 오산화바나듐으로 존재한다고 가정하고, 입자의 크기분률과 관계없이 농도값을 단순 비교하였다. 관련 자료를 확인할 수는 없지만 석탄 내 대부분의 바나듐은 광물을 구성하는 미량원소로 존재하여 오산화바나듐이 아닐 것으로 추정된다.

17) 검출한계 : 벤젠 0.21 µg/sample, 톨루엔 0.12 µg/sample, 자일렌 0.15 µg/sample, 노말헥산 0.16 µg/sample

<표 III-11> 석탄설비의 고열 스트레스 지수 측정 결과

위치	사업장	WBGT (℃)	습구온도 (℃)	건구온도 (℃)	흑구온도 (℃)	상대습도 (%)	외부온도* (℃)
SCB 내부	A	25.7	24.0	29.3	29.6	49.8	20.7
BB 1층	A	21.9	21.0	23.7	23.9	67.8	20.7
BB 2층	A	23.1	22.2	25.0	25.1	68.5	20.7
TT 내부	B	20.3	19.5	22.1	22.2	69.4	17.6
옥내저탄장	A	21.5	20.3	24.0	24.3	62.4	20.7
옥내저탄장	B	25.3	24.2	27.4	28.0	61.3	17.6
옥외저탄장	A	23.6	20.9	23.5	33.1	48.3	20.7
트리퍼 내부	A	22.6	21.2	25.4	25.8	52.9	20.7
트리퍼 내부	D	30.2	30.1	30.1	30.3	97.8	20.0

* 기상청 관측자료에 따른 해당지역의 당일 평균기온임

† 노출기준(중등작업 기준) : 계속작업 26.7℃, 매시간 75% 작업 25% 휴식 28℃, 매시간 50% 작업 50% 휴식 29.4℃, 매시간 25% 작업 75% 휴식 31.1℃

값은 노출기준 미만이었으며, 특수건강진단 대상이 되는 소음 수준인 85 dBA 미만이었다.

고열은 발전소 3개소의 이송탑(혼합, 분쇄/선별설비 포함), 옥내외 저탄장, 배탄기실에서 모두 9지점의 고열 스트레스 지수를 측정하였다(표 III-11). 이 중 8 개 측정값이 노출기준 미만이었으며, 배탄기실에서 측정된 1개 측정값이 중등작업 시 매시간 50% 작업 50% 휴식 기준(29.4℃)을 초과하였다.

2) 보일러 및 터빈설비

(1) 노출 특성

보일러 및 터빈설비의 순회점검과 전기설비, 계측제어장치, 기계설비의 점검

<표 III-12> 보일러 및 터빈설비 작업자의 호흡성분진 노출 농도

직무	자료 수	산술 평균 (mg/m ³)	표준 편차 (mg/m ³)	기하 평균 (mg/m ³)	기하 표준 편차 (mg/m ³)	범위 (mg/m ³)	>노출 기준*	>1/10노출 기준
전체	28	0.028	0.021	0.022	1.945	<0.015-0.084	0	0
기계공	7	0.026	0.019	0.021	2.028	<0.015-0.062	0	0
전기공	6	0.020	0.007	0.019	1.442	<0.015-0.031	0	0
발전기술원	8	0.035	0.030	0.025	2.322	<0.018-0.084	0	0
운영감독원	7	0.028	0.022	0.022	2.037	<0.015-0.071	0	0

* 노출기준은 석탄분진과 동일하게 1 mg/m³을 적용하였음

† “<”는 검출한계 미만을 뜻함

및 정비 시 바닥이나 설비에 퇴적된 분진의 재비산 또는 비상 시 설비로부터 누출되는 분진¹⁸⁾에 노출될 수 있었고, 보일러와 터빈에서 발생하는 소음과 고열에도 노출될 가능성이 있었다. 보일러건물의 바닥, 설비, 난간 등에서 퇴적된 분진이 관찰되었으나 터빈실은 바닥과 설비 등에 퇴적된 분진이 없고 깨끗하였다. 누출이 없는 경우 재비산된 이차분진에 의한 노출수준은 낮을 것으로 예상되었다. 작업자는 고정된 위치에서 작업하지 않고 순회점검하거나 당일 작업지시에 따라 이동하여 작업하므로, 대체로 작업시간 동안의 작업자의 위치에 따라 유해인자에 간헐적으로 노출될 것으로 예상되었다.

(2) 노출 위해성

보일러 및 터빈설비의 작업자에서 28개의 호흡성분진 개인시료가 채취되었다(표 III-12). 호흡성분진의 산술평균값은 모든 직종이 노출기준을 초과하지 않았으며, 가장 높은 측정값도 노출기준의 1/10 미만이었다. 직종별 산술평균값은

18) 밝은 색깔로 보아 석탄분진 보다는 석탄재 분진으로 추정되었다.

<표 III-13> 보일러 및 터빈설비 작업자의 소음 노출 수준

직무	자료수	산술평균 (dBA)	표준편차 (dBA)	범위 (dBA)	>85 dBA*	>90 dBA†
전체	37	71.1	8.9	47.5-88.9	1	0
기계공	10	71.2	6.7	59.5-81.6	0	0
전기공	11	69.0	9.5	47.5-79.4	0	0
발전기술원	8	78.9	5.6	69.2-88.9	1	0
운영감독원	8	66.0	9.4	48.0-76.9	0	0

* >85 dBA = 특수건강진단 대상

† 90 dBA = 노출기준

<표 III-14> 보일러 및 터빈설비의 고열 스트레스 지수 측정 결과

위치	사업장	WBGT (℃)	습구온도 (℃)	건구온도 (℃)	흑구온도 (℃)	상대습도 (%)	외부온도* (℃)
보일러설비 15층	A	29.2	25.3	37.9	38.5	40.1	20.7
보일러설비 분기 앞	A	24.9	22.6	28.4	30.1	44.8	20.7
보일러설비	B	37.2	29.9	47.2	54.1	12.4	17.6
보일러설비 11층	D	35.6	29.7	46.8	49.4	19.0	20.0
터빈건물설비 3층	A	28.7	24.8	36.4	37.9	28.5	20.7
터빈설비	B	29.8	25.2	39.4	40.7	23.8	17.6
터빈설비 3층	D	28.8	25.8	35.4	36.3	36.8	20.0

* 기상청 관측자료에 따른 해당지역의 당일 평균기온임

† 노출기준(중등작업 기준) : 계속작업 26.7℃, 매시간 75% 작업 25% 휴식 28℃, 매시간 50% 작업 50% 휴식 29.4℃, 매시간 25% 작업 75% 휴식 31.1℃

높은 순부터 발전기술원, 운영감독원, 기계공, 전기공 순이었다.

결정체 산화규소는 채취된 28개의 시료 중 27개에서 불검출¹⁹⁾되었으며 발전기술원(보일러 오퍼레이터)에서 채취된 하나의 시료에서 0.006 mg/m³이 검출되었다.

소음은 발전소 3개소에서 37개의 시료를 측정하였다. 모든 측정값은 노출기준 미만이었으며, 발전기술원(보일러 오퍼레이터)에서 측정한 하나의 자료(88.9 dBA)가 특수건강진단 대상 소음 수준의 기준인 85 dBA를 초과하였다(표 III-13).

고열은 발전소 3개소의 보일러과 터빈실에서 7지점의 고열 스트레스 지수를 측정하였다(표 III-14). 보일러 주변에서 측정된 4개 값 중 2개가 중등작업 시 매시간 25% 작업 75% 휴식 기준(31.1℃)을 초과하였고, 1개는 매시간 75% 작업 25% 휴식 기준(28℃)을 초과하였으며, 나머지 1개는 기준 미만이었다. 터빈 주변에서 측정된 3개 자료 중 1개는 매시간 50% 작업 50% 휴식 기준(29.4℃), 2개는 매시간 75% 작업 25% 휴식 기준(28℃)을 초과하였다.

3) 탈황설비

(1) 노출 특성

탈황설비의 순회점검과 석회석 하역장 운영, 전기설비, 계측제어장치, 기계설비의 점검 및 정비 시 석회석 분진과 설비에서 발생하는 소음에 노출될 가능성이 있었다. 대부분의 작업자는 고정된 위치에서 작업하지 않고 당일 작업지시에 따라 이동하여 작업하므로, 대체로 발생하는 유해인자에 작업시간동안의 위치에 따라 간헐적으로 노출되는 것으로 보였다.

(2) 노출 위해성

탈황설비의 작업자에서 5개의 호흡성분진 개인시료를 채취하였다(표 III-15).

19) 검출한계 : 0.0043 mg/sample

<표 III-15> 탈황설비 작업자의 호흡성분진 노출 농도*

직무	자료 수	산술 평균 (mg/m ³)	표준 편차 (mg/m ³)	기하 평균 (mg/m ³)	기하 표준 편차 (mg/m ³)	범위 (mg/m ³)	>노출 기준 [†]	>노출 기준
전체	5	0.040	0.041	0.028	2.503	<0.016-0.110	-	-
운영공	2	0.061	0.069	0.037	4.581	<0.018, 0.110	-	-
기계공	1	0.038	-	0.038	-	0.038	-	-
전기공	1	0.029	-	0.029	-	0.029	-	-
운영감독원	1	-	-	-	-	<0.016	-	-

* 탈황설비 작업자가 노출되는 분진은 석회석 분진임

† “<”는 검출한계 미만을 뜻함

* 석회석은 기타분진으로 분류되어 고용노동부의 총분진의 노출기준을 적용 시 10 mg/m³임. 본 연구의 측정값은 호흡성분진 농도이므로, 2020년 ACGIH TLV의 기타분진(Particles Not Otherwise Specified, PNOS)의 호흡성분진 기준인 3 mg/m³과 비교하여 평가하였음.

<표 III-16> 탈황설비 작업자의 소음 노출 수준

직무	자료수	산술평균 (dBA)	표준편차 (dBA)	범위 (dBA)	>85 dBA*	>90 dBA [†]
전체	5	71.2	11.8	53.9-82.7	0	0
운영공	3	79.1	3.8	75.2-82.7	0	0
전기공	1	64.6	-	64.6	0	0
운영감독원	1	53.9	-	54.9	0	0

* >85 dBA = 특수건강진단 대상

† 90 dBA = 노출기준

가장 높은 측정값(0.110 mg/m^3)은 석회석 하역벨트를 순찰한 운영공에서 측정된 값으로, ACGIH의 기타분진의 호흡성분진 농도기준(3 mg/m^3)의 3.7% 수준이었다.

결정체 산화규소는 측정한 5개 시료에서 모두 불검출²⁰⁾되었다.

소음은 발전소 3개소에서 5개의 측정값을 구하였다(표 III-17). 모든 측정값은 노출기준 미만이었으며, 특수건강진단 대상인 소음 수준인 85 dBA를 초과한 값은 없었다.

가스상 물질은 발전소 1개소의 탈황설비의 누출 가능 부위를 중심으로 측정하였으나, 이산화황이 검출되지 않았다.

4) 회처리설비

(1) 노출 특성

발전소 4개소 중 1개소는 회정제공장에서 비산재를 정제하여 외부로 반출하였고, 다른 3개소는 회정제를 거치지 않고 비산재를 외부로 반출하였다. 비산재는 회반출설비에서 탱크로리를 통해 다른 사업장으로 반출되었고, 바닥재는 회사장으로 운반하여 야적하거나 일부를 분쇄해서 반출하는 발전소도 있었다. 회처리설비의 운영 및 순회점검과 전기설비, 계측제어장치, 기계설비의 점검 및 정비 시 바닥이나 설비에 퇴적된 분진의 재비산이나 설비에서의 누출로 인한 분진 노출 가능성이 있었다. 비산재를 반출 시에는 발전사 또는 협력사 소속이 아닌 탱크로리의 운전자가 직접 회반출장치의 노즐을 탱크로리의 탱크 상부에 연결하여 비산재를 반출하였다. 이 과정에서 탱크의 개구부와 회반출장치의 끝단 사이의 공간에서 비산재가 비산되었고, 탱크에 비산재를 채운 후 노즐을 들어 올릴 때에도 비산재가 비산되었다.

20) 검출한계 : 0.0043 mg/sample

<표 III-17> 회처리설비 작업자의 호흡성분진 노출 농도

직무	자료 수	산술 평균 (mg/m ³)	표준 편차 (mg/m ³)	기하 평균 (mg/m ³)	기하 표준 편차 (mg/m ³)	범위 (mg/m ³)	>노출 기준*	>½노출 기준
전체	20	0.041	0.032	0.031	2.171	<0.014-0.122	0	0
운영공	11	0.038	0.031	0.038	2.180	<0.014-0.105	0	0
기계공	4	0.070	0.039	0.062	1.765	0.031-0.122	0	0
전기공	2	0.035	0.018	0.033	1.730	0.022-0.048	0	0
중기운전원	1	-	-	-	-	<0.016	0	0
운영감독원	2	0.021	0.013	0.019	1.997	<0.016-0.030	0	0

* 석탄분진의 노출기준(1 mg/m³)을 적용하였음.

† “<”는 검출한계 미만을 뜻함

<표 III-18> 회처리설비 작업자의 금속 노출 농도*

금속	자료수	산술 평균 (mg/m ³)	표준 편차 (mg/m ³)	범위 (mg/m ³)	>노출 기준†	>½노출 기준
크롬(Cr)	6	0.0004	0.0002	<0.0002-0.0007	0	0

* 총분진으로 채취한 금속 농도임

† 노출기준 = 크롬 0.5 mg/m³

* 크롬 외 금속 10 종은 모든 시료에서 불검출되었음. 검출한계는 비소(As) 0.53 µg/sample, 카드뮴(Cd) 0.35 µg/sample, 코발트(Co) 0.16 µg/sample, 크롬(Cr) 0.10 µg/sample, 수은(Hg) 0.69 µg/sample, 망간(Mn) 0.14 µg/sample, 니켈(Ni) 0.33 µg/sample, 납(Pb) 0.18 µg/sample, 탈륨(Tl) 0.16 µg/sample, 우라늄(U) 0.19 µg/sample, 바나듐(V) 0.08 µg/sample

‡ “<”는 검출한계 미만을 뜻함

<표 III-19> 회처리설비 작업자의 소음 노출 수준

직무	자료수	산술평균 (dBA)	표준편차 (dBA)	범위 (dBA)	>85 dBA*	>90 dBA [†]
운영공	4	83.4	3.7	78.4-87.3	1	0

* >85 dBA = 특수건강진단 대상

† 90 dBA = 노출기준

(2) 노출 위해성

회처리설비의 작업자에서 20개의 호흡성분진 개인시료를 채취하였다(표 III-17). 산술평균값은 모든 직종이 노출기준을 초과하지 않았으며, 가장 높은 측정값(0.122 mg/m^3)은 노출기준의 12% 수준이었다. 직종별 산술평균값은 높은 순부터 기계공, 운영공, 전기공, 운영감독원, 중기운전원 순이었다.

결정체 산화규소는 20개의 시료 중 19개에서 불검출²¹⁾되었으며 기계공에서 채취한 하나의 시료에서 0.007 mg/m^3 이 검출되었다.

금속은 개인시료 6개 중 5개에서 크롬이 검출되었으며, 나머지 평가한 금속 10종은 모든 시료에서 검출되지 않았다(표 III-18). 크롬의 노출농도는 측정된 최고값(0.0007 mg/m^3)을 기준으로 노출기준의 0.14% 수준이었다.

소음은 발전소 1개소에서 4개의 측정값을 얻었다(표 III-19). 모든 측정값은 노출기준 미만이었으며, 회처리 현장운전원에서 측정한 하나의 자료(87.3 dBA)가 특수건강진단 대상인 소음 수준인 85 dBA를 초과하였다.

5) 분석실험실

(1) 노출 특성

석탄 및 비산재의 시료채취와 실험실에서의 분석을 위한 전처리 과정 등에서 석탄이나 석탄재 분진에 노출될 가능성이 있었다. 발전소에 따라 시료를 채취

21) 검출한계 : 0.0043 mg/sample

<표 III-20> 분석실험실 작업자의 호흡성분진 노출 농도

직무	자료 수	산술 평균 (mg/m ³)	표준 편차 (mg/m ³)	기하 평균 (mg/m ³)	기하 표준 편차 (mg/m ³)	범위 (mg/m ³)	>노출 기준*	>1/2노출 기준
시료분석원	10	0.081	0.125	0.037	3.451	<0.013-0.402	0	0

* 노출기준 = 1 mg/m³
 † “<”는 검출한계 미만을 뜻함

하는 작업자와 분석자가 별도로 있거나, 분석자가 시료를 직접 채취하는 경우가 있었다.

(2) 노출 위해성

분석실험실의 작업자에서 호흡성분진 개인시료 10개를 채취하였다(표 III-20). 산술평균값은 노출기준을 초과하지 않았다. 가장 높은 측정값(0.402 mg/m³)은 정제회 분석원에서 측정되었으며 노출기준의 40%²²⁾ 수준이었다. 나머지 측정값은 0.155 mg/m³ 이하로 낮았다.

결정체 산화규소는 10개의 시료 중 9개에서 불검출²³⁾되었으며 정제회 분석원에서 채취된 하나의 시료에서 0.019 mg/m³이 검출되었다.

소음은 석탄 시료채취 및 검수를 주로 수행한 한 명의 작업자에서 측정한 결과 67.6 dBA이었다.

22) 석탄분진의 노출기준(1 mg/m³)을 적용하였음.
 23) 검출한계 : 0.0043 mg/sample

3. 작업환경관리

다음의 작업환경관리실태에 대한 관찰 결과는 평가대상 발전소 4개소의 일부 설비에서 연구진이 관찰한 사항으로, 별도의 언급이 없는 한 다음에 기술된 내용이 평가한 모든 발전소에 해당되거나 특정 발전소에만 해당됨을 의미하지 않는다.

1) 청소

작업장 청소와 관련하여 관찰된 내용은 다음과 같았다.

- 이송탑과 컨베이어 라인의 청소상태에 발전소 간에 차이가 관찰되었다. 낙탄의 청소를 위해 물청소설비, 고정식 진공청소설비 또는 이동식(차량) 진공청소설비가 설치되어 있었으나, 낙탄의 양이 많은 경우 삼질하여 대차나 호퍼에 담아 운반하거나 컨베이어에 다시 올리는 방식으로 청소하였다. 이 과정에서 높은 농도의 석탄분진에 노출될 우려가 있었다.
- 한 발전소는 이송탑의 바닥과 벽면의 수평 부위에 상당한 양의 분진이 쌓여 방치되어 있었고, 운탄 이후에 지체 없이 청소가 이루어지지 않는 것으로 보였다. 작업자가 이동하거나 설비 가동으로 인해 진동이 가해질 때 바닥과 설비에 침착된 분진이 재비산되었다.
- 효과적인 물청소를 위해서는 적절한 형태와 수압의 노즐을 사용하고 배수가 원활한 구조여야 하는데, 부분적으로 배수가 원활하지 않거나 바닥이 평탄하지 않아서 분진이 물과 함께 여울에 고여 있는 경우가 있었다.
- 일부 사업장에서 위층에 퇴적된 분진이 바닥의 틈이나 구멍 등 개구부를 통해 아래층으로 떨어지며 공기 중으로 비산되거나, 물청소 시 석탄이 포함된 물이 적절한 배수로가 아닌 바닥의 개구부를 통해 아래층으로 떨어져 바닥과 설비를 오염시켰다.
- 진공청소설비의 하부 호퍼에 수집된 분탄을 다시 컨베이어에 분거나 이송

- 탑 외부로 반출하여 옥내저탄장으로 옮긴 후 다시 상탄하였다. 이 과정에서 석탄분진이 다량 비산되고 분진이 재순환되었다.
- 일부 발전소의 옥내저탄장에서 빗자루가 관찰되었고, 작업자 인터뷰 시 마른 상태로 비질하기도 한다고 답하였다.
 - 기계공이나 전기공이 설비와 설비 주변 바닥이 분진에 오염된 상태로 설비를 정비하는 모습이 관찰되었다.
 - 일부 사업장의 회반출장 바닥과 설비가 비산재로 오염되어 있었다.

2) 환기

국소배기장치 및 전체환기설비와 관련하여 관찰된 내용은 다음과 같았다.

- 평가한 발전소 4개소 모두 석탄설비의 슈트에 포위식 국소배기장치가 설치되어 있었다. 발전소 2개소에 확인한 결과 국소배기장치의 설계된 제어풍속은 각각 0.78 m/s와 1 m/s로, 산업안전보건기준에 관한 규칙에서 정하는 제어풍속을 만족하였다. 다만 이 연구에서 제어풍속을 실측하거나 설계된 성능 이상으로 작동되는지 확인하지는 않았다.
- 슈트에서 국소배기장치에 포집된 석탄분진이 덕트를 통해 다음 컨베이어의 테일 부위로 공급되었다. 이 과정에서 컨베이어로 공급된 석탄분진이 공기중으로 비산되었고, 컨베이어로 위에 떨어진 분탄은 다음 컨베이어에서 이송되는 과정과 다음 슈트에서 다시 비산될 수 있었다.
- 포위식 국소배기장치 후드의 컨베이어가 드나드는 부위에 개구부를 최소화하기 위해 사이드 커튼이 설치되어 있었으나 손상된 상태로 방치되거나 사이드 커튼이 없는 경우가 있었다.
- 이동식 배탄기를 운영하는 발전소 3개소 중에서 1개소의 배탄기에는 상부에 국소배기장치가 설치되었으며, 2개소의 배탄기에는 국소배기장치가 설치되지 않았다.
- 고정식 배탄설비가 설치된 발전사의 설비는 슈트에 국소배기장치가 설치되

- 어 있었으나 슈트와 슈트 사이의 컨베이어는 개방된 상태였다.
- 회반출설비에서 탱크로리로 석탄재를 공급 시 노즐에 분진회수장치가 설치되지 않은 경우가 있었다. 회반출장치의 노즐 끝이 탱크로리의 탱크에 밀착되지 않은 경우 석탄재를 공급하는 동안 석탄재가 사이 공간을 통해 비산되었다. 특히 탱크로리가 아닌 덤프트럭에 석탄분진이나 석탄재를 반출할 때 다량의 분진이 발생하였다.
 - 분진을 반출하는 설비에 국소배기장치가 설치되어있지 않거나, 설치된 캐노피식 후드의 크기에 비해 덕트가 작고 연결된 제어풍속이 충분하지 않아 분진이 외부로 비산되는 경우가 있었다.
 - 석탄설비의 전체환기는 루버를 통한 자연환기가 일부 이뤄지고 있었고, 작은 창문이 있는 경우가 있었으나 개방하지는 않았다. 동력을 이용한 전체환기설비는 모든 발전소에서 관찰되지 않았다.

