한국산업보건학회지, 제33권 제3호(2023) ISSN 2384-132X(Print) ISSN 2289-0564(Online)
Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene, 2023: 33(3): 375-383
https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2023.33.3.375

Original Article

석탄화력발전소 호흡성분진 작업환경 평가 전략 사례에 관한 연구

이은승 · 이윤근[1] · 신동일[2*]

명지대학교 대학원 재난안전학과, [1]노동환경건강연구소, [2]명지대학교

A Study on Occupational Environment Assessment Strategies for Respirable Particulate Matter at Coal-Fired Power Plants

Eun-Seung Lee · Yun-Keun Lee[1] · Dong-Il Shin[2*]

Department of Disaster and Safety Graduate School, Myongji University
[1]Wonjin Institute for Occupational and Environmental Health
[2]Myongji University

ABSTRACT

Objectives: Coal-fired power plants feature diverse working conditions, including multi-layered employment structures and irregular work cycles due to outsourcing and non-standardized tasks. The current uniform occupational environment measurement systems have limitations in accurately assessing and evaluating these varied conditions. This study aims to propose alternative measurement and assessment strategies to supplement existing methods.

Methods: Major domestic coal-fired power plants were selected as the study targets. To prepare for the study and establish strategies, work processes were identified and existing occupational environment measurement results were compared and analyzed. The study proceeded by employing three strategies: specific exposure groups (SEGs) measurement, continuous monitoring, and supplementary measurements, which were then compared and discussed.

Results: Previous exposure index evaluations (5,268 cases) indicated that crystalline silica, a type of respirable particulate matter, had detection limits below the threshold (non-detectable) in 82.6% (4,349 cases) of instances. Exposures below 10% of the exposure limit were observed at a very low concentration of 96.1%. Similar exposure group measurements yielded results where detection limits were below the threshold in 38.2% of cases, and exposures below 10% of the limit were observed in 70.6%. Continuous monitoring indicated detection limits below the threshold in 12.6% of cases, and exposures below 10% of the limit were observed in 75.6%. Instances requiring active workplace management accounted for more than 30% of cases, with SEGs at 11.8% (four cases), showing a higher proportion compared to 3.0% (four cases) in continuous monitoring. For coal dust, exposures below 10% of the limit were highest in legal measurements at 90.2% (113 cases), followed by 74.0% (91 cases) in continuous monitoring, and 47.0% (16 cases) in SEGs. Instances exceeding 30% were most prevalent in SEGs at 14.7% (five cases), followed by legal measurements at 5.0% (eight cases), and continuous monitoring at 2.4% (three cases). When examining exposure levels through arithmetic means, crystalline silica was found to be 104.7% higher in SEGs at 0.0088 mg/m^3 compared to 0.0043 mg/m^3 in continuous monitoring. Coal dust measurements were highest in SEGs at 0.1247 mg/m^3, followed by 0.1224 mg/m^3 in legal measurements, and 0.0935 mg/m^3 in continuous monitoring.

*Corresponding author: Dong-il Shin, Tel: 031-330-6389, E-mail: dongil@mju.ac.kr
Myongji University, 116, Myongji-ro, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, Korea(17058)
Received: July 24, 2023, Revised: August 23, 2023, Accepted: September 7, 2023

Eun-Seung Lee https://orcid.org/0009-0005-7949-3964
Yun-Keun Lee https://orcid.org/0000-0001-6090-7665
Dong-Il Shin https://orcid.org/0000-0003-0034-5212

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Conclusions: Strategies involving SEGs measurement and continuous monitoring can enhance measurement reliability in environments with irregular work processes and frequent fluctuations in working conditions, as observed in coal-fired power plants. These strategies reduce the likelihood of omitting or underestimating processes and enhance measurement accuracy. In particular, a significant reduction in detection limits below the threshold for crystalline silica was observed. Supplementary measurements can identify worker exposure characteristics, uncover potential risks in blind spots of management, and provide a complementary method for legal measurements.

Key words: coal dust, coal, crystalline silica, periodic measurements, quartz, risk assessment, SEGs, supplementary work environment measurement, work environment measurement

I. 서 론

석탄화력발전이란 석탄이 가지고 있는 화학에너지를 열에너지를 거쳐 전기에너지로 변환시키는 발전방식이다. 이 과정에 연료설비, 보일러, 터빈, 발전기, 환경설비 등 수많은 공정을 거치게 된다. 이러한 석탄화력발전은 가스나 유류에 비해 연료비가 저렴하여 값싼 전기를 생산할 수 있었고, 이에 따라 우리나라의 산업화 과정에서 지대한 공헌을 한 것 또한 사실이다. 그리하여 석탄화력발전은 2021년까지도 우리나라 발전량 중 가장 큰 비중(32.8%)을 차지하고 있는 발전원(發電源)으로 자리하고 있다.

