

자동차 도장시설에서 발생하는 유해대기오염물질 및 미세먼지의 배출특성에 관한 연구

The Study on the Emission Characteristics of HAPs and PM from the Motor Vehicle Paint Facility

김한나 · 봉춘근* · 김용구 · 전준민¹⁾

(주)그린솔루스, ¹⁾순천제일대학 토목환경학과

(2013년 5월 3일 접수, 2013년 6월 12일 수정, 2013년 8월 29일 채택)

Han-Na Kim, Choon-Keun Bong*, Yong-Gu Kim and Jun-Min Jeon¹⁾

Greensolus Co. Ltd., ¹⁾Department of Civil & Environmental Engineering,
Suncheon First College

(Received 3 May 2013, revised 12 June 2013, accepted 29 August 2013)

Abstract

This study is about emission characteristics of HAPs and particulate matters emitted by spray of paint and organic solvent usually used in vehicle paint facilities. To analyze emission characteristics of HAPs and particulate matters emitted from vehicle paint facilities are calculated based on the measuring emission quantity of pollutants based on the amount of paint used (kg) and unit area (m²) by paint manufacturers (J company, K company, and R company).

In cases of paint manufacturers (J, K, and R), average emission factors of VOCs, carbonyl compound, particulate matter, and PAHs per 1 kg of paint were 327.81 g/kg, 5.98 g/kg, 336.70 g/kg, and 0.0078 g/kg respectively. The average emission factors of VOCs, carbonyl compounds, particulate matters, and PAHs by unit area were 171.55 g/m², 3.10 g/m², 176.27 g/m², and 0.0036 g/m² respectively.

Key words : Paint facility, HAPs, Particulate matter, Emission factor

1. 서 론

일반적으로 자동차 도장시설의 보수도장공정은 전처리공정, 하도공정, 중도공정, 상도공정 (유색, 투명)으로 이루어지는데, 상도공정은 페인트 및 유기용제

의 휘발성유기화합물 (Volatile organic compound; VOCs)이 대부분 포함되어 있어 휘발성유기화합물이 가장 많이 배출된다.

이와 같이 자동차 도장시 주로 사용되는 페인트 및 유기용제에 함유되어 있는 VOCs 등에는 미세한 액적의 분사로 인한 미세먼지 및 건강위해성을 고려할 수 있는 유해대기오염물질 (Hazardous Air Pollutants; HAPs)이 다량 배출될 수 있을 것으로 판단되며, 자

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)70-8290-5050 E-mail : greenbeemail@naver.com

동차 도장시설로부터 배출되는 여러 가지 오염물질의 특성에 대한 연구가 필요하다(Song *et al.*, 2012).

미국의 경우 악취 저감을 달성하면서 저농도로 건강에 유해한 물질을 배출하는 사업장에 유해대기오염물질 규제를 강화하는 추세이며, HAPs 배출로 인한 악취와 건강피해 비상사태에 대비하기 위해 HAPs의 사고방출프로그램(Accidental Release Program)을 운영하여 유해화학물질 사고를 미연에 방지하고 있다(Gale, 1994). 독일은 발암성 물질(21종), 입자상 물질(20종), 가스상 물질(10종), 유기화학물질(103종) 등 4종류로 구분한 154종의 물질을 HAPs 차원에서 관리하고 있으며, 각각에 분류에 대하여 I~IV 등급으로 구분하여 배출허용기준을 다르게 설정하고 있으나(Gong and Lee, 2011), 국내에서의 연구는 악취 관점에서 접근하여 가스상 오염물질인 VOCs에 한정된 연구가 많은 실정이다(Kwon *et al.*, 2006; Ministry of environment, 2004).

자동차 도장시설의 일반적 특성 및 방지시설을 파악하기 위해 서울시 613개 자동차 도장시설 중 15개 업체를 선정하여 사전 현장조사를 시행했다(Seoul metropolitan government of climate & environment department, 2011). 자동차 도장시설이 밀집되어 있는 성동구, 강서구, 금천구, 영등포 등의 도장시설 중에서 배출되는 오염물질 처리가 잘 이루어지지 않을 가능성이 있는 중·소규모의 일반적으로 승용차를 도장하는 업체를 대상으로 선정하였다.

현장조사 결과 대부분의 도장시설에서는 2액형 우레탄 도료와 일반건을 사용하였으며, 스프레이방법은 에어스프레이법을 주로 사용하고 여과 및 활성탄 흡착시설에 의해 오염물질을 처리하는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 사전 현장조사 결과를 바탕으로 서울지역 자동차 도장시설의 보수도장을 대상으로 하여 자동차 도장시설로부터 배출되는 HAPs 및 미세먼지를 측정하여 신뢰할 수 있는 배출계수를 도출하고, 미세먼지의 입경별 분포도를 분석하였다. 이를 통해 향후 자동차 도장시설의 오염물질을 효과적으로 관리하기위한 기초자료를 제공하고자 하였다.

