

ISSN 1738-8716(Print)

ISSN 2287-8130(Online)

Particle and Aerosol Research

Part. Aerosol Res. Vol. 17, No. 1: March 2021 pp. 1-8

<http://dx.doi.org/10.11629/jpaar.2021.17.1.001>

연탄재 처리 환경미화원의 분진 및 호흡성 석영 노출

김 부 옥*

근로복지공단 직업환경연구원

(2021년 1월 7일 투고, 2021년 3월 7일 수정, 2021년 3월 16일 게재확정)

Occupational exposure to dust and respirable quartz in coal briquettes ash handling worker

Boowook Kim*

Institute of Occupation and Environment, Korea Workers' Compensation and Welfare Service

(Received 7 Jan 2021; Revised 7 Mar 2021; Accepted 16 Mar 2021)

Abstract

The purpose of this study is to assess respirable crystalline silica (RCS) exposure levels in workers who collect and dispose used coal briquette ash (CBA) in sanitation companies that are subcontracted by one medium-sized local government on the collection of municipal household waste (MHW), and to analyze the quartz content in CBA.

When the CBA powder that undergone specialized pretreatment in several steps were subjected to mineral identification and quantitative analysis using X-ray diffraction (XRD), it was found that quartz represented 18%, and in addition, mullite, and plagioclase were included. For two CBA collectors, samples were collected by the personal sampling evaluation method. After respirable dust was collected in accordance with the National Institute for Occupational Safety and Health 7500 method, the concentration of quartz was analyzed using XRD. Meanwhile, a portable real-time dust monitor (Sidepak AM520, TSI Inc., USA) was also used to observe the dust exposure level for each time zone and job task.

The RCS exposure level of one worker was as high as 0.024 mg/m³, which was the American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) Threshold Limit Values (TLV) level. The other worker also exhibited a concentration of 0.013 mg/m³, which was more than half of TLV. The Sidepak results revealed that the work of collecting CBA and loading it onto a vehicle was hardly exposed to the dust of a significant level. It was found, however, that the work of transferring the collected CBA to a container through a conveyor belt was exposed to a very high average respirable dust concentration of 2.238 mg/m³.

The results of this study confirmed that quartz, which is crystalline silica and a carcinogen, is contained in CBA, one of municipal household waste (MHW), in high concentration. It was also confirmed that workers are exposed to high RCS concentrations while transferring collected CBA into a container. Although each local government in South Korea handles CBA in different ways, it is imperative to investigate the CBA exposure level of sanitation workers and improve their working conditions.

Keywords: Coal briquettes ash, Dust, Exposure, Quartz, Worker

*Corresponding author.

Tel : +82-32-540-4968, Fax : +82-32-540-4997

Email : labor7@gmail.com

1. 서론

지난 수십년간 많은 국가에서 자국내 가정 폐기물의 재활용에 대한 관심이 증가 되어 폐기물을 수거하고 있다. 가정 폐기물을 수거하는 작업자는 근골격계 질환과 더불어서 바이오에어로졸을 포함한 분진과 디젤엔진배출물질(디젤매연)에 노출되어 각종 호흡기 질환 위험에 노출되어 있다(Poulsen et al., 1995).

환경미화원은 각 시도 지자체에 직접 소속되어 있거나 간접 고용되어 있는데, 2016년 기준으로 국내 환경미화원 종사자 수는 약 33,950명으로(Government Announcement, 2018), 버스 운전기사 81,799명의 42% 수준으로 적지 않다.

최근 환경미화원에서 폐암 발생으로 인한 산업재해 신청이 증가하고 있고, 업무관련성을 인정 받아 공적 보상을 받는 사례도 늘고 있다. 이에 정부, 학회 및 노동조합에서는 환경미화원의 건강 문제에 대해 많은 관심을 가지고 있고, 언론에서도 종종 보도되어 사회적 관심사이기도 하다(Government Announcement, 2018).

환경미화원의 업무는 쓰레기 수거와 거리청소(가로청소)로 구분할 수 있는데, 쓰레기는 크게 일반 쓰레기, 재활용 쓰레기 및 음식물 쓰레기로 분류된다.

환경미화원은 쓰레기를 수거하는 과정에서 필연적으로 수거 차량에서 배출되는 디젤매연과 주변 도로에서 발생하는 디젤매연에 노출되게 된다. 디젤매연은 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서 Group 1으로 지정된 발암물질이므로 환경미화원의 디젤매연 노출수준에 대한 평가와 노출감소를 위한 개선은 중요하다(IARC, 2012). 따라서 그동안 환경미화원의 유해인자 노출에 관한 연구는 디젤매연을 중심으로 진행되어 왔었다 (Fleming et al., 2002; Park et al., 2013; Lee et al., 2015; Lee et al., 2016; Wikuats et al., 2020).

