

고속도로 톨게이트 부스의 공기 중 분진 및 침착 분진 특성

남미란 · 정종현¹ · 피영규^{1*}

대구한의대학교 대학원, ¹대구한의대학교 보건학부

Characteristics of Airborne and Deposited Dust in Expressway Toll Booths

Mi Ran Nam · Jong-Hyoen Jung¹ · Young Gyu Phee^{1*}

Graduate School of Daegu Haany University

¹Faculty of Health Science, Daegu Haany University

ABSTRACT

Objectives: This study was performed to evaluate the total dust, size-selective dust, and heavy metal concentrations generated inside and outside toll booths on an expressway and to identify the source through analysis of the components of the deposited dust.

Methods: A total of 32 samples were collected from eight expressway toll booths. Each total dust sample was collected using a 37 mm PVC filter attached to a personal air sampler. Heavy metal samples were collected according to NIOSH method 7300. The size-selective dust concentrations were identified using a DustMate, and deposited dust was analyzed by WD-XRF and UHR-FE-SEM.

Results: The geometric mean concentrations of the total dust inside and outside the toll booths were 337.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and 342.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. The overall concentrations of TSP, PM₁₀, PM_{2.5}, and PM₁ were higher on the outside of the toll booths, as the particle size of dust was larger, and higher in the underground passage as the dust size was smaller. The real-time analysis of the dust concentrations of TSP, PM₁₀, PM_{2.5}, and PM₁ revealed to be higher at morning and evening times than other times because of heavy traffic. The element components of deposited dust in the toll booth were related to natural sources rather than artificial sources. Among the chemical components in the deposited dust analyzed by WD-XRF, SiO₂ was the highest. For the elements analyzed by UHR-FE-SEM, C was the highest, followed by O, and Si.

Conclusions: In order to reduce the dust concentrations around toll booths on an expressway, it is necessary to periodically clean surrounding areas such as underground passages, and it is also necessary to remove deposited dust inside the toll booth from time to time.

Key words: concentration, dust, expressway, toll booth

I. 서 론

현대사회의 경제성장이 이루어지고 생활수준이 향상됨에 따라 자동차 이용이 증가하여 고속도로를 통한 교통량이 크게 증가하고 있다(Roh et al., 1990). 고속도로 이용 차량이 늘어남에 따라 1일 이용 차량이 2012년 43,689대에서 2016년에는 50,098대로 매년 증가추세를 보이고 있다(KEC, 2016).

고속도로를 포함한 도로에서 발생하는 먼지는 인체에

유해한 중금속 성분이 많이 포함되어 있으며, 도로에 직접적인 영향을 미치는 교통량의 지속적 증가로 그 중요성이 부각되고 있다(Xueli et al., 1993). 이러한 중금속은 도로에서 발생하는 입자상 물질에 포함되어 있기 때문에 이에 대한 연구도 활발하게 진행되어 왔다. 미국의 경우 서부지역을 중심으로 도로먼지의 입자에 대한 연구가 이루어졌고(Venkatram et al., 1999; Abu-Allaban et al., 2003), 유럽은 도로변 대기오염 문제가 대두되면서 도로먼지 및 차량관련 마모입자에 대한

*Corresponding author: Young Gyu Phee, Tel: 053-819-1590, Fax: 053-819-1209, E-mail: yphee@dhu.ac.kr
Faculty of Health Science, Daegu Haany University, 1 Hannydae-ro, Gyeongsan-si, Gyeongbuk 38610

Received: March 20, 2020, Revised: March 24, 2020, Accepted: March 30, 2020

 Mi Ran Nam <https://orcid.org/0000-0003-0042-2003>

 Young Gyu Phee <https://orcid.org/0000-0003-2011-7591>

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.

연구가 수행된 바 있다(Omstedt et al., 2005; Hussein et al., 2008). 또한 중국과 대만도 도로에서 재비산되는 먼지의 유해성이 크다는 점을 감안하여 도로먼지의 분포 및 특성에 관한 연구가 발표되었다(Han et al., 2007; Chiang & Huang, 2009).

고속도로에는 톨게이트 부스에 종사하는 노동자들이 있다. 한국표준직업분류 상 톨게이트 요금수납원은 요금 정산원에 속하며, 이는 시설 사용이나 서비스의 대가로 지불된 현금을 수취하고 거스름돈을 지불하는 일을 수행하는 자를 말한다(KOSTAT, 2007). 이들은 대략 7천여 명에 이르며, 대부분 여성근로자로 구성되어 있다. 또한 이들의 작업환경은 차량통행으로 인한 도로먼지 및 소음노출, 근골격계질환, 야간 교대근무로 인한 생체리듬의 저하 등으로 인해 다양한 건강문제가 유발될 수 있다(KOSHA, 2016). 또한 불안정한 고용형태와 교대업무에 따른 불규칙한 생활, 감정노동과 같은 직무스트레스가 발생하고 있을 뿐만 아니라 자동차 매연 노출 등 열악한 환경에서 근무하고 있다(Kim et al., 2015).

