

주물사업장의 입자상물질 입경분포 및 비산배출 특성

박정호 · 장민재 · 김형갑*

경남과학기술대학교 환경공학과

Characteristics of Size Distribution and Fugitive Emissions of Particulate Matter in Foundries

Jeong-Ho Park · Min-Jae Jang · Hyoun-Kab Kim*

Department of Environmental Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology

ABSTRACT

Objectives: This study was performed to measure and evaluate the concentration, size distribution and fugitive emission of particulate matter from process operations at foundries.

Methods: Particle matter was collected from three foundries, and samples were also collected from a background site for calculating the fugitive emission concentration of the foundries. For the collection of the samples, a Nanosampler cascade impactor was used.

Results: The concentration of TSP in the samples collected from the three foundries was 0.675~1.222 mg/m³, PM₁₀ was 0.525~1.018 mg/m³ and PM_{2.5} was 0.192~0.615 mg/m³. The mass size distribution was bimodal or monomodal with maximum peak at two stage(size 2.5~10 µm). The mass median aerodynamic diameter(MMAD) was 1.80~3.98 µm. The fugitive emission concentration of TSP varies in the range of 0.65 to 1.21 mg/m³, which exceeds the emission standard of fugitive dust(0.5 mg/m³).

Conclusions: Particle concentration and size is an important industrial hygiene factor to protect foundry workers. Furthermore, the presence of high emission of particulate pollutants has a significant negative impact on the ambient air of the study area. Therefore, it is important to improve both the process and prevention facility in order to reduce particulate pollutants in foundries.

Key words: cascade impactor, foundry, fugitive dust, particulate matter, size distribution

I. 서 론

주물사업장은 용해, 주조, 탈형, 후처리 등 작업 공정에서 금속, 모래, 흙 등 비중이 높은 광물성의 입자상물질(Particulate Matters, PM)이 다량 발생되고 국소배기 방식으로도 완벽한 포집제거가 용이치 않다. 특히, 공단지역에 위치한 주물사업장의 경우 발생된 PM은 전체 작업장으로 부유 확산되어 근로자의 건강상 문제뿐만 아니라 출입구 등을 통해 외부로 비산 배출될 경우 주변 대기질의 악화와 인근

근로자들에게도 큰 영향을 줄 수도 있다(KOSHA, 2000).

일반적으로 공기 중 부유하는 PM은 입경이 수 nm에서 100 µm까지 넓은 범위로 분포하고 발생원에 따른 농도, 입경 그리고 물리화학적 조성 등의 차이에 따라 인체에 미치는 피해영향은 크게 다르다. 특히 미세입자일수록 더 강한 독성학적 영향을 미친다고 보고되고 있으며(Donaldson et al., 1998), 이에 입경에 따른 각종 국내외 기준은 작업환경 중 호흡성분진의 경우 입경 10 µm 이하이거나 ACGIH에서

*Corresponding author: Hyoun-Kab Kim, Tel: 055-751-3340, E-mail: hgkim@gnitech.ac.kr

Department of Environmental Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology, 33 Dongjin-ro, Jinju 52725
Received: February 3, 2016, Revised: March 18, 2016, Accepted: March 21, 2016

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.

는 기하평균입경 4 μm 인 것으로 정의하고 있으며 (ACGIH, 2007), 대기환경기준에서도 PM_{10} 및 $\text{PM}_{2.5}$ 등 주로 미세입자를 규제하고 있다. 최근에는 저비점중금속, 다환방향족탄화수소(PAH) 등 유해성물질로 구성되어 건강상 더 큰 악영향을 줄 수 있는 입경 0.1 μm 이하의 초미세입자(Ultra Fine Particles, UFP)에 대한 관심이 집중되고 있다(Delfino et al., 2005; Douglas et al., 2008).

주물사업장의 PM과 관련된 국내외연구에서는 산업보건측면에서 주로 호흡성분진 중 유리규산 등 유해물질에 대한 작업환경 및 개인 근로자의 노출수준에 대한 측정 및 평가가 이루어지고 있다(Park et al., 2003; Scholz & Slavin, 2007; Bae et al., 2015). 그러나 주물공장의 경우 작업특성상 미세입자뿐만 아니라 조대입자도 높은 농도로 발생하는 등 넓은 범위의 입경분포 특성을 가지고 있다. 또한, 공장들이 밀집된 산업단지에 위치한 주물사업장의 경우 출입구 등을 통해 다량의 비산먼지(fugitive dust)가 외부로 배출시 인근 근로자들에게도 피해영향을 주게 된다. 한편, 최근 화학물질 배출·이동량(PRTR) 조사결과에 따르면 유해물질의 대기배출량은 2013년 기준 총 50,544 톤/년 중 방지시설을 거치는 점배출량은 38.1%에 불과하고 나머지 61.9%는 방지시설 없이 공기 중으로 비산배출 된다는 보고 등 사업장 비산배출의 문제점과 저감대책의 중요성이 높아지고 있다(MoE, 2015).