2. 연구 방법

본 연구에서 시료채취 항목은 HAPs에 대부분 포함되어 있는 VOCs, 카보닐화합물, 입자상 다환방향족탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydro-carbons; PAHs)와 미세먼지를 대상으로 하였다. 또한 서울시에 소재한 자동차 도장시설 현장조사 결과 자동차 도장시설의 규모, 도장방법 등은 도장시설별 배출특성에 미치는 영향이 미미한 반면, 페인트 및 유기용제의 제조사는 각 제조사별 구성성분이 달라 HAPs 및 미세먼지의 배출특성이 상이할 것으로 판단되어졌다.

따라서 본 연구에서는 자동차 보수용 도료로 99% 이상 사용되는 페인트 제조사(J사, K사, R사)를 선정

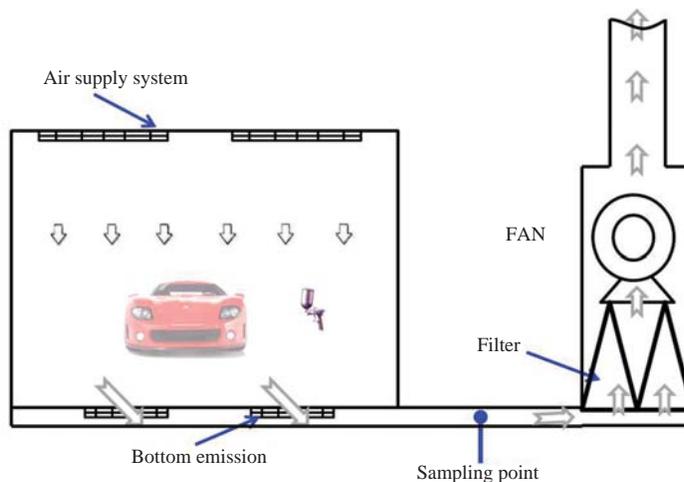


Fig. 1. Schematic diagram of experimental system for the motor vehicle paint facility.

하고, 제조사별로 페인트 사용량(1 kg)과 단위면적(1 m²)에 따른 VOCs, 카보닐화합물, PAHs, 미세먼지의 배출량을 측정하였다.

도장부스는 일반적으로 그림 1과 같이 도료 및 유기용제를 분사하면 부스 내부의 급·배기필터를 통해 가스상 및 입자상 물질이 방지시설을 통과하여 외부로 배출되는 구조로 구성되어 있다. 본 연구에서는 실제 공정과 동일한 조건으로 도장부스(5.5 m×3.5 m×2.4 m)에서 VOCs, 카보닐화합물, 미세먼지, PAHs의 시료채취는 도색대상인 1 m×1 m의 철판에 상도도장(서페이스 → 베이스 → 투명 → 유색)의 도료 및 유기용제를 제조사별로 500 g을 준비하여 분사하였다. 분사 후 도장시설의 방지시설 전단부를 2회씩, 상도도장 및 건조공정 동안 측정하였으며, 측정방법은 대기오염공정시험방법 및 미국 EPA 분석방법에 따라 실시하였다.

VOCs 시료채취는 대기오염공정시험법 및 미국 EPA TO-17 분석방법에 준하여 내용적이 5 L인 시료채취 주머니(Tedlar Bag)에 휴대용 소형 흡입펌프(Mini-pump SIBATA, MP-30, JP)를 이용하여 Teneax TA (40/60 mesh, Markers Inc., UK) 280 mg을 스테인레스 스틸 흡착관(1/4'×9 cm, Perkin Elmer., UK)에 100 mL/min의 유량으로 채취하였다. 시료채취 후 자동열탈착 장치(TurboMatrix, PerkinElmer, USA)가 GC컬럼(DB-1, 0.32 mm×60 m×3 μm, Agilent Technologies, USA)으로 직접 연결된 GC/MS(HP 6890/5973 inert, Hewlett Packard, USA)시스템을 사용하여 분석하였다.

카보닐화합물 시료채취는 내용적이 5 L인 시료채취 주머니(Tedlar Bag)에 1 cm (Inner Diameter)×6 cm (length)의 폴리프로필렌튜브에 DNPH-실리카가 충전된 카트리지(Top trading, Korea)를 사용하였다. 흡인 유량이 1~10 L/min인 판막식 펌프로 구성된 흡입펌프(SIBATA Σ100, Japan)를 이용하여 1 L/min의 유량으로 채취하였다. 이 때 카보닐화합물은 대기 중 오존에 의해 시료채취과정에서 방해받게 되므로 오존의 영향을 배제하기 위하여 약 1.5 g의 KI가 충전된 오존스크러버(Top trading., Korea)를 2,4-DNPH 카트리지 앞에 장착하여 시료를 채취하였다.

시료채취 후 분석을 위해 2,4-DNPH와 반응하여 형성된 카보닐-DNPH 유도체에 HPLC 등급의 아세트나이트릴을 2 mL씩 두 번 주입하여 약 1분 동안

DNPH 유도체를 추출하였으며 추출액은 고성능액체 크로마토그래피(HPLC)를 이용하여 분석하였다.

