Journal of Environmental Science International
24(5); 699~708; May 2015

pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
http://dx.doi.org/10.5322/JESI.2015.24.5.699

ORIGINAL ARTICLE

주물사업장 내 공기중 화학적 유해인자 노출 평가

배혜정 · 남미란 · 이상만[1] · 정유진[2] · 손병현[3] · 피영규[4] · 정종현[4]*

대구한의대학교 산업보건연구소, [1](주)IESH 솔루션, [2]씨이테크(주) 연구개발센터, [3]한서대학교 환경공학과,
[4]대구한의대학교 보건학부

Exposure Assessments of Chemical Risk Factors to Airborne Contaminants in Foundry Process

Hye-Jeong Bae, Mi-Ran Nam, Sang-Man Lee[1], Yu-Jin Jung[2], Byung-Hyun Shon[3], Young-Gyu Phee[4], Jong-Hyeon Jung[4]*

Institute for Industrial Health, Daegu Haany University, Gyeongsan 712-715, Korea
[1]IESH-Solution CO. Ltd, Gumi 730-904, Korea
[2]C.E.Tech Co. Ltd., R&D Center, Suwon 440-855, Korea
[3]Dept of Environmental Engineering, Hanseo University, Seosan 356-706, Korea
[4]Faculty of Health Science, Daegu Haany University, Gyeongsan 712-715, Korea

Abstract

This study was performed to identify the state of the exposure and characteristics of pollutants by each process at 4 casting sites located in Gyeongsang-do from April to November 2013. The concentrations of methanol, crystallized silica glass, formaldehyde and phenol were analyzed by different process - casting process, molding process, core process, and shakeout & finishing process. The highest concentration of methanol was found in casting and molding process, whereas the highest concentration of crystalline quartz(Silica) was observed in core process. The most oxidized steel dusts and the highest concentration of fume were found in shakeout & finishing process. As a result of this study, those labors working at the casting site were found to be constantly exposed to various forms of hazardous chemicals; therefore, it is considered that this is the time to manage and plan how to reduce them. In addition, it is required to thoroughly manage the local exhauster, and improve the process and working environment to reduce various forms of hazardous chemicals.

Key words : Foundry process, Hazards contaminants, Health risk factors, Exposure characteristics

1. 서 론

주물 사업장은 각종 산업활동에서 발생되는 다양한 형태의 철재류를 이용하여 제품을 가공 및 제조하는 업종으로 분류되며 산업적으로는 가치가 있는 반면 세부 생산공정에서는 분진 및 악취 등과 같은 오염물질을 발생시켜 3D(dirty, difficult, dangerous) 업종으로 인식되고 있으며(Kang, 2007; Park, 2007), 특히 주물업종 및 유사 관련사업장은 생산공정 전반에서 다량의 금속성 분진, 유해가스 및 다양한 형태의 유해오염물질이 발생

Received 12 March, 2015; **Revised** 18 May, 2015;
Accepted 18 May, 2015
***Corresponding author** : Jong-Hyeon Jung, Faculty of Health Science, Daegu Hanny University, Gyeongbuk 712-715, Korea
Phone: +82-53-819-1418
E-mail: airgas@dhu.ac.kr

ⓒ The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
ⓒ 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.

되고 있다(Jung et al., 2013; Jung et al., 2013a, 2013b).

주물공정은 선철 또는 고철을 용해시켜 모래입자, 점결제, 수분, 첨가제를 섞은 주물사로 조형 틀에 용탕을 주입시키고, 주물사를 제거하는 탈사공정을 거쳐 제품을 가공 처리하는 마무리 공정으로 이루어져 있다. 특히 주물업종의 경우 산업재해에 취약한 영세사업장이 많고, 일부 사업장의 경우 산업안전 및 보건관리의 상태가 부적합한 조건에서 오랜 기간 운영되고 있다. 특히 주물사업장 현장공정에서는 유리규산, 호흡성 분진, 금속성 흄, 유기용제, 고열, 진동, 일산화탄소(CO), 전리방사선, 독성 금속, 방향족 탄화수소, PAHs, 결정형 실리카, 포름알데히드 등 다양한 형태의 유해인자가 배출되는 것으로 보고되었다(Burgess, 1995; Chen et al., 1992; Cooper et al., 1993; EPA, 1999; Gomes et al., 2001; Guenther et al., 1995; MoEL, 2012; NIOSH, 2003; Jung et al., 2013; Jung et al. 2013a, 2013b).

특히 주물사업장에서 가장 많이 발생하는 주물분진 중 호흡성분진(respirable particulate)은 규폐증, 폐의 섬유화 증상과 함께 기도 협착 및 폐암 등을 유발할 수 있다(Perrault et al. 1992). 이와 함께 휘발성 유기화합물은 증기압이 높아 쉽게 공기 중으로 휘발되며, 물질에 따라 발암성이나 돌연변이성 같은 영향이 나타나며 낮은 농도에서도 장기간 노출 시 감각기관의 자극이나 천식 등과 같은 인체 건강피해를 일으키는 것으로 알려져 있다(Guenther et al). 이러한 다양한 유해오염물질이 발생함에도 불구하고 주물공정에서 발생하는 유해화학물질 등에 대한 노출 평가 관련연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 그 동안의 선행연구는 주로 유리규산 등과 같은 입자상물질 등의 노출에 관한 연구가 중점적으로 이루어졌고, 기타 관련 연구는 주기적인 작업환경 측정을 통한 공정관리 일환으로서의 역할일 뿐 주물업종에 대한 체계적이고 사전적인 작업환경 관리시스템에 대한 연구는 부족한 실정이다(ACGIH, 2001; Alpaugh, 1988; Jung et al. 2013; Jung et al. 2013a, 2013b). 또한, 국내·외적으로도 대부분의 관련분야 연구가 주물업종 공정에서 발생하는 총 분진, 중금속, 휘발성 유기화합물 등에 대한 작업환경 및 개인 노출수준에 대한 측정 및 평가에 관한 관련연구가 대부분이다(ACGIH, 2001; Alpaugh, 1988; Jung et al., 2013; Jung et al., 2013a, 2013b).

