

도로 포장 기술 개선에 따른 대기 경계층의 열 변화에 관한 연구

A Study on the Impact of an Improved Road Pavement Technology on the Thermal Structure of Atmospheric Boundary Layer

이 순 환* · 김 인 수¹⁾ · 김 해 동²⁾

부산대학교 BK21 연안환경시스템사업단, ¹⁾한국도로공사 도로교통연구원,

²⁾계명대학교 환경방재시스템학과

(2008년 6월 10일 접수, 2008년 9월 9일 채택)

Soon-Hwan Lee*, In-Soo Kim¹⁾ and Hae-Dong Kim²⁾

BK21 Coastal Environment System School, Pusan National University

¹⁾*Expressway & Transportation Research Institute, Korea Expressway Corporation*

²⁾*Department of Environment Disaster System, Keimyung University*

(Received 10 June 2008, accepted 9 September 2008)

Abstract

In order to clarify the impact of anti-heat insulation pavement on the thermal structure of atmospheric boundary layer, field experiments and numerical simulations were carried out. Field experiment with various pavements were also conducted for 24 hours from 09LST 19 June 2007. And numerical experiment mainly focused on the impact of albedo variation, which is strongly associated with thermal characteristics of insulated pavement materials, on the temporal variation of planetary boundary layer. Numerical model used in this study is one dimension model with Planetary Boundary Layer developed by Oregon State University (OSUPBL).

Because anti-heat insulation pavement material shows higher albedo value, not only maximum surface temperature but also maximum surface air temperature on anti-heat insulation pavement is lower than that on asphalt. The maximum value of surface temperature only reach on 49.5°C. As results of numerical simulations, surface sensible heat flux and the height of mixing layer are also influenced by the values of albedo. Therefore the characteristics of urban surface material and its impact on atmosphere should be clarified before the urban planning including improvement of urban heat environment and air quality.

Key words : Insulation pavement material, Atmospheric boundary layer, OSUPBL, Numerical experiment, Urban heat environment

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)51-583-2651, E-mail : withshlee@pusan.ac.kr

1. 서 론

온실기체 증가로 인한 지구온난화는 많은 사회적 문제를 야기하고 있다. 특히 도시지역은 지구온난화와 더불어 도시 발달에 따른 열섬현상 등으로 생활 환경이 급격히 악화되고 있다. IPCC 보고서에는 지난 100년간 지구의 평균온도가 약 0.74도 상승하였다고 보고하였다. 그러나 도시지역에서는 지구 평균보다 높은 온도 상승이 나타났다. 서울과 뉴욕은 같은 기간 동안 2.1°C와 1.7°C의 온도 상승이 관측되었다. 그리고 Mikami (2005)는 동경의 경우 같은 기간 동안 온도 상승률이 3°C에 육박하고, 도시 중심부의 온도는 교외지역과 약 5°C 정도의 차이가 나타난다고 밝혔다. 이와 같이 도시지역은 지구온난화와 더불어 국지적인 도시 열섬의 특성이 더해져 지구 평균보다 높은 온도 상승이 나타난다.

도시열섬강도를 결정하는 요인으로 대기상태, 도시의 방열 특성, 인구밀도, 운송수단의 정도 등이 있다. 특히 에어컨 등 공조기를 통한 인공열과 더불어 지표면을 덮고 있는 아스팔트와 콘크리트에 의한 열적 특성이 주요한 요인이다. 일반적으로 도심 아스팔트의 경우 약 50°C까지 온도가 올라가서 보행자들이 직접적으로 지표면 현열을 접하게 되어 불편감을 느낀다. 그리고 낮 동안 다량의 현열이 도시내에 축적되고 야간이 되어도 완화되지 않는 특징이 있기 때문에 도심내의 온도를 상승시키는 요인이 되기도 한다. 이러한 도시의 열섬 형성요인을 이해하고 이를 조절함으로써 도시열섬강도를 완화시키기 위한 연구가 다수 진행되었다 (Kolokotroni *et al.*, 2006; 이순환 등, 2002; Ichinose *et al.*, 1999). 이러한 연구의 주요한 논점은 지표면 토지이용도의 변화를 통한 지표면 온도상승을 방지하는 것이다. 최근 도로 등 도시 지표면 물성변화에 따른 도시열섬 강도변화에 관한 연구가 다수 진행되고 있다 (Lin *et al.*, 2007; Oliveti *et al.*, 2003; Pomerantz *et al.*, 2000). 류남형과 우병림 (2006)은 투보수성 시멘트 재료에 대한 물성을 파악하여 수분보유에 따른 표면 온도의 변화를 살펴보았다. 수분량에 따른 열수지분포의 변화는 도로 표면의 온도에 크게 영향을 미친다고 하였다. 그리고 Dupont *et al.* (2006)은 도시지역의 빌딩과 지표면변화에 따른 열수지를 파악하고 이를 적용하여 지표면 온도를 비교

하였다. 이들은 나지와 습지의 열환경을 빌딩 등 도시지역의 열환경과 비교하여 도시지역의 지표면도 상승률을 분석하였다. 이순환 등 (2008)은 이러한 토지이용도에 따른 열환경의 변화 양상이 대도시와 교외지역에서 달리 나타나고 있으며, 이들을 비교함으로써 한반도 대도시지역의 국지적인 온난화 양상을 평가할 수 있는 가능성을 제시하였다. 그리고 Lee and Kim (2008)은 대구지역의 30년 동안의 도시 확장에 따른 중규모 순환장 변화를 통하여 지표면 토지이용의 변화가 중규모 순환장에 영향을 미칠 수 있음을 보였다.

이처럼 도시열섬을 일으키는 인공 구조물 중에서도 도로포장은 도시 지표면의 많은 부분을 점하는데, 그 비율은 우리나라의 경우에 대략 20% 내외에 이르고 있다. 포장된 도로는 강우 시에 지표면으로부터 빗물을 빠르게 배수시켜 교통과 보행을 편리하게 하는 기능이 있지만, 반면에 지층의 토양수분을 감소시키는 작용을 하게 된다. 그 결과로 지표면의 수분증발효과가 소실되면 증발에 따른 냉각작용도 소실되기 때문에 도시 지표면의 고온화가 진행된다. 이러한 아스팔트 지역의 열수지 연구는 주로 환경친화적인 측면에서 지표면 포장 재료의 보습성을 비롯한 물성적인 특징과 아스팔트의 생산기법 등 공학적인 방법으로 접근하고 있으며 (안덕순 등, 2006; Asada and Ca, 1993), 중규모 수치실험을 통한 연구는 주로 벌크적인 측면에서 지표면의 열수지 방정식을 이용하여 실시되었다.