3) 분무/살수장치

석탄설비의 분무/살수장치와 관련하여 관찰된 내용은 다음과 같았다.

- 발전소 4개소 중 1개소의 옥내저탄장에 분무장치와 살수장치가 함께 설치되어 있었다. 1개소는 분무장치가 설치되어 있었고 다른 1개소는 살수장치가 설치되어 있었다.
- 발전소 4개소 중 1개소의 일부 이송탑에 분무장치가 설치되어 있었다.
- 발전소 4개소 중 1개소의 배탄기실에 분무장치가 설치되어 있었다.

4) 격리

유해물질의 누출 또는 작업자를 유해물질로부터 격리하기 위한 조치와 관련하여 관찰된 내용은 다음과 같았다.

- 한 발전소에서 설비를 슈트 근처의 점검창이 열린 채로 가동하여, 석탄을

- 이송하는 동안 석탄분진의 누설이 되어 공기 중에 비산되고 바닥에 축적되는 것이 관찰되었다.
- 일부 발전소에서 실링재와 라이너 플레이트 등이 노후되어 이격이 발생하거나 설비가 마모되어 분탄이 누출되어 공기 중에 비산되고 바닥에 축적되었다.
 - 옥내저탄장의 상/하탄기 컨트롤룸, 배탄기실의 배탄설비 컨트롤룸, 옥내저탄장 내에 작업하는 중기의 케빈 내에서 석탄분진 노출 가능성이 있었다.
 - 이 연구의 예비조사 시 한 발전소에서 고정식 배탄기의 슈트와 슈트 사이의 컨베이어를 밀폐한 것을 확인하였으나, 평가한 발전소의 같은 방식의 설비는 컨베이어가 개방된 구조였다.
 - 회반출 시 탱크로리 안에 석탄재가 들어간 양을 관찰하기 위해 작업자가 탱크의 개구부 위에서 내부를 관찰하며 노즐의 높이를 버튼으로 조작하였다. 이 과정에서 작업자가 비산되는 석탄재에 노출되었다. 몸에 묻은 석탄재를 털기 위해 압축공기를 사용하는 탱크로리 운전자와 회반출설비 운영공이 관찰되었다.

5) 개인보호구

개인보호구 착용과 관련하여 관찰된 내용은 다음과 같았다.

- 평가한 발전소 4개소의 석탄분진과 석탄재분진에 노출되는 모든 작업자는 반면형 1급 또는 특급방진마스크를 착용하고 있었다. 대부분의 작업자에게 특급마스크를 지급하는 발전소, 높은 분진농도에 노출되는 작업자에게 선별적으로 특급마스크를 지급하는 발전소 등 발전소 간에 특급마스크 착용 작업에 차이가 있었다. 낙탄처리 작업자는 발전소 4개소 모두 반면형 특급방진마스크를 착용하였다. 그 중 1개소의 낙탄처리 작업자는 분리식 반면형 특급 방진마스크를 착용하였으며, 그 외의 모든 작업자는 안면부 여과식 방진마스크를 착용하였다.

- 발전소 관계자의 말에 따르면 석탄화력발전소 특조위 보고서 이후 인체 발암성물질인 결정체 산화규소로부터 작업자를 보호하기 위해 특급 방진마스크를 지급하기 위해 노력하고 있다고 하였다.
- 한 발전소의 배탄기실 컨트롤룸 내에서 작업자가 호흡보호구를 착용하지 않거나, 옥내저탄장의 중기운전자가 케빈 내에서 호흡보호구를 착용하지 않은 모습이 관찰되었다.
- 일부 작업자가 방진마스크를 부적절하게 착용하는 사례가 관찰되었다. 방진마스크의 머리끈 두 개 중 하나만 머리에 걸거나 느슨하게 착용하는 사례가 관찰되었다.
- 일부 작업자의 면도 상태가 불량하여 방진마스크와 작업자 안면부의 밀착도가 낮고 분진이 누설될 우려가 있었다.
- 일부 작업자들은 특급 방진마스크 착용으로 인해 호흡의 불편함을 호소하였다. 사업주가 특급과 1급 방진마스크를 모두 지급하는데, 작업자가 1급 방진마스크를 선호하여 착용하기도 하였다.
- 방음보호구는 폼타입의 귀마개를 지급하고 있었다.

6) 작업환경측정

석탄과 석탄재와 관련된 작업환경측정 항목에 대한 조사 결과는 다음과 같았다.

- 2020년 상반기 작업환경측정 결과 기준으로 발전소 4개소 중 2개소는 석탄화력발전소 특조위 권고 사항에 따라 석탄분진 및 석탄재분진 노출 작업자의 석탄에 함유된 금속(비소, 수은, 니켈, 납)에 대한 노출평가와 일부 작업환경의 휘발성 유기화합물 농도수준에 대한 평가를 실시하였다.
- 발전소 4개소 모두 자연발화에 대비하여 옥내저탄장의 일산화탄소 농도를 모니터링하고 있었으나, 이 중 1개소는 가스농도가 제어실에서만 확인되고 옥내저탄장 출입구에 농도를 알릴 수 있는 장치가 설치되지 않았다.

- 발전소 4개소 중 1개소는 옥내저탄장 작업자에게 휴대용 가스농도측정기를 지급하였다. 한 발전소에서 한 작업자가 본인의 사비로 휴대용 가스농도측정기를 구매하여 착용하고 있는 것이 확인되었다.

7) 물질안전보건자료

석탄과 석탄재의 물질안전보건자료에 대해 조사한 결과는 표 Ⅲ-21과 같았다.

- 발전소 4개소 모두 석탄의 물질안전보건자료를 보유하고 있었으나, 그 중 2개소는 석탄재의 물질안전보건자료를 보유하지 않았다.
- 발전소 4개소에서 수집한 석탄의 물질안전보건자료 24개 중 19개(79%)는 유해성·위험성에 발암성 분류 1A가 기재되어 있지 않았고, 7개(29%)는 구성성분의 명칭 및 함유량에 결정체 산화규소가 함유되어 있음이 기재되어 있지 않았다. 석탄재의 물질안전보건자료는 확인한 2개 모두 발암성 분류 1A를 표기하였으나 결정체 산화규소의 함유는 표기되어 있지 않았다.
- 발전소 관계자의 말에 따르면 수출국가에서 제공되는 영문 물질안전보건자료가 부실하고 제공하는 국가마다 내용이 달라서 물질안전보건자료

<표 Ⅲ-21> 석탄과 석탄재의 물질안전보건자료 중 발암성과 결정체 산화규소 함유 기재 현황

구분	자료	발암성*		결정체 산화규소†	
		표기	미표기	표기	미표기
석탄	24	5	19	7	17
석탄재	2	2	0	0	2

* 물질안전보건자료의 작성항목 2. 유해성·위험성 가. 유해성·위험성 분류에 발암성 분류 1A 기재 여부

† 물질안전보건자료의 작성항목 3. 구성성분의 명칭 및 함유량에 결정체 산화규소(석영 포함)의 함유 기재 여부

를 충실하게 작성하기가 어렵다고 하였다.

8) 기타

기타 작업환경과 관련하여 관찰한 결과는 다음과 같았다.

- 발전사와 협력사가 별도의 건물에 화장실과 샤워실을 갖추고 있었다.
- 한 사업장에서 재하청업체의 작업자들이 적절한 휴식공간이 없어서 작업이 끝난 후에 작업장에서 서성이고 있는 것이 관찰되었다.
- 작업장으로부터 화장실 및 휴게시설의 거리가 멀어서 작업자들이 불편을 느끼는 경우가 있었다.
- 상탄라인의 컨베이어는 두 줄이 운영되는데 한 라인이 운탄 중에 다른 한 라인을 멈추고 정비작업하거나, 운탄 중에 이송탑 내에서 물청소하는 모습이 관찰되었다.
- 휴식시간 등에 흡연하는 작업자를 흔하게 볼 수 있었다.

IV. 고찰

1. 석탄과 석탄재의 유해물질

석탄은 유기물이 탄화되는 과정에서 생성된 다양한 유기물과 무기물로 구성된다. USGS(2003)는 석탄에서 120종 이상의 광물이 확인되었으며 이 중 33종은 대부분의 석탄에서 확인되었는데, 그 중에서도 석영, 카올리나이트, 일라이트 등 8종이 일반적으로 주요 성분으로 간주할 수 있을 만큼 존재한다고 하였다(표 IV-1). 본 연구에서 분석한 9종의 석탄 중 인도네시아산 저열량탄(0.6%)을 제외한 8종의 석탄에서 결정체 산화규소(석영)가 1% 이상 검출되었다.

<표 IV-1> 석탄에 함유된 주요 광물

물질	화학조성	비고
석영(quartz)	SiO ₂	
카올리나이트(kaolinite)	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	
일라이트(illite)	KAl ₄ (AlSi ₇ O ₂₀)(OH) ₄	
몬모릴로나이트(montmorillonite)	(1/2Ca,Na) _{0.7} (Al,Mg,Fe) ₄ [(Si,Al) ₄ O ₁₀] ₂ (OH) ₄ ·nH ₂ O	Mn(점토류는 Mn, Be, Cr, Ni 또는 다른 미량 원소) 함유 가능
녹니석(chlorite)	(Mg,Al,Fe) ₁₂ [(Si,Al) ₈ O ₂₀](OH) ₁₆	As, Cd, Co, Hg, Ni, Sb, Se 함유 가능
황철석(pyrite)	FeS ₂	
방해석(calcite)	CaCO ₃	
능철석(siderite)	FeCO ₃	Mn 함유 가능

자료출처 : USGS(2003)

석탄재는 석탄의 탄소성분이 보일러에서 연소되는 과정에서 불연성 물질이 농축되므로, 결정체 산화규소의 함유율이 석탄에 비해 높았다. 석탄재의 평균 실리콘 함유율(비산재 20.95%, 바닥재 27.65%)을 기준으로 검출된 실리콘을 모두 산화규소(SiO_2)로 가정하여 함유율을 계산하면 비산재 44.8%, 바닥재 59.2%였다. 그러나 본 연구 결과의 결정체 산화규소 함유율은 비산재 2.0%~9.8%, 바닥재 5.6%~20.1%로 이에 비해 크게 낮았다. ASTM의 시험법에 따라 석탄과 석탄재의 원소를 분석 시에는 검출된 실리콘(Si)을 모두 SiO_2 함유율로 환산하여 표기하므로, 이 결과가 곧 결정체 산화규소의 함유율을 의미하지는 않는다. Hicks와 Yager(2006)는 미국 내 6개 발전소의 석탄재 중 결정체 산화규소 함유율을 분석하였는데, 유연탄을 연료로 사용하는 발전소의 석탄재의 결정체 산화규소 함유율은 2.3~6.1%로 본 연구결과와 큰 차이를 보이지 않았다. Borm(1997)은 석탄 비산재의 구성성분은 소량의 멀라이트($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)와 석영이 함유된 비결정형 실리콘-알루미늄-유리질 약 60~80%, 수%의 철, 칼슘과 미연탄소를 함유한다고 하여 석탄재에 함유된 실리콘의 일부가 결정체 산화규소로 존재한다는 본 연구의 분석 결과를 지지한다.

박동원 등(2013)은 국내 4개 석탄화력발전소의 바닥재 중 금속 용출시험을 실시한 결과를 보고하였는데 검출된 금속 농도는 구리 10.8 ppm~45.6 ppm, 카드뮴 2.2 ppm~14.0 ppm, 납 0.8 ppm~31.5 ppm, 비소 1.4 ppm~5.4 ppm, 아연 17.1 ppm~31.2 ppm, 니켈 29.9 ppm~103.5 ppm, 붕소 20.8 ppm~52.4 ppm, 바나듐 39.9 ppm~51.7 ppm, 크롬 5.0 ppm~13.4 ppm, 셀레늄 1.3 ppm~4.5 ppm, 스트론튬 27.7 ppm~248.9 ppm, 몰리브덴 0.6 ppm~2.1 ppm, 안티몬 1.28 ppm~1.85 ppm, 바륨 41.4 ppm~1044.6 ppm, 우라늄 0.29 ppm~1.53 ppm, 수은 0.07 ppm~4.61 ppm, 탈륨 0.04 ppm~0.05 ppm, 알루미늄 2640.3 ppm~10693.4 ppm, 철 4905.7 ppm~28273.2 ppm, 망간 101.5 ppm~381.0 ppm으로, 비소 등 미량원소의 함유율은 대체로 본 연구의 분석결과와 작업자의 노출량에 유의미한 차이를 보일 만큼 큰 차이를 보이지 않았다. 박동원 등의 분석결과를 바탕으로

볼 때 본 연구에서 벌크시료에서 분석하지 않은 탈륨과 우라늄의 함유율도 수 ppm 이하 수준일 것으로 추정되었다. 본 연구에서 작업자의 노출평가를 실시한 금속 11 종의 석탄 내 최대 함유율을 퍼센트 농도로 환산하면 크롬 0.011%, 망간 0.01%, 바나듐 0.0085% 순이었고, 석탄재는 망간 0.09%, 바나듐 0.0162%, 크롬 0.0087% 순으로 석탄과 석탄재에서 0.1% 이상 검출된 금속은 없었다. 따라서 공기 중 금속의 낮은 농도를 고려할 때, 본 연구에서 검출된 수준의 금속으로 인해 작업자의 유의미한 작업환경 중 노출은 발생하지 않을 것으로 판단된다.

석탄재에 함유된 금속은 보일러에서의 연소과정에서 높은 산화수를 가질 수 있다. 그 중에서도 크롬과 바나듐은 산화수에 따라 독성의 차이가 있다. Stam 등(2011)은 X-선 흡수분광학(X-ray absorption fine structure, XAFS)으로 분석한 결과, 비산재에 함유된 크롬 중 산화수 6가(6가크롬)의 비율이 5-9%이었다고 보고하였다. 본 연구의 크롬 함유율에 6가크롬의 크롬 중 최고 함유율 9%를 적용해서 계산하면 석탄재의 6가크롬 함유율은 비산재 1.9 ppm-9.4 ppm, 바닥재 1.9 ppm-7.6 ppm으로 추정되었다.

석탄의 휘발성 유기용제 중 벤젠, 톨루엔, 자일렌, 노말헥산은 석탄의 벌크시료에서 검출되었으나 휘발성 유기용제의 석탄으로부터의 탈착 정도를 알 수 없고, 크로마토그램 상에서 다양한 피크가 중첩되어 그 양을 확인할 수 없었다. Fernández-Martinez 등(2000)은 일정량의 석탄이 주입된 열탈착관을 350°C의 온도로 탈착하고 GC-MS로 분석하여 남아프리카공화국산 아역청탄에서 평균 벤젠 7.25 µg/g, 톨루엔 12.31 µg/g, 자일렌 4.67 µg/g, 에틸벤젠 1.86 µg/g, 스티렌 7 µg/g 등 방향족 탄화수소와 헵탄 4.23 µg/g, 옥탄 12.21 µg/g 등 지방족 탄화수소를 검출하였으며, 스페인산 역청탄에서 평균 벤젠 14.83 µg/g, 톨루엔 18.86 µg/g, 자일렌 5.21 µg/g, 에틸벤젠 1.21 µg/g, 스티렌 1.19 µg/g 등 방향족 탄화수소와 헵탄 3.02 µg/g, 옥탄 0.70 µg/g 등 지방족 탄화수소를 검출하였다. 석탄재에서는 유기용제가 석탄보다 낮은 수준으로 검출되었다. 본 연구와

Fernandez-Martinez 등의 연구결과는 고온에서 유기용제를 석탄의 탄소성분으로부터 탈착시켜 얻은 결과이므로, 상온인 작업환경에서는 검출된 유기용제가 모두 공기 중에 휘발되지 않음을 고려해야 한다. 따라서 벌크시료의 분석결과를 작업자의 공기 중 농도 수준과 바로 연결 지을 수 없으며, 상온 조건에서 석탄으로부터 유기용제가 탈착되어 유의미한 노출이 발생하는지 여부는 공기 중 농도를 측정된 결과를 통해 판단하여야 한다. 본 연구에서는 옥내저탄장과 배탄기실 공기 중에서 벤젠, 톨루엔, 자일렌, 노말헥산이 불검출되어, 석탄에 함유된 유기용제로 인한 유의미한 노출은 없을 것으로 판단되었다.

2. 유해인자 노출 위해성

정해진 작업위치에서 매일 유사한 작업을 수행하는 일반적인 제조업과 달리 석탄화력발전소의 대부분의 작업자는 작업 당일의 작업조건과 작업내용에 따라 노출농도의 일간 변이와 일내 변이가 매우 클 것으로 예상되었다. 그날의 작업 위치, 작업시간, 작업내용, 운탄량, 낙탄 발생량, 설비의 누설 또는 이상 여부, 청소 상태, 석탄의 습기를 머금은 정도, 석탄의 분탄 함유 정도, 기상상황 등 노출농도에 영향을 미칠 수 있는 다양한 변수로 인해 본 연구의 노출평가를 통해 발생 가능한 모든 작업상황의 노출 수준을 평가하기는 어려웠다. 이러한 이유로 본 연구의 측정값을 해석 시에는 유사노출군의 평균과 통계적 분포와 함께, 높은 이상값에 대해서도 측정 당시의 작업상황을 고려하여 의미를 파악하고 주의를 기울일 필요성이 있었다.

1) 석탄분진 및 결정체 산화규소

호흡성분진과 결정체 산화규소는 석탄설비의 운영공 중 낙탄청소작업자에게서 노출기준을 초과하는 값이 측정되었다(표 IV-2, 그림 IV-1, 그림 IV-2). 석탄설비 운영공이 건조한 상태에서 분탄이 많은 낙탄을 삼질하거나 물청소 시

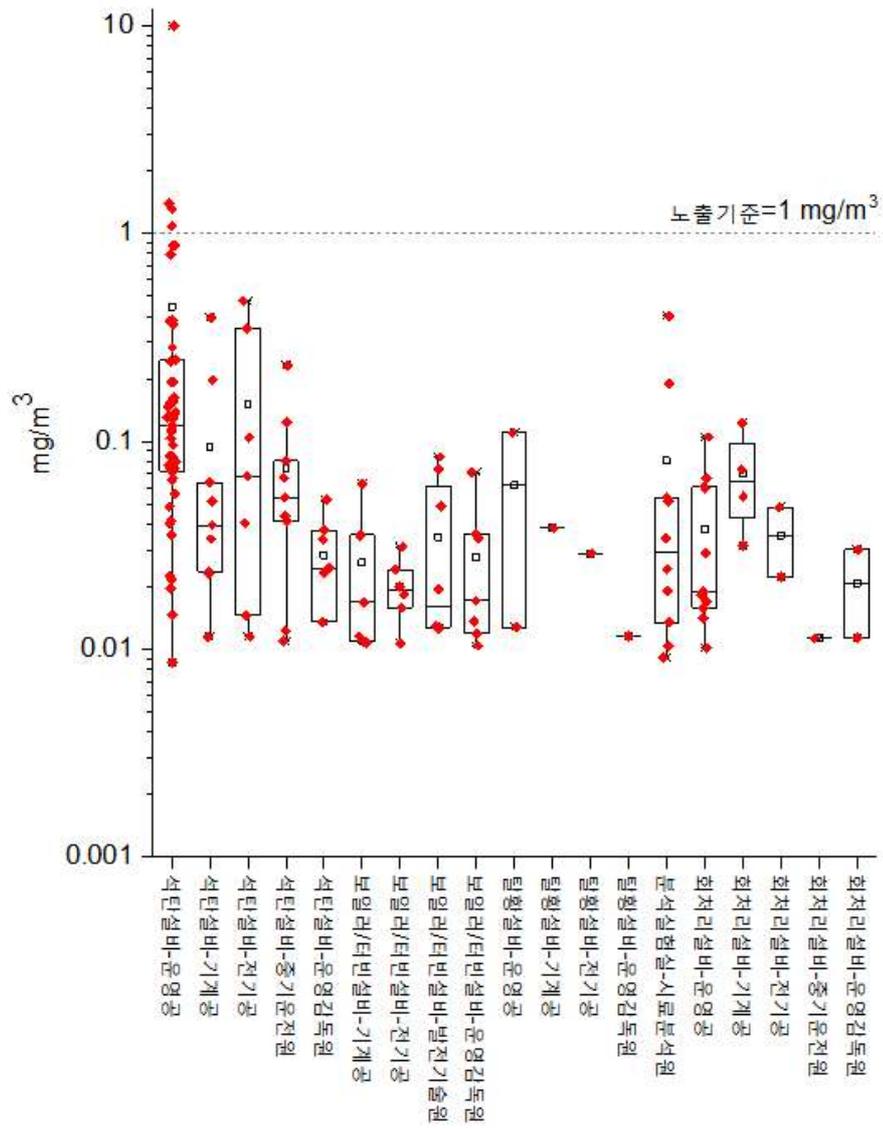
호흡성분진 또는 결정체 산화규소의 노출수준이 노출기준을 초과하였다. 특히 케이싱 내 협소한 공간에서 마른 상태의 분탄을 삽질하는 작업 시 호흡성분진이 노출기준의 약 10배에 가까웠고 결정체 산화규소가 노출기준의 11배를 초과하였다. 호흡성분진이 노출기준을 초과한 4개 자료는 모두 청소작업에서 측정되었으며, 그 중 상위 3개 자료는 분탄이 많은 낙탄을 건조한 상태에서 삽질하여 청소한 작업자에게서 측정되었다. 가장 높은 두 값(9.996 mg/m^3 , 1.398 mg/m^3)이 측정된 작업자들은 오전에 컨베이어 이송탑의 케이싱 내부에서 낙탄을 청소하고 오후에는 개방된 곳에서 작업하였으며 이러한 작업량은 평소 수준이라고 응답하였다. 다른 노출기준을 초과한 두 측정값 중 하나(1.315 mg/m^3)는 배탄기실의 분탄을 삽질한 청소작업자의 노출농도였으며 이 작업은 매일 있지 않고 간헐적으로 실시하는 작업이라고 하였다. 나머지 한 측정값(1.083 mg/m^3)은 이송탑의 물청소를 실시한 작업자에게서 측정되었으며, 해당 작업자는 측정일이 다른 날에 비해 먼지가 적은 편이었다고 답하여 작업일에 따라 보다 높은 노출수준을 보일 수도 있을 것으로 추정되었다. 결정체 산화규소의 농도가 노출기준을 초과한 자료 4개는 모두 건조한 상태에서 분탄이 많은 낙탄을 삽질하여 청소한 작업자에게서 측정된 값이었다. 석탄설비의 낙탄청소작업자를 제외한 운영공에게서는 석탄분진과 결정체 산화규소 모두 노출기준의 1/2를 초과하는 값이 측정되지 않았다.