따라서 이 연구에서는 중소규모의 주물업종에 대한 맞춤형 작업환경 관리기준을 개발 및 최적화 공정설계 기준을 마련하기 위한 기초조사의 일환으로 수행되었으며, 특히 이 연구에서는 주물공정에서 발생하는 다양한 형태의 유해화학물질 및 기타 오염물질의 특성을 조사하였다. 또한, 각종 주물사업장 공정별 발생 유해화학물질의 노출실태를 파악함은 물론 핵심 작업공정인 탈사 및 마무리(G/R) 공정에서의 작업장 공기 중 분진의 특성을 파악하였다. 향후 관련연구는 동종업종 근로자들의 건강보호에 기여함은 물론 해당분야의 적절한 관리방안을 마련하기 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 연구 방법

2.1. 연구대상 및 공정

이 연구는 2013년 4월에서 11월까지 경상도 지역에 위치한 주물사업장 4곳을 선정하여 수행되었으며. 각각의 공정별 유해오염물질 노출특성 및 작업환경 위해인자를 파악하였다. 이 연구에서는 주조공정, 조형공정, 중자공정 및 마무리 공정으로 구분하여 현장조사를 수행하였다.

주조공정은 전체 주형제작의 계획단계부터 용해성이 있는 금속을 고온으로 용해하여 준비된 형틀에 주입하여 주물을 만드는 공정이다. 주물사가 서로 엉겨 붙어 있도록 하기 위하여 접착성을 가지는 고분자 물질인 퓨란(furan)류를 주물사에 섞게 되고, 녹은 주철이 목형으로 들어가게 되는데 주입을 마친 주형에서 고열이 발생하게 된다. 주조공정에서는 점결제의 열분해로 인하여 일산화탄소(CO), 알콜류, 포름알데히드(HCHO) 등이 발생된다(Park et al., 2006; Park et al., 2005; Perrault et al., 1992; Phee et al., 1997). 또한, 조형공정은 쇳물을 투입하기 위한 틀을 만드는 전체적인 작업으로 자동 및 반자동 조형기의 혼합 및 조립작업 시 압출공기에 의한 소음과 주물사 분진이 발생하며, 점결제로 사용되는 전분당밀 등의 열분해에 의해 일산화탄소(CO)가 발생된다. 또한 아민계열 촉매의 휘발로 인해 아민가스가 발생되며, 도형제 작업 시 메탄올 등의 유기용제가 발생된다. 다음 공정으로 주물의 공동부와 구멍 등을 만들고자 할 때에는 이에 해당되는 부분에 용탕이 들어가지 않도록 하기

위해서 주형 속에 삽입되는 사형을 중자라고 한다. 중자 공정에서는 주입작업 시 휘발성 유기화합물과 화학사에 첨가되어 있는 페놀수지의 열분해 과정에서 생성된 페놀 화합물이 대기 중으로 배출된다. 특히 불완전 연소 시 생성되는 페놀류에서는 다양한 형태의 악취가 발생한다. 또한, 마무리 공정은 완성된 주물 생산품에 대해 사상 및 연마, 가우징, 절단, 용접 등의 작업을 통해 제품을 최종적으로 다듬는 공정이며, 제품의 외부표면을 편평하게 하고 제품 조형과정 및 찌꺼기 부분을 제거하는 공정이다. 주물에 붙어있는 모래를 두드리거나, 연마로 떼어낼 때 많은 양의 분진이 발생되며, 충격 발생기기를 이용하여 모래를 제거하는 작업은 소음을 발생하게 된다 (ACGIH, 2001; Alpaugh, 1988; Burgess, 1995; Chen et al., 1992; Cooper et al., 1993; EPA, 1999; Gomes et al., 2001; Guenther et al., 1995; MoEL, 2012; NIOSH, 2003). 또한 마무리 그라인딩 공정에서 용접 흄이 발생한다.

2.2. 공기 중 화학물질 측정 및 분석방법

이 연구에서는 주물공정에서 발생하는 다양한 형태의 유해화학물질을 조사하기 위하여 공기 중 화학물질과 특히 호흡성질환에 영향을 미치는 위해인자들을 중심으로 측정 및 분석 작업을 수행하였다. 이를 위하여 대상항목은 메탄올(MeOH), 포름알데히드(HCHO), 용접 흄, 호흡성 분진 및 결정형 유리규산(Crystalline quartz, Silica) 등을 선정하였다. 또한, 주물사업장의 공정별 발생되는 분진의 특성과 분진에 함유된 원소의 정성특성을 확인하기 위하여 SEM(MIRA Ⅱ LMH CS02, TESCAN, Czech Republic)/EDS(Analyzer model 550i, TESCAN, USA)를 이용하여 물질시료 성분분석 작업을 수행하였다.

2.2.1. 메탄올(MeOH)

주물공정에서 지속적으로 검출되는 메탄올을 대상물질로 선정하였다. 메탄올의 노출평가를 위해 실리카겔관(226-51, SKC, USA)을 사용하였으며, 페놀은 실리카겔관(226-95, SKC, USA)을 사용하였으며, 가스크로마토그래피(Clarus 680, Perkinelmer, USA)를 사용하여 노출농도를 평가하였다.

