

도로변 자동살수 장치 설치에 따른 미세먼지 저감 효과 분석

박기형[†] · 곽진 · 유은철
대기보전과

Analysis of Reduction Efficiency of PM-10 by Clean Road System

Park Gee-hyeong[†], Kwak Jin, Yoo Eun-chul
Air Preservation Division

Abstract

This research has been performed to analysis reduction efficiency of PM-10 by clean road system installed in center of the road. We have tested 6 times for the reduction efficiency before, during, and after watering at the on-site. The test results are like that ; the concentration ranges are before watering $37.6 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 62.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, during watering $40.2 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 62.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, and after watering $46.0 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 60.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. The result of before watering vs during watering showed that the case of concentration reduced is 2 times, the case of no difference is 3 times and the case of concentration increased is 1 time. The statistical analysis, Mann-whitney U Test, showed that the case of reduction efficient is 2 times, the case of reduction non-efficient is 2 times, and the case of concentration increased is 2 times. Therefore, we couldn't conclude whether the reduction efficiency by watering is real or not. It is advantageous to test at the on-site, but it was difficult to find credible results owing to many parameters (the number of traffic, meteorological factors such as wind velocity and wind direction, and concentration of fine particulate matter in ambient air, etc).

Key words : PM-10, clean road system, watering, reduction efficiency, statistical analysis

서론

최근 대기환경오염 특히, 미세먼지로 인한 인체 건강 및 환경에 미치는 영향에 대한 연구가 활발하게 진행 중이며, 대기환경의 개선 등 미세먼지의 저감을 위한 여러 방법들이 제시되고 있다. 우리 시에서 발생하는 미세먼지(PM-10)는 2011년 기준 총 7,907 톤/연간이며, 그 중 비산먼지가 58.9%에 해당하는 4,656 톤/연간이다. 비산먼지 중 도로에서 발생하는 재비산먼지는 1,051 톤/연간으로 전체 미세먼지(PM-10) 배출량의 13.3%에 해당한다. 한편 우리의 미세먼지(PM-2.5) 배출량은 2011년 기준 3,616 톤/연간으로 미세먼지(PM-10)의 46%정도

이며 이중 도로재비산에 의해 발생하는 미세먼지(PM-2.5)는 전체 PM-2.5 배출량의 7%에 해당하는 254.3 톤/연간이다¹⁾. 이와 같이 도로재비산에 의해 발생하는 미세먼지의 배출량 감소를 위해서는 주기적인 도로 청소가 필수적이라 하겠다. 일반적으로 도로노면에서 재비산되는 먼지를 제거하기 위하여 도로 물청소 및 진공흡인 등의 방법을 이용한 도로청소 차량을 운영하고 있으나 불법주차, 도로소통의 방해, 운전자의 불만제기 등으로 다소 어려움이 있다. 이에 대한 개선방법으로 공기질 개선(특히 미세먼지)과 폭염 대비를 위해 일정구간을 선정하여 도로먼지 제거를 위해 '클린 로드 시스템(clean road system)'을 도입한 사례가 있다. 클린 로드 시스

[†] Corresponding author, E-mail : green911@korea.kr
Tel : +82-51-309-2927, Fax : +82-51-309-2929

템은 배수관과 물 분사 설비를 도로 중앙 분리대에 살수 노즐을 설치하여 일정시간 동안 도로에 물을 살수하는 방식이다. 자동화시스템을 이용하여 인력의 소요 없이 작동시킬 수 있으며, 여름철 교통 정체가 심한 도시도로의 낮 시간대에 작동하여 열섬현상 방지 등의 효과를 기대할 수 있다²⁾. 2014년 현재까지 이러한 방식이 도입된 지자체는 서울, 대구, 포항, 광주 등이며 부산시에서도 2012년말 사상구 광장로 구간 200 m에 설치하여 시범적으로 운영 중이다. 서울의 경우 2006년 말부터 대기질 개선을 위해 태평로, 올림픽로 등지에서 시범적으로 운영하였다. 봄과 가을에는 도로청소를 목적으로 새벽 5시, 밤 11시에 5분씩 가동했으며, 여름철에는 도심의 열섬완화를 위해 낮기온이 최고에 이르는 오후 2시를 전후로 가동하였다. 포항시는 2008년 이 시스템을 도입하였으며, 북구 육거리-오거리의 830 m 구간에 설치하여 운영 중이다. 대구의 경우 2010년말 이 시스템을 도입하여 도시철도 10개 역에서 버려지는 지하수를 이용하고 있으며, 달구벌대로 만촌네거리 - 범어네거리, 대구은행 - 수성교, 반월당네거리 - 감삼네거리 등 전체 9.2 km 구간에 설치되어 있다. 대구시는 특히 2011년 세계육상선수권대회가 열리는 기간 클린 로드 시스템을 활용한 경우도 있다³⁾.