본 연구에서는 옥내저탄장에서 상탄 후 낙탄을 바닥에서 긁어 삽으로 컨베이어에 퍼 올리는 작업을 실시한 5명의 작업자에게서도 호흡성분진과 결정체 산화규소를 측정하였는데, 호흡성분진은 최고 0.102 mg/m^3 , 결정체 산화규소는 최고 0.007 mg/m^3 으로 낮게 나타났다. 하역작업에서는 벌크선의 홀드 내의 집탄작업자 2명과 중기운전원 2명에게서 측정한 결과, 호흡성분진은 최고 0.049 mg/m^3 이었고 결정체 산화규소는 모두 불검출($<0.006 \text{ mg/m}^3$)되었다. 옥내저탄장의 낙탄처리작업과 선박 내 집탄작업의 호흡성분진과 결정체 산화규소 노출농도가 낮게 나타난 이유는 석탄이 습기를 머금고 분탄이 적게 함유되어서인

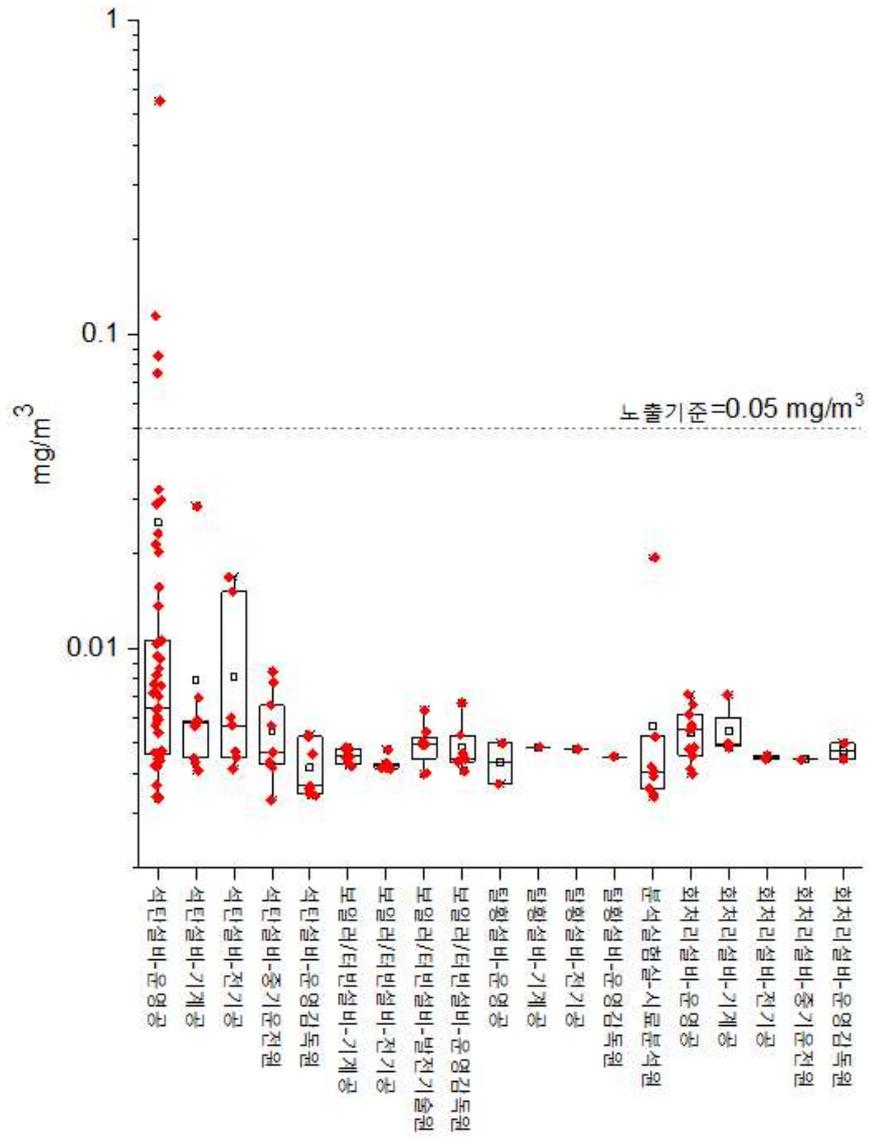
것으로 추정된다. 선박에서 하역 시에는 석탄이 어느 정도 습기를 머금고 있고 분탄이 적지만 저탄장에서 보일러로 운반되면서 저장, 혼합, 분쇄, 선별되는 과정을 거치며 석탄이 건조해지고 분탄의 함유율이 높아지므로, 석탄이 보일러에 근접할수록 석탄분진의 비산성이 높아지는 것으로 보인다.

유사노출군별 측정 자료가 대수정규분포를 따르는 경우 노출기준 초과 가능성을 통계적으로 분석한 결과(Mulhausen과 Damiano, 1998), 호흡성분진은 석탄설비 운영공의 95% 상한값이 노출기준을 초과하였고, 석탄설비 전기공은 노출기준의 1/2를 초과하였다. 반면에 보일러/터빈설비의 기계공, 전기공, 발전기술원, 운영감독원과 회처리설비 운영공은 95% 신뢰수준으로 95% 상한값이 노출기준을 넘지 않았다(표 IV-3; IV-4). 결정체 산화규소는 석탄설비 운영공의 95% 상한값이 노출기준을 초과하였다. 다만 측정값의 분포에 따른 통계자료의 해석 시 본 연구는 발전소간의 노출특성에 관계없이 직무에 따라 유사노출군을 구분하였으므로, 보다 정확한 평가를 위해서는 각 발전소별로 보다 세분화된 직무별로 평가할 필요성이 있음을 고려해야 한다.

ACGIH는 결정체 산화규소의 노출기준 0.05 mg/m^3 이 노출된 근로자의 대부분을 규폐증(폐 섬유화)과 폐암으로부터 보호하기에 충분하지 않다는 역학연구 결과를 바탕으로 2006년에 권고기준을 0.025 mg/m^3 로 강화하였다(ACGIH, 2010). 따라서 작업자의 건강보호를 위해 결정체 산화규소의 노출로 인한 위해성평가 시 ACGIH의 권고기준(0.025 mg/m^3)을 기준으로 측정자료를 해석하는 것은 의미가 있다. 본 연구에서 측정값 중 8개가 ACGIH가 권고하는 결정체 산화규소의 노출기준인 0.025 mg/m^3 을 초과하였으며, 이 중 7개는 운영공의 청소 및 순찰작업에서 측정되었고 1개는 기계공에서 측정되었다. 기계공은 측정 당일 이송탑 내 설비의 베어링 교체작업을 실시하였다. 이러한 측정결과는 기계공이 이송탑 내부에서 기계정비작업 시에도 유의미한 수준의 결정체 산화규소 노출이 발생할 수 있다는 점을 보여준다.



[그림 IV-1] 유사노출군별 호흡성분진 노출 농도



[그림 IV-2] 유사노출군별 결정체 산화규소 노출 농도

<표 IV-2> 석탄설비 작업자의 호흡성분진 및 결정체 산화규소 노출농도 상위 10위 내 작업 내용*

농도(mg/m ³)		직무	작업내용 [†]
호흡성분진	결정체산화규소		
9.996	0.554	운영공	낙탄처리, 타워 4개(TTT-TT-SCB-BB) 멈추고 케이싱 내부 들어가서 삽질 2시간30분, 오후는 개방된 곳 6번타워 밖에 작업, 평소 이정도 작업한다고 함.
1.398	0.115	운영공	낙탄처리, 타워 4개(TTT-TT-SCB-BB) 멈추고 케이싱 내부 들어가서 삽질 2시간30분, 오후는 개방된 곳 6번타워 밖에 작업, 평소 이정도 작업한다고 함.
1.315	0.029	운영공	1-4호기 피더, 1-3호기 피더 순찰, 집진기 점검, 1발전소 트리퍼 오버플로 청소(자갈 및 분탄 삽질). 오버플로 발생 시 드물게 있는 작업이라 함.
1.083	0.016	운영공	TT05 물청소, 컨베이어 가동 중 작업하기도하고 아닐 때도 있었음. 오늘은 먼지가 많이 없는 편이었음.
0.885	0.085	운영공	1-4 트리퍼 운영, 순찰, 오버플로 청소(자갈 및 분탄 삽질). 오버플로 발생 시 드물게 있는 작업이라 함.
0.877	0.032	운영공	컨베이어 물청소 1시간, 나머지 시간은 컨베이어 가동 중 점검 실시.
0.795	0.075	운영공	1-4 트리퍼 운영, 순찰 오버플로 청소(자갈 및 분탄 삽질)
0.475	0.017	전기공	석탄설비 전기정비, 오전 사무실 케이블 작업, 오후 BB 상부 설비 가동 중 등 교체 2-3시간 정도, 오전 사무실 작업으로 평소비해 측정당일 노출 적은편이라 함.
0.402	0.019	시료분석원	회정제공장 정제회 분석, 미연탄소 분석.
0.394	0.028	기계공	TT05A 베어링교체작업.
0.380	0.023	운영공	육내저탄장 운영.
0.363	0.030	운영공	트리퍼 9, 10호기 청소작업.
0.247	0.021	운영공	진공차 운영. 타워 외부로 이탄된 낙탄(분탄)을 개방된 곳에서 진공차로 흡입.

* 호흡성분진과 결정체 산화규소 상위 10개 작업 중 7개 자료가 중복되며, 호흡성분진 농도 순으로 정렬하였음.

† 채취된 시료를 회수 시 작업자에게 직접 인터뷰한 시료채취한 날의 작업내용임.

■ 노출기준 초과, ▨ 노출기준 1/2 초과

<표 IV-3> 유사노출군별 호흡성분진 노출 농도의 대수정규분포 통계 결과

직무	N	AM (mg/m ³)	95th Percentile (mg/m ³)	UTL _{95%,95%} (mg/m ³)	%>OEL	UCL _{1,95%} %>OEL
석탄설비						
운영공	49	0.444	1.181	2.062	6.453	12.182
기계공	9	0.093	0.311	1.434	0.342	7.479
전기공	7	0.152	0.746	9.342	3.231	22.790
중기운전원	9	0.074	0.256	1.008	0.125	5.052
운영감독원	7	0.028	0.059	0.145	0.000	<0.111
보일러/터빈설비						
기계공	7	0.026	0.067	0.232	0.000	0.281
전기공	6	0.020	0.035	0.074	0.000	<0.263
발전기술원	8	0.035	0.100	0.367	0.001	0.964
운영감독원	7	0.028	0.071	0.247	0.000	0.330
탈황설비						
운영공	2	0.061	0.458	-	1.548	63.960
기계공	1	0.038	-	-	-	-
전기공	1	0.029	-	-	-	-
운영감독원	1	0.012	-	-	-	-
분석실험실						
시료분석원	10	0.081	0.280	1.346	0.378	6.886
회처리설비						
운영공	11	0.038	0.102	0.255	0.000	0.211
기계공	4	0.070	0.159	1.164	0.000	6.087
전기공	2	0.035	0.081	-	0.000	<43.065
중기운전원	1	0.011	-	-	-	-
운영감독원	2	0.021	0.058	-	0.000	44.031

* N = 자료수, AM = 산술평균, 95%th percentile = 95% upper confidence limit, UTL_{95%,95%} = UCL_{1,95%} for 95th percentile, %>OEL = 1 mg/m³ 초과 %, UCL_{1,95%}>OEL = 1 mg/m³ 초과 %의 95% UCL

† 검출한계 미만인 자료는 검출한계/√2를 농도로 계산하여 산출하였음.

<표 IV-4> 유사노출군별 결정체 산화규소 노출 농도의 대수정규분포 통계 결과

직무	N	AM (mg/m ³)	95th Percentile (mg/m ³)	UTL _{95%,95%} (mg/m ³)	%>OEL	UCL _{1,95%} %>OEL
석탄설비						
운영공	49	0.025	0.051	0.080	5.255	10.466
기계공	9	0.008	0.017	0.038	0.023	2.630
전기공	7	0.008	0.018	0.051	0.038	5.202
중기운전원	9	0.005	0.009	0.014	0.000	<0.027
운영감독원	7	0.004	0.006	0.008	0.000	<0.111
보일러/터빈설비						
기계공	7	0.005	0.005	0.006	0.000	<0.111
전기공	6	0.004	0.005	0.005	0.000	<0.263
발전기술원	8	0.005	0.006	0.008	0.000	<0.052
운영감독원	7	0.005	0.006	0.008	0.000	<0.111
탈황설비						
운영공	2	0.004	0.006	-	0.000	<43.065
기계공	1	0.005	-	-	-	-
전기공	1	0.005	-	-	-	-
운영감독원	1	0.005	-	-	-	-
분석실험실						
시료분석원	10	0.006	0.011	0.022	0.000	0.310
회처리설비						
운영공	11	0.005	0.007	0.009	0.000	<0.000
기계공	4	0.005	0.007	0.014	0.000	<2.532
전기공	2	0.004	0.005	-	0.000	<43.065
중기운전원	1	0.004	-	-	-	-
운영감독원	2	0.005	0.005	-	-	<43.065

* N = 자료수, AM = 산술평균, 95th percentile = 95% upper confidence limit, UTL_{95%,95%} = UCL_{1,95%} for 95th percentile, %>OEL = 1 mg/m³ 초과 %, UCL_{1,95%}>OEL = 1 mg/m³ 초과 %의 95% UCL

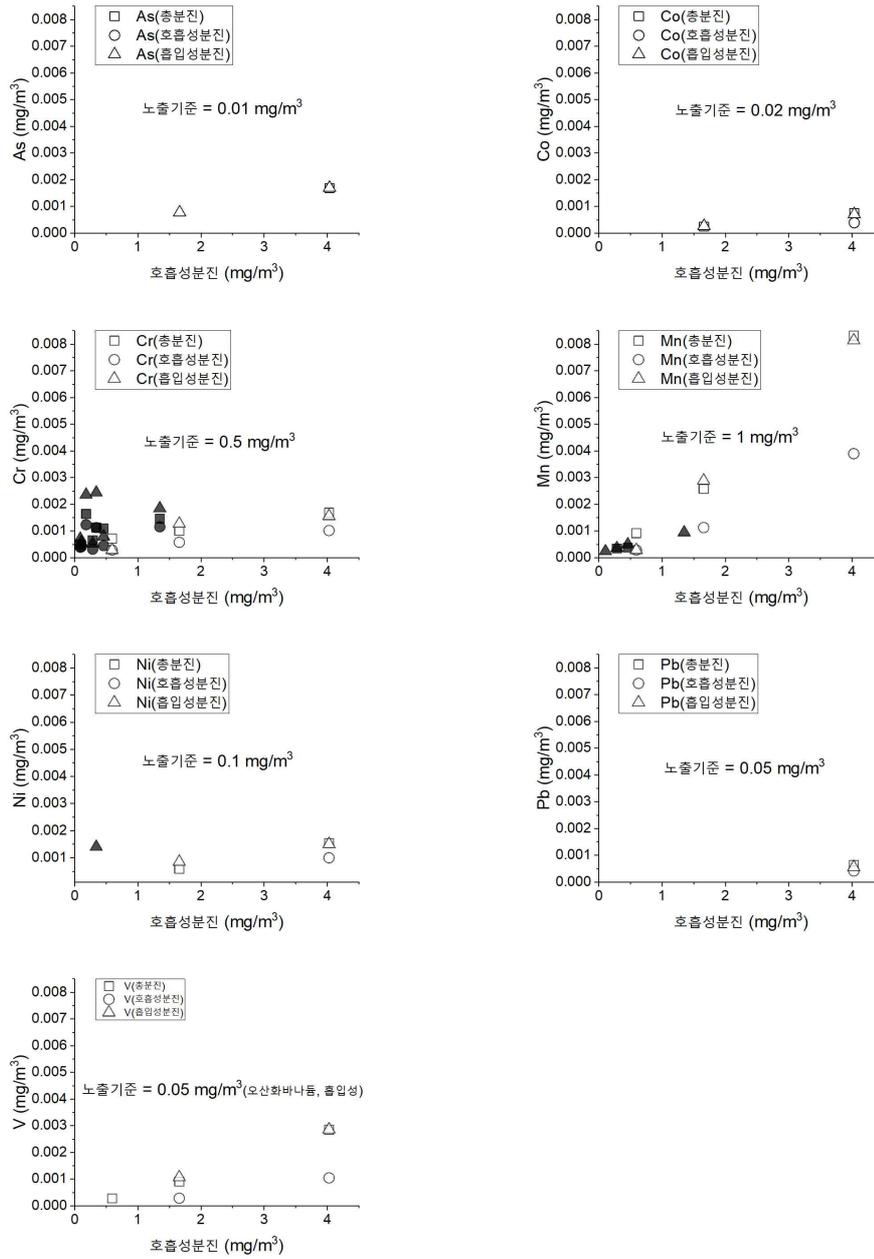
† 검출한계 미만인 자료는 검출한계/√2를 농도로 계산하여 산출하였음.

2) 금속

작업자의 금속 노출은 높은 농도의 분진에 노출될 것으로 예상되는 석탄설비와 회처리설비 작업자를 대상으로 측정하였으나 작업환경에서의 노출기준과 비교하여 유의미한 수준의 측정값을 보이지 않았다. 본 연구에서 측정한 작업자 개인시료의 최대값은 석탄설비 작업자는 크롬 0.0007 mg/m^3 , 망간 0.0004 mg/m^3 , 바나듐 0.0002 mg/m^3 , 회처리 작업자는 크롬 0.0007 mg/m^3 이었고 다른 금속은 검출되지 않아 모두 노출기준의 1% 수준에 미치지 못하였다²⁴⁾.

옥내저탄장, 배탄기실, 회처리장에서 채취된 지역시료의 금속농도는 회처리장에서 채취된 비소 1개 시료(17%)외의 모든 자료가 작업환경 노출기준의 10% 미만이었다(그림 IV-3). 총분진을 기준으로 석탄분진을 포집한 지역시료에서는 평가한 11종의 금속 중 크롬, 망간이 검출되었고 나머지 금속 9종은 검출되지 않았다. 비산재를 포집한 지역시료에서는 평가한 11종의 금속 중 비소, 코발트, 크롬, 망간, 니켈, 납, 바나듐이 검출되었고 나머지 금속 4종은 검출되지 않았다. 본 연구에서 비산재의 지역시료는 비산재를 탱크로리에 주입하는 부분의 약 1 m 위의 노즐 옆에서 측정하였으므로 회반출장의 일반적인 비산재 농도에 비해 가혹한 조건에서 측정된 것임을 고려할 필요가 있다. 석탄화력발전소 특조위 보고서(2019)는 태안발전본부 옥내저탄장의 공기 중 금속농도가 비소 0.0032 mg/m^3 , 크롬 0.109 mg/m^3 , 납 0.0826 mg/m^3 , 니켈 0.019 mg/m^3 이었다고 하여 본 연구결과와 대비되었다. 이러한 차이는 시료채취 당일 환기상태 등에 따른 채취된 분진량이나 석탄의 중금속 함유율의 차이에서 비롯된 것일 수도 있으나, 본 연구에서 석탄의 금속 함유율이 망간을 제외하면 최대 약 100 ppm 수준임을 고려할 때 통상적인 공기 중 석탄분진 농도에서 금속이 석탄화력발전소 특조위 보고서와 같은 수준으로 측정되기는 어려워 보인다. 비소의

24) 바나듐의 노출기준은 없으므로, 검출된 바나듐(V)이 모두 오산화바나듐으로 존재한다고 가정하고 입자의 크기분률과 관계없이 농도값을 오산화바나듐의 노출기준과 단순 비교하였다. 관련 자료를 확인할 수는 없지만 대부분의 석탄 내 바나듐은 광물 내 미량원소로 존재하며 오산화바나듐으로 존재하지 않을 것으로 추정된다.



[그림 IV-3] 지역시료의 호흡성분진과 금속의 공기 중 농도 비교.
 검은색 도형은 석탄분진, 흰색 도형은 석탄재분진임. 검출한계 이상인 자료만 활용하였음. 모든 시료가 불검출된 금속은 도표작성에서 제외하였음.

경우로 예를 들면 비소의 함유율이 입자의 크기에 관계없이 본 연구의 석탄에서 분석된 가장 높은 비소 함유율인 25 ppm이라는 가정 하에, 분진농도가 10 mg/m³일 때 비소의 농도는 0.00025 mg/m³로 추정된다. Yager 등(1997)은 저질 갈탄을 연료로 사용하는 석탄화력발전소의 보일러와 전기집진장치 내부 석탄재 청소작업 시 작업자의 비소 노출이 노출기준(0.01 mg/m³)을 초과하는 수준(평균 0.0483 mg/m³, 0.00017 mg/m³-0.3752 mg/m³)이었다고 보고하였다. 그러나 Yager 등의 연구에서 작업자가 노출된 비산재의 비소 함유율은 800 ppm으로 본 연구에서 분석된 비산재의 최고 비소 함유율(43 ppm) 보다 약 20배 가까이 높았다.