그러나 도시교통을 지탱하는 중요한 사회기반이지만, 도시기후에 막대한 영향을 미치는 도로포장 특성에 따른 열수지 변화와 그에 따른 경계층의 대기환경 변화에 대한 연구는 많지 않다. 본 연구는 도시의 열환경을 악화시키는 주요한 요인의 하나인 도심 지표면환경 변화 특히 공학적으로 개선된 도로의 포장 상태에 따른 지표면 열수지에 관한 수치실험을 실시하였다. 그리고 실질적인 포장 재료를 이용한 야외 실험을 통하여 수치실험에 대한 검증과 지표면 열수지 변화가 대기경계층에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 관측 및 수치실험

2.1 지면 포장재의 특성

본 연구에 사용된 차열성 포장재는 고반사성 포장

재료 배수성이 뛰어난 포장재에 태양복사에 대한 반사율이 높은 표면 물질을 도색한 것이다. 태양복사는 가시광선과 근적외영역의 에너지가 많은데, 이들 중 가시광선의 반사율이 높으면 도로 표면에 대한 명도가 높아져서 사람들에게 눈부심 현상을 일으킨다. 그래서 최근에는 가시광선의 반사율은 낮추고 인간의 눈에 영향을 덜 미치는 근적외영역의 반사율을 높이는 방식의 기술이 개발되고 있다.

일사가 갖는 복사 특성으로부터 가시광선보다 긴 영역의 근적외파장은 복사영역의 열에너지의 약 50%를 점한다. 그림 1은 본 연구에서 사용된 고반사율 포장재료의 반사율을 파장별로 나타낸 것이다. 가시광선 영역에 해당하는 700 nm 이하의 파장에서는 반사율이 0에 가까워 흑색으로 나타나지만, 근적외파장 영역의 경우 70%에 이르며 전체영역의 파장대에서 보면 약 35~40%의 반사율 증가효과를 가진다. 이러한 반사율의 증가효과가 지표면 기온과 경계층에 어떠한 영향을 주는가를 수치실험을 통하여 살펴 보았다.

2. 2 야외 관측

차열성 지표면 포장재의 열적인 특성을 살펴보기 위하여 실외 관측을 실시하였다. 그림 2는 실외 관측 장면을 나타낸 것이다. 관측은 가로, 세로 각각 30 cm, 두께 5cm의 차열성포장재와 일반 아스팔트 포장재를 일사가 원만히 공급되는 대구광역시 계명대학교 운동장내에 설치하고 이들 표면에서의 온도변화를 측정하였다. 관측에 이용한 차열성 포장재는 회색, 진회색, 흑색 차열성 포장재 세 종류이다. 차열성

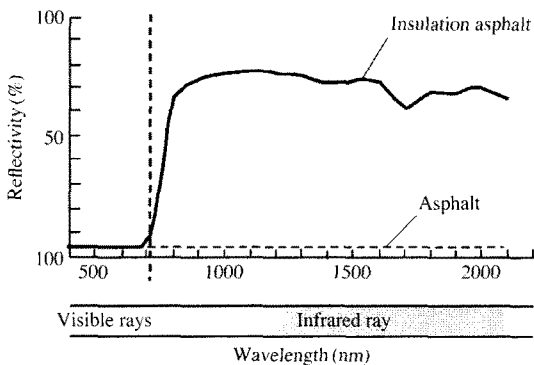


Fig. 1. Reflectivity of asphalt and insulation asphalt.

포장재의 제조공정을 보면, 먼저 두 차례에 걸쳐 일반 아스팔트를 시공과 다짐을 한 후, 아스팔트 표면의 수분, 유분, 먼지 등을 제거한 후에 차열재료의 도포에 따른 미끄럼을 방지하기 위하여 저항 감소 재료를 살포한 후 그 위에 고반사성 재료를 도포하였다. 모든 관측 시편은 차열재료를 제외한 모든 재료와 공정이 동일하게 적용되고 제작되었기 때문에 반사율 이외의 다른 포장재의 물리적인 특성은 유사하게 나타난다. 이들 고반사성 재료의 명도에 따른 반사도 차이와 지표면 온도 변화를 살펴보았다. 그리고

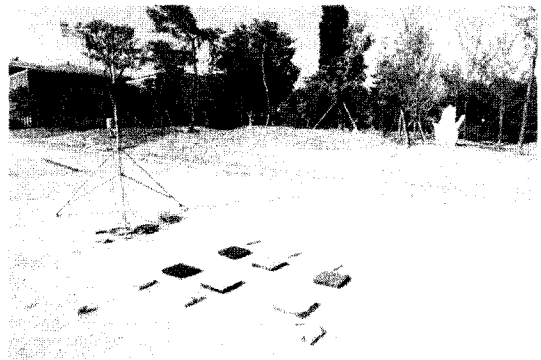


Fig. 2. Photography of field experiment for the surface temperature observation of several antiheat pavement materials. The pole with several equipments is Automatical Weather System.

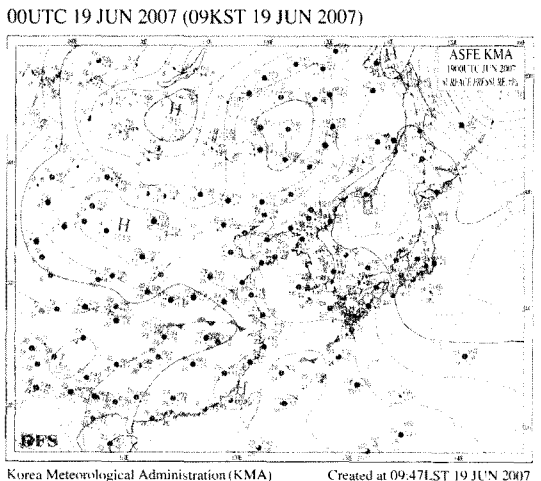


Fig. 3. Surface weather chart at 09LST 19 June 2007 provided by Korea Meteorological Administration.

