

건설업 옥외작업장 근로자의 미세먼지 노출 실태 조사

김승원^{1*} · 이가현¹ · 피영규² · 양원호³ · 하권철⁴ · 박현희⁵

¹계명대학교 공중보건학전공, ²대구한의대학교 보건학부 산업안전보건전공,

³대구가톨릭대학교 산업보건학과, ⁴창원대학교 생명보건학부, ⁵한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원

Exposure of Outdoor Workers to Particulate Matter in Construction Sites

Seung Won Kim^{1*} · Ga Hyun Lee¹ · Young Gyu Phee² ·

Won-Ho Yang³ · Wonchul Ha⁴ · Hyunghee Park⁵

¹Department of Public Health, Keimyung University

²Department of Safety and Environmental Prevention, Daegu Hanny University

³Department of Occupational Health, Catholic University of Daegu

⁴Department of Biochemistry and Health Science, Changwon National University

⁵Occupational Safety and Health Research Institute, Korea Occupational Safety and Health Agency

ABSTRACT

Objectives: Particulate matter (PM) at construction sites mostly originates from either construction activities or the atmospheric environment. This study was conducted to evaluate the exposure level to PM and the contribution ratio of atmosphere sources at construction sites.

Methods: We reviewed literature and governmental systems related to PM exposure in occupational settings and summarized them. In the field evaluation, five construction sites and one golf course were selected: two from Gyeonggi-do Province and four from North Gyeongsang-do Province. For each site, personal samples from outdoor construction workers and area samples from the outdoor area around the construction site office were collected according to construction work types. PM concentrations reported from nearby National Ambient Air Monitoring Stations were recorded. Respirable dust concentrations, respirable silica concentrations, and several metal concentrations including Cd, Cr, Pb, and As were monitored over four months. In the end we suggested how to manage particulate matter exposure at construction sites.

Results: There was little literature reporting on exposure levels of construction workers to PM. Respirable dust concentrations measured in Gyeonggi-do Province were higher than those measured in North Gyeongsang-do Province. The geometric means of respirable dust concentrations in personal samples and area samples were 37.89 µg/m³ and 92.86 µg/m³, respectively. The respirable dust concentrations were higher than the PM concentrations reported from nearby National Ambient Air Monitoring Station. The geometric means of respirable silica concentrations of personal samples and area samples were 1.3 µg/m³ and 1.1 µg/m³, respectively. All metal concentrations were lower than 10% of individual Korean occupational exposure limits.

Conclusions: Assuming that personal samples consisted of ambient PM and dust originating from work activities and area samples only collected ambient PM, we concluded that the dust exposure of outdoor construction workers originated 40.8% from the atmosphere and 59.2% from construction activities. PM exposure at construction sites should be controlled by employers, as in the case of outdoor heat stress. The Korean government needs to consider setting an occupational exposure limit for respirable dust.

Key words: outdoor construction worker, Particulate matter (PM), PM from construction activities, PM from the atmosphere

*Corresponding author: Seung Won Kim, Tel: 053-580-5197, E-mail: swkim@kmu.ac.kr
Baekeun-Gwan, #B50, Department of Public Health, Keimyung University. 1095 Dalgubeol-Daero, Dalseo-Gu, Daegu 42601
Received: March 10, 2017, Revised: March 14, 2017, Accepted: March 20, 2017

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.

I. 서 론

일상과 기상뉴스 등에서 사용하는 황사라는 용어는 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)의 권고에 따라 목측(눈으로 관측)으로 판단하는 시정 및 하늘상태 등의 기상현상이다. 이와 별도로 환경보건에서 사용하는 미세먼지라는 대기오염 항목이 존재하며, 황사 발생의 여부는 미세먼지 농도에 의존하지 않고 관측자가 발령기준과 비교하여 감각적으로 판단한다. 미세먼지는 우리 눈에 보이지 않을 정도로 아주 가늘고 작은 먼지 입자를 말하는 일반용어로 환경부 등에서 주로 사용한다. 기술적으로는 PM10과 PM2.5로 구분된다. PM10이라 함은 10 μm 의 공기역학적 지름에서 50% 효율을 갖는 선택적 흡입구를 지나는 크기의 입자를 말한다(ISO, 2012). PM10은 산업보건에서 사용하는 흉곽성 협약(thoracic convention)과 상응함을 ISO 기준에서 명확히 밝히고 있다(ISO 23210 영어 표현은 “PM10 corresponds to the “thoracic convention” as defined in ISO 7708: 1995, Clause 6.”). PM2.5는 공기역학적 지름 2.5 μm 인 선택적 흡입구를 지나는 크기의 입자를 말한다. PM2.5는 컷오프 지름이 4.0 μm 인 호흡성 분진(respirable dust)과 약간의 차이를 보이지만 ISO 7708 (1995)에서 1995년 새로 제정한 기준인 고위험 호흡협약(high-risk respirable convention)과 상응한다(ISO 23210 영어 표현은 “PM2.5 corresponds to the “high-risk respirable convention as defined in ISO 7708:

1995, 7.1.”). 임팩터(impactor)에서 분리 효율의 곡선이 경사가 급한 시그모이드 곡선(sigmoidal curve)을 그린다는 점을 감안하여 산업보건 기준과 PM10 및 PM2.5의 기준을 그림으로 나타내면 Figure 1과 같다. 기상청 등의 정부기관에서 일반인에게 설명하기 위해 PM10을 10 μm 보다 작은 크기의 먼지로 설명하고 있으며(KEC, 2017), 환경보건 분야의 책을 저술하는 전문가도 이를 혼동하여 책에 기술하고 있다(KSEH, 2016).

PM2.5는 가스교환이 일어나는 폐포에 도달할 확률이 높고 혈관으로 침입하여 심혈관계 질환 등을 유발하는 것으로 알려졌다. 통상 PM10을 ‘미세먼지’, PM2.5를 ‘초미세먼지’로 구분하여 지칭한다. 1987년 미국에서 처음으로 환경 기준이 설정되었고, 이후 세계 여러 나라에서 대기오염의 지표로 삼고 있다. 한국은 2014년 2월 6일부터 PM10을 기준으로 미세먼지 예보를 시행중이다. 이 연구에서 미세먼지는 PM10과 PM2.5를 모두 포함하는 통칭으로 사용되었다.

옥외작업장에서는 황사를 비롯한 미세먼지에 노출될 수 있다. 옥외작업장은 옥내작업장을 제외한 곳을 말하며, 여기서 옥내작업장은 천장과 2면 이상의 벽면을 갖추고 자연통풍을 저해할 정도의 밀폐된 작업장을 말한다. 옥내작업장은 갯내, 터널 등을 포함한다.