3) 휘발성 유기화합물

옥내저탄장이 다량의 석탄이 쌓여 있고 환기량이 많지 않은 불리한 조건임을 고려하여 유기용제의 농도가 가장 높은 지역일 것으로 예상하고 측정하였으나 발전소 3 개소의 옥내저탄장은 물론 배탄기실에서도 벤젠, 톨루엔, 자일렌, 노말헥산은 검출되지 않았다. 석탄화력발전소 특조위(2019)는 태안발전본부 옥내저탄장의 공기 중에 휘발성 유기화합물을 측정한 결과 벤젠 0.12 ppm, 톨루엔 0.14 ppm 이었다고 하여 본 연구결과와 대비되었다. 이러한 차이는 시료채취 당일 환기상태, 석탄의 유기화합물 함유율, 저탄장 내 온도, 측정당일 자연발화 여부 등의 차이에 따라 발생할 수 있으나, 본 연구의 측정결과를 근거로 볼 때 자연발화가 없는 경우 유기화합물의 유의미한 노출이 발생할 가능성은 낮다고 판단된다.

4) 일산화탄소, 이산화황

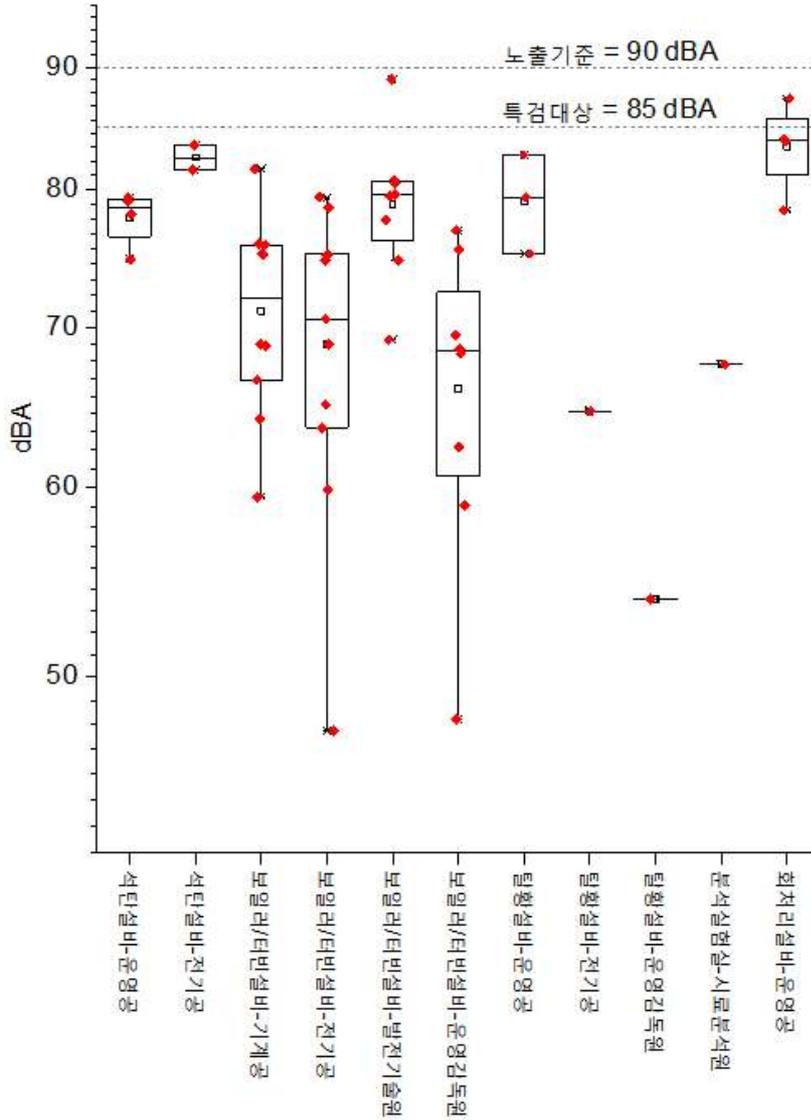
발전소 1개소의 옥내저탄장에서 287 분간 가스농도를 측정하고, 다른 발전소 1개소에서 탈황공정의 누설 가능 부위에서 가스농도를 측정한 결과 일산화탄소

와 이산화황 모두 검출되지 않았다. 옥내저탄장에서 석탄의 자연발화가 발생하거나 탈황공정에서 누설이 발생하지 않는 경우 일산화탄소와 이산화황에 대한 유의미한 노출은 발생하지 않을 것으로 예상되나, 본 연구의 측정값이 한 사업에 대해 위치별 1회로 제한적인 결과임을 고려할 필요가 있다.

5) 소음

유사노출군별 소음노출 수준은 평균값 기준으로 높은 순부터 회처리설비 운영공, 석탄설비 전기공, 탈황설비 운영공, 보일러/터빈설비 발전기술원 순이었다(그림 IV-4). 소음의 측정 자료가 대수정규분포를 따르는 경우 유사노출군별 노출기준 초과 가능성을 통계적으로 분석한 결과(Mulhausen과 Damiano 1998), 95% 상한값이 노출기준을 초과하는 유사노출군은 없었으나 보일러/터빈설비의 기계공, 전기공, 발전기술원, 운영감독원과 탈황설비 운영공, 회처리설비의 운영공의 95% 신뢰수준의 95% 상한값은 노출기준을 초과하여 작업상황에 따라 노출기준을 초과할 가능성이 있었다. 보일러/터빈설비의 전기공, 발전기술원과 탈황설비 운영공, 회처리설비 운영공의 95% 상한값은 특수건강진단 대상을 정하는 기준인 85 dBA를 초과하였다(표 IV-5).

측정값별로는 노출기준을 초과한 측정값은 없었지만 보일러 오퍼레이터에서 측정된 값(88.9 dBA)과 회처리 현장운전원에서 측정된 값(87.3 dBA)이 소음에 대한 특수건강진단 대상을 정하는 수준인 85 dBA를 초과하였다. 석탄화력발전소 작업자는 작업위치와 작업시간에 따라 불규칙적으로 높은 수준의 소음에 노출되었다. 그림 IV-5에서 작업자가 노출되는 시간에 따른 음압수준은 낮게는 약 60 dBA의 바탕수준에서 높을 때에는 발전기술원은 120 dBA, 회처리 현장운전원은 100 dBA가 넘는 큰 변이를 보였다. 이러한 큰 폭의 변이와 일부 발전소의 작업환경측정 결과에서 노출기준을 초과한 값이 측정되었음을 고려할 때, 매일의 작업자의 소음노출 수준은 고소음 발생지역에 얼마나 오래 머물렀는지에 따라 큰 차이를 보일 수 있다.



[그림 IV-4] 유사노출군별 소음 노출 수준

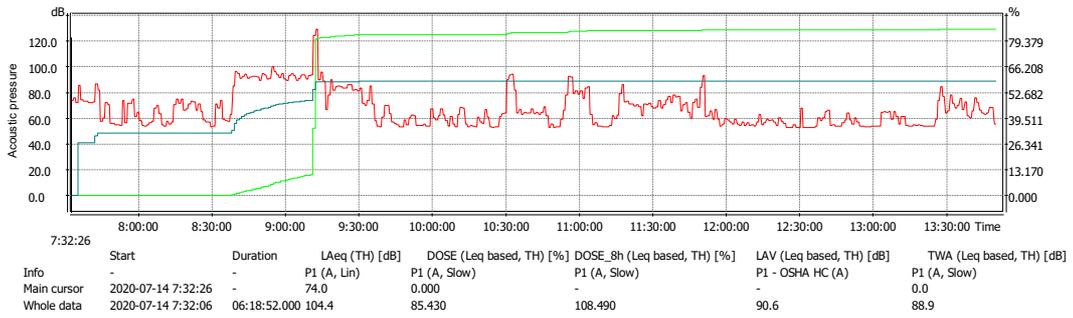
<표 IV-5> 유사노출군별 소음측정값의 대수정규분포 통계 결과

직무	N	AM (dBA)	95th Percentile (dBA)	UTL _{95%,95%} (dBA)	%>OEL	UCL _{1,95%} %>OEL
석탄설비						
운영공	4	77.9	81.4	89.6	0.000	4.419
전기공	2	82.5	84.9	-	0.000	47.059
보일러/터빈설비						
기계공	10	71.2	82.9	93.6	0.617	8.470
전기공	11	69.0	87.5	104.3	3.332	16.426
발전기술원	8	78.9	88.5	98.8	2.976	19.845
운영감독원	8	66.0	84.1	106.4	1.820	16.369
탈황설비						
운영공	3	79.1	85.5	113.9	0.324	36.055
전기공	1	64.6	-	-	-	-
운영감독원	1	53.9	-	-	-	-
분석실험실						
시료분석원	1	67.6	-	-	-	-
회처리설비						
운영공	4	83.4	89.7	104.8	4.190	38.947

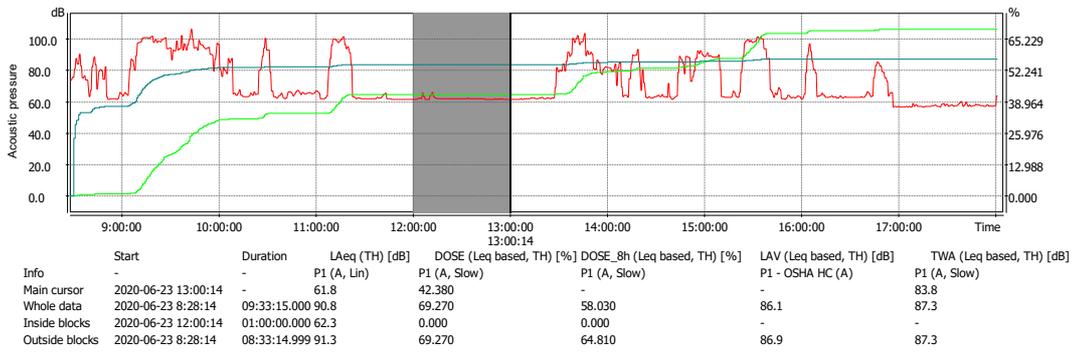
* N=자료수, AM=산술평균, 95%th percentile=95% upper confidence limit, UTL_{95%,95%}=UCL_{1,95%} for 95th percentile, %>OEL=90 dBA 초과 %, UCL_{1,95%}>OEL=90 dBA 초과 %의 95% UCL

6) 고열

고열 스트레스 지수를 측정한 결과, 석탄설비 중 한 발전소의 배탄기실 내부는 고용노동부 노출기준(중등작업 기준) 매시간 50% 작업, 50% 휴식 온도를 상회하였다. 해당 측정값은 건구온도와 흑구온도가 유사하여 복사열의 영향은 거의 없는 반면에 상대습도가 높아서 습구온도가 높게 나타난 영향으로 분석되었다. 따라서 해당 배탄기실의 습도를 낮춤으로서 고열지수를 낮출 수 있으나, 이 경우 배탄기실의 청소방법과 석탄분진의 비산에 영향이 있는지를 고려해야 한다. 이송탑(분쇄선별기, 혼탄기 포함)의 고열지수는 대체로 당일 외부온도를



(a)



(b)

[그림 IV-5] 85 dBA 초과 측정값의 시간에 따른 음압수준: (a) 발전기술원, (b) 회처리 현장운전원

조금 상회하는 수준으로 높지 않았으나, 외부온도와 습도의 영향을 많이 받을 수 있으므로 폭염 시에 측정할 경우 본 연구와 달리 높은 결과를 보일 수 있다.

보일러 및 터빈설비의 고열 스트레스 지수를 측정한 결과, 한 발전소의 보일러 미분기 앞을 제외하고 모두 계속작업 기준을 상회하였다. 전체적으로 상대 습도와 습구온도는 낮았으나 건구온도와 흑구온도가 높고 건구온도와 흑구온도의 차이가 크지 않았으므로, 습도와 복사열의 영향은 적었고 더운 공기가 높은 고열 스트레스 지수의 주요 원인임을 알 수 있었다.

3. 작업환경관리

1) 청소

석탄화력발전소에서 컨베이어를 통해 석탄을 운반하고 혼탄, 선별, 분쇄하는 과정에서 누설된 석탄 중 무거운 괴탄과 분탄은 작업장 바닥과 설비 위에 즉시 쌓이고, 가벼운 분진은 공기 중에 비산되었다가 침강하여 작업장 바닥과 설비에 쌓인다. 석탄의 운반과 회반출 이후에 작업장을 지체 없이 청소하지 않으면 후속작업 시 퇴적된 분진이 공기 중에 재비산되어 작업자가 노출되게 된다. 또한 청소 과정에서 부적절한 방법을 사용하면 청소작업자가 높은 농도의 분진에 노출될 수 있다. 따라서 작업장 내 분진을 지체 없이 적절한 방법으로 청소하는 것은 재비산된 분진에 의한 작업자의 노출을 최소화하기 위해 중요한 작업환경 관리수단이다. 석탄분진의 청소방법으로는 작업장의 상황에 따라 물청소, 고정식 진공청소, 이동식 진공청소(진공차 등)를 사용할 수 있다.

본 연구에서 청소와 관련하여 관찰된 내용에 따른 개선사항은 다음과 같다.

- 운탄과 회반출 작업 후 지체 없이 작업장의 분진을 청소할 필요가 있다. 작업장 바닥과 설비에 분탄이 퇴적된 상태로 방치되지 않도록 하여 분진의 재비산을 최소화하여야 한다.

- 진공청소를 하는 경우 이동식 진공청소설비(진공차 등) 보다는 고정식 진공청소설비 사용하는 것이 바람직하다. 이동식 진공청소설비를 사용하면 포집된 분탄을 운반해서 처리하는 과정에서 분진이 재비산될 우려가 있다.
- 관련 협력사와 협의하여 청소설비의 성능을 지속적으로 개선할 필요가 있다. 물청소를 효과적으로 실시하기 위해 적절한 형태와 수압의 노즐 사용, 작업장 바닥의 평탄화, 작업장 바닥의 틈새 및 구멍이 없게 하여 아래층으로의 낙수 및 낙진 방지, 적절한 성능의 배수구 및 배수관 설치, 침전조와 배수펌프 설비 용량 및 성능 개선, 진공청소설비의 용량 및 성능 개선 등을 지속적으로 추진하기 바란다.
- 비산을 최소화하기 위한 적절한 조치 없이 진공청소기와 청소차량에 수집된 분탄이 다시 컨베이어에 공급되지 않도록 조치할 필요가 있다. 진공청소설비의 하부 호퍼에 수집된 분탄을 공압식으로 보일러 사일로로 이송하거나, 펠렛이나 조개탄으로 압축하여 배출하는 등 적절한 처리방법을 고안



[그림 IV-6] 호퍼에 연결된 공압식 분진 이송장치.

사진출처 :

<https://www.powermag.com/coping-with-coal-dust/>



[그림 IV-7] 호퍼에 연결된 펠릿 제조장치(pin mixer). 사진출처 : <https://www.powermag.com/coping-with-coal-dust/>



[그림 IV-8] 펠릿 제조장치로 펠릿화된 분탄. 사진출처 : <https://feeco.com/pin-mixers/>

하기 바란다(그림 IV-6; IV-7; IV-8).

- 설비 보강을 통해 건조하고 분진이 많은 석탄의 청소 시 물청소 또는 진공 청소하고, 가능한 건조한 상태의 삼질과 비질을 금지할 필요가 있다.
- 정비작업 시에는 작업 전에 작업이 예정된 장소와 설비에 오염된 분진을 청소할 필요가 있다.

2) 환기

국소배기장치 및 전체환기설비와 관련하여 관찰된 내용에 따른 개선사항은 다음과 같다.

- 비산을 최소화하기 위한 적절한 조치 없이 국소배기장치에 포집된 분진이 다시 컨베이어에 공급하지 않도록 조치할 필요가 있다. 특히 포집된 분진이 다음 컨베이어의 개방된 상부에서 배출되지 않도록 할 필요가 있다. 국소배기장치에 포집된 분진을 공압식으로 보일러 사일로로 이송하거나, 펠렛이나 조개탄으로 압축하여 배출하는 등 적절한 처리방법을 고안하기 바란다(그림 IV-6; IV-7; IV-8).
- 이동식 배탄기 상부에 가능하면 국소배기장치를 설치할 필요가 있다.
- 석탄설비에 국소배기장치나 분무설비 등 적절한 분진제설설비의 설치가 불가능한 경우 동력을 이용한 전체환기장치를 설치할 수 있는지 검토하기 바란다. 예를 들어 컨베이어의 테일 부위 바깥에서 깨끗한 공기를 공급하고 헤드부위에서 공기정화장치를 통해 배출되도록 하는 방식을 고려할 수 있다.
- 국소배기장치 포위식 후드의 컨베이어가 드나드는 개구부에 사이드 커튼이 없는 경우 설치하고, 손상된 경우 수리하여 후드의 개구부를 최소화할 필요가 있다.
- 회반출설비에서 탱크로리로 석탄재를 공급하는 노즐에 분진회수장치가 설치되지 않은 경우 설치할 필요가 있다. 회반출설비의 석탄재 공급 부위에

국소배기장치가 설치되어있지 않은 경우 설치하고, 제어풍속을 확인하여 충분한 성능이 유지되도록 개선할 필요가 있다. 탱크로리가 아닌 덤프트럭으로 석탄재 등 분진을 이송하지 않아야 한다.

3) 분무/살수장치

석탄설비의 분무/살수장치와 관련하여 관찰된 내용에 따른 개선사항은 다음과 같다.

- 옥내저탄장, 이송탑 등에 분무설비 또는 살수설비가 없는 경우 가능한 설치하여 분진비산을 최소화하기 바란다. 분무설비는 비산된 석탄분진이 응집체 또는 집합체를 형성하여 빠르게 바닥으로 침강하도록 하여 분진농도를 저감시키고, 살수설비는 석탄이 습기를 머금게 하여 후속 작업에서 분진의 비산을 억제하는 효과가 있다.

4) 격리

유해물질의 누출 또는 작업자를 유해물질로부터 격리하기 위한 조치와 관련하여 관찰된 내용에 따른 개선사항은 다음과 같다.

- 석탄설비의 점검창이 열린 상태로 석탄을 이송하지 않도록 하여야 한다.
- 주기적인 설비점검을 통한 석탄설비 컨베이어 슈트와 스커트보드의 노후된 실링재 교체(그림 IV-9), 슈트 라이너 플레이트 설치 및 노후된 제품 교체, 컨베이어 벨트 헤드의 고착탄 제거를 위한 스크레퍼 설치, 핀홀 발생 시 지체 없는 수리 실시 등 설비로부터 분탄의 누설을 최소화할 필요가 있다.
- 옥내저탄장 내 상/하탄기 컨트롤룸, 배탄기실 컨트롤룸 등 석탄설비의 실내에 있는 컨트롤룸과 옥내저탄장 내에서 작업하는 중기의 케빈에 HEPA필터가 있는 공기공급장치를 설치하여 내부로 깨끗한 공기가 공급되고 양압이 유지되도록 조치할 필요가 있다(그림 IV-10).



[그림 IV-9] 삼중 구조의 스킨트보드 실링. 사진출처 :
<https://www.asgco.com/products/tri-seal-conveyor-skirtboard-sealing-compounds/>



[그림 IV-10] 중기 케빈 상부에 설치된 헤파필터 공기 공급장치. 사진출처 : The State of Queensland, 2018

- 고정식 배탄설비의 컨베이어는 밀폐가 가능하면 밀폐하기를 권고한다.
- 회반출 시 격리된 공간에서 창을 통해 탱크로리의 탱크 내부를 확인하고 설비를 조작할 수 있도록 트럭 탱크 상부에 점검창과 회반출 노즐 조정기가 설치된 격리된 공간을 설치할 필요가 있다.
- 회반출 시 작업자가 작업자의 몸과 주변의 분진을 제거하기 위해 압축공기를 사용하지 않도록 하고, 필요시 진공청소장치의 브러쉬로 분진을 청소하도록 조치할 필요가 있다.

5) 개인보호구

개인보호구는 작업환경 관리의 마지막 수단으로, 사업주는 개인보호구를 사용하지 않더라도 작업자가 유해물질로부터 보호를 받을 수 있도록 설비 개선 등 필요한 조치를 하여야 한다(고용노동부, 2019). 그럼에도 불구하고 호흡용 보호구를 광범위하게 착용하는 석탄화력발전소에서 방진마스크를 착용하여 원하는 보호수준을 달성하는 것은 작업자의 호흡기를 통한 분진 노출을 최소화하기 위해 중요하다. 산업안전보건법 산업안전보건기준에 관한 규칙 제617조는 사업주가 분진작업을 하는 근로자에게 적절한 호흡용 보호구를 지급하여 착용하도록 할 것을 규정하고 있으나, 적절한 호흡용 보호구가 무엇인지까지는 법에 구체적으로 명시되어 있지 않다(고용노동부, 2019).

