

TECHNICAL NOTE

도시열환경개선을 위한 대구 클린 로드 시스템의 확대 운영방안에 관한 연구

정응호 · 노백호 · 김해동*

계명대학교 환경학부

Managerial Plan of Extended Operation of the Clean-Road System for the Improvement of the Urban Thermal Environment in Daegu

Eung-Ho Jung, Paik-Ho Rho, Hae-Dong Kim*

Faculty of Environment, Keimyung University, Daegu 42601, Korea

Abstract

From December 2014 to November 2015, an automatic weather system (AWS) was installed over a wide road of Daegu to continuously measure meteorological factors and surface temperature. We investigated the effective operating period of the clean-road system using the daily maximum and minimum air and asphalt surface temperatures, with the aim of creating an optimum thermal environment.

The clean-road system was installed over a part of the broad way of Dalgubul(Dalgubul-Daero) by Daegu Metropolitan City in 2011. Until now, the clean-road system has been operated from the middle of April to the end of September. We assumed that it was desirable that the clean-road system could be operated when the discomfort index was above 55. In conformity with the conditions, we concluded that the optimum operation period of the clean-road system is from the end of March to about the middle of October.

Key words : Clean-road system, Optimum thermal environment, Discomfort index, AWS

1. 서론

대구광역시에서는 2009년 6월부터 2011년 11월에 걸쳐서 대구의 대표적인 간선도로인 달구벌대로의 일부 구간인 총 9.1 km 구간에 클린 로드 시스템이라고 부르는 도로 살수장치를 설치하여 2011년부터 운영해 오고 있다. 클린 로드 시스템의 도입은 2011년 대구 세계 육상 선수권 대회를 대비하여 도로 비산먼지를 저감하기 위하여 도입되었다. 최근에는 클린 로드

시스템의 주목적인 도로상의 비산먼지 제거보다도, 여름철 폭염 대응책의 하나로 도로변의 열 환경 개선 효과가 더 주목받고 있다. 클린 로드 시스템의 도입은 대구에 앞서서 서울과 포항도 도입하여 운영하였다 (Kim et al., 2015a).

서울시에서는 2007년에 국내 최초로 세종로, 올림픽대로에서 도로에 물을 살수하여 도로 청소를 수행하였다. 사업 대상의 도로 길이는 연장 1 km(각 500 m)로 1일 수회씩(1회에 100 톤) 5분간 노면 전체에

Received 2 November, 2016; Revised 16 November, 2016;

Accepted 18 November, 2016

*Corresponding author : Hae-Dong Kim, Department of Global Environment, Keimyung University, Daegu 42601, Korea
Phone : +82-53-580-5930
E-mail : khd@kmu.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.

살수하는 방식이었다. 하지만 이 시스템은 2010년 10월부터 서울시 신청사 공사, 차선변경 등의 사유로 중지되었다. 포항시는 국내 기초지자체로서는 최초로 2009년에 클린 로드 시스템을 도입하여 운영하고 있다. 대상 도로는 육거리-남빈사거리-오거리에 걸친 약 800 m 구간이고, 대구와 마찬가지로 도로 중앙에 분사 노즐을 3 m 간격으로 200여개를 설치하였고 1회에 5분씩 가동하고 있다. 봄과 가을에는 새벽 시간대에 1회 살수하고 여름에는 낮에 한차례 더 추가로 살수하고 있다(Baek, 2011). 창원시에서도 여름철 도시열섬 억제 대책으로 클린 로드 시스템의 도입을 추진하고 있다.

클린 로드 시스템이 여름철 도로 변의 고온 경감대책으로 주목받고 있지만, 한후기(cold climate season)에 고농도 미세먼지 발생 시에 클린 로드 시스템을 가동하여 도로변의 비산먼지를 제거할 필요성도 높아지고 있다. 하지만 동계에 클린 로드 시스템을 가동하면 도로 결빙과 도로 이용자들에게 저온 피해를 유발할 우려가 있다. 이러한 이유로 클린 로드 시스템을 도입한 지역에서도 이 시스템을 난후기(warm climate season) 중심으로 운영하고 있다.