또한, 통상 주물사업장은 공정과정에서 발생하는 PM으로 3D 업종임과 더불어 PM의 다량 비산배출로 인해 공해산업으로도 인식되고 있다(Kim et al., 2007). 그러나 제조업 품질 경쟁력의 근간이 되는 뿌리산업

으로 정착되기 위해서는 향후 청정(clean)산업으로의 전환이 필요하다. 이를 위해서는 주물사업장의 주요 발생 오염물질인 PM에 대한 농도, 입경분포 그리고 거동 특성에 대한 종합적인 기초자료의 축적이 필요할 것이다.

따라서, 본 연구에서는 3개 주물사업장을 대상으로 다단 임팩터(cascade impactor)를 사용하여 사업장의 PM 농도 및 비산먼지의 배출농도 등 입경별 거동특성을 파악하였다. 향후 연구결과는 넓은 의미의 산업보건 측면에서 주물사업장이 소재한 산업단지 근로자들의 건강피해 대책과 종합적인 주물공장의 PM 저감방안을 도출하기 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

II. 연구내용 및 방법

1. 연구대상

주물사업장의 실태조사는 2015년 11월에서 12월 사이에 부산시 신평·장림산업단지에 소재한 HJ, SY, HS 등 3개 사업장을 대상으로 실시하였다.

Table 1에 나타난 바와 같이 본 사업장들은 6~12 톤/일의 고철(scrap iron)을 이용하여 전기용해로의 용융과정과 성형, 탈형 등 주물사(1.5~5 톤/일)처리과정 그리고 절단, 연삭, 용접 등 표면처리 공정을 거쳐 각종 기계장비 부속품을 최종 생산하고 있다. 특히, 사업장의 규모가 작아 모든 공정이 한 작업장 내에서 동시에 진행되고 있다. 또한, 대기환경보전법상 사업장의 용해, 주물사 시설 등은 대기배출시설로 허가되어 있으며, 발생된 PM은 국소배기장치를 통해 여과집진기(bag filter) 및 활성탄 흡착탑(AC tower)

Table 1. General characteristics in this foundries

	HJ site	SY site	HS site
Industrial classification	Manufacture of machine equipment	Steel foundry	Steel foundry
Building area	3,364 m ²	496 m ²	497 m ²
Amount of material	Scrap iron	12 ton/day	6 ton/day
	Moulding sand	1.5 ton/day	5 ton/day
Air pollutants	Emission facility	EIC and HS	EIC and HS
	Prevention facility	Bag filter	Bag filter, AC tower

*EIC : Electric induction furnace, HS : Moulding sand

등으로 처리되어 굴뚝을 통해 배출된다.

2. 시료채취 방법

1) 다단 임팩터

PM의 입경별 시료채취를 위해 다단 임팩터인 Nanosampler(Model 3180, Kanomax, Japan)를 사용하였다. 본 임팩터는 노즐입구로부터 유입된 먼지를 1~4단의 분리단(1단 : $>10 \mu\text{m}$, 2단 : $2.5\sim10 \mu\text{m}$, 3단 : $1.0\sim2.5 \mu\text{m}$, 4단 : $0.5\sim1.0 \mu\text{m}$), 관성필터 카트리지(5단 : $0.1\sim0.5 \mu\text{m}$) 및 back-up 필터($<0.1 \mu\text{m}$)를 통해 분리 포집된다. 따라서, 본 임팩터는 전체 분리단의 농도 즉, 총먼지(Total Suspended Particles, TSP)를 포함한 $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_1/\text{PM}_{0.5}/\text{PM}_{0.1}$ 등으로 입경별 농도 분포 특성을 파악할 수 있다(Eryu et al., 2009; Furuuchi et al., 2010). 또한, 통상적인 임팩터와 달리 입경 $0.1 \mu\text{m}$ 이하의 초미세입자(UFP)를 효율적으로 신속하게 포집할 수 있도록 포집유량은 40 L/min 으로 비교적 고용량으로 설계되어있다(Otani et al., 2007).

한편, 본 연구에서는 임팩터의 분리포집 특성을 고려하여 입경 $1.0 \mu\text{m}$ 이상의 영역을 조대입자(coarse) 그리고 $1.0 \mu\text{m}$ 이하의 영역을 미세입자(fine)로 정의하였다.