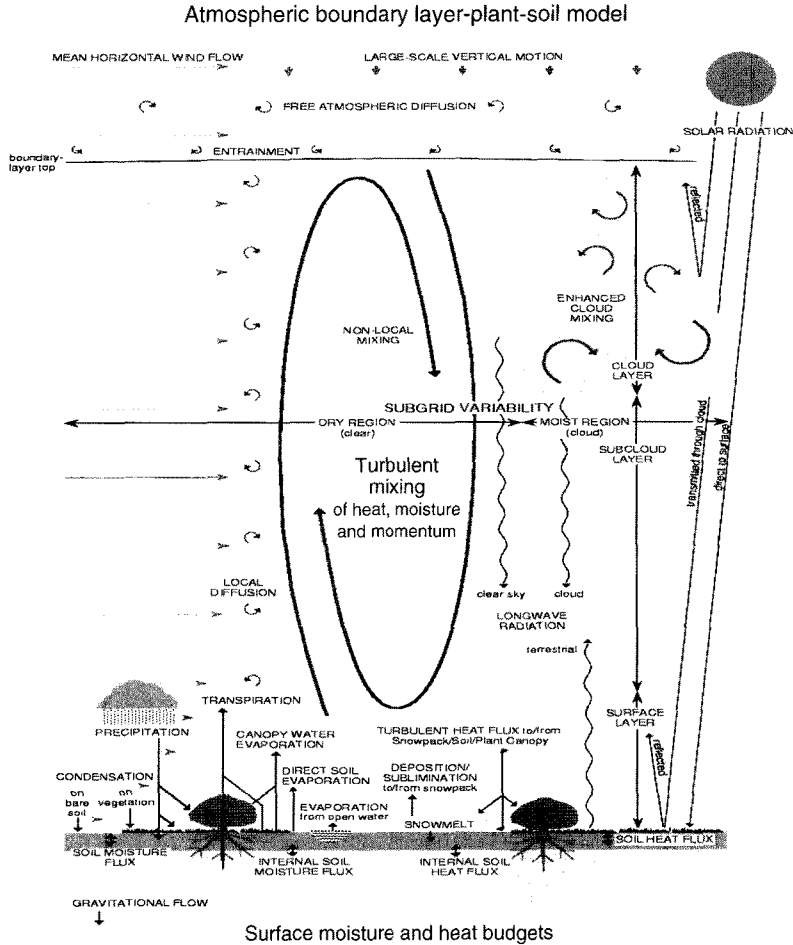


Fig. 4. Schematic illustration for construction of OSUPBL (Ek and Mahrt, 1991).

대조실험으로 차열성 도료를 칠하지 않은 아스팔트의 온도 변화도 관측하였다.

야외관측은 2007년 6월 19일 9시부터 24시간 동안 실시되었으며 온도 관측은 표면온도와 2.5 cm, 5 cm의 지표 내부온도를 10분 단위로 측정하였다. 표면 온도는 적외선 온도계를 사용하였으며, 지표 내부 온도의 측정에는 전기온도계를 이용하였다. 그리고 분석에는 아스팔트와 차열성 재료 이외에 나지인 운동장 표면의 온도를 측정하여 비교하였다. 동시에 자동기상관측장비를 이용하여 대기의 기상상태를 측정하였는데, 6월 19일 9시에서 18시까지의 낮시간 평균 풍속은 2.1 m/s, 평균기온은 27°C이며 평균 일사량은 831 W/m²였다. 이날의 일조시간은 12.5시간으

로 맑은 날씨를 나타내었다.

그림 3은 관측일인 2007년 6월 19일 09LST의 지상일기도를 나타낸 것이다. 한반도 상공을 중심으로 고기압이 동서로 길게 발달하고 있으며, 등압선의 간격이 넓기 때문에 바람이 매우 약한 상태에서 맑은 날씨가 유지된다. 이러한 기상조건은 지표면 기온에 영향을 미치는 풍속의 영향을 최소화할 수 있으며 강한 일사에 의한 지표면 열수지의 특성을 잘 나타낸다고 할 수 있다.

2.3 수치모형 및 실험설계

본 연구에 사용된 수치모형은 미국 오레곤 주립대학에서 개발한 1차원 지표-대기 결합 대기 경계층

모형 (Oregon State University one Dimensional Planetary Boundary Model) (OSUPBL)이다 (Ek and Mahrt, 1991). 그림 4는 모형의 개념도를 나타낸 것이다. 이 모형은 대기-지표 상호 간의 에너지 및 물질의 교환에 관한 연구에 적용되고 있으며, 현재 차세대 중규모 기상예보 모형인 WRF (Weather and Research Forecast)의 지표면 온도 및 식생온도 예보모형으로 채택되어 사용되고 있다. 지표면-대기 결합 모형은 자유대기 역학모형, 경계층 난류 혼합과 생성모형, 토양모형, 캐노피 모형, 지표면 열수지모형, 경계층 구름 모수화, 장파-단파 복사모형 등으로 구성되어 있으며, 본 연구에는 1.04버전이 이용되었다.

아스팔트의 구조 변화에 따른 지표면 온도 변화를 보기 위해서는 토양모형을 세분화하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 토양모형을 다층화하고 최상층을 아스팔트로 가정하여 계산을 실시하였다. 아스팔트 표면의 에너지 분포를 평가하기 위해서는 단순한 지표면의 열적인 요인뿐 아니라 지층과 대기 중의 열적인 요소를 이해하여야 한다. OSUPBL의 경우 이러한 요소들이 유기적으로 결합되어 계산된다. 그러나 본 논문에서는 지표면 온도 산출이 중요하기 때문에 모형의 지배 방정식 중 지표면 온도 산출에 관한 과정만 서술하였다.

계산에 이용된 지표면 온도 예보 방정식은 아래와 같다.