국내 근로자들을 업종별 대분류로 구분해보면 제조업, 도소매업, 숙박음식점 등의 순으로 근로자가 많으며 모든 업종의 총괄인원은 2014년 기준 약 1,990만 명으로 조사되어 있다(KOSTAT, 2015). 이들

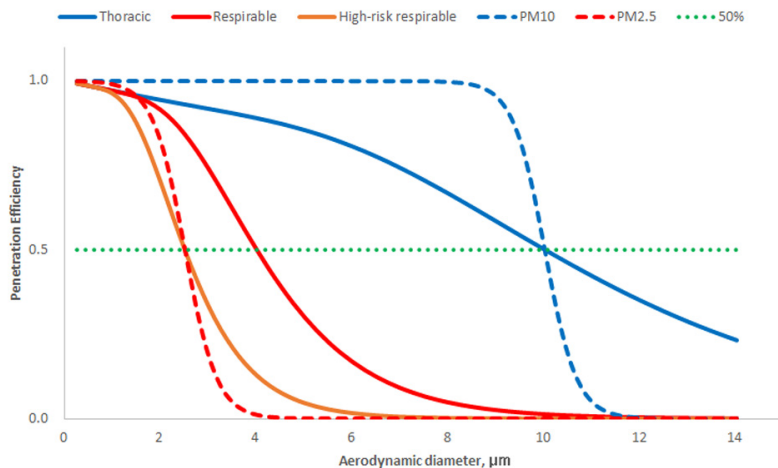


Figure 1. Size convention of dust (or particulate matter) for occupational health (dashed lines) and environmental health(solid lines)

중 옥외작업이 많을 것이라고 예상되는 대분류로는 건설업, 농림어업, 광업, 유틸리티 사업, 하수폐기물 처리업, 운수업 등을 들 수 있다. 이들 중 건설업, 농림어업, 운수업 등은 작업시간의 대부분이 옥외작업이라고 할 수 있고, 광업, 유틸리티 사업, 하수폐기물 처리업 등은 일부 작업이 옥외작업이라고 할 수 있다(Kim et al., 2016). 대표적인 옥외작업장이 많은 업종은 건설업을 들 수 있으며, 근로자 수는 2014년 기준 약 110만 명으로 집계되어 있다. 그 외에도 운송업, 농림어업, 광업, 유틸리티 사업, 하수폐기물처리 등의 업종들에서 옥외작업이 많을 것으로 예상되며 근로자 수는 각 업종을 합하여 약 2014년 기준 125만 명으로 집계되어 있다(KOSTAT, 2015). 건설업과 비건설업 근로자수를 합하면 235만 명이 옥외작업장에서 미세먼지에 영향을 받을 수 있는 상황에 놓여 있다.

직종별 구분은 한국표준직업분류(KSCO)의 분류에 따라 크게 10개의 대분류로 구분된다. 이 중 옥외 미세먼지에 노출될 가능성이 높을 것으로 예상되는 직종은 경찰관, 농림어업 근로자, 건설관련 근로자, 자동차 및 기계 운전원, 청소원, 배달원 등을 들 수 있다. 한국표준직업분류에 따른 근로자수를 파악할 수 있는 근거자료가 없어, 고용노동부의 ‘직종별 사업체 노동력조사’의 결과자료(한국고용직업분류표를 따름)를 토대로 직종별 노출규모를 추정하였을 때 옥외작업이 많을 것으로 예상되는 직종은 운전 및 운전 관련직, 건설 관련직, 농림어업 관련직, 경비 및 청소 관련직 등을 들 수 있다. 2016년 기준 140만 명의 근로자가 이 직종에 해당된다. 따라서 옥외작업장 미세먼지 농도 및 특성을 파악하고 이에 따른 근로자 건강보호방안을 마련할 필요가 있다.

본 연구의 주요 연구 목표는 3가지였다. 첫째, 국내외 미세먼지 관련 문헌고찰 및 제도 분석을 통해 미

세먼지 실태조사 계획 수립시 활용하고, 권고지침 개발 및 관련 정책·제도 개선사항 검토시 활용하고자 하였으며 이 내용은 서론 및 고찰에 나누어져 기술되었다. 둘째, 옥외작업장 미세먼지 노출 실태조사 및 성분 파악을 통해 기상·대기환경관리 측면이 아닌 근로자 노출의 관점에서 미세먼지 노출에 대한 실측 정보를 제공하고자 하였으며 이 목표가 본 논문의 주된 주제이다. 셋째, 옥외작업장 미세먼지에 대한 권고지침 개발 및 관련 정책·제도 개선사항 검토를 통해 현장에 실질적인 도움을 제공하고자 하였다.

II. 연구 방법

1. 측정 사업장의 특성

옥외작업장 미세먼지 노출농도 실태조사는 크게 건설업과 비건설업으로 구분하였다. 대기중 미세먼지 이외의 미세먼지 발생원이 거의 없을 것으로 생각되는 비건설업 중 서비스업 근로자인 골프장 캐디를 대조군으로 선정하였다. 건설업 근로자와 서비스업 근로자의 야외미세먼지 노출환경 및 노출특성이 대표적으로 평가될 수 있도록 대상을 선정하였다. 미세먼지는 지역적 및 계절적 농도 차이가 크기 때문에, 수도권인 경기도 지역과 비교적 거리가 먼 대구·경상지역을 구분하여 조사하였다. 계절적인 영향을 확인하고자 했으나, 측정대상 사업장 섭외의 한계로 6월 - 9월에 걸쳐 측정이 진행되었다. 6월 21일부터 9월 6일 기간 동안 건설현장 5개소에서 근무하는 옥외작업 근로자를 대상으로 미세먼지에 대한 노출평가를 실시하였다. 옥외작업장 미세먼지 측정 사업장은 다음 Table 1과 같다.

건설업 사업장은 총 5곳이며, 미세먼지 농도가 비교적 낮은 골프장 1곳을 대조군으로 선택하였다. 경기도 지역 사업장은 6월부터 9월까지 월별 1회씩 총

Table 1. Characteristics of sampling sites and sampled chemicals

Site	Construction type	Location	Sampled chemicals
A	Apartment construction	Bucheon, Gyeonggi	Personal samples: respirable dust, crystalline silica
B	Apartment construction	Bucheon, Gyeonggi	
C	Apartment construction	Gyeongsan, Gyeongbuk	
D	Shopping mall construction	Buk District, Daegu	Regional samples: respirable dust, crystalline silica, metals (including Pb, Cd, Cr, Cu, Mn, Fe, Ni, As, Be)
E	Highway construction	Gyeongbuk	
F	Golf course (control)	Near Daegu	

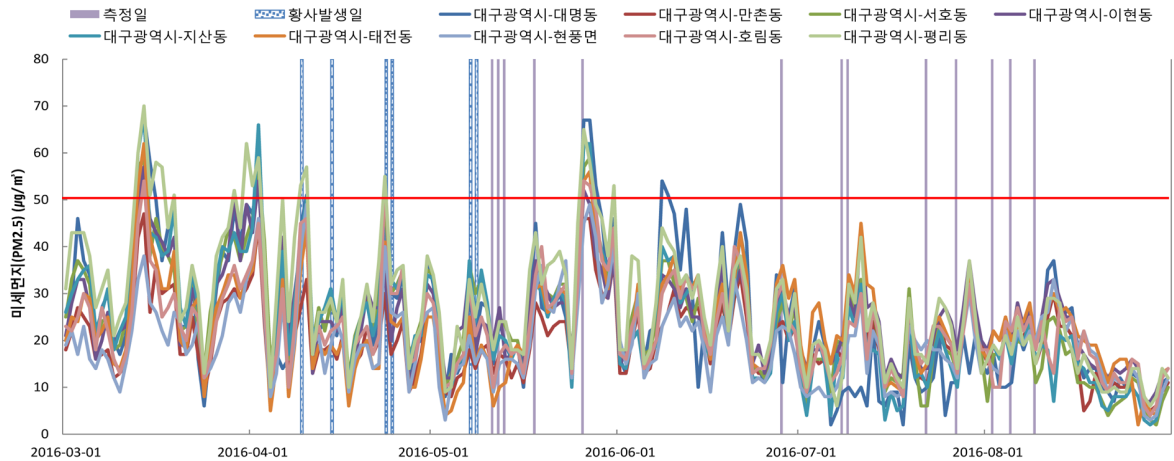


Figure 2. Change of daily respirable dust concentrations in Daegu air pollution measurement network.