미세먼지 시료채취는 두 가지 방법을 동시에 사용하였는데 먼저 반자동식 채취기(ASTMC, Astec., Korea)를 사용하여 Duct에서의 유속과 동일한 속도로 흡인하였다. 사용한 여지는 110±5°C에서 충분히(1~3시간) 건조하고 테시케이터에서 실온까지 냉각하여 0.1 mg까지 정확히 잰 원통형여지(glass fiber thimble filter, Advantec. Toyo Roshi Kaisha, Ltd., Japan)에 채취하였다. 시료채취 후 채취된 여과지를 110±5°C로 충분히(1~3시간) 건조하고 테시케이터 내에서 실온까지 냉각하여 무게를 잰 여지를 분석용으로 사용하였다. 또 하나는 실시간의 미세먼지를 연속적으로 측정할 수 있는 광산란방식(Portable Aerosol Monitor (Grimm 1.108, Grimm Aerosol Technik., Germany)를 사용하였으며, 등속흡인을 위해 Isokinetic channel probe (Grimm 1.152, Grimm Aerosol Technik., Germany)를 사용하여 상도도장 중 스프레이 분무시간이 길어 오염물질이 다량 배출될 것이라 판단된 유색공정의 시료를 채취하였다.

PAHs 시료채취는 850°C에서 2시간 강열시킨 후, 아세톤 및 톨루엔으로 각각 30분간 초음파 세정을 한 다음, 진공 건조하고 0.001 mg까지 정확히 잰 원통형 여지(glass fiber thimble filter, Advantec. Toyo Roshi Kaisha, Ltd., Japan)를 사용하였으며, 미세먼지의 반자동식 채취기에 의한 방법으로 시료를 채취하였다.

PAHs 분석을 위해 원통형 여지를 Soxhlet에 넣고 Hexane : 아세톤 혼합용매(9 : 1)용액을 150 mL 넣은 후 회수용 측정용 대리표준물질(SS)을 첨가하고 16 시간 동안 추출하였다. Soxhlet 추출이 끝난 추출액은 자동 질소농축기를 이용하여 2 mL로 농축하며 Sodium sulfate cartridge와 hexane : 아세톤 혼합용매(9 : 1)용액 6 mL를 이용하여 정제하였다. 정제된 시료는 고순도 질소를 이용하여 최소 1 mL까지 농축하였으며, 최종 농축된 시료를 PAHs 내부표준물질 10 μL를 첨가한 후 EPA TO-13A Method와 국내 대기오염공정 시험기준(ES 01552.1)의 따라 Agilent GC/MS(HP-6890/HP-5973N)를 이용하여 분석하였다.

오염물질 측정결과를 토대로 오염물질별 페인트 사용량(1 kg), 단위면적(1 m²)에 따라 배출계수를 산정하였다(Kim *et al.*, 2005).

$$\frac{\text{페인트 사용량(1 kg)당 오염물질 배출계수}}{\text{오염물질 농도(g/m}^3\text{)} \times \text{배출가스 유량(m}^3\text{/min)}} = \frac{\text{페인트 사용량(kg/min)}}{\text{오염물질 농도(g/m}^3\text{)} \times \text{배출가스 유량(m}^3\text{/min)}} \quad (\text{식 1})$$

$$\frac{\text{단위면적(1 m}^2\text{)당 오염물질 배출계수}}{\text{오염물질 농도(g/m}^3\text{)} \times \text{배출가스 유량(m}^3\text{/min)}} = \frac{\text{단위면적(m}^2\text{/min)}}{\text{오염물질 농도(g/m}^3\text{)} \times \text{배출가스 유량(m}^3\text{/min)}} \quad (\text{식 2})$$

3. 결과 및 고찰

3.1 도료별 VOCs 배출특성

최근 자동차 도장시설을 대상으로 VOCs 배출특성에 관한 연구는 대부분 VOCs 성분별 농도가 아닌 총탄화수소(Total Hydro Carbon; THC)의 최종 배출농도 및 방지시설의 제거효율과 관련된 연구들이 대부분을 차지하고 있다(Kim *et al.*, 2006; Kwon *et al.*, 2006; Ministry of environment, 2004; Yoo *et al.*, 2004).

