

# 아스팔트 도로포장 작업자의 아스팔트 흙 및 다환방향족탄화수소 노출수준 평가

박현희<sup>1,2\*</sup> · 황은송<sup>1</sup> · 김성호<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원, <sup>2</sup>서울대학교 보건대학원

## Asphalt Fumes and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons(PAHs) Exposure Assessment among Asphalt Road Paving Workers

Hyunhee Park<sup>1,2\*</sup> · Eunsong Hwang<sup>1</sup> · Sungho Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Occupational Safety and Health Research Institute,

<sup>2</sup>Graduate School of Public Health, Seoul National University, Seoul, Korea

### ABSTRACT

**Objectives:** The objective of this study was to evaluate asphalt fumes and PAHs exposure among asphalt road paving workers.

**Methods:** Task-based personal air samplings(n=41) were carried out in 3 asphalt road paving construction sites using PTFE (polytetrafluorethylene) filters for asphalt fume and XAD-2 with glass fiber filters for PAHs. The concentration of fumes and PAHs were showed by four different job(paver finisher operator, paving laborer(raker), macadam roller operator and tire roller operator).

**Results:** The geometric mean(GM) concentration of asphalt fumes as benzene soluble aerosol was highest at paving laborers(42.32  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), followed by in order, paver finisher operators(41.57  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), macadam roller operators(31.9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), and tire roller operators(30.31  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). The GM of total PAHs concentration was highest at paver finisher operators(37.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), followed by in order, paving laborers(20.13  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), tire roller operators(8.66  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), and macadam roller operators(6.23  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). The results of the evaluation of 16 compounds of PAHs showed that the concentrations of naphthalene, achenaphthylene, achenaphthene, pyrene, fluorene and benz(a) anthracene was higher than those of other PAHs compounds and as the carcinogenic substances, benzo(a)pyrene, and debenz(a,h) anthracene were detected. The benzo(a)pyrene equivalent concentration(BaPeq) was 2.81  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  at paver finisher operators, 2.07  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  at paving laborers, 0.41  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  at tire roller operators and 0.22  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  at macadam roller operators. Asphalt road paving workers have higher benzo(a)pyrene equivalent(BaPeq) values even though at lower total PAHs concentration than workers in steel pipe coating and tar industry.

**Conclusions:** Asphalt road paving workers were found to have risk of carcinogen exposure due to higher Benzo(a)pyrene equivalent concentration(BaPeq) than other PAHs exposure occupations. This study confirmed the carcinogenic hazards among asphalt paving workers.


**Key words:** asphalt fume, benzo(a)pyrene, polycyclic aromatic hydrocarbons, road paving workers


## I 서 론


아스팔트(asphalt)란 원유의 추출과정에서 최종적으로 남는 흑갈색에서 검은색을 띠는 액체 또는 반고체 상태의 석유화합물로, 유기화합물과 미량의 무기화합물이 포함된 수 천종 이상의 고분자 탄화수소로 구성되어 있다(Lee et al., 2012). 일반적으로 미국에서는

아스팔트, 영국에서는 비투멘(bitumen)으로 불리며 도로포장과 지붕방수용으로 주로 사용된다. 아스팔트를 도로포장용으로 사용하기 위해서는 아스팔트에 굵은 골재(자갈, aggregate), 잔골재(모래, sand) 또는 포장용 채움재(석분 등)등을 혼합하여 고온에서 가열한 아스팔트 콘크리트(asphalt concrete), 일명 아스콘을 생산하여 사용한다.

\*Corresponding author: Hyunhee Park, Tel: 052-7030-901, E-mail: phh2000@kosha.net  
Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA, 400, Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan, Republic of Korea, 44429  
Received: August 7, 2018, Revised: September 12, 2018, Accepted: September 14, 2018

 Hyunhee Park <https://orcid.org/0000-0003-1506-9505>

 Eunsong Hwang <https://orcid.org/0000-0003-3487-2096>

 Sungho Kim <https://orcid.org/0000-0002-0158-1244>

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.

아스팔트 포장작업은 덤프트럭으로 실어온 아스콘을 포설장비(paver finisher) 차량에 쏟은 후, 포설장비 차량이 일정한 두께로 아스콘을 도포하면 포장특공(rakers)들이 차량을 따라가면서 평탄화 및 수정 작업을 수행하게 된다. 이후 포장된 도로를 머캐덤 롤러(macadam roller, 쇠바퀴 장착) 차량이 지나가면서 1차 다짐을 하게 되고, 이후 타이어 롤러(tire roller, 고무바퀴 장착) 차량이 2차 다짐작업을 하는 공정으로 이루어진다. 아스콘은 저장할 수 없으므로 도로포장 현장에서 필요한 양만큼 주변의 아스콘 제조업체에서 바로 생산하여 공급하는 형태이다. 생산된 아스콘은 현장에 도착할 때까지 약 160℃ 이상의 고온의 상태를 유지하여야 하므로, 고온의 아스콘을 바닥에 일정한 두께로 포설하고 다짐작업을 실시하는 작업과정에서 아스콘에 함유되어 있는 아스팔트 흙 및 다환방향족탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)가 작업자에게 노출된다.