한편 가정 및 상가에서 배출되는 연탄재는 보통 일반 쓰레기를 수거하면서 같이 수거하여 매립 처리하고 있지만, 일부 지자체에서는 연탄재만 전담으로 수거하는 팀이 운영되고 있어서 작업자의 연탄재 분진 노출이 우려되는 상황이다. 특히 연탄의 원료인 무연탄에는 결정형 실리카인 석영(quartz, SiO₂)이 소량 함유되어 있다.

석영은 지각의 구성 성분 중 9% 이상을 차지하는 흔한 규산염 광물로 생활환경에서도 흔히 볼 수 있

는데, 모래와 화강암의 주성분이 석영이며, 보석으로 사용되는 수정, 산업용 실리카 분말 및 석영 유리 등으로 다양하게 쓰이고 있다. 석영은 모스 경도가 7인 단단한 광물로 덩어리 상태일 때는 안전한 물질이지만, 인체의 폐 깊숙이 침투할 수 있는 미세한 크기의 석영 입자(호흡성 석영)에 장기간 고농도로 노출되면 폐암, 규폐증, 만성폐쇄성폐질환 등의 각종 호흡기 질환을 일으킬 수 있어서 IARC에서는 50% cut-point가 4 μm인 호흡성분진(Respirable dust)으로써 석영과 크리스토포바라이트(cristobalite, SiO₂)를 폐암 1급 발암물질로 규정하고 있다(IARC, 1997). 석영 노출에 의한 직업병은 산업보건 분야에서는 오래전부터 잘 알려져 있는데, 국내에서도 광업, 주물업(Jeong et al., 2013), 토목건설업(Park et al., 2020), 세라믹 분말 취급업(Kim et al., 2019), 석재가공업(Kim et al., 2014), 고속도로 요금소(Shin et al., 2020) 등 다양한 산업에서 작업자의 석영 노출에 관한 연구가 있었다 (Kim et al., 2018). 그러나 대부분의 연구가 전통적인 작업환경에서 이루어진 연구였고, 환경미화원처럼 일반 대기 환경에서 석영 노출에 관한 연구는 거의 없었다.

그러므로, 연탄재를 수거하고 처리하는 환경미화원의 호흡성 석영 노출수준을 파악하고 노출을 감소시킬 수 있는 개선대책 마련은 작업자의 폐암 예방을 위한 매우 중요한 과제이다. 그러나 연탄재 중 석영의 함량에 관한 자료나 연탄재를 취급하는 작업자의 석영 노출에 관한 연구는 거의 없었다.

따라서 본 연구의 목적은 첫째, 연탄재 중 석영의 함량을 분석하고, 둘째, 비닐봉지에서 연탄재를 꺼내 컨테이너에 상차하는 작업자가 노출되는 분진과 호흡성 석영의 농도를 평가함으로써 환경미화원의 건강 보호를 위한 기초 자료를 확보하는데 있다.

2. 연구방법

2.1 연구대상

인구 약 80만명의 A지자체 소속의 환경미화 업체에서는 관내 연탄재를 산업용 자원으로 재사용하는 시설로 보내기 위해서 연탄재를 전담으로 수거하는 팀을 운영하고 있다. 트럭 운전원 1명과 연탄재 수거원 2인은 관할 구역을 이동하면서 도로변 지정된

위치에 비닐봉지에 담겨 있는 연탄재를 수거한다. 가까운 거리를 이용할 때에는 트럭 뒤편에 매달려 이동하고 비교적 긴 거리를 이용할 때에는 조수석에 탑승해 이동한다.

새벽 6시부터 약 4시간 동안 연탄재를 수거한 뒤 별도의 지정된 장소에서 비닐봉지 속의 연탄재를 수작업으로 일일이 꺼내서 컨베이어 벨트를 거쳐 컨테이너에 담는 작업을 하였다(연탄재 재처리 시설에는 비닐봉지를 제외한 연탄재만 반입 가능하기 때문에). 컨테이너에 연탄재를 옮겨 담는 작업은 약 40분 소요되는데, 연탄재를 컨베이어 벨트에 올리는 과정에서 연탄재가 부서지면서 다량의 분진이 주변으로 비산되었다.

본 연구는 연탄재 수거 작업자 2명을 대상으로 실시되었다. 작업자 2명은 방진마스크와 방진복을 착용하고 작업하였고, 연탄재 상차 작업이 종료된 이후 오후의 2~3시간은 플라스틱 재활용품을 분류하는 작업에 동원되기 때문에 연탄재에 노출되지 않았다.