이렇듯 석탄화력발전소가 우리나라 경제발전에 큰 공을 세웠고, 지금도 생활 편익에 지대한 순기능을 담당하고 있지만, 전기 생산 과정에서 다양한 유해인자들을 배출하기도 한다. 호흡성분진, 중금속, 유기화합물, 산알칼리, 가스상물질 등이 그 유해인자들이다. 그 중에서도 석탄을 원료로 사용하기 때문에 호흡성 분진이 가장 유해한 인자이고, 때문에 작업환경측정에서 측정 항목의 대다수를 차지하고 있다. 작업자들은 설비의 운전 및 운영 · 점검 등 정형작업(정상작업) 시 비교적 낮은 농도의 석탄 분진과 석탄재에 노출되지만, 계획예방정비 작업 및 경상정비 작업 등 비정형작업 시에는 고농도의 유해인자에 노출될 가능성이 높다 (Hicks & Yager, 2006). 석탄 분진과 석탄재에 주목하는 이유는 석탄에는 탄소성분 외에 1급 발암성물질인 결정형 유리규산이 함유되어 있기 때문이다. 결정형 유리규산은 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)는 인체 발암물질인 그룹 1로, 미국산업위생전문가협의회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)는 인체 발암성 의심물질인 그룹 A2로 지정하고 있다. 우리나라 고용노동부에서는 결정형 유리규산을 사람에게 충분한 발암성 증거가 있는 물질인 1A로 분류하고 있다 (IARC, 2012; ACGIH, 2020; MoEL, 2020). 또한, 석탄화력발전소 작업자들을 대상으로 한 보고서에서 석탄분진, 석탄재, 결정형 유리규산은 진폐증, 만성폐쇄성폐질환(chronic obstructive pulmonary disease, COPD), 폐암, 천식 등의 건강장애를 일으키는 원인으로 보고되었다.

석탄화력발전소도 관련 법령에 따라 매년 2회 작업환경측정을 실시하고 있다. 하지만, 현행의 획일적인 작업환경측정 제도로 작업환경을 측정 · 평가하는데 한계가 있다. 그 이유는 외주화 형태의 다층적 고용구조와 작업주기가 일정하지 않은 비정형 작업, 작업지시 사항에 따라 다양한 변수가 있는 작업 특성 때문이다. 만일, 작업환경의 유해인자가 측정 누락 또는 저평가될 경우, 이는 석탄화력발전소의 작업환경이 문제가 없는 것으로 인식될 수 있어 작업자의 직업병 예방 · 관리에 향후 문제가 될 수 있다. 이를 증명하듯 국내외 연구 결과에는 석탄화력발전소에서 결정형 유리규산과 석탄 분진이 노출기준을 초과하는 고농도 노출 사례가 보고되고 있다(Bird et al, 2004; Hicks & Yager, 2006; Engelbrecht et al, 2012; Kwon et al, 2020; Lee et al, 2021). 그러나 석탄화력발전소에서 실시한 기존 작업환경 측정 결과에서는 노출 초과가 거의 보고되지 않고 있고, 측정된 결과도 노출기준 1% 미만이 81.2% (검출한계 미만 54.9% 포함)로 매우 낮은 노출수준인 것으로 조사되었다(Lee, 2020). 따라서 왜 이러한 상반된 결과들이 나오는지에 대한 문제점을 구체화하고, 석탄화력발전소의 작업 특성을 반영하는 보완적 측정 방법을 제안하는 것이 본 연구의 주된 목적이며, 구체적인 연구 목표는 다음과 같다.

첫째, 유사노출그룹(similar exposure groups, SEGs) 측정 전략으로 측정 결과의 신뢰도를 높일 수 있는 방안을 제시한다.

둘째, 수시측정 전략으로 측정의 사각지대 평가를 통해 최고노출 상황(worst cases)이 측정에 반영되도록 한다.

셋째, 보완적 작업환경 측정 전략으로 개인노출평가가 불가능한 관리사각지대에 대해 측정・평가하고 개인노출 평가 중심의 한계를 보완한다.

II. 대상 및 방법

1. 연구대상

연구 대상은 특이적인 작업(정비 작업 등) 비중이 높고, 다층적 고용구조로 인해 작업환경 평가가 어렵고 작업 특성상 다양한 변수를 가지고 있어 작업환경평가 및 체계적인 작업환경 관리에 한계가 있을 수밖에 없는 석탄화력발전소로 선정하였다. 대상 사업장은 전력 생산 규모 면에서 메이저급 발전소로 다양한 작업환경 특성이 있는 00발전소를 대상으로 하였다.본 연구는 석탄화력발전소의 핵심 유해인자인 호흡성분진(석탄 분진, 결정형 유리규산)에 대해서 연구를 진행하였으며, 현장작업을 위주로 하는 상주 협력기업 작업자를 대상으로 실시하여 연구의 재현성을 높이고자 하였다. 구체적인 현황은 〈Table 1〉과 같다.