국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)는 도로 포장 작업에서 노출되는 아스팔트 흙의 발암 연관성에 대한 근거는 아직 충분하지 않으나, 발암성과 관련한 지속적인 연구 보고 등과 관련하여 이를 발암가능등급인 Group 2B(possible carcinogen)로 지정하였다(IARC, 2013). 또한, 지붕방수나 매스틱(합성고무 등이 첨가된) 아스팔트 취급 작업 중 노출되는 아스팔트 흙의 발암 연관성에 대해서는 제한적인 증거 있으며, 특히, 폐암과 구강, 인두, 후두, 식도 등 상부 호흡소화관에서 발암과는 연관성이 확인되었다고 하였다(IARC, 2013). 아스팔트 흙에 의한 비발암 위험으로는 아스팔트를 취급하는 건설현장 작업자를 대상으로 한 설문조사를

통해 피부, 눈 자극, 오심, 복통, 두통, 피로 등 급성건강영향이 있다는 보고가 있었고(Butler et al, 2001), 아스팔트 흙 노출 근로자가 비노출근로자와 비교하여 인후염 발생률이 높고, 눈, 코, 목의 자극증상도 더 높다는 연구결과가 있었다(Tepper et al., 2006). 아스팔트 흙 노출을 통한 발암성 위험은 함유되어 있는 PAHs가 주요 원인물질로, PAHs는 2개 이상의 벤젠고리를 갖는 방향족 탄화수소이다. PAHs는 주로 석유화학제품을 취급하거나 화학연료나 유기물의 불완전 연소과정에서 생성되어 작업자에게 노출되며, 아스팔트의 원재료인 원유를 고온으로 가공하는 과정에서 생성된다. PAHs는 잔류성이 크고, 생물농축이 되며, 발암, 생식변이원성이 있는 것으로 알려져 있다. 특히 피부암, 폐암, 방광암, 신장암, 유방암 등을 유발하는 것으로 알려져 있고, 최근 동물실험과 생체시료를 통한 연구에서 아스팔트 흙 중의 PAHs 노출에 의해 산화스트레스가 증가하여 DNA에 생식변이를 유발할 수 있다는 연구가 보고되었다(Bal et al., 2018). 국내 아스팔트 도로 포장작업에 대한 PAHs의 노출농도에 대해서는 현재까지 연구된 바가 없다. 본 연구에서는 아스팔트 도로포장 작업 중 직무에 따른 아스팔트 흙 및 PAHs의 노출농도 수준을 평가하고, PAHs의 구성성분 특성을 살펴보고자 한다.

## II. 대상 및 방법

### 1. 연구대상

아스팔트 도로포장을 실시하는 산업단지 1개소, 국도 건설현장 2개소를 대상으로 2017년 6월 ~ 7월 사이 아스팔트 흙 및 PAHs 농도를 평가하였다(Table 1). 측정위

Table 1. Target monitoring workplace

Site	A	B	C
Location(City)	Gimhae	Busan	Yangsan
Road type	Road in Industrial complex	Natioanl road	Natioanl road
Function of road	General Road	Bridge	General Road
Asphalt type	General Ascon	General Ascon	General Ascon
Pavement	Middle-Layer Pavement	Middle-Layer Pavement	Top-Layer Pavement
Paving tickness	19 mm	10 mm	19 mm
Sampling period	June, 2017	June, 2017	June, 2017
Sampling mean time(range)	385.2 min(100 ~ 460 min)	331.5 min(142 ~ 401 min)	409.7 min(125 ~ 480 min)
No of sample	16	16	16
Weather(Temp.℃)	Sunny(20~25℃)	Sunny(22~26℃)	Sunny(20.5~25℃)
Wind velocity	> 1 m/s	> 1 m/s	> 1 m/s

차별 2일 연속측정을 실시하였으며 포장작업은 하루 8시간이상 연속으로 수행되어 일 6시간 이상 측정을 실시하고 8시간 가중평균농도로 평가하였다. 이번 평가에서는 포설장비 운전원(paver operator, n=6), 포장특공(raker, n=24), 머캐덤 로올러 운전원(macadam roller operator, n=8), 타이어 로올러 운전원(tire roller operator, n=4)을 대상으로 평가하였다.

## 2. 측정 · 분석방법

### 1) 아스팔트 흠(벤젠추출물, Asphalt fumes as Benzene soluble aerosol)

아스팔트 흠에 대한 측정 및 분석은 미국국립산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)의 분석방법 #5042에 따라 실시하였다(NIOSH, 2003). 채취매체는 37 mm PTFE 필터(2  $\mu$ m pore size, SKC, USA)를 3-piece cassette에 장착하고 고유량 시료채취기(MSA Escort Elf, USA)를 사용하여 약 2 lpm 유량으로 채취하였다. 현장 및 실험실 공시료를 분석하여 보정을 실시하였다. 시료채취기는 유량보정기(Dry cal, Defender 520-M, MesaLabs, USA)를 사용하여 시료채취 전, 후에 보정을 실시하였다. 시료채취 전, 후의 PTFE 필터(37 mm, 2  $\mu$ m pore size, SKC, USA)의 무게를 전자저울(Mettler Toledo, XP2U, Switzerland, 해독도: 0.1  $\mu$ g)에 달아 총 분진의 양을 평가하였다.