이러한 이유로 톨게이트 근로자를 대상으로 한 연구는 건강유해성(Cha et al., 1988; Park et al., 1990)과 근로환경 실태조사(Kim et al., 2015)가 있으며, 최근 감정노동이 사회적 이슈가 되면서 요금수납원의 직무스트레스에 관한 연구(Nam, 2016)도 이루어진 바 있으나 모두 도로먼지와는 관련이 없는 내용이었다. 그리고 톨게이트 환경평가와 관련된 연구는 도로주변 대기오염(Lee et al., 2004; Kim et al., 2008; Pallavi et al., 2015)과 부스 및 자동차 배기가스로 인한 납 및 가스상 물질(Lee et al., 1988; Roh et al., 1990)이 진행된 바 있으나 그 대상이 대기환경의 오염물질이었다. 또한 외국의 경우에도 고속도로 톨게이트 부스를 대상으로 도로먼지의 입자크기별 특성이나 중금속 농도 등에 대한 노출평가를 수행한 연구는 상당히 드문 실정이다.

따라서 본 연구는 고속도로 톨게이트 부스 안팎에서 발생하는 총분진, 입자크기별 분진 및 중금속 농도를 확인하고, 침착 분진의 성분 분석을 통한 발생원을 규명하여 환경적 관리방안을 제시하고자 하였다.

II. 대상 및 방법

1. 연구 대상

본 연구는 2017년 7월부터 9월까지 경기도 지역 8개소와 경상도 지역 8개소에 위치한 민자 고속도로 톨

게이트를 대상으로 부스 안팎에서 발생하는 총분진과 입자크기별 분진 및 중금속의 농도를 파악하고 침착 분진의 특성을 확인하였다.

2. 연구 방법

1) 공기 중 분진의 채취

(1) 총분진 및 중금속 시료

총분진은 미국 국립직업안전보건연구원(National Institute of Occupational Safety & Health, NIOSH)의 공정시험법 0500에 따라 직경 37 mm, 공극 5 μ m의 PVC Filter(Polyvinyl Chloride, SKC, USA)를 사용하였다. 중금속 분석을 위한 시료는 NIOSH method 7300에 준하여 MCE Filter(37 mm, pore size 0.8 μ m, SKC, USA)를 각각 3단 카세트에 장착하여 측정하였다. 그 후 개인시료채취기(Personal air sampler, Gilian, USA)를 연결하여 2 l/min의 유량으로 바닥면으로부터 1 m 내외 높이에서 1일 작업시간동안 시료를 채취하였다(NIOSH, 2003).

(2) 입자크기별 분진 시료

톨게이트 부스 주변에서 발생하는 실시간 입자크기(TSP, PM₁₀, PM_{2.5} 및 PM₁)별 농도 확인을 위하여 직독식분진측정기(DustMate, Turnkey, U.K)를 활용하였다. 시간에 따른 농도 확인을 위하여 바닥면으로부터 1 m 내외의 높이에서 연속적으로 측정하였다.

2) 시료의 분석

(1) 총분진의 농도

공기 중에서 채취한 총분진은 Micro balance (MSE3.6P-000-DM, Sartorius, Germany)를 이용하여 측정 전·후 3회 칭량한 평균값을 활용하여 중량차를 구하고 공시료의 무게를 보정한 후 농도를 산출하였다.

(2) 중금속의 농도

공기 중 총분진 내 중금속은 유도결합플라즈마발광광도계(Optima 8000, Perkin elmer, USA)를 이용하여 NIOSH Method 7300에 따라 시료를 전처리 한 후 정량분석하였다.

(3) 침착 분진의 성분

한국기초과학지원연구원에 분석을 의뢰하여 고속도로 톨게이트 부스에서 채취한 침착 분진의 원소성분과

화학적 구성성분을 파악하였다.

① 원소의 구성성분 및 함유량

침착 분진은 에너지 분산형 X-선 분광기가 장착된 초 고분해능 전계방출형 주사전자현미경(Ultra High Resolution Field Emission Scanning Electron Microscope, Model S-4800, Hitachi, Japan)을 이용하여 분석하였다. 채취한 침착 분진은 고르게 분포시킨 후 디스크에 0.5 g를 압축하여 입자크기와 원소 구성성분 및 함유량을 확인하였다.

② 화학적 구성성분

침착 분진의 화학적 구성성분은 파장분산형 X-선 형광 분광기(Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometer, Model PW2400, Philips, Netherland)를 활용하였으며, 시료와 di-lithium tetraborate (Li₂B₄O₇)을 혼합한 후 유리편을 제작하여 파악하였다.

3) 자료의 분석

입력된 자료는 SPSS(Version 23.0K, USA) 프로그램을 활용하여 분석하였다. 고속도로 톨게이트 부스 안팎의

총분진과 중금속 농도는 Mann Whitney U test를 활용하여 비교하였고, 입자크기별 측정 위치에 따른 농도 차이는 Kruskal-Wallis test를 수행하여 확인하였다.

III. 결 과

1. 공기 중 분진의 특성

1) 톨게이트 부스의 총분진 농도

고속도로 톨게이트 부스 안팎의 총분진 기하평균 농도를 확인한 결과를 Table 1에 제시하였다. 부스 안의 경우 337.5 µg/m³, 부스 밖은 342.7 µg/m³이었고 평균 I/O ratio도 0.99로 나타나 유의한 차이를 보이지 않았다.