본 연구에서 현장평가를 실시한 발전소 4개소는 모두 석탄화력발전소 특조위 보고서가 공개된 이후 석탄분진 또는 석탄재분진에 노출되는 작업자에게 반면형 안면부 여과식 1급 또는 특급 방진마스크를 지급하고 있었다. 사업장 관계자 및 작업자의 말에 따르면 석탄분진과 석탄재분진에 함유된 인체발암성물질인 결정체 산화규소로부터 작업자를 보호하기 위해 가능한 1급이 아닌 특급 방진마스크를 착용해야 한다고 생각하고 있었고, 대부분의 작업자에게 특급 방진마스크를 지급하는 사업장도 있었다. 그러나 일

부 작업자들이 특급 방진마스크 착용으로 인한 불편을 호소하고, 비용이 상승함에도 불구하고 모든 결정체 산화규소 노출 작업자가 반드시 특급 방진마스크를 착용하여야 하는 것은 아니다. 미국 산업안전보건청(Occupational Safety and Health Administration, OSHA)은 결정체 산화규소에 노출되는 작업자는 노출 수준에 따라 적절한 보호계수(protection factor, PF)²⁵⁾의 방진마스크를 착용하여야 하며, N95(우리나라의 1급 방진마스크 성능에 상당함) 이상의 방진마스크를 착용할 수 있다고 질의 회시한 바 있다(OSHA, 1999)²⁶⁾. 미국 NIOSH는 결정체 산화규소 노출 작업자의 호흡기 보호 관련 정책 설명 자료에서 공기 중 결정체 산화규소 0.5 mg/m^3 이하의 농도에 노출되는 작업자는 N95 또는 동등 수준 이상의 성능을 가진 방진마스크를 착용할 것을 권고하였다(NIOSH, 2008). NIOSH의 배경설명에 따르면 과거에 0.5 mg/m^3 이하의 결정체 산화규소에 노출되는 작업자에게 HEPA필터(우리나라의 특급마스크의 필터 규격에 상당함)로 제작된 반면형 방진마스크를 착용하도록 권고하였던 이유는 99.97%의 여과효율이 필요해서가 아니라 과거 방진마스크의 필터가 작은 입자(공기역학적 직경 $0.2 \mu\text{m}$ 미만)에 대한 여과효율이 제한적이었던 점을 반영한 것이었다. NIOSH는 현재의 방진마스크 필터는 성능이 개선되어 모든 크기의 결정체 산화규소 입자에 대해 95%(우리나라의 1급 방진마스크의 필터 성능에 상당함) 이상의 성능을 보이므로, 99.97% 여과효율의 필터를 사용하지 않더라도 10 이상의 보호계수를 만족할 수 있다고 설명하였다. 미국 OSHA는 반면형 안면부 여과식 방진마스크의 보호계수를 N95 이상은 10으로 규정하고 있으며, 영국 보건안전청(Health and Safety Executive, HSE)은 FFP2(우리나라의 1급 방진마스크와 같음)는 10, FFP3(우리나라의 특급 방진마스크와 같음)은 20으로

25) 마스크를 적절하게 착용 시 마스크의 외부와 내부의 유해물질의 농도 비율. 보호계수가 10인 마스크를 적절하게 착용할 경우 노출기준의 10배까지 노출되더라도 작업자의 호흡기가 노출기준 이하의 유해물질 농도에 노출된다는 의미임.

26) 연마 블라스팅 작업은 제외한다.

정하고 있다(OSHA, 2009; HSE, 2013). 따라서 적절하게 착용하면 반면형 안면부 여과식 특급마스크와 1급 방진마스크는 모두 10 이상의 보호계수를 제공한다.

본 연구에서 관찰된 석탄화력발전소에서 착용하는 안면부 여과식 방진마스크는 작업자가 자기 호흡으로 외부의 공기를 필터로 정화하여 흡입하는 음압식 마스크로, 마스크의 흡기저항과 내부의 이산화탄소로 인해 장시간 착용 시 작업자가 호흡의 불편함을 느끼게 된다. 특히 특급 방진마스크는 1급 방진마스크에 비해 안면부 흡기저항이 크므로 착용 시 호흡의 불편함이 더욱 크다. 이러한 호흡의 불편함은 작업자가 마스크를 험겁게 착용하거나 마스크 착용을 기피하게 하는 원인이 된다. 영국 HSE의 경우 음압식 마스크를 1시간 이상 연속하여 착용하지 않고, 1시간 이상 연속하여 착용할 경우 동력을 이용하여 마스크 안면부 내로 공기를 공급하는 양압식 마스크를 착용할 것을 권장하고 있다(HSE, 2013). 더욱이 천식 등 호흡기 기저질환이나 심장질환이 있는 작업자라면 음압식 마스크를 착용 시 더욱 세심한 주의가 요구된다. 따라서 석탄화력발전소의 작업자에게 안면부 여과식 마스크를 지급 시에는 작업자의 호흡기 및 심장 기저질환 여부를 미리 확인하고, 작업 중 휴식시간을 적절히 배분하여 분진이 발생하지 않는 곳에서 마스크를 벗고 쉴 수 있도록 함으로써 작업 중에 마스크를 올바르게 착용하도록 도울 필요가 있다. 따라서 더 높은 보호성능의 마스크 착용을 통해 작업자의 유해물질 노출을 최소화하는 것은 바람직하지만, 작업자가 석탄분진과 결정체 산화규소에 대해 노출기준의 10배 이하로 노출된다면 작업자가 호흡의 불편함을 호소함에도 불구하고 특급 방진마스크만 착용하도록 할 필요는 없다. 본 연구의 노출평가 결과를 기준으로 판단하면 노출기준의 11배 이상의 결정체 산화규소 노출수준을 보인 분탄이 많은 낙탄을 협소한 공간에서 삽질하는 작업자는 보호계수가 높은 전면형 안면부 여과식 특급 방진마스크(27)를 착용하되, 유해물질에 노출기준의 10배 이하로 노출된 나머지 작업자는

반면형 안면부 여과식 특급 또는 1급 마스크를 선택하여 착용할 수 있다.

마스크 착용을 통해 원하는 수준의 보호수준을 얻기 위해서는 유해물질의 종류와 농도 수준에 적합한 마스크를 선택하고, 작업 시 마스크를 안면부에 밀착시켜 착용하는 것이 중요하다. 이를 위해 마스크의 정량적 밀착도 평가를 실시하면 작업자 개인의 안면부에 밀착되는 마스크를 선정할 수 있을 뿐만 아니라, 작업자에게 올바른 마스크의 착용법을 교육하고 마스크 착용을 통한 호흡기 보호 효과를 수치로 통해 체감하도록 하여 마스크 착용을 통한 작업자 보호에 도움이 될 수 있다.

상기 사항을 고려하여 호흡보호구 착용과 관련된 관찰된 내용에 따른 개선사항은 다음과 같다.

- 노출기준의 11배 이상의 결정체 산화규소 노출수준을 보인 낙탄처리 작업자에게 해당 발전소는 분리식 전면형 특급 방진마스크를 지급하고 작업 중 착용하도록 조치하는 것이 필요하다. 다른 발전소도 컨베이어 케이싱 등 협소한 공간에서 다량의 분탄을 삽질하는 방식으로 청소하는 작업자에 대해 노출기준의 10배를 초과하지 않는다는 노출평가 자료가 없다면 분리식 전면형 특급 방진마스크를 지급하고 착용시킬 필요가 있다.
- 노출기준의 10배 이하의 석탄분진과 결정체 산화규소에 노출되는 작업자는 반면형 안면부 여과식 1급 마스크 또는 그 이상의 보호성능을 보이는 마스크를 착용할 수 있다.
- 작업자가 작업 중 방진마스크를 안면부에 밀착시켜 정확하게 착용하도록 지속적으로 교육하기 바란다.
- 방진마스크의 밀착도를 확보하기 위해 작업자가 안면부를 깨끗하게 면도하고, 구렛나루나 수염을 기르지 않도록 지도하기 바란다.
- 작업자의 안면부 형태에 적합한 방진마스크를 선정하고, 마스크의 정확한 착용법과 마스크 착용의 중요성에 대한 교육훈련 효과를 위해 방진마스크

27) OSHA가 규정한 전면형 안면부 여과식 방진마스크의 보호계수는 50이다.

- 의 정량적 밀착도평가를 도입하기를 권장한다. 특히 고농도의 분진에 노출되는 석탄설비의 운영공에 대해 우선 실시하기 바란다.
- 보일러 건물과 터빈 건물 내 고소음 발생구역에서 작업자가 귀마개 등 방음보호구를 착용하도록 지속적으로 관리하기 바란다.

6) 작업환경측정

산업안전보건법 제125조 시행규칙 제186조에 따라 사업주는 시행규칙 별표 21의 작업환경측정 대상 유해인자에 노출되는 근로자가 있는 작업장에 대하여 작업환경측정을 실시하여야 한다(고용노동부, 2019). 이에 따라 석탄 분진²⁸⁾과 결정체 산화규소는 작업환경측정 대상 유해인자이다. 금속류는 본 연구에서 분석된 석탄 중 함유율의 최대값을 기준으로 알루미늄, 철, 칼륨, 실리콘이 중량비율 1%를 초과하였다. 이 중 알루미늄은 작업환경측정 대상 유해인자이지만²⁹⁾, 석탄 속 알루미늄이 카올리나이트, 일라이트, 녹니석과 같은 다른 광물의 구성성분으로 존재하는 점³⁰⁾과 이들 광물이 ACGIH의 알루미늄 및 비수용성 화합물의 노출기준에 명시된 대상물질³¹⁾이 아니라는 점을 고려하면 작업환경측정 대상물질로 분류하지 않는 것이 합리적 판단이다(ACGIH, 2008). 작업환경 관리 측면에서도 알루미늄 금속 분진 또는 알파 알루미늄의 노출기준은 기타 광물성 분진과 같은 10

28) 산업안전보건법 시행규칙 별표 21 제3호 가. 3)그 밖의 광물성 분진으로 분류된다.

29) 철은 산화철에 한하여 작업환경측정 대상이므로 제외한다. 알루미늄은 알루미늄 및 그 화합물이 작업환경측정 대상인데 알루미늄이 함유된 광물을 알루미늄 화합물로 본다면 작업환경측정 대상으로 분류할 수 있다.

30) 예를 들어 고령토에 노출되는 작업자에 대해 고령토의 주성분인 고령석($Al_2Si_2O_5(OH)_4$)의 알루미늄을 별도로 측정할 필요가 없다면 석탄의 알루미늄도 측정할 필요가 없다.

31) ACGIH의 알루미늄 금속과 무기화합물의 TLV는 알루미늄 금속, 산화알루미늄, 스탬프된 알루미늄, 보크사이트 광석 분진과 코런덤 내 등의 비수용성 알루미늄 형태에 대해 규정되어 있다.

mg/m³²²)이므로, 비록 본 연구에서 평가하지는 않았지만 석탄분진의 노출기준인 호흡성분진 1 mg/m³과 결정체 산화규소의 노출기준인 0.05 mg/m³를 기준으로 작업환경을 관리한다면 알루미늄도 안전한 수준에서 관리될 것으로 보인다. 석탄의 비소 등 미량 금속은 함유율이 중량비율 1%에 크게 못미쳐 작업환경측정 대상 유해인자가 아니었고, 본 연구결과 석탄분진과 석탄재분진의 호흡성분진이 1 mg/m³을 초과하더라도 비소 등 미량 금속의 유의미한 노출은 발생하지 않았다(그림 IV-3). 따라서 석탄의 금속 함유율이 본 연구결과에 비해 크게 높지 않다면 석탄에 함유된 비소 등 미량금속은 산업안전보건법에 따른 작업환경측정 대상 유해인자가 아니며 측정 필요성도 없는 것으로 판단된다. 석탄에 함유된 벤젠, 톨루엔, 자일렌 등 유기용제는 본 연구의 벌크시료에서 검출되었으나, 함유율은 관련된 해외 문헌을 참고하면 평균 20 ppm 미만으로 중량비율 1%를 초과할 가능성이 없는 것으로 판단된다. 본 연구에서 옥내저탄장과 배탄기실의 작업환경 시료에서도 벤젠, 톨루엔, 자일렌, 노말헥산이 불검출되어 유의미한 작업환경 중 노출은 없을 것으로 판단된다. 따라서 석탄의 유기용제의 함유율이 본 연구의 참고문헌에 비해 크게 높지 않다면 석탄에 함유된 유기용제는 산업안전보건법에 따른 작업환경측정 대상 유해인자가 아니며 측정 필요성도 없는 것으로 판단된다.

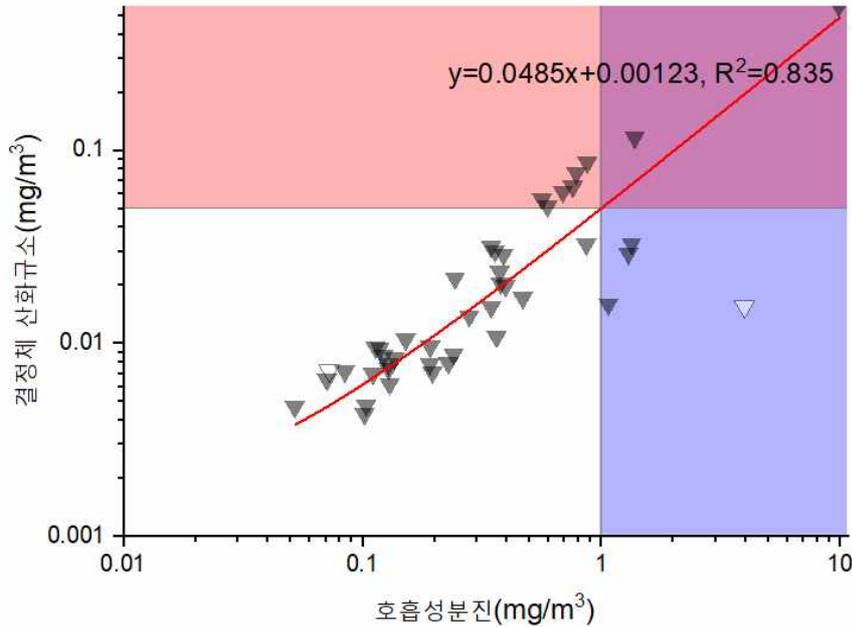
석탄재의 석탄재분진³³⁾과 석탄재에 함유된 결정체 산화규소는 작업환경측정 대상 유해인자이다. 석탄재의 금속류는 본 연구에서 분석된 함유율의 최대값을 기준으로 비산재 또는 바닥재에서 알루미늄, 칼슘 철, 칼륨, 마그네슘, 황, 실리콘이 중량비율 1%를 초과하여 검출되었다. 이 중 알루미늄, 철, 마그네슘은 그 산화물이 작업환경측정 대상 유해인자이지만 노출기준이 각각 알루미늄 10 mg/m³, 산화철 5 mg/m³, 산화마그네슘 10 mg/m³으로

32) 알과 알루미늄 또는 알루미늄(금속분진) 기준임

33) 석탄의 연소산화물이지만 다양한 광물이 구성성분이므로 석탄재 또한 산업안전보건법 시행규칙 별표 21 제3호 가. 3) 그 밖의 광물성 분진으로 분류할 수 있다.

높아서 이들 금속의 석탄재 내 함유율을 고려할 때 석탄재의 노출기준을 기타 광물성분진의 노출기준인 10 mg/m^3 을 적용한다면 각 물질은 노출기준 이하로 관리되게 된다. 아울러 전체적으로는 결정체 산화규소의 노출기준인 0.05 mg/m^3 이 매우 엄격하므로, 석탄재의 노출기준 초과 여부와 작업환경관리방안은 사실상 결정체 산화규소에 따라 결정된다. 따라서 석탄재에 함유된 알루미늄, 철, 마그네슘의 산화물에 대한 작업환경측정을 별도로 실시하지 않더라도 작업자의 노출수준을 평가하고 관리하는데 영향은 없다. 다만 이들 금속이 석탄재에 작업환경측정대상 수준(중량 1% 초과)으로 함유되어 있어서 법적으로 측정이 필요하다면, 별도의 시료채취 및 분석 없이 석탄재의 기타 광물성 분진 측정결과를 이들 금속 농도에 준용하는 것이 합리적이라고 판단된다. 본 연구에서 석탄재에 함유된 비소 등 미량금속은 함유율이 중량비율 1%에 크게 못 미치므로 산업안전보건법에 따른 작업환경측정 대상 유해인자가 아니다. 작업환경에서의 노출 및 근로자 건강관리 측면에서도 본 연구에서 석탄재분진의 호흡성분진 농도가 1 mg/m^3 을 초과하더라도 미량 금속의 유의미한 노출은 발생하지 않았으므로, 석탄재의 금속 함유율이 본 연구결과에 비해 크게 높지 않다면 이들 금속에 대한 작업환경측정은 실시할 필요성은 없다. 석탄재에 함유된 벤젠, 톨루엔, 자일렌, 노말헥산은 관련된 해외 문헌에서 석탄재에 함유된 유기용제의 함유율이 석탄 보다 낮은 수준으로 나타나 중량비율 1%를 초과할 가능성이 없는 것으로 판단된다. 따라서 석탄재분진에 함유된 유기용제는 산업안전보건법에 따른 작업환경측정 대상 유해인자가 아니며 측정 필요성도 없는 것으로 판단된다.

본 연구에서 측정된 호흡성분진과 결정체 산화규소 농도는 강한 양의 상관관계($R^2=0.835$)를 보였다(그림 IV-11). 기울기는 0.0485로 결정체 산화규소의 농도는 호흡성분진 농도의 약 5% 수준이었으나, 시료별로 많게는 약 10% 수준까지 나타났다. 두 유해인자의 공기 중 농도 사이에 강한 양의 상



[그림 IV-11] 호흡성분진과 결정체 산화규소의 공기 중 농도의 회귀분석 결과

관관계가 있으므로 관리적인 목적으로 호흡성분진의 공기 중 농도를 직독식장치 등으로 모니터링하고, 결정체 산화규소를 포함한 작업환경 관리에 활용할 수 있을 것이다.

본 연구에서 일부 발전소에는 옥내저탄장의 일산화탄소 농도와 위치를 알 수 있는 장치가 설치되지 않았는데, 작업자가 옥내저탄장 내에 진입하기 전에 가스농도를 확인하도록 하고 높은 경우 경고하는 장치의 설치가 필요하다. 옥내저탄장은 규모가 커서 가스 농도는 자연발화가 일어나는 지점에서 국부적으로 상승한다. 옥내저탄장의 화재 등 관리를 위한 자연발화의 모니터링 측면에서는 고정식 센서가 충분할 수 있으나, 자연발화로 발생된 가스가 고정식 센서와 작업자에게 도달하는 시간에 차이가 발생할 수 있고

일산화탄소의 급성독성을 고려할 때, 작업자에게 개인 휴대형 가스농도모니터를 착용시키는 것이 필요하다.

상기 사항을 고려하여 작업환경측정 항목과 관련된 관찰된 내용에 따른 개선사항은 다음과 같다.

- 석탄재의 유해물질 함유율이 본 연구결과에 비해 크게 높지 않다면 작업환경측정은 석탄분진에 대해서 석탄분진과 결정체 산화규소(석영), 석탄재분진에 대해서 기타 광물성 분진과 결정체 산화규소(석영)에 대해 실시하기 바란다. 석탄재에 중량비율 1% 이상 함유된 작업환경측정 대상 유해인자(알과 알루미늄, 산화철, 산화마그네슘)는 별도로 시료채취 및 분석하지 말고 석탄재의 기타 광물성 분진의 농도를 준용해서 평가할 수 있다. 금속(비소, 수은, 니켈, 납)과 옥내저탄장의 유기화합물에 대한 작업환경측정은 석탄 또는 석탄재 내 함유율이 본 연구와 달리 크게 높지 않다면 실시할 필요성이 없다.
- 석탄분진과 석탄재분진의 호흡성분진과 결정체 산화규소 농도는 높은 상관관계를 보이므로 호흡성분진의 농도를 직독식측정장치로 측정하여 작업환경 관리에 활용할 수 있다.
- 옥내저탄장의 일산화탄소 농도가 제어실에서만 확인되는 발전소는 옥내저탄장 출입구에 일산화탄소 농도와 위치를 알릴 수 있는 장치를 설치하는 것이 필요하다.
- 옥내저탄장 작업자에게 휴대용 일산화탄소 가스농도모니터를 지급하고 사용하도록 하기 바란다.

7) 물질안전보건자료

물질안전보건자료는 작업자에게 자신이 취급하는 화학물질의 유해성과 위험성 등을 알려줌으로써 작업자가 스스로 주의하고 자신을 보호할 수 있도록 하는 정보제공의 수단이다. 산업안전보건법 제110조와 111조에 따르면

물질안전보건자료 대상물질을 제조하거나 수입하려는 자는 물질안전보건자료를 작성하여 고용노동부장관에게 제출하여야 하고, 물질안전보건자료 대상물질을 양도하거나 제공하는 자는 이를 양도받거나 제공받는 자에게 물질안전보건자료를 제공하여야 한다(고용노동부, 2020). 우리나라는 석탄화력발전소에서 사용되는 석탄을 일부 국내산 무연탄을 제외하고 모두 수입에 의존한다. 산업안전보건법에 따라 수입탄의 물질안전보건자료 작성 의무자는 석탄을 수입하는 자이므로, 발전사가 직접 석탄을 수입하는 경우 발전사가, 중간 수입업체를 통해 수입하는 경우 수입업체가 물질안전보건자료의 작성 의무자이다. 국내산 석탄의 경우 석탄을 채굴하는 자를 제조하는 자로 볼 수 있으므로, 석탄을 채굴하는 사업장을 작성 의무자로 볼 수 있다. 석탄재는 발전소에서 생산되므로 발전소를 물질안전보건자료의 작성 의무자로 볼 수 있다.

고용노동부의 화학물질의 분류·표시 및 물질안전보건자료에 관한 기준 제11조에 따르면 화학물질의 구성 성분의 함유량을 기재 시에는 함유율의 ± 5 퍼센트(%)의 범위에서 함유율의 범위로 기재할 수 있고, 함유율이 5% 미만인 경우에는 하한값을 1% 이상으로 표기하되 발암성 물질과 생식세포 변이원성 물질은 0.1%, 가스상 호흡기과민성물질은 0.2%, 생식독성 물질은 0.3% 이상으로 표시하고, 취급근로자의 건강보호목적에 맞도록 성실하게 작성하여야 한다(고용노동부, 2016). 석탄과 석탄재는 다양한 구성성분을 함유하고, 그 성분을 모두 알기 어려우며, 함유율의 변이가 크거나 예측하기 어려운 물질이다³⁴⁾. 이를 감안하더라도, 발암성, 생식세포 변이원성, 호흡기과민성, 생식독성 물질의 유의미한(고시에 규정하는 함유율 이상) 함유 정보는 취급 작업자의 건강보호 목적을 다하기 위해 물질안전보건자료에 기재되어야 한다. 본 연구에서 분석한 유연탄, 무연탄, 비산재, 바닥재의 평균

34) UVCB(unknown or variable composition, complex reaction products or biological materials, UVCB) substance라고 한다.

결정체 산화규소 함유율은 인도네시아산 저열량탄 1건을 제외하고 모두 1% 이상이였다. 따라서 관련 고시에 따라 이들 석탄과 석탄재의 구성 성분의 함유량에 ‘결정체 산화규소(석영) 0.1% 이상’ 또는 ‘결정체 산화규소(석영) 1% 이상’을 표기하고 유해성·위험성 분류에 ‘발암성 분류 1A’를 표기하여야 한다.