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial \left(K_s \frac{\partial T}{\partial z} \right)}{\partial z} \quad (1)$$

여기서 C, T는 각각 열용량과 온도이고, K_s 는 열확산 계수이다. 지표면의 열용량은 지온을 결정하는 주요한 요인이 되며, 체적 함수량에 선형적인 비례관계를 가진다. 그러나 열확산계수의 경우, 비선형적으로 변화하는 특징을 가지고 있다. 지표면과 토양 내부의 열교환은 아래의 식에 의해서 결정된다.

$$G = K_s \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_z = \frac{\theta - T_{soil}}{\delta z} z \quad (3)$$

여기서 G는 지중열 플럭스를 나타내며, θ 는 지표

면의 온도, T_{soil} 은 토양 상층부의 온도를 나타낸다. 여기서 계산된 지중열을 이용하여 최종적인 지표면의 열수지는 아래의 식과 같다.

$$(1-a)S\downarrow + L\downarrow - \sigma(\theta)^4 = G + H + IE \quad (4)$$

이를 통하여 최종적으로 지표면 온도가 결정된다. 이때 S, L, H, IE는 각각 단파, 장파 복사, 현열, 잠열을 의미한다. 그리고 a는 반사율, σ 와 I은 각 Stefan-Boltzmann 계수와 증발효율을 의미한다.

전체적으로 모형은 대기-식생-지면으로 구성되며, 다양한 토지 상태에 적용된다. 도시지역에서는 다양한 토지이용도가 나타나지만 본 연구에서는 아스팔트 환경을 고려하기 때문에 식생 캐노피 층과 대기 또는 지중과의 열적인 교환은 고려하지 않았다. 그러므로 식물의 뿌리에 의한 증산효과, 식생에 의한 바람의 저항, 복사에너지의 차단 등도 없다고 가정하였다. 즉, 지표면과 대기의 직접적인 열 교환 환경만을 평가하는 수치실험을 실시하였다.

모형의 연직격자는 고도 6km까지 52개의 층을 두었다. 지표면 근처에서는 각종 물리량이 급격히 변화하기 때문에 조밀하게 두었으며, 상층으로 갈수록 격자간격을 넓게 하였다. 최하층의 높이는 5m로 설정하였다. 지중으로는 2개 층을 두었다. 지중의 물리적인 특성은 나지의 값을 이용하였다. 그리고 본 연구는 아스팔트 등 일반적인 도시의 포장재를 대상으로 하기 때문에, 지표면 열수지를 결정하는 주요한 요인 중의 하나인 잠열플럭스는 고려하지 않았다.

지표면 온도를 상승시키는 태양 복사에너지량은 관측이 실시된 대구지방의 위·경도에서 6월 19일의 일사량을 기준으로 설정하고 실험을 실시하였다. 이러한 수치실험 결과는 야외관측 결과와 비교하여 각 실험 조건의 타당성을 검증하였다. 실제 1차원 수치실험은 수평적인 조건이 모두 동일하다는 가정하에 실시되는데 본 연구의 야외실험은 조각의 시편을 이용한 것으로 이 둘의 물리적인 차이가 존재한다. 그러나 본 연구는 지표 포장재에 따른 물리적 변화가 대기 경계층에 미치는 영향을 정성적으로 분석하는 것이고, 대기의 물리량에 비하여 지표면 온도는 2차원적인 불균일성의 영향을 적게 받기 때문에 야외실험을 통한 지표면 온도 자료를 1차원 모형 실험의 검증 자료로 이용하였다. 그리고 관측 자료는 수치모형의 지표면 온도 변화 경향성을 검증하는 자료로도

이용되었다.

수치실험의 계산조건은 차열성 포장재의 특성인 반사도 값을 주요 변인으로 하였으며, 본 연구에서는 반사도를 0.1 (case ABD01), 0.3 (case ABD03), 0.6 (case ABD06)의 3가지로 구분하여 지표면과 대기경계층의 변화를 분석하였다. 도심지의 경우 빌딩 등 3차원적인 건물 등의 간접적인 요인에 의하여 일중 변화할 수 있으나 본 연구에서는 고정된 3가지 다른 반사도를 사용하여 각각의 수치실험을 실시하였다. 본 연구에 이용된 초기치 연직 기상 자료는 포항지역에서 2007년 6월 19일의 관측한 존데 자료를 이용하였다. 그리고 계산 적분기간은 96시간이며 초기치의 오차에 영향을 제거하기 위하여 24시간 이후의 값을 이용하였다.

3. 결 과

3. 1 차열성 포장재의 특성

그림 5는 야외 실험결과 나타난 아스팔트와 차열성 포장재별 표면 온도와 태양복사의 시간변화를 나타낸 것이다. 전체적으로 아스팔트에 비하여 차열성 포장재의 표면 온도가 낮게 나타난다. 모든 재료 표면에서 일출과 함께 온도가 상승하기 시작한다. 9시의 경우 아스팔트에서 온도가 33.5°C로 약간 높게 나타나고 있으며, 나머지 포장재는 30°C 전후의 비슷한 온도를 나타낸다. 그러나 일사가 강해짐에 따라 온도상승 정도가 달라진다. 아스팔트는 급격한 표면 온도상승이 나타나고 14시에 최대 57.6°C까지 상승한다. 그러나 회색의 차열성 포장재의 경우 태양 복사가 강해짐에 따라 표면온도가 상승하나 최고온도가 49.5°C에 머문다. 다른 차열성 포장재 역시 표면 온도가 상승하나 아스팔트에 비하여 작은 표면 온도 상승률을 나타낸다. 이러한 상승률의 차이는 차단재가 가진 반사율의 차이에 의한 것이다. 차단재 사이에도 회색계열의 포장재는 반사율이 높기 때문에 표면 온도가 낮게 나타난다.

지표면의 태양 복사 역시 온도와 비슷한 변화 경향을 가진다. 그러나 최대 태양 복사는 13시 경에 나타나는 데 비하여 최대온도는 14시에 나타난다. 이러한 1시간의 시간 지연은 태양 복사에너지가 다시 지표면의 현열 플럭스의 형태로 나타나는 데 시간이

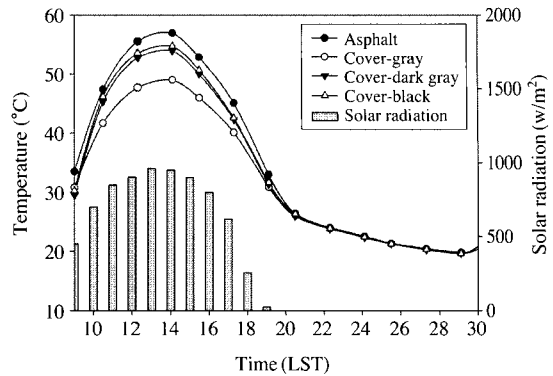


Fig. 5. Temporal variations of solar radiation and surface temperatures on asphalt and several pavement with insulation from 09LST 19 June 2007.