2.2.2. 포름알데히드(HCHO)

포름알데히드의 노출수준 평가를 위해 EPA TO-11A 및 NIOSH 2016 방법(EPA, 1999; NIOSH, 2003)을 참고하여 2,4-DNPH가 코팅된 실리카겔관을 개인시료채취기(226-119, SKC, USA)에 연결하여 1 ℓ/min의 유량으로 6시간 시료를 채취하였으며, HPLC(Ultimate3000, Thermo, USA)를 이용하여 시료를 분석하였다.

2.2.3. 용접 흄

용접 흄 모니터링을 하기 위하여 시료포집은 Cellulose ester membrane 여과지(37 ㎜, 0.8 ㎛ pore size)를 이용하였으며, 3-piece cassette에 고정시킨 후 개인용 시료포집 펌프에 연결하여 약 2 ℓ/min의 유속으로 360～420 분간 개인 및 공기 중 시료를 채취하였다. 포집된 시료는 포집전과 동일한 방법으로 온도·습도가 조절되는 데시게이터를 이용하여 건조시킨 후 계량하였다. 용접 흄 농도는 시료포집 전·후의 여과지 중량차를 확인하였으며, 전자저울(Sartorius CP244S, Germany)을 사용하여 중량분석법에 의해 농도를 산출하였다. 또한, 용접 흄 중 금속분석은 불꽃 원자흡광광도계(AA 240, Varian, USA)를 이용하여 분석하였고, 현장의 공시료를 이용하여 분석농도를 보정하였다.

2.2.4. 호흡성 분진 및 결정형 유리규산

호흡성분진은 NIOSH 0600 공정시험법에 따라 측정하였으며, 결정형 유리규산(Crystalline quartz, Silica)의 정량분석을 위해 미국국립산업안전보건연구원(National Institute of Occupational Safety & Health, NIOSH)의 공정시험법 7602에 따라 공시료와 함께 FTIR(Cary 640, Agilent, USA)로 분석하여 측정된 흡광도를 표준분말을 이용한 검량식에 대입하여 검출량을 계산하였다.

2.2.5. 물질시료 성분분석

주물사업장의 공정별 발생되는 각종 분진의 특성과 분진에 함유된 원소의 정성을 확인해 보고자 작업장 기중에 분진을 여과포집법으로 약 2 ℓ/min한 샘플을 전처리 한 후 SEM(MIRA Ⅱ LMH CS02, TESCAN, Czech Republic)/EDS(Analyzer model 550i, TESCAN, USA)를 활용하여 분석하였다.

2.3. 자료의 분석

통계분석은 version 20.0 SPSS Statistics 프로그램을 이용하였으며, 채취한 시료의 농도가 검출한계 미만으로 분석된 결과는 자료처리를 위해 각각 검출한계의 1/2로

치환하여 분석하였다. Shapiro-wilk test를 통해 자료의 정규성 검정을 실시하였으며, 공정과 화학물질간의 평균 비교는 kruskal wallis test를 이용하였다. 통계적 유의수준은 $p<0.05$로 하였다.

3. 연구결과

3.1. 각 공정별 유해인자별 노출 농도 및 위해인자

3.1.1. 메탄올(MeOH) 노출농도

Table 1에서는 주물공정의 조업과정에서 발생하는 메탄올의 노출 농도를 측정 및 분석한 결과를 나타내었다. 주조공정, 조형공정, 중자공정 등 세부작업 공정별로 구분하여 나타낸 메탄올의 기하평균 농도값은 주조공정에서 4.5097 ppm, 조형공정에서 0.1357 ppm, 중자공정에서 0.0010 ppm으로 확인되었다. 주조공정에서 확인된 메탄올의 농도값이 높게 나타났으며, 이는 통계적으로 유의한 차이를 나타내었다($p<0.05$).

3.1.2. 결정형 유리규산 노출 농도

Table 2에서는 주물공정의 조업과정에서 발생하는 결정형 유리규산(Crystalline quartz, Silica)의 노출 농도를 측정 및 분석한 결과를 나타내었다. 주조공정, 조형공정, 중자공정, 마무리공정 등 세부작업 공정별로 구분하여 나타낸 결정형 유리규산(Crystalline quartz, Silica)의 농도는 주물 사업장 내 호흡성분진 중 결정형 유리규산(Crystalline quartz, Silica) 농도의 누적분포도를 산출한 결과 Fig. 1과 같이 각 대수 값들이 선형을 보이면서 대수정규분포를 나타내었다. Fig. 2에서는 총 66개의 측정시료별 석영농도를 자세히 구분하여 그림으로 나타내었다. 주물 작업 공정별 결정형 유리규산(Crystalline quartz, Silica)의 기하평균 농도는 주조공정 0.0018 ㎎/㎥, 조형공정 0.0047 ㎎/㎥, 중자공정 0.0056 ㎎/㎥, 마무리공정 0.0052 ㎎/㎥으로 나타났으며, Table 2에서 확인한 바와 같이 그 차이에 대한 통계적 유의성은 없는 것으로 나타났다.