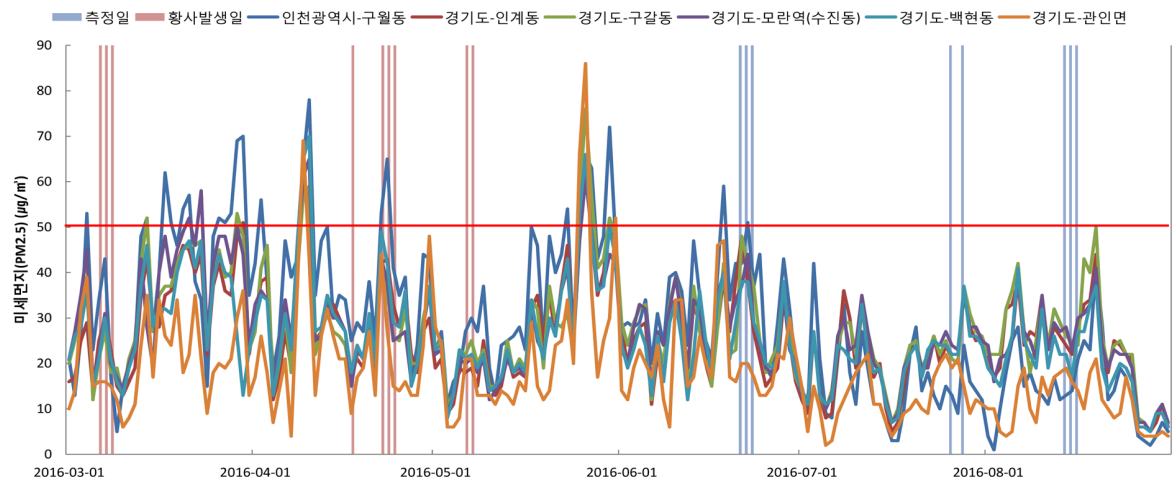


Figure 3. Change of daily respirable dust concentrations in Gyeonggi-do air pollution measurement network.

4회 측정했으며, 대구·경상 지역 사업장은 7월부터 9월까지 월별 1회씩 총 3회 반복측정을 수행했다. D 건설현장은 연구진행 중간에 건설작업이 중단되어 2회만 측정되었다. 연구기간 중 경기도 및 경북 지역 측정사업장 인근 대기측정망의 농도($PM_{측정망}$) 변화와 황사 발생일 및 측정일을 Figure 2와 3에 각각 표시하였다. 황사가 선언되는 날이 미세먼지 농도가 가장 높은 날은 아니었다. 미세먼지 측정이 수행된 날은 비교적 미세먼지 농도가 낮은 여름에 이루어졌다.

개인시료 측정대상자는 업무의 대부분을 옥외에서 수행하는 근로자로 하였다. 측정대상자의 직종은 크게 골조·형틀·철근공종, 직영목수, 방수공종, 견출

공종, 토목공종, 자재정리, 거푸집, 현장관리 및 신호수, 설비내관, 직영반장 등 10개로 조사되었다. 측정시간은 근로자의 근무 시작시간인 오전 7시부터 오후 4시 30분까지 1일 전체 작업시간 동안 측정하였다. 근로시간 동안 호흡성분진, 호흡성분진 내 실리카에 대한 개인시료($PM_{작업}$)를 포집하였다. 같은 작업시간 동안 현장사무실 인근에서 호흡성분진, 호흡성분진 내 실리카의 지역시료($PM_{대기}$)를 포집하였다.

조사대상 사업장은 지역별·업종별로 표본설계방법론에 따라 선정하는 것이 바람직하지만 연구의 규모가 제한적이고 임의로 선정한 사업장에 대한 접근 가능성을 예측할 수 없기 때문에 아파트 공사장처럼

연중 작업이 지속되는 대형사업장을 중심으로 선정하였다.

2. 유해인자의 측정

작업에서 발생하는 미세먼지(PM_{작업})와 대기 유래 미세먼지(PM_{대기})의 기여도 평가하기 위해 개인시료(PM_{작업} + PM_{대기})와 지역시료(PM_{대기})를 구분하여 측정하였다. 작업에서 발생하는 미세먼지의 비중을 지역시료 농도를 개인시료 농도로 나눈 값의 백분율을 이용하여 추정하였다. 지역시료는 건설현장 내부 중 비교적 미세먼지 발생이 적은 현장사무실 인근 지역에서 측정하였다. 개인시료와 지역시료에서 측정 항목은 공통적으로 호흡성 분진, 호흡성 분진 내 실리카 농도, 중금속 성분이었다.

이와 별도로 측정대상 사업장 인근에 위치한 환경부 대기측정망에서 보고된 미세먼지(PM_{측정망})의 농도를 기록하여 비교하였다. 여기서 개인시료와 지역시료 미세먼지 시료는 사이클론을 이용하여 PM_{2.5}와 유사한 호흡성분진을 포집하였고, 대기측정망에서 보고된 미세먼지 농도는 PM_{2.5} inlet을 이용한 초미세먼지 농도로 각 그룹별로 포집된 먼지의 크기특성이 다르므로 직접적인 비교는 불가능하다.

실리카 분진의 측정은 미국 국립산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH) 7602 공정시험법에 따라 PVC 여과지(공극 5.0 μm , 직경 37 mm)를 3 piece 카세트에 고정시킨 후 사이클론(Aluminum cyclone, SKC, USA)에 장착하여 사용하였다(NIOSH, 2003). 고유량 개인시료채취기(SKCC)에 연결하여 근로자의 호흡기영역에 부착하였고, 지역시료는 바닥면으로부터 1~1.2 m 높이에 설치하였으며 채취시간은 근로자 1일 근무시간동안 측정이 이루어지도록 하였다. 시료채취시 유량은 호흡성분진 2.5 ℓ/min 이었다. 실리카 분

진의 분석은 적외선 분광분석기(Fourier Transform Infra-Red Spectrometer, FTIR)를 이용하였으며, 정량 분석을 위해 표준물질 1878a(respirable quartz)를 사용하였다.

중금속 성분의 측정은 NIOSH 7300 방법에 따라 실시하였다. MCE 여과지(공극 0.8 μm , 직경 37 mm)를 3 piece 카세트에 고정시킨 후 지상높이 1-1.2 m에서 포집하였다. 시료채취시 유량은 2.0 ℓ/min 이었다. 채취된 시료는 전처리를 거친 후 유도결합플라즈마 광학방출분광계(Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy, ICP-OES)를 이용하여 중금속성분(Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn)을 분석하였다.

3. 자료분석

수집된 자료들은 Excel(Microsoft 2014, USA) 프로그램을 사용하여 정리하고 분석하였다. 미세먼지를 포함한 유해물질들의 공기 중 농도가 대수정규분포를 보인다는 점을 고려하여 기하평균과 기하표준편차를 계산하였고, 다른 자료와의 비교를 위하여 산술평균과 표준편차도 제시하였다. 두 집단 간의 비교에는 t-test를 이용하여 검정하였다. 그 이상의 집단 간의 비교에는 분산분석을 이용하여 검정한 후 집단의 수가 네 집단 이상인 것을 감안하여 Scheffé 사후검정을 하였다.