이에 따라 본 연구에서는 우리시에 시범적으로 설치된 도로변 살수장치 가동에 따른 미세먼지농도 저감효과를 분석하고 향후 클린로드시스템의 확대여부 방안에 대해서 판단해 보고자 한다.

연구방법

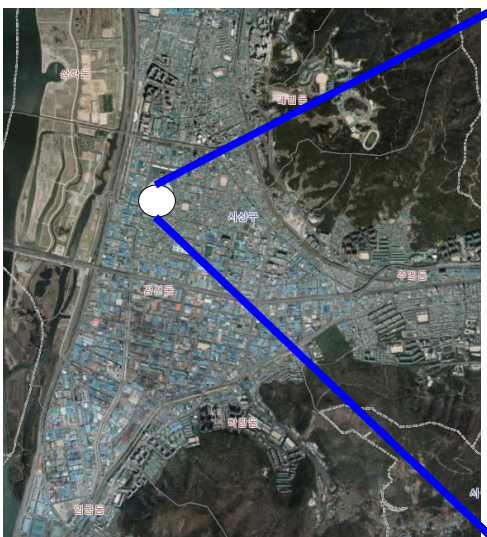
연구지점

본 연구를 위한 지점은 사상구 소재 사상광장로(사상시외버스터미널 ~ 르네시떼) 200 m 구간으로 Fig. 1(b), Fig. 2와 같다. 그림에서와 같이 차로 중앙 200 m구간에 총 67개의 분배기가 설치되어 있다. 도로에 분사될 물은 인근 삼락천에서 공급되도록 설계되어 있다.

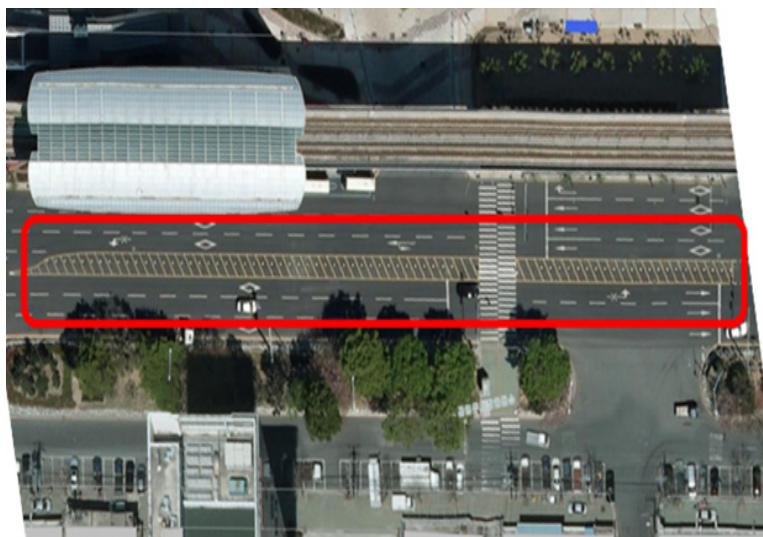
측정방법

미세먼지(PM-10)의 연속측정을 위해서 사용된 장비는 광산란(light scattering) 방법을 이용한 PM-101P (Koea, HCT社製)와 DustTrack DRX Aerosol Monitor 9533 (USA, TSI社製)이다. 대기환경공정시험기준상 대기 중 미세먼지(PM-10)의 연속측정에 이용되는 방법은 베타선(β -ray) 측정법이나, 본 연구의 특성 상 실시간 변화 특성을 알아보기 위해 광산란방법을 이용하였다. 이에 따라 광산란 측정기와 베타선 (β -ray) 방법을 비교측정하여 베타선 방법으로 농도보정을 실시하였다.

본 연구는 오전 10시부터 오후 4시 사이에 수행되었으며, 총 6회에 걸쳐 실시되었다. 살수장치의 가동 전·중·후 미세먼지(PM-10) 농도 수준을 비교하기 위해 살수장치 가동 전 1시간 이전부터 가동 종료 후 1시간 동안 10초 간격으로 미세먼지(PM-10)농도를 측정하였다. 살



(a) Sasang-Gu district



(b) research area(red line)

Fig. 1. Map for the research.

수장치의 가동을 시작하여 도로면이 물로 완전히 적셔지는데 소요되는 시간은 5분 정도이므로 가동시간을 5분으로 하였다.

결 과

물 소요량

살수장치가 설치된 지역의 구간은 200 m이며 67개의 분사판이 설치되어 있다. 1회 5분간 연속 살수장치가 가동된다고 가정했을 때 살수 시에 사용되는 물은 약 7 m^3



(a) water sharing plate on the center of road



(b) water sharing plate

Fig. 2. Site description.



Fig. 3. Picture during watering.