Kim *et al.* (2006)의 연구에서는 총탄화수소의 최종 배출농도가 37.5 ~ 247.7 ppm으로 나타났으며, Kwon *et al.* (2006)의 연구에서는 도장시설의 VOCs 중 톨루엔, m,p-자일렌, 에틸벤젠의 최종 배출농도가 각각 9.02 ppm, 1.61 ppm, 1.16 ppm으로 나타났다. Yoo *et al.* (2004)의 연구에서도 총탄화수소의 최종 배출농도가 124.9 ppm으로 나타났다. 또한 Ministry of environ-

ment (2004)의 연구에서는 자동차 보수도장공정을 하도공정, 중도공정, 상도공정으로 구분하고 각 공정의 VOCs 농도를 측정하였다. 각 공정의 특성을 살펴보면, 하도공정에서 사용하는 아크릴 퍼티는 자일렌, 톨루엔 등의 VOCs를 포함하고 있어 THC 농도가 22 ~ 66 ppm으로 나타났으며, 중도공정에서는 VOCs 농도가 평균 59 ~ 170 ppm으로 나타났다. 상도(유색) 공정은 도료와 대부분이 VOCs 물질인 희석제를 혼합하여 스프레이 하는 작업이어서 VOCs 농도가 150 ~ 400 ppm으로 가장 많이 배출되는 공정으로 나타났으며, 상도(투명) 공정은 VOCs 농도가 100 ~ 300 ppm으로 나타났다.

당 연구에서는 도장시설의 방지시설 전단에서 측정된 도료별 VOCs 배출특성을 살펴보면, 톨루엔 성분의 경우 J사 271,966 µg/m³, K사 252,614 µg/m³, R사 227,959 µg/m³으로써 가장 높게 측정되었다. 또한 3가지 도료에서 다소 차이는 있으나, 대체적으로 메틸이소부틸케톤, 톨루엔, 자일렌, 에틸벤젠 성분들이 검출빈도 뿐만 아니라 높은 농도로 배출되고 있어 도장시설에서 주요 배출 성분으로 판단된다.

측정한 VOCs의 농도를 이용하여 제조사별 페인트사용량(1 kg)과 단위면적에 따른 VOCs의 배출계수 산정 결과를 표 1에 나타냈다.

연구결과 페인트 1 kg당 배출되는 총휘발성유기화합물(Total Volatile organic compound; TVOC)은 J사,

Table 1. Emission factors of VOCs from the motor vehicle paint facility.

VOCs	Emission factor (g/kg)				Emission factor (g/m ²)			
	J	K	R	Avg.	J	K	R	Avg.
Acetone	0.56	0.56	0.56		0.31	0.29	0.28	
Isopropylalcohol	1.64	3.16	1.59		0.90	1.63	0.80	
Methylenechloride	0.71	0.57	4		0.39	0.29	2.02	
tert-Butylmethyl ether	0.15	N.D	0.08		0.08	N.D	0.04	
Benzene	0.10	N.D	N.D		0.05	N.D	N.D	
Hexane	N.D	N.D	0.73		N.D	N.D	0.37	
Toluene	183.14	181.10	167.21		100.54	93.39	84.27	
Methylisobutyl ketone	138.31	133.23	126.91		75.93	68.69	63.96	
Ethylbenzene	5.2	6.46	6.98		2.85	3.33	3.52	
m,p-Xylene	8.21	1.65	10.9		4.51	0.85	5.51	
o-Xylene	4.29	4.67	5.24		2.35	2.41	2.64	
4-Ethyltoluene	0.001	N.D	N.D		0.0006	N.D	N.D	
1,3,5-Trimethylbenzene	0.0007	N.D	N.D		0.0004	N.D	N.D	
1,2,4-Trimethylbenzene	0.01	N.D	N.D		0.005	N.D	N.D	
TVOC	338.81	326.78	317.85	327.81	185.70	168.67	160.27	171.55

* N.D : Not Detected

K사, R사에서 각각 338.81 g, 326.78 g, 317.85 g으로 나타났으며, 단위면적당 J사, K사, R사에서 각각 185.7 g, 168.67 g, 160.27 g 배출되는 것으로 나타났다. 도료 3사의 경우 TVOC는 평균적으로 페인트 1 kg당 327.81 g 배출되며 단위면적당 171.55 g 배출되는 것으로 나타났다. 또한 3사 도료 모두 VOCs 물질 중 톨루엔과 메틸이소부틸케톤이 대부분이었는데, 특히 J사 도료의 경우 페인트 1 kg당 톨루엔 183.14 g, 메틸이소부틸케톤 138.31 g으로 배출되었으며 단위면적당 톨루엔 100.54 g, 메틸이소부틸케톤 75.93 g을 배출되는 것으로 나타났다. K사와 R사의 도료에서 배출되는 물질 또한 J사 도료와 비슷한 경향으로 K사 도료의 경우 페인트 1 kg당 톨루엔은 181.10 g, 메틸이소부틸케톤 133.23 g으로 배출되었으며 단위면적당 톨루엔은 93.39 g, 메틸이소부틸케톤은 68.69 g을 배출되는 것으로 나타났다. R사 도료 또한 페인트 1 kg당 톨루엔은 167.21 g, 메틸이소부틸케톤은 126.91 g을 배출되었으며 단위면적당 톨루엔은 84.27 g, 메틸이소부틸케톤은 63.96 g을 배출되는 것으로 나타났다.