III. 결 과

1. 호흡성분진 및 실리카 농도

측정지역에 따른 호흡성분진 개인시료 측정농도는 Table 2와 같았다. 호흡성분진 농도는 B 건설이 기하평균 154.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높은 농도수준을 보였고, A 건설 129.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, C 건설 98.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 도로

Table 2. Respirable dust concentrations of personal samples in $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Site	No.	AM	SD	GM	GSD	Min.	Max
A	16	149.5	103.1	129.8*	1.67	54.6	502.0
B	14	165.4	63.1	154.3*	1.48	83.0	268.4
C	12	106.4	48.8	98.8	1.47	61.8	240.6
D	7	73.4	27.5	68.4	1.52	39.2	98.2
E	12	62.6	79.0	36.9	3.18	2.2	299.0

* There was statistically significant difference compared to other groups.63.1

건설현장인 E 건설의 호흡성분진 농도는 $36.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 낮은 농도수준을 보였다. 건설현장별 평균비교 결과 경기도 지역의 건설현장이 대구·경상 지역 건설현장과 비교하여 통계적으로 유의하게 높았다($p<0.05$). 이 자료를 이용하여 작업에서 발생하는 미세먼지의 비중을 지역시료 농도를 개인시료 농도로 나눈 값의 백분율을 이용하여 추정하면 옥외작업장 근로자가 노출되는 미세먼지 중 40.8%는 대기($\text{PM}_{\text{대기}}$)에서 유래하고 나머지 59.2%는 작업($\text{PM}_{\text{작업}}$)에서 유래한다고 해석될 수 있다. 하지만 이 해석은 성분 분석에 바탕을 두지 않은 거친 추정이다.

건설현장 위치별 호흡성분진 지역시료 측정농도는 Table 3과 같았다. 개인시료 측정농도 결과와 동일하게 B 건설이 기하평균 $74.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높았고, A 건설이 $40.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, E 건설이 $30.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 건설현장별 평균비교 결과 B 건설이 다른 건설현장과 비교하여 통계적으로 유의하게 높았다($p<0.05$). 미세먼지 노출이 가장 낮을 것으로 예상된 F 골프장이

기하평균 $30.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 대구·경상지역 건설현장보다 높았지만, 그 차이가 통계적으로 유의하지 않았다. B 건설의 호흡성분진 최대값은 $270.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 측정위치 인근으로 덤프트럭, 지게차 등의 중장비가 빈번하게 이동하는 것이 관찰되었다.

직무/공종에 따른 호흡성분진 농도는 Table 4와 같았다. 건설업 직종 중 설비내관 근로자가 기하평균 $201.10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높은 농도 수준을 나타내었고, 직영목수 근로자 $168.78 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 현장관리, 신호수 근로자 $116.90 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 방수공종 근로자 $132.90 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 골조·철근·형틀공종 근로자 $116.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 직종별 평균비교결과 설비내관, 직영목수 근로자가 다른 직종 근로자와 비교하여 통계적으로 유의하게 높았다($p<0.05$).

발생원에 따른 호흡성분진 노출농도는 Table 5와 같았다. 개인시료로 측정된 작업영역에서의 미세먼지 농도($\text{PM}_{\text{작업}}$)는 $92.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 지역시료로 측정된 대기중 미세먼지 농도($\text{PM}_{\text{대기}}$)는 $37.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로

Table 3. Respirable dust concentrations of regional samples in $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Site	No.	AM	SD	GM	GSD	Min.	Max
A	8	45.6	22.0	40.0	1.81	12.3	76.6
B	8	96.8	86.3	74.7*	2.07	40.9	270.2
C	6	29.7	13.2	27.0	1.64	12.6	47.5
D	4	29.4	6.5	28.9	1.24	23.4	37.3
E	6	30.6	5.7	30.1	1.21	22.6	38.3
F	6	32.2	13.2	30.2	1.46	21.0	50.1

* There was statistically significant difference compared to other groups.4

Table 4. Respirable dust concentrations by job category in $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Job title	No.	AM	SD	GM	GSD	Min.	Max
Rebar worker	8	124.1	45.4	116.1	1.50	51.6	202.2
Carpenter	5	210.9	169.9	168.8	2.07	68.9	502.0
Plumber	2	209.6	83.3	201.1*	1.50	150.7	268.4
Waterproofing contractor	2	141.1	66.9	132.9	1.64	93.8	188.4
Wall finisher	3	163.5	78.5	149.5	1.72	83.0	239.8
Field manager	2	92.0	1.0	92.0	1.01	91.4	92.7
Ground worker	7	108.1	20.0	106.3	1.23	70.3	129.2
Supply manager	12	100.7	51.2	91.6	1.55	42.5	240.6
Concrete molder	12	62.6	79.0	36.9	3.18	2.2	299.0
Flagman	8	138.9	78.7	116.9	1.95	39.2	257.4

* There was statistically significant difference compared to other groups.

Table 5. Respirable dust concentrations by dust origin in $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Dust origin (sample type)	No.	AM	SD	GM	GSD	Min.	Max	T-test
work (personal)	61	118.9	82.7	92.86*	2.25	2.19	502.0	p<0.001
atmosphere (regional)	38	47.7	47.5	37.89	1.84	12.3	270.2	

* There was statistically significant difference compared to other groups.

Table 6. Metal concentrations by sampling site in $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Metal	Metrics	Sampling site					
		A	B	C	D	E	F
Pb	Detected no./total no.	8/8	8/8	6/6	4/4	5/6	6/6
	AM \pm SD	0.046 \pm 0.070	0.049 \pm 0.230	0.157 \pm 0.184	0.254 \pm 0.260	0.071 \pm 0.088	0.245 \pm 0.316
	GM(GSD)	0.025 (3.02)	0.041 (2.11)	0.081 (4.17)	0.112 (7.02)	0.038 (3.54)	0.073 (7.38)
	Range	0.008-0.217	0.008-0.080	0.008-0.506	0.007-0.620	N.D-0.238	0.008-0.807
Cr	Detected no./total no.	8/8	8/8	6/6	4/4	6/6	6/6
	AM \pm SD	0.008 \pm 0.008	0.133 \pm 0.230	0.030 \pm 0.016	0.018 \pm 0.013	0.038 \pm 0.076	0.030 \pm 0.036
	GM(GSD)	0.005 (2.56)	0.027 (3.42)	0.026 (1.88)	0.015 (2.02)	0.011 (4.53)	0.015 (4.05)
	Range	0.002-0.021	0.002-0.624	0.009-0.050	0.007-0.037	0.002-0.192	0.003-0.096
Cu	Detected no./total no.	6/8	8/8	6/6	4/4	6/6	6/6
	AM \pm SD	0.035 \pm 0.027	0.039 \pm 0.024	0.013 \pm 0.013	0.005 \pm 0.003	0.156 \pm 0.367	0.015 \pm 0.018
	GM(GSD)	0.019 (4.90)	0.027 (3.42)	0.009 (2.71)	0.004 (2.12)	0.011 (10.06)	0.007 (4.00)
	Range	N.D-0.0073	0.002-0.070	0.004-0.032	0.001-0.009	0.001-0.905	0.002-0.048
Mn	Detected no./total no.	8/8	8/8	6/6	4/4	6/6	6/6
	AM \pm SD	0.056 \pm 0.033	0.259 \pm 0.270	0.037 \pm 0.051	0.016 \pm 0.009	0.086 \pm 0.170	0.018 \pm 0.013
	GM(GSD)	0.048 (1.77)	0.167 (2.61)*	0.018 (3.91)	0.015 (1.68)	0.025 (4.58)	0.013 (2.80)
	Range	0.019-0.124	0.066-0.735	0.003-0.137	0.009-0.028	0.005-0.433	0.004-0.035
Fe	Detected no./total no.	8/8	8/8	6/6	4/4	6/6	6/6
	AM \pm SD	1.788 \pm 1.316	5.496 \pm 5.016	1.218 \pm 1.203	0.512 \pm 0.189	2.219 \pm 4.776	0.583 \pm 0.282
	GM(GSD)	1.379 (2.28)	4.058 (2.22)*	0.816 (2.73)	0.481 (1.53)	0.499 (5.52)	0.536 (1.54)
	Range	0.311-4.535	1.734-16.233	0.215-3.482	0.265-0.724	0.100-11.964	0.360-1.101
Ni	Detected no./total no.	3/8	5/8	2/6	2/4	4/6	3/6
	AM \pm SD	0.022 \pm 0.003	0.033 \pm 0.033	0.018 \pm 0.008	0.010 \pm 0.003	0.043 \pm 0.086	0.017 \pm 0.002
	GM(GSD)	0.022 (1.14)	0.022 (2.58)	0.016 (1.62)	0.010 (1.38)	0.012 (4.88)	0.017 (1.16)
	Range	N.D-0.026	N.D-0.102	N.D-0.032	N.D-0.015	N.D-0.219	N.D-0.021
Cd	Detected no./total no.	8/8	8/8	6/6	4/4	6/6	6/6
	AM \pm SD	0.005 \pm 0.003	0.006 \pm 0.005	0.006 \pm 0.004	0.004 \pm 0.003	0.004 \pm 0.002	0.006 \pm 0.003
	GM(GSD)	0.004 (1.89)	0.004 (2.78)	0.005 (2.24)	0.003 (2.01)	0.004 (1.50)	0.005 (2.50)
	Range	0.002-0.008	0.001-0.014	0.002-0.012	0.001-0.008	0.002-0.007	0.001-0.009
Zn	Detected no./total no.	8/8	8/8	5/6	4/4	6/6	6/6
	AM \pm SD	0.433 \pm 0.554	0.746 \pm 1.230	0.515 \pm 0.484	0.023 \pm 0.010	2.508 \pm 5.522	0.301 \pm 0.343
	GM(GSD)	0.127 (7.11)	0.136 (9.00)	0.246 (4.97)	0.021 (1.58)	0.195 (14.17)	0.122 (5.48)
	Range	0.010-1.595	0.012-3.501	N.D-1.143	0.014-0.033	0.013-13.763	0.016-0.783

