

보수성 도로 포장재의 증발효율 변화에 의한 중규모 순환장 특성 분석

김인수¹ · 이순환^{2,*} · 김해동³ · 서영찬⁴

¹한국도로공사 도로교통연구원, 445-812, 경기도 화성시 동탄면 신천리 50-5

²부산대학교 환경문제연구소, 609-735, 부산광역시 금정구 산 30

³계명대학교 환경방재시스템학과, 704-701, 대구광역시 달서구 달구벌대로 2800

⁴한양대학교 교통공학과, 426-791, 경기도 안산시 상록구 사3동 1271

The Analysis of Mesoscale Circulations Characteristics Caused by the Evaporation-Efficiency of Water Retention Pavement

In-Su Kim¹, Soon-Hwan Lee^{2,*}, Hae-Dong Kim³, and Young-Chan Suh⁴

¹Expressway and Transportation Research Institute, Korea Expressway Corporation, Gyeonggi 445-812, Korea

²Institute for Environmental Studies, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

³Department of Environment Disaster System, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

⁴Department of Transportation Engineering, Hanyang University, Gyeonggi 426-791, Korea

Abstract: Field observation and numerical experiments were conducted to understand the impact of water retention pavement on the surface heat budget and on the regional circulation. The numerical model applied in this study is the atmospheric dynamic model Local Circulation Model (LCM) with two dimensional grid system, and a field observation was carried out under the clear sky and calm conditions of the weather on 19 July 2007. In the field observation, the maximum value of surface temperature on pavement covered with water retention material reached the 41.2°C at 1430 LST and the values was lower for 16.1°C than that of asphalt without the material. The Case BET03 assumed to be 0.3 for the surface evaporation efficiency was in good agreement with the observation and its sensible and latent heat fluxes were numerically estimated to be 229 and 227 W/m², respectively. Results of the numerical experiments demonstrated that the water retention pavement tends to induce the increase of latent heat flux associated with the lower surface temperature and mixing height during the daytime. Discontinuity of latent heat caused by the water retention pavement also tends to promote the development of mesoscale circulation called as land-land breeze or country breeze.

Keywords: water retention pavement, evaporation-efficiency, numerical model, surface heat budget

요 약: 보수성 포장재가 지표면 열수지와 중규모 순환장에 미치는 영향을 파악하기 위하여 수치실험과 야외 관측을 실시하였다. 수치실험에 이용된 모형은 LCM(Local Circulation Model)이며, 야외 관측은 대기가 안정되어 날씨가 맑은 2007년 7월 19일 실시되었다. 야외 관측실험에서 보수성 포장재 지표면 온도의 최대치는 1430 LST에서 41.2°C이고, 보수성 재료가 도포되어 있지 않은 일반 아스팔트보다 16.1°C 낮게 관측되었다. 수치실험에서는 증발효율 0.3을 가정한 case BET03에서 관측과 가장 유사한 값을 나타내었다. 이때 현열과 잠열플럭스는 각각 227 와 229 W/m²이다. 수치실험 결과, 보수성 포장재는 낮은 지표면 온도, 혼합고와 관련된 잠열플럭스를 높이는 경향이 나타난다. 보수성 포장재에 의한 잠열플럭스의 불연속은 교외풍과 같은 중규모 순환장의 발달을 강화시키는 역할을 한다.

주요어: 보수성 포장재, 증발효율, 수치모형, 지표면 열수지

*Corresponding author: withshlee@pusan.ac.kr

Tel: 82-51-583-2651

Fax: 82-51-583-2651

서 론

기후학적인 관점에서 지구온난화 문제가 주요한 환경적인 연구과제로 활발히 진행된다. 이러한 지구온난화를 가속시키는 하나의 요인으로 도시지역의 열환경 변화가 있다. 도시의 열환경 문제는 도시의 인구 밀집에 따른 인공열 증가와 더불어 도시표면의 아스팔트나 콘크리트에 의한 지표면 포장과 밀접하게 관계한다. 대표적인 도시 열환경 문제로 열섬현상을 들 수 있다, 열섬현상은 도로 포장에 의한 증발량 감소, 도로 포장재와 빌딩 등 구조물 밀집에 의한 열용량 증가, 나지 면적 감소, 도시하천의 복개 등 다양한 요인에 의해서 발생한다. 다양한 요인에 의한 도시의 고온 열 환경을 열오염의 개념으로 파악하고 이를 해소하는 연구가 다양한 방법으로 진행된다. 류남형과 우병림(2006)은 다양한 물성을 가진 시멘트 재료를 이용한 관찰을 실시하였다. 시멘트의 알베도와 투수성이 표면의 열환경을 결정짓는 요인으로 파악하였고 공학적인 포장 방법을 통한 해결이 필요하다고 제시하였으며, 이순환 외(2002) 대기 수치 실험을 통하여 한반도 동남지역의 지표면 토지 이용도를 변화시킨 상태에서 오염 입자를 방출하는 이류 확산 실시하였다. 토지이용도 변화가 열환경 변화를 가져오고, 이는 다시 오염 입자 수송에 영향을 미치고 있음을 확인하였다. Lee and Kim(2008)은 수치실험을 통해 대구지역의 30년간의 토지이용도 변화가 국지 순환장에 미치는 영향을 살펴보았다. 그 결과 도시열섬의 발생빈도가 증가하였으며, 이러한 도심지내 열환경 변화는 도시규모 바람장에 직접적으로 영향을 미치고 있다고 하였다. Olsen et al.(2008)은 GCM (General Circulation Model)을 이용하여 지표면 도시화에 영향을 미치는 요인들에 대한 민감도 실험을 통하여, 열섬 강도는 도시의 구조 뿐 아니라 지표면의 물리적 특성이 중요하며, 도시 열환경은 종관적인 기상상태와 주변지역의 지표환경에도 영향을 받고 있음을 보였다.