2) 시료채취 방법

사업장들은 작업장 내 환기를 위하여 출입구를 열어 둔 채로 작업하기 때문에 공정에서 발생된 상당량의 PM이 외부로 비산 배출되고 있는 실정이다. 따라서 임팩터를 이용한 사업장의 PM 시료채취방법은 비산먼지의 배출농도가 가장 높을 수 있는 출입구의 안쪽(내부) 지점에서 1시간 동안 연속 채취하였다. 한편, 비산배출 농도 산정시 필요한 대조지역(지역배경)의 농도 특성을 파악하기 위해 부산시 사하구의 풍상지점에 위치하고 주변에 인위적 배출원이 거의 없는 을숙도 문화회관(BG 지점)에서 2015년 10월 30일에 24시간 동안 대기 중 시료를 채취하였다.

시료채취에 사용되는 여과지(QR-100, Advantec, Japan)는 시료채취 전후로 24시간 이상 데시게이트에서 항온, 항습한 후 무게 0.01 mg 까지 칭량가능한 전자저울(AT201, METTLER, USA)을 이용하여 여과지 무게차와 흡인공기량을 통해 PM의 질량농도를 산정하였다.

3. 자료분석 방법

1) 사업장 PM 발생량

본 사업장의 PM 발생량(E)을 산정하기 위하여 식(1)에 나타난 바와 같이 US EPA AP-42의 용해(melting), 주물사처리(sand handling), 중자(core), 주입(pouring), 주조(casting), 냉각(cooling) 등 공정별 배출계수(EF)와 각 사업장에서 사용되는 고철 원료량 또는 주물사량(A)을 각각 곱하여 산정하였다(US EPA, 1995).

$$E = EF \times A \quad (1)$$

2) 대수정규분포의 작성

임팩터로 채취된 PM의 분리단별 농도는 분리단의 입경 폭을 대수로 변화시켜 대수정규분포(log-normal distribution)로 작성하였다. 또한, 대수정규분포의 특성은 전체 질량농도의 50% 절단입경인 공기역학적 질량 중앙경(Mass Median Aerodynamic Diameter, MMAD) 및 기하표준편차(geometric standard deviation, σ_g)의 변수로 설명할 수 있다(Suh et al., 2014). 본 연구에서는 엑셀 프로그램(MS Excel)상에서 대수확률 그래프용지를 작성하고 각 분리단의 농도 누적 퍼센트를 통해 선형회귀선의 y 절편 및 기울기를 구하는 최소자승회귀분석(Least-squares linear regression)으로 직선방정식을 긋는 Probit method를 이용하여 MMAD 및 σ_g 를 각각 산정하였다(O'Shaughnessy & Raabe, 2003).

3) 비산먼지의 배출농도

비산먼지는 굴뚝 등 일정한 배출구를 거치지 않고 외부로 비산 배출되는 입자상물질로써 대기환경보전법상 배출허용기준에 해당하는 항목이며, 대기오염 공정시험법에 그 측정법이 기술되어 있다(MoE, 2016). 본 연구에서는 공정시험방법에 준하여 주물사업장에 대한 비산먼지의 배출농도는 식(2)에 나타난 바와 같이 사업장 출입구 지점의 농도를 C_H 로 대조 지역 BG 지점의 농도를 C_B 로 그리고 풍향과 풍속의 보정계수를 1로 가정하여 계산하였으며, 특히 임팩터를 사용하였기에 배출농도를 입경별 특성으로 산정할 수 있다.

$$C = (C_H - C_B) \times W_D \times W_S \quad (2)$$

III. 연구결과

1. PM 발생량

Table 2에 나타난 바와 같이 각 주물사업장의 고철 및 주물사 사용량과 EPA AP-42의 공정별 배출계수를 이용하여 PM 발생량을 산정한 결과, HJ 7.52 톤/년, SY 15.20 톤/년, HS 7.13 톤/년으로 나타났다. 따라서 본 주물사업장은 대기환경보전법상 대기 3종

및 4종으로 중소규모의 배출시설에 해당된다.

2. 입경별 농도특성

Table 3에는 대조지역(BG) 및 3개 주물사업장(HJ, SY, HS)에서 채취된 PM에 대한 분리단별 농도 및 TSP/PM₁₀/PM_{2.5}/PM₁/PM_{0.5}/PM_{0.1} 등 입경별 농도 그리고 총먼지(TSP)에 대한 입경별 농도비의 분석결과를 나타냈다.