작업영역의 미세먼지 농도가 통계적으로 유의하게 높았다($p<0.001$).

호흡성분진 개인시료 중 실리카 농도는 대구·경상지역의 건설현장이 기하평균 0.0015 mg/m^3 으로 가장 높은 농도수준을 보였고, 경기도 지역 건설현장은 기하평균 0.0009 mg/m^3 이었지만, 건설현장별로 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다($p=0.742$). 모든 시료에서 실리카 노출수준은 노출기준(0.05 mg/m^3) 미만으로 나타났다. 건설업 직종 중 현장관리, 신호수 근로자가 기하평균 0.0017 mg/m^3 으로 가장 높은 농도 수준을 나타내었고, 토목, 토목직영 근로자 0.0014 mg/m^3 , 골조·철근·형틀공종 근로자 0.0013 mg/m^3 , 자재운반 및 정리작업 근로자 0.0013 mg/m^3 , 거푸집 작업 근로자 0.0010 mg/m^3 이었다. 직종별 평균 비교결과 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다($p=0.111$). 발생원별 실리카 농도도 경기도 지역의 A, B건설의 기하평균이 0.0018 mg/m^3 , 0.0016 mg/m^3 로 대구·경상지역의 건설업의 농도보다 높게 나타났지만, 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다($p=0.214$). 대조군인 골프장에서 측정된 실리카 농도는 0.0014 mg/m^3 로 대구지역의 C, D, E 건설에서 측정된 농도보다 높은 농도를 보였지만 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다($p>0.05$).

2. 금속 농도

측정지역에 따른 중금속 측정농도는 Table 6에 나타내었다. 불검출 혹은 검출한계미만 값은 ‘검출한계/2’를 적용한 값을 사용하였다. 경기도 및 대구·경상지역의 건설현장의 미세먼지 중 중금속 농도는 큰 차이를 보이지 않았다. 측정대상 중 B 건설은 망간(Mn) $0.167 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, 철(Fe) $4.058 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ 으로 가장 높은 농도 수준을 나타내었고, 건설현장별 평균비교 결과 두 구성성분의 농도가 다른 건설현장과 비교하여 통계적으로 유의하게 높았다($p<0.05$). 크롬(Cr) $0.027 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, 구리(Cu) $0.027 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, 니켈(Ni) $0.022 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ 의 노출농도도 다른 건설업보다 높게 나타났지만 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다. 납(Pb)의 경우 D건설에서 $0.112 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ 으로 가장 높게 나타났고, 대조군인 골프장에서 $0.73 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ 의 노출농도를 보였다. 대조군인 골프장의 미세먼지 금속성분 노출수준은 대구·경상 지역 건설현장 노출농도와 유사하거나

약간 높게 나타났지만 그 차이가 통계적으로 유의하지는 않았다.

IV. 고 찰

1. 건설업 옥외작업장 미세먼지 노출 수준

외국을 포함해서 건설업 옥외작업장 근로자의 미세먼지 노출에 대한 연구는 발견하기 어렵다. 산업보건의 측면에서 흔히 평가되는 작업 유래의 분진과 별도로 옥외작업자에 대하여 대기 유래의 미세먼지 노출을 측정한 연구는 국내외에 없었다. 건설업이외에 종사하는 근로자(예를 들면 운전원)에 대한 미세먼지 노출평가는 환경보건의 측면에서 접근한 것이 대부분이었다. 그런 면에서 본 연구는 국내외에 유래가 없는 주제를 조사했다고 할 수 있으며, 특히 대기 중 미세먼지 농도가 높은 중동 및 동아시아 등지에서 특히 참고할만한 연구라 할 수 있다.

국외에서 옥외작업이 확실한 건설작업에 대하여 수행된 연구는 많지 않았다. Hall et al.(2013)은 노조의 요구에 의해 미국 건물 지붕공사자(roofer)들의 지붕 타일(roof tile) 설치작업 중에 노출되는 실리카를 측정하여 사례연구 형태로 보고하였다. 총 4개의 지붕설치 회사를 대상으로 호흡성 분진 및 호흡성 실리카에 대하여 38개의 시료를 수집 및 분석하였다. 호흡성 분진의 농도가 가장 높았던 회사와 호흡성 실리카의 농도가 가장 높았던 회사가 일치하였고 각각의 기하평균은 1.19 mg/m^3 , 0.16 mg/m^3 이었다. 이 연구에서 타일의 절단 등의 작업으로 인해 발생하는 분진이 주 노출원이었고 대기 유래 미세먼지는 고려되지 않았지만 명명한 옥외작업이었다.

Nij et al.(2003)이 뉴질랜드 건설현장을 대상으로 수행한 연구에서는 34개 사업장에서 호흡성 분진 및 그 속에 함유된 실리카를 측정하기 위하여 68개의 시료를 수집 및 분석되어 보고되었다. 이 연구 역시 대기 유래의 미세먼지 노출이 아닌 작업 자체에서 발생하는 분진에 초점이 맞추어져 있었다. 측정 공종은 벽돌미장공(tuck pointer), 콘크리트 가공/작업자(recess miller/concrete workers), 건물해체업자(demolition workers), 내벽건설공(inner wall constructor), 현장청소원(construction site cleaners), 기타 간접노출 건설업 작업자(background exposed group)로 구분하였다. 이

들 중 벽돌미장공은 항상 옥외작업을 한다고 볼 수 있다. 그 중 가장 높은 농도의 호흡성 분진에 노출되는工种은 벽돌미장공, 내벽건설공 순이었으며 농도는 각각 기하평균 2.2 mg/m^3 (범위: $0.6\text{--}8.0 \text{ mg/m}^3$)과 1.5 mg/m^3 (범위: $0.6\text{--}4.0 \text{ mg/m}^3$)이었다. 호흡성 실리카의 노출 농도는 벽돌미장공, 콘크리트 가공/작업자 순이었으며 농도는 0.35 mg/m^3 (범위: $0.089\text{--}1.65 \text{ mg/m}^3$)과 0.31 mg/m^3 (범위: $0.028\text{--}3.77 \text{ mg/m}^3$)이었다. 상기 공정 중 분명한 옥외작업은 벽돌미장공에 의해서 수행된 작업일 것이며 나머지는 실내외를 구분하기 어려우며, 내벽건설공은 실내에서 작업했을 가능성이 크다.