이러한 배경에서, 이 연구에서는 도로결빙과 보행자에게 저온 영향을 최소화하면서 클린 로드 시스템을 운영할 수 있는 기간을 평가해 보고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 야외 관측 조사

대구 지역의 계절별 기온의 시간변화를 알아보기 위해 대구의 지난 1년간(2014년 12월~2015년 11월) 햇빛에 충분히 노출되는 교내의 주차장에 온도로그를 설치하여 도로 표면온도를 연속적으로 관측하였다. 관측은 온도로그에 열전대를 2개 접촉시켜 도로 표면온도를 동시에 관측하여 2개 온도자료가 일치하는 지 여부를 평가하는 방식으로 자료의 품질을 평가하였다. 아울러 관측 장치를 연구실에서 지근거리에 설치하여 매일 자료를 수거하고 수시로 센서가 도로 표면에 제대로 부착되어 있는지를 확인하였다. 아울러 학교 부근의 달구벌대로 상에 AWS를 설치하여 도로 상의 온습도와 바람을 관측하였다. Fig. 1에 AWS의 설치 사진을 나타내었다.

2.2. 연구방법

대구의 상대습도 기후치인 65.2% (National Institute of Meteorological Research, 2011)를 가정하고, 1년간 관측한 도로 상의 일 최고 기온을 사용하여 불쾌지수를 계산하였다. 모든 사람들이 추위를 느낀다는 불쾌지수 55 이상이 되는 온도가 유지되는 기간을 클린 로드 시스템의 운영 가능기간으로 상정하였다(Hujibe, 2012). 여기서 사용한 불쾌지수(discomfort



Fig. 1. Photograph of AWS established over Dalgubul broad way of Daegu.

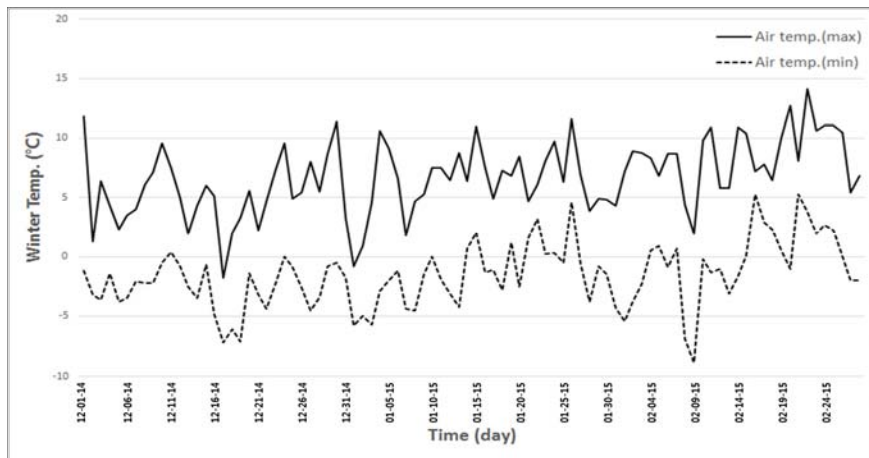


Fig. 2. Time variation of daily maximum and minimum air temperature during wintertime(Dec. ~Feb.).

index, DI)는 다음의 공식을 이용하였다(Nakamura and Kitamura, 1987).

$$DI = 0.81t_a + 0.01RH(0.99t_a - 14.3) + 46.3 \quad (1)$$

여기서 RH는 상대습도(relative humidity, %)이다.

불쾌지수는 주로 여름철 냉방설정의 참고자료로 활용되고 있지만, 겨울철 난방 조건 설정에도 이용할 수 있다. 불쾌지수가 60 이하가 되면 쌀쌀함을 느끼고, 55 이하가 되면 추위를 느끼게 되어 난방을 할 필요성이 제기된다(Kim et al., 2001). 이러한 지적에 따라서 이 연구에서는 한낮에 불쾌지수 값이 55 이하가 되면 사람들이 추위를 느끼게 되므로, 도로에 살수를 하는 것은 바람직하지 않은 것으로 상정하기로 하였다.