정도 소요되는 것으로 산정되었다.(아래 식 참조) 소요되는 물은 인근 삼락천에서 공급된다.

$$1\text{회 살수 시 물소모량} = 67\text{개} \times 21\text{L/개/분} \times 5\text{분/회} = 7,035 \text{ L}$$

측정 결과

미세먼지 저감효율 분석을 위한 실제 현장 실험은 총 6회에 걸쳐 수행되었으며, 살수 전·중·후로 구분하여

10초 간격으로 연속적으로 측정하였고 그 결과를 Table 1과 Fig. 4에 나타내었다. 미세먼지(PM-10) 농도는 살수 전 $37.6 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 62.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 살수 중 $40.2 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 62.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 살수 후 $46.0 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 60.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도범위를 나타내었다. 살수 전 대비 살수 중 농도를 비교해보면, 뚜렷한 농도 감소를 나타낸 경우는 1, 3차로 각각 -10.1%, -14.0% 농도가 감소한 것으로 나타났다. 2, 4, 5차는 미미하게 감소하였으나 큰 차이가 없었으며, 6차의 경우 오히려 증가한 것으로 나타났다. 다음으로 살수 전 대비 살수 후의 경우 1, 3, 4차는 각각 -4.7

Table 1. Variation of PM-10 concentrations and change rate (%) every 10 second before, during, and after watering

	Before watering (30 min)			During watering (5 min)				After watering (30 min)			
	conc. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			conc. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			rate (%)	conc. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			rate (%)
	mean	max.	min.	mean	max.	min.	mean	mean	max.	min.	mean
1st	59.3	108.0	45.0	53.3	80.0	46.0	-10.1	56.5	176.0	39.0	-4.7
2nd	53.2	67.3	46.4	52.7	57.5	48.2	-0.9	60.3	129.5	44.4	13.4
3rd	60.4	110.0	41.0	52.0	85.0	41.0	-14.0	59.2	128.0	42.0	-2.0
4th	62.2	103.5	47.2	62.0	99.1	45.7	-0.4	57.4	108.0	46.0	-7.8
5th	43.8	109.0	28.0	40.0	57.0	28.0	-0.8	46.5	124.0	25.0	6.0
6th	37.6	127.3	28.2	48.2	67.3	33.3	28.3	46.0	134.5	28.9	22.4

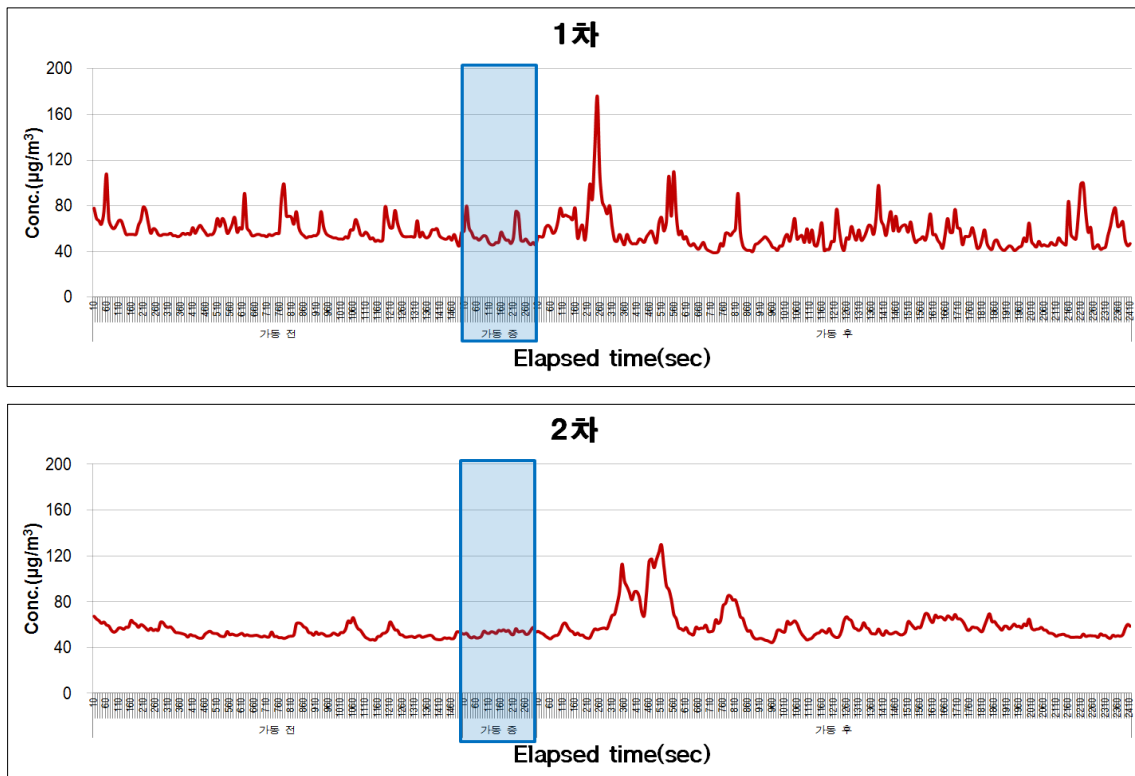


Fig. 4. Variation of PM-10 concentrations every 10 second before, during, and after watering.