2.2 연탄재 중 석영 함량 분석

연탄재 중 석영 함량을 분석하기 위해서 현장에서 입수해 온 연탄재를 X선 회절분석기(X-ray Diffraction (XRD), D8 Advance, Bruker Inc., Germany)를 사용해 분석하였다. 시료의 입자크기가 표준물질의 입자크기보다 클수록 석영의 농도는 과대평가가 일어나므로 (Bhaskar et al., 1994) 연탄재 시료의 입자 크기를 가능한 균질하면서도 표준물질과 유사한 크기로 만들기 위해서 Spex 8000 Mixer Mill with a tungsten carbide ball mill (Spex Industry Inc., Metuchen, NJ, USA)을 사용하여 결정형 실리카의 비결정형화를 방지하기 위해 10분간만 분쇄한 후 다시 10 μm 진동체(Sieve Shakers) (Model Octagon 200, Endecotts Ltd, London, England)로 거른 시료를 회수하여 분석하였다.

정확한 석영의 함량을 분석하기 위해서는 간섭물질을 인지하여야 하는데, XRD로 분석된 회절 피크들의 정성분석은 ICDD (International Centre for Diffraction Data) Data Base를 이용해 확인하였다. 석영의 1차 피크(2θ 26.7°) 앞부분에서는 플라이트(Mullite)의 피크가 겹치는 것이 확인되었고, 뒷부분에서는 사장석 피크의 간섭이 확인되어, XRD 분석시 우선시 되는 면적을 이용한 정량분석 대신에 석영 피크의 높이로 정량 분석하였다.

미국국립산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH) 공정시험법 7500 방법을 참고하여 연탄재 약 1 mg을 은막여과지에 침착시켜 분석시료를 만들었고, 0.05 mg ~ 1 mg 범위에서 표준물질(standard respirable α -quartz, NIST SRM 1878) 검량선법에 사용하여 연탄재 중 석영 함량을 산출하였다.

2.3 총분진, 호흡성분진 및 결정형 실리카 노출수준 평가

작업자가 하루 작업시간 동안에 노출되는 총분진(total dust)과 폐 깊숙한 가스 교환영역인 폐포까지 도달 가능한 미세한 크기의 먼지로 정의되는 50%-cut point가 4 μm 인 호흡성분진(Respirable dust, PM_{10}) 그리고 호흡성분진 중 석영의 농도를 각각 미국국립산업안전보건연구원(NIOSH) 공정시험법 0500 (NIOSH, 2003a), 0600 (NIOSH, 2003b), 7500 (NIOSH, 2003c) 방법에 따라 개인시료(personal air sampling) 평가법으로 측정하였다.

개인시료 측정을 위해 벨트에 착용하는 개인시료 채취용 소형 펌프(GilAir Plus pump, Sensidyne, St. Petersburg, FL, USA)에 튜브를 연결하여 끝단에는 dual port manifold를 이용해 총분진과 호흡성분진을 동시에 작업자의 호흡 영역인 옷가에서 포집하였다.

총분진은 1.5 L/min 유량으로 직경 37 mm, pore 5 μm 인 PVC 여과지(SKC Cat No. 225-5-7)가 장착된 3 피스 카세트(SKC Cat No. 225-2LF)로 포집하였고, 호흡성분진은 동일한 PVC 여과지를 알루미늄 사이클론(SKC Cat No. 225-01-02)에 체결하여 2.5 L/min 유량으로 포집하였다. PVC 여과지는 습기 제거를 위해 측정 전과 후에 테시케이터에서 24시간 동안 보관한 뒤 해독도 1 μg 의 전자저울로 중량분석을 하였다.

중량분석이 끝난 호흡성분진이 포집된 PVC 여과지는 내열도가니에 넣어 600°C 전기로에서 2시간 동안 열처리 하는 회화(ashing)를 통해 PVC 여과지 등의 유기물은 제거되고 잔류하는 재(ash)를 알코올에서 초음파 분산 후 25 mm 은막여과지(silver membrane filter, SKC Cat No. 225-1802)에 재침착(re-deposition) 시킨 후 XRD를 사용하여 결정형 실리카인 석영을 분석하였다. 호흡성 석영 표준물질인 SRM 1878b - Respirable Alpha Quartz를 5 μg ~ 500 μg 범위에서 7수준 검량선을 통해 결정형 실리카는

석영을 정량 분석하였다. 결정형 실리카는 석영만 검출되었고 크리스토파라이트는 검출되지 않았다. 간섭물질의 영향을 고려해 석영의 정량은 1차 피크(2θ 26.6°)의 면적 대신에 높이로 계산하였다.