총 분진의 평가가 끝난 PTFE 필터는 흡후드 내에서 15 ml 실험관 튜브에 담고, 벤젠 3 ml를 넣은 후, 초음파 발생장치(Branson 8510, USA)로 20분간 추출하였다. 벤젠 추출물은 유리 피펫(glass pipet)을 사용하여 2 ml 분취한 뒤에 실린지(hydrophobic PTFE, Millipore)를 사용하여 여과하였다. 여과한 액은 무게를 미리 칭량해둔 계량용 접시에 담고, 진공오븐(OV-12, JEIO TECH, Korea)에서 약 2시간정도 건조시킨 후에 다시 무게를 달아서 벤젠이 휘발되고 난 후 남아있는 무게를 통해 농도를 계산하였다. 오븐의 온도와 압력은 40°C, 50~200 mmHg으로 설정하였다. 아스팔트 흠의 검출한계는 공시료의 표준편차의 3배수로 0.0357 mg/시료 이었다.

### 2) 다환방향족 탄화수소

다환방향족 탄화수소(PAHs)에 대한 측정 및 분석은 NIOSH #5506에 따라 실시하였다(NIOSH, 2003). 채취매체는 37 mm, 2  $\mu$ m PTFE 필터와 washed XAD-2(100 mg/50 mg, ORBO 43, Supelco)를 연결하여 사용하였으

며, 고유량 시료채취기(MSA Escort Elf, USA)를 유량 2 l/min으로 설정하고 채취하였다. 시료는 햇빛(열과 자외선)에 노출되지 않도록 시료를 채취하는 동안과 채취 후 은박지로 감싸고, 냉장보관하여 운송하였으며, 실험실 운송 직 후, 전처리 하여, 0°C이하에서 보관하였다. 현장 공시료 및 실험실 공시료를 분석하여 공시료에 대한 보정을 실시하였다. 시료채취기는 유량보정기(Dry cal, Defender 520-M, MesaLabs, USA)를 사용하여 시료채취 전, 후에 보정을 실시하였다.

시료 채취 후, PTFE 필터와 washed XAD-2의 흡착제는 시험관(15 ml high-clarity polypropylene conical tube)으로 각각 옮기고, 아세토니트릴 5 ml를 주입한 후, 뚜껑을 닫고 30 ~ 60분 동안 초음파 처리를 하였다. 추출된 샘플은 0.45  $\mu$ m 실린지 필터(syringe filter)를 이용하여 여과하였으며 액체크로마토그래프(waters acquity UPLC H-Class, USA)-형광검출기(fluorescence detector, 350 nm /397 nm)를 사용하여 분석하였다. PAHs의 세부화합물 중 Naphtalene, Acenaphthene, Phenanthrene, Anthracene, Fluoranthene, Pyrene, Benz(a)anthracene, Chrysene, Benzo(b)fluoranthene, Benzo(k)fluoranthene, Benzo(a)pyrene, Fluorene, Acenaphthylene, Debenz(a,h) anthracene, Benzo(ghi)perylene, Indeno(1,2,3-C,D) pyrene의 16개 물질에 대한 농도를 평가하였다. PAHs의 세부화합물 중 독성이 가장 큰 것으로 알려져 있는 Benzo(a)pyrene을 독성값 1로 하여 다른 PAHs 세부화합물의 독성계수(Toxic Equivalent Factors, TEF)와 산술평균값을 곱하여 독성등가계수(Benzo(a)pyrene Equivalent Factors, BaPeq)를 산출하였다. 세부화합물의 TEF는 Naphthalene, Acenaphthylene, Acenaphthene, Fluorene, Phenanthrene, Fluoranthene, Pyrene은 0.001, Anthracene, Chrysene, Benzo(ghi)perylene는 0.01, Benz(a)anthracene, Benzo(b)fluoranthene, Benzo(k)fluoranthene, Indeno(1,2,3-C,D) pyrene는 0.1, Debenz(a,h) anthracene는 1로 환산하였다(Zhao et al., 2016).

### 3) 자료분석

측정결과는 자료의 정규성 검정을 실시하여 분포 특성을 살펴보았으며, 분석물질에 따라 정규분포 또는 대수정규분포를 따르지 않는 평가그룹이 존재하여 평균값을 산술평균과 기하평균으로 모두 제시하였다. 다만, 자료의 형태가 대수정규분포에 가까워, 로그 변환한 뒤 분산분석(ANOVA), T-검정(T-test) 및 비모수검정을 통

해 직종별 평균을 비교하였다. 자료 분석을 위한 통계처리 는 PASW version 18.0(SPSS Ins, Chicago, USA)을 이 용하였다.