Table 2. Discharge amount of particulate matter

Process	Emission factor* (kg/ton)	Dust emissions(kg/day)		
		HJ site	SY site	HS site
Melting(Electric induction)	0.05	0.30	0.60	0.30
Sand grinding/handling	0.27	0.41	1.35	0.81
Core ovens	1.11	6.66	13.32	6.66
Pouring and casting	1.40	8.40	16.80	8.40
Casting cleaning	0.85	5.10	10.20	5.10
Casting cooling	0.70	4.20	8.40	4.20
Sum		25.07	50.67	25.47
Working days per year		300 days	300 days	280 days
Annual dust emissions		7.52 ton/yr	15.20 ton/yr	7.13 ton/yr

*US EPA AP-42

Table 3. PM concentration for local background area(BG) and three foundries

Location	Size fraction(mg/m ³)						
	1(> 10 μm)	2(2.5~10 μm)	3(1.0~2.5 μm)	4(0.5~1.0 μm)	5(0.1~0.5 μm)	back-up(< 0.1 μm)	
BG	0.003	0.007	0.003	0.005	0.004	0.001	
HJ	0.204	0.403	0.156	0.124	0.247	0.089	
SY	0.150	0.333	0.071	0.062	0.046	0.012	
HS	0.242	0.517	0.208	0.112	0.104	0.046	
	PM concentration(mg/m ³)						
	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁	PM _{0.5}	PM _{0.1}	Coarse
BG	0.023	0.020	0.012	0.009	0.004	0.001	0.014
HJ	1.222	1.018	0.615	0.460	0.336	0.089	0.763
SY	0.675	0.525	0.192	0.121	0.058	0.012	0.554
HS	1.230	0.988	0.471	0.262	0.150	0.046	0.967
	Ratio(-)						
	PM ₁₀ /TSP	PM _{2.5} /TSP	PM ₁ /TSP	PM _{0.5} /TSP	PM _{0.1} /TSP	Coarse/TSP	
BG	0.86	0.54	0.40	0.19	0.03	0.60	
HJ	0.83	0.50	0.38	0.27	0.07	0.62	
SY	0.78	0.28	0.18	0.09	0.02	0.82	
HS	0.80	0.38	0.21	0.12	0.04	0.79	

분리단별 농도는 BG의 경우 2단(입경 2.5~10 μm) 이 0.007 mg/m^3 로 가장 높았고, 입경 0.1 μm 이하 영역(back-up)이 0.001 mg/m^3 로 가장 낮게 나타났다. 입경별 농도는 TSP 0.023, PM_{10} 0.020, $\text{PM}_{2.5}$ 0.12, PM_1 0.009, $\text{PM}_{0.5}$ 0.004, $\text{PM}_{0.1}$ 0.001 mg/m^3 등으로 나타났다.

주물사업장의 경우 전반적으로 입경 2.5~10 μm 영역이 가장 높았고, 입경 0.1 μm 이하 영역이 가장 낮은 농도를 보였다. 입경별 농도는 TSP의 경우 HJ 1.222 mg/m^3 , SY 0.675 mg/m^3 , HS 1.230 mg/m^3 , PM_{10} 의 경우 HJ 1.018 mg/m^3 , SY 0.525 mg/m^3 , HS 0.988 mg/m^3 , $\text{PM}_{2.5}$ 의 경우 HJ 0.615 mg/m^3 , SY 0.192 mg/m^3 , HS 0.471 mg/m^3 등으로 나타났다.

$\text{PM}_{10}/\text{TSP}$ 농도비는 HJ 0.83, SY 0.78, HS 0.80, $\text{PM}_{2.5}/\text{TSP}$ 의 경우 HJ 0.50, SY 0.28, HS 0.38, PM_1/TSP 의 경우 HJ 0.38, SY 0.18, HS 0.21 등으로 나타났다. 또한, 사업장별 입경 1 μm 이상의 조대입자 영역(coarse)의 농도비는 HJ 0.62, SY 0.82, HS 0.79로 미세입자 영역(fine= PM_1) 보다 상대적으로 더 높은 것으로 나타났다.

3. 대수정규분포 특성

Figure 1에는 대조지역(BG) 및 3개 주물사업장(HJ, SY, HS)에서 채취된 PM 질량농도에 대한 대수정규 분포($\Delta M/\Delta \text{Log}(D_p)$)와 중앙경(MMAD) 및 기하표준 편차(σ_g)를 나타냈다.