%, -2.0 %, -7.8 % 농도가 감소하였으나 2, 5, 6차는 오히려 증가한 것으로 나타났다.

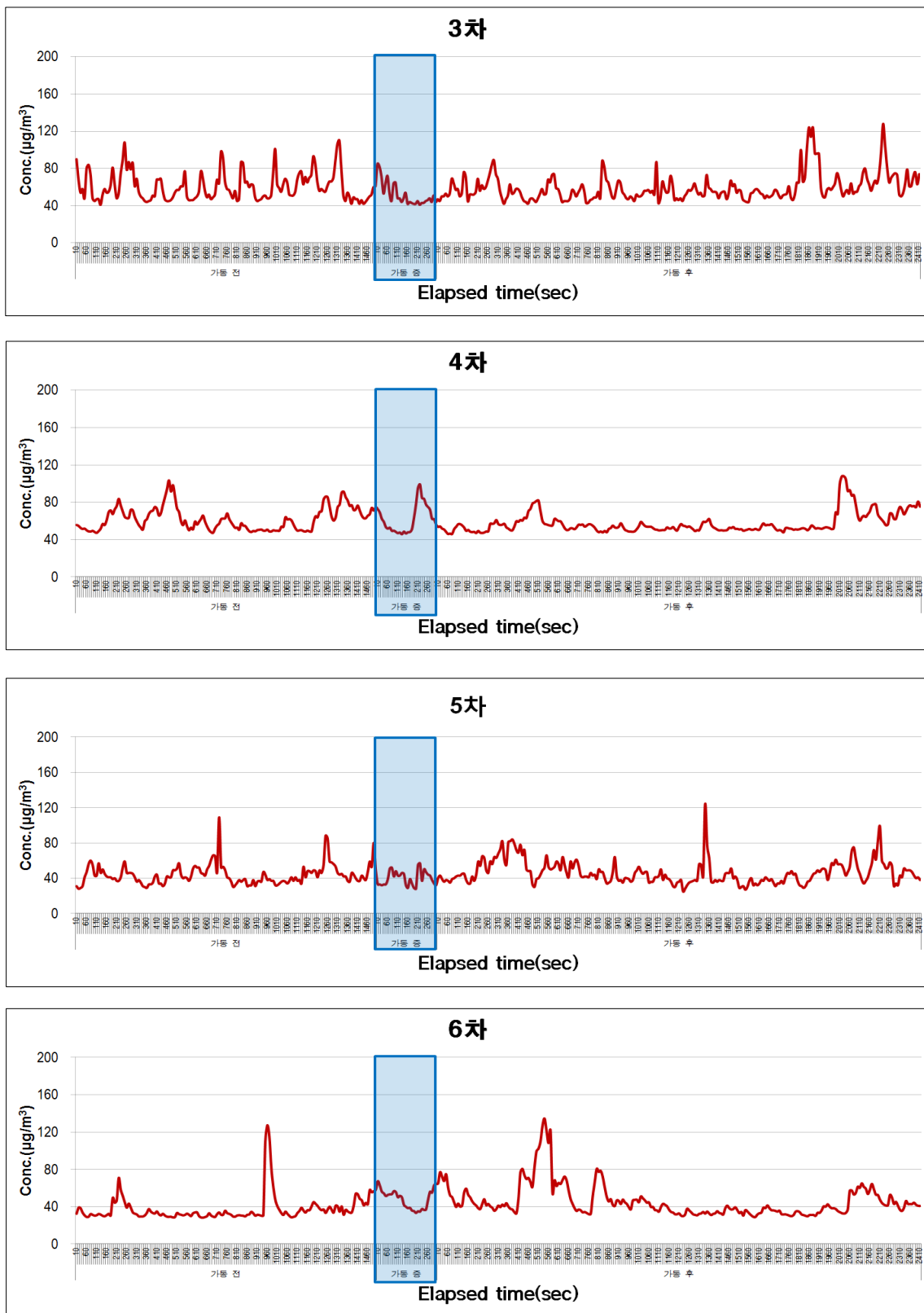


Fig. 4. Continued.

Fig. 5는 10초 간격으로 측정된 미세먼지(PM-10) 농도를 1분간 평균한 값을 그래프로 나타낸 것으로 순간 농도가 살수 전 대비 살수 후 농도가 높아지는 경우도 전체 6회 중 4회(1차, 2차, 5차, 6차)가 있었다.