### III. 연구결과

#### 1. 아스팔트 흙(벤젠추출물) 노출농도

아스팔트 도로포장을 실시하는 현장 3개소에서 측정 한 아스팔트 흙(벤젠추출물) 농도를 직종별로 살펴보면, 포장특공에서 기하평균 42.32  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (N.D. ~ 308.71  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )로 가장 높았고, 다음으로 포설장비 운전원 41.57  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (N.D. ~ 259.01  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 머캐덤 로올러 운전원 31.9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (N.D. ~ 171.55  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 타이어 로올러 운전원 30.31  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (N.D. ~ 72.13  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )수준이었다(Table 2).

총분진 중 아스팔트 흙 농도를 직종에 따라 살펴보면, 포장특공에서 기하평균 212.95  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (78.38 ~ 691.43  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )로 가장 높았고, 다음으로 포설장비 운전원 148.33  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (63.15 ~ 273.57  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 타이어 로올러 운전원 140.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (103.71 ~ 285.11  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 머캐덤 로올러 운전원

83.39  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (39.95 ~ 295.16  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 수준이었다. 총 분진 중 아스팔트 흙은 직종별 자료의 분포가 대수 정규분포 하는 특성이 있었고, 벤젠추출방식으로 분석한 아스팔 트 흙의 경우 포설장비 운전원 자료에서만 대수 정규분 포하는 특성이 있었다. 총 분진 중 아스팔트 흙 의 경우, ANOVA 분석결과, 직종에 따라 농도차이가 통계적으 로 유의하게 나타난 반면(95% 유의수준), 비모수 검정방 법으로 분석한 아스팔트 흙(벤젠추출물)농도의 경우 직 종 간 농도에 차이가 없는 것으로 나타났다 (Table 2).

#### 2. 다환방향족 탄화수소(PAHs) 노출농도

아스팔트 작업 중 노출되는 PAHs 평가 결과, 총 PAHs 기하평균 농도는 포설장비 운전원에서 37.496  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (17.545 ~ 73.203  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )으로 가장 높았고, 포장특공 20.131  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1.922 ~ 147.62  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 타이어 로올러 운전원 8.662  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (3.658 ~ 19.698  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 머캐덤 로올러 운전원 6.288  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2.99 ~ 18.618  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )수준이었다(Table 3).

포설장비 운전원에서 평가한 시료의 PAHs 세부물질 별 농도를 살펴보면, Acenaphthylene(8.449  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Benz

Table 2. Concentration of asphalt fume in asphalt road pavement work

(Unit:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

Job	Classification	Asphalt Fume	
		Total	Benzene soluble aerosol
Paver operator (n=6)	Distribution	log-normal	log-normal
	AM*±SD†	164.23±75.94	76.36±92.82
	GM‡ (GSD§)	148.33(1.677)	41.57(3.658)
	Range	63.15~273.57	N.D.**~259.01
Raker (n=24)	Distribution	log-normal	- (p=0.022)
	AM±SD	243.03±133.75	64.85±73.91
	GM(GSD)	212.95(1.701)	42.32(2.386)
	Range	78.38~691.43	N.D.~308.71
Macadam Roller Operator (n=8)	Distribution	log-normal	- (p=0.012)
	AM±SD	109.81±92.08	52.04±61.14
	GM(GSD)	83.39(2.155)	31.9(2.661)
	Range	39.95~295.16	N.D.~171.55
Tire Roller Operator (n=4)	Distribution	log-normal	- (p=0.014)
	AM±SD	154.65±87.21	35.08±24.73
	GM(GSD)	140.5(1.609)	30.31(1.786)
	Range	103.71~285.11	N.D.~72.13
Comparison of average concentration		ANOVA test, p<0.05	Nonparametric Test, p=0.861

\* AM: Arthmatic Mean

† SD: Standard Deviation

‡ GM: Geometric Mean

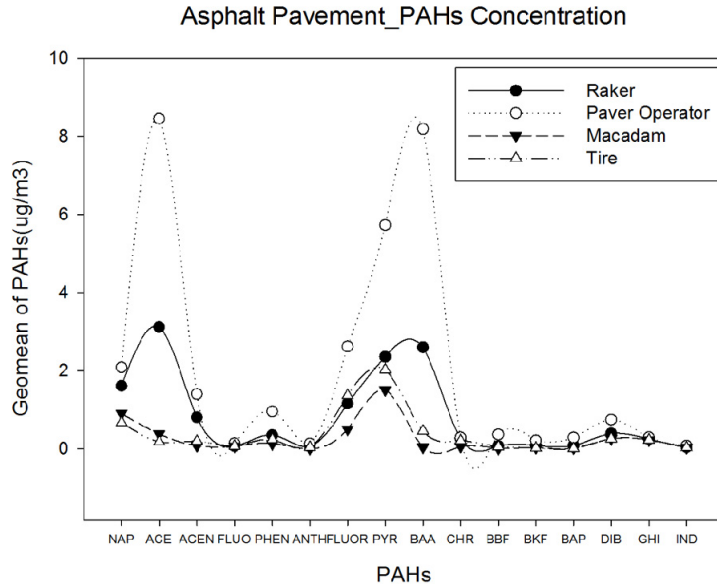
§ GSD: Geometric Standard Deviation

\*\*N.D.: Not Detected



(a)anthracene(8.183  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Pyrene(5.724  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Fluoranthene (2.62  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 순으로 농도가 높았고, 발암위험이 있는 것으로 알려진 Benzo(a)pyrene(0.29  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Debenz(a,h)

anthracene(0.749  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )도 검출되었다. 포장특공 작업자에서도 Acenaphthylene (3.119  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Benz(a)anthracene (2.601  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Pyrene(2.358  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Naphthalene(1.615  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )



※ NAP: Naphthalene, ACE: Acenaphthylene, ACEN: Acenaphthene, FLUO: Fluorene, PHEN: Phenanthrene, ANTH: Anthracene, FLOUR: Fluoranthene, PYR: Pyrene, BAA: Benz(a)anthracene, CHR: Chrysene, BBF: Benzo(b)fluoranthene, BAP: Benzo(a)pyrene, DIB: Dibenz(a,h)anthracene, IND: Indeno(1,2,3-C,D)pyrene

Figure 1. Concentration of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Asphalt pavement work (Geometric mean,  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

Table 4. Concentration of polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) in various occupational environments

Occupational Environments	Process	$\Sigma$ PAHs (AM. $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	BaP ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	BaP <sub>eq</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Country	Reference
Asphalt paving	Paver operator	42.3	0.359	2.813	S.Korea	This study
	Raker	32.618	0.267	2.071		
	Macadam roller operator	7.675	0.104	0.248		
	Tire roller operator	10.792	-	0.410		
Paint Manufacturing	-	17.48	0.3	0.394	S.Korea	Lee JS, 2004
Steel pipe coating	-	526.54	0.7	1.986		
Tar Manufacturing	Personal	17.09	0.003	0.034	S.Korea	Lee K, 2005
	Environmental	12.97	0.11	0.46		
Carbon black industry	packaging	1.953	0.341	0.566	Taiwan	Tsai P et al., 2001
	palletizing	1.449	0.285	0.314		
Traffic policeman	-	0.867	0.0262	0.0824	China, Tianjin	Hu Y et al, 2007
Highway toll station	-	0.330	0.0216	0.0413	China, Tianjin	Zhao Y et al., 2016
Vehicle Inspection factory	Bus line	0.112	0.00135	0.00438	China, Beijing	Li et al., 2013
	Gasoline line	0.0561	0.00131	0.00334		
	Diesel line	0.199	0.00434	0.0124		
Vehicle Inspection factory	-	1.884	0.007	0.017	S.Korea	Im HS et al., 2004
Waste Incineration	-	6.066	0.015	0.039		

m<sup>3</sup>) 등의 순으로 농도가 높았고, Benzo(a)pyrene(0.088  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Debenz(a,h)anthracene(0.398  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )이 검출되었다 (Table 3, Figure 1). 머캐덤 로울러 운전원에서는 Benzo(a)pyrene(0.024  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )은 검출되었으나 Debenz(a,h)anthracene은 검출한계 미만으로 평가되었다. 타이어 로울러 운전원에서는 Benzo(a)pyrene, 및 Debenz(a,h)anthracene 모두 검출한계 미만으로 평가되었다 (Table 3, Figure 1).

### 3. 다환방향족 탄화수소(PAHs) 독성등가계수

PAHs의 세부물질 중 독성이 가장 큰 것으로 알려져 있는 Benzo(a)pyrene을 독성값 1로 하여 다른 PAHs 세부화합물의 독성정도(TEF, Naphthalene, Acenaphthylene, Acenaphthene, Fluorene, Phenanthrene, Fluoranthene, Pyrene은 0.001, Anthracene, Chrysene, Benzo(ghi)perylene는 0.01, Benz(a)anthracene, Benzo(b)fluoranthene, Benzo(k)fluoranthene, Indeno(1,2,3-C,D) pyrene는 0.1, Debenz(a,h)anthracene는 1로 환산)와 산술평균값을 곱하여 독성등가계수(BaPeq)를 산출하였다(Table 3). 각 작업별 독성등가계수의 합은 포설장비 운전원 2.813  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 포장특공 2.071  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 머캐덤 로울러 운전원 0.248  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 타이어 로울러 운전원 0.410  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다(Table 4). 포설장비 운전원의 독성등가계수를 세부물질별로 살펴보면, Benz(a)anthracene(1.2656  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Debenz(a,h)anthracene(1.032  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Benzo(a)pyrene(0.359  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 순으로 높았고, 포장특공 작업자에서도 Benz(a)anthracene(1.1322  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Debenz(a,h)anthracene(0.58  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Benzo(a)pyrene(0.267  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 순으로 높았다.

## IV. 고 찰

아스팔트 도로포장을 실시하는 건설현장 3개소에서 아스팔트 흙(벤젠추출법) 농도의 직종별 차이를 살펴보면, 포장특공(42.32  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 포설장비 운전원(41.57  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 머캐덤 운전원 (31.9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 타이어 운전원(30.31  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 순으로 높았는데, 이는 고온의 아스팔트가 현장에 도착하고 시간이 지남에 따라 아스팔트 흙의 노출수준이 감소하는 것을 알 수 있었다. 작업별 아스팔트 흙의 기하평균농도는 노출기준 500  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 약 10% 수준으로 낮았으나, 작업별 기하표준편차는 1.79 ~ 3.66 수준으로 농도의 변이가 큰 특징이 있어, 대수정규분포상의 95% 상위 농도값(추정)을 구하면 포설장비 운전

원의 경우 노출기준의 약 50% 이상 수준인 350.97  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고 포장특공 작업자에서도 176.98  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  수준이었다.