2) 톨게이트 부스의 입자크기별 분진 농도

톨게이트 부스 안팎 및 지하통로를 구분하여 TSP (Total Suspended Particulates), PM₁₀, PM_{2.5} 및 PM₁의 농도를 확인하였다(Table 2). 부스 밖 TSP와 PM₁₀의 기하평균 농도는 각각 62.13 µg/m³, 40.43 µg/m³으로 부스 안 및 지하 연결통로에 비해 높은 수준이었지만 그 차이가 유의하지는 않았다. 그러나 오히려 입

Table 1. Total dust concentrations of expressway toll booth by location (Unit : µg/m³)

| Location | N [*] | GM [†] (GSD [‡]) | Mean±S.D. [§] | Min | Max | I/O ratio | P-value |
|-----------------------|----------------|-------------------------------------|------------------------|--------|---------|-------------------------|---------|
| Inside of toll booth | 16 | 337.47(1.70) | 378.93±171.57 | 102.56 | 671.79 | 0.985 | 0.897 |
| Outside of toll booth | 16 | 342.72(2.32) | 443.91±303.59 | 34.62 | 1116.67 | | |

*N: Number of samples, †GM: Geometric Mean, ‡GSD: Geometric Standard Deviation, §S.D.: Standard Deviation, ||I/O ratio: (GM of inside of toll booth over GM of outside of toll booth)×100

Table 2. Size selective dust concentrations of expressway toll booth by location (Unit : µg/m³)

| Location | N [*] | GM [†] (GSD [‡]) | Mean±S.D. [§] | Min | Max | P-value | |
|-------------------|-----------------------|-------------------------------------|------------------------|-------------|-------|---------|-------|
| TSP | Inside of toll booth | 16 | 53.85(1.46) | 57.61±21.96 | 32.20 | 102.30 | |
| | Outside of toll booth | 16 | 62.13(1.56) | 68.51±33.97 | 28.10 | 162.70 | 0.672 |
| | Underground passage | 16 | 57.71(1.48) | 62.14±25.01 | 31.60 | 102.40 | |
| PM ₁₀ | Inside of toll booth | 16 | 30.72(1.69) | 34.96±19.14 | 11.00 | 85.50 | |
| | Outside of toll booth | 16 | 40.43(1.62) | 45.56±26.19 | 19.70 | 123.80 | 0.339 |
| | Underground passage | 16 | 36.92(1.70) | 42.19±22.94 | 18.10 | 83.80 | |
| PM _{2.5} | Inside of toll booth | 16 | 14.94(2.08) | 19.73±17.78 | 4.87 | 71.67 | |
| | Outside of toll booth | 16 | 16.70(2.10) | 22.14±19.91 | 5.70 | 81.83 | 0.850 |
| | Underground passage | 16 | 17.06(2.29) | 23.37±19.41 | 3.99 | 63.76 | |
| PM ₁ | Inside of toll booth | 16 | 4.81(2.57) | 7.29±7.25 | 1.26 | 26.14 | |
| | Outside of toll booth | 16 | 5.54(2.90) | 8.84±8.65 | 0.98 | 33.01 | 0.728 |
| | Underground passage | 16 | 5.57(3.33) | 9.37±8.51 | 0.56 | 27.45 | |

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

자 크기가 작은 PM_{2.5}, PM₁의 기하평균 농도는 지하통로에서 각각 17.06 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 5.57 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 톨게이트 부스 안쪽에 비해 높은 수준이었다.

3) 시간대 별 분진의 농도 변화

고속도로 톨게이트 부스 안에서 시간대별로 입자크기

별 농도를 확인한 결과를 Figure 1에 나타내었다. 전반적으로 TSP, PM₁₀, PM_{2.5} 및 PM₁의 농도는 입자크기가 클수록 높은 수준으로 확인되었다. 시간대별로는 출근으로 차량이동이 많은 오전시간대에 농도가 증가하는 추세였고, 점심시간대에는 발생량이 감소하는 것으로 확인되었다. 또한 오후에 입자크기별 농도는 낮은 경향을 보이다가