본 시료를 분석한 기기분석실은 미국산업위생전문가협회(AIHA, American Industrial Hygiene Association)에서 주관하는 국제분석 정도관리(Proficiency Analytical Testing program)에 매회(1년에 4회) 참여하여 Proficiency 상태를 항상 유지하고 있다. 본 분석법의 석영의 분석 검출한계는 0.0025 mg/sample이었다.

2.4 실시간 모니터를 이용한 호흡성분진 측정

연탄재가 비산되는 작업 동안의 분진 농도를 확인하기 위해서 후임인 작업자2는 여과지 포집에 더불어 개인시료 채취용 실시간 분진 모니터(SidePak AM520, TSI Inc., USA)를 함께 착용하여 증량법에 의한 분진 평가와 실시간 모니터를 이용한 분진 평가를 동시에 하였다. 모니터의 튜브 끝단에는 제조사에서 제공되는 호흡성분진 채취에 사용되는 사이클론(10 mm nylon Dorr-Oliver cyclone)을 장착해 실시간 호흡성분진 농도를 측정할 수 있도록 하였다.

모니터의 측정 간격은 1분으로 설정하였고, 측정 당일 측정 시작 전에 Zero filter를 사용해 기기상태를 점검하였고, Calibration factor (CF)는 특정 분진이 발생하는 특정 실내 작업장이 아닌 대기 환경이기 때문에 atmospheric mode (0.38)로 설정한 후 사용하였다.

2.5 데이터 처리

작업자가 측정 당일 노출된 총분진, 호흡성분진과 호흡성 석영의 농도는 식 1에 따라 1일 8시간 작업을 기준으로 하여 유해인자의 측정치에 발생시간을 곱하여 8시간으로 나눈 값인 8시간 시간가중평균농도(8hr-TWA)를 산출하여 법적 기준치인 노출기준과 비교하였다. 8시간(480분)에서 본 연구에서 측정시간인 248분을 제외한 232분에 대해서는 대기중 배경농도에 관련된 문헌(Kim et al., 2017a; Kim et al., 2017b)을 참조하여 총분진은 0.100 mg/m³, 호흡성분진은 0.030 mg/m³, 호흡성 석영은 불검출로 가정하여 8hr-TWA를 계산하였다. C는 유해인자의 측정치(단위: mg/m³), T는 유해인자의 발생시간(단위: 시간).

$$TWA \text{ conversion value} = \frac{C_1 \cdot T_1 + C_2 \cdot T_2 + \dots + C_n \cdot T_n}{8} \quad \text{식 1}$$

CF를 기본 상태로 하여 실시간 분진모니터로 측정한 호흡성분진의 평균농도(0.314 mg/m³)와 증량법에 의한 호흡성분진 농도(0.466 mg/m³)간의 비(ratio)를 산출(1.48)하여 전체 실시간 농도를 보정하였다. 그러나 정확도가 높은 데이터를 얻기 위해서는 광산란 기기에 있어 실제 입자의 밀도에 기반한 CF값을 설정하여야(Kim et al., 2020) 하지만 본 연구에서 CF 설정을 위한 Ratio 1.48은 기기 측정치의 평균으로 산출된 값이므로 연탄재 상차 작업부분에서는 과소 평가, 연탄재 수거 부분에서는 다소 과대평가가 발생할 수 있는 제한점은 있다.

실시간 호흡성분진의 농도는 연탄재를 수거할 때와 수거된 연탄재를 컨테이너에 옮겨 담는 작업을 할 때를 구분하여 비교하였다.

그림의 작성은 Origin 2016 소프트웨어(OriginLab Co., Northampton, MA, USA)를 이용하였다.

3. 결과

3.1 연탄재 중 석영 함량

연탄재를 XRD로 분석한 결과 석영(Quartz), 물라이트(Mullite), 일라이트(illite), 경석고(Anhydrite), 방해석(Calcite), 사장석(Plagioclase)등이 검출되었고, 석영의 함량은 18.1%로 분석되었다(그림 1).

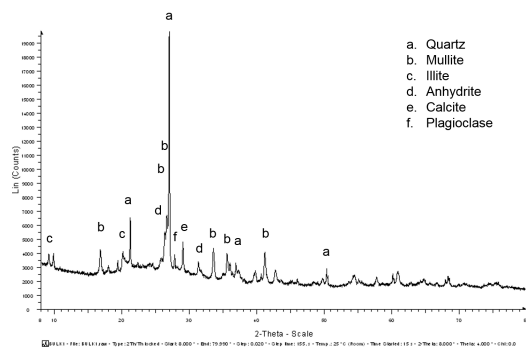


Fig. 1. Powder X-ray diffraction patterns of coal briquettes ash.