일반적으로 복사와 전도의 직접적인 열전달에 관한 연구는 건축공학적인 측면에서 다수 이루어져 왔다 (Oliveti, 2003; Hagishima and Tanimoto, 2003). 또한 대기경계층의 야외 관측과 수치 실험을 바탕으로 지표면과 빌딩 벽면에서의 현열 플럭스 변화에 관한 연구가 다수 이루어져왔다(Asaeda et al., 1996; Pomerantz et al., 2000; 이순환 외, 2008). 이러한 연

구는 대부분 현열플럭스를 주요 연구대상으로 하고 있다. 지표면 열수지에서 현열플럭스의 해석은 잠열 플럭스에 비하여 상대적으로 선형성이 강하기 때문에, 이들 연구 결과가 해석적으로 높은 정확도를 나타내었다.

지표면 온도를 결정하는 주요한 요인 중의 다른 하나는 지표면의 수분의 상변화에 따른 잠열플럭스이다. 특히 일반적인 도시 면적의 20%에 해당하는 도로 포장재의 잠열플럭스는 도시 지표면 열수지에 중요한 요소이다. 도로 포장재는 지표내부로부터 발생하는 증발을 방해할 뿐 아니라 강수에 의한 지표면 수분공급을 차단하고, 배수 작용을 통하여 지표면내의 수분 유지효과를 감소시킨다. 이러한 포장재의 잠열감소효과는 도심지역 열섬을 유발하는 주요 요인이 된다. 이와 같이 도시 열환경에서 잠열의 효과가 크게 부각됨에 따라 도시의 큰 영역을 차지하는 도로 포장재의 잠열을 높이는 재료와 기술적인 공법에 관한 연구가 실시되었고 특히 등이 출원되었다(김병훈 외, 2001; Dierkes et al., 2002; 박승범 외, 2007). 이러한 연구는 공학적인 관점에서 접근하여 미시적인 온도 분포특성만을 집중적으로 제시하고 있다. 본 연구는 도로 포장재의 수분 함유 능력 변화에 따른 지표면 열수지 변화와 이에 따른 중규모 순환장 변화를 수치실험을 통하여 살펴보았다. 이러한 연구결과는 도시계획상의 도시표면에 의한 영향을 정량화하는데 도움을 주리라 판단한다.

연구방법

수치모형

본 연구에서는 1차원적인 영향 뿐 아니라 지표면 포장재의 변화에 따른 지표열환경이 중규모 순환장에 미치는 영향을 파악하기 위하여 2차원 수치모형을 사용하였다. 본 연구에 사용된 대기 역학 모형은 LCM (Local Circulation Model)이다. 이 모형은 Kikuchi et al.(1983)에 의해 개발된 수치모형을 Kimura and Kuwagata(1993)과 Lee and Kimura(2001)가 비정역 학과정과 식생과정을 개량하여 만든 모형이다. 여기에서 간단한 기본 방정식계와 지표면과정을 기술 하였다.

모형은 2차원 정역학 대기를 가정하고, 좌표계는 지형 준거 좌표계(Z^*)를 채용하였다. 지형 준거 좌표계는 아래와 같다.

$$z^* = z_{TOP} \frac{z - z_G}{z_{TOP} - z_G}$$

z_T, z_G 는 각각 모형의 상단과 지표면의 고도를 의미한다.

모형에서 사용한 운동방정식은

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = f v - \Theta \frac{\partial \pi'}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + w \frac{\partial v}{\partial z} = f(u - v) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

으로 나타낼 수 있으며
운위방정식은

$$\frac{\partial \theta'}{\partial t} + u \frac{\partial \theta'}{\partial x} + w \frac{\partial \theta'}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial \theta'}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h \frac{\partial \theta'}{\partial z} \right) + Q_{cool},$$

비습방정식은

$$\frac{\partial q_v}{\partial t} + u \frac{\partial q_v}{\partial x} + w \frac{\partial q_v}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial q_v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h \frac{\partial q_v}{\partial z} \right)$$

이다.

이때 Exner 함수는 $\pi = c_p \left(\frac{p}{p_0} \right)^{R_d/c_p}$ 으로 표현하였다.

위에서 u, w 는 각각 x, z 방향의 속도성분이다. t 는 시간을 나타내며 θ' 는 평균온위(Θ)로부터의 편차를 나타낸다. q 는 비습(kg/kg)이고, T 는 온도(K), K_m 과 K_h 는 운동량과 열, 비습의 연직방향 확산계수($m^2 s^{-1}$)이며 K_H 는 수평방향 확산계수($m^2 s^{-1}$)이다.

지표면 모형의 경우 아래와 같은 현열, 잠열, 운동량플럭스의 예보 방정식으로 구성된다.

$$H = -\rho C_p u_* \theta^*,$$

$$LE = -\rho l u_* q^*,$$

$$\tau = -\rho u_*^2.$$

여기서 u_*, θ^*, q^* 는 각각 마찰속도, 마찰온도, 그리고 마찰비습이다. 이러한 현열과 잠열플럭스는 Monin-Obukhov 상사이론을 바탕으로 계산되며, 지표면과 토양내부의 열환경은 열전도 방정식에 의하여 결정되는데 이때 열용량은 지온을 결정하는 주요한 요인으로 비선형적으로 변화하는 특성을 나타낸다.

경계층내 난류 확산은 2.5 level 동결모형(Mellor and Yamada, 1982)을 적용하였으며, 본 연구는 응결에 의한 강수 상황을 고려하지 않기 때문에 강수와 정은 계산중에 포함하지 않았다. 그리고 수치대기의

밀도 변화에 의하여 생성되는 증력과의 상층 반사를 방지하기 위하여 Klemp and Durran(1983)의 상층 경계조건을 사용하였으며, 측면 경계 역시 수치 증력과의 원활한 통과를 고려하는 Oranski(1976)의 경계조건을 적용하였다. 이 모형은 다양한 미규모와 증규모 사례연구에 적용되어 모형의 계산안정성은 확인되었다(Kusaka et al., 2000; 이순환 외, 2002).

수치실험 설계

연구에 사용된 수치 모형은 대기-식생-지면으로 구성되며, 다양한 토지 상태에 적용된다. 도시지역 역시 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. 수치실험은 도로 포장재의 보수성 향상에 따른 지표면과 대기경계층의 물리요소를 분석하기 위하여 실시되었다.