걸리기 때문이다. 지표면의 온도는 일정 깊이까지 배워진 후에 이것이 현열 플럭스의 형태로 표현된다. 이러한 온도지연은 열전달 방정식(식 1)에 나타난 확산계수와 지표면 수분상태 등에 따라 달라진다. 이날의 낮시간 동안 평균 태양 복사에너지는 831 W/m²로 전반적으로 강하게 나타나고 평균 이상의 복사가 5시간 이상 지속되었다. 이러한 강한 복사는 지표면의 온도 변화에 영향을 줄 것이다. 그리고 복사가 큰 폭으로 감소하는 14시 이후 지표면 온도 역시 큰 폭으로 떨어지는 것을 볼 수 있다.

태양복사가 약해지는 오후에 모든 포장재에서 온도가 하강한다. 그리고 21시가 되면 모든 포장재의 온도는 유사한 값을 가진다. 이는 태양 복사에너지에 의한 열적인 요인이 제거되는 동시에 내부적인 요인인 장파복사의 차이가 그리 크지 않기 때문으로 사료된다. 그리고 포장재의 면적이 유한하고, 각 포장재의 복사 특성에 따른 온도차이가 낮보다 야간에 작으며, 비록 야간 평균 풍속이 1.5 m/s로 작지만 이들에 의하여 포장재의 열적인 특성이 상쇄되기 때문에 모든 값이 유사하게 나타나는 것으로 사료된다. 이러한 포장재에 따른 열적인 특성을 반사도 특성에 따른 수치실험을 통하여 살펴보았다.

그림 6은 서로 다른 반사도에 대한 수치실험에서 계산된 지표면 온도의 시간 변화를 나타낸 것이다. 일사가 시작되면서 상승하는 지표면 온도는 반사율이 0.1인 ABD01에서 가장 높게 나타났다. 그러나 그 크기는 크지 않다. 그러나 시간이 지남에 따라 온

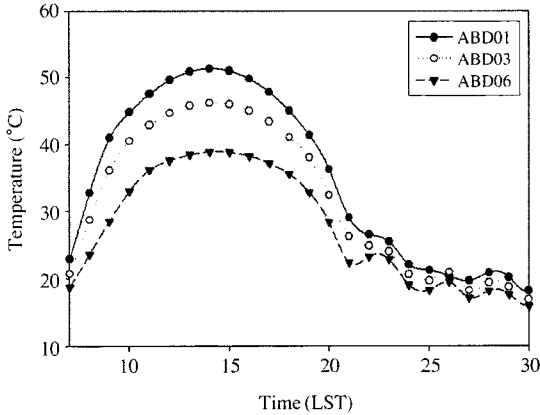


Fig. 6. Time evolution of simulated surface temperatures at 19 June 2007.

도상승률에 차이가 발생하고 정오에 각 실험에서 계산된 지표면 온도는 큰 차이를 보인다. 최고 상승률을 나타내는 ABD01의 경우, 온도가 15시에 51.3°C까지 상승한다. 전체적인 변화 경향이 그림 5의 아스팔트의 변화 경향과 비슷하다. 그러나 반사도가 높은 ABD06의 경우, 지표면 온도 상승률이 작게 나타나고 최고온도가 38.1°C이다. 그리고 전체적으로 반사율이 높을수록 지표면 온도는 작은 값을 나타낸다. 그러므로 반사율은 식 (4)에서 보는 바와 같이 지표면 온도를 결정하는 주요인자 중의 하나이다.

그리고 태양강도가 떨어지는 오후에 각 실험의 표면온도 역시 하강하지만 그림 5의 야외실험과 같이 일치하지는 않는다. 이는 야외실험의 경우 작은 면적의 포장재를 대상으로 실시되어 야간 복사 냉각 정도가 주위의 기상조건에 크게 영향을 받기 때문이다. 그래서 모든 포장재의 표면 온도가 유사하게 결정된다. 그러나 수치실험은 비록 연직 1차원 모형이지만 수평적으로 동일한 조건의 지표면이 무한하다는 가정을 가진다. 그러므로 주간의 기상조건에 따라 각 실험마다 야간 표면온도 분포의 차이가 발생할 수 있다.

이러한 차열성 포장재의 열적인 특성이 연직 대기 경계층에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 수치실험을 실시하였는데, 먼저 이러한 수치실험 결과의 타당성을 평가하여야 한다. 본 연구에서는 관측을 통하여 나타난 차열성 포장재의 표면온도와 다양한 반사도를 적용한 수치실험상의 표면 온도를 상

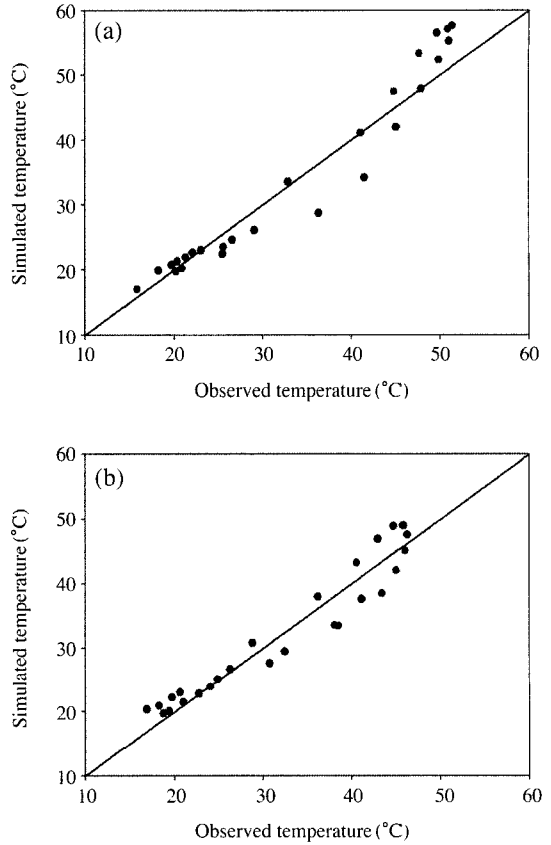


Fig. 7. Scatter plot of observed and simulated surface temperature for (a) asphalt-ABD01 and (b) insulated pavement material with gray color-ABD03. Black line is linear regression of the data.