3.2 연탄재 작업자의 총분진, 호흡성분진, 호흡성 석영 농도

표 1은 연탄재를 수거하여 컨테이너에 상차하는 작업자에서 평가한 총분진, 호흡성분진 및 호흡성 석영의 농도를 나타낸다. 연탄재 전담 작업자 2명의 8hr-TWA 총분진 농도는 각각 13.460 mg/m³, 4.052 mg/m³이었고, 호흡성분진 농도는 0.499 mg/m³, 0.246 mg/m³, 호흡성 석영 농도는 0.024 mg/m³, 0.013 mg/m³ 이었다.

측정시간(248분) 동안의 농도는 8hr-TWA에 비해 약 2배 높았고, 호흡성분진 중 석영의 함량은 평균 5.25%이었다. 그리고 선임 작업자의 농도가 후임 작업자에 비해 훨씬 높았다.

우리나라 고용노동부 고시인 ‘화학물질 및 물리적 인자의 노출기준’에서 적용 가능한 8hr-TWA 기준은 총분진은 기타분진으로 10 mg/m³으로 설정되어 있고, 석탄 분진은 호흡성분진으로써 1 mg/m³으로 설정되어 있으며, 호흡성 석영(노출기준에서는 산화규소(결정체 석영)로 명시되어 있음)은 0.05 mg/m³으로 설정되어 있다. 노출기준과 비교해 보면 후임 작업자는 총분진의 농도가 노출기준을 초과하며 호흡성 석영 농도는 고용노동부 노출기준의 절반이면서, 미국산업위생전문가협회(ACGIH) 노출기준(TLV)인 0.025 mg/m³에 해당하는 농도로 나타났다.

3.3 실시간 호흡성분진 농도

그림 2는 후임 작업자에서 측정된 실시간 호흡성분진 농도를 나타낸다. 연탄재를 상차하는 작업을 제외한 수거 작업 210분 동안의 호흡성 농도는 평균은 0.125 mg/m³이었다. 6시 57분, 8시 7분경에 약 1 mg/m³, 9시 2분경 2 mg/m³ 가까이 상승한 피크와 이외의 약 0.3 mg/m³ 정도로 반복되는 작은 피크들은 수거한 연탄재 봉지를 트럭에 적재하는 과정과 트럭의 뒤편에 매달려서 이동할 때에 트럭 머플러에서 배출

되는 디젤매연에 노출되기 때문으로 판단된다.

연탄재를 상차하는 40분 동안의 호흡성분진 농도는 평균 2.238 mg/m³으로 수거 작업에 비해 약 18배나 높았고, 최고 농도는 4.942 mg/m³으로 매우 높았다(그림 3).

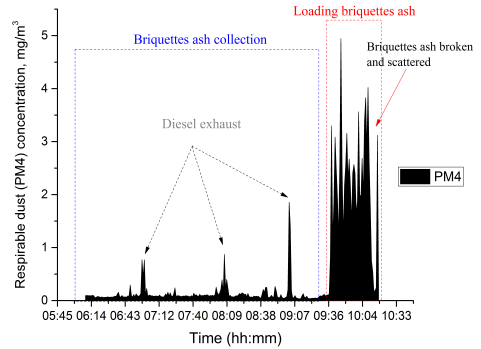


Fig. 2. Workers' dust exposure concentration according to sampling time. The fill area under curve was real-time respirable dust (PM4) concentration.

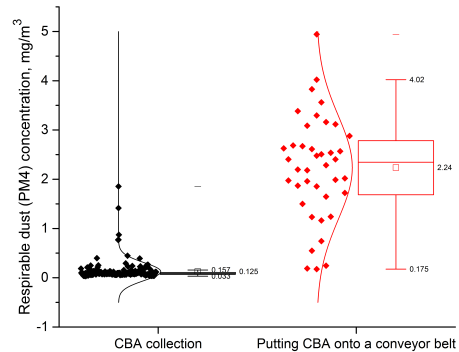


Fig. 3. Boxplot of real-time respirable dust (PM4) concentrations for CBA collection and putting CBA onto a conveyor belts.