보수성포장재를 상정한 수치실험은 1차원 연직 에너지 분석과 동시에 2차원 증규모 순환장을 가정하여 지표면 포장재의 성능 평가가 실시되었기 때문에 2차원 수치대기를 가정하였다. 격자구조를 보면 6 km 까지 52개의 층으로 구성하였으며 지중 격자 2개 층으로 설정하였다. 연직격자는 지표면 열플럭스가 매우 급격히 변화하는 지상에 가까울수록 조밀하게 두었다. 수평격자는 99개로 구성되며 격자간격은 2 km로 설정하였으며, 모든 격자가 동일한 물리량을 가지도록 하였다.

대기경계층 변화에 미치는 도로 포장재의 물성은 현열플럭스 차원에서 반사도, 열용량, 전도도 특성 등 여러 가지가 존재하며 상대적으로 선형적으로 반응한다. 그러나 잠열플럭스에 관련된 물성은 매우 복잡한 형태로 나타나며, 이를 선형적으로 설명하기 매우 어렵다. 그러므로 본 연구에서는 지표면 수증기 잠열을 결정하는 요소 중 중요도가 가장 높다고 알려진 증발효율의 변화를 통하여 아스팔트의 보수성을 표현하였다. 증발효율은 대기의 상태가 증발을 가장 효율적으로 나타낸다고 가정할 때 지표면의 최대 가증발량에 대한 실제 증발량의 비로 표현할 수 있다. 그러나 실제 증발량을 정확히 관측하는 것은 매우 어려운 작업이기 때문에 이 값을 지표면의 종류

Table 1. Evaporation efficiencies for several surface land-uses and their observation conditions (Kondo, 1994)

Land use	Evaporation efficiencies	Atmospheric condition	Observation height (m)
Sea surface	1.02	8m/s for wind speed	10
Snow	1.02	Neutral stability	1
Bare soil	0~1	↑	1
grass land	0.2~0.4	↑	1
Irrigated land	0.5~0.8	↑	10
Tree	0.1~0.3	↑	30
Urban	0.0 ~ 0.1	↑	30

별로 모수화하여 사용한다. Table 2는 각각의 지표면 상태에 따른 증발효율과 벌크 열확산계수를 나타낸 것이다(Kondo, 1994).

도심의 경우 증발효율이 0.1 이하의 저증발을 상정하며, 아스팔트의 경우 증발이 이루어지지 않기 때문에 0을 가정하기도 한다. 그러나 실제 주변에서의 수증기 이류 등으로 계산에서는 0보다는 약간 크게 설정한다. 본 연구에서는 0.05(case BET0.05), 0.1(case BET0.1), 0.3(case BET0.3), 0.5(case BET0.5)의 4단계의 증발효율 값을 설정하여 이들 값에 따른 변화를 살펴보았다. 계산에 사용된 복사에너지는 야외 관측이 실시된 2007년 6월 19일을 기준으로 설정하였으며, 구름이 없는 맑은 날을 상정하였다.

중규모 순환을 생성시키기 위한 요인으로 수평방향의 열적 불균일을 적용하였는데, 이러한 열적 강제순환을 생성시키기 위하여 도메인 중심에 위치한 25개 격자를 도심지로 설정하고 그 주변을 목초지로 구성하였다. 그리고 도시와 목초지사이의 열환경 차이에 의하여 발달하는 전원풍 변화를 통하여 보수성재료의 물리특성이 이들 순환에 미치는 영향을 분석하였다. 계산시간은 03시부터 36시간 적분을 실시하고 중간 24시간을 분석에 사용하였다.

야외 관측

한국도로공사에서 제공된 보수성 포장재의 물리적 특성을 파악하기 위하여, 야외 실험을 실시하였다. 관측은 주변이 트인 계명대학교내 운동장에서 가로 세로 각각 30 cm 두께 5 cm의 보수성 포장재를 두고 일중 온도 변화를 측정하였다. 동시에 대조군으로 일반 아스팔트로 도포된 포장재 역시 같은 크기로 설치하여 온도변화를 살펴보았다(Fig. 1).

보수성 포장재는 먼저 배수성 아스팔트 포장체내에 보수재를 포함하고 있으며, 보수재내의 수분은 대기 온도에 의해 증발할 때 기화열을 발생시키고 이러한



Fig. 1. Field experiment for the estimation of latent heat flux on the water retention pavement materials. The pole indicates the Automatic Weather System including several meteorological equipments.

기화열이 지표면 온도로 식히는 원리로 되어 있다. 이러한 보수성은 일회 강수 후 수일간은 수분을 유지할 수 있다. 이러한 보수성 포장재는 포장체의 큰 공극에 강성재료인 시멘트 페이소스를 사용하여 반강성을 가지기 때문에 내유동성이 강하여 변형이 방지되고, 또한 수분 증발에 따른 온도 하강은 하절기 지표면 포장재가 고온에 의하여 주행 및 인간의 보행에 쾌적한 환경을 제공한다는 장점이 있다(김인수 외, 2008).

야외관측은 2007년 6월 19일 9시부터 24시간 동안 실시되었으며 온도측정은 10분 단위로 표면, 2.5 cm, 5 cm 깊이의 지온을 측정하였다. 지중의 온도는 전기 온도계를 이용하였으며, 표면의 온도는 적외선 온도계를 사용하였다. 포장재의 온도에는 직접적인 태양 복사 뿐 아니라 관측시의 기상장도 영향을 미친다. 그러므로 보수성 재료의 온도 관측과 더불어 기상관