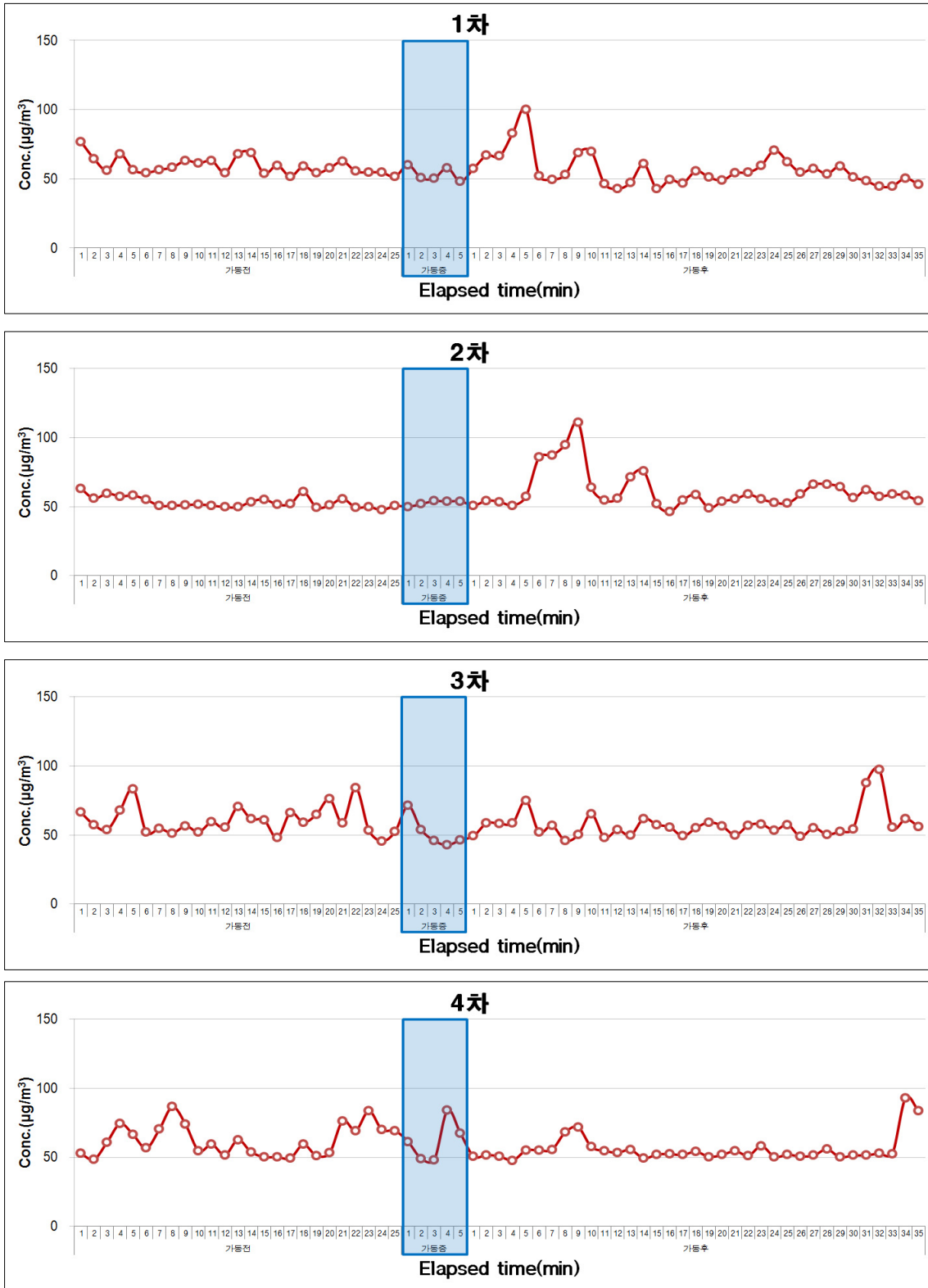


Fig. 5. Variation of PM-10 concentrations every minute before, during, and after watering.