3.2. 작업공정별 유해인자 노출 농도 및 위해인자

3.2.1. 주조공정의 유해인자별 노출 농도

Table 3에서는 주조공정에서 취급 및 발생하고 있는 유해인자별 기하평균 농도를 확인하였다. 연구결과 결정형 유리규산(Crystalline quartz, 노출기준 0.05 ㎎/㎥)

Table 1. Methanol concentration by operation in foundry process

(Unit : ppm)

Classification	N*	GM**(GSD†)	Mean±S.D.‡	Min	Max	p-value
Casting process	6	4.5097(64.3002)	24.4095±23.1216	0.0010	67.2796	
Molding process	14	0.1357(54.7335)	3.5945±6.8085	0.0010	24.4264	0.004
Core process	6	0.0010(1)	0.0010±0	0.0010	0.0010	

* N : Number of samples ** GM : Geometric Mean
† GSD : Geometric Standard Deviation ‡ S.D. : Standard Deviation

Table 2. Crystalline quartz concentration of the respirable dust by operation in foundry process

(Unit : ㎎/㎥)

Classification	N*	GM**(GSD†)	Mean±S.D.‡	Min	Max	p-value
Casting process	2	0.0018(1.7276)	0.0019±0.0099	0.0012	0.0026	
Molding process	39	0.0047(3.0787)	0.0080±0.0089	0.0004	0.0505	0.445
Core process	6	0.0056(2.6642)	0.0085±0.0082	0.0022	0.0209	
Shakeout & finishing process	19	0.0052(2.5888)	0.0078±0.0079	0.0006	0.0297	

* N : Number of samples ** GM : Geometric Mean
† GSD : Geometric Standard Deviation ‡ S.D. : Standard Deviation

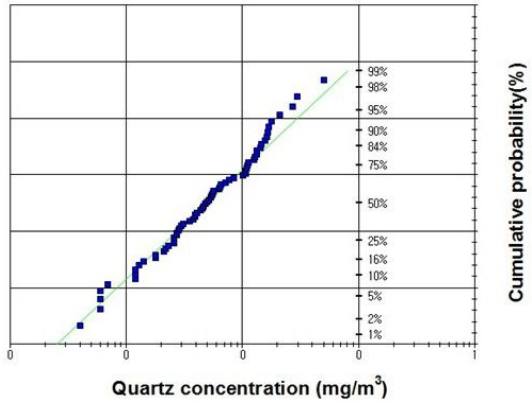

Fig. 1. Cumulative distribution of crystalline quartz concentration in respirable dust.

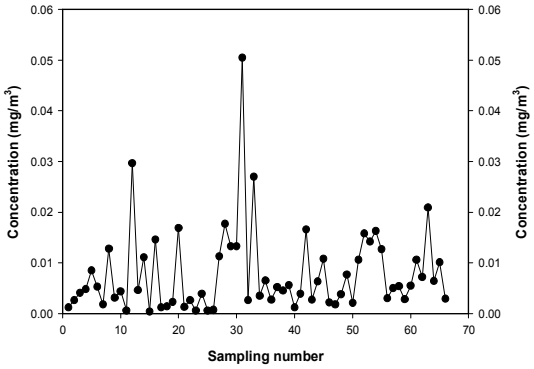

Fig. 2. Effect of sampling number on crystalline quartz concentration in respirable dust.

농도는 0.0018 ㎎/㎥, 포름알데히드(노출기준 0.5 ppm) 농도는 0.00001 ppm, 메탄올(노출기준 200 ppm) 농도는 4.5097 ppm으로 확인되었다. 주조공정에서 각 유해물질 인자별로 노출기준을 적용하여 평균 농도값을 비교한 결과, 메탄올의 농도가 높게 나타났으며, 이는 통계적으로 유의한 차이를 나타내었다($p<0.05$).

3.2.2. 조형공정의 유해인자별 노출 농도

Table 4에서는 조형공정에서 취급 및 발생하고 있는 유해인자별 기하평균 농도를 확인하였다. 유해인자별 기하평균 농도를 확인한 결과, 결정형 유리규산(노출기준 0.05 ㎎/㎥) 0.0047 ㎎/㎥, 포름알데히드(노출기준 0.5 ppm) 0.00001 ppm, 메탄올(노출기준 200 ppm) 0.1357 ppm으로 나타났다. 조형공정에서 각 유해물질 인자별로 노출기준을 적용하여 평균 농도값을 비교한 결과, 메탄올의 농도가 높게 나타났으며, 이는 통계적으로 유의한 차이를 나타내었다($p<0.01$).

Table 3. The concentration of environmental hazards contaminants in casting process

(Unit : ㎎/㎥, ppm)

Classification	N*	GM**(GSD†)	Mean±S.D.‡	Min	Max	p-value
Quartz(㎎/㎥)	2	0.0018(1.7276)	0.0019±0.0099	0.0012	0.0026	
HCHO	6	0.00001(109.5588)	0.0016±0.0026	0.00000052	0.0059	0.028
MeOH	6	4.5097(64.3002)	24.4095±23.1216	0.0010	67.2796	

* N : Number of samples ** GM : Geometric Mean
† GSD : Geometric Standard Deviation ‡ S.D. : Standard Deviation

Table 4. The concentration of environmental hazards contaminants in molding process

(Unit : ㎎/㎥, ppm)

Classification	N*	GM**(GSD†)	Mean±S.D.‡	Min	Max	p-value
Quartz(㎎/㎥)	39	0.0047(3.0787)	0.0080±0.0089	0.0004	0.0505	
HCHO	21	0.00001(81.6864)	0.0029±0.0072	0.00000052	0.0306	p<0.01
MeOH	14	0.1357(54.7335)	3.5945±6.8085	0.0010	24.4264	

* N : Number of samples ** GM : Geometric Mean
† GSD : Geometric Standard Deviation ‡ S.D. : Standard Deviation

Table 5. The concentration of environmental hazards contaminants in core process

(Unit : ㎎/㎥, ppm)