국내에서 건설업을 대상으로 수행된 분진노출 연구는 여러 차례 시행되었지만 미세먼지 노출에 대한 평가는 없었다. Choi et al.(2000)은 건설업 근로자들이 노출될 수 있는 분진, 소음, 진동, 유기용제 등 다양한 유해작업에 대하여 측정하고 조사하였다. Bae et al.(2013)은 콘크리트 취급사업장의 석영 노출에 관하여 연구하였고, Sung et al.(2015)은 토공사 현장에서 석영의 노출에 관하여 평가하였다. 두 연구 모두 작업에서 발생하는 분진 및 그 함유성분에 대해서 연구하였다는 공통점이 있다.

2. 비건설업 근로자의 미세먼지 노출

택배기사를 대상으로 한 초미세먼지 노출 조사 결과는 다음과 같다. Lee(2015)의 연구에서 광학모니터를 이용해 측정한 초미세먼지(PM_{2.5})와 대기오염측정망의 농도를 비교하였는데 대부분의 경우 대기오염측정망의 농도보다 개인측정 농도가 높았다. 두 농도수준이 유사한 경우에도 개인측정값이 대기오염측정망의 값보다 높았다. 동일한 Lee(2015)의 연구에서 택배원의 배송업무 중 배송위치를 도로변과 주택가로 구분한 PM_{2.5} 노출수준은 도로변의 노출수준이 $49.90 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ 으로, 주택가 PM_{2.5} 노출수준 $46.17 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ 보다 높았으며, 유의한 차이를 보였다. BC 노출수준은 도로변 $3.46 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, 주택가 $1.96 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ 로 도로변이 주택가보다 노출수준이 높았으며, 유의한 차이를 보였다. 대기 중 PM_{2.5}와 택배원의 PM_{2.5} 및 BC 사이의 상관성은 대기 중 PM_{2.5}와 택배원의 BC간의 상관계수는 0.260로 나타났으며, 대기 중 PM_{2.5}와 택배원의 PM_{2.5} 및 택배원의 PM_{2.5}와 BC 사이의

상관성은 나타나지 않았다.

Lee et al.(2015)은 환경미화원 및 쓰레기차량 운전수를 대상으로 근무시간 동안 측정된 DPM의 대리인자인 EC, BC, PM_{2.5}의 노출을 측정하였다. 노출수준은 EC $39.6 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ ($1.7\text{--}29.0 \text{ } \mu\text{g/m}^3$), 실시간으로 측정된 PM_{2.5}와 BC의 노출수준은 각각 $9.1 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ ($6.0\text{--}19.6 \text{ } \mu\text{g/m}^3$), $62 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ ($27\text{--}240 \text{ } \mu\text{g/m}^3$)이었다. 생활폐기물 차량의 배기구 배기구는 차량하부, 차량 뒤편에 위치하며, 배기구와 차량 뒤편의 거리는 1.2-4.2 m이었으며, 수거원의 EC농도는 배기구와의 거리가 4 m 미만일 경우의 농도가 4 m 이상일 때보다 유의하게 높은 농도를 보였다. EC를 제외한 DPM의 농도는 유의한 차이를 보이지 않았다. 흡연자의 OC, TC 농도는 비흡연자보다 높았으며, 유의한 차이를 보였지만, EC, BC, PM_{2.5} 농도는 유의한 차이를 보이지 않았다(Lee et al., 2015). Park et al.(2014)은 생활폐기물 수거원 및 운전수에 대한 DEE의 대리인자인 PM_{2.5}, BC, NO₂의 노출을 측정하였다. BC 노출수준은 수거원 $11.81 \pm 5.25 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, 운전수 $6.98 \pm 0.67 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ 로 수거원의 노출수준이 유의하게 높았으며, PM_{2.5} 노출수준은 수거원 $64.99 \pm 24.67 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, 운전수 $63.88 \pm 29.95 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ 로 유사한 노출수준을 보였다.

Zagury et al.(2000)은 파리에서 택시운전사들을 상대로 대기오염물질 노출평가를 하였으며 미세먼지를 측정하지는 않았지만 가스상 물질들과 black smoke index를 측정하여 보고하였다. Riediker 등(2003)은 미국에서 고속도로순찰을 수행하는 경찰관들을 상대로 대기오염물질 노출평가를 수행한 결과 미세먼지(PM_{2.5})는 $24 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ 수준이었으며 모든 측정항목이 기준보다 모두 낮았다고 보고하였다. Lewne et al.(2007)은 도시지에서 운행하는 버스 및 택시 운전자를 대상으로 미세먼지를 측정하였는데 차량배출물질 중 PM_{2.5}의 노출수준은 버스운전자 $15.7 \pm 1.8 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, 택시운전자 $17.3 \pm 1.3 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ 의 농도를 보였다. Davis et al.(2007)은 미국 배송차량 운전자를 대상으로 PM_{2.5} 농도를 측정한 결과, 흡연자의 PM_{2.5} 농도는 $36.5 \pm 2.4 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, 비흡연자의 PM_{2.5} 농도는 $16.2 \pm 1.8 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ 로, 흡연은 PM_{2.5} 농도에 영향을 주며, 측정대상자인 택배원 중 흡연자는 비흡연자 보다 PM_{2.5} 농도가 약 2배 높았으며, 유의한 차이를 보였다. Sehgal et al.(2015)은 인도 텔리에서 도로 요금정산소(toll plaza)

에서 근무하는 근로자들을 대상으로 미세먼지(PM_{2.5}), 일산화탄소, 산화질소, 이산화황, 원소탄소(EC)/유기탄소(OC)를 측정하고 폐기능을 검사하였다. 고속도로 요금정산소보다 도심에 있는 요금정산소에서 미세먼지, 이산화질소, 이산화황의 농도가 높았지만 원소탄소(EC)/유기탄소(OC) 비율은 반대였다. 미세먼지의 농도는 도심도로 요금정산소와 고속도로 요금정산소에서 산술평균이 각각 0.22 mg/m³와 0.15 mg/m³였으며 이는 인도 정부의 미세먼지 규제기준(maximum permissible limit)인 0.06 mg/m³을 초과하는 농도였고, 요금정산소에서 측정된 모든 시료의 농도가 이 기준을 초과하였다.

3. 미세먼지 관리 책임

옥외작업장에서 노출되는 대기 유래 미세먼지는 사업장 외부 유래의 유해인자이기 때문에 노출관리 책임을 사업주가 져야하는지 여부에 대해 미국 직업안전보건청(Occupational Safety and Health Administration, OSHA)과 미국 국립직업안전보건연구원(National Institute of Occupational Safety and Health, NIOSH)에서 제시하는 내용을 조사하였다.