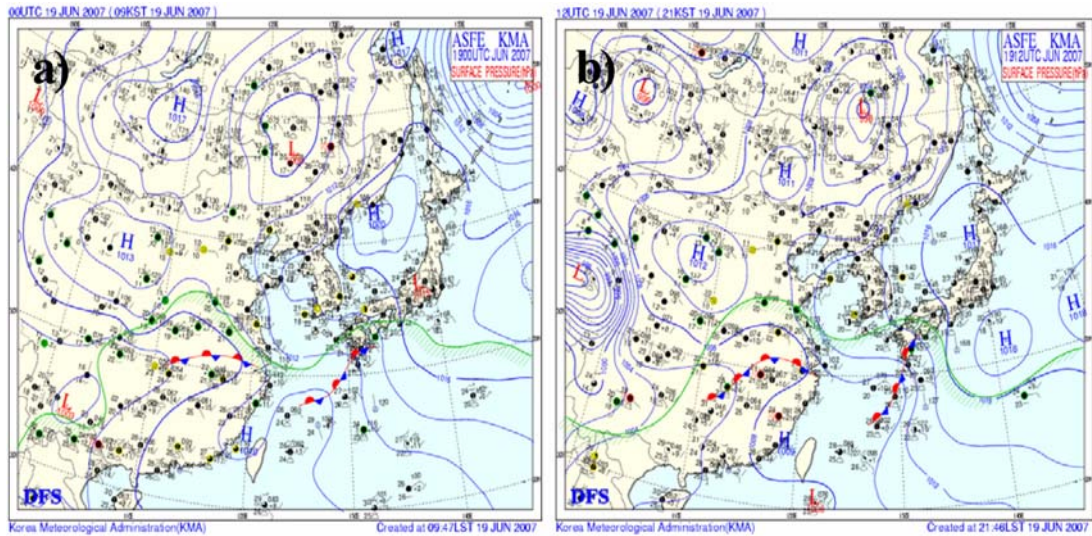


Fig. 2. Synoptic charts on surface at 0900 and 2100 LST 19 July 2007, which were provided by Korea Meteorological Administration.

측도 병행하였다. Fig. 1의 AWS(Automatic Weather System)에서 관측한 09시부터 18시 까지 일사가 방출되는 6시간 동안의 평균 풍속과 기온은 각각 2.1 m/s와 27°C이었다.

Fig. 2는 관측 당일의 09시와 21시의 지상 일기도를 나타낸 것이다. 19일 09시에는 한반도 동해상에 위치한 강한 고기압의 영향을 받고 있기 때문에 한반도 전역이 맑은 날씨를 나타내고 있으며, 21시에는 고기압의 강도가 약해지기는 하였으나 전체적인 위치 변화는 나타나지 않는다. 그러므로 관측이 이루어진 16일 낮시간 동안은 한반도 전체가 강한 고기압의 영향을 받았기 때문에 강한 일사가 관측되었다. AWS에서 관측된 낮시간 평균 일사량은 800 W/m²이며, 최대값은 14시에 1001 W/m²를 나타냈다.

이러한 기상조건 즉 약한 평균 풍속과 강한 일사 등은 보수성 포장재의 잠열효과가 뚜렷하게 나타날 것으로 판단되며, 이러한 잠열 특성은 대기 경계층 발달 강도에도 영향을 미칠 것이다.

결 과

보수성 포장재의 열적 특성

지표면 수분은 태양 복사에너지에 의해 지표에 흡수된 열을 잠열의 형태로 대기중으로 되돌려 보내는 역할을 한다. 그러므로 보수성 재료로 피복된 지표는

강수 등의 도심 수분을 배수시키지 않고 표면에 수분을 보존하여 지표면 잠열량을 증가시킨다. 이러한 잠열 방출은 지표면 온도결정에 직접적으로 영향을 미친다. Fig. 3은 야외실험에서 관측된 보수성 재료가 없는 아스팔트와 보수성재료로 피복된 아스팔트의 지표면 온도를 시간적으로 나타낸 것이다. 그리고 막대 그래프는 관측시간에 따른 태양 복사에너지에 나타낸 것이다.

먼저 관측초기인 9시에 아스팔트와 보수성 아스팔트의 지표온도 차이가 10°C에 이르렀다. 이것은 태양이 상승하고 작은 복사에너지에도 차이가 크게 나타난다는 것을 의미한다. 그리고 시간이 지남에 따라 이 둘의 온도차는 점점 증가하여 14시에 16.1°C로 최대가 된다. 이후 태양 복사에너지가 감소하고 지구 장파복사가 증가함에 따라 이 둘의 차이는 점점 줄어들고 20시를 넘어가면서 거의 일치하게 된다. 그리고 두 지표면 온도 차이는 크지 않으며 일정하게 유지되는 경향을 보인다.

지표면 온도의 시간변화상 뚜렷한 특징이 나타나는 데, 최대온도에 이르는 시간이 보수성 아스팔트에서 늦게 나타나는 것이다. 일반 아스팔트의 경우 13시 56분에 최대 온도가 나타났으나, 보수성아스팔트의 경우 그보다 40분이 늦은 14시 36분에 나타났다. 이는 높은 잠열에너지에 의하여 지표면 온도가 낮게 나타나고, 지구 장파복사의 방출량이 줄어들었기 때

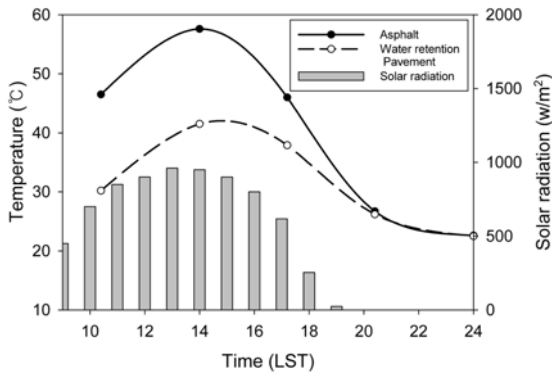


Fig. 3. Temporal variations of the solar radiation and surface temperatures on asphalt with and without retention pavement from 0900 LST 19 June 2007.

문이다. 그러므로 아스팔트의 보수성은 지표면 온도를 낮출 뿐 아니라 최고온도의 시간지연효과를 가져온다고 할 수 있다.