2. 연구방법

입하탄 및 석탄재 성분 분석은 발전소에서 시료를 채취(역청탄 56건, 아역청탄 33건)하여 한국인정기구(Korea Laboratory Accreditation Scheme, KOLAS)에서 인증을 받은 실험실에서 원소분석과 함유율을 분석하였다. 원소분석은 미국재료시험협회(American Society of Testing Materials, ASTM)의 공정시험법인 ASTM D6349-13과 ASTM D6357-19에 따라 시료를 건조 및 분쇄 등의 전처리 과정을 거쳐서 ICP(inductively coupled plasma)로 분석하였다. 결정형 유리규산은 NIOSH 7500 시험법에 따라서 XRD(X-RAY Diffractometer)로 분석하였다. 호흡성분진은 4 ㎛ 50% cut-point를 가지도록 5 ㎛ 공극의 37 mm PVC Filter가 장착된 알루미늄 사이클론을 이용하여 2.5 LPM 유량으로 시료를 채취하였다. 석탄 분진은 시료채취 후 건조기에서 24시간 건조한 후 0.01 ㎎까지 측정 가능한 천평을 이용하여 중량분석 하였으며, 결정형 유리규산은 NIOSH 7602에 따라 FT-IR(Fourier transform infrared spectroscopy)로 분석하였다. 측정 위치는 근로자 호흡기 반경 30 ㎝ 이내에서 6시간 이상 개인시료 채취를 원칙으로 하였으며, 노출수준 비교를 위해 보완적으로 지역시료 채취를 병행하였다. 개인시료 채취기(personal air sampler)의 유량보정(calibration)은 시료 채취 전・후에 각각 3회 이상 실시하여 유량 변동에 따른 오차를 최소화하였다. 모든 측정자료에 대해 정규성 분포를 검정하였으나 정규분포를 이루고 있지 않았다. 따라서 모든 데이터는 기술통계량으로 산술평균과 표준편차를 제시하였다.

1) 연구 데이터 수집 및 전략 수립

석탄화력발전소 현황을 파악하기 위해 석탄을 원료로 사용하는 석탄화력발전소에 대한 기초 조사를 하였다. 석탄화력발전소 작업자의 유해인자 노출과 노출수준을 조사하기 위해 관련 논문, 안전보건공단 연구자료, 국내・외 학술자료, 관련 기관의 홈페이지 및 관련 법규를 조사하였다. 연구 대상 발전소에 대한 작업 특성 및 연구전략을 수립하기 위해 최근 3년간(2019년~2021년) 7개 석탄화력발전본부의 작업환경측정 결과를 조사・분석하였다.

Table 1. Summary of research subjects

Subject of research	Major processes	Major hazards
000 Coal-Fired Power Plants	① Fuel process: Coal handling, coal storage, coal transportation, coal blending facility, etc. ② Power generation process: Facilities that produce electricity using boilers and turbines ③ Environmental facilities: Desulfurization, denitrification, and flyash treatment facilities ④ Planned preventive maintenance work: Regular OH (overhaul) work conducted during non-peak power periods	▸ Mineral dust such as coal dust and crystalline silica ▸ Volatile organic compounds (VOCs) such as benzene, toluene, etc. ▸ Metals such as arsenic, mercury, lead, nickel, etc. ▸ Gaseous substances such as ammonia ▸ Welding fumes ▸ Other organic compounds such as cleaning agents

2) 연구 전략

유사노출그룹(SEGs) 측정은 작업공정 및 작업 수행 방식의 유사성이 높고 주로 현장 작업을 수행하는 협력기업을 대상으로 구분하였다. 원청사는 연구의 재현성을 고려하여 제외하였다. 원청 근로자들은 주로 실내의 중앙제어실에서 근무하고 감독 및 점검을 위한 설비 현장에서 근무하는 시간이 짧기 때문이다. 유사노출그룹 분류를 위해서 근로자 수, 근무형태, 협력기업별 역무 등 예비조사를 실시하였다, 기존 작업환경측정 결과를 분석하여 작업정보와 유해인자 노출 특성을 파악하였으며, 노조위원, 관리감독자, 작업자 면담을 실시하였다. 석탄화력발전소는 장치산업으로 작업자는 각각의 호기와 단위작업공정을 넘나들면서 작업을 수행하고 있고, 석탄의 생애주기(연소 전 · 후)에 따라 작업이 명확히 구분되어 유사노출그룹을 연료공정(17개), 발전공정(9개), 환경공정(8개) 3개 그룹으로 구분하였다(Table 2). 기존 측정 방식은 단위작업에 대한 이해의 부족으로 단위작업과 작업 조별 시료 선정 측정으로 단위작업당 시료수는 1~2로 매우 적었다. 측정 · 평가는 정상 가동 중인 A발전소 2개 호기에서 각각의 유사노출그룹별 3개 공정을 대상으로 시료수는 그룹별 규모에 따라 3개~5개로 하였다. 채취 시료수는 법에서 규정하는 최소치보다 2배로 늘렸고, 채취시간은 6시간 연속 채취하였다.