대기중 미세먼지와 유사하게 사업장에서 발생되지 않는 유해인자로는 옥외작업에서 오는 직업적 열노출(occupational heat exposure)을 들 수 있다. 직업적 열노출에는 용광로 고열작업 등 인위적인 열발생 작업이 포함되지만, 더운 날씨에 직사광선 아래에서 이루어지는 야외작업(outdoor operations)도 포함된다. 야외작업 시 노출되는 열은 사업자가 발생시킨 것이 아니며, 이러한 작업에는 야외농사, 건설작업, 석유나 가스 시추작업, 조경작업, 비상대응작업(emergency response operations), 전력 및 유틸리티 서비스 유지작업 등이 포함된다. OSHA에서는 홈페이지(<https://www.osha.gov/SLTC/heatstress/>)와 자료집 등을 통해 직업적 열노출(혹은 열손상, heat stress)에 대하여 중요하게 다루고 있다. 홈페이지 메뉴에는 직업적 열노출에 대한 관리의 책임에 대하여 ‘How do I find out about employer responsibilities and worker rights?’라는 제목 하에 다루고 있다. 이에 대한 OSHA는 “근로자는 안전한 작업장에서 일할 권리가 있다. 법률은 사업주가 고용인들에게 안전하고 보건적인 작업장을 제공하도록 요구하고 있다. OSHA 법률은 또한 고용인들이 법

으로 보장된 권리(안전 및 보건적이 우려에 대하여 의견을 제시할 권리 및 상병을 보고할 권리)를 행사하는 것에 대하여 사업주가 불이익을 주는 것을 금지하고 있다.”라고 답하고 있다.

OSHA가 제시하는 관련법규(Standards) 페이지에는 Occupational Safety and Health Act(OSHA) Section 5(a)(1)를 사업주 관리 책임의 근거로 제시하고 있으며, 같은 내용이 우리나라 산업안전보건법 제5조(사업주 등의 의무)제1항제2호에 ‘근로자의 신체적 피로와 정신적 스트레스 등을 줄일 수 있는 쾌적한 작업환경을 조성하고 근로조건을 개선할 것’라는 내용으로 제시되어 있다. 이 조항은 사업자가 유해인자를 발생시키는지 여부에 대한 단서가 달려있지 않다.

이상의 내용을 토대로 살펴볼 때 옥외작업장 미세먼지 노출관리에 대한 책임은 직업적 열노출과 마찬가지로 사업주에게 있으며, 정부 또한 다양한 경로를 통하여 관련정보를 근로자에게 제공하는 것이 필요하다.

4. 옥외작업장 미세먼지 관리에 대한 고찰

(1) 옥외작업장의 측정대상 여부

건설현장과 같이 한시적인 옥외작업장의 작업환경 측정 대상 여부에 대한 질의에 고용노동부는 “작업환경측정대상은 옥내외를 구분하지 않고 작업환경측정대상 유해인자에 노출되는 근로자가 작업하고 있는 작업장을 말하며, 공사규모 및 작업 인원과는 상관없이 적용됨. 다만, 공사기간, 한시적인 작업과 관련해서는 산업보건기준에 관한 규칙 제11장의 임시작업 및 단시간 작업인 경우와 제2장의 규정에 의한 분진작업의 적용제외(동 규칙 제4조) 작업장은 측정대상에서 제외됨”이라고 회시(산업보건환경과-300, 2004.1.16.)하였다. 따라서 건설현장과 같이 한시적인 옥외작업장이라고 할지라도 기본적으로 측정대상이 된다.

(2) 기상청 자료의 이용

기상청에서는 기상현상인 황사를 관측하고 홈페이지(<http://www.kma.go.kr/weather/asiandust/density.jsp>)를 통해 관측값을 공유하고 있다. 이 자료는 에어코리아 홈페이지에서도 일부 확인가능하다. 기상청에서 안내하는 황사발생 확인방법 3가지는 아래와 같다.

- ① 방송매체(TV나 라디오)의 일기 예보 시청
- ② 기상청 홈페이지(www.kma.go.kr) 및 국립수의과학검역원 홈페이지(www.qia.go.kr) 수시 확인
- ③ 전화를 통한 확인(기상청: 국번없이 131, 농림축산검역본부: 031-467-1700)

(3) 환경부 자료의 이용

환경부에서는 한국환경공단의 에어코리아 홈페이지(<http://www.airkorea.or.kr/>) 을 통해 대기측정망 자료를 공유하고, 미세먼지와 오존에 대한 대기질 예보 및 경보를 통해 현재 미세먼지 농도를 경고하고 2일 치 농도를 전망한다. 미세먼지 주의보 및 경보의 경우 발령기준이 일정농도가 2시간 이상 지속되는 경우에 발령되므로 노출관리를 위해서는 예보를 활용하는 것이 권장된다. 또한 건설현장 등의 특성상 일 단 작업이 시작되면 근로자들을 다시 소집하거나 현장에 접근하여 방진마스크 등을 착용하도록 요구하거나 배포하는 것이 어렵기 때문에 예보에 따른 관리가 더 현실적인 대안이다.

(4) 미세먼지 노출에 따른 호흡용 보호구의 선정

호흡용 보호구의 선정은 미세먼지 노출수준에 따라 달라질 수 있다. 과거의 미세먼지 노출수준을 기준으로 판단하면 대기중 미세먼지 노출수준은 산업보건 분진노출기준과 비교하여 크게 낮은 편이므로 2급 방진마스크를 사용하는 것으로 대기중 미세먼지 노출이 관리될 수 있다. 황사마스크 규격은 식품의약품안전처에서 관리하고 있으며 요구되는 성능 중 여과효율의 경우 80%로 2급 방진마스크와 유사하다.

(5) 기타 호흡용 보호구 관련 프로그램

착용법 교육 및 유지관리 등의 호흡용 보호구 선정을 제외한 나머지 사항들은 일반 호흡용 보호구 프로그램의 내용(예를 들면 KOSHA CODE H-82-2015 호흡용 보호구의 사용지침)을 따르면 된다. 황사마스크 중 접이형의 경우 호흡용 보호구와 다른 착용법이 필요하지만 착용법이 방한대와 유사하고 제품 포장에 사용법이 표시되어 있으므로 별도의 교육이 필요하지는 않다.

5. 연구의 한계점

푸리에변환적외선분광분석(Fourier transform infrared

spectroscopy, FTIR)의 실리카 분석 검출한계는 NIOSH 7602에서 0.005 mg/sample으로 제시하고 있고, 실제로 분석을 해 보아도 0.003 mg/sample 정도로 시료의 실리카 농도가 낮아지면, 분석이 거의 불가능해진다(NIOSH, 2003). 본 논문에서 인용한 Nij et al.(2002)의 논문에서도 검출한계를 1.7 μg 이라고 제시하고 있다. 본 연구의 검출한계를 2 $\mu\text{g/sample}$ 이라고 가정하더라도, 공기채취량을 감안하면 공기 중 실리카 농도가 검출한계에 가까운 농도가 많다. 건설현장에서는 허리를 숙이거나 엎드리는 등의 자세 변화가 많은 작업들이 잦아서, 측정과정동안 사이클론의 기울어짐으로 인해, 입자크기가 큰 입자도 때때로 포집될 수 있는데, FTIR로 실리카 분석시 시료의 입자크기가 표준물질(물리적 평균 입자크기 약 2 μm)보다 큰 경우에는 실리카 농도의 과소평가가 크게 발생된다(Bhaskar et al., 1994). 따라서, 본 연구에서 제시된 실리카 농도는 건설업 작업의 특성상 과소평가의 가능성을 배제할 수 없다. 다만, 본 연구에서 측정시간이 오전 7시부터 오후 4시 반까지 9.5시간 동안 측정하였기 때문에 공기채취량이 많아, 기중 실리카 검출한계가 다소 낮아졌다. 또한 본 연구에서 측정한 건설현장 작업에서 실리카 소스인 콘크리트, 각종 석재, 골재 및 모래에 노출되는 작업이 거의 없었다는 점도 자료의 해석 시 고려해야 한다.

옥외작업장의 미세먼지 농도는 계절적 변이가 심하며, 특히 봄철에 황사현상과 함께 노출 농도가 높아지는 경향이 있다. 본 연구는 3월에 시작되었으나 측정이 5월부터 시작되었기 때문에 측정된 자료에 계절적 변이가 반영되지 않았다. 옥외작업이 주가 되는 여러 공종을 조사하였으나 공종별로 시료의 개수가 불균등하여 통계처리 등을 통하여 비교하기 어렵다. 공종별 수행작업에 관한 내용은 해당 보고서에 기록되어 있다(Kim et al., 2016).