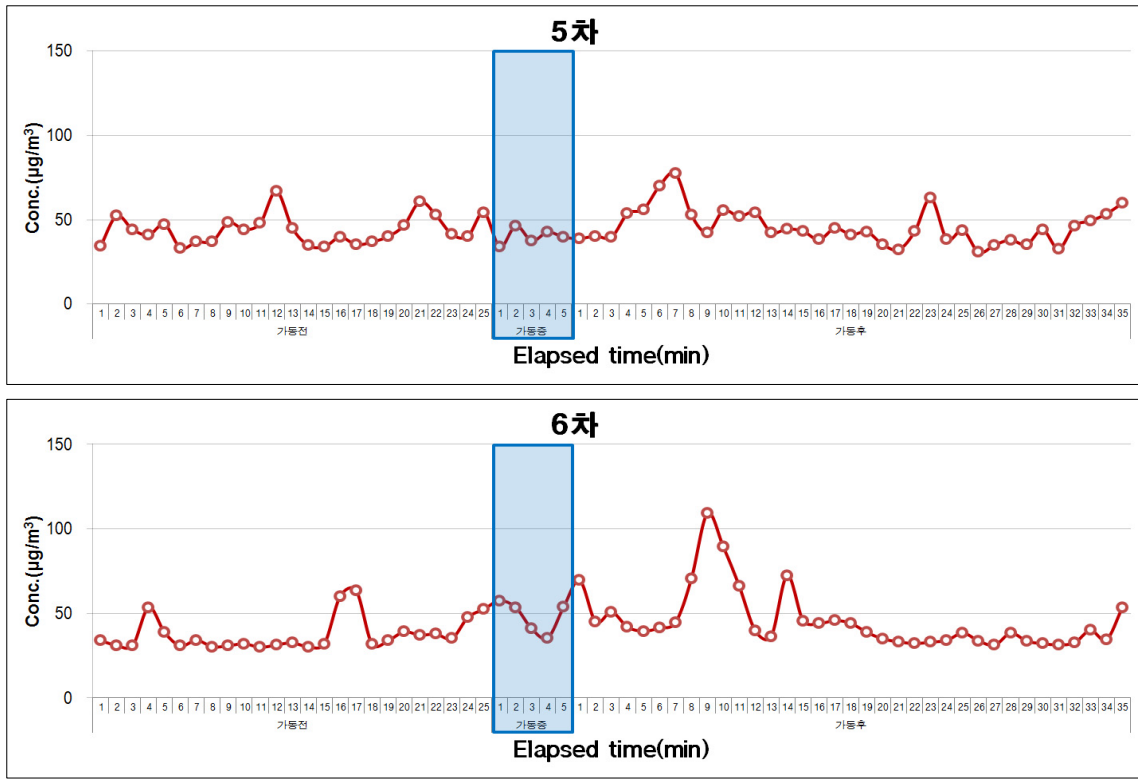


Fig. 5. Continued.

Fig. 6은 10초 간격으로 측정된 미세먼지(PM-10) 농도를 5분간 평균한 값을 그래프로 나타낸 것으로 살수에 의한 농도 감소를 확인하기는 다소 어려웠으며 살수 전 대비 살수 후 농도가 높아지는 경우도 1분 평균과 유사하게 전체 6회 중 4회(1차, 2차, 5차, 6차)가 있었다.

저감효율 분석

실제 살수장치 가동을 통한 미세먼지 저감효율 여부를 판단하기 위해 살수 전·중·후의 농도 자료를 이용하여 통계분석을 실시하였다. 저감효율 분석을 위해 이용된 통계

분석은 비모수 검정인 Mann-Whitney U Test (맨-위트니 U 검정법)이다. 이 방법은 모집단의 평균을 모르는 두 독립표본의 집단간 차이가 있는지 여부를 검정하는 방법으로서 본 연구에서는 살수 전과 살수 중 농도차이 및 살수 전과 살수 후의 농도차이를 알아보았으며, 그 결과를 Table 2에 나타내었다. 총 6회에 걸친 효율분석 결과 살수 전과 살수 중을 비교했을 때 미세먼지 감소 효과가 있는 것으로 분석된 경우는 2회(1차, 3차), 감소 효과가 없는 것으로 분석된 경우는 3회(2차, 4차, 5차), 오히려 농도가 증가하는 경우는 1회(6차)였다. 한편 살수 전과 살수 후의 효율분석 결과 미세먼지 감소효과가 있는 것으

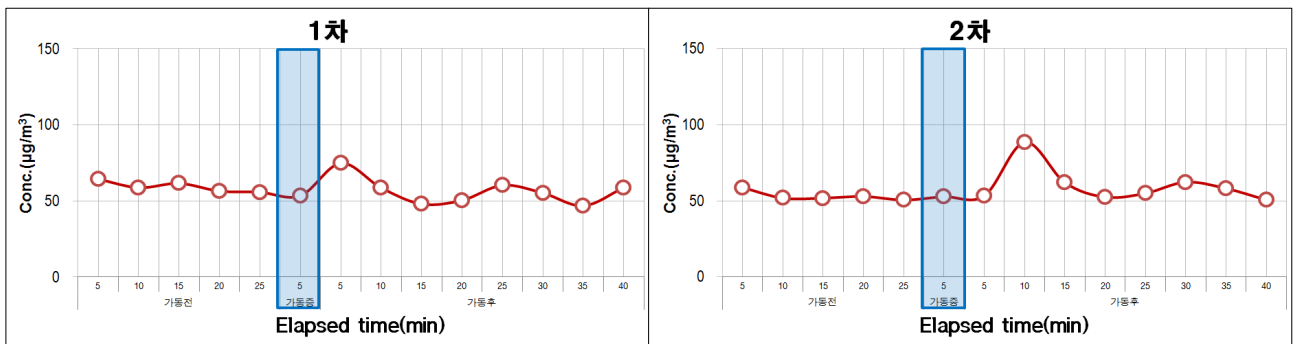


Fig. 6. Variation of PM-10 concentrations every 5 minutes before, during, and after watering.