Classification	N*	GM**(GSD†)	Mean±S.D.‡	Min	Max	p-value
Quartz(㎎/㎥)	6	0.0056(2.6642)	0.0085±0.0082	0.0022	0.0209	0.351
HCHO	10	0.0002(449.3662)	0.0475±0.0728	0.00000052	0.1596	
MeOH	6	0.0010(1)	0.0010±0	0.0010	0.0010	
Phenol	10	0.0004(48.8948)	0.1665±0.5103	0.000042	1.6185	

* N : Number of samples ** GM : Geometric Mean
† GSD : Geometric Standard Deviation ‡ S.D. : Standard Deviation

Table 6. The concentration of environmental hazards contaminants in shakeout and finishing process

(Unit : ㎎/㎥, ppm)

Classification	N*	GM**(GSD†)	Mean±S.D.‡	Min	Max	p-value
Quartz(㎎/㎥)	19	0.0052(2.5888)	0.0078±0.0079	0.0006	0.0297	
Iron oxide	67	0.5434(4.5857)	1.1698±1.4110	0.0019	6.7270	p<0.01
Manganese	8	0.0019(3.0365)	0.0030±0.0025	0.0005	0.0060	

* N : Number of samples ** GM : Geometric Mean
† GSD : Geometric Standard Deviation ‡ S.D. : Standard Deviation

3.2.3. 중자공정의 유해인자별 노출 농도

Table 5에서는 중자공정에서 취급 및 발생하고 있는 유해인자별 기하평균 농도를 확인하였다. 유해인자별 기하평균 농도를 확인한 결과, 결정형 유리규산(노출기준 0.05 ㎎/㎥) 0.0056 ㎎/㎥, 포름알데히드(노출기준 0.5 ppm) 0.0002 ppm, 메탄올(노출기준 200 ppm) 0.0010 ppm, 페놀(노출기준 5 ppm) 0.0004 ppm으로 나타났다. 중자공정에서 각 유해물질 인자별로 노출기준을 적용하여 평균 농도값을 비교한 결과, 결정형 유리규산(Crystalline quartz, Silica)이 높게 나타났으며, 그 차이에 대한 통계적 유의성은 없는 것으로 나타났다.

3.2.4. 마무리공정의 유해인자별 노출 농도

Table 6에서는 마무리공정에서 취급 및 발생하고 있는 유해인자별 기하평균 농도를 확인하였다. 유해인자별 기하평균 농도를 확인한 결과, 결정형 유리규산(노출기준 0.05 ㎎/㎥) 0.0052 ㎎/㎥, 산화철분진과 흄(노출기준 5 ㎎/㎥) 0.5434 ㎎/㎥, 망간(노출기준 1 ㎎/㎥) 0.0019 ㎎/㎥으로 확인되었다. 마무리공정에서 각 유해물질 인

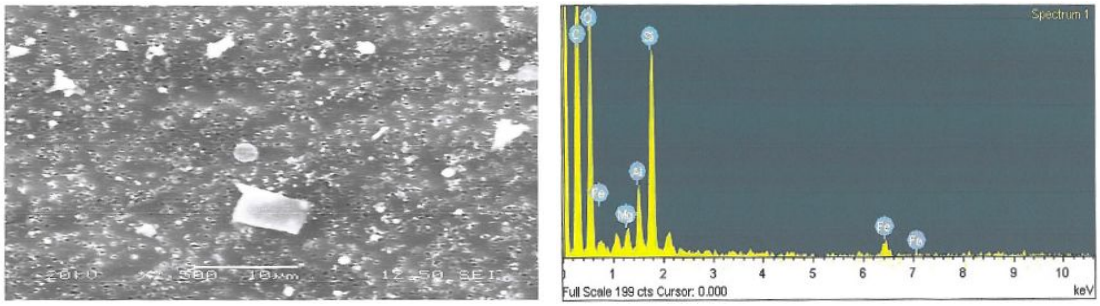

Fig. 3. A shape of dust sample by SEM/EDS in shakeout process.

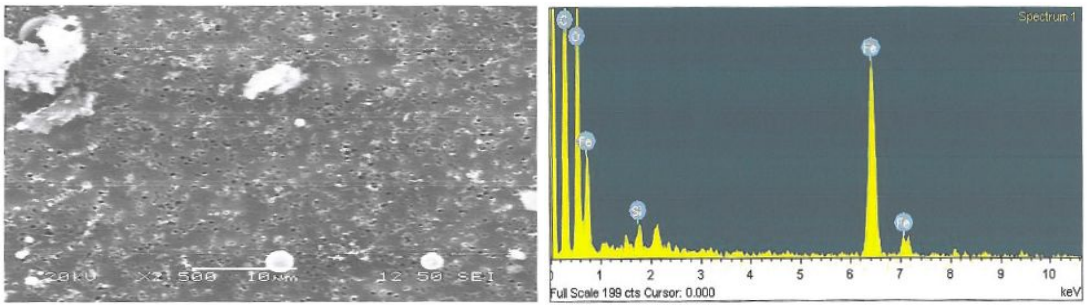

Fig. 4. A shape of dust sample by SEM/EDS in finishing(G/R) process.

자별로 노출기준을 적용하여 평균 농도값을 비교한 결과, 산화철분진과 흄 농도가 높게 나타났으며, 이는 통계적으로 유의한 차이를 나타내었다($p<0.01$).