수시측정은 연중 작업 일정에 맞춰 수시로 측정하는 방법이다. 현행 작업환경측정은 상 · 하반기 년2회 측정기관과 일정을 협의해서 정기적으로 작업환경측정을 실시하고 있으나, 석탄화력발전소의 작업공정은 대부분 일관된 공정 특성을 가지고 있지 않고 경상예방정비 작업과 같이 특이적인 비정형 작업이 발생하고 있어서 의도하지 않은 측정 누락과 작업자의 노출수준이 저평가되는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 현장 작업계획 및 경상예방정비 작업 등 사전 비정형 작업을 파악하고 측정기관 협의를 통해서 연중 수시측정으로 문제점을 줄이고자 하는 측정 방법이다. 노조위원, 관리감독자, 보건관리자, 작업자 등 작업 관련자 면담 및 확인을 통해 최고 노출 상황으로 추정되는 작업 일정에 맞춰 피측정자를 선정하여 5개월간(5월~9월) 측정하고 데이터(석탄 분진 123건, 결정형 유리규산 135건)를 수집하였다.

보완적 측정은 현행의 획일적 측정을 보완하고 작업자 노출특성을 파악하여 작업환경 관리에 적용하기 위해서 계획예방정비 작업(비정형 작업), 휴게공간(측정非대상, 사각지대), 트리퍼룸(고농도 노출)에 대해 개인시료 채취 방법과 지역시료 채취 방법으로 측정하여 비교 · 평가하였다.

Ⅲ. 결 과

1. 과거 노출지수 평가

과거 노출지수 평가를 위해 최근 3년간(2019~2021년) 7개소의 석탄화력발전소 측정 결과를 분석하여 노출지수를 평가하였다. 결정형 유리규산에 대한 노출지수를 살펴보면 전체 측정 건수(5,268건)를 기준으로 검출한계 미만이 82.6%(4,349건), 1% 미만 3.2%(169건), 1% 이상~10% 미만 10.3%(545건)로 작업환경 관리상 크게 문제가 되지 않는 노출기준의 10% 미만이 96.1%로 조사되었다. 노출기준을 초과한 측정값은 1건이었다(Fig 1). 석탄 분진은 전체 측정 건수(4,066건)를 기준으로 검출한계 미만이 0.3%(12건), 노출기준 1% 미만 2.6%(105건), 1% 이상~10% 미만 38.9%(1,583건), 10% 이상~30% 미만 50.6%(2,056건), 관리가 필요한 수준인 노출수준 50% 이상은 1.62%(67건)로 조

Table 2. Classification of similar exposure groups

Process	Main duties	Workplace	Similar exposure group
Fuel process	Coal handling, coal storage, coal crushing, coal conveying and transportation facility	Unloading area, storage area, conveying facility, blending facility, crusher, pulverizer	Operators, mechanics, electricians heavy equipment operators sample analysts
Power generation process	Operation and maintenance of boiler/turbine facilities	Boiler facility Turbine facility	Power generation technicians operation supervisors electricians, mechanics
Environmental process	Operation and maintenance of dust collection equipment, flyash treatment	Operation and maintenance of dust collection equipment, flyash treatment	Operation supervisors heavy equipment operators electricians, mechanics

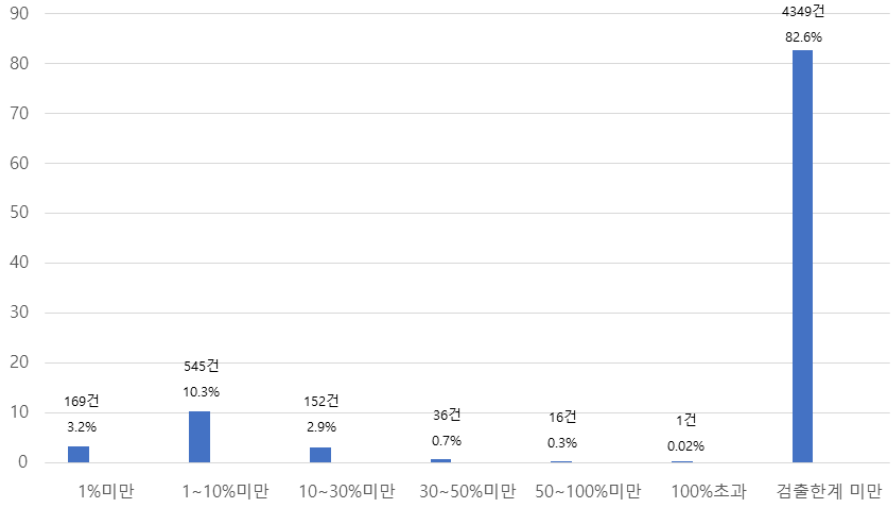

Fig 1. Comparison of crystalline silica exposure indices by power plant units

사되었다. 노출기준 초과는 1건으로 확인되었다.