호 비교함으로써 수치실험의 타당성을 평가하였다.

그림 5와 그림 6을 통하여 ABD01의 온도 변화가 검은색의 열차단재의 온도 변화와 비슷하게 나타나고, 반사율이 0.3인 ABD03의 경우 최대온도가 46.2°C로 회색의 차단재와 유사하다. 그러므로 각각의 지표면 온도를 상호 비교하여 산포도를 나타낸 것이 그림 7이다. 그림은 각 시간별 표면온도의 산포도를 나타낸 것이다. (a)는 아스팔트와 ABD01을 비교한 것인데 저온과 고온 영역에서 수치모형이 지표면 온도를 과대평가하고 있으며, 온도 상승기와 하강기에는 모델이 과소평가하고 있다. 그러나 전체적으로 상관도(R)가 0.951로, ABD01의 결과는 아스팔트의 온도변화를 잘 모의하고 있다. 그리고 (b)는 회색 열차

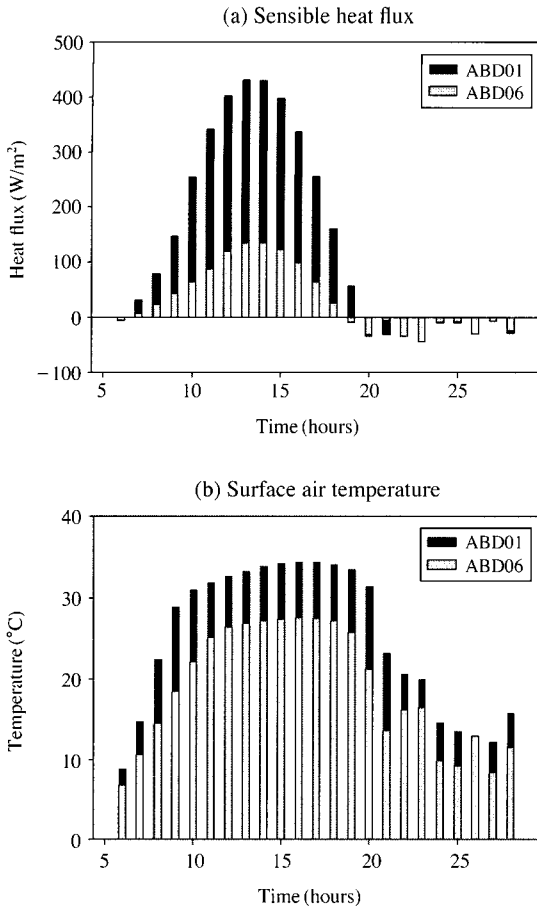


Fig. 8. Time evolution of sensible heat flux and surface air temperatures for ABD01 and ABD06. Black and gray bars indicate the values for ABD01 and ABD06, respectively.

단 포장재의 온도변화와 ABD03의 결과를 나타낸 것이다. 그 상관도는 0.972로 아스팔트에 비하여 높게 나타난다. 이러한 높은 상관도는 본 연구에서 사용한 경계층모형이 지표면 포장재 변화에 따른 경계층연구에 부합한다는 것을 의미한다.

3. 2 지표면 포장재에 따른 대기경계층의 영향 분석

야외실험에 따른 분석 결과 차열성 포장재의 온도 분포 특성이 수치모형의 반사도를 변화시킨 경우와 유사하게 나타남을 보았다. 그러므로 다양한 차열성 포장재 특성을 반사도 변화와 직접적으로 연결할 수

있으며, 다양한 반사도를 적용한 수치실험을 통하여 차열성 포장재가 대기 경계층에 미치는 영향을 분석할 수 있다. 본 연구에서는 차열성 포장재에 의한 열수지가 대기 경계층에 미치는 영향을 명확히 하기 위하여, 아스팔트의 온도 특성과 유사한 반사도 0.1과 태양 복사열을 차단한 포장재를 가정한 반사도 0.6의 값을 적용하였다.

그림 8은 ABD01과 ABD06에서 나타난 지표면 현열 플럭스와 지표면 기온을 나타낸 것이다. 현열 플럭스의 일변화는 태양 복사에너지의 일변화와 일치한다. 일출과 더불어 증가하면서 정오 무렵에 최대가 된다. ABD01과 ABD06의 주간 최대 현열 플럭스는 13시에 각각 $453.3 W/m^2$ 와 $148.6 W/m^2$ 이다. 이러한 두 실험의 현열 플럭스의 차이는 반사도 차이에 의한 것으로 잠열 플럭스를 거의 없는 것으로 설정하였기 때문에 식 (4)의 열수지식에서 복사에너지의 거의 대부분이 현열 플럭스로 전환되었다.

그림 (b)는 지표면 기온을 나타낸 것인데 현열 플럭스와 마찬가지로 정오에 최대 차이를 나타낸다. ABD01과 ABD06에서 계산된 최고 기온은 각각 $33.4^{\circ}C$ 와 $27.2^{\circ}C$ 이다. 이러한 지표면 기온 차이는 두 실험의 현열 플럭스 차이를 반영한 것이다. 기온이 지표면 온도의 일차원 함수가 아니라 비선형적인 형태로 바람 등 주위의 기상조건에 영향을 받고 있기 때문에 기온과 현열플럭스의 변동행태가 동일하게 나타나지는 않는다. 야간이 되면 즉 20시부터 두 실험 모두 현열 플럭스는 음의 값을 가지며, 대기에서 지표면으로 열이 전달되는 것을 알 수 있다. 그리고 ABD01에서는 양에서 음으로 현열 플럭스가 변하는 시간이 ABD06에 비하여 1시간 지연된다.

그러나 그들의 플럭스 차이가 크지 않다. 그리고 플럭스의 차이와 비교할 때 온도의 차이는 크게 나타난다. 이것은 낮 시간 동안 나타난 대기의 온도 차이에 의한 영향이 지속적으로 지표면 온도에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 즉 지표면 현열 플럭스는 태양 복사에너지에 직접적으로 영향을 받기 때문에 비록 앞에서 설명한 바와 같이 약간의 시간 지연은 나타나지만 태양 복사량과 유사한 경향성을 가진다. 그러나 기온의 경우 지표면뿐 아니라 경계층내 공기의 열적인 환경에도 영향을 받기 때문에 태양 복사량 변화와 선형적으로 일치하지는 않는다. 특히 야간의 경우 이러한 불일치는 두드러지게 나타난다.