3. 2 도료별 카보닐화합물 배출특성

당 연구의 도장시설에서 검출된 카보닐화합물의 배출특성을 살펴보면, J사 도료의 경우 가장 높게 측정된 성분은 아세톤 5,393 µg/m³로 나타났으며, 그 다음으로 n-부틸알데하이드 301.2 µg/m³, 포름알데하이드 108.4 µg/m³, 벤즈알데하이드 58.25 µg/m³으로 나타났다. K사 도료의 경우에는 아세톤 8,697 µg/m³, n-부틸알데하이드 185.2 µg/m³, 포름알데하이드 76.0

µg/m³, m,p-톨루알데하이드 31.5 µg/m³ 순으로 나타났으며, R사 도료의 경우에는 아세톤 11,457 µg/m³, n-부틸알데하이드 89.2 µg/m³, m,p-알데하이드 52.9 µg/m³, 포름알데하이드 44.0 µg/m³ 순으로 나타났다.

카보닐화합물의 배출특성은 3사의 도료 모두 배출 농도에선 다소 차이가 있으나 대체적으로 아세톤, n-부틸알데하이드, 포름알데하이드 성분들이 검출빈도 및 배출농도가 높게 나타났으며, 도장시설에서 주요 배출 성분으로 판단되어진다.

당 연구에서 측정된 카보닐화합물의 농도를 이용하여 제조사별 페인트 사용량(1 kg)과 단위면적에 따른 카보닐화합물의 배출계수 산정 결과를 표 2에 나타냈다.

3사의 도료 모두 배출되는 총 카보닐화합물의 양은 미량으로 나타났는데 페인트 1 kg당 배출되는 총 카보닐화합물은 J사, K사, R사에서 각각 4.03 g, 6.47 g, 7.44 g으로 나타났으며 단위면적당 J사, K사, R사에서 각각 2.2 g, 3.34 g, 3.75 g 배출되는 것으로 나타났다. 도료 3사에서 총 카보닐화합물은 평균적으로 페인트 1 kg당 5.98 g 배출되며 단위면적당 3.10 g 배출되는 것으로 나타났다.

현재까지 자동차 도장시설을 대상으로 한 총 카보닐화합물에 대한 연구는 없는 것으로 사료되어 이에 대한 세부적인 정량적 비교분석은 어려울 것으로 판단된다.

3. 3 도료별 미세먼지 배출특성

당 연구에서 미세먼지 반자동식 채취기로 측정된

Table 2. Emission factors of carbonyl compounds from the motor vehicle paint facility.

Carbonyl compound	Emission factor (g/kg)				Emission factor (g/m ²)			
	J	K	R	Avg.	J	K	R	Avg.
Formaldehyde	0.07	0.05	0.03		0.04	0.03	0.02	
Acetaldehyde	0.03	0.01	0.02		0.01	0.006	0.01	
Acetone	3.63	6.24	7.25		1.99	3.21	3.65	
Propionaldehyde	0.02	0.005	N.D		0.009	0.002	N.D	
n-Butylaldehyde	0.20	0.13	0.07		0.11	0.07	0.03	
Benzaldehyde	0.04	N.D	0.003		0.02	N.D	0.002	
iso-Valeraldehyde	0.01	N.D	0.005		0.007	N.D	0.002	
Valeraldehyde	0.006	0.01	0.01		0.003	0.006	0.006	
m,p-Tolualdehyde	0.01	0.02	0.04		0.006	0.01	0.02	
Hexaldehyde	0.009	0.006	0.01		0.005	0.003	0.006	
∑ Carbonyl	4.03	6.47	7.44	5.98	2.2	3.34	3.75	3.10

* ND : Not Detected

3사 도료의 입경별 분포 결과를 보면 3사 도료 모두 총먼지(Total Suspended Particle; TSP) 중 PM₁₀이 약 98%로 대부분을 차지하고 있으며, PM_{2.5}는 약 0.02%로써 매우 적게 나타났다(표 3).

상도도장 중 스프레이 분무시간이 긴 유색공정의

Table 3. The concentrations of PM_{2.5}, PM₁₀, TSP from the motor vehicle paint facility. (Unit : mg/m³)

Size (μm)	J	K	R
PM _{2.5}	0.1	0.08	0.08
PM ₁₀	522.1	465.2	443.1
TSP	532.9	470.8	449.8

Table 4. Size concentrations of particulate matters from the motor vehicle paint facility measured by portable dust monitor. (Unit : mg/m³)

Size (μm)	J	K	R	Avg.
~1.00	67.53	51.68	37.06	
1.00~1.30	17.51	15.47	10.17	
1.30~1.60	32.83	26.42	17.80	
1.60~2.00	88.34	65.41	44.90	
2.00~2.50	317.99	206.48	145.97	
2.50~3.00	412.58	272.38	193.91	
3.00~3.50	410.57	306.93	215.23	
3.50~4.00	366.68	301.13	205.59	
4.00~5.00	593.55	560.59	375.21	
5.00~6.50	255.50	307.67	197.35	
6.50~7.50	44.54	69.04	41.83	
7.50~8.50	8.9	16.12	9.33	
8.50~10.0	4.17	6.19	3.31	
10.0~	21.89	10.94	4.34	
TSP	2,642	2,216	1,502	2,120

미세먼지를 광산란방식의 먼지측정기로 측정된 3사 도료의 입경별 분포 결과를 보면, 표 4, 그림 2와 같이 4.0~5.0μm의 입경범위에서 J사 593.55 mg/m³, K사 560.59 mg/m³, R사 375.21 mg/m³으로써 가장 높게 나타났다.