2. 입하탄 유리규산 함량분석 결과

입하탄 분석 결과 보일러 투입 전 석탄의 회분 함량은 평균 11.01%(8.52%~13.5%), 보일러 투입 후 회성분의 결정형 유리규산 함량은 평균 51.5%(49.52%~53.39%)로 확인되었다(Table 3). 이를 통해 처음 석탄에 함유된 결정형 유리규산의 함량이 5.6% 수준임을 알 수 있고, 이는 Hicks & Yager(2006)의 선행연구 결과인 2.3%~6.1%와 비슷한 수준으로 회성분에 함유된 결정형 유리규산 함량은 처음 석탄에 비해 무려 8~10배 정도 증가했음을 알 수 있다. 회성분의 성분별 평균 함유율은 Si(53.4%), Al(23.8%), Fe(6.3%), Ca(5.6%), S(4.0%), Mg(2.2%), K(1.4%), Na(1.3%), Ti(1.1%), P(0.5%) 순서로 높게 나타났다.

3. 보완적 측정 결과

트리퍼룸의 석탄분진에 대한 개인시료와 지역시료 산술평균값 비교 결과 개인시료 산술평균값은 0.0631 mg/㎥(0.0263~0.0977), 지역시료는 0.0824 mg/㎥

Table 3. Analysis results of crystalline silica content in imported coal by country of origin

Coal type	Number	Source country	Percent (%)	Remarks
Bituminous coal	11	Russia	55.94	Excluding South Africa
	3	USA	62.02	
	8	Colombia	44.34	
	32	Australia	52.69	
Subbituminous coal	4	Russia	54.67	
	3	USA	35.35	
	20	Indonesia	51.81	
	6	Australia	45.56	

Table 4. Work environment measurement results for planned preventive maintenance work

Hazard	Number	Min. (mg/㎥)	Max. (mg/㎥)	Mean (mg/㎥)	SD*1 (mg/㎥)
Coal dust	10	0.1256	0.5760	0.2330	0.1312
Crystalline silica	7	0.0010	0.0061	0.0030	0.0021

*1: Standard deviation

Table 5. Comparison of exposure levels for coal dust and crystalline silica among workers

Hazard	Number	Min. (mg/㎥)	Max. (mg/㎥)	Mean (mg/㎥)	SD*1 (mg/㎥)
Coal dust	123	0.0123	0.5150	0.0935	0.0685
Crystalline silica	118	0.0002	0.0239	0.0043	0.0046

*1: Standard deviation

Table 6. Comparison of measurement results for area sampling in rest areas

Hazard	N	Min (mg/㎥)	Max (mg/㎥)	Mean (mg/㎥)	SD*1 (mg/㎥)
Coal dust	51	0.0023	0.3675	0.1139	0.0797
Crystalline silica	3	0.0040	0.0096	0.0059	0.0032

*1: Standard deviation

Table 7. Work environment measurement results for planned preventive maintenance work

Hazard	N	Min (mg/㎥)	Max (mg/㎥)	Mean (mg/㎥)	SD*1 (mg/㎥)
Coal dust	10	0.1256	0.5760	0.2330	0.1312
Crystalline silica	7	0.0010	0.0061	0.0030	0.0021

*1: Standard deviation

(0.0746~0.0930)으로 지역시료가 개인시료 대비 23.4% 높은 수준으로 나타났다(Table 4).

결정형 유리규산은 개인시료 0.0022 mg/㎥(0.0007~0.0043), 지역시료 0.0021 mg/㎥(0.0~0.0043)으로 비슷한 수준으로 조사되었다(Table 5).

현장 휴게공간에 대한 측정 결과 석탄분진은 51개소 모두 검출되었으며, 산술평균값은 0.1139 mg/㎥(0.0023~0.3675)으로 노출기준의 11.39% 수준으로 확인되었다. 결정형 유리규산은 3개소에서만 검출되었으며 48개소에서 불검출 되었다(Table 6).

비정형작업인 계획예방정비 작업에 대한 작업환경측정 결과 석탄분진 노출수준은 0.2330 mg/㎥(0.1256~0.5760)으로 노출기준의 23.3%로 조사되었고, 결정형 유리규산은 0.0030 mg/㎥(0.0010~0.0061)으로 노출기준의 6.0% 수준으로 조사되었다(Table 7).