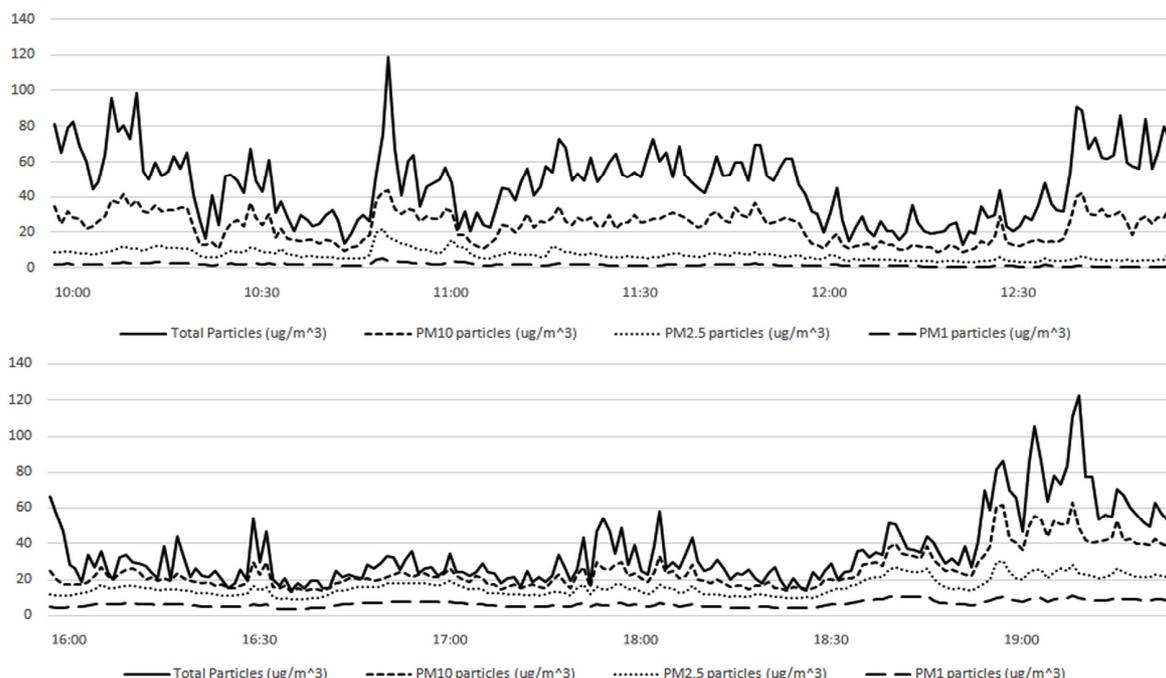


Figure. 1. Changes of concentration with time for TSP, PM₁₀, PM_{2.5}, and PM₁

Table 3. Heavy metal concentrations by expressway toll booth location

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

| Heavy metals | Inside of toll booth(N [*] =16) | | | | Outside of toll booth(N=16) | | | | I/O ratio | P-value |
|--------------|--|------------------------|------|-------|-----------------------------|-----------|------|------|-------------------------|--------------------|
| | GM [†] (GSD [‡]) | Mean±S.D. [§] | Min | Max | GM(GSD) | Mean±S.D. | Min | Max | | |
| Zn | 1.38(1.35) | 1.42±0.41 | 1.01 | 1.89 | 1.39(1.98) | 1.67±1.00 | 0.51 | 3.19 | 0.993 | 0.445 |
| Pb | 0.09(1.35) | 0.09±0.02 | 0.06 | 0.11 | 0.15(2.50) | 0.26±0.37 | 0.08 | 1.10 | 0.600 | 0.809 |
| Cd | 0.01(1.88) | 0.01±0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01(1.89) | 0.01±0.01 | 0.01 | 0.02 | 1.000 | 0.254 |
| Ni | 0.02(1.75) | 0.01±0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.02(1.59) | 0.03±0.01 | 0.01 | 0.05 | 1.000 | 0.867 |
| Fe | 0.70(1.29) | 0.71±0.17 | 0.48 | 0.93 | 0.66(1.34) | 0.68±0.18 | 0.39 | 0.90 | 1.061 | 0.007 [¶] |
| Mn | 0.02(1.40) | 0.02±0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.02(1.32) | 0.02±0.05 | 0.01 | 0.03 | 1.000 | 0.023 |
| Cr | 0.27(1.09) | 0.27±0.03 | 0.25 | 0.32 | 0.29(1.04) | 0.29±0.01 | 0.28 | 0.31 | 0.931 | 0.809 |
| Mg | 1.33(1.07) | 1.33±0.09 | 1.20 | 1.42 | 1.29(1.08) | 1.29±0.10 | 1.15 | 1.42 | 1.031 | 0.067 |
| V | 0.01(1.92) | 0.01±0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01(2.32) | 0.02±0.01 | 0.01 | 0.03 | 1.000 | 0.224 |
| Ca | 8.40(1.23) | 8.54±1.77 | 6.73 | 10.63 | 7.52(1.15) | 7.58±1.04 | 6.06 | 9.21 | 1.117 | 0.361 |
| Cu | 0.04(1.06) | 0.04±0.01 | 0.04 | 0.05 | 0.04(1.27) | 0.04±0.01 | 0.03 | 0.06 | 1.000 | 0.014 [¶] |
| Al | 0.93(1.31) | 0.95±0.26 | 0.70 | 1.31 | 0.80(1.56) | 0.86±0.31 | 0.38 | 1.17 | 1.163 | 0.515 |

* N: Number of samples, †GM: Geometric Mean, ‡GSD: Geometric Standard Deviation, §S.D.: Standard Deviation, ||I/O ratio: (GM of inside of toll booth over GM of outside of toll booth)×100, ¶: P<0.05

퇴근이 집중되는 18시 이후 차량 통행량 증가로 인해 농도가 급격히 상승하는 경향으로 나타났다.

2. 공기 중 총분진 내 중금속의 농도

Table 3은 고속도로 톨게이트 부스 안팎에서 채취한 총분진 내 12개의 중금속 원소에 대하여 분석한 결과이다. 전체적으로 부스 안팎의 중금속 농도는 평균 I/O ratio로 봤을 때 큰 차이를 보이지는 않았다. 다만 Pb의 경우 부스 밖의 기하평균 농도(0.15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)가 부스 안의 농도(0.09 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해 높게 나타났으며 평균 I/O ratio는 0.60이었고, Cr 역시 부스 밖의 기하평균 농도(0.29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해 부스 내 농도(0.27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)가 다소 높은 수준이었다. 반면 Fe, Ca 및 Al 기하평균의 경우 오히려 부스 안의 농도가 부스 밖에 비해 높게 확인되었다.