경계층 열수지에 미치는 영향 분석

Fig. 4는 수치실험을 통하여 계산된 각 사례별 지표면 온도와 모델 최하층의 기온을 나타낸 것이다. 보수성 정도를 의미하는 증발효율에 따른 지표면 온도경향성은 매우 뚜렷이 나타난다. 아스팔트를 가정 한 BET0.05의 지표 최고온도는 51°C로 13시에 나타난다. 이것은 Fig. 3에 제시된 아스팔트의 최고온도(57°C)와는 약간의 차이가 있다. 이는 실제 아스팔트의 경우 지표면 수분이 전혀 없기 때문에 증발이 전혀 없는 상태인데 수치실험에서는 도시의 보편적인 값으로 주었기 때문이다. 그러나 전체적인 시간 변화는 관측치와 잘 일치하고 있다. 그러므로 BET0.05를 아스팔트의 물리조건으로 상정하였다. 그리고 BET01, BET03, BET05로 갈수록 지표면 온도가 하강한다. 야외관측을 통하여 나타난 보수성 포장재의 증발 효율은 0.1에서 0.3 사이에 해당한다고 볼 수 있다. 즉 보수성 포장재에 의한 잠열에너지는 지표면 온도의 하강에 기여한다는 것을 알 수 있다. 이러한 지표면 온도에 따라 최하층 대기온도도 같은 시간 변화 경향성을 가진다. 그러나 지표면 온도의 시간 변화와 달리 20시 이후에도 온도차이가 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 대기중에 낮시간 동안 발달한 경계층상부의 에너지가 남아있기 때문으로 사료되며, 이러한 잔류에너지는 땅과 공기의 비열, 혼합고의 차이, 복사에너지의 양 등에 관계한다.

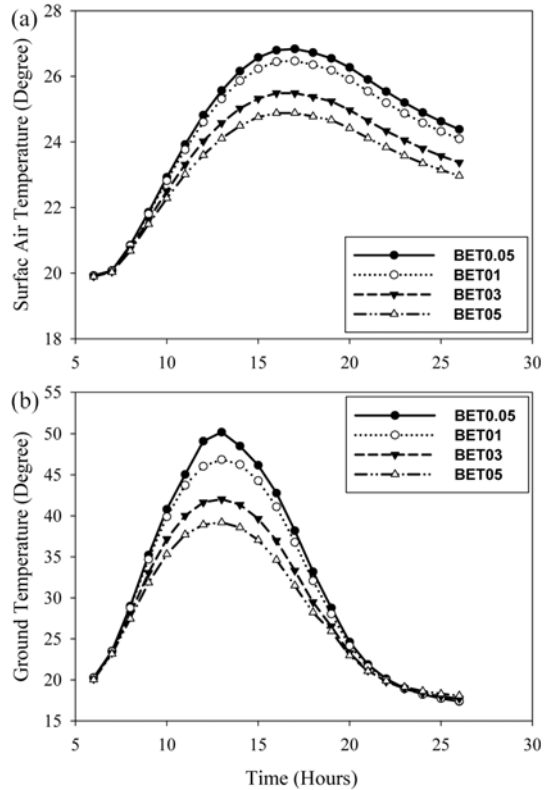


Fig. 4. Temporal variation of (a) air temperature at lowest level (20 m) and (b) simulated soil temperature in four cases.

각 사례의 지표면 플럭스변화를 보기 위하여 현열 플럭스와 잠열플럭스의 시간변화를 보았다(Fig. 5). 각 플럭스의 전체적인 변화경향은 모든 실험에서 유사하게 나타난다. BET0.05의 현열플럭스는 13시에 365 W/m²로 최대값을 나타내며 잠열 플럭스는 121 W/m²로 최소를 나타내었다. 반면 증발효율이 높은 BET03의 경우 같은 시간에 현열과 잠열플럭스가 각각 229, 227 W/m²로 계산되었다. 앞서 설명한 바와 같이 보수성 포장재를 상정한 BET03에서 잠열플럭스가 증가하고 이는 지표면 온도 및 기온 감소로 연결된다. 그리고 앞의 야외관측에서 본 바와 같이 플럭스의 시간변화에서도 매우 미묘하지만 약 15분 정도의 현열플럭스의 시간지연이 나타난다.

이를 좀 더 정확히 분석하기 위하여 Fig. 6에서 시간 변화에 따른 Bowen 비의 변화를 나타내었다. Bowen 비는 잠열플럭스에 대한 현열플럭스의 비로, 표면의 상태에 따라 달라진다. BET0.05에서 14시에 Bowen 비는 최대 3.1에 도달한다. 즉 현열 플럭스가

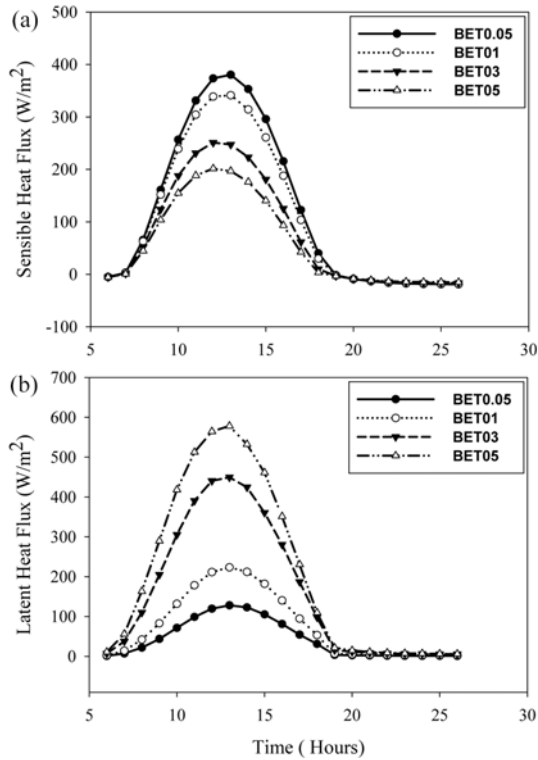


Fig. 5. Time variation of (a) sensible and (b) latent heat fluxes estimated by different numerical experiments.