3. 결과 및 고찰

최근 1년간(2014년 12월 ~2015년 11월) 관측한 아스팔트 포장 면 위의 일최고기온과 일최저기온을 Fig. 1~4에 계절별로 나누어 제시하였다. Fig. 1에서 겨울철(12~2월)의 일최고기온은 -2~14.5°C, 일최저기온은 -9~5°C의 범위에서 변동하였다. 겨울철 최고기온은 2월 22일에 14.1°C로 나타났고 최저기온은 2월 9일에 -8.8°C로 나타났다. 겨울철에 도로의 결빙이 발생할 가능성이 있는 일최저기온이 0°C이하

로 떨어진 일수는 약 74% 정도로 나타났다. 그리고 일교차는 대체로 3~12°C로 나타났다. 상대습도가 60% 정도일 때에 모든 사람들이 추위를 감지하는 불쾌지수 55는 12°C정도이다. 따라서 겨울철에는 거의 모든 날의 한낮에도 불쾌지수 55 이하 상태로 평가되므로 클린 로드 시스템을 가동하는 것은 바람직하지 않을 것으로 판단된다. 특히 2월 중순 이후를 제외하고는 대부분의 날에서 일최저기온이 영하로 나타나서 클린 로드 시스템을 가동하게 되면 도로 결빙의 위험성도 높은 것으로 판단된다. 따라서 겨울철에 고농도 미세먼지 경보가 발령되는 경우에도 도로 상의 비산먼지 제거를 위한 클린 로드 시스템 가동은 도로의 열적 환경을 고려하면 타당하지 않은 것으로 판단된다.

Fig. 3에 봄철의 아스팔트 도로 상의 일최고기온과 일최저기온을 제시하였다. 봄철 일최고기온은 약 4°C~34°C이고 일최저기온은 약 -5~19°C로 봄철 최고기온은 5월 26일에 34°C로 나타났고 최저기온은 3월 10일에 -4.7°C로 나타났다. 봄철은 3월에서 5월로 기간이 흘러감에 따라 평균적으로 큰 기온 차를 보인다. 3월 중순까지 일최저기온이 0°C이하인 날이 나타나는 반면 5월에는 일최저기온이 약 10°C이상, 최고기온이 약 20°C이상으로 나타난다. 50% 정도의 사람이 더위로 인한 불쾌감을 감지한다고 알려져 있는 불쾌지수 75를 나타낼 수 있는 28°C 이상에 도달하는 날은 4월 20일 경이었다. 일최고기온이 28°C 이상이면서

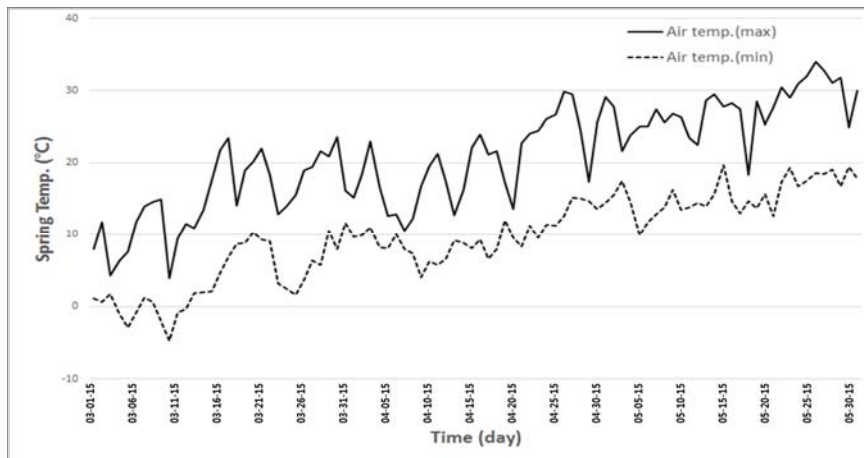


Fig. 3. Same as Fig. 1 but for springtime(Mar. ~May).