Table 1. The concentration of dust exposed to the Coal Briquette Ash collector

CBA Worker	Total dust		Respirable dust		Respirable quartz		Quartz/RD (%)
	8hr-TWA	At work	8hr-TWA	At work	8hr-TWA	At work	
Senior Worker	13.484	26.005	0.509	0.956	0.024	0.047	4.92
Successor Worker	4.076	7.796	0.255	0.466	0.013	0.026	5.58
Mean	-	-	-	-	-	-	5.25

CBA: coal briquette ash

8hr-TWA: Concentration for 8-hour time weighted average

RD: Respirable dust

At work: Concentration for 248 min

3.4 추정된 연탄재 상차 작업시 RCS 농도

40분간 연탄재 상차 작업시 평균 호흡성분진 농도인 2.238 mg/m³에 표 1에서 얻은 호흡성분진 중 평균 석영 함량인 5.25%를 적용하면 연탄재 상차 작업시 호흡성 석영의 농도는 0.117 mg/m³으로 추정되며, 표 1에서 후임과 선임 작업자의 호흡성 석영의 농도비 1.808 (0.026 vs 0.047 mg/m³)을 적용하면 선임 작업자의 연탄재 상차 작업시 호흡성 석영 농도는 0.212 mg/m³으로 추정된다.

만약 하루 작업시간 내내 연탄재를 상차하는 작업을 한다면 고용노동부 노출기준을 각각 2배, 4배 이상 초과할 수 있다는 것을 보여준다.

4. 고찰

환경미화원은 기존의 알려진 유해인자인 미세먼지, 디젤매연, 바이오에어로졸 외에도 주요 폐암 발암물질인 호흡성 석영에도 노출될 수 있는데, 그동안 환경미화원은 호흡성 석영에 노출될 수 있는 직종으로 인지하지 못해 환경미화원의 석영 노출에 관한 연구는 국내외적으로 거의 없었다. 이에 본 연구에서 연탄재를 취급하는 환경미화원의 호흡성 석영 노출수준에 대해 평가하였고, 더불어, 연탄재 중 석영의 함량을 분석하였다.

XRD로 연탄재를 분석한 결과 석영이 18%나 함유되어 있는 것으로 나타났는데, Tulepov et al. (2019)의 연구 결과에서도 연탄재에 석영이 함유되어 있는 것으로 확인된다. 연탄의 원료인 무연탄에는 석영이 일반적으로 5% 미만 함유되어 있지만 (IARC, 1997), 1,000℃ 이상의 고온에서 연탄이 연소되는 과정에서 연탄의 주요 성분인 탄소는 열분해되어 휘발하였기 때문에 연탄재에는 단위 중량당 석영 함량이 연탄보다 높아지게 된다. 더불어 수분도 같이 증발하였기 때문에 연탄재는 분쇄될 때 분진이 쉽게 발생하는 특성이 있다. 그러므로 연탄재를 취급하는 작업자와 더불어서 일반인도 연탄재 분진 노출은 주의해야 하겠다. 한편 연탄재 중 석영의 함량은 연탄의 연소 정도와 무연탄의 산지에 따라 다소 차이가 있을 수 있으니 다양한 시료로 추가적인 연구가 필요하다.

본 연구에서 연탄재를 상차하는 환경미화원의 호

흡성 석영 노출수준은 선임 작업자 0.024 mg/m³, 후임 작업자 0.013 mg/m³으로 선임작업자의 농도가 약 2배 높았다. 그 이유는 선임 작업자는 비닐봉지에서 연탄재를 꺼내 컨베이어벨트에 올려놓는 작업을 지속적으로 수행하였지만, 후임 작업자는 트럭 내부에서 연탄재 봉지를 가져오는 일도 병행하였기 때문에 선임 작업자에 비해 상대적으로 분진 노출이 적었기 때문으로 판단된다. 선임 작업자의 호흡성 석영 농도는 ACGIH TLV 수준으로 높게 나타났지만, 고농도의 연탄재 분진에 노출되는 상차 작업은 40분에 불과하였다. 본 연구에서처럼 연탄재가 지속적으로 부서지면서 비산되는 상차 작업이 아니라면, 호흡성 석영의 농도는 훨씬 낮아질 수 있다. 그러나 고농도의 연탄재 분진에 지속적으로 노출되는 작업이라면 본 연구에서 나타난 농도보다 더 높은 수준의 호흡성 석영에 노출될 수도 있다.

본 연구에서 연탄재를 상차하는 환경미화원 2명의 호흡성분진 농도는 각각 0.509 mg/m³, 0.255 mg/m³이었다. 기존에 연탄재 상차 작업 시 평가된 연구는 없고, Lee et al. (2015)에 의하면 일반 쓰레기를 수거하는 환경미화원의 PM_{2.5} 농도는 기하평균 0.062 mg/m³으로 본 연구에 비해 낮았다.