국내에서 아스팔트 흙에 대한 노출기준 개정 연구에서 아스콘을 취급하는 다양한 작업장을 대상으로 아스팔트 흙에 대한 평가를 실시하였는데(Jeong et al., 2006), 이중 한 개의 도로포장 현장에서 아스팔트 흙 농도를 평가한 결과, 3명의 포장특공 작업자(포설장비 보조자)에서 각 410  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 290  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 210  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 농도가 가장 높았고, 포설장비 운전원 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 머캐덤 운전원 130  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 타이어 운전원은 검출한계(30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 미만이라고 보고하였다. Jeong et al.(2006)의 노출평가 결과는 이번 연구보다 약 10배 가량 높은 농도였는데, 이는 과거 아스팔트 포설장비 장비에서는 아스콘을 담은 호퍼에 환기장치가 설치되지 않은 경우가 대부분이었으나, 최근에 제작된 포설장비의 경우 아스콘을 담은 호퍼에 아스팔트 흙을 제거하는 환기장치가 설치되어 있어 농도수준에 차이가 큰 것으로 평가된다. 또한, 작업장소가 시내 중심이거나 주변에 건물이 많아 자연환기가 어려운 경우 노출농도 수준은 높아지는데, 이번 연구에서는 신설 도로포장 현장에서 작업을 실시하여 주변에 건물이 없고 개방된 환경에서 평가가 진행된 점이 기존 연구와 비교하여 농도수준이 매우 낮았다고 평가된다. 다만 이번 연구는 3개 사업장에서 41개 시료에 대한 평균농도이며, 이전 노출평가 자료는 한 개 사업장을 대상으로 하였고, 이번 연구의 최대(max) 노출농도 값은 Jeong et al.(2006)의 노출농도와 비교하여 유사한 수준을 나타내었다.

NIOSH에서 1994년에서 1997년간 미국 내 캘리포니아 등 다양한 지역에서 수행한 아스팔트 도로 포장작업에 대한 아스팔트 흙(벤젠추출물)노출평가 결과(Butler et al, 2001), 포장 및 포설장비 작업(paver operators, screed auger operators)에서 약 82 ~ 590  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 로울러 운전원에서 30 ~ 22  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 단순노무 작업자에서 55 ~ 170  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이라고 보고하여 이번 연구의 노출농도 범위와 유사한 수준이었다.

벤젠추출방법이 아닌 총분진 중 아스팔트 흙의 농도의 경우 이번 연구에서는 포장특공(212.95  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 포설장비 운전원(148.33  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 타이어 로울러 운전원(140.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 머캐덤 로울러 운전원(83.39  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 수준이었다. Jeong et al.(2006)의 연구에서는 아스팔트 생산 사업장에서는 각 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 170  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 아스콘 제조사업

장에서는 각  $770 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $860 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 도로포장 현장에서는  $1,010 \mu\text{g}/\text{m}^3$  수준이었다고 보고하였다. 국내 관공서 주차장 아스콘 포장 작업에서 아스팔트 흡 노출평가를 실시한 연구에서는(Choi et al., 2000), 포설장비 보조원  $7,970 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 포설장비 운전자  $3,430 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 아스콘 포설  $370 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 타이어 로올러  $450 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 텐덤 로올러  $360 \mu\text{g}/\text{m}^3$  수준이었고, 15개 시료의 농도 평가결과 기하평균  $940 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다고 보고하였다. Hicks et al.(1995)의 연구에서는 기하평균  $370 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , Tepper et al.(2006)의 연구에서는 포설장비 운전원(paver operator, screed operator)  $220 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 포장특공(raker)  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 로올러 운전원(roller operator)  $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 이번 연구결과와 유사하였다. Chung et al.(2018)의 연구에서는 중국 상해 및 홍콩의 아스팔트 도로 포장현장 12개소를 대상으로 아스팔트 흡 농도를 평가한 결과 포설장비 운전자의 노출농도 범위는  $167 \sim 7,801 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 매우 다양하였고 기하평균은  $1,361 \mu\text{g}/\text{m}^3$  수준이라고 보고하였다. 포장특공의 경우  $514 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ( $157 \sim 3,908 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 로올러 운전자는  $133 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ( $47 \sim 300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 수준이라고 보고하였다. 아스팔트 흡은 작업장소의 특성 및 위치, 측정일의 풍속, 날씨, 아스팔트의 종류 등에 따라 농도가 매우 상이함을 알 수 있으며, 작업종류별로는 포설장비(paver operator) 및 포장특공(raker)에서 가장 높고, 로올러 작업에서는 상대적으로 낮은 농도수준임을 알 수 있다.