패청한 날에는 아스팔트 표면온도가 45°C 내외까지 올라가고 이러한 경우에 낮에 지표가 대기를 가열하는 현열의 양은 200 W/m²에 도달하는 것으로 평가된다(Kim et al., 2015b). 그리고 추위를 느끼는 수준에 상당하는 불쾌지수 55를 넘어서는 12°C 수준(일최저기온)에 도달하는 날은 3월 20일 경으로 나타났다. 3월 15일 이후로 일최저온도가 영상으로 전환되었고 일최고 기온이 20°C 이상까지 상승하기도 하였다. 낮의 일최고기온이 12°C 이하로 재차 떨어지지 않은 것은 4월 10일 이후였다. 따라서 클린 로드 시스템의 가

동은 3월 중순 이후로는 도로 상의 비산먼지 제거를 위해 가동할 수 있는 여건이 형성되는 것으로 판단된다. 다만 일최고온도가 재차 12°C 이하로 내려가지 않은 것은 4월 10일 이후였다. 따라서 대구시가 현재 클린 로드 시스템 가동을 개시하는 시기인 4월 15일은 도로의 열적 환경을 고려한다면 타당한 설정으로 판단된다.

여름철 일최고기온은 약 20~38°C이고 일최저기온은 약 12~19°C로 봄철 최고기온은 8월 6일에 37.4°C로 나타났고 최저기온은 6월 6일 12.9°C로 나타났다.

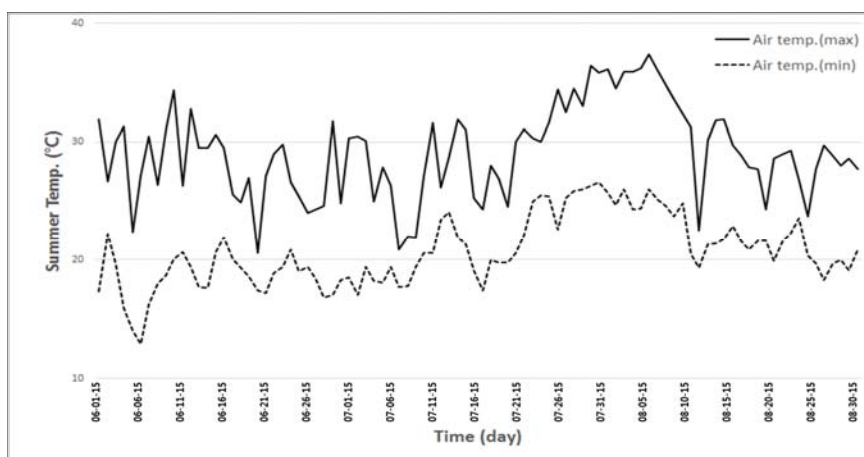


Fig. 4. Same as Fig. 1 but for summertime(June-July).

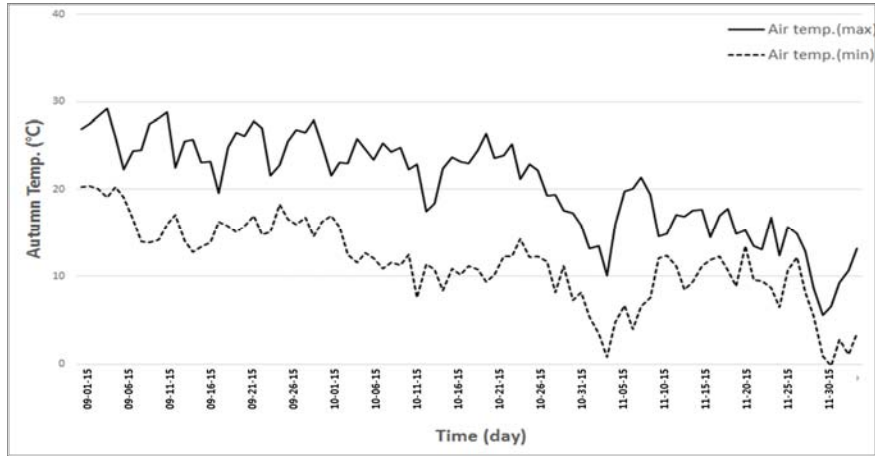


Fig. 5. Same as Fig. 1 but for autumn season(September~November).

여름철은 대부분 일최고기온이 강수가 있는 날을 제외하고 약 25°C이상으로 나타나며 7월 말부터 8월 중순까지 약 30°C이상의 일최고기온을 나타냈다. 강수량이 많은 날은 일최저기온이 약 25°C이하로 하강하며 일최저기온은 전날 6월 5일 강수로 인해 6월 6일 12.9°C로 나타난 날을 제외하고 여름철 일 최저기온은 약 18°C이상을 나타낸다.