4. 유사노출그룹(SEGs) 측정 결과

SEGs 측정 방법에 대한 노출지수 비교 결과 결정형

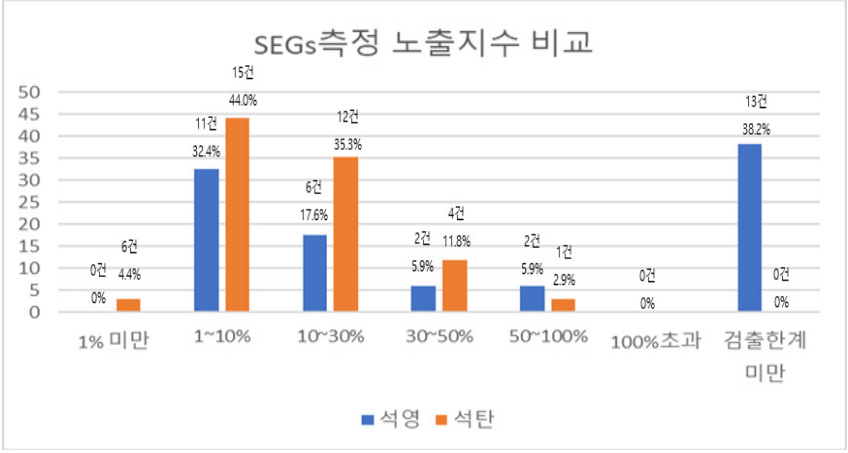

Fig 2. Comparison of exposure indices for SEGs

Table 8. Comparison of exposure levels for coal dust and crystalline silica among workers

Hazard	N	Min (mg/㎥)	Max (mg/㎥)	Mean (mg/㎥)	SD*1 (mg/㎥)
Coal dust	123	0.0123	0.5150	0.0935	0.0685
Crystalline silica	118	0.0002	0.0239	0.0043	0.0046

*1: Standard deviation

유리규산은 검출한계 미만이 38.2%(13건), 작업환경 관리가 요구되는 30% 이상은 11.8%(4건), 노출기준 초과는 한 건도 없었다. 석탄분진은 10% 미만이 48.4%(21건), 작업환경 관리가 요구되는 30% 이상은 14.7%(5건), 노출기준 초과는 한 건도 없었다(Fig 2). 노출수준을 산술평균값으로 살펴보면 석탄분진은 연료공정 0.1557 mg/㎥, 환경공정 0.1421 mg/㎥, 발전공정 0.0507mg/㎥ 순으로 높게 조사되었다. 결정형 유리규산은 환경공정 0.0114 mg/㎥, 연료공정 0.0072 mg/㎥, 발전공정 0.0018 mg/㎥ 순으로 나타났다.

5. 수시측정 결과

수시측정에 대한 노출지수를 살펴보면 석탄분진은 10% 미만이 74.0%(91건), 10~30 미만 23.6%(29건), 30~50% 미만 1.6%(2건), 50% 이상이 0.8%(1건)로 조사되었다. 결정형 유리규산은 검출한계 미만이 12.6%(17건), 1% 미만이 4.4%(6건), 1~10% 미만 63.0%(85건), 10~30% 미만 17.0%(13건), 30~50% 미만 3.0%(4건), 50% 이상 노출기준 초과는 한 건도 없는 것으로 조사되었다. 노출수준 산술평균값을 살펴보면 석탄분진은 0.0935 mg/㎥으로 노출기준의 9.4%, 결정형 유리규산은 0.0043 mg/㎥으로 노출기준의 8.6% 수준으로 확인되었다(Table 8). 수시측정의 산술평균값(102건)으로 석탄분진내 결정형 유리규산의 함유율 계산 결과 4.6%로 나타났다.

Ⅳ. 고 찰

1. 입하탄 분석

입하탄 분석 결과 처음 석탄에 함유된 결정형 유리규산은 5.6% 수준으로 Hicks & Yager(2006)의 2.3%~6.1%와 비슷한 수준으로 회분에 함유된 결정형 유리규산 함량은 처음 석탄에 비해 무려 8~10배 정도 증가했음을 알 수 있다. 이와 같은 결과로 보일러 내부 계획예방정비 작업, 회처리공정, 탈황공정 작업자들은 원료 설비를 담당하는 작업자들에 비해 고농도 결정형 유리규산에 노출될 가능성이 있음을 알 수 있다. 이 자료는 향후 작업환경측정 시 석탄에 대한 물질안전보건자료(MSDS)의 부족한 내용을 보완하여 측정항목 선정에 반영될 수 있으며, 고농도 회분진 노출 작업으로 예상되는 '보일러 내부 계획예방정비 작업', '회처리공정', '탈황공정', 작업에 집중적인 작업환경 측정이 이루어져야 하고, 그 결과를 바탕으로 작업환경 개선 및 보건관리가 이루어져야 함을 참고할 수 있을 것이다.