TSP 중 2.0~6.5 μm의 입경범위에서 분포비율을 보면 J사 89.2%, K사 88.2%, R사가 88.8%로 전체의 약 88.7%로 나타났다. 또한 3사 도료 모두 TSP 중 PM₁₀이 약 99%로 대부분을 차지하고 있음을 확인할 수 있었다.

반자동식 미세먼지 채취기와 광산란방식 먼지측정기로 측정된 미세먼지의 농도를 이용하여 페인트사용량(1 kg)과 단위면적에 따른 먼지의 배출계수 산정결과를 표 5에 나타냈다.

페인트 1 kg당 배출되는 TSP는 J사, K사, R사에서 각각 358.82 g, 339.21 g, 329.87 g이며, 단위면적당 배출되는 TSP는 J사, K사, R사에서 각각 196.99 g, 174.91 g, 166.25 g으로 나타났다. 도료 3사에서 TSP는 평균적으로 페인트 1 kg당 342.63 g 배출되며, 단위면적당 179.38 g 배출되는 것으로 나타났다.

PM₁₀의 경우에는 페인트 1 kg당 J사, K사, R사에서 각각 351.60 g, 333.50 g, 324.99 g으로 배출되며, 단위면적당 J사, K사, R사에서 각각 193.03 g, 171.97 g, 163.80 g으로 배출되는 것을 알 수 있었다. 도료 3사에서 PM₁₀은 평균적으로 페인트 1 kg당 336.70 g 배출되며, 단위면적당 176.27 g 배출되는 것으로 나타났다.

PM_{2.5}의 경우에는 페인트 1 kg당 J사 0.07 g, K사와

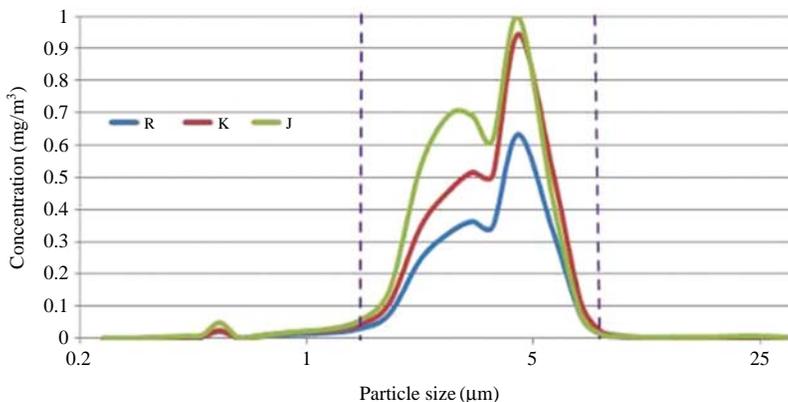


Fig. 2. Size distributions of particulate matters from the motor vehicle paint facility measured by portable dust monitor.

Table 5. Emission factors of PM_{2.5}, PM₁₀, TSP from the motor vehicle paint facility.

PM	Emission factor (g/kg)				Emission factor (g/m ²)			
	J	K	R	Avg.	J	K	R	Avg.
PM _{2.5}	0.07	0.06	0.06	0.063	0.04	0.03	0.03	0.033
PM ₁₀	351.60	333.50	324.99	336.70	193.03	171.97	163.80	176.27
TSP	358.82	339.21	329.87	342.63	196.99	174.91	166.25	179.38

Table 6. Emission factors and TEQs of PAHs from the motor vehicle paint facility.

PAHs	Emission factor (mg/kg)				Emission factor (mg/m ²)				TEF (EPA)	TEQ (ng-TEQ/m ³)		
	J	K	R	Avg.	J	K	R	Avg.		J	K	R
Naphthalene	0.13	0.36	1.07	0.07	0.19	0.54	0.001	0.19	0.5	1.46		
Acenaphthylene	0.14	0.35	0.53	0.008	0.18	0.27	0.001	0.21	0.48	0.72		
Acenaphthene	0.51	1.26	3.26	0.28	0.65	1.64	0.001	0.76	1.75	4.44		
Fluorene	0.19	0.5	1.78	0.11	0.26	0.9	0.001	0.28	0.7	2.43		
Phenanthrene	0.62	1.25	3.12	0.34	0.64	1.57	0.001	0.92	1.74	4.26		
Anthracene	0.11	0.7	1.22	0.06	0.36	0.62	0.01	1.6	9.7	16.7		
Fluoranthene	0.19	2.56	1.02	0.1	0.13	0.51	0.001	0.28	0.36	1.39		
Pyrene	0.16	0.27	0.4	0.09	0.14	0.2	0.001	0.24	0.37	0.55		
Benz[a]anthracene	0.12	0.05	0.61	0.07	0.03	0.31	0.1	18	7	83		
Chrysene	0.05	0.01	0.12	0.03	0.006	0.06	0.01	0.7	0.2	1.6		
Benzo[b]fluoranthene	0.002	0.01	0.006	0.001	0.006	0.003	0.1	0	2	1		
7,12-Dimethylbenz(a)anthracene	0.04	0.2	0.2	0.03	0.1	0.1	-	-	-	-		
Benzo[a]pyrene	0.01	0.06	0.07	0.01	0.03	0.04	1	20	80	100		
Benzo[e]pyrene	0.007	0.06	0.05	0.01	0.03	0.02	-	-	-	-		
∑PAHs	2.28	7.64	13.46	7.8	1.21	2.75	6.78	3.6	43.18	104.8	217.6	