잠열 플럭스에 비하여 3배 정도 크다는 것을 의미한다. 이러한 큰 값의 Bowen 비는 일몰과 함께 급격히 떨어지고 반대로 야간이 되면 Bowen 비가 음의 값으로 작아진다. 다른 말로 하향의 강한 현열플럭스가 나타나는 것이다. 반면 보수성 아스팔트를 상정한 BET03의 Bowen 비가 일중 1에 가까운 값을 유지하고 있으며 오후로 갈수록 점진적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 그리고 야간에도 급격한 하향의 현열이 나타나지는 않는다. 이러한 플럭스의 변화는 일반 아스팔트의 경우 작은 태양 복사에너지에 의하여 민감하게 반응하여 급격히 온도가 올라가고 반대로 급격히 온도가 내려가는 경향성을 나타낸다. 반면 보수성 아스팔트인 경우 수증기 잠열과 높은 수분함유량에 의하여 급격한 온도 변화가 나타나지 않는다.

이러한 지표면의 온도 변화는 낮 동안 연직 혼합층의 발달에도 영향을 미친다. Fig. 7은 각 실험을 통하여 계산된 12시의 연직 온도분포를 나타낸 것이다. 고도 1600 m 이상에서는 지표면의 영향을 받지

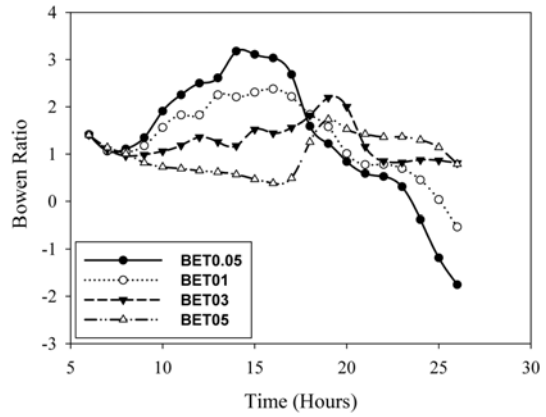


Fig. 6. Time variation of Bowen ratio (H_e/L_e) calculated by 4 different cases. Bowen ratio indicates the ration of sensible heat flux and latent heat flux and the amount of sensible heat flux is larger when the ration is over 1.

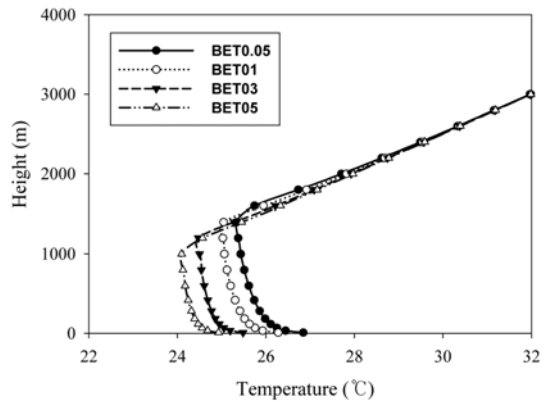


Fig. 7. Vertical profiles of potential temperature in cases at 1200 LST.

않기 때문에 거의 차이가 나타나지 않지만 지표면에 가까운 곳에서는 각 실험마다 다양한 강도의 혼합분포를 나타낸다. 실제 보수성 아스팔트를 가정한 BET03의 경우 1100 m 높이의 혼합고가 나타나는데 반하여 지표면 온도가 높은 아스팔트의 경우(case BET0.05)는 1500 m 까지 혼합고가 성장하는 것을 볼 수 있다. 그림으로 보이지는 않았지만 15시에 최대 2100 m까지 성장한다. 이러한 혼합고의 발달은 지표면 현열플럭스의 크기와 관련되고, 오후의 야간 잔류층 강도와도 관련이 깊다. 그리고 이러한 일종의 혼합고는 도시대기오염 농도에 밀접하여 도심지 인간 활동에 지대한 영향을 미친다.

Table 2. Estimated stream function, surface air temperature, and mixing height for each cases at 1200 LST

	BET0.05	BET01	BET03	BET05
Stream function (m^2/s)	1820	1501	823	425
Surface air temperature ($^{\circ}C$)	49.5	45.9	41.8	38.7
Mixing height (m)	1509	1499	1141	1025

중규모 기류장에 미치는 영향 분석

지금까지 연직 1차원적 분석을 통하여 보수성 포장재가 대기경계층에 미치는 영향을 보았다. 본장에서는 수치실험을 통하여 이러한 1차원적인 영향이 2차원 중규모 국지 순환장에 미치는 영향을 평가하였다. Fig. 8은 각 실험에서 계산된 12시의 유선장을 나타낸 것이다. 실선은 반시계방향의 순환을 점선은 시계방향의 순환을 나타낸다. 그리고 그림 하단의 굵은 실선은 도시로 상정된 영역을 나타낸다. 실험 설계에서 설명한 바와 같이 중심은 도시가 존재하고 양옆으로 경작지가 위치하는 조건에서 실험을 실시하였다. 그리고 도시로 상정된 지역에 보수성 포장재가

위치한다고 가정하였다.

먼저 12시의 유선장을 보면, 모든 실험에서 왼쪽은 반시계방향의 순환이 오른쪽은 시계방향의 순환이 나타난다. 즉 모든 영역에서 교외에서 도심쪽으로 바람이 불어오는 것을 의미한다. 그러나 강도면에서는 크게 차이가 나는데, BET0.05(a)의 도시를 가정한 경우 유선함수의 강도가 최대 $1820 m^2/s$ 까지 나타난다. 이는 보수성 아스팔트를 고려한 BET03(c)의 경우와 비교하면 약 2배 이상 강한 강도의 순환이 발생하는 것을 의미한다. 경작지와 비슷한 증발효율이 고려된 BET05는 거의 중규모 순환이 발생하지 않으며 발생 하더라도 매우 약하게 나타난다. 그러므로 보수성 아