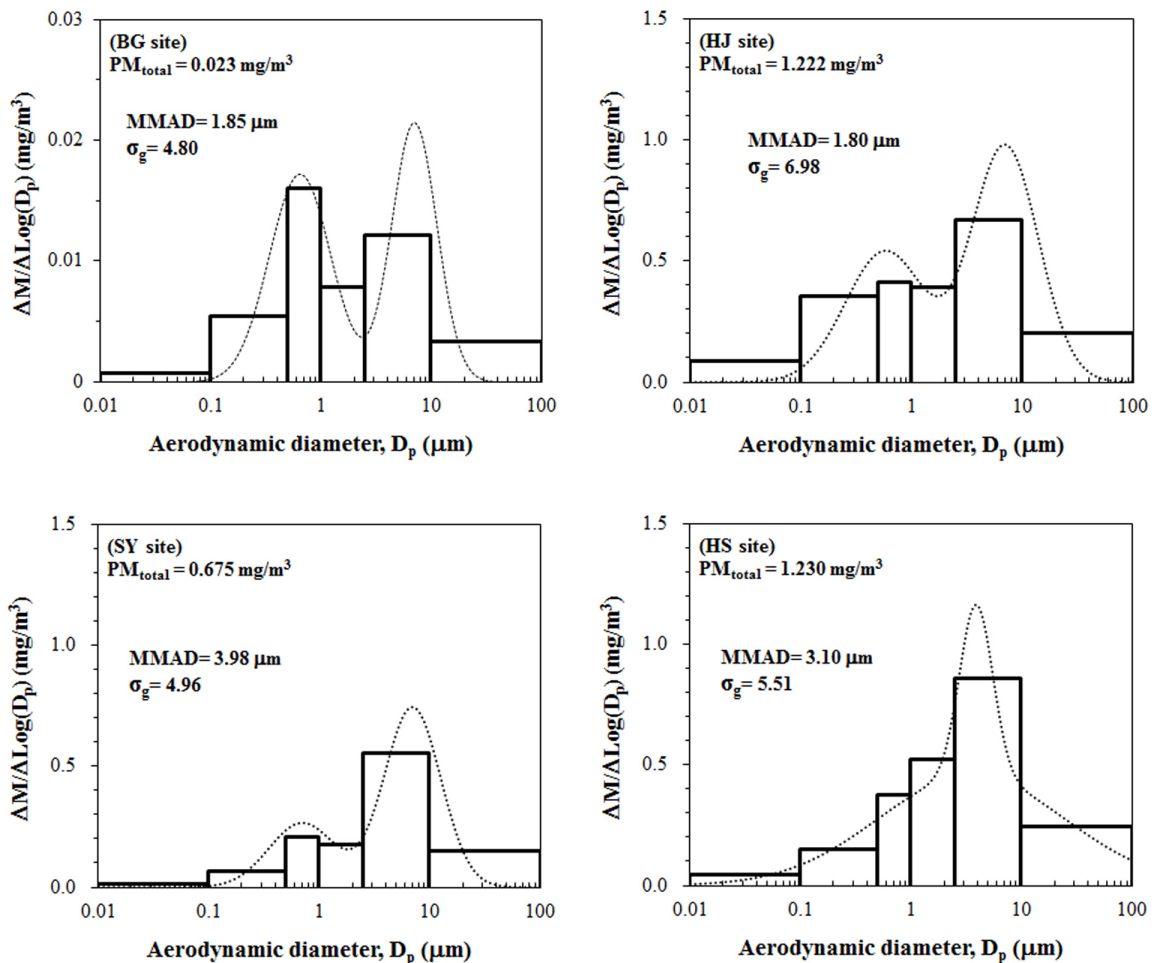


Figure 1. Characteristics of mass size distributions of particulate matter in local background area(BG) and three foundries

입경분포는 BG지점의 경우 입경 약 $1\ \mu\text{m}$ 전후로 미세입자 및 조대입자 영역의 양측에 peak를 가진 이산형(bimodal) 분포특성을 보였으며, MMAD과 σ_g 값은 $1.85\ \mu\text{m}$ 및 4.80 로 나타났다.

주물사업장의 경우 공통적으로 조대입자 영역에서 큰 농도 peak를 가진 특성과 더불어 HJ 및 SY의 경우 미세입자 영역에서도 낮은 농도 peak를 가진 이산형 분포 그리고 HS의 경우 조대입자 영역에 치우친 일산형 분포 등 사업장별로 다소 차이를 보였다. MMAD과 σ_g 값은 HJ $1.80\ \mu\text{m}$ 및 6.98 , SY $3.98\ \mu\text{m}$ 및 4.96 , HS $3.10\ \mu\text{m}$ 및 5.51 로 각각 나타났다.

4. 비산먼지의 배출농도

비산먼지는 대기환경보전법상 배출허용기준 항목이며, 사업장별 배출허용농도는 시멘트 제조시설 $0.3\ \text{mg}/\text{m}^3$ 및 그 밖의 배출시설에서 $0.5\ \text{mg}/\text{m}^3$ 로 규제하고 있으며, 주물사업장에 대한 비산먼지의 배출농도에 대한 조사는 거의 찾아 볼 수 없다. Figure 2에는 임팩터로 채취된 각 사업장 출입구 지점 및 대조지역 BG 지점의 농도 차이를 통해 산정된 비산먼지의 배출농도를 입경별로 나타냈다.