한편, 이 연구에서는 탈사공정에서 포집한 시료의 물성을 확인하기 위하여 미세구조와 원소성분을 파악하고, 각 분진의 특성과 함유원소의 정성특성을 확인하기 위하여 SEM(MIRA][LMH CS02, TESCAN, Czech Republic) /EDS(Analyzer model 550i, TESCAN, USA)를 이용하여 물질시료 원소의 정성분석을 수행하였다. 분석작업을 수행한 결과 Fig. 3에서와 같이 규소(Silica, Si)가 가장 높게 나타났으며, 기타 철(Iron, Fe) 성분과 알루미늄(Al) 성분이 확인되었다. Fig. 4에서는 마무리공정에서 포집된 시료의 원소 성분을 확인한 결과, 철(Fe) 성분이 높은 함량을 차지하고 있는 것을 확인되었다. 분석결과 대부분이 지각의 구성물질인 규소(Silica), 알루미늄(Al), 철(Fe) 등으로 이루어져 있음을 확인하였으며, 마무리공정(G/R)에서는 용접 흄과 같이 매우 작은 나노크기의 입자가 발견되었다.

4. 고찰

주물공정 사업장 근로자는 다양한 형태의 독성금속 및 오염물질에 노출 될 수 있다. 이 연구에서는 주물공정 사업장을 대상으로 유해화학물질 노출특성 및 건강 위해인자 기초조사를 수행한 결과, 주조공정에서 메탄올이 다른 공정에 비해 통계적으로 유의하게 높게 나타났다($p<0.05$). 특히 주조공정의 경우 주물공정의 첫 단계로서 주물사를 접착성물질과 섞게 되고, 녹은 주철이 고온에서 반응하여 다양한 형태의 유기화합물을 발생하고 있었다. 또한, 작업공정별 결정형 유리규산(Crystalline quartz, Silica), 포름알데히드(HCHO), 메탄올, 페놀 및 기타 유해화학물질의 농도 측정 및 분석 작업을 수행한 결과, 주물 사업장의 근로자들에게 노출되는 유해화학물질 및 기타 오염물질의 농도가 다소 높은 수준으로 확인되었다. 특히 알데히드류 및 휘발성 유기화합물류는 증기압이 높아 쉽게 공기 중으로 휘발되며, 물질에 따라 발암성이나 돌연변이성 같은 영향이 나타나며, 낮은 농도에서도 장기간 노출 시 감각기관의 자극이나 천식 등과 같은 인체 건강피해를 일으키는 것으로 보고되고 있고, 결정형 유리규산이 함유된 분진은 규폐증, 폐의 섬유화, 기도 협착, 폐암 등을 유발 할 수 있다(Park et al., 2006; Park et al., 2005; Perrault et al., 1992; Phee et al., 1997). 따라서 향후 이러한 다양한 형태의 유해화학물질 및 각종 공정에서 발생하는 입자상물질 및 가스상 물질을 저감하기 위하여 국소배기장치의 개선과 함께 비산먼지의 발생을 적극적으로 저감하기 위하여 다양한 형태의 공정개선 작업이 이루어져야 할 것이다.

또한, 이 연구를 수행한 결과 주조공정에서 메탄올의 농도값이 다른 공정에 비해 높게 나타났으며, 통계적으로 유의한 차이를 나타났다($p<0.05$). 이는 주조 작업이 주물공정의 첫 단계로서 주물사를 접착성 물질과 혼합하고 녹은 주철이 고온에서 반응하여 다양한 형태의 유기화합물이 발생되어 나타난 결과로 판단되며, Kim(2003) 연구에서도 페놀 노출농도 역시 고온상태의 쇳물로 인해 주입공정에서 가장 높게 나타났다고 보고하고 있다.

중자공정에서 노출되는 포름알데히드(HCHO)의 농도는 0.0002 ppm으로 우리나라 고용노동부 노출기준 0.5 ppm과 비교하여 낮은 수준으로 나타났으며, 페놀 또

한 0.0005 ppm으로 노출기준 5ppm과 비교하였을 때 상당히 낮은 수준으로 검출되었다(MoEL, 2012). 또한, Zhang et al.(2010) 연구에서 주물 사업장에서 고온에 의한 접착제 방출로 나타난 포름알데히드(HCHO) 농도 0.60 ㎎/㎥과 페놀 1.73 ㎎/㎥에 비해서도 매우 낮은 수준이었다(Zhang et al., 2010; MoEL, 2012). 카보닐화합물 및 휘발성유기화합물 성분중의 일부물질은 인체 호흡기관을 자극하고 눈의 통증이나 자극을 유발하며(Son et al., 1995), 빈혈, 백혈구 감소, 혈액암, 임파암, 현기증, 구토, 두통, 신경계 장애 등의 인체영향을 초래하는 것으로 보고하고 있다(Harley and Cass,1995; WHO,2002). 따라서 대상공정 근로자들에게는 적은 양의 카보닐화합물 및 유기화합물질류에 노출 된다고 하더라도 관련물질을 저감하기 위하여 국소배기장치의 개선이 요구된다. 특히 비산먼지의 발생을 적극적으로 차단하기 위하여 국소 배기장치가 성능 보완 및 추가장비의 설치가 요구되며, 다양한 형태의 공정개선 작업이 이루어져야 할 것이다. 또한 근로자들에게 노출되는 화학물질의 위험성에 대한 교육을 제공하는 등 지속적인 관리가 필요할 것으로 판단된다.