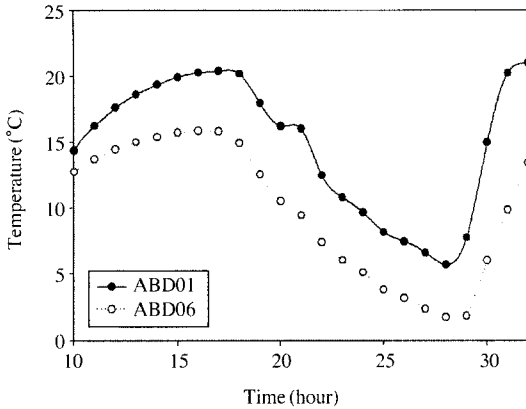


Fig. 9. Time series of air temperatures at 50 m high for ABD01 and ABD06. Closed and open circles indicate the simulated air temperature with one hour interval from case ABD01 and case ABD06, respectively.

경계층내 온도 변화의 시간변화를 보기위하여 고도 50 m 상공의 기온변화를 나타낸 것이 그림 9이다. 50 m 상공의 기온변화도 지표면 온도 변화와 비슷한 양상을 나타낸다. 그림 8에 나타난 지표면 기온변화와 비교할 때 두 실험 간의 기온차이는 적으나 온도 변화 양상은 유사하다. 이는 상공으로 갈수록 지표면으로부터 전달되는 현열 플럭스가 감소하기 때문이다. 오전시간대에 급격히 상승하여 오후 18시를 지나면서 다시 급격하게 떨어진다. 그리고 그림으로 나타내지는 않았지만 시간이 지남에 따라 일 최고온도가 점진적으로 상승하는 경향을 나타낸다. 이러한 미세한 상승은 토양수분의 일변화 양상과 유사한 형태이다 (황수진과 진병화, 1994). 그리고 이러한 온도상승은 지표면의 잠열을 억제시킨 수치실험 설계상의 특성으로 분석할 수 있다. 이는 비록 초기에 지표면 수분량이 적지만 잠열 플럭스가 나타난다. 그러나 이러한 잠열플럭스는 시간이 지남에 따른 지표면 수분량 감소와 더불어 감소하게 된다. 이러한 잠열플럭스의 감소와 현열 플럭스의 증가에 의하여 미세하지만 점진적인 주간 온도 누적 현상이 나타난 것으로 볼 수 있다.

이러한 지표면의 열환경 변화가 혼합고의 높이 변화에 미치는 영향을 보기 위하여 12시부터 18시까지 혼합고의 연직분포를 살펴보았다. 그림 10은 12시부터 18시까지 온위의 연직 분포를 나타낸 것이다.

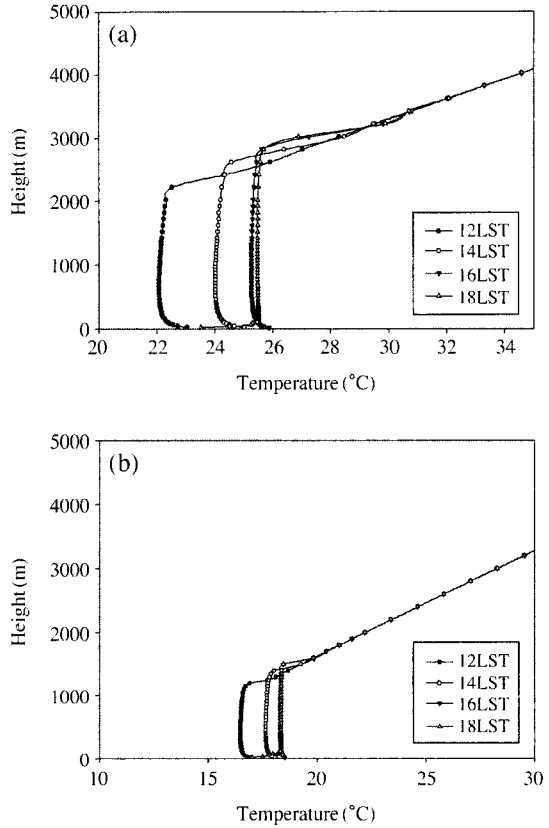


Fig. 10. Time evolution of vertical profile of potential temperature for (a) case ABD01 and (b) case ABD06. The time interval for each profile is 2 hours from 12LST.

ABD01에서 계산된 연직 분포를 보면, 12시에 혼합고가 2,000 m 정도까지 성장한 것을 볼 수 있다. 지표면 부근의 온위는 지표면에서 계속적으로 현열 플럭스로 인하여 혼합고 전체의 평균 온위보다 높게 나타난다. 이러한 현상은 14시까지 유지된다. 14시의 혼합고는 계속 성장하여 2,200 m를 넘어간다. 그리고 전체 혼합고의 온위도 12시보다 높다. 그러나 18시가 되면 혼합고의 성장은 멈춰지고 지상 부근의 온위는 감소하게 된다. 이때 최고 혼합고를 나타내는데 2,800 m 고도를 나타낸다. 그리고 12시부터 18시까지 혼합층내 평균온위는 5.5°C 정도 증가하였다. 반면, ABD06의 경우 전체적인 혼합고 성장 경향은 ABD01과 유사하게 나타난다. 그러나 혼합고의 최고 높이가 16시에 1,500 m 높이에 머물고 있으며, 이때

의 혼합층내의 평균온위는 18°C를 나타낸다. 그리고 12시부터 18시까지 혼합층의 온위상승은 ABD01에 비해서 작게 나타남을 알 수 있다. 혼합층의 최고 온위는 18.3°C로 ABD01에 비하여 낮게 나타난다. 이러한 낮은 온위변동은 지표면에서 현열 플럭스가 작다는 것을 의미한다. 그러나 고도 3 km 이상에서는 온위의 일변화가 나타나지 않는다. 이에 지표면 포장재에 따른 영향은 3 km 이상에서는 거의 없다고 볼 수 있다.