주물사업장의 비산먼지 배출농도는 입경별로 TSP의 경우 HJ $1.20\ \text{mg}/\text{m}^3$, SY $0.65\ \text{mg}/\text{m}^3$, HS $1.21\ \text{mg}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 또한, PM_{10} 의 경우 HJ $1.00\ \text{mg}/\text{m}^3$, SY $0.50\ \text{mg}/\text{m}^3$, HS $0.97\ \text{mg}/\text{m}^3$, $\text{PM}_{2.5}$ 의 경우 HJ $0.60\ \text{mg}/\text{m}^3$, SY $0.18\ \text{mg}/\text{m}^3$, HS $0.46\ \text{mg}/\text{m}^3$, $\text{PM}_{1.0}$ 의 경우 HJ $0.45\ \text{mg}/\text{m}^3$, SY $0.11\ \text{mg}/\text{m}^3$, HS $0.25\ \text{mg}/\text{m}^3$, $\text{PM}_{0.5}$ 의 경우 HJ $0.33\ \text{mg}/\text{m}^3$, SY $0.05\ \text{mg}/\text{m}^3$,

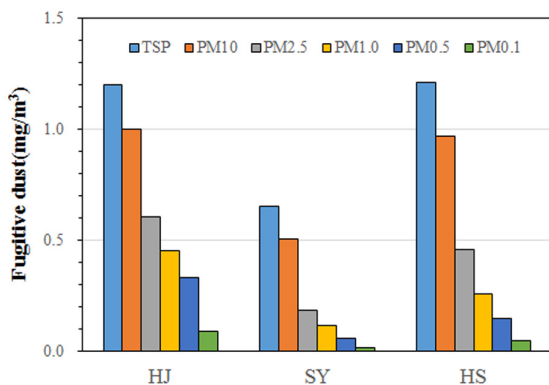


Figure 2. Emission concentrations of fugitive dust in three foundries

HS $0.15\ \text{mg}/\text{m}^3$ 그리고 $\text{PM}_{0.1}$ 의 경우 HJ $0.09\ \text{mg}/\text{m}^3$, SY $0.01\ \text{mg}/\text{m}^3$, HS $0.05\ \text{mg}/\text{m}^3$ 등으로 각각 나타났다.

IV. 고 찰

본 주물사업장들은 PM 배출량 기준으로 중소규모에 해당하며, 입경별 PM 농도는 전반적으로 입경 $2.5\sim 10\ \mu\text{m}$ 영역에서 가장 높았으며, 평균농도는 TSP $1.042\ \text{mg}/\text{m}^3$, PM_{10} $0.844\ \text{mg}/\text{m}^3$, $\text{PM}_{2.5}$ $0.426\ \text{mg}/\text{m}^3$, PM_1 $0.281\ \text{mg}/\text{m}^3$, $\text{PM}_{0.5}$ $0.181\ \text{mg}/\text{m}^3$, $\text{PM}_{0.1}$ $0.049\ \text{mg}/\text{m}^3$ 등으로 나타났다. TSP 농도 중 입경별 기여도는 평균적으로 PM_{10} 0.80 , $\text{PM}_{2.5}$ 0.39 , PM_1 0.26 , $\text{PM}_{0.5}$ 0.16 , $\text{PM}_{0.1}$ 0.04 로 나타났으며, 특히, 입경 $1\ \mu\text{m}$ 이상의 조대입자(coarse) 영역이 0.76 으로 미세입자(fine= PM_1) 영역보다 더 높게 나타났다. 한편, 주물사업장의 PM농도수준은 TSP의 경우 Phee et al. (1997) $2.94\ \text{mg}/\text{m}^3$ 및 Liu et al.(2010) $1.64\ \text{mg}/\text{m}^3$ 그리고 호흡성분진의 경우 Park et al.(2003) $1.213\ \text{mg}/\text{m}^3$ 및 Andersson et al.(2009) $0.58\ \text{mg}/\text{m}^3$ 등으로 보고되고 있다.