3. 고속도로 톨게이트 부스 내 축적분진의 특성

1) 침착 분진의 형태

톨게이트 부스 안에서 채취한 침착 분진의 미세구조와 원소성분을 파악하기 위하여 주사전자현미경으로 분석한 결과 입경이 5 μm 내외의 작은 입자들이 뭉쳐져

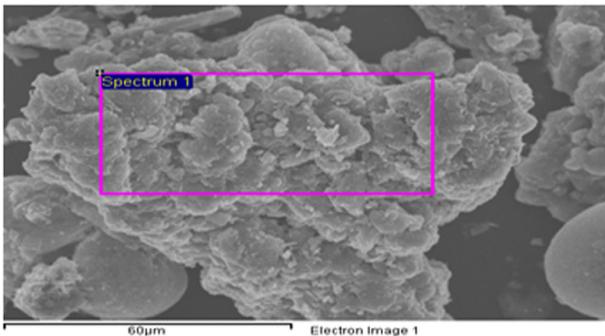


Figure 2. Shape of deposited dust sample analyzed by UHR-FE-SEM

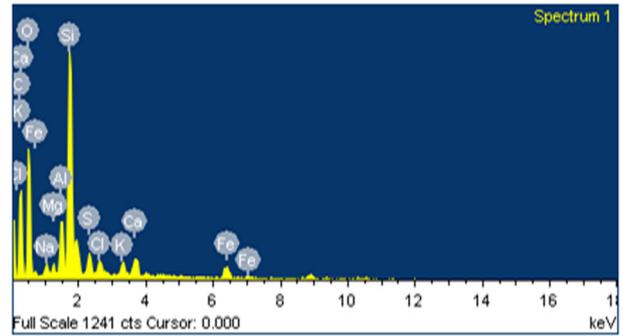


Figure 3. Spectrum of deposited dust sample analyzed by UHR-FE-SEM

있는 불규칙한 형태로 관찰되었다(Figure 2).

2) 침착 분진의 원소 성분별 함유량

침착 분진에 대한 원소별 성분분석 결과 약 0.5 keV에서 C와 O 피크가 높게 나타났고, 약 2 keV에서 Si 피크를 확인 할 수 있었다(Figure 3).

침착 분진 시료의 원소 성분별 함유량은 C가 54.6%로 가장 높았다(Table 4). 그 다음으로는 O 35.9%, Si 5.1%, Al 1.3%, Fe 0.6%, Na, S 및 Ca 0.5%, Cl 0.4%, K 및 Mg 0.3% 순이었다.

3) 침착 분진의 화학적 구성성분

Table 5는 파장 분산형 X-선 형광 분광기로 침착 분진의 화학적 구성성분을 확인한 결과이다. SiO₂가 41.42%로 가장 높은 함유량을 보였으며 그 다음 순으로 Fe₂O₃ 13.6%, Al₂O₃ 11.8%, CaO 8.1% 등이었다.

IV. 고 찰

외국에서는 대기오염으로 인한 유병률이나 사망률 증가에 따라 진행된 수많은 연구 결과 자동차로 인한 대

Table 4. Atomic percent of element for deposited dust sample analyzed by UHR-FE-SEM

| Element | C | O | Si | Al | Fe | Na | S | Ca | Cl | K | Mg |
|-------------------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Component rate(%) | 54.55 | 35.97 | 5.12 | 1.25 | 0.57 | 0.54 | 0.51 | 0.50 | 0.36 | 0.33 | 0.29 |

Table 5. Chemical compositions of deposited dust sample analyzed by WD-XRF

| Composition | SiO ₂ | Fe ₂ O ₃ | Al ₂ O ₃ | CaO | SO ₃ | K ₂ O | Cl | Na ₂ O |
|-------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----------------|------------------|--------------------------------|-------------------|
| Component rate(%) | 41.42 | 13.64 | 11.77 | 8.12 | 7.65 | 3.84 | 3.40 | 2.97 |
| Composition | MgO | TiO ₂ | P ₂ O ₅ | ZnO | MnO | CuO | Cr ₂ O ₃ | SrO |
| Component rate(%) | 2.33 | 2.03 | 1.28 | 1.03 | 0.32 | 0.11 | 0.05 | 0.03 |

기오염을 오염의 주된 원인으로 발표하고 있다. 이에 배출되고 있는 오염물질 저감을 위하여 많은 예산이 투입·관리되고 있으며, 입자와 관련된 인체 유해성 연구도 활발히 진행하고 있다. 또한, 우리나라의 연구에서도 도로먼지의 주원인이 되는 자동차에서 발생하는 각종 오염물질이 인체에 미치는 위해도가 매우 큰 것으로 보고하고 있다(Kim, 2011a; Kim, 2011b).

고속도로 톨게이트 주변에서 발생하는 도로먼지에 포함된 미세먼지는 장기간 노출될 경우 폐암 및 심혈관질환 사망률과 관련이 있으며, 미세먼지의 흡입은 단순히 호흡기계의 영향 뿐 아니라 암과 심혈관계 질환 등과 같은 전신적인 질환과도 관련이 있다고 보고하였다(Pope et al., 2004). 또한 미세먼지에 포함된 Cu, Cr, Ni, Fe 등의 금속물질이 활성산소를 생성해서 기도에 염증반응을 유발한다는 점을 감안할 때 비산먼지 내 중금속 농도를 확인하는 것은 중요하다(Dockery & Pope, 1994). 이에 본 연구에서는 고속도로 톨게이트 부스 안팎의 총분진, 입자크기별 분진 및 중금속 농도를 파악하고, 침착 분진의 특성을 확인하고자 하였다.