한편, 결정형 유리규산의 경우 Phee et al.(1997) 연구에서 형 해체와 마무리공정에서 호흡성 분진 및 석영의 농도가 높은 수준으로 확인되었으며, 이러한 경향은 본 연구결과에서도 중자공정과 마무리공정에서 결정형 유리규산의 농도가 다른 공정에 비해 다소 높은 수준으로 나타났다. 또한, 마무리공정은 형 해체 후 폐기용과 재생용으로 구분하기 위한 모래 처리 작업 시 많은 양의 분진을 발생하며, 특히 마무리 공정이 대부분 실내작업에서 이루어지고 있으므로 다른 공정과 비교하여 보다 철저한 작업환경 관리가 이루어져야 할 것이다.

이와 함께 마무리공정에서의 그라인딩 작업에서 용접흄이 발생하게 되는데 SEM/EDS 분석결과 나노입자 수준의 입자상물질이 확인되었으며, 특히 이는 그라인딩 작업과정에서 고열이 발생되고 있음을 추정할 수 있게 하는 지표이므로, 물리적 인자와 병행하여 고열 등에 대한 관리도 필요할 것으로 판단된다. 또한 비산되는 먼지를 저감 할 수 있는 국소 배기장치가 보완 및 추가적으로 설치되어야 하며, 노출되는 화학물질의 위험성에 대한 교육을 제공하는 등 지속적인 관리가 필요할 것으로 판단된다.

이 연구의 제한점으로 주물 사업장에서 다양하게 발생하는 유기화합물 중 화학적 유해인자를 중심으로 수행한 점과 연구대상 수의 제한으로 주물 사업장 전체의 유기화합물의 농도를 대표하기에는 다소 무리가 있다. 그러나 주물 사업장내 다양한 화학적인자의 노출 수준을 제시함으로서 대상공정 근로자들의 건강보호를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

향후 물리적 및 생물학적 유해인자와 함께 대상공정에서는 근골격계 질환의 발생이 지속적으로 증가하는 추세이므로 근골격계 질환의 예방을 위한 다양한 형태의 관리방안도 제시되어야 할 것이다.

5. 결론

이 연구에서는 주물공정 근로자들의 건강보호 및 작업환경 개선을 위해 유해오염물질 노출특성 및 위해인자 조사를 수행하였다. 이 연구는 2013년 4월에서 11월까지 수행되었으며, 경상도 지역에 위치한 주물사업장 4곳을 선정하여, 공정별 오염물질 노출실태와 특성을 파악하였으며, 이상의 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 주물사업장의 작업공정별로 구분하여 메탄올의 농도를 분석한 결과, 기하평균 농도는 주조공정(Casting process)에서 4.5097 ppm, 조형공정(Molding process)에서 0.1357 ppm, 중자공정(Core process)에서 0.0010 ppm으로 확인되었으며, 주조공정에서 농도가 높게 나타났다($p<0.05$). 이는 통계적으로 유의한 차이를 나타내었다. 또한, 주물사업장의 작업공정별 구분하여 결정형 유리규산(Crystalline quartz, Silica)의 농도를 분석한 결과, 기하평균 농도는 주조공정에서 0.0018 ㎎/㎥, 조형공정에서 0.0047 ㎎/㎥, 중자공정에서 0.0056 ㎎/㎥, 마무리공정(Shakeout & finishing process)에서 0.0052 ㎎/㎥으로 나타났다.

2. 주조공정에서 취급 및 발생하고 있는 유해인자별 기하평균 농도를 확인한 결과, 결정형 유리규산(Crystalline quartz, Silica) 0.0018 ㎎/㎥, 포름알데히드(HCHO) 0.00001 ppm, 메탄올 4.5097 ppm으로 확인되었다. 각 유해인자별 노출기준을 적용하여 평균 농도값을 비교한 결과, 메탄올의 농도가 높게 나타났다. 이는 통계적으로 유의한 차이를 나타내었으며($p<0.05$), 주조공정에서 주물사와 접착성 물질을 혼합하고 녹은 주철이 고온에서

반응하는 과정에서 다양한 형태의 유해화학물질 및 휘발성 유기화합물이 발생되는 것으로 판단된다. 또한, 조형공정의 유해인자별 농도를 확인한 결과, 결정형 유리규산(Crystalline quartz, Silica)의 기하평균 농도는 0.0047 ㎎/㎥, 포름알데히드(HCHO) 0.00001 ppm, 메탄올 0.1357 ppm으로 확인되었으며, 메탄올의 농도가 높게 나타났다. 이는 통계적으로 유의한 차이를 나타내었다($p<0.01$).

3. 중자공정의 유해인자별 농도를 확인한 결과, 결정형 유리규산(Crystalline quartz, Silica)의 기하평균 농도는 0.0056 ㎎/㎥, 포름알데히드(HCHO) 0.0002 ppm, 메탄올 0.0010 ppm, 페놀 0.0004 ppm으로 확인되었다. 각 유해인자별 노출기준을 적용하여 평균 농도값을 확인한 결과, 결정형 유리규산(Crystalline quartz, Silica)이 높게 나타났다. 마무리공정에서 발생하고 있는 유해인자의 기하평균 농도를 확인한 결과, 결정형 유리규산(Crystalline quartz, Silica) 0.0052 ㎎/㎥, 산화철분진과 흄 0.5434 ㎎/㎥, 망간 0.0019 ㎎/㎥으로 확인되었다, 각 유해인자별 노출기준을 적용하여 평균 농도값을 비교한 결과, 산화철분진과 흄 농도가 높게 나타났다. 이는 통계적으로 유의한 차이를 나타내었다($p<0.01$).

이상의 결과로부터 주물 사업장의 근로자들에게 노출되는 유해화학물질 및 기타 오염물질에 대한 지속적인 관리와 대책이 필요한 시점으로 판단된다. 향후 이러한 다양한 형태의 유해화학물질 및 각종 공정에서 발생하는 입자상물질 및 가스상 물질을 저감하기 위하여 국소배기장치의 개선과 함께 비산먼지의 발생을 적극적으로 저감하기 위하여 다양한 형태의 공정개선 작업이 요구되는 시점이다.