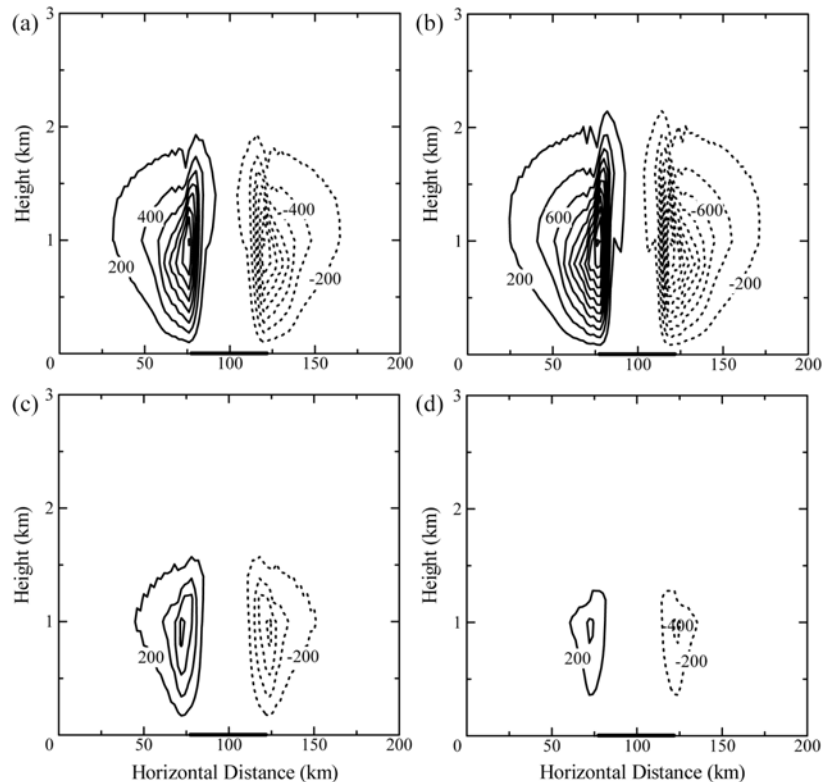


Fig. 8. Vertical distribution of estimated stream lines under a mixture of surface conditions for (a) BET0.05, (b) BET01, (c) BET03, and (d) BET05 at 1200 LST. Solid lines indicate the counter-clockwise circulation, while dashed lines indicate the clockwise circulation. Thick solid line on the X-axis denote urban with various evaporation efficiencies, and the interval of the stream lines is $200 m^2/s$.

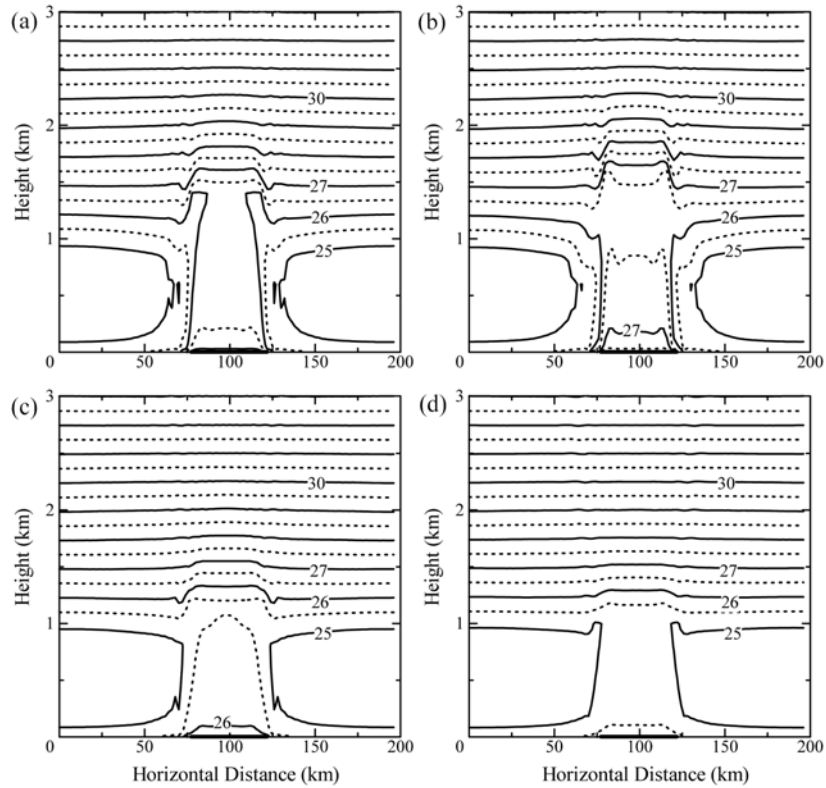


Fig. 9. Vertical distribution of potential temperatures for (a) BET0.05, (b) BET01, (c) BET03, and (d) BET05 in 1200 LST. Interval of solid and dashed lines is 1°C. Thick solid lines on the X-axis denote urban with various evaporation efficiencies.

스팔트의 온도 분포는 중규모 순환 강도에도 영향을 미치고 있다.

동일한 시간의 연직 온위 단면을 나타낸 것이 Fig. 9이다. 먼저 BET0.05의 온위 분포를 보면 도시가 위치하는 중앙부에서 높은 온위가 1600 m 높이까지 나타난다. 그리고 양옆에서 발생하는 중규모 순환을 따라 온위가 분포하는 것을 볼 수 있다. 이러한 분포는 도시와 경작지 사이의 중규모 순환에 따른 온도이류를 의미한다. 그러나 이러한 도심지의 뚜렷한 온위분포는 BET01, BET03, BET05로 갈수록 약화되며 도심지 양옆 순환장에 따른 온위경도도 약화된다. 보수성 아스팔트를 상정한 BET03의 경우 도심의 혼합고가 약 1000 m 정도로 낮게 나타난다. 그리고 경작지 환경과 비슷한 도심을 설정한 BET05는 작지만 온도가 낮게 나타나기도 한다. 이것은 도심과 경작지의 온도차가 작다는 것을 말한다. 또한 수평온도경도도 작기 때문에 중규모 순환을 발생시킬 수 있는 강제력이 없다는 것을 의미하기도 한다.