그 결과 총분진의 기하평균 농도는 톨게이트 부스 안의 경우 337.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 부스 밖은 342.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 확인되었다. 이는 Roh et al.(1990)이 차량 통행량이 많은 고속도로의 톨게이트 10개 지역을 대상으로 총분진을 측정된 결과 부스 안은 0.79 mg/m^3 , 부스 밖의 경우 1.55 mg/m^3 로 보고한 결과에 비해 낮은 수준이었다. 이는 Roh et al.(1990)의 경우 1일 고속도로 통행량이 약 4만대 정도이었고 그에 비해 본 연구는 1일 평균 통행량이 5천대 수준인 민간 고속도로가 대상이 되어 차이가 발생된 것으로 추정된다. 또한 Cha et al.(1988)은 톨게이트 근무자를 대상으로 노출평가를 수행한 결과 총분진 농도를 340~1264 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 보고하여 본 결과 102.6~671.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 비해 역시 높은 수준으로 보고하였다. 이런 이유는 본 연구가 진행된 시기에 비해 30여년 전에 진행되어 시기적인 차이와 자동차 성능 개선으로 인한 입자 발생량 저하, 톨게이트 부스 내 관리상태가 달라져 차이가 발생된 것으로 추측된다.

입자크기별 분진의 기하평균 농도는 TSP의 경우 고속도로 톨게이트 부스 밖 62.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 부스 안 53.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 그 동안 고속도로 톨게이트를 대상으로 TSP에 대한 노출평가가 이루어지지 않아 직접 비교할 수는 없었지만 Choi(2008)가 초중고를 대상으로 수행한 흡입성분진에 대한 노출평가 결과 교실 내 418.8~

598.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 및 교실 밖 145.7~194.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 비해 상당히 낮은 수준으로 확인되었다. 이는 연구대상 및 측정 장비와 채취한 분진의 입자 크기 등의 차이에 기인되는 것으로 생각된다. 또한 고속도로 톨게이트 부스 안 PM_{10} 의 기하평균 농도는 30.72 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (11.0~81.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 나타났다. 이 역시 동일한 대상으로 진행된 PM_{10} 관련 연구 부족으로 농도의 차이를 직접 비교하는 것은 무리가 있었다. 다만 Jung et al.(2015)은 평균 PM_{10} 농도를 교실 안 49.9~52.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 본 결과에 비해 다소 높게 보고하였으나, 서울 및 경기 지역 초·중·고등학교 교실의 평균 PM_{10} 농도를 36.23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 발표한 Kim et al.(2003)의 결과와는 유사한 수준이었다. 그러나 학교 교실 안의 경우 학생들의 활동에 따른 유기분진이 대부분이지만 고속도로 톨게이트에서 비산되는 분진의 경우 부스 안에서 채취한 침착 분진의 화학적 구성성분이 SiO_2 와 Fe_2O_3 가 대부분인 점을 감안할 때 단순히 농도만으로 비교하는 것은 타당하지 않다. 한편 $\text{PM}_{2.5}$ 농도의 경우 톨게이트 부스 안의 기하평균 농도는 14.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (4.9~71.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 부스 밖은 16.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (7.7~81.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 확인되었다. 이 역시 연구 대상의 차이는 있지만 학교의 평균 $\text{PM}_{2.5}$ 농도를 학교 안 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 학교 밖 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 보고한 Wichmann et al.(2010)에 비해 높은 수준이었다. 그러나 Rivas et al.(2014)은 학교 안 평균 $\text{PM}_{2.5}$ 농도를 37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 학교 밖 29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, Zwodziazk et al.(2013)과 Stranger et al.(2008)은 $\text{PM}_{2.5}$ 농도를 학교 안의 경우 여름 14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 겨울 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 57 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 학교 밖은 여름 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 72 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 겨울 49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 톨게이트 부스 안팎의 농도보다 다소 높게 보고하였다. 이러한 농도 차이 역시 국가, 연구대상, 측정방법 등에 있는 것으로 판단된다. 그리고 PM_1 의 기하평균 농도는 톨게이트 부스 안 4.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1.3~26.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 부스 밖은 5.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1.0~33.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 확인되었지만 PM_1 에 대한 연구에 대한 보고가 흔하지 않아 비교하기 어려웠다. 다만 $\text{PM}_{2.5}$ 와 PM_1 농도의 경우 톨게이트 부스 안팎에 비해 지하통로에서 높게 나타나 크기가 상대적으로 작은 입자가 부스 내부로 유입되는 것을 방지하기 위하여 주변지역의 물청소 등이 필요한 것으로 판단된다.