감사의 글

본 연구는 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업이며, (No. 2012-R1A1A4A01- 014771) 연구비를 지원하여 주심에 감사드립니다.

REFERENCE

American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH), 2001, Industrial Ventilation Manual of Recommended Practice, 24th Edition.

Alpaugh, E. L., 1988, Particulates in Fundamentals of Industrial Hygiene, 3rd ed, by Plog B. A., Chicago, Illinois, National Safety Council, 128.

Burgess, W., 1995, A Foundry Operation in Recognition of health hazards in industry, 2th ed, Wiley J & Sons, Canada, 106-139.

Chen, J., McLaughlin, J. K., Zhang, J. Y., Stone, B. J., Luo, J., Chen, R. A., Dosemeci, M., Rexing, S. H., Wu, Z., Hearl, F. J., McCawley, M. A., Blot, W. J., 1992, Mortality among Dust exposed Chinese Mine and Potter Workers, J. Occup. Med., 34(3):311-316.

Cooper, T. C., Gressel, M. G., Froehlich, P. A., Caplan, P. E., Mickelsen, R. L., Valiante, D., Bost, P., 1993, Successful Reduction of Silica Exposure at Sanitary Ware Pottery, Am. Ind., Hyg. Assoc. j., 54(10) 600 -606.

Environmental Protection Agency(EPA), 1999, Com -pendium Method TO-11A: Determination of formal -dehyde in ambient air using adsorbent cartridge followed by high performance liquid chromatography (HPLC).

Gomes, J., Lloyd, O. L., Norman, N. J., Pahwa, P., 2001, Dust exposure and impairment of lung function at a small iron foundry in a rapidly developing country, Occup Environ Med, 58, 656 – 662.

Guenther, A., Hewitt, C. N., Erickson, D., Fall, R., Geron, C., Graedel, T., Harley, P., Klinger, L., Lerdau, M., McKay, W. A., Pierce, T., Scholes, B., Steinbrecher, R., Tallamraju, R., Taylor, J., Zimmerman, P., 1995, A global model of natural volatile organic compound emissions, Journal of Geophysical Research, 8873 – 8892.

Harley, R. A., Cass, G. R., 1995, Modeling the atmospheric concentrations of individual volatile organic compounds, Atmos. Environ, 29, 905-922.

Jung, J. H., Lee, S. W., Lee, S. M., Shon, B. H., Lee, J. H., Jung, Y. J., 2013, Improvement of capturing velocity in the fume hood using Computational Fluid Dynamics(I) - uniform flow, The Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 14(2), 9621-969.

Jung, Y. J., Park, K. W., Shon, B. H., Jung, J. H., 2013a, A numerical study on performance improvement of rnclosed hood in reverberatory furnace, Journal of

the Korean Siciety of Urban Environment, 13(3), 235-242.

Jung, Y. J., Shon, B. H., Lee, S. M., Jung, J. H., 2013b, A Numerical Study on Performance Improvement of Canopy Hood in Melting Process, The Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 14(3), 1519-1526.

Kang, L. W., 2007, The New Casting Engineering, Bo Sung Gak Publishing company.

Kim, M. R., Lee, K. R., Park, D. G., Jang, J. K., 2003, Phenol occurrence characteristics due to the use of chemical company in the casting process, Korea Solid Wastes Engineering Society, 11, 172-175.

Ministry of Employment and Labor(MoEL), 2012, Occupational exposure limits for chemical and physical agents, MoEL Notification No. 2012-31.

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 2003, NIOSH manual of analytical methods : No 2016 [cited 2014 May 26]; Available at http://www.cdc.gov/niosh

Park, H. S., 2007, Morphological Property and Size Distribution of Dust Particles Emitted from Iron Casting Processes, Environmental Societies Joint conference, 124.

Park, J. S., 2006, Development and Field Installation of a System of Simultaneously Removing Dust and Volatile Organic Compounds from Furan Process in Foundry, Korean Chem. Eng. Res., 44(2), 136-148.

Park, R. M., Ahn, Y. S., Stayner, L. T., Kang, S. K., Jang, J. K., 2005, Mortality of iron and steel workers in Korea, Am J Ind Med, 48:194 – 204.

Perrault, G., Dion, C., Ostiguy, C., Michaud, D., Baril, M., 1992, Selective sampling and chemical speciation of airborne dust in ferrous foundries, Am Ind Hye Assoc J, 53(7):463-470.

Phee, Y. G., Poh, Y. M., Lee, K. M., Kim, H. A., Kim, Y. W., Won, J. I., Kim, H. W., 1997, Analysis or quartz content and particle size distribution of airborne dust from selected foundry operations, Korean Ind. Hyg. Assoc. J, 7(2):196-208.

Sohn, J. Y., Yoon, D. W., 1995, Characteristics and Control of Volatile Organic Compounds in Indoor Air Environment, Korean Journal of Air-Condi-tioning and Refrigeration Engineering, 24(1), 44-55.

World Health Organization(WHO), 2002, Europe exposure assessmentin studies on the chronic effectsoflong-term exposuretoairpollution.

Zhang, M., Qi, C., Chen, W. H., Lu, Y., Du, X. Y., Li, W. J., Meng, C. S., 2010, Re-analysis of occupational hazards in foundry. Zhonghua Lao Dong Wei Sheng Zhi Ye Bing Za Zhi. Apr;28(4), 280-5.