본 연구에서 사용한 측정방법은 호흡성분진을 측정하기 위해 고안된 방법이므로 대기측정망을 통해 측정된 미세먼지(PM_{2.5}) 농도와 직접적인 비교가 불가능하였다. 미세먼지(PM_{2.5}) 농도를 측정하는 기구를 사용하였다 하더라도 차이가 있었을 것으로 예상되는데 그 이유는 환경부의 대기측정망은 건물 옥상 등 높은 곳에 설치되어 대지에서 일어나는 활동들에 영향을 적게 받을 것이기 때문이다.

V. 결 론

본 연구에서는 건설업 옥외작업장 미세먼지 노출 실태조사를 실시하여 지역별로 여러 달에 걸쳐 호흡성분진, 결정형 실리카, 중금속(Fe, Pb, Cr 등)의 농도를 조사하였고 대조군으로 골프장에서 같은 유해인자들을 조사하였다. 건설업 옥외작업장의 미세먼지 노출수준은 같은 날 대기측정망에서 측정된 것보다 대부분 높았으며 경기지역과 대구·경북지역 간의 비교에서는 경기지역이 상대적으로 높았다. 호흡성분진에 대한 건설업 옥외작업장 내 지역시료와 개인시료의 기하평균은 $37.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $92.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 두 집단 간의 노출수준에 대한 유의한 통계적 차이가 있었다. 이는 옥외작업장 근로자가 노출되는 미세먼지 중 40.8%는 대기에서 유래하고 나머지 59.2%는 작업에서 유래한다고 해석될 수 있다. 실리카와 금속 노출은 노출기준보다 상당히 낮았다.

3면 이상이 차단되어 옥내로 구분될 수 있는 공간에서는 작업유래의 미세먼지 농도가 압도적으로 높다는 점을 감안하면 건설현장에서는 작업에서 유래하는 분진 관리에 우선순위를 두어 관리할 필요가 있으며 호흡성 분진 농도를 측정하여 노출수준을 평가할 필요가 있다고 사료된다. 미세먼지 노출에 대한 작업장에서의 관리방안은 발생원이 작업장 내에 위치하지 않기 때문에 기존에 산업보건에 사용하는 관리방법 중 근로자를 보호하는 접근법만이 사용가능하며 필요하다고 판단되는 경우 호흡보호구를 지급하는 것이 추천된다. 미세먼지는 작업장 내에서 발생된 유해인자가 아니지만 야외작업장에서 직사광선 노출로 인한 열손상에 대해서 쾌적한 작업환경을 제공할 의무가 부여되는 사업주가 관리하는 것과 같은 원리로 사업주가 노출관리를 해야 한다고 여겨진다.

미세먼지 노출을 분진과 개별 성분으로 분리하여 산업보건기준과 비교했을 때 그 수준이 노출기준의 10% 이하로 조사되었고, 낮은 수준의 미세먼지 노출인 경우 산업안전보건법을 기반으로 하여 고농도 노출수준에서 사용되는 기존의 작업장 미세먼지 관리방법의 도입을 강제하는 것은 합리적이지 않을 것으로 판단된다. 옥외작업장 미세먼지 관리의 중단기 목표표로 정부에서 미세먼지 중 건강영향이 더 큰 PM_{2.5} 크기의 분진과 호흡성이 있는 호흡성분진 노출에 대

한 노출기준 설정을 검토하는 것이 추천된다.

감사의 말씀

이 논문은 2016년도 산업안전보건연구원의 위탁연구 용역사업 지원을 받아 수행된 것(2016-연구원-762)으로 이에 감사를 드립니다.

References

- Bae HJ, Jung JH, Phee YG. Analysis of Quartz Concentrations by FTIR-DOF and FTIR-Transfer method in Concrete Manufacturing Industries. *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*. 2013. 23(2):75-83.
- Bhaskar R, Li J, Xu L. A comparative study of particle size dependency of IR and XRD methods for quartz analysis. *Am Ind Hyg Assoc J*. 1994 Jul;55(7):605-9.
- Choi JW, Mun JS, Won JI, Park HC. Health Hazardous Substances in Construction Work in Korea. *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*. 2000. 10(1):1-19.
- Davis ME, Smith TJ, Laden F, Hart JE, Blicharz AP, Reaser P, & Garshick E. Driver exposure to combustion particles in the US trucking industry. *Journal of occupational and environmental hygiene*. 2017. 4(11): 848-854.
- Hall RM, Achutan C, Sollberger R, McCleery RE, Rodriguez M. Case Study: Exposure Assessment for Roofers Exposed to Silica during Installation of Roof Tiles. *Journal of occupational and environmental hygiene*. 2013. 10(1):D6-10.
- ISO. Air quality -- Particle size fraction definitions for health-related sampling. KS I ISO 7708: 1995.
- ISO. Stationary source emissions -- Determination of PM₁₀/PM_{2.5} mass concentration in flue gas -- Measurement at low concentrations by use of impactors. KS I ISO. 23210: 2012.
- Kim SW, Phee YG, Yang WH, Ha GC. A Study on the Exposure of Outdoor Workers to Particulate Matter and on Health Protection Plan. Korea Occupational Safety and Health Research Institute. 2016-KOSHRI-762. 2016.
- Korea Environment Corporation (KEC). Air Korea: Information: Air Quality Standard. 2017. Available from: <http://www.airkorea.or.kr/airStandardKorea>
- Korean Society of Environmental Health (KSEH).

- Environmental health. *Episteme*; 2016. p. 277.
- KOSTAT. The Numbers of Employers and Employees by their Region, Industrial Sector, and Employee Size('06-'14). 2015.
- Lee GH. Exposure Assessment of Diesel Engine Exhaust (DEE) among Door-to-door Deliverers. Keimyung University. Master thesis. 2015.
- Lee KH, Jung HJ, Park DU, Ryu SH, Kim B., Ha KC, ... & Yoon C. Occupational Exposure to Diesel Particulate Matter in Municipal Household Waste Workers. *PloS one*. 2015. 10(8), e0135229.
- Lewne M, Plato N, & Gustavsson P. Exposure to particles, elemental carbon and nitrogen dioxide in workers exposed to motor exhaust. *Annals of occupational hygiene*. 2007. 51(8), 693-701.
- Nij ET, Hilhorst S, Spee T, Spierings J, Steffens F, Lumens M, Heederik D. Dust control measures in the construction industry. *Annals of Occupational Hygiene*. 2003. 47(3):211-8.
- NIOSH. SILICA, CRYSTALLINE by IR (KBr pellet). NIOSH NMAM 7602. 2003.
- Park DW, Kim SW, Kim W, Bae HJ, Yoon CS, Lee GH, Ha GC. 2014. Study on the Estimation of Industrial Sectors and Populations Exposed to Diesel Engine Exhaust. Korea Occupational Safety and Health Agency. OSHRI Report No. 2014-OSHRI-793.
- Riediker M, Williams R, Devlin R, Griggs T, & Bromberg P. Exposure to particulate matter, volatile organic compounds, and other air pollutants inside patrol cars. *Environmental science & technology*. 2003. 37(10): 2084-2093.
- Sung EC, Bae HJ, Jung JH, Phee YG. Exposure assessment of airborne quartz from earthwork site. *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*. 2015. 25(4):584-590.
- Zagury E, Le Moullec Y, & Momas I. Exposure of Paris taxi drivers to automobile air pollutants within their vehicles. *Occupational and environmental medicine*. 2000. 57(6):406-410.