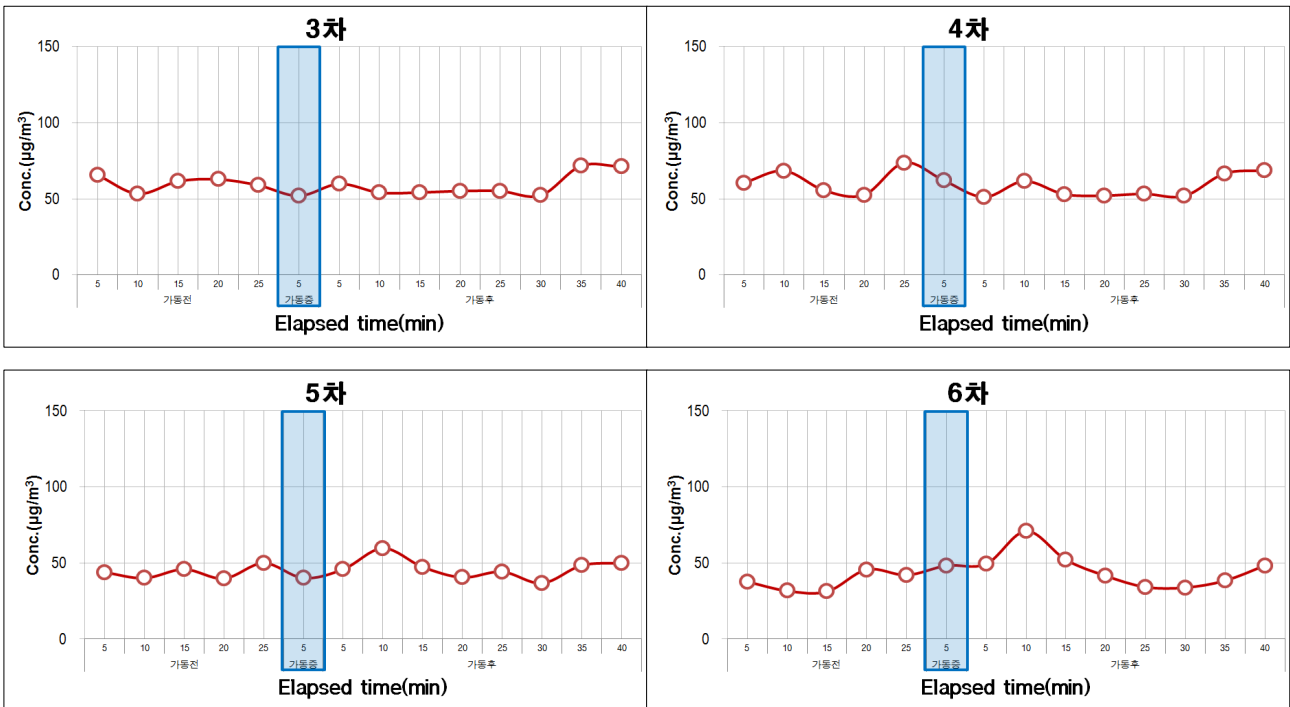


Fig. 6. Continued.

Table 2. Statistical analysis of before-during watering and before-after watering using Mann-Whitney U Test

	order	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
before-during watering	significant level (p=0.05)	0.000	0.607	0.000	0.394	0.108	-
	judgement	effective	not effective	effective	not effective	not effective	increase of conc.
before-after watering	significant level (p=0.05)	0.000	-	0.765	0.000	0.071	-
	judgement	effective	increase of conc.	not effective	effective	not effective	increase of conc.

로 분석된 경우는 2회(1차, 4차), 감소 효과가 없는 것으로 분석된 경우도 2회(3차, 5차), 살수 후의 농도가 증가하는 경우도 2회(2차, 6차)였다. 여러 연구결과에 따르면 단지 도로먼지 청소차량을 이용한 도로청소(sweeping)만으로는 미세먼지 저감여부를 판단하기 어렵고, 살수(water flushing) 및 진공흡인(vacuum suction)이 결합된 청소방법이 이용될 경우에 미세먼지 저감 효과를 나타내는 것으로 나타났다.(Chang 등, 2005; Chou 등, 2007; 환경부, 2008년; Fulvio 등, 2009년; 환경부, 2012년; 국립환경과학원, 2012년)4)5)6)7)8)9) 도로표면에 살수 시 도시 미기상의 온도 저감에는 효과가 있었으나(서유환 등, 2013년)10), 본 연구와 유사하게 수행된 조병윤 등(2012년)의 연구결과에서와 같이 일간 및 일중 변동 분석결과 도로살수로 인한 미세먼지(PM-10)뿐만 아니라

NO₂, CO 등도 저감효과를 기대하기는 어려운 것으로 판단된다²⁾.

결론

본 연구에서는 우리 시에 시범적으로 설치된 도로변 살수장치 가동에 따른 미세먼지 농도 저감효율을 분석하고 자 총 6회에 걸친 현장실험을 실시하였고, 향후 클린로드 시스템의 확대여부 방안에 대해서 알아보려고 하였으며 그 결론은 다음과 같다.