아스팔트 작업 중 노출되는 총 다환방향족탄화수소(Total PAHs)의 기하평균 농도는 포설장비에서 가장 높았지만, 포장특공 농도는 변이가 큰 특성이 있어 95% 상한치 농도(추정)를 구하면  $118.618 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았고, 포설장비  $93.458 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 타이어 운전원  $34.534 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 머캐덤 로올러  $18.362 \mu\text{g}/\text{m}^3$  이었다. 각 작업의 기하표준편차는 포장특공에서 2.94로 가장 컸고, 포설장비 작업에서 1.74로 가장 작았다.

아스팔트 도로 포장작업 중 PAHs의 16개 세부화합물에 대한 평가결과, Pyrene, Benz(a)anthracene, Fluoranthene, Naphthalene, Acenaphthylene, Acenaphthene 농도가 다른 PAHs 농도보다 높은 특징이 있었다. Hicks et al. (1995)의 연구에서 도로포장작업자에 대한 PAHs 노출평가를 실시하였는데(n=9), PAHs의 세부화합물 중 Naphthalene( $5.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Acenaphthene( $1.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Acenaphthylene ( $0.69 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Fluorene( $0.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Phenanthrene( $0.43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Fluoranthene( $0.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Pyrene ( $0.17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Benzo(e)pyrene( $0.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Chrysene( $0.13$

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Anthracene( $0.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 이 검출되었다.

국내 페인트제조업, 강관도포업(Lee et al., 2004), 화학제품제조업 타르 생산작업(Lee et al., 2005)에서 총 PAHs를 평가한 연구결과를 살펴보면, 페인트제조업에서 기하평균  $17.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ( $2.6 \sim 148.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 강관도포업에서  $526.55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ( $112.1 \sim 6,311.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )이었고, 화학제품제조업 타르 생산작업에서 기하평균  $10.631 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (기하표준편차 2.16)이라고 보고하였다. 아스팔트 도로포장작업 중 PAHs를 타르 생산작업, 페인트제조업에서의 평가결과와 비교하면, 포설장비, 포장특공 작업과 유사하거나 다소 높은 수준이었다.

다만, PAHs 독성등가계수(BaPeq)를 비교하면, 강관도포업  $1.985 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 페인트 제조업  $0.394 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 타르 제조업  $0.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$  수준이었으나, 아스팔트 포설장비 및 포장특공 작업에서는 BaPeq가 각  $2.813 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $2.071 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 총 PAHs농도가 높았던 강관도포보다도 독성이 더 높음을 알 수 있었다. 이는 아스팔트에 독성이 높은 Benzo(a)pyrene Benz(a)anthracene, Debenz(a,h) anthracene 농도가 상대적으로 높았기 때문이며 향후 아스팔트 포장작업자에 대한 발암유해도 평가가 필요함을 알 수 있다.

국내 자동차 배기가스 검사소에서 평가한 총 PAHs는 산술평균으로  $1.884 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 표준편차  $1.662 \mu\text{g}/\text{m}^3$  수준이었고(Im et al., 2004), 중국 베이징의 자동차 검사소에서 평가한 자료에서는 가솔린 엔진 차량 검사의 경우 산술평균  $0.056 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (표준편차  $0.018 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 버스  $0.111 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (표준편차  $0.041 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 디젤차량  $0.199 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (표준편차  $0.113 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 수준으로(Li et al., 2013), 아스팔트 도로포장 작업이 자동차 검사소와 비교하여 약 10배 이상 높은 PAHs 농도에 노출되고 있음을 알 수 있다. 일반 대기 중 PAHs 농도를 평가한 자료(Chen et al., 2016)에서 중국 시안(Xian)에서  $0.087 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 대한민국 서울에서  $0.0263 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 미국 아틀란타  $0.002 \sim 0.006 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 대만, 일본 등에서는 약  $0.002 \sim 0.005 \mu\text{g}/\text{m}^3$  수준이라고 보고하였다. PAHs의 16개 세부화합물 중 나프탈렌(Naphthalene)의 경우 국내 및 ACGIH에서 노출기준을 10 ppm으로 지정하고 있으며, 일부 물질(Phenanthrene, Anthracene, Pyrene, Benzo(a)pyrene)에 대해서 노출기준이  $0.2 \text{ mg}/\text{m}^3$ 로 정하고 있다. 이번 연구결과는 노출기준과 비교하면 기준의 10% 미만 수준으로 낮으나 대기환경 중 농도(서울기준)와 비교하면 약 400배 이상 높은 수준임을 알 수 있었다.



## V. 결 론

본 논문은 아스팔트 도로포장작업을 실시하는 건설현장을 대상으로 직무에 따른 아스팔트 흙 및 다환방향족탄화수소(PAHs) 노출 농도수준을 살펴보았다. 주요 연구결과는 다음과 같다.

1. 아스팔트 흙(벤젠추출법) 농도는 포장특공(42.32  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 포설장비 운전원(41.57  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 머캐덤 운전원(31.9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 타이어 운전원(30.31  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 순으로 노출 농도가 높았으며, 고온의 아스팔트가 현장에 도착한 후, 작업이 진행됨에 따라 노출농도가 감소함을 알 수 있었다. 평균농도 수준은 노출기준 500  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 약 10% 수준으로 낮았으나, 농도의 변이가 큰 특성이 있어 향후 다양한 작업환경을 대상으로 하는 노출평가 연구가 요구된다.