입경분포의 특성은 대조지역(BG)의 경우 전형적인 대기 중 입자상물질의 분포특성인 이산형 입경분포로 나타났으며(Whitby, 1978), MMAD과 σ_g 값은 비교적 대기오염도가 심하지 않는 지역과 유사한 경향을 보였다(Lee et al., 2003; Park et al., 2015). 주물사업장의 경우 이산형 또는 일산형으로 사업장별로 다소 상이하였으나, 공통적으로 조대입자 영역에서 큰 농도 peak를 나타내고 있었다. 한편, 주물공장의 경우 조대입자 영역에서 큰 농도 peak를 나타내면서 용해, 조형, 해체작업에서는 이산형 그리고 마무리 공정에서는 일산형 분포를 한다는 보고가 있다(Phee et al., 1997). 또한, 호흡성분진의 입경분포는 입경 $0.4\ \mu\text{m}$ 및 $5\ \mu\text{m}$ 부근 등에서 각각 peak를 가진 이산형 분포의 특성을 보이며, 작업공정 중 분사가공(abrasive blasting)시 조대입자 영역 그리고 용융(melt) 및 주물주입(pour) 과정에서 UFP입자를 포함한 미세입자 영역의 발생농도가 높은 것으로 보고되고 있다(Douglas et al., 2008). 통상 PM은 연소과정에서 미세입자 그리고 파쇄, 연마 등 물리적 처리과정에서 조대입자가 주로 발생하는 특성을 보이므로(Willeke & Whitby, 1975), 주물업종의 경우 용융, 주

조 등에서 미세입자와 더불어 탈형, 후처리 등에서 조대입자의 발생 특성이 고려된다. 본 사업장들의 경우 생산 공정이 거의 동일하고 모든 작업이 동일 작업장에서 진행되는 특성상 PM의 발생과 입경분포의 특성은 모두 유사할 것으로 추정된다. 그러나 본 연구에서 입경분포의 차이는 공정별 후드를 통한 국소 배기의 효율성 등이 사업장별로 상이하기 때문에 나타난 결과로 판단된다.

비산먼지의 평균 배출농도는 입경별로 TSP 1.02 mg/m³, PM₁₀ 0.82 mg/m³, PM_{2.5} 0.41 mg/m³, PM₁ 0.27 mg/m³, PM_{0.5} 0.18 mg/m³ 그리고 PM_{0.1} 0.05 mg/m³ 등으로 각각 나타났다. 특히, TSP 농도의 경우 모든 사업장에서 비산먼지의 배출허용농도(0.5 mg/m³)를 초과하는 수준으로 나타났다. 또한, 대기오염공정시험법상 대조위치를 선정할 수 없는 경우 대조위치(C_B)의 농도를 0.15 mg/m³로 가정하는데, 이를 적용할 경우에도 평균 0.89 mg/m³으로 기준을 초과하는 것으로 나타났다. 사업장에서 비산배출되는 PM은 주변지역에 영향을 줄 수 있으며, 주물산업단지의 주변지역 대기질 조사사례에서 PM₁₀ 121~146 µg/m³ 및 PM_{2.5} 59~87 µg/m³ 등으로 주물공장으로 인해 인근지역에 대기환경기준을 초과하는 수준의 영향을 미친다는 보고가 있다(Sathe et al., 2015).

V. 결 론

본 연구에서는 중소규모의 3개 주물사업장을 대상으로 다단 임팩터를 사용하여 PM 농도 및 비산먼지의 배출농도를 입경별 특성으로 파악한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 입경별 평균농도는 TSP 1.042 mg/m³, PM₁₀ 0.844 mg/m³, PM_{2.5} 0.426 mg/m³, PM₁ 0.281 mg/m³, PM_{0.5} 0.181 mg/m³, PM_{0.1} 0.049 mg/m³ 등으로 나타났다. 특히, 입경 1 µm 기준으로 조대입자(coarse) 영역이 0.76으로 미세입자 영역보다 높게 나타났다.

2) 입경분포 특성은 이산형 또는 일산형 분포 등 사업장별 다소 차이를 보였으나, 공통적으로 미세입자 영역보다 조대입자 영역에서 더 큰 농도 peak가 나타났다. 또한, MMAD은 1.80~3.98 µm, σ_g 값은 4.96~6.98로 넓은 범위의 입경분포 특성이 나타났다.

3) 비산먼지의 배출농도는 입경별로 TSP 1.02

mg/m³, PM₁₀ 0.82 mg/m³, PM_{2.5} 0.41 mg/m³, PM₁ 0.27 mg/m³, PM_{0.5} 0.18 mg/m³, PM_{0.1} 0.05 mg/m³ 등으로 나타났다. 특히, TSP 기준으로 모든 사업장에서 비산먼지의 배출허용농도(0.5 mg/m³)를 초과하였다.