산업안전보건법 제114조에 따라 물질안전보건자료대상물질을 취급하려는 사업주는 물질안전보건자료를 해당 물질을 취급하는 작업장 내에 근로자가 쉽게 볼 수 있는 장소에 게시하거나 갖추어 두어야 한다(고용노동부, 2020). 따라서 석탄화력발전소는 석탄과 석탄재에 대한 물질안전보건자료를 게시하거나 갖추어 두어야 한다.

상기 사항을 고려하여 물질안전보건자료 비치와 내용과 관련하여 관찰된 내용에 따른 개선사항은 다음과 같다.

- 석탄재의 물질안전보건자료를 보유하지 않은 발전소는 물질안전보건자료를 작성하여 게시하거나 갖추어두어야 한다.
- 석탄과 석탄재의 물질안전보건자료 작성 시 구성 성분의 함유량에 결정체 산화규소(석영)가 함유되어 있음을 표기하고 유해성·위험성 분류에 ‘발암성 분류 1A’를 표기하여야 한다.
- 산업안전보건법에 따른 물질안전보건자료의 작성 주체는 수입자 또는 제조자이므로 해외 수출사가 제공하는 석탄의 영문 물질안전보건자료가 부실하더라도 수입자는 고용노동부의 화학물질의 분류·표시 및 물질안전보건자료에 관한 기준에 따라 충실하게 작성하여야 한다.

8) 기타

기타 작업환경관리와 관련하여 관찰한 결과에 따른 개선사항은 다음과 같다.

- 재하청업체 작업자가 쉴 수 있는 적절한 휴게공간을 마련해주길 바란다.

- 컨베이어 2개 라인 중 하나를 정비 시 가능하면 정비하지 않는 컨베이어도 가동을 멈출 필요가 있다. 석탄설비의 청소는 가능하면 운탄이 모두 종료된 후에 실시하기 바란다.
- 보일러 및 터빈 건물 내부 고열지역과 폭염기의 이송탑 및 컨베이어 작업자들이 시원하게 쉴 수 있는 냉방장치가 있는 적절한 휴게공간을 주된 작업 장소에서 가까운 위치에 설치하고, 음용수를 제공할 필요가 있다.
- 주요 작업장소로부터 화장실과의 거리와 작업자의 의견을 고려하여, 필요한 경우 화장실을 설치하기 바란다.
- 고열 스트레스는 날씨, 작업위치, 작업강도, 작업복, 작업자의 고열 순응도 등 다양한 요인에 의해 결정되므로, 발전소 보건업무담당자가 능동적으로 작업 상황을 모니터링하고 고열 스트레스 노출을 최소화하기 위해 노력할 필요가 있다.
- 작업자 건강관리를 위해 적극적인 금연 프로그램을 실시하기 바란다. 석탄 분진 및 결정체 산화규소 노출과 흡연은 폐질환 발생에 상가관계이다 (Hnizdo, 1990; Kuempel 등, 2009; Lai 등, 2018).

9) 작업환경관리 참고 사례

석탄화력발전소 특조위의 보고서가 발표된 이후 본 연구에서 조사한 석탄화력발전소는 설비를 개선하고, 특급 방진마스크를 지급하며, 특조위 권고사항에 따라 작업환경측정을 실시하는 등 작업환경개선을 위해 다양한 개선노력을 기울이고 있었다. 본 연구는 발전소 6개소에 대해 예비조사를 실시하고 그 중 4개소의 작업환경상태를 평가하는 과정에서 발전소의 작업환경관리를 위해 상호간에 벤치마킹할 수 있는 사례를 다음과 같이 확인하였다(관련 사진은 부록 4 참조).

- 한 발전소는 다른 발전소에 비해 석탄설비의 물청소를 위한 배수시설이 잘 설치되어 있었다. 넉넉한 지름의 배수관이 이송탑의 층간을 연결하여 이송

- 탑 외부의 침전조 까지 이어져 있었고, 이송탑 뿐 아니라 컨베이어 라인도 물청소가 가능하도록 테일부위에 배수구가 설치되어 있었다. 층간 바닥은 배수가 원활하고 누설부위가 최소화되도록 설치되었다.
- 일부 발전소의 낙탄이 많이 발생하는 컨베이어 헤드부위에 낙탄을 자동으로 회수하는 장치가 설치되어 있었다.
 - 일부 발전소의 공기부양식 컨베이어의 벨트 반전부위 하부에 낙탄을 연속으로 물청소하는 설비가 설치되어 있었다.
 - 한 발전소는 석탄 컨베이어 스킵트 보드에서 석탄이 밖으로 밀려나오는 것을 최소화하기 위해 바깥쪽을 덧대어 보강하거나 컨베이어에 각도를 주어 컨베이어벨트와 실링재를 밀착시키는 방식을 사용하였다.
 - 한 발전소는 석탄과의 마찰에 의한 핀홀 발생을 최소화하기 위해 석탄 컨베이어 슈트부위에 두꺼운 내마모성 재질의 라이너를 설치하였다.
 - 한 발전소는 이동식 배탄기의 상부에 국소배기장치를 설치하였다. 석탄 공급 시 보일러 사일로의 각 위치에 배탄기가 연결되면 해당 덕트의 댐퍼가 자동으로 개방되어 분진을 포집하고, 석탄 공급이 없을 때에는 전체 댐퍼를 개방하여 전체환기장치로 사용하였다.
 - 한 발전소는 배탄기실과 이송탑 내에 분무장치를 설치하여 분진의 비산을 억제하였다.
 - 일부 발전소는 옥내저탄장 상부에 분무장치를 설치하여 상하탄시 분진의 비산을 억제하였다.
 - 일부 발전소는 옥내저탄장 출입구에 옥내저탄장 내 위치별 가스농도를 알 수 있는 알림판을 설치하였다.
 - 일부 발전소는 발전소 일부에 무더위쉼터를 마련하여 폭염 시 작업자가 쉴 수 있는 공간을 제공하였다.

V. 결론

이 연구는 우리나라의 석탄화력발전소 중 대표성을 고려해 선정된 4개소에 대하여 설비의 운전, 운영, 경상정비작업 시 노동자의 석탄분진 및 석탄재와 관련된 유해인자 노출 위험성과 작업환경 관리 실태를 평가하고 유해인자 노출을 최소화하기 위한 개선방안을 제시하였다.

1. 유해인자 노출 위해성

호흡성분진과 결정체 산화규소는 석탄설비의 운영공 중 낙탄청소작업자에게서 노출기준을 초과하는 값이 측정되었다. 호흡성분진이 노출기준을 초과한 4개 자료 중 상위 3개 자료는 분탄이 많은 낙탄을 건조한 상태에서 삽질하여 청소한 작업자에게서, 나머지 하나는 낙탄을 물청소한 작업자에게서 측정되었다. 결정체 산화규소의 농도가 노출기준을 초과한 4개 자료는 모두 건조한 상태에서 분탄이 많은 낙탄을 삽질하여 청소한 작업자에게서 측정되었다. 유사노출군별 노출기준 초과 가능성을 통계적으로 예측한 결과 호흡성분진은 석탄설비 운영공의 95% 상한값이 노출기준을 초과하였고, 석탄설비 전기공의 95% 상한값은 노출기준의 1/2를 초과하였다. 보일러/터빈설비의 기계공, 전기공, 발전기술원, 운영감독원과 회처리설비 운영공은 95% 신뢰수준으로 95% 상한값이 노출기준을 넘지 않았다. 결정체 산화규소는 석탄설비 운영공의 95% 상한값이 노출기준을 초과하였다.

석탄에 함유된 주요 유해 금속 11종(비소, 카드뮴, 코발트, 크롬, 수은, 망간, 니켈, 납, 탈륨, 우라늄, 바나듐)에 대한 개인시료의 노출농도는 노출기준의 1% 미만이었다. 석탄의 금속함유율이 본 연구결과에 비해 크게 높지 않은 경우 금속의 유의미한 작업 중 노출은 발생하지 않을 것으로 판단된다.

휘발성 유기화합물은 옥내저탄장과 배탄기실의 작업환경에서 벤젠, 톨루엔, 자일렌, 노말헥산이 검출되지 않았다. 휘발성 유기화합물의 유의미한 작업 중 노출은 발생하지 않을 것으로 판단된다.

일산화탄소와 이산화황은 옥내저탄장과 탈황공정의 누설 가능 부위를 측정된 결과 검출되지 않았다. 석탄의 자연발화나 설비의 누설이 없는 경우 유의미한 작업자 노출은 발생하지 않을 것으로 판단된다.

소음은 노출기준을 초과한 값은 없었으나, 보일러 오퍼레이터와 회처리장 운전원에게서 특수건강진단 실시 기준을 초과하는 값이 측정되었다. 95% 상한값이 노출기준을 초과하는 유사노출군은 없었으나 보일러/터빈설비의 기계공, 전기공, 발전기술원, 운영감독원과 탈황설비 운영공, 회처리설비 운영공의 95% 신뢰수준의 95% 상한값은 노출기준을 초과하여 작업상황에 따라 노출기준을 초과할 가능성이 있었다. 보일러/터빈설비의 전기공, 발전기술원과 탈황설비 운영공, 회처리설비 운영공의 95% 상한값은 특수건강진단 실시 기준을 초과하였다.

고열은 석탄설비 중 한 사업장의 배탄기실의 측정값이 계속작업 기준을 초과하였다. 이송탑(분쇄선별기, 혼탄기 포함)의 고열 스트레스 지수는 대체로 당일 외부온도를 조금 상회하는 수준으로 높지 않았으나, 외부온도와 습도의 영향을 많이 받을 수 있으므로 폭염 시에 측정할 경우 본 연구와 달리 높은 결과를 보일 수 있을 것으로 판단되었다. 보일러/터빈설비는 한 발전소의 보일러 미분기 앞을 제외한 모든 측정된 값이 계속작업 기준을 초과하였으며, 습도와 복사열의 영향은 적었고 더운 공기가 높은 고열 스트레스 지수의 주요 원인이었다.

2. 작업환경 관리실태 및 개선방안

본 연구는 석탄화력발전소의 작업환경 관리실태에 대하여 실태조사 시 관찰한 사항, 발전소 관계자와 작업자 문답 내용, 석탄과 석탄재 벌크시료 분석결

과, 작업자의 유해인자 노출 위해성 평가 결과를 바탕으로 청소, 환기, 분무/살수장치, 격리, 개인보호구, 물질안전보건자료, 작업환경측정, 기타사항으로 구분하여 개선방안을 제시하였다(표 V-1). 또한 작업환경실태를 평가하는 과정에서 작업환경관리를 위해 발전소 상호간에 벤치마킹할 수 있는 사례를 제시하였다(IV.3.9) 및 부록 4 참조).

작업자의 석탄분진 및 석탄재분진과 분진에 함유된 결정체 산화규소 및 금속에 대한 노출을 최소화하기 위해서는 설비의 개선과 주기적인 점검 및 관리를 통해 낙탄 발생 및 분진 비산을 최소화하고, 운탄 또는 회반출 후 작업장에 축적된 낙탄과 분진을 물청소나 진공청소와 같은 분진의 비산을 최소화할 수 있는 방식을 활용하여 지체 없이 청소하며, 수집된 분진이 다시 작업환경에 비산되지 않도록 하는 것이 중요하다. 아울러 환기설비와 분무/살수설비의 설치 및 개선 등 공학적 관리방안을 시행하고, 노출 수준에 적합한 보호계수의 호흡보호구를 올바르게 착용하도록 하며, 물질안전보건자료의 정확한 작성을 통해 석탄분진과 석탄재분진의 유해·위험성을 작업자에게 인지시키고, 주기적으로 작업자의 유해인자 노출수준을 모니터링하여 개선조치에 반영할 필요가 있다. 소음에 대한 노출을 최소화하기 위해서는 보일러 건물과 터빈 건물 내 고소음 발생구역에서 작업자가 귀마개 등 방음보호구를 올바르게 착용하도록 지속적으로 관리할 필요가 있다. 고열 노출로 인한 건강영향을 최소화하기 위해서는 보일러 및 터빈 건물 내부 고열지역과 폭염기의 이송탑 및 컨베이어 작업자가 시원하게 설 수 있는 냉방장치가 있는 적절한 휴게공간을 주된 작업장소에서 가까운 위치에 설치하고 음용수를 제공할 필요가 있다.

석탄화력발전소는 유해인자의 노출 변이가 크므로, 노동자의 유해인자 노출을 최소화하기 위하여 석탄화력발전소 관계자는 본 연구에서 제시한 작업환경 개선방안과 벤치마킹 사례를 참고하여 각 발전소의 상황에 맞게 자율적으로 능동적인 작업환경개선활동을 추진하기 바란다.

3. 연구의 제한점

본 연구의 작업자의 유해물질 노출에 대한 측정결과와 작업환경관리에 대한 평가결과는 발전소의 모든 장소와 상황에 대한 것이 아니다. 본 연구는 발전설비의 운전 및 운영과 경상정비작업에 한하여 석탄 및 석탄의 연소산물에 노출되는 작업을 대상으로 평가를 실시하였다. 따라서 본 연구결과를 계획예방정비 작업, 화학분석실험실이나 공무 등 본 연구에서 다루지 않은 작업과 공정에 대해 확대하여 해석하지 않기 바란다. 본 연구결과는 각 발전소의 연구범위에 해당하는 공정 중 대표적인 일부에 대해 실시한 것이다. 석탄화력발전소는 규모가 커서 본 연구에서 모든 공정에 대한 평가는 가능하지 않았다.

작업지시 내용, 작업위치, 작업시간, 낙탄 발생량, 설비의 누설 또는 이상 여부, 청소 상태, 석탄의 습기를 머금은 정도와 분탄의 함유 정도, 날씨 등 다양한 변수로 인해 본 연구의 제한적인 노출평가를 통해 석탄화력발전소의 모든 작업상황의 노출 수준을 평가하고 이해할 수는 없었다. 다양한 노출 변수로 인해서 같은 작업자에서도 대체로 비슷한 값이 측정되기 어려울 가능성도 있었다. 세부적인 설비의 특성, 작업환경의 관리방법, 작업량, 작업인력 등 본 연구에서 구분하지 않은 유해인자의 노출수준에 영향을 미칠 수 있는 다양한 차이점이 석탄화력발전소 간에 존재하였다. 따라서 본 연구의 일부 높은 측정값이 평가한 모든 발전소에서 항상 발생하는 것으로 일반화하여 해석하지 않기를 바란다.

<표 V-1> 작업환경관리 개선 권고사항

관찰된 사항	관찰된 사항에 따른 영향	권고사항
<p>낙탄의 청소를 위해 물청소설비, 고정식 진공청소설비 또는 이동식(차량) 진공청소설비가 설치되어 있었으나, 낙탄의 양이 많은 경우 삽질하여 대차나 호퍼에 담아 운반하거나 컨베이어에 다시 올리는 방식으로 청소하였다.</p>	<p>삽질, 호퍼에 담은 낙탄의 처리 시 퇴적된 분진이 재비산되어 작업장 내 분진농도 상승 우려가 있었다. 컨베이어에 올려진 분탄은 다음 공정에서 다시 비산되기 쉬웠다.</p>	<p>설비 보강을 통해 건조하고 분진이 많은 석탄의 청소 시 물청소 또는 진공청소하고, 가능한 건조한 상태의 삽질과 비질을 금지할 필요가 있다. 진공청소를 하는 경우 이동식 진공청소설비(진공차 등) 보다는 고정식 진공청소설비 사용하는 것이 바람직하다. 이동식 진공청소설비를 사용하여 포집된 분탄을 운반해서 처리하는 과정에서 분진이 다시 비산될 우려가 있다.</p>
<p>옥내저탄장에서 빗자루가 관찰되었고, 작업자의 말에 따르면 마른 상태로 비질하기도 한다고 하였다.</p>		
<p>이송탑의 바닥과 벽면의 수평 부위에 상당한 양의 분탄이 쌓여 방치되어 있었고, 운탄 이후에 지체 없이 청소가 이루어지지 않는 것으로 보였다.</p>	<p>작업자가 이동하거나 설비 가동으로 인해 진동이 가해질 때 바닥과 설비에 쌓인 분진이 재비산되었다.</p>	<p>운탄과 회반출 작업 후 지체 없이 작업장의 분진을 청소할 필요가 있다. 작업장 바닥과 설비에 분탄이 퇴적된 상태로 방치되지 않도록 하여야 한다.</p>
<p>회반출장 바닥과 설비가 비산재로 오염되어 있었다.</p>		
<p>효과적인 물청소를 위해서는 적절한 형태와 수압의 노즐을 사용하고 배수가 원활한 구조여야 하는데, 부분적으로 배수가 원활하지 않거나 배</p>	<p>청소 시 작업자의 석탄분진 노출이 증가하고, 배출되지 않은 석탄분진이 건조된 후 재비산될 우려가 있었다.</p>	<p>관련 협력사와 협의하여 청소설비의 성능을 지속적으로 개선할 필요가 있다. 물청소를 효과적으로 실시하기 위해 적절한 형태와 수압의 노</p>

관찰된 사항	관찰된 사항에 따른 영향	권고사항
<p>다이크 평탄하지 않아서 분진이 물과 함께 여울에 고여 있는 경우가 있었다.</p> <p>위층에 퇴적된 분진이 바닥의 틈이나 구멍 등 개구부를 통해 아래층으로 떨어지며 공기 중으로 비산되거나, 물청소 시 석탄이 포함된 물이 적절한 배수도가 아닌 바닥의 개구부를 통해 아래층으로 떨어져 바닥과 설비를 오염시켰다.</p>		<p>즐 사용, 작업장 바닥의 평탄화, 작업장 바닥의 틈새 및 구멍이 없게 하여 아래층으로의 낙수 및 낙진 방지, 적절한 성능의 배수구 및 배수관 설치, 침전조와 배수펌프 설비 용량 및 성능 개선, 진공청소설비의 용량 및 성능 개선 등을 지속적으로 추진하기 바란다.</p>
<p>진공청소설비의 하부 호퍼에 수집된 분탄을 다시 컨베이어에 분거나 이송탑 외부로 반출하여 옥내저탄장으로 옮긴 후 다시 상탄하였다.</p>	<p>분탄을 처리하는 과정에서 작업자가 분진에 노출되었다. 분탄이 재순환되고 재비산되어 분진 농도가 상승될 우려가 있었다.</p>	<p>적절한 조치 없이 진공청소기와 청소차량에 수집된 분탄이 다시 컨베이어에 공급되지 않도록 조치할 필요가 있다. 진공청소설비의 하부 호퍼에 수집된 분탄을 공압식으로 보일러 사일로로 이송하거나, 펠렛이나 조개탄으로 압축하여 배출하는 등 적절한 처리방법을 고안하기 바란다.</p>
<p>기계공이나 전기공이 설비와 설비 주변 바닥이 분진에 오염된 상태로 설비를 정비하는 모습이 관찰되었다.</p>		<p>정비작업 시에는 작업 전에 작업이 예정된 장소와 설비에 오염된 분진을 청소할 필요가 있다.</p>
<p>슈트에서 국소배기장치에 포집된 석탄분진이 덕트를 통해 다음 컨베이어의 테일부위로 공급되었다.</p>	<p>컨베이어로 공급된 석탄분진이 공기 중으로 비산되었고, 컨베이어로 위에 떨어진 분탄은 다음 컨베이어에서 이송되는 과정과 다음 슈트에서</p>	<p>비산을 최소화하기 위한 적절한 조치 없이 국소배기장치에 포집된 분진이 다시 컨베이어에 공급하지 않도록 조치할 필요가 있다. 특히 포</p>

관찰된 사항	관찰된 사항에 따른 영향	권고사항
	다시 비산될 수 있었다.	집된 분진이 다음 컨베이어의 개방된 상부에서 배출되지 않도록 할 필요가 있다. 국소배기장치에 포집된 분진을 공압식으로 보일러 사일로로 이송하거나, 펠렛이나 조개탄으로 압축하여 배출하는 등 적절한 처리방법을 고안하기 바란다.
포위식 국소배기장치 후드의 컨베이어가 드나드는 부위에 개구부를 최소화하기 위해 사이드 커튼이 설치되어 있었으나 손상된 상태로 방치되거나 사이드 커튼이 없는 경우가 있었다.	국소배기장치의 포집속도가 감소되고 분진의 비산이 증가될 수 있었다.	국소배기장치 포위식 후드의 컨베이어가 드나드는 개구부에 사이드 커튼이 없는 경우 설치하고, 손상된 경우 수리하여 후드의 개구부를 최소화할 필요가 있다.
이동식 배탄기를 운영하는 발전소 3개소 중에서 1개소의 배탄기에는 상부에 국소배기장치가 설치되었으며, 2개소의 배탄기에는 국소배기장치가 설치되지 않았다.	슈트에서 발생된 분진이 공기 중에 비산될 수 있었다.	이동식 배탄기 상부에 가능하면 국소배기장치를 설치할 필요가 있다.
고정식 배탄설비가 설치된 발전사의 설비는 슈트에 국소배기장치가 설치되어 있었으나 슈트와 슈트 사이의 컨베이어는 개방된 상태였다.	석탄 운반 과정에서 컨베이어서 석탄분진이 발생되었다.	고정식 배탄설비의 컨베이어는 밀폐가 가능하면 밀폐하기를 권고한다.
회반출설비에서 탱크로리로 석탄재를 공급 시 노즐에 분진회수장치가 설치되지 않은 경우가 있었다. 회반출장치의 노즐 끝이 탱크로리의 탱	개방된 부위에서 분진이 비산되었다.	회반출설비에서 탱크로리로 석탄재를 공급하는 노즐에 분진회수장치가 설치되지 않은 경우 설치할 필요가 있다.