그러므로 반사도 변동에 의한 지표면 온도의 변화는 대기 경계층의 변동에 직접적으로 영향을 미친다. 반사도가 높은 차열성 포장재를 이용한 도시 표면은 태양 복사에너지의 많은 부분을 대기 또는 우주로 돌려보내고 나머지를 지표면이 흡수하기 때문에 도시 내에 축적되거나 현열의 형태로 재방출되는 열에너지가 작게 된다. 이는 도심지내 열에너지총량의 감소로 이어지고 그리고 도시열섬을 완화시켜 쾌적한 인간생활을 영위할 수 있는 기초적인 조건을 제공할 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 도로 포장의 표면온도를 저감시켜 도시 열섬 억제 효과를 가져오기 위해서 개발하고 있는 차열성 포장재를 대상으로 지표면온도 저감효과에 관한 실외실험을 수행하였다. 그리고 차열성 포장재가 대기경계층의 열환경에 미치는 영향을 보기 위하여 수치모형을 이용한 수치실험도 병행하였다. 야외 관측은 차열성 포장재와 아스팔트의 표면 열변화를 비교하기 위해 2007년 6월 19일 09시부터 24시간 실시되었다. 그리고 수치실험에 이용된 모형은 오레곤 주립대학의 1차원 대기경계층 모형이다. 수치실험은 아스팔트와 차열성 포장재의 반사율을 각각 0.1과 0.6으로 산정하였다.

그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 아스팔트의 표면 온도의 경우 14시에 57.6°C까지 상승하였으나 회색의 차열성 포장재는 49.5°C로 낮은 최고 온도를 나타내었다. 이러한 차열성 포장재의 변화에 따른 표면온도의 변화는 반사율의 변화에 기인한 것이다.

2) 야외 관측과 수치실험 결과의 상관관계를 분석

해 본 결과 모두 0.9 이상의 높은 상관을 나타내었다. 그러므로 차열성 포장재의 물리적 특성은 열수지 방정식 내 반사도의 항으로 표현할 수 있다.

3) 차열성 포장재의 반사도 변화에 따라 지표면 현열 플럭스가 변화하고, 그 차이가 최대 304.7 W/m²로 크게 나타났다. 그리고 이러한 현열 플럭스의 차이에 따른 지표면 기온의 차이는 6.2°C이다. 그러므로 반사도가 높은 지표면 포장재는 도시지역의 온도를 낮추는 역할을 할 수 있다.

4) 혼합고의 변화에도 영향을 미치는데, 아스팔트를 산정한 ABD01에서 혼합고가 최대 2,800 m까지 성장하였다. 반면 차열성 포장재를 산정한 ABD06의 경우 혼합고의 성장 고도도 낮고 혼합층내의 온도 변화도 3°C로 낮게 나타난다. 그러나 약 3 km 이상의 고도에는 지표면 포장재에 따른 차이를 발견할 수 없었다.

이와 같이 차열성 포장재는 반사도 변화를 통하여 표면 온도를 낮추는 효과를 나타낸다. 이러한 지표면 온도의 감소는 대기중으로 방출되는 현열 플럭스를 감소시켜, 대기 혼합층의 발달을 억제한다. 이와 같이 도시의 표면을 차열성 포장재로 교체하면 도시지역의 열섬효과를 방지할 수 있는 하나의 방안이 될 수 있다. 그리고 포장에 의한 도시 열환경의 악화를 방지하기 위하여 포장재를 밝게 하여 반사도를 높이는 공법이 필요할 것이다. 본 연구는 포장재의 표층에 관한 연구에 주안점을 두었기 때문에 지중열 등 지중으로의 열확산을 높이는 방안에 대한 연구가 추후 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 “장수명 친환경 도로포장 재료 및 설계 시공 기술 개발 사업”의 일환으로 진행되었으며 본 연구를 지원하여 주신 국토해양부와 한국도로공사에 감사드립니다.

참 고 문 헌

류남형, 유병림 (2006) 투보수성 시멘트 콘크리트 포장의 열물성 및 수분보유 특성이 표면 온도에 미치는 영향. 한국조경학회지, 34(1), 21-36.

- 안덕순, 박희문, 엄병식, 김재원 (2006) 현장 계측자료를 이용한 아스팔트 포장체 온도 예측 연구, 대한토목학회논문집, 26(1), 67-72.
- 이순환, 박명희, 김해동 (2008) 도시화에 의한 야간 대기 냉각율 변화에 관한 연구, 대기환경학회지, 24(1), 83-90.
- 이순환, 이화운, 김유근 (2002) 복잡지형에서 도시화에 따른 대기오염 확산에 관한 시뮬레이션, 한국대기환경학회지, 18(2), 67-83.
- 황수진, 진병화 (1994) 지표면 열수지의 강수응답성에 관한 연구, 한국환경과학회지, 3(2), 89-100.
- Asaeda, T. and V.T. Ca (1993) The subsurface transport of heat and moisture and its effect on the environment: a numerical model, Bound. Layer Meteor., 65, 159-179.
- Dupont, S., P.G. Mestayer, E. Guilloteau, E. Berthier, and H. Andrieu (2006) Parameterization of the urban water budget with the submesoscale soil model, J. Appl. Meteor. Climat., 45, 624-648.
- Ek, M. and L. Mahrt (1991) OSU PBL model user's guide, Oregon state university, 117pp.
- Ichinose, T., K. Shimodozono, and K. Hanaki (1999) Impacts of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo, Atmospheric Environment, 33, 3897-3909.
- Kolokotroni, M., I. Giannitsaris, and R. Watkins (2006) The effect of the London urban heat island on building summer cooling demand and night ventilation strategies. Solar Energy, 80, 383-392.
- Lee, S.H. and H.D. Kim (2008) Effects of regional warming due to urbanization on daytime local circulations in a complex basin of the Daegu Metropolitan Area, Korea., J. Appl. Meteor. Climat., 47, 1427-1441.
- Lin, T.P., Y.F. Ho, and Y.S. Huang (2007) Seasonal effect of pavement on outdoor thermal environments in subtropical Taiwan, Building and Energy, 42, 4124-4131.
- Mikami, T. (2005) The abnormal climate in Tokyo, Yosensha Press, 95pp.
- Oliveti, G., N. Arcuri, and S. Ruffolo (2003) Experimental investigation on thermal radiation exchange of horizontal outdoor surfaces, Building and Environment, 38, 83-89.
- Pomerantz, M., B. Pon, H. Akbari, and S.C. Chang (2000) The effect of pavement's temperatures on air temperature in large cities. Berkely CA, Lawrence Berkely National Laboratory, LBNL-434.