대구기상지청에서 관측된 일최고기온이 30°C 이상인 경우에, 도로변의 기온은 이보다 적어도 3°C 이상 높게 나타나며, 일최저기온도 도로변이 3~5°C정도

더 높게 형성되므로 대구기상지청 발표의 일최고기온이 30°C 이상으로 예측될 경우에는 클린 로드 시스템을 이용하여 도로 표면온도를 낮추어주는 활동을 강화할 필요가 있다.

가을철 일최고기온은 약 5~30°C이고 일최저기온은 약 -0.2~21°C로 가을철 최고기온은 9월 4일에 29.2°C로 나타났고 최저기온은 11월 27일 -0.2°C로 나타났다. 가을철은 9월에서 11월로 시간이 지남에 따라서 일최고기온과 일최저기온이 점점 하강하는 경향을 보인다. 11월 27일은 일최저기온이 0°C이하로 영하의

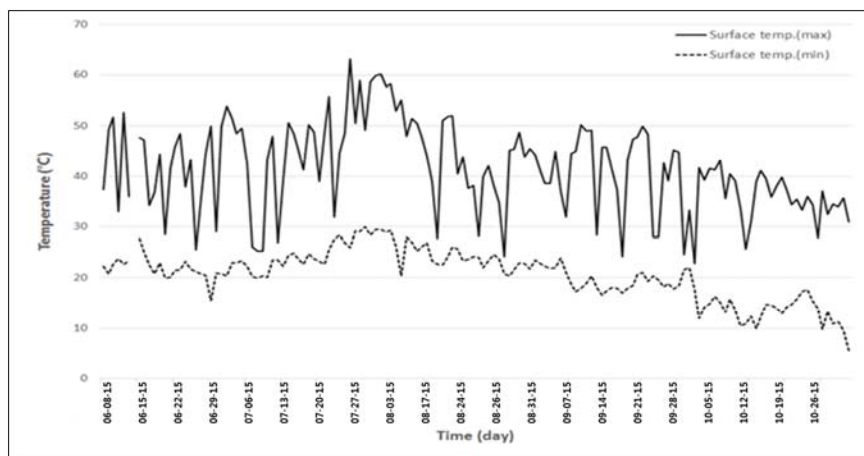


Fig. 6. Time variation of daily maximum and minimum surface temperatures(15 Aug. ~31 Oct. 2015).