호흡성분진은 크기가 4 μm 이하(50% cut-point가 4 μm인 먼지)의 먼지로써, 10 μm 이하의 먼지인 PM₁₀보다 2.5 μm 이하의 먼지인 PM_{2.5}에 가까운 입경분포를 가지는 분진으로 흡입 시 폐 깊숙이 도달하는 미세한 크기의 먼지로써 장기간 노출 시 만성폐쇄성 폐질환 등 각종 호흡기 질환을 일으킬 수 있다. 고용노동부 고시의 노출기준에서는 석영(노출기준 0.05 mg/m³), 석탄(노출기준 1 mg/m³), 운모(노출기준 2 mg/m³) 등의 일부 광물과 카드뮴(노출기준 0.002 mg/m³), 인듐(노출기준 0.01 mg/m³), 텅스텐(노출기준 1 mg/m³) 등의 일부 금속을 대상으로 총분진이 아닌 호흡성분진으로 평가하도록 하고 있다. 또한 우리나라에서는 특정되지 않은 호흡성분진에 대해서는 별도의 노출기준이 설정되어 있지 않지만, 작업자의 업무상 질병 유무를 심의하는 근로복지공단 직업환경연구원에서는 만성폐쇄성폐질환이 발생한 작업자의 업무관련성을 판단할 때 1 mg/m³ 이상의 호흡성분진에 장기간 지속적으로 노출되었으면 업무관련성을 열어두고 판단하고 있다. 따라서 본 연구에서 실시간 분진 모니터로 확인한 연탄재 상차 작업시

의 호흡성분진 농도(2.238 mg/m³)는 시급한 개선이 필요한 높은 농도이다.

글로벌 경제 위기 이후 세계적으로 호흡성 석영 노출수준이 감소하는 경향을 보이고 있으며(Zilaout et al., 2020), 전통적인 작업장에서도 ACGIH TLV 수준의 호흡성 석영에 노출되는 경우는 흔치는 않다. 더군다나 기존에 알려진 호흡성 석영 노출 업종에서는 작업자의 건강보호를 위해서 호흡기보호 프로그램의 실시, 공학적 대책(공장내 석영 발생원에서 국소배기 장치를 이용한 분진 포집, 콘크리트 천공 작업시 분진흡입 장치가 장착된 공구의 사용), 순환 근무 등의 보건관리를 적용해 볼 수 있지만, 환경미화원은 노출 저감을 위한 개선대책 마련도 쉽지 않으므로 전문가의 관심이 필요하다.

본 연구는 연탄재 분진에 노출되는 작업자에서 호흡성 석영 노출수준을 평가한 최초의 연구로써 중요한 의미가 있지만 제한점이 있다. 연구대상 섭외와 작업자 개인사료 채취의 어려움으로 연구대상이 2명에 불과하여 국내 연탄재를 취급하는 작업자의 분진 및 호흡성 석영 노출수준을 대표한다고 볼 수는 없다. 연탄재는 전국의 지자체마다 다른 방식으로 폐기되고 있으므로 다양한 지역에서 연탄재 처리방식에 따른 후속 노출평가 연구가 필요하다.

더불어서 공정시험법에 의한 호흡성 석영 평가는 물질의 독성에 기반을 두고, 법적 노출기준과 비교할 수 있는 장점이 있지만, 기기분석에 별도의 전문성과 시간, 비용이 소요되고 실시간 농도 변화를 알 수 없는 단점이 있다. 따라서 정확도가 높으면서도 저비용의 실시간 모니터를 활용한 작업자 노출평가 기법의 확대가 필요하다고 생각된다.

5. 결론

본 연구는 연탄재 분진에 노출되는 환경미화원에서 발암물질인 호흡성 석영 노출수준에 관한 최초의 연구이다. 연탄재에는 결정형 실리카인 석영이 18% 함유되어 있었고, 물라이트(Mullite)와 사장석(plagioclase)이 석영 피크와 간섭을 일으키므로 분석시 주의가 필요하였다.

연탄재를 비닐봉지에서 꺼내 벨트 컨베이어를 통해 컨테이너에 옮겨 담은 상차 작업에서는 연탄재가

부서지면서 고농도의 연탄재 분진이 지속적으로 발생하였다. 따라서 상차 작업을 40분 수행하였음에도 8hr-TWA 농도가 고용노동부 노출기준의 절반이자 ACGIH TLV 수준으로 높았다. 따라서 연탄재 분진에 고농도로 노출되는 작업에서는 안전보건 교육 실시, 분진 노출저감을 위한 공학적 개선대책, 호흡기 보호구 착용 등의 적극적인 대책 실행이 요구된다.