고속도로 톨게이트를 대상으로 수행한 금속과 관련된 노출평가는 대부분 Pb와 관련된 연구이다. 본 연구에서 Pb의 기하평균 농도는 부스 안 0.1316 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 부스 밖은 0.1291 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 큰 차이를 보이지 않았다. 비록 농

도차이는 있지만 Lee et al.(1988)은 부스 안 Pb 농도를 $1.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 부스 밖은 $0.90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, Park et al.(1990)도 부스 안 $6.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 부스 밖 $4.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 본 결과와 유사하게 부스 안의 농도를 높게 발표하였다. 그러나 Roh et al.(1990)의 경우 부스 안 Pb 농도를 $0.0018 \text{ mg}/\text{m}^3$, 부스 밖은 $0.0027 \text{ mg}/\text{m}^3$ 으로 오히려 부스 밖의 농도를 높게 보고하였다. 또한 Cha et al.(1988)은 총분진 중 Pb의 농도를 부스 안의 경우 $1.91 \sim 1.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 본 결과에 비해 높은 수준으로 보고하였다. 이러한 Pb 농도 차이는 과거 자동차용 연료인 휘발유에 4에틸납이 포함되어 최근에 비해 상당히 높은 수준이었을 것으로 생각된다.

톨게이트 부스 안팎에서 채취한 분진 중 가장 고농도로 함유된 금속성분은 Ca로 부스 안 기하평균 $8.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 부스 밖은 $7.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 확인되었다. 그 다음으로 Mg $1.33 \sim 1.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Fe $0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Mn $0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$, V $0.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 이 원소들은 지각에 많이 함유되어있는 토양에서 발생하는 입자 등 자연적인 발생원과 관련된 성분이다(Do et al., 2010). 한편 인위적 발생원과 관련 있는 원소로 추정되는 유해한 중금속인 Cd, Cu, Cr, Ni, Pb 및 Zn 등은 각각 기하평균 농도가 $0.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.27 \sim 0.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.09 \sim 0.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.38 \sim 1.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 낮은 수준을 보였다. 따라서 고속도로 톨게이트 부스 안팎에 침착된 분진 중 미량 원소 성분은 인위적 발생원보다는 자연적 발생원과 관련된 성분이 높게 나타났다. 또한 Cu, Cr, Ni 및 Fe 등의 금속물질은 활성산소를 증가시켜 기도의 염증 반응을 유발한다는 점을 감안할 때 침착 분진의 재비산을 방지하기 위해 수시로 청소하는 등의 노력도 필요한 것으로 생각된다(Dockery & Pope, 1994).

이 연구는 일부 지역의 고속도로 톨게이트로 그 대상이 한정되었고 시료 수의 제한으로 전체 톨게이트를 대표하기에 무리가 있다. 또한 노출평가 수행시기가 7~9월로 장마와 휴가로 인해 계절 및 환경적인 영향을 받았을 것으로 판단되며, 입자 크기별 분진 농도의 경우 직독식 장비를 활용하여 정확도가 높지 않았다는 단점이 있다.

V. 결 론

본 연구는 고속도로 톨게이트 부스 안팎에서 발생하는 총분진, 입자크기별 분진 및 중금속 농도를 확인하고, 침착 분진의 성분 분석을 통해 발생원을 규명하고자

하였다.

톨게이트 부스 안팎의 총분진 기하평균 농도는 각각 $337.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $342.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 부스 안팎의 전반적인 TSP, PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 및 PM_1 의 농도는 분진의 입자크기가 클수록 부스 밖의 농도가 높았고, 작은 입자일수록 지하통로에서 높게 확인되었다. 또한 시간대별 TSP, PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 및 PM_1 농도는 차량이동이 많은 오전에 높은 수준이었고, 그 이후 감소 추세를 보이다가 퇴근시간인 18시 이후 차량 통행의 증가로 다시 증가하는 경향을 보였다. 톨게이트 부스 안 침착 분진 중 미량 원소는 인위적인 발생원보다는 자연적인 발생원과 관련된 성분이었으며, 기도에 염증반응을 유발하는 Cu, Cr, Ni, Fe 등을 함유하고 있었다. 또한 침착 분진의 화학적 구성성분은 SiO_2 가 가장 많았고, 원소는 C, O, Si 순으로 함량이 높게 나타나 고속도로 톨게이트 주변에서 비산되는 광물성 분진과 타이어 마모 분진이 톨게이트 부스 안으로 유입되는 것으로 추정되었다.

따라서 고속도로 톨게이트 부스 농도 저감을 위해서는 지하통로 등 주변지역을 주기적으로 청소해야 하고, 부스 안에 침착된 먼지도 수시로 제거할 필요가 있다. 또한 출퇴근 시간에 분진의 농도가 상승되는 점을 감안할 때 교통량이 집중되는 시간만이라도 최소한 방진마스크를 착용하는 것이 권장된다.

References

- Abu-Allaban M, Gilies JA, Gerlter AW. Application of a multi-lag regression approach to determine on-road PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ emission rates. *Atmo Env* 2003;37:5157-5164
- Cha CW, Yum YT, Kim YW. A study on the health effect of air pollution among the express-way tollgate workers in Seoul. *J KAPRA* 1988;4(1):71-75
- Chiang HL, Huang. Particulate matter emissions from on road vehicles in a freeway tunnel study. *Atmo Env* 2009;43:4014-4022
- Choi SJ. The effect of outdoor air and indoor human activity on mass concentrations of size-selective particulate in classrooms. *J Env Hlth Sci* 2008; 34(2):137-147
- Dockery DW, Pope CA. Acute respiratory effects of particulate air pollution. *Annu Rev Pub Health* 1994; 15:107-132
- Do HS, Song HB, Jung YW, Yoon HS, Kwak JH et al. Trace element analysis and source assessment of