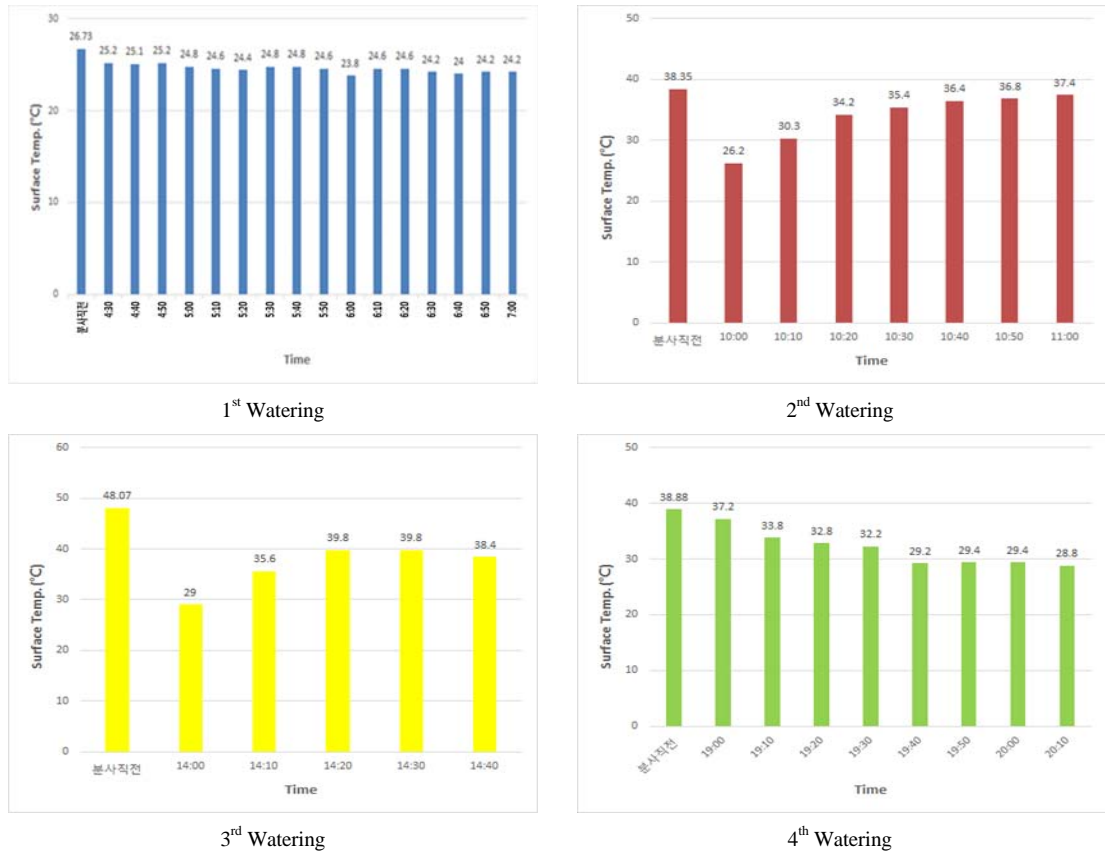


Fig. 7. Time variation of surface temperatures after watering by clean road system (05 Aug. 2015).

날씨가 나타남을 알 수 있다. 일최고기온이 28℃를 초과하는 날은 9월 말까지 이어져서, 적어도 이 기간까지는 도로 표면온도를 낮추어주는 활동이 필요한 것으로 판단된다. 현재 대구시에서는 클린 로드 시스템을 9월 30일까지 운영하고 있는데, 도로의 열 환경 개선을 목적으로 한다면 운영기간이 타당한 것으로 판단된다. 그리고 도로의 비산먼지 제거를 위한 시스템의 운영은 일최저기온이 0℃ 이상이고, 일 최고기온이 12℃ 이상을 유지한 10월 중순까지도 가능한 것으로 평가되었다. Fig. 6에 2015년 8월 15일부터 10월 31일까지 관측한 아스팔트 도로 표면의 일최고기온과 일최저기온의 시간변화를 나타내었다. 7월 27일에 63.5℃로 가장 높았고 10월말까지도 낮의 최고온도는 30℃를 초과하였다. 일최저온도는 7월 중순에서 8월 초에 걸쳐서 30℃ 이상으로 나타났고, 10월 하순까지 10℃

이상으로 나타났다. 이러한 지표온도의 시간변화로부터 하계 야간온도 하강을 위한 클린 로드 시스템 가동이 필요하며, 도로 상의 비산먼지 제거를 위한 시스템 가동은 10월 중순경까지도 시스템 운영이 가능하다는 것을 뒷받침하는 것으로 판단된다.

Fig. 7에 클린 로드 시스템 운영에 따른 도로 표면 온도 변화 사례를 나타내었다. 클린 로드 시스템으로 살수가 이루어진 2015년 5일에 모두 4차례(4:30, 10:00, 14:00, 19:00)에 걸쳐서 각각 30분씩 살수가 이루어졌다. 살수 직전부터 살수 후 1시간동안 10분 간격으로 도로의 표면 온도를 관측하였다. 첫 번째 살수는 4시 30분에 이루어졌다. 살수 후에 약 2℃정도 하강한 후에 그 상태가 지속되었다. 일사량이 많았던 10:00과 14:00에 살수가 이루어진 경우에는 살수 직후에는 표면온도가 약 10~15℃ 급강하였지만 20~

30분 후에는 표면의 물이 모두 증발하고 표면온도가 거의 원래 상태로 상승하였다. 낮 시간 동안에 클린로드 시스템이 가동되면 지표면온도와 기온이 일시적으로 크게 낮아졌지만, 그 효과는 불과 30분 정도에 지나지 않았다. 반면에 일몰 후인 19:00에 살수가 이루어진 이후에도 표면온도가 5℃정도 하강 한 후에 약간씩 표면온도가 하강하여 20:00에는 추가로 약 5℃ 추가로 낮아지는 것이 확인되었다. 일몰 이후의 클린로드 시스템의 가동으로 살수가 이루어진 경우에는 지속적인 지표면 온도 하강이 이루어져서 효과의 지속성이 높은 것으로 파악되었다.