관찰된 사항	관찰된 사항에 따른 영향	권고사항
크에 밀착되지 않은 경우 석탄재를 공급하는 동안 석탄재가 사이 공간을 통해 비산되었다.		
탱크로리가 아닌 덤프트럭에 석탄분진이나 석탄재를 반출할 때 다량의 분진이 발생하였다.	개방된 부위에서 분진이 비산되었다.	탱크로리가 아닌 덤프트럭으로 석탄재 등 분진을 이송하지 않아야 한다.
분진을 반출하는 설비에 국소배기장치가 설치되어있지 않거나, 설치된 캐노피식 후드의 크기에 비해 덕트가 작고 연결된 제어풍속이 충분하지 않아 분진이 외부로 비산되는 경우가 있었다.	분진 배출 시 분진이 비산되고 국소배기장치를 통해 효율적으로 제어되지 않았다.	회반출설비의 석탄재 공급 부위에 국소배기장치가 설치되어있지 않은 경우 설치하고, 제어풍속을 확인하여 충분한 성능이 유지되도록 개선할 필요가 있다.
석탄설비의 전체환기는 루버를 통한 자연환기가 일부 이뤄지고 있었고, 작은 창문이 있는 경우가 있었으나 개방하지는 않았다. 동력을 이용한 전체환기설비는 모든 발전소에서 관찰되지 않았다.	작업장 공기가 효과적으로 깨끗한 공기로 치환되고, 유해물질이 희석되지 않았다.	석탄설비에 국소배기장치나 분무설비 등 적절한 분진제설설비의 설치가 불가능한 경우 동력을 이용한 전체환기장치를 설치할 수 있는지 검토하기 바란다.
발전소 4개소 중 1개소의 옥내저탄장에 분무장치와 살수장치가 함께 설치되어 있었다. 1개소는 분무장치가 설치되어 있었고 다른 1개소는 살수장치가 설치되어 있었다. 발전소 4개소 중 1개소의 일부 이송탑에 분무장치가 설치되어	분무설비는 비산된 석탄입자가 응집체 또는 집합체를 형성하여 석탄입자가 빠르게 바닥으로 침강하도록 하고, 살수설비는 석탄이 습기를 머금게 하여 후속 작업에서 분진의 비산을 억제하는 효과가 있는 것으로 보였다.	옥내저탄장, 이송탑, 배탄기실 등에 분무설비 또는 살수설비가 없는 경우 가능한 설치하여 분진비산을 최소화하기 바란다.

관찰된 사항	관찰된 사항에 따른 영향	권고사항
있었다. 발전소 4개소 중 1개소의 배탄기실에 분무장치가 설치되어 있었다.		
발전소에서 설비를 슈트 근처의 점검창이 열린 채로 가동하였다.	석탄을 이송하는 동안 석탄분진의 누설이 되어 공기 중에 비산되고 바닥에 축적되는 것이 관찰되었다. 점검창 개구부를 통해 분탄이 누설되어 바닥에 축적되었다.	석탄설비의 점검창이 열린 상태로 석탄을 이송하지 않도록 하여야 한다.
실링재와 라이너 플레이트 등이 노후되어 이격이 발생하거나 설비가 마모된 채로 설비를 가동하였다.	분탄이 누설되어 공기 중에 비산되고 바닥에 축적되었다.	주기적인 설비점검을 통한 석탄설비 컨베이어 슈트와 스커트보드의 노후된 실링재 교체, 슈트 라이너 플레이트 설치 및 노후된 제품 교체, 컨베이어 벨트 헤드의 고착탄 제거를 위한 스크래퍼 설치, 핀홀 발생 시 지체 없는 수리 실시 등 설비로부터 분탄의 누설을 최소화할 필요가 있다.
옥내저탄장의 상/하탄기 컨트롤룸, 배탄기실의 배탄설비 컨트롤룸, 옥내저탄장 내에 작업하는 중기의 캐빈 내에서 석탄분진 노출 가능성이 있었다.	석탄설비 내의 컨트롤룸과 중기의 캐빈 내에서 분진에 노출될 우려가 있었다.	옥내저탄장 내 상/하탄기 컨트롤룸, 배탄기실 컨트롤룸 등 석탄설비의 실내에 있는 컨트롤룸과 옥내저탄장 내에서 작업하는 중기의 캐빈에 HEPA필터가 있는 공기공급장치를 설치하여 내부로 깨끗한 공기가 공급되고 양압이 유지되도록 조치할 필요가 있다.

관찰된 사항	관찰된 사항에 따른 영향	권고사항
회반출 시 탱크로리 안에 석탄재가 들어간 양을 관찰하기 위해 작업자가 탱크의 개구부 위에서 내부를 관찰하며 노즐의 높이를 버튼으로 조작하였다. 몸에 묻은 석탄재를 털기 위해 압축공기를 사용하는 탱크로리 운전자와 회반출 설비 운영공이 관찰되었다.	노즐 조작과 압축공기 사용 시 석탄재 분진에 노출되었다.	회반출 시 격리된 공간에서 창을 통해 탱크로리의 탱크 내부를 확인하고 설비를 조작할 수 있도록 트럭 탱크 상부에 점검창과 회반출 노즐 조절기가 설치된 격리된 공간을 설치할 필요가 있다.
한 발전소의 건조한 분탄을 청소한 작업자에게서 노출기준 11배를 초과하는 결정체 산화규소 농도가 측정되었으나, 분리식 반면형 특급 방진 마스크를 착용하였다.	호흡보호구의 보호계수가 낮아 작업자가 석탄분진과 결정체 산화규소로부터 적절히 보호되지 않았다.	노출기준의 11배 이상의 결정체 산화규소 노출 수준을 보인 낙탄처리 작업자에게 해당 발전소는 분리식 전면형 특급 방진마스크를 지급하고 작업 중 착용하도록 조치하는 것이 필요하다. 다른 발전소도 컨베이어 케이싱 등 협소한 공간에서 다량의 분탄을 삼질하는 방식으로 청소하는 작업자에 대해 노출기준의 10배를 초과하지 않는다는 노출평가 자료가 없다면 분리식 전면형 특급 방진마스크를 지급하고 착용시킬 필요가 있다.
평가한 발전소 4개소의 석탄분진과 석탄재분진에 노출되는 모든 작업자는 반면형 1급 또는 특급 방진마스크를 착용하고 있었다. 대부분의	필요 이상의 마스크 구매비용이 지출되고, 호흡 불편으로 인해 마스크를 올바르게 착용하지 않을 수 있었다.	노출기준의 10배 이하의 석탄분진과 결정체 산화규소에 노출되는 작업자는 반면형 안면부 여과식 1급 마스크 또는 그 이상의 보호성능을

관찰된 사항	관찰된 사항에 따른 영향	권고사항
<p>작업자에게 특급마스크를 지급하는 발전소, 높은 분진농도에 노출되는 작업자에게 선별적으로 특급마스크를 지급하는 발전소 등 발전소 간에 특급마스크 착용 작업에 차이가 있었다. 낙탄처리 작업자는 발전소 4개소 모두 반면형 특급 방진마스크를 착용하였다. 그 중 1개소의 낙탄처리 작업자는 분리식 반면형 특급 방진마스크를 착용하였으며, 그 외의 모든 작업자는 안면부 여과식 방진마스크를 착용하였다.</p>		<p>보이는 마스크를 착용할 수 있다.</p>
<p>발전소 관계자의 말에 따르면 석탄화력발전소 특조위 보고서 이후 인체발암성물질인 결정체 산화규소로부터 작업자를 보호하기 위해 특급 방진마스크를 지급하기 위해 노력하고 있다고 하였다</p>		
<p>일부 작업자들은 특급 방진마스크 착용으로 인해 호흡의 불편함을 호소하였다. 사업주가 특급과 1급 방진마스크를 모두 지급하는데, 작업자가 1급 방진마스크를 선호하여 착용하기도 하였다.</p>		

관찰된 사항	관찰된 사항에 따른 영향	권고사항
일부 작업자가 방진마스크를 부적절하게 착용하는 사례가 관찰되었다. 방진마스크의 머리끈 두 개 중 하나만 머리에 걸거나 느슨하게 착용하는 사례가 관찰되었다.	방진마스크 착용을 통해 기대되는 수준 이상의 분진노출 저감 효과를 얻을 수 없었다.	작업자가 안면부를 깨끗하게 면도하고, 구렛나루나 수염을 기르지 않도록 지도하고, 작업 중 방진마스크를 안면부에 밀착시켜 정확하게 착용하도록 지속적으로 교육하기 바란다.
일부 작업자의 면도 상태가 불량하여 방진마스크의 안면부와 밀착도가 낮고 누설될 우려가 있었다.		작업자의 안면부 형태에 적합한 방진마스크를 선정하고, 마스크의 정확한 착용법과 마스크 착용의 중요성에 대한 교육훈련 효과를 위해 방진마스크의 정량적 밀착도평가를 도입하기를 권장한다. 특히 고농도의 분진에 노출되는 석탄 설비의 운영공에 대해 우선 실시하기 바란다.
방음보호구는 폼타입의 귀마개를 지급하고 있었다.		보일러 건물과 터빈 건물 내 고소음 발생구역에서 작업자가 귀마개 등 방음보호구를 착용하도록 지속적으로 관리하기 바란다.
2020년 상반기 작업환경측정 결과 기준으로 발전소 4개소 중 2개소는 석탄화력발전소 특조위 권고사항에 따라 석탄분진 및 석탄재분진 노출 작업자의 석탄에 함유된 금속(비소, 수은, 니켈, 납)에 대한 노출평가와 일부 작업환경의 휘발성 유기화합물 농도수준에 대한 평가를 실시하		작업환경측정은 석탄분진에 대해서 석탄분진과 결정체 산화규소(석영), 석탄재분진에 대해서 기타 광물성 분진과 결정체 산화규소(석영)에 대해 실시하기 바란다. 석탄재에 중량비율 1% 이상 함유된 작업환경측정 대상 유해인자(알파 알루미나, 산화철, 산화마그네슘)는 별도로 시료

관찰된 사항	관찰된 사항에 따른 영향	권고사항
였다.		채취 및 분석하지 말고 석탄재의 기타 광물성 분진의 농도를 준용해서 평가할 수 있다. 금속(비소, 수은, 니켈, 납)과 옥내저탄장의 유기화합물에 대한 작업환경측정은 석탄 또는 석탄재 내 함유율이 본 연구와 달리 크게 높지 않다면 실시할 필요성이 없다.
석탄분진과 석탄재분진의 호흡성분진과 결정체 산화규소 농도는 높은 양의 상관관계를 보였다.		호흡성분진의 농도를 직독식측정장치로 측정하여 작업환경 관리에 활용할 수 있다.
발전소 4개소 모두 자연발화에 대비하여 옥내저탄장의 일산화탄소 농도를 모니터링하고 있었으나, 이 중 1개소는 가스농도가 제어실에서만 확인되고 옥내저탄장 출입구에 농도를 알릴 수 있는 장치가 설치되지 않았다.	작업자가 출입 전에 가스농도를 알 수 없었다.	옥내저탄장의 일산화탄소 농도가 제어실에서만 확인되는 발전소는 옥내저탄장 출입구에 일산화탄소 농도와 위치를 알릴 수 있는 장치를 설치하는 것이 필요하다.
발전소 4개소 중 1개소는 옥내저탄장 작업자에게 휴대용 가스농도측정기를 지급하였다. 한 발전소에서 한 작업자가 본인의 사비로 휴대용 가스농도측정기를 구매하여 착용하고 있는 것이 확인되었다.	넓은 저탄장에서 가스농도는 국부적으로 상승하고, 가스의 고정식 센서에 감지되는 시간과 작업자의 호흡기에 도달하는 시간에 차이가 있을 수 있다고 판단되었다.	옥내저탄장 작업자에게 휴대용 일산화탄소 가스농도모니터를 지급하고 사용하도록 하기 바란다.
발전소 4개소 모두 석탄의 물질안전보건자료를	작업자에게 적절한 유해성 주지가 되지 않을	석탄재의 물질안전보건자료를 보유하지 않은

관찰된 사항	관찰된 사항에 따른 영향	권고사항
보유하고 있었으나, 그 중 2개소는 석탄재의 물질안전보건자료를 보유하지 않았다.	수 있었다.	발전소는 물질안전보건자료를 작성하여 게시하거나 갖추어두어야 한다.
발전소 4개소에서 수집한 석탄의 물질안전보건자료 24개 중 19개(79%)는 유해성·위험성에 발암성 분류 1A가 기재되어 있지 않았고, 7개(29%)는 구성성분의 명칭 및 함유량에 결정체 산화규소가 함유되어 있음이 기재되어 있지 않았다. 석탄재의 물질안전보건자료는 확인한 2개 모두 발암성 분류 1A를 표기하였으나 결정체 산화규소의 함유는 표기되어 있지 않았다.	작업자에게 적절한 유해·위험성 주지가 되지 않을 수 있었다	석탄과 석탄재의 물질안전보건자료 작성 시 구성 성분의 함유량에 ‘결정체 산화규소(석영)가 함유되어 있음’을 표기하고 유해성·위험성 분류에 ‘발암성 분류 1A’를 표기하여야 한다.
발전소 관계자의 말에 따르면 수출국가에서 제공되는 영문 물질안전보건자료가 부실하고 제공하는 국가마다 내용이 달라서 물질안전보건자료를 충실하게 작성하기가 어렵다고 하였다.		산업안전보건법에 따른 물질안전보건자료의 작성 주체는 수입자 또는 제조자이므로 해외 수출사가 제공하는 석탄의 영문 물질안전보건자료가 부실하더라도 수입자는 고용노동부의 화학물질의 분류·표시 및 물질안전보건자료에 관한 기준에 따라 충실하게 작성하여야 한다.
한 사업장에서 재하청업체의 작업자들이 적절한 휴식공간이 없어서 작업이 끝난 후에 작업장에서 서성이고 있는 것이 관찰되었다.		재하청업체의 작업자가 쉴 수 있는 적절한 휴게공간을 마련해주기를 바란다.

관찰된 사항	관찰된 사항에 따른 영향	권고사항
<p>석탄설비 9개소 중 배탄기실 1개소, 보일러 및 터빈설비 7개소 중 보일러설비 3개소 터빈설비 3개소가 고열 스트레스의 중등작업 시 계속작업 기준을 초과하였다.</p>	<p>해당 장소에서 장시간 작업 시 고열로 인한 건강영향 우려가 있었다.</p>	<p>보일러 및 터빈 건물 내부 고열지역과 폭염기의 이송탑 및 컨베이어 작업자들이 시원하게 설 수 있는 냉방장치가 있는 적절한 휴게공간을 주된 작업 장소에서 가까운 위치에 설치하고, 음용수를 제공할 필요가 있다.</p> <p>고열 스트레스는 날씨, 작업위치, 작업강도, 작업복, 작업자의 고열 순응도 등 다양한 요인에 의해 결정되므로, 발전소 보건업무담당자가 능동적으로 작업 상황을 모니터링하고 고열 스트레스 노출을 최소화하기 위해 노력할 필요가 있다.</p>
<p>작업장으로부터 화장실 및 휴게시설의 거리가 멀어서 작업자들이 불편을 느끼는 경우가 있었다.</p>		<p>주요 작업장소로부터 화장실과의 거리와 작업자의 의견을 고려하여, 필요한 경우 화장실을 설치하기 바란다.</p>
<p>상탄라인의 컨베이어는 두 줄이 운영되는데 한 라인이 운탄 중에 다른 한 라인을 멈추고 정비 작업하거나, 운탄 중에 이송탑 내에서 물청소하는 모습이 관찰되었다.</p>	<p>작업 중 가동 중인 설비에서 비산되는 분진에 노출될 우려가 있었다.</p>	<p>컨베이어 2개 라인 중 하나를 정비 시 가능하면 정비하지 않는 컨베이어도 가동을 멈출 필요가 있다. 석탄설비의 청소는 가능하면 운탄이 모두 종료된 후에 실시하기 바란다.</p>
<p>휴식시간 등에 흡연하는 작업자를 흔하게 볼</p>	<p>석탄분진 노출과 흡연의 상가작용으로 인한 건</p>	<p>작업자 건강관리를 위해 적극적인 금연 프로그램</p>

관찰된 사항	관찰된 사항에 따른 영향	권고사항
수 있었다.	강영향이 우려되었다.	램을 실시하기 바란다. 석탄분진 및 결정체 산화규소 노출과 흡연은 폐질환 발생에 상가관계이다.

참고문헌

고 김용균 사망사고 진상규명과 재발방지를 위한 석탄화력발전소 특별노동안전조사위원회. 고 김용균 사망사고 진상조사결과 종합보고서. ISBN 979-11-88896-12-7. 2019.

고용노동부. 산업안전보건기준에 관한 규칙. 고용노동부령 제251호. 2019.

고용노동부. 화학물질의 분류·표시 및 물질안전보건자료에 관한 기준. 고용노동부고시 제2016-19호. 2016.

고용노동부. 산업안전보건법. 법률 제17433호. 2020.

고용노동부. 화학물질 및 물리적 인자의 노출기준. 고용노동부고시 제2020-48호. 2020.

박동원, 최한나, 우남철, 김휘중, 정다위. 국내 석탄 화력발전소 배출 바닥재의 중금속 용출 가능성 평가. J Soil & Groundwater Env 2013;18(7):32-40.

에너지경제연구원. 2019 에너지통계연보. ISSN 1226-606X. 2019.

전력거래소 장기수급처. 2018년도 발전설비현황. 2019.

한국전력공사. 제89호(2019년) 한국전력통계. 등록번호 2020-9721-정0019. 2020.

American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). Coal Dust - Documentation of the Threshold Limit Values for chemical substances and physical agents and Biological Exposure Indices. ACGIH. 2001.

American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). Aluminum metal and insoluble compounds - Documentation of the Threshold Limit Values for chemical substances and physical agents and Biological Exposure Indices. ACGIH. 2008.

American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). Silica, crystalline- α -quartz and cristobalite - Documentation of the Threshold Limit Values for chemical substances and physical agents and Biological Exposure Indices. ACGIH. 2010.

American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). 2020 TLVs and BEIs - Based on the documentation of the Threshold Limit Values for chemical substances and physical agents and Biological Exposure Indices. ACGIH. 2020.

American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard Test Methods for Determination of Major and Minor elements in Coal, Coke and Solid Residues from Combustion of Coal and Coke by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry. ASTM D6349-13. 2013.

American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard Test

Methods for Total Sulfur in Coal and Coke Combustion Residues Using a High-Temperature Tube Furnace Combustion Method with Infrared Absorption. ASTM D5016-16. 2016.

American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard Test Methods for Determination of Trace Elements in Coal, Coke, and Combustion Residues from Coal Utilization Processes by Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry, Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, and Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrometry. ASTM D6357-19. 2019.

American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard Test Method for Total Mercury in Coal and Coal Combustion Residues by Direct Combustion Analysis. ASTM D6722-19. 2020.

Bird MJ, MacIntosh DL, Williams PL. Occupational exposure during routine activities in coal-fired power plants. *J Occu Environ Hyg* 2004;1:403-413.

Borm PJA. Toxicity and occupational health hazards of coal fly ash (CFA). A review of data and comparison to coal mine dust. *Ann Occu Hyg* 1997;41(6):659-676.

Engelbrecht J, Tau P, Hongoro C. Occupational health hazards of fabric bag filter workers' exposure to coal fly ash. *Journal of Toxicology and Environmental Health Sciences* 2012;4(3):57-64.

Fernández-Martinez G, Lopez-Mahia P, Muiategui-Lorenzo S, Prada-Rodríguez D. Determination of volatile organic compounds in coal, fly ash and slag samples by direct thermal desorption/GC/MS. *Analisis* 2000;28:953-959.

Health and Safety Executive (HSE). Respiratory protective equipment at work-A practical guide. HSG53. ISBN 978 0 7176 6454 2. 2013.

Hicks J, Yager J. Airborne crystalline silica concentrations at coal-fired power plants associated with coal fly ash. *J Occup Environ Hyg* 2006;3:448-455.

Hnizdo E. Combined effect of silica dust and tobacco smoking on mortality from chronic obstructive lung disease in gold miners. *Br J Ind Med* 1990;47(10):656-664.

International Agency for Research on Cancer (IARC). Silicad Dust, crystalline, In the form of quartz or cristobalite. IARC Monograph 100C-14. 2012.

Kuempel ED, Wheeler MW, Smith RJ, Vallyathan V, Green FHY. Contributions of dust exposure and cigarette smoking to emphysema severity in coal miners in the United States. *Am J Respir Crit Care Med* 2009;180(3):257-264.

Lai H, Liu Y, Zhou M, Shi T, Zhou Y, Wen S, Chen W. Combined effect

of silica dust exposure and cigarette smoking on total and cause-specific mortality in iron miners: a cohort study. *Environ Health* 2018;17(1):46.

Mulhausen JR, Damiano J. A strategy for assessing and managing occupational exposures. 2nd ED. ISBN 0-932627-86-2. 1998.

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). Health Hazard Evaluation Determination. Report NO. 78-50 (A, B, & C)- 517. 1987.

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). Health Hazard Evaluation Report. HETA 82-093-1453. 1984.

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). Mercury. NMAM 6009. NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM) 4th ed. 1994.

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). Silica, crystalline, by XRD (filter redeposition). NMAM 7500. NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM) 4th ed. 1994.

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). Volatile organic compounds (screening). NMAM 2549. NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM) 4th ed. 1994.

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). Particulates not otherwise regulated, Respirable. NMAM 0600. NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM) 4th ed. 1998.

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). Elements by ICP (Hot block/HCl/HNO₃ digestion). NMAM 7303. NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM) 4th ed. 2003.

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). Hydrocarbons, Aromatic. NMAM 1501. NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM) 4th ed. 2003.

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). NIOSH Policy Statement-Respiratory protection recommendations for airborne exposures to crystalline silica. DHHS (NIOSH) Publication No. 2008-140. 2008.

Occupational Safety and Health Administration (OSHA). Standard Interpretations-Respirators for silica dust must be selected based on exposure levels. 1999.

Occupational Safety and Health Administration (OSHA). Assigned Protection Factors for the Revised Respiratory Protection Standard. OSHA 3352-02. 2009.

Stam AF, Meij R, Winkel HT, Eijk RJV, Huggins FE, Brem G. Chromium speciation in coal and biomass co-combustion products. Environ Sci Technol 2011;45(6):2450-2456.

The State of Queensland. Managing respirable dust hazards in coal-fired power stations. Code of Practice 2018. 2018.