- household dust in Daegu, Korea. *Kor Soc of Env Eng* 2010;32(1):69-78
- Han L, Zhuang G, Cheng S, Wang Y, Li J. Characteristics of resuspended road dust and its impact on the atmospheric environment in Beijing. *Atmo Env* 2007;41:7485-7499
- Hussein T, Johansson C, Karlsson H, Hansson HC. Factors affecting non-tailpipe aerosol particle emissions from paved roads: On-road measurements in Stockholm, Sweden. *Atmo Env* 2008;42:688-702
- Jung JS, Park DS, Jeon HJ, Song HS, Lee MJ. A study of indoor air quality of school classrooms. *J of Kor Acad Ind cooper Soc* 2015;16(5):3643-3652
- Kim HI, Kang DM, Kim JE, Kim SY, Kim SE et al. A survey on work environment of express tollgate workers. Korea Occupational Safety & Health Agency Report. 2015. p.22
- Kim JY. Risk analysis of size-related airborne particulate matters in Urban area. Graduate school of Yonsei University. Seoul; Yonsei University Press. 2011b. p.8-11
- Kim KM. Study on Air pollutant generated by the usage of vehicle fuel and the effects on environmental health - Focus on particulate matter in metropolitan roadside area -. Graduate school of Yonsei University. Seoul; Yonsei University Press. 2011a. p.9-13
- Kim YS, Lee CM, Moon JS, Kim SW. A Study on the indoor air pollution in the classrooms primary, middle and high schools in Seoul and Gyeonggi-Do. *J of Kor Soc of School Hlth* 2003;16(1):81-90
- Kim YS, Won SR, Choi YJ, Choi SH, Kim AR et al. Concentration variations in primary and secondary aerosols near a major road. *Korean Soc Atmo Env* 2008;PB:173-174
- Korea Expressway Corporation(KEC). Expressway traffic statistics, 2016. p. 4
- Korea Occupational Safety and Health Agency(KOSHA). Occupational health guidelines for tollgate pay rollers, 2016. p. 4
- Lee BK, Jung EL, Kim DY, Kang JK, Kim IS et al. Concentration analysis of fine particles from the highway areas passing through Ulsan. *Proceeding of the Meeting of KOSAE. Korean Soc Atmo Env* 2004;PB21:403-404
- Lee YJ, Kim JC, Kim KC, Song DB, Cha CH et al. A Study on the status of air pollution around toll booth of expressway - Around Seoul and Suwon toll booth. *KAPRA* 1988;4(1):76-83
- Nam KS. The influence on somatization for job stress and emotional labor of the worker at highway tollgate. Graduate school of Catholic University. Seoul; Catholic University Press. 2016. p.7-10
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). NIOSH manual of analytical methods (NMAM), Fourth edition. elements by ICP. 7300. 2003. p. 1
- Omstedt D, Bringfelt B, Johansson C. A model for vehicle induced non tailpipe emissions of particles along Swedish roads. *Atmo Env* 2005;39:6088-6097
- Pallavi P, Stephen JB, Anuradha S, Caitlin M, Krystal J et al. The PM₁₀ fraction of road dust in the UK and India: Characterization source profiles and oxidative potential. *Sci of Total Env* 2015;445-452
- Park JI, Koo JW, Roh YM, Lee SH. Lead exposure of tollgate workers on Korean expressway. *The Kor J of Occup Med* 1990;2(2):134-141
- Pope CA, Burnett RT, Thuston GD, Thun MJ, Calle EE et al. Cardiovascular mortality and long-term exposure to particulate air pollution. *Circulation* 2004;109:71-77
- Rivas I, Viana M, Morenob T, Pandolfi M, Amato F et al. Child exposure to indoor and outdoor air pollutants in schools in Barcelona, Spain. *Env Inter* 2014;69:200-212
- Roh YM, Park JI, Chung CK, Lee KM, Min BK et al. A survey on the air pollution of expressway tollgate in Korea. *The Kor J of Occup Med* 1990;2(2):142-152
- Statistics Korea(KOSTAT). Korea Standard Job Classification, 2007. p. 144
- Stranger M, Potgieter-Vermaak SS, Van GR. Characterization of indoor air quality in primary schools in Antwerp, Belgium. *Indor Air* 2008;18(6):454-463
- Venkatram A, Fitz D, Bumiler K, Du S, Boeck M et al. Using a dispersion model to estimate emission rates of particulate matter from paved roads. *Atmo Env* 1999;33(7):1093-1102
- Wichmann J, Lind T, Nilsson MA-M, Bellander T. PM_{2.5}, soot and NO₂ indoor-outdoor relationships at homes, pre schools and schools in Stockholm, Sweden. *Atmo Env* 2010;44(36):4536-4544
- Xueli J, Dahe J, Simei F, Hui Y, Pinjing H et al. Road dust emission inventory for the metropolitan area of Shanghai city. *Atmo Env* 1993;27(11):1735-1741
- Zwoździak A, Sówka I, Krupińska B, Zwoździak J, Nych A. Infiltration or indoor sources as determinants of the elemental composition of particulate matter inside a school in Wrocław, Poland. *Build Env* 2013;66:173-180

<저자정보>

남미란(박사), 정종현(교수), 피영규(교수)