2. 보완적 측정

현장 휴게실 53개소에서 측정된 석탄분진 산술평균값은 0.1139 mg/㎥(0.0023~0.3675)으로 노출기준의 11.4% 수준으로 조사되어 작업 현장과 비슷한 수준으로 조사되었다. 결정형 유리규산도 3개소에서 검출되어 편안하고 안전해야 할 휴게공간이 오염되어 작업자들이 유해인자에 노출되는 것을 확인하였다. 따라서 휴게실 출입구에 에어샤워 시설 설치와 공기청정기 설치, 청소 등 위생관리를 강화할 필요가 있으며, 정기적 모니터링 관리가 필요하다.

또한 이러한 결과를 바탕으로 지금까지 작업환경 측정이 이루어지지 않은 휴게공간에 대한 보완적 측정이 이루어지길 제안할 수 있을 것이다. 트리퍼룸은 작업자들이 호흡성분진의 공기 중 농도가 가장 높다고 인식하는 공정이나 작업자 출입이 제한적이어서 그동안 작업환경 측정이 거의 이루어지지 않았다. 측정 결과 개인시료와 지역시료에서 석탄분진과 결정형 유리규산 모두 노출기준의 10% 이하로 비교적 낮은 수준으로 조사 되었다. 하지만 측정 시 사용한 사이클론은 cut-point가 4 ㎛로 4 ㎛ 미만의 분진 입자만 포집되었다고 볼 수 있다. 따라서 트리퍼룸은 현장에서 비산먼지가 눈으로 보여지는 것 대비 측정 결과는 낮게 평가될 가능성이 높다. 총분진 측정 방법, 고유량 펌프로 측정하는 방법, 직독식으로 실시간 측정하는 방법으로 부유분진의 입경분포를 파악하여 법적 측정의 한계를 보완할 수 있는

보완적 측정이 다각도로 검토되고 연구되어야 할 것이다. 비정형작업인 계획예방정비 작업에 대한 작업환경 측정 결과 석탄분진 노출수준은 유사노출그룹 측정, 수시측정, 법적측정 대비 2배 수준으로 높게 측정되었다. 상대적으로 유리규산 농도는 낮게 검출되었으나 이는 작업 특성(좁은 공간 작업, 진동)에서 오는 시료 유실에 기인한것으로 보여진다. 이와 같은 결과로 계획예방정비 작업자는 작업 시 현장에 남아 있는 석탄분진의 재비산으로 고농도 호흡성분진(석탄분진, 결정형 유리규산)에 노출될 가능성이 높다.

3. SEGs 측정

SEGs 측정 결과 결정형 유리규산은 검출한계 미만이 38.2%로 수시측정 전략 12.6% 대비 높은 수준이나, 과거 3년간 측정 결과 82.6% 대비 많이 낮은 수준으로 나타났다. 노출수준은 석탄분진과 결정형 유리규산 모두 SEGs 측정 방법이 수시측정과 기존측정 대비 높은 수준으로 조사되었다. 또한 석탄분진의 작업자 노출은 원료공정이 취약하고, 결정형 유리규산의 작업자 노출은 환경공정이 취약함을 확인하였고 이를 통해서 공정별 노출특성도 파악할 수 있었다. 석탄화력발전소는 장치산업으로 설비와 작업 방법이 유사한 형태를 가지고 있다. 따라서 모집단의 측정 결과를 다른 유사노출그룹에 적용할 수 있다면 측정기관의 업무 부담이 경감되어 측정의 질도 올라갈 수 있고 작업자의 측정 부담도 줄일 수 있을 것으로 기대된다. 선행연구에서 유사노출그룹을 측정대상의 모집단으로 선정하여 반복측정 하는 방식으로 시료수를 늘려 측정을 실시한 결과 측정 대상이 기존 97개 팀이었던 것이 64개 팀으로 34% 감소하였으며, 팀별 평균 측정 시료수는 기존 20개에서 25개로 25% 증가하여 측정 결과의 신뢰도 향상에 도움이 될 수 있을 것으로 보고하였다(이윤근 등, 2021).

4. 수시측정

수시측정 방법은 현장 작업 일정에 따라 측정 일정을 수시로 변경해야 하는 경우가 많이 발생하기 때문에 측정기관의 업무 협조가 전제되어야 한다. 수시측정 방법으로 결정형 유리규산의 검출한계 미만을 12.6%로 획기적으로 낮출 수 있었다. 또한 수시측정 측정값(122건)으로 공기중 석탄분진내 결정형 유리규산의 함유율이 4.6%인 것을 확인할 수 있었다. 수시측정 방법은 석탄화력발전소와 같이 비정형 작업이 발생하고 현장 작업환경이 단기간 내 수시로 변하는 작업환경의 다양성으로 측정이 곤란한 사업장이 측정기관과 협의를 통해서 사업장의 작업 일정에 맞춰 측정함으로써 측정 누락을 방지하고 최고노출 작업을 대상으로 측정하기에 적합한 방법이라고 생각한다.