4. 결론

대구의 클린 로드 시스템은 도로의 비산먼지 제거와 여름철 도로 상의 열 환경 개선을 목적으로 매년 4월 15일부터 9월 30일 사이에 가동되고 있다. 이러한 가동 기간의 타당성과 시스템의 확대 운영 가능성을 조사해 보기 위하여 아스팔트 도로 상에서 기상요소와 도로 표면 온도를 1년간 관측하였다. 이 자료를 이용하여, 불쾌지수 55(추위를 감지하는 수준)보다 높은 열 환경 하에서 도로 비산먼지 제거를 위하여 클린로드 시스템을 가동할 수 있는 대략적인 기간을 평가해보았다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 한낮의 도로 열 환경이 불쾌지수 55 이상이 되고, 야간 도로결빙의 위험성이 없어서 고농도 미세먼지 발생 시기에 클린 로드 시스템을 가동할 수 있는 기간은 대략 3월 20일부터 10월 20일 사이로 평가되었다.

둘째, 클린로드 시스템의 가동으로 여름철 한낮에 도로에 살수를 하면 높은 일사량에 의해 단 시간에 도로가 건조되고 도로의 온도가 원상회복이 되었다. 반면에 일몰 이후에 클린 로드 시스템을 가동하여 도로 온도를 낮추어 주면 도로 표면 온도의 하강 효과가 지속되었다. 그 결과로 도로에서 방출되는 현열과 장파복사에너지가 줄어 여름철 야간의 열대야 해소에 도움이 되고, 도로 상에서 발생하는 열적 난류를 줄여 도로 상의 미세먼지 재 비산을 줄이는 데에도 기여할 것으로 판단되었다.

셋째, 클린 로드 시스템을 지하철 이외로 또는 지하철 구간이라고 하더라도 폭염 대응을 위해 운영 시간을 대폭 확대하고자 한다면 이에 필요한 물의 확보를 위해 빗물 재활용의 비중을 높이는 등의 대안 마련을 하여야할 것이다.

도로의 열 환경은 매년 종관장의 영향에 따라서 변하므로 이 연구에서 제시한 클린 로드 시스템 가동 가능 기간도 해에 따라서 달라질 것이다. 따라서 클린로드 시스템을 가동하는 대구시에서 도로 상의 비산먼지 제거를 위해서 시스템 운영의 필요성이 대두될 때에는 도로 열 환경이 기온 12℃이상이고, 야간 도로결빙의 위험성이 없는 지를 고려하여 판단하면 타당할 것이다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부 도시건축연구개발사업의 연구비지원(16AUDP-B102406-02)에 의해 수행되었습니다(과제번호: 16AUDP-B102406-02).

REFERENCES

- Baek, S. O., 2011, Assessment of air quality at a heavy-traffic site in Daegu City with respect to the operation of clean-road system, Daegu Regional Environmental Technology Development Center, 1-7.
- Hujibe, H., 2012, Urban climate change and abnormal weather phenomenon, Asakusa Press, Tokyo, 161.
- Nakamura, S., Kitamura, K., 1987, Meteorological data manual, Maruzen Press, Tokyo, 204.
- Kim, H. D., Kim, S. B., 2001, On the property of climatological environment with discomfort index in Korea, J. Environ. Sci., 10, 129-133.
- Kim, S. R., Jung, E. H., Kim, H. D., 2015a, Observational study to investigate thermal environment and effect of clean-road system over a broad way of Daegu in summer, J. Environ. Sci. Int., 24, 969-980.
- Kim, H. D., Kim, S. R., Kim, B. J., 2015b, Observational study for the thermal environment evaluation of summertime over the asphalt pavement-Case study in Daegu 2014-, J. Environ. Sci. Int., 24, 1265-1272.