R사에서 0.06 g으로 배출되며, 단위면적당 J사 0.04 g, K사와 R사에서 0.03 g으로 배출되는 것을 알 수 있었다. 도료 3사에서 PM_{2.5}는 평균적으로 페인트 1kg 당 0.063 g 배출되며, 단위면적당 0.03 g 배출되는 것으로 나타났다.

3. 4 도료별 PAHs (입자상) 배출특성

당 연구에서 도장시설에서 측정한 PAHs 배출특성을 살펴보면 J사 도료의 경우에는, 페난트렌 0.92 µg/m³, 아세나프텐 0.76 µg/m³, 플루오렌 0.28 µg/m³ 순으로 배출되고 있었다. K사 도료의 경우에는 아세나프텐 1.75 µg/m³, 페난트렌 1.74 µg/m³, 안트라센 0.97 µg/m³, 플루오렌 0.7 µg/m³ 순이었고, R사 도료의 경우에는 농도 수준은 다르지만 K사 도료와 유사하게 아세나프텐 4.44 µg/m³, 페난트렌 4.26 µg/m³, 플루오렌 2.43 µg/m³, 안트라센 1.67 µg/m³ 순으로 나타났다. 3가지 도료에서 다소 차이는 있으나 대체적으로 페난트렌, 아세나프텐, 플루오렌, 안트라센, 플루오란

텐 성분들이 검출빈도 뿐만 아니라 다른 성분들에 비해 고농도로 배출되고 있음을 알 수 있었으며, 이러한 성분들이 도장시설에서 주요 PAHs 배출 성분으로 나타났다.

한편, PAHs 물질 중 발암성 위해도 측면에서 중요한 벤조[a]피렌 성분은 J사 0.02 µg/m³, K사 0.08 µg/m³, R사 0.10 µg/m³ 순으로 나타났다.

측정한 PAHs의 농도를 이용하여 제조사별 페인트 사용량(1 kg)과 단위면적에 따른 PAHs의 배출계수를 산정하였으며, 발암성 위해도 측면에서의 분석을 위해 식품의약품안전처의 독성등가치(Toxicity equivalency; TEQ) 산정방법(식 3)에 따른 결과를 표 6과 같이 얻을 수 있었다(Ministry of Food and Drug Safety, 2010).

독성등가치(TEQ)
 =검출농도(ng/m³)× 독성등가치수(TEF) (식 3)

총 PAHs는 3사 도료 모두 미량으로 배출되었으며

Table 7. VOCs, Carbonyl compound, PM₁₀, PAHs average emission factors from the motor vehicle paint facility.

	Emission factor (g/kg)				Emission factor (g/m ²)			
	J	K	R	Avg.	J	K	R	Avg.
VOCs	338.81	326.78	317.85	327.81	185.70	168.67	160.27	171.55
Carbonyl compound	4.03	6.47	7.44	5.98	2.2	3.34	3.75	3.10
PM ₁₀	351.60	333.50	324.99	336.70	193.03	171.97	163.80	176.27
PAHs	0.00228	0.00764	0.01346	0.0078	0.00121	0.00275	0.00678	0.0036

페인트 1 kg당 배출되는 총 PAHs는 J사, K사, R사에서 각각 2.28 mg, 7.64 mg, 13.46 mg으로 나타났으며, 단위면적당 J사, K사, R사에서 각각 1.21 mg, 2.75 mg, 6.78 mg 배출되는 것으로 나타났다. 도료 3사에서 총 PAHs는 평균적으로 페인트 1 kg당 7.8 mg 배출되며, 단위면적당 3.6 mg 배출되는 것으로 나타났다.

또한 독성등가치 산정 결과, J사, K사, R사에서 각각 43.18 ng-TEQ/m³, 104.8 ng-TEQ/m³, 217.6 ng-TEQ/m³으로 나타났으며, 벤조[a]피렌의 경우 J사, K사, R사에서 각각 20 ng-TEQ/m³, 80 ng-TEQ/m³, 100 ng-TEQ/m³으로 가장 독성이 높은 물질로 나타났다.