1. 살수 전·중·후로 구분하여 10초 간격으로 연속적으로 측정된 결과, 미세먼지(PM-10) 농도는 살수 전 37.6 µg/m³ ~ 62.2 µg/m³, 살수 중 40.2 µg/m³ ~

62.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 살수 후 46.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 60.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도범위로 나타났다.

2. 살수 전 대비 살수 중 농도 비교분석 결과 농도가 감소한 경우는 2회로 각각 -10.1 %, -14.0 % 였고, 3회는 미미하게 감소하였으나 살수 전·후 큰 차이가 없었으며, 1회는 오히려 증가한 것으로 나타났다.
3. 살수 전 대비 살수 후 농도 비교분석 결과 농도가 감소한 경우는 3회로 각각 -4.7 %, -2.0 %, -7.8 % 였으나 3회는 오히려 증가한 것으로 나타났다.
4. 비모수 검정인 Mann-Whitney U Test (맨-위트니 U 검정법)를 이용한 통계분석 결과, 살수 전과 살수 중 미세먼지 감소효과가 있는 것으로 분석된 경우는 2회, 감소효과가 없는 것으로 분석된 경우는 3회, 농도가 증가하는 경우는 1회였으며, 살수 전과 살수 후의 효율분석 결과 미세먼지 감소효과가 있는 것으로 분석된 경우는 2회, 감소효과가 없는 것으로 분석된 경우도 2회, 살수 후의 농도가 증가하는 경우도 2회로 나타나 살수장치 가동으로 실제 미세먼지(PM-10) 저감 효과를 판단하기에는 어려웠다.
5. 도로청소방법에 따른 미세먼지 저감효과 분석을 위해 청소차량을 이용한 미세먼지 저감연구와 비교 결과, 살수와 진공흡인이 결합된 형태의 이동식 청소방식(water flushing + vacuum suction)은 저감 효과가 있는 것으로 나타났으나, 본 연구와 같이 고정식 살수 방식은 타 유사 연구사례와 같이 저감효과를 기대하기 어려운 것으로 판단된다.
6. 본 연구는 실제 현장에서 실험할 수 있는 이점이 있으나, 주의의 여러 변수들을 조절할 수 있는 닫힌계(closed system)가 아니라 현장 주위의 변수들(차량 통행량, 운행 속도, 풍속, 풍향 등 기상조건, 대기 중 미세먼지의 영향 등)에 의한 영향을 직접적으로 받는 열린계(opened system)이므로 정확한 결과도출에 어려움이 있었다.

활용방안 및 제언

활용방안

제한된 구간에 설치된 도로변 살수장치는 미세먼지 저감효과의 판단 여부가 어려우므로 살수장치 확대 방안 강구 시 도로 청소차량 도입 시와 경제성과 효율성에 대해 충분히 비교검토 필요

제언

1. 도로변 살수장치 운영하면서 하천수를 용수로 사용 시 하천수내 부유물질로 인한 가동 상의 문제점(펌프의 막힘 등)과 하절기 악취문제 유발, 동절기 동결 등의 문제로 고려 필요
2. 살수장치 가동 시 통행 차량들로 인한 물튀김으로 인근 차량 및 보행자, 주변 상가 등의 민원발생에 따른 점도 고려 필요

참고문헌

1. 국립환경과학원, 대기오염물질배출량(2011).
2. 조병윤, 백성옥, “클린로드 시스템 가동이 도로변 PM10 농도에 미치는 영향분석-대구지역의 사례연구”, *한국입자 에어로졸학회*, 제8권 제3호, pp.111~120 (2006).
3. 대구광역시, 클린로드 조성사업 기본계획 수립 용역 요약보고서, (2009).
4. Chang YM, Chou CM, Su KT., Tseng CH, “Effectiveness of street sweeping and washing for controllig ambient TSP”, *Atmospheric Environment*, Vol. 39, pp.1891~1902(2005).
5. Chou C, Chang Y, Lin W, Tseng C, “Evaluation of street sweeping and washing to reduce ambient PM10”, *International Journal of Environmental Pollution*, Vol. 31, pp.4231~448 (2007).
6. 환경부, 도로 재비산 먼지 저감 시범사업 타당성 조사 연구, (2008년).
7. Fulvio amoto, Xavier Querol, Andres Alastuey, Marco Pandolfi, teresa Moreno, Jose Gracia, Pau Rodriquez, “Evaluating urban PM10 pollution benefit induced by street cleaning activities”, *Atmospheric Environment*, Vol.43, pp.4472~4480(2009).
8. 환경부, 도로청소를 통한 비점오염물질관리 타당성 조사 연구, (2012).
9. 국립환경과학원, 교통량 밀집지역의 자동차 대기오염 영향연구, (2012).
10. 서유환, 박익수, 김원태, 김정호, 윤용한, “클린로드 시스템이 미기상에 미치는 영향분석”, *한국환경과학회 2013년 정기학술대회 발표논문집*, 제22권 (2013).