V. 결 론

석탄화력발전소의 작업환경측정에서 핵심 유해인자는 석탄분진과 결정형 유리규산이다. 그중에서도 인체 발암성물질인 결정형 유리규산에 대한 평가와 관리에 집중할 필요가 있다. 최근 3년간(2019년~2021년) 7개 석탄화력발전소에서 실시한 측정보고서 분석 결과는 검출한계 미만이 82.6%(4,349건)였으며, 노출기준 10% 미만이 96.1%로 매우 낮은 농도로 조사되었다. SEGs 측정 결과는 검출한계 미만이 38.2%, 노출기준 10% 미만이 70.6%로 조사되었고, 수시측정은 검출한계 미만이 12.6%, 노출기준 10% 미만이 75.6%로 조사되었다. 따라서 SEGs 측정과 수시측정 방법을 통해서 결정형 유리규산의 측정 신뢰도를 높일 수 있었으며, 노출수준이 기존의 측정 대비 높은 농도로 조사되어 작업자의 직업병예방관리에 관심(개선 투자, 개인보호조치 등)을 높일 수 있을 것으로 기대된다. 특별히 수시측정 방법은 측정의 사각지대 평가를 통해 최고노출 상황이 측정에 반영되도록 하여 결정형 유리규산의 검출한계 미만을 획기적으로 낮출 수 있었다. 또한 SEGs 측정을 통해서 공정별 노출특성(석탄분진 노출은 원료공정 취약, 결정형 유리규산 노출은 환경공정 취약)을 파악함으로써 작업환경측정 결과를 작업환경관리의 선택과 집중에 반영하여 작업환경 측정의 효용성 제고가 기대된다. 입하탄 분석 결과는 석탄분진에 함유된 결정형 유리규산 함량이 4.2%~5.6%로 조사되어 향후 석탄화력발전소 측정 시 참고가 될 수 있을 것이다. 보완적 측정을 통해서 측정 대상에서 제외되는 휴게공간의 오염을 확인할 수 있었으며, 개인노출평가가 불가능한 관리사각지대에 대한 개인 노출 평가 중심의 한계를 보완할 수 있었다. 결정형 유리규산은 기본적으로 측정 · 분석이 어렵고 현장의 다양성으로 작업환경 측정의 정확성과 신뢰도를 확보한다는 것이 어려운 점이 있는 것은 사실이다. 따라서 측정의 정확성과 신뢰도를 높이기 위해서는 측정기관은 측정 · 분석의 숙련도를 높일 필요가 있으며, 이를 위하여 결정형 유리규산의 정기적인 정도관리 실시

를 제안한다. 또한 본 연구 결과에 근거한 SEGs 측정, 수시측정, 보완측정 방법 등을 석탄화력발전소와 같이 작업내용 변화가 심하고 작업환경의 다양성으로 측정·평가가 어려운 유사한 사업장에 확대 적용할 것을 제안한다. 이를 위해서는 측정전문가의 의견이 반영되는 선택적 전문측정이 가능하도록 제도적 지원이 필요하다.

References

ACGIH. TLVs and BEIs – Based on the documentation of the Threshold Limit Values for chemical substances and physical agents and Biological Exposure Indices. American Conference of Governmental Industrial Hyg.; 2020.

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

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

Hicks J, Yager J. Airborne Crystalline Silica Concentrations at Coal-Fired Power Plants Associated with Coal Fly Ash. Journal of Occupational and Environmental Hygiene 2006;3:448-455

Hwang JS. A Study on the Harmfulness of Silicon Oxide Dust and Measures for the Work Environment Improvement in Construction Sites. Journal of the Society of Disaster Information 2022;18(3):478-486

IARC. Silicad Dust crystalline In the form of quartz or cristobalite. IARC Monograph 100C-14.; 2012.

Kim SH, Kwon JW, Kim SM, Kim YK, Jang YH. Characteristics of domestic coals and efficient control of coal dust. Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association 2017;19(4):589-609

The State of Queensland. Managing respirable dust hazards in coal-fired power stations Code of Practice(PN12377). The State of Queensland.; 2018.

Yun YN, Kim YS. Particle Size Distribution and Respirable Dust Fraction of Some Coal Mine Floating Dust. Journal of the Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene 1991;1(1):62-67

Kwon JW, Jang GH, Hwang ES, Kim KW. Study on Ensuring the Reliability of Measurement and Analysis of Crystalline Silica. Korea Occupational Safety and Health Agency.; 2017. p. 18-31

Kwon JE, Jang KM, Kim SH, Kim SD, Jang MY et al. Study on the Evaluation of Hazardous Exposures by Process and Establishment of Working Environment Management Measures in Coal-Fired Power Plants. Korea Occupational Safety and Health Agency.; 2020. p. 29-38

Lee YG, Park JI, Lee JH, Jung TJ, Choi YE et al. Pilot Study for the Introduction of Comprehensive Work Environment Evaluation System. Korea Occupational Safety and Health Agency.; 2020. p. 39-55

<저자정보>

이은승(학생), 이윤근(연구소장), 신동일(교수)