References

- Bhaskar, R., Li, J., and Xu, L. (1994). A comparative study of particle size dependency of IR and XRD methods for quartz analysis, *American Industrial Hygiene Association Journal*, 55(7), 605-609.
- Fleming, L.E., Bean, J.A., Danits, M., John, N., and Rogers, J. (2002). Solid waste workers: occupational exposures and health, *The Journal of Solid Waste Technology and Management*, 28(2), 79-96.
- Government Announcement, joint government departments (2018). How to improve waste collection worker's safety, <https://www.gov.kr/portal/ntna-dmNews/1317481> (Korean).
- IARC (2012). Diesel and gasoline engine exhausts and some nitrogens, *International Agency for Research on Cancer*, Lyon, France.
- IARC (1997). Silica, some silicates, coal dust and para-aramid fibrils, *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*, No. 68, 1-475.
- Jeong, I., Ryu, I., Kim, B., Park, I., Won, J.U., Kim, E.A., Kim, I., and Roh, J. (2013). Two cases of lung cancer in foundry workers, *Annals of Occupational and Environmental Medicine*, 25, 16.
- Kim, B., Kim, D., Kim, H.R., and Choi, B.S. (2019). Exposure assessment of crystalline silica in diatomite powder handling workplace with acute silicosis, *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*, 29(3), 271-277.
- Kim, S.H., Bae, H.J., Jung, J.H., and Phee, Y.G. (2014).

- Particle size-related dust and quartz concentration of stone grinding operations, *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*, 24(4), 462-470.
- Kim J.B., Kim, D., Noh, S., Yoon, K.H., Park, D., Lee, J.J., and Kim, J. (2020). Estimation of PM2.5 correction factor for optical particle counter in ambient air, *Particle and Aerosol Research*, 16(2), 49-59.
- Kim, B., Choi, S., and Shin, J. (2017a). Study on the ratio and concentration of respirable dust in the workplace, *Occupational Lung Diseases Institute, Korea Workers' Compensation and Welfare Service*. Report No. Research-2017-2]-12.
- Kim, S.W., Lee, G.H., Phee, Y.G., Yang, W.H., Ha, W., and Park, H. (2017b). Exposure of outdoor workers to particulate matter in construction sites, *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*, 27(1), 46-58.
- Kim, H.R., Kim, B., Jo, B.S., and Lee, J.W. (2018). Silica exposure and work-relatedness evaluation for occupational cancer in Korea, *Annals of Occupational and Environmental Medicine*, 30, 4.
- Lee, K.H., Jung, H.J, Park, D.U., Ryu, S.H., Kim, B., Ha, K.C., Kim, S., and Yi, G. (2015). Occupational exposure to diesel particulate matter in municipal household waste workers, *PLoS ONE*, 10(8), e0135229.
- Park, D., Lee, K., Ryu, S., Kim, S., Yoon, C., and Ha, K. (2013). Characteristics of particulate matter generated while handling municipal household waste, *Journal of Occupational Health*, 55(6), 503-510.
- Park, H., Hwang, E., Jang, M., and Yoon, C. (2020). Exposure assessment of elemental carbon, polycyclic aromatic hydrocarbons and crystalline silica at the underground excavation sites for top-down construction buildings, *PLoS ONE*, 15(9), e0239010.
- Poulsen, O.M., Breum, N.O., Ebbenhøj, N., Hansen, A.M., Ivens, U.I., Lelieveld, D.van, Malmros, P., Matthiasen, L., Nielsen, B., Nielsen, E., Schibye, B., Skov, T., Stenbaek, E., and Wilkins, K. (1995). Collection of domestic waste, review of occupational health problems and their possible causes, *Science of the Total Environment*, 170, 1-19.
- Shin, J., Kim, B., Lee, J., Jung, J.S., Shin, Y.C., and Lee, K. (2021). Exposure assessment of elemental carbon, ultrafine particles, and crystalline silica at highway toll booths, *Environmental Engineering Research*, 26(5), 200380.
- Shin, Y.C., Choi, B.S., Lee, B.K., Yi, G.Y., Lee, J.T., Lee, J.S., Lee, J.O., Kim, K.W., Kim, T.K., Go, K.S., and Chung, H.K. (2002). Exposure assessment of air contaminants by type of mines in Korea - focused on carcinogenic substances, *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*, 12(2), 95-105.
- Tulepov, M.I., Sassykova, L.R., Kerimkulova, A.R., Tureshova, G.O., Tolep, D.M., Zhapekova, A.O., Spanova, G.A., Abdrakova, F.Yu., and Mansurov, Z.A. Preparation of coal briquettes and determination of their physical and chemical properties, *Oriental Journal Chemistry*, 35(1), 180-185.
- Zilaout, H., Houba, R., and Kromhout, H. (2020). Temporal trends in respirable dust and respirable quartz concentrations within the European industrial minerals sector over a 15-year period (2002-2016), *Occupational and Environmental Medicine*, 77(4), 268-275.