한편, 본 연구결과에서는 PM에 의한 직접적인 근로자 노출에 대해 언급치 않으나, 인근 근로자들까지도 포함된 넓은 의미의 산업보건측면에서 근로자들의 건강피해를 예방하고 향후 효과적인 주물사업장의 PM 발생억제와 비산배출 저감 등을 위한 종합적인 관리방안을 마련하기 위한 기초자료로 활용할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 경남과학기술대학교 연구비지원에 의하여 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

References

- Scholz RC, Slavin TJ. Control of silica exposure in foundries. American Foundry Society; 2007. p. 1-3
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH). 2007 TLVs and BEIs based on the documentation of the threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices. Cincinnati, ACGIH, 2007
- Andersson L, Bryngelsson IL, Ohlson CG, Nayström P, Lilja BG et al. Quartz and Dust Exposure in Swedish Iron Foundries, Journal of Occupational and Environmental Hygiene. 2009;6:9-18
- Bae HJ, Nam MR, Lee SM, Jung YJ, Shon BH et al. Exposure Assessments of Chemical Risk Factors to Airborne Contaminants in Foundry Process. Journal of Environmental Science International 2015;24(5): 699-708
- Delfino RJ, Sioutas C, Malik S. Potential Role of Ultrafine particles in Associations between Airborne Particle Mass and Cardiovascular Health, Environ Health Perspect 2005;113(8):934-946
- Donaldson K, Li XY, MacNee W. Ultrafine(nanometer) particle mediated lung injury. J Aerosol Sci 1998; 29(5/6):553-560
- Douglas EE, William AH, Thomas JS, Thomas MP. Ultrafine and Respirable Particles in an Automotive

- Grey Iron Foundry. *Ann Occup Hyg* 2008;52(1):9-21
- Eryu K, Seto T, Mizukami Y, Nagura M, Furuuchi M et al. Design of inertial filter for classification of PM_{0.1}. *Erozory Kenkyu* 2009;24:24-29
- Furuuchi M, Eryu K, Nagura M, Hata M, Kato T et al. Development and performance evaluation of air sampler with inertial filter for Nanoparticle sampling. *Aerosol and Air Quality Research* 2010;10:185-192
- Kim TH, Ha HC, Jeong CH, Seo JY, Piao CX et al. The Status of Maintenance of Exhaust Fans and Bag filters in Melting Processes in a foundry industrial complex. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2007;17(3):212-223
- Korea Occupation Safety & Health Agency(KOSHA), Study of Reformation about Working condition Foundry Postprocess, Report, 2000-69-318; 2000. p.1
- Lee KH, Yang HJ, Hu CG. Size distribution of ambient aerosol measured at a coastal site in Jeju island, *Journal of the Environmental Sciences* 2003;12(10):1043-1054
- Liu HH, Yang HH, Chou CD, Lin MH, Chen HK. Risk assessment of gaseous/particulate phase PAH exposure in foundry industry. *Journal of Hazardous Materials* 2010;181:105-111
- Ministry of Environment(MoE). PRTR report of chemical substance emissions. 2015. p.26
- Ministry of Environment(MoE). Standard methods for the Measurements of air pollution. ES01302. 2016
- O'Shaughnessy PT, Raabe OG. A Comparison of Cascade Impactor Data Reduction Methods. *Aerosol Sci Technol* 2003;37:187-200
- Otani Y, Eryu K, Furuuchi M, Tajima N, Tekasakul P. Inertial classification of Nanoparticles with fibrous filters. *Aerosol and Air Quality Research* 2007;7:343-352
- Park JH, Jang MJ, Kim HG. Mass Size Distribution of Atmospheric Aerosol Particles with Nanosampler Cascade Impactor in Jinju City. *Journal of Environmental Science International* 2015;24(5):679-687
- Park YS, Roh YM, Kim HW, Han JG, Ahn YS et al. A Study of Respirable Dust Concentrations and Quartz Contents in Foundry. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2003;13(1):90-97
- Phee YG, Roh YM, Lee KM, Kim HA, Kim YW et al. Analysis of Quartz Content and Particle Size Distribution of Airborne Dust from Selected Foundry Operations. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 1997;7(2):196-208
- Sathe AJ, Desai VGM, Chate VR, Hosamani S. Air Pollution Monitoring & Control at Foundry Clusters in Belgaum-A Case Study. *Civil and Environmental Research* 2015;7(5):63-69
- Suh JM, Bin W, Jang SH, Park JH, Choi KC. Characteristics of Size-segregated Mass Concentrations of Indoor Aerosol Particles in University Buildings. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2014;24(4):453-461
- US Environmental Protection Agency(US EPA). Compilation of Air Pollutant Emission Factors. AP-42 5th ed. 1995
- Whitby KT. The physical characteristics of sulfur aerosols. *Atmos Environ* 1978;12:135-159
- Willeke K, Whitby KT. Atmospheric Aerosols: Size Distribution Interpretation. *J Air Poll Cont Assoc* 1975;25:529-534