U.S. Geological Survey (USGS). Coal—A complex natural resource: An overview of factors affecting coal quality and use in the United States. U.S. GEOLOGICAL SURVEY CIRCULAR 1143. 2003.
1994

Yager JW, Hicks JB, Fabianova E. Airborne arsenic and urinary excretion of arsenic metabolites during boiler cleaning operations in a Slovak coal-fired power plant. *Environmental Health Perspectives* 1997;105(8):836-842.

Abstract

Evaluation of occupational exposures in coal-fired power plants

Objectives:

This study evaluated occupational exposures during routine nonoutage works in coal-fired power plants to establish a baseline dataset and suggested good control practices to minimize health hazards.

Methods:

The data were collected from 4 facilities that were selected to be representative of coal-fired power plants in the Republic of Korea. At each facility, an industrial hygiene survey was conducted including an assessment of control measures and exposure monitoring for coal dusts, coal fly ash dusts, respirable crystalline silica, minor and trace metals of coal, volatile organics, gases, noise, and heat stress. A total of 212 personal samples and 78 area samples for were collected. Coal and coal fly ash bulk samples were collected from facilities and subjected to analysis of crystalline silica, metals, and volatile organics.

Results:

4 out of 144 personal respirable dusts and respirable crystalline silica samples at coal facilities exceeded the occupational exposure limits(OELs), respectively. All 15 personal samples for 11 minor or trace metals in coals were below 1% of OELs of each metal species. Benzene, toluene, xylene,

and n-hexane were not detected from all 7 area samples collected from indoor coal storage hazes and tripper areas. CO and SO₂ were not detected from 2 measurements at a denitrification facility and indoor coal storage haze. 2 out of 53 noise measurements exceed 85 dBA. Heat stress measurements showed that 1 out of 9 coal facilities and 6 out of 7 boiler and turbine facilities exceeded 1 hour OELs. Differences of engineering control and management control between facilities were identified and benchmarks of good control were suggested.

Conclusions:

The results show that overexposure to coal dusts, respirable crystalline silica, noise, and heat stress may be encountered during routine nonoutage work activities in coal-fired power plants. Following advices and recommendation suggested in this study, appropriate actions should be taken to reduce future health outcome from occupational exposure in the industry.

Key words: coal-fired power plant, coal dusts, respirable crystalline silica

부록

부록 1: 국내 석탄화력발전소 현황

<표 A1-1> 국내 석탄화력발전소 현황(2020년 5월 기준)³⁵⁾

발전사	사업장	발전기	준공 년도	단위용량 (kW)	근로자수(명)		연료		보일러방식	집진방식	회처리방식	
					발전 사	협력사	종류	주요수입국			바닥재	비산재
한국남동발전(주)	삼천포	삼천포 #1	1983	560,000	546	856	유연탄	호주, 인니	미분탄연소	건식 ESP	습식연속기계	압력이송
		삼천포 #2	1984	560,000					미분탄연소	건식 ESP	습식연속기계	압력이송
		삼천포 #3	1993	560,000					미분탄연소	건식 ESP	습식연속기계	압력이송
		삼천포 #4	1994	560,000					미분탄연소	건식 ESP	습식연속기계	압력이송
		삼천포 #5	1997	500,000					미분탄연소	건식 ESP	습식연속기계	압력이송
		삼천포 #6	1998	500,000					미분탄연소	건식 ESP	습식연속기계	압력이송
	영흥	영흥 #1	2004	800,000	631	1323	유연탄	호주, 인니, 러시아, 미국, 캐나다	미분탄연소	건식 ESP	습식연속기계	압력이송
		영흥 #2	2004	800,000					미분탄연소	건식 ESP	습식연속기계	압력이송
		영흥 #3	2008	870,000					미분탄연소	건식 ESP	습식연속기계	압력이송
		영흥 #4	2008	870,000					미분탄연소	건식 ESP	습식연속기계	압력이송
		영흥 #5	2014	870,000					미분탄연소	건식 ESP	습식연속기계	압력이송
		영흥 #6	2014	870,000					미분탄연소	건식 ESP	습식연속기계	압력이송

35) 영동발전소는 2020년에 연료전환(무연탄→우드펠릿) 예정으로 파악되어 명단에서 제외하였음

발전사	사업장	발전기	준공 년도	단위용량 (kW)	근로자수(명)		연료		보일러방식	집진방식	회처리방식	
					발전 사	협력사	종류	주요수입국			바닥재	비산재
	여수	여수 #1	2016	340,000	200	313	유연탄	호주, 인니, 러시아, 미국, 캐나다	순환유동층연소	건식 ESP	회재순환처리	압력이송
		여수 #2	1977 (11년 중유→ 유연탄)	328,600					순환유동층연소	건식 ESP	회재순환처리	압력이송
한국중부발전(주)	보령	보령 #1	1983	500,000	501	672	유연탄	호주, 인니, 캐나다	미분탄연소	건식 ESP	습식연속기계	압력이송
		보령 #2	1984	500,000					미분탄연소	건식 ESP	습식연속기계	압력이송
		보령 #3	1993	500,000					미분탄연소	건식 ESP	회재순환처리	압력이송
		보령 #4	1993	500,000					미분탄연소	건식 ESP	회재순환처리	압력이송
		보령 #5	1993	500,000					미분탄연소	건식 ESP	회재순환처리	압력이송
		보령 #6	1994	500,000					미분탄연소	건식 ESP	회재순환처리	압력이송
		보령 #7	2008	500,000					미분탄연소	건식 ESP	습식연속기계	압력이송
		보령 #8	2008	500,000					미분탄연소	건식 ESP	습식연속기계	압력이송
	신보령	신보령 #1	2017	1,019,024	250	689	유연탄	호주, 인니	미분탄연소	건식 ESP	건식처리방식	압력이송
		신보령 #2	2017	925,989					미분탄연소	건식 ESP	건식처리방식	압력이송
한국서부발전(주)	태안	태안 #1	1995	500,000	1,177	1,192	유연탄	호주, 인니, 러시아, 콜롬비아	미분탄연소	건식 ESP	습식연속기계	압력이송

발전사	사업장	발전기	준공 년도	단위용량 (kW)	근로자수(명)		연료		보일러방식	집진방식	회처리방식				
					발전 사	협력사	종류	주요수입국			바닥재	비산재			
		태안 #2	1995	500,000								미분탄연소	건식 ESP	습식연속기계	압력이송
		태안 #3	1997	500,000								미분탄연소	건식 ESP	습식연속기계	압력이송
		태안 #4	1997	500,000								미분탄연소	건식 ESP	습식연속기계	압력이송
		태안 #5	2001	500,000								미분탄연소	건식 ESP	습식연속기계	압력이송
		태안 #6	2002	500,000								미분탄연소	건식 ESP	습식연속기계	압력이송
		태안 #7	2007	500,000								미분탄연소	건식 ESP	건식처리	압력이송
		태안 #8	2007	500,000								미분탄연소	건식 ESP	건식처리	압력이송
		태안 #9	2016	1,050,000								미분탄연소	건식 ESP	건식처리	압력이송
		태안 #10	2017	1,050,000								미분탄연소	건식 ESP	건식처리	압력이송
		태안 IGCC	2016	380,000								석탄가스화복합 발전			
		한국남부발전(주)	하동	하동 #1								1997	500,000	626	800
하동 #2	1997			500,000	미분탄연소	건식 ESP	습식연속기계	압력이송							
하동 #3	1998			500,000	미분탄연소	건식 ESP	습식연속기계	압력이송							
하동 #4	1999			500,000	미분탄연소	건식 ESP	습식연속기계	압력이송							
하동 #5	2000			500,000	미분탄연소	건식 ESP	습식연속기계	압력이송							

발전사	사업장	발전기	준공 년도	단위용량 (kW)	근로자수(명)		연료		보일러방식	집진방식	회처리방식		
					발전 사	협력사	종류	주요수입국			바닥재	비산재	
		하동 #6	2001	500,000						건식 ESP	습식연속기계	압력이송	
		하동 #7	2008	500,000							건식처리방식	압력이송	
		하동 #8	2009	500,000							건식처리방식	압력이송	
	삼척	삼척그린파 위 #1	2016	1,022,000	335	388	유연탄	호주, 인도네시아		건식 ESP	순환유동층연소	건식처리	압력이송
		삼척그린파 위 #2	2017	1,022,000							순환유동층연소	건식처리	압력이송
한국동서발전(주)	당진	당진 #1	1999	500,000	685	1,001	유연탄	호주, 인니, 러시아, 미국		건식 ESP	미분탄연소	습식연속기계	압력이송
		당진 #2	1999	500,000							미분탄연소	습식연속기계	압력이송
		당진 #3	2000	500,000							미분탄연소	습식연속기계	압력이송
		당진 #4	2001	500,000							미분탄연소	습식연속기계	압력이송
		당진 #5	2005	500,000							미분탄연소	습식연속기계	압력이송
		당진 #6	2006	500,000							미분탄연소	습식연속기계	압력이송
		당진 #7	2007	500,000							미분탄연소	습식연속기계	압력이송
		당진 #8	2007	500,000							미분탄연소	습식연속기계	압력이송
		당진 #9	2016	1,020,000							미분탄연소	건식처리	압력이송

발전사	사업장	발전기	준공 년도	단위용량 (kW)	근로자수(명)		연료		보일러방식	집진방식	회처리방식	
					발전 사	협력사	종류	주요수입국			바닥재	비산재
		당진 #10	2016	1,020,000					미분탄연소	건식 ESP	건식처리	압력이송
	호남	호남 #1	1972 (85년 중유→ 유연탄)	250,000	162	121	유연탄	호주, 인니, 러시아, 콜롬비아	미분탄연소	건식 ESP	습식연속기계	압력이송
		호남 #2	1972 (85년 중유→ 유연탄)	250,000					미분탄연소	건식 ESP	습식연속기계	압력이송
	동해	동해 #1	1989	200,000	220	240	무연탄	호주, 러시아, 국내	순환유동층연소	건식 ESP	건식처리	압력이송
		동해 #2	1999	200,000					순환유동층연소	건식 ESP	건식처리	압력이송
	(주GS동해전력)	북평	북평 #1	2017	595,000	132	278	유연탄	호주, 인니, 러시아	미분탄연소	건식 ESP	건식처리
북평 #2			2017	595,000	미분탄연소					건식 ESP	건식처리	압력이송

부록 2: 유해인자별 평가기준

<표 A-2> 유해인자별 평가기준

물질	측정대상(1%초과 함유시)		노출기준					
	작업환경 측정	허용기준	고용노동부			ACGIH TLV		
			기준 (mg/m ³)	물질	발암성	기준 (mg/m ³)	물질	발암성
석탄분진	대상(그밖의 광물성분진)	비대상	1(호흡성)	석탄분진	-	0.4(호흡성) 0.9(호흡성)	무연탄 유연탄 및 갈탄	A4
결정체 산화 규소(석영)	대상	비대상	0.05(호흡성)	석영	1A	0.025(호흡성)	석영	A2
석탄재	대상	비대상	10	그밖의 광물성분진	-			
금속								
-비소(As)	대상	비대상	0.01	비소 및 무기화합물	1A	0.01	비소 및 무기화합물	A1

물질	측정대상(1%초과 함유 시)		노출기준					
	작업환경 측정	허용기준	고용노동부			ACGIH TLV		
			기준 (mg/m ³)	물질	발암성	기준 (mg/m ³)	물질	발암성
-납(Pb)	대상	대상	0.05	납 및 무기화합물	1B (납금속 2)	0.05	납 및 무기화합물	A3
-크롬(Cr)	대상	비대상	0.5	크롬(금속)	-	0.5(흡입성)	크롬(금속)	-
			0.5	크롬(2가)화합물	-	-	-	-
			0.5	크롬(3가)화합물	-	0.003(흡입성)	크롬(3가)화합물	A4
	대상	대상	0.01(불용성) 0.05(수용성)	크롬(6가)화합물	1A	0.0002(흡입성) 0.0005 (STEL, 흡입성)	크롬(6가)화합물	A1
-니켈(Ni)	대상	대상	1	니켈(금속)	2	1.5(흡입성)	금속(원소)	A5
			0.1	니켈(가용성화합물)	1A	0.1(흡입성)	니켈(가용성화합물)	A4
			0.2	니켈(불용성 무기화합물)	1A	0.2(흡입성)	니켈(불용성 무기화합물)	A1

물질	측정대상(1%초과 함유 시)		노출기준					
	작업환경 측정	허용기준	고용노동부			ACGIH TLV		
			기준 (mg/m ³)	물질	발암성	기준 (mg/m ³)	물질	발암성
-수은(Hg)	대상	대상	0.025	수은 및 무기형태	-	0.025	수은 및 무기형태	A4
-카드뮴(Cd)	대상	대상	0.01 0.002(호흡성)	카드뮴 및 그 화합물	1A	0.01 0.002(호흡성)	카드뮴 및 그 화합물	A2
-우라늄(U)	비대상	비대상	0.2	가용성 및 불용성 화합물	1A	0.2 0.6(STEL)	우라늄 가용성 및 불용성 화합물	-
-망간(Mn)	대상	대상	1	망간 및 무기화합물	-	0.02(호흡성) 0.1(흡입성)	망간 및 무기화합물	A4
-바나듐(V)	대상 (오산화바나듐)	비대상	0.05(흡입성)	오산화바나듐 기준	2	0.05(흡입성)	오산화바나듐	A3
-탈륨(Tl)	비대상	비대상	0.1	탈륨(가용성화합물)	-	0.02(흡입성)	탈륨 및 그 화합물	-
-코발트(Co)	대상	대상	0.02	코발트 및 그 무기화합물	2	0.02(흡입성)	코발트 및 그 무기화합물	-

물질	측정대상(1%초과 함유 시)		노출기준					
	작업환경 측정	허용기준	고용노동부			ACGIH TLV		
			기준 (mg/m ³)	물질	발암성	기준 (mg/m ³)	물질	발암성
벤젠	대상	대상	0.5 (STEL 2.5)	벤젠	1A	0.5 (STEL 2.5)	벤젠	A1
톨루엔	대상	대상	50 (STEL 150)	톨루엔	-	20 (STEL 150)	톨루엔	A4
일산화탄소	대상	대상	30 (STEL 200)	일산화탄소	-	25	일산화탄소	-
이산화황	대상	비대상	2 (STEL 5)	이산화황	-	(STEL 5)	이산화황	-
소음	대상	비대상	90(85) dBA	-	-	85 dBA	-	-
고열	대상	비대상	화학물질 및 물리적 인자의 노출기준 참고(고용노동부, 2020)	-	-	2020 ACGIH TLV 참고	-	-

부록 3: 작업환경 관련 사진



[그림 A3-1] 운탄 과정에서 이송탑 내에 누설된 분탄이 바닥에 쌓여 있는 모습



[그림 A3-2] 점검창 패킹부위의 누설로 인하여 바닥에 쌓인 분탄



[그림 A3-3] 바닥의 여울에 고인 석탄분진과 물



[그림 A3-4] 저탄장에 비치된 빗자루



[그림 A3-5] 낙탄을 삽질하여 대차에 담는 모습



[그림 A3-6] 낙탄을 물청소 하는 모습



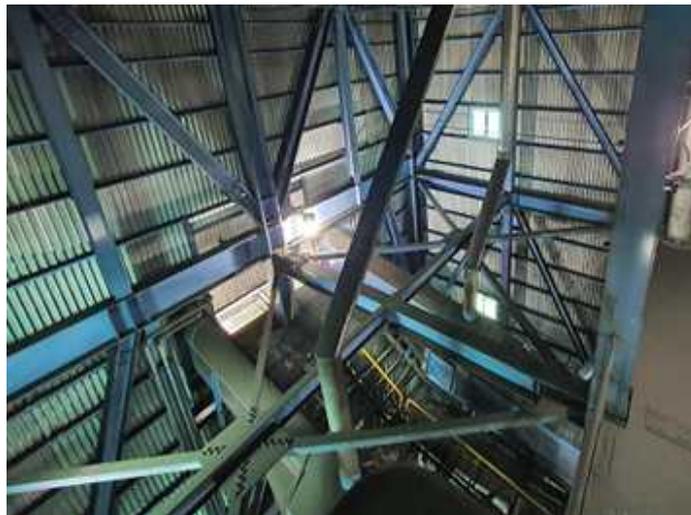
[그림 A3-7] 정비작업 전 작업부위가 청소가 실시되지 않은 모습



[그림 A3-8] 슈트부위의 국소배기장치에서 포집된 분진이 다음 컨베이어의 테일 부위 위로 배출되는 배관



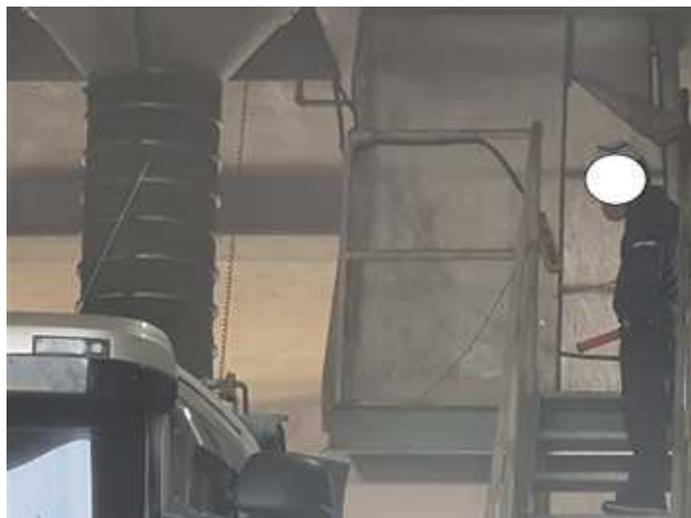
[그림 A3-9] 슈트부위의 국소배기장치에서 포집된 분진이 다음 컨베이어의 테일 부위 위로 배출되며 분진이 비산되는 모습(그림 A3-8의 확대사진)



[그림 A3-10] 슈트부위의 국소배기장치에서 포집된 분진이 다음 컨베이어의 테일 부위로 이송되는 배관



[그림 A3-11] 국소배기장치 후드의 사이드 커튼이 파손된 모습



[그림 A3-12] 회반출 시 작업복과 주변에 쌓인 분진을 제거하기 위해 압축공기(에어건)를 사용하는 모습



[그림 A3-13] 덤프트럭에 반출 시 비산되는 분진

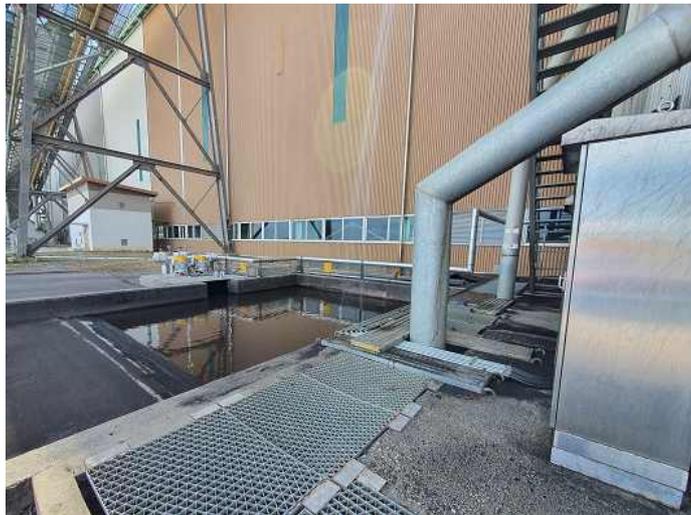


[그림 A3-14] 분진회수장치가 없는 분진 배출구와 후드의 크기에 비해 적게 설계된 배기덕트

부록 4: 작업환경관리 참고 사례 관련 사진



[그림 A4-1] 이송탑의 물청소 배수 시설



[그림 A4-2] 이송탑의 물청소 배수 및 침전조 시설



[그림 A4-3] 컨베이어라인 경사로 하부에 설치된 배수구



[그림 A4-4] 컨베이어라인 경사로 하부에 설치된 배수관



[그림 A4-5] 컨베이어라인 헤드부위 하부에 설치된 자동낙탄회수장치



[그림 A4-6] 컨베이어라인 헤드부위 하부에 설치된 자동낙탄회수장치



[그림 A4-7] 공기부양식 컨베이어 테일 부위 하부에 설치된 연속 물청소 장치



[그림 A4-8] 컨베이어와 밀착된 스킵트 보드 라이너



[그림 A4-9] 컨베이어 슈트의
내마모성 재질 라이너



[그림 A4-10] 배탄기실에 설치된 자동 댐퍼 개방형
국소배기장치



[그림 A4-11] 배탄기실에 설치된 분무장치



[그림 A4-12] 옥내저탄장에 설치된 분무장치와 살수장치



[그림 A4-13] 옥내저탄장에 출입구에 설치된 가스농도 알림판



[그림 A4-14] 옥내저탄장에 출입구에 설치된 가스농도 알림판



[그림 A4-15] 무더위 휴게소

〈〈연 구 진〉〉

연 구 기 관 : 산업안전보건연구원

연구책임자 : 권지운 (연구위원, 직업환경연구실)

연 구 원 : 장광명 (연구원, 직업환경연구실)

김성호 (연구원, 직업환경연구실)

김세동 (연구원, 직업환경연구실)

장미연 (연구원, 직업환경연구실)

노지원 (연구원, 직업환경연구실)

정은교 (수석연구위원, 직업환경연구실)

박승현 (실장, 직업환경연구실)

〈〈연 구 기 간〉〉

2020. 1. 1 ~ 2020. 11. 30

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

산업안전보건연구원장

**석탄화력발전소의 공정별 유해인자 노출 위험도
평가 및 작업환경관리방안 마련 연구**
(2020-산업안전보건연구원-832)

발 행 일 : 2020년 11월
발 행 인 : 산업안전보건연구원 원장 고재철
연구 책임자 : 산업안전보건연구원 권지운
발 행 처 : 안전보건공단 산업안전보건연구원
주 소 : (44429) 울산광역시 중구 중가로 400
전 화 : (052) 703-0884
팩 스 : (052) 703-0337
누 리 집 : <http://www.kosha.or.kr/oshri>