표 7은 3사 도료(J사, K사, R사)에 따른 VOCs, 카보닐화합물, 미세먼지, PAHs의 배출계수 산정결과의 평균값을 나타낸 것으로 페인트 1 kg당 VOCs, 카보닐화합물, 미세먼지, PAHs는 각각 327.81 g, 5.98 g, 336.70 g, 0.0078 g으로 나타났으며, 단위면적당 VOCs, 카보닐화합물, 미세먼지, PAHs는 각각 171.55 g, 3.10 g, 176.27 g, 0.0036 g으로 나타났다. 이를 통해 자동차 도장시설에서 주로 배출되는 물질은 VOCs와 미세먼지임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 자동차 도장시설에서 발생하는 오염물질의 배출특성, 미세먼지의 입경분포, 오염물질의 배출계수를 산정하였으며 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

도장시설에서 VOCs, 카보닐화합물, 미세먼지, PAHs의 시료를 채취하여 분석한 결과 VOCs와 미세먼지의 배출량이 대부분을 차지하고 있으며 카보닐화합물과 PAHs는 미량으로 배출되고 있음을 확인할 수 있었다.

미세먼지의 경우 3사 도료 모두 TSP 중 PM₁₀이

약 98% 이상 차지하고 있으며 스프레이 분무시간이 긴 상도 유색공정에서는 4.0~5.0 μm의 입경범위에서 세 도료 모두 농도가 가장 높은 경향을 보였다.

도장시설에서 발생하는 오염물질을 페인트 사용량(1 kg)과 단위면적에 따른 페인트 제조사(J사, K사, R사)의 평균 배출계수를 산정한 결과 도료 3사에서 VOCs, 카보닐화합물, 미세먼지, PAHs는 평균적으로 페인트 1 kg당 327.81 g, 5.98 g, 336.70 g, 0.0078 g 배출되며 단위면적당 171.55 g, 3.10 g, 176.24 g, 0.0036 g 배출되는 것으로 나타났다.

현재까지 자동차 도장시설에서 배출되는 오염물질 특성에 관한 연구는 VOCs가 대부분이었으나 본 연구 결과를 통해 카보닐화합물, 미세먼지, PAHs도 도장시설에서 배출되고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 향후 자동차 도장시설에서 배출되는 오염물질에 대해 효과적으로 관리하기 위해서 VOCs 외 카보닐화합물, 미세먼지, PAHs 등과 같은 HAPs의 배출특성에 관한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 서울녹색환경지원센터의 “서울시 자동차 도장시설에서 발생하는 HAPs와 미세먼지의 특성조사 및 관리방안 마련 연구”에 의하여 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

References

- Gale, F.H. (1994) The Clean Air Act Amendments : Updated Strategies : a Practical Handbook for Compliance Planning, TRC Environmental Corporation, US.
- Gong, S.-Y. and M.-J. Lee (2011) A study on Improvement of Management System for Specific Hazardous Air

- Pollutants-emitting Facilities, Korea Environment Institute Research Report, 72-73.
- Kim, K.-R., Y.-R. Choi, Y.-M. Lee, E.-G. Jeong, S.-M. Gwon, H.-K. Kim, C.-H. Lee, J.-H. Shin, S.-C. Lee, S.-M. Eo, J.-S. Shin, and M.-Y. Kim (2005) The Characteristics of Emission Gas from Automobile Coating Facility Atmospheric, Report of Seoul Metropolitan City Institute of Health & Environment, 41, 322-328.
- Kim, K.-T., D.-S. Jaegal, J.-H. Choi, J.-S. Kim, H.-G. Kim, M.-J. Lee, and J.-Y. Hyun (2006) Characteristics of the THC Emission from Painting Facilities, Report of Incheon Metropolitan City Institute of Health & Environment, 10, 185-195.
- Kwon, S.-M., Y.-R. Choi, Y.-M. Lee, J.-H. Shin, S.-M. Eo, J.-H. Kim, and M.-Y. Kim (2006) The Estimation on the Concentrations of Odorants (VOCs) from Automobile Coating Facilities in Seoul, Report of Seoul Metropolitan City Institute of Health & Environment, 42, 363-370.
- Ministry of Environment (2004) VOC Environmental management Guideline for Automobile Paint Facility.
- Ministry of Food and Drug Safety (2010) Risk Profile.
- Seoul metropolitan government of climate & environment department (2011) Current status in management of air pollutant emission facilities.
- Song, B.-J., S.-M. Lee, G.-J. Cho, J.-G. Cho, P.-J. You, and G.-G. Kim (2012) VOC/HAPs Emission Characteristics & Adsorption Evaluation for Paint Products in Busan Area, Report of Busan Metropolitan City Institute of Health & Environment, 34(5), 316-325.
- Yoo, E.-C., G.-J. Cho, and Y.-T. Kim (2004) Study on the Characteristics of THC Emission in Paint and Dry Booths, Report of Busan Metropolitan City Institute of Health & Environment, 14(2), 60-77.