2. 총 PAHs의 농도는 포설장비 운전원(37.496  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 포장특공(20.131  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 타이어 로올러 운전원(8.662  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 머캐덤 로올러 운전원(6.288  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 순으로 높았고, 노출기준의 10% 미만 수준이었으나, 대기환경 농도와 비교하면 수백배 높은 농도수준으로 도로 포장작업자들이 작업으로 인한 PAHs에 노출되고 있음을 확인할 수 있었다.

3. 발암유해도를 확인할 수 있는 독성등가계수(BaPeq)를 산출한 결과, 강관도포, 타르 제조업 등 기존 연구의 PAHs 노출평가 결과와 비교하였을 때, 아스팔트 포장작업에서는 총 PAHs 농도는 낮으나 독성등가계수가 높은 특성이 있었다. 특히 PAHs 세부물질 중 발암 의심물질인 Benzo(a)pyrene Benz(a)anthracene, Debenz(a,h) anthracene 농도가 높음을 알 수 있었다.

이번 연구를 통해 아스팔트 도로 포장작업자는 아스팔트 흙 노출농도는 높지 않더라도, 다환방향족 탄화수소 노출에 따른 발암 유해성을 확인할 수 있었다. 아스팔트 도로포장 작업자에 대한 발암유해도 등 건강영향 평가 및 작업환경관리방안 마련에 대한 추가적인 연구가 요구된다.

## References

Bal C, Agis ER, Büyükşekerci M, Gündüzöz M, Tutkun L, Yılmaz ÖH. Occupational exposure to asphalt fume can cause oxidative DNA damage among road paving workers. *Am J Ind Med.* 2018 Jun;61(6):471-476

Butler M.A., Burr G., Dankovic D., Lunsford R.A., Miller A. Hazard Review: Health effects of occupational exposure to asphalt. 2001, Feb. <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2001-110/pdfs/2001-110.pdf>

Im HS, Yang MH, Sul DG Hong HH, Lee EI. Composition of air polycyclic aromatic hydrocarbons in automobile emission inspection offices and a waste incinerating company and urinary 1-hydroxypyrene and 2-naphthol. *J Korean Soc Occup Environ Hyg*, 2004;14(2):134-143

IARC Monographs. Bitumens and bitumen emissions and some N-and S-heterocyclic polycyclic aromatic hydrocarbons (volume 103) 2013

Chen YC, Chiang HC, Hsu CY, Yang TT, Lin TY, Chen MJ, Chen NT, Wu YS. Ambient PM2.5-bound polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Changhua County, central Taiwan: seasonal variation, source apportionment and cancer risk assessment. *Environ Pollut.* 2016 Nov;218:372-382

Choi JW, Mun JS, Won JI, Park HC. Health Hazardous substances in construction work in Korea. *J Korean Soc Occup Environ Hyg*, 2000, 10(1)

Chung D, Wang Y, Zh ao K, Wang D, Oeser M. Asphalt fume exposures by pavement construction workers: current status and project cases. *J. Constr. Eng. Manage* 2018; 144(4):05018002

Hicks JB. Asphalt industry cross-sectional exposure assessment study. *Appl Occup Environ Hyg* 1995;10(10):840-848

Jeong JY. Study on establishment and revising chemical exposure standards(asphalt fume). Research Report of Occupational Safety and Health Research Institute, 2006: 162-193

Lee K. A study on the status of exposure to polycyclic aromatic hydrocarbon(PAHs) and its metabolites among the workers in a chemical factory. PhD diss., Dongguk University, 2004:17-19

Lee JS. The relationship between urinary 8-hydroxydeoxyguanosine and polynuclear aromatic hydrocarbons exposure in Working Environment. PhD diss. Inje University, 2005: 14-15

Lee SB, Jang KW, Kim JH, Kim JH, Jung N. A study in the licensing & certification system to improve asphalt manufacturing facility. National Institute of Environmental Research 2012

Li PH, Kong SF, Geng CM, Han B, Lu B et al., Health risk assessment for vehicle inspection workers exposed to airborne polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in their work place. *Environ Sci Process Impacts.* 2013 Mar;15(3):623-32.

NIOSH Manual of Analytical Methods 4<sup>th</sup> Edition, CDC (Accessed 2018 Sep 14) available from URL: <https://>

[www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/default.html](http://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/default.html)

Tepper AL, Burr GA, Feng HA, Singal M, Miller AK, Hanley KW, Olsen LD. Acute symptoms associated with asphalt fume exposure among road pavers. *Am J Ind Med.* 2006 Sep;49(9):728-39.

Zhao YJ, Shou YP, Mao TY, Guo TY, Li PH. PAHs exposure assessment for highway toll station workers through personal particulate sampling and urinary biomonitoring in Tianjin China. *Polycyclic Aromatic Compounds* 2016:1-10