Table 2는 각 실험에서 계산된 1200 LST의 유선

강도, 최하층 기온, 혼합고를 나타낸 것이다. 앞서 본 바와 같이 지표면 보수성에 의한 잠열변화의 경향성에 따라 뚜렷한 특징이 나타난다. 가장 낮은 보수성을 가정한 case BET0.05가 가장 강한 유선함수강도, 높은 기온, 높은 혼합고도를 나타낸다. 그러나 여기서 한 가지 주목할 점은 유선함수강도와 혼합고의 관계이다. 특히 BET0.05와 BET01의 경우, BET0.05의 유선함수강도는 BET01에 비하여 $319 \text{ m}^2/\text{s}$ 증가한 데 비하여, 혼합고는 단지 10 m 증가에 그쳤다. 즉 유선함수의 강도는 21% 증가하였는데 혼합고는 단지 0.6% 증가하는데 그쳤다는 것이다. 이는 지표면의 열 플럭스에 따른 중규모 순환장의 강도에 대한 민감도와 혼합고 증감에 따른 민감도가 다르다는 것을 의미한다. 즉 지표면의 현열플럭스는 중규모 순환장의 강도에는 매우 민감하게 작용하지만 혼합고를 증감에는 덜 민감하게 나타난다.

이러한 경향성은 야간 산풍에도 동일하게 나타나는데, Lee and Kim(2009)는 부산 성지곡을 대상으로 한 야간 산풍 재현 실험에서 야간산풍의 도심지 통

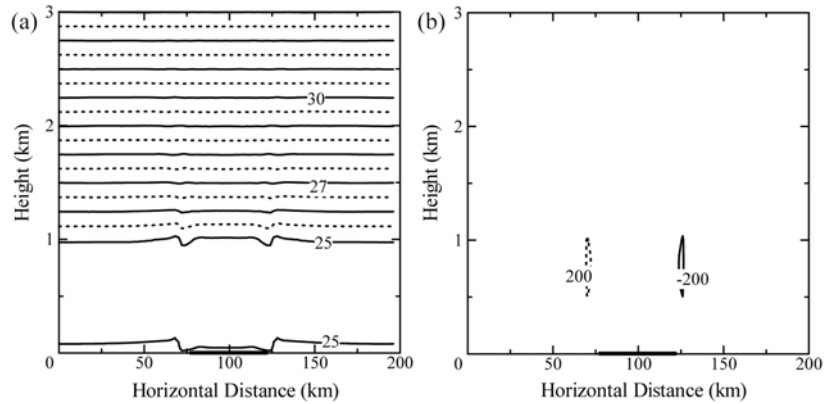


Fig. 10. Estimated (a) stream lines and (b) potential temperatures with evaporation efficiency value setting on 0.6 at 1200 LST.

과에 따른 가열은 도심지 야간 혼합고를 성장시키는 데, 이때 혼합고의 증가는 지표면 현열플럭스에 덜 민감하며, 지표면 열과 운동량 확산계수가 더욱 중요한 요인으로 작용한다고 제시하고 있다. 본 연구에서 발생하는 중규모 순환장에서도 지표면 현열플럭스가 혼합고의 증가 보다는 순환강도 증가에 더욱 직접적인 영향을 미친 것으로 사료된다.

Fig. 10은 증발효율을 0.6으로 설정했을 때 온위와 유선을 나타낸 것이다. 이 경우 도심지의 잠열 플럭스가 경작지의 증발효율인 0.5보다 크기 때문에 도심지의 온도가 1°C 이상 낮게 나타난다. 그리고 전체적인 온위가 지표면에서 최고층까지 수평적분포를 하기 때문에 매우 약한 중규모 순환이 나타난다. 그리고 이때 순환의 방향은 Fig. 8에서 본 것과는 반대방향으로 나타난다. 즉 중심에서 양옆으로 빠져나가는 바람이 발생한다. 이는 도심지의 수분환경이 중규모 순환장의 방향을 결정할 수 있음을 말한다.

결론

지구 온난화의 진행의 주요한 요인으로 작용하는 국지 도시지역의 온도 상승은 인구증가와 더불어 빌딩과 도로 등 지표면 포장재의 물리적인 특성에 크게 기인한다. 본 연구는 도시지역 도로 포장재의 잠열플럭스 변화에 따른 경계층의 발달 특성과 중규모 대기 순환장의 변화를 확인하기 위하여 야외 실험과 수치 실험을 실시하였다. 한국도로공사에서 제공한 보수성 포장재의 열적특성 평가를 위한 야외관측은 2007년 6월 19일 24시간 실시되었으며, 수치연구에 이용된 수치모형은 2차원 대기역학 모형인 LCM 이다.

관측과 수치실험 결과는 아래와 같다.

- 1) 보수성 포장재와 일반 아스팔트의 표면 온도의 야외 관측 비교실험에서 14시에 최대 16.1°C의 온도 차로 아스팔트 표면 온도가 높게 나타났다. 그리고 20시 이후 이 둘의 표면 온도 차이는 거의 사라진다. 또한 아스팔트의 보수성은 지표면 온도를 낮출 뿐 아니라 최고온도의 시간지연 효과를 가져왔다.
 - 2) 보수성 포장재를 상정한 수치실험에서 증발효율이 0.1에서 0.3사이의 값에 해당하며, 일반아스팔트의 경우는 증발효율이 0.05보다 작게 나타난다.
 - 3) 일반 아스팔트를 상정한 BET0.05의 현열플럭스는 13시에 365 W/m²로 최대값을 나타내며 잠열플럭스는 121 W/m²로 최소를 나타내어 현열플럭스가 3 배 정도 크게 나타나지만, 보수성 아스팔트를 상정한 BET03의 경우 같은 시간에 현열과 잠열플럭스가 각각 229, 227 W/m²로 거의 비슷하게 나타난다.
 - 4) 일반 아스팔트와 보수성 아스팔트의 지표면 물리적 특성에 따라 지표면 열환경이 변화하는 것을 수치실험으로 확인하였다, 특히 일반 아스팔트인 경우 혼합고가 12시에 1600 m에 달하지만, 보수성 아스팔트의 경우 1000 m 정도로 나타나 이들 지표면 물리적 특성 차이에 따라 대기의 연직 혼합고 변화에 영향을 미친다.
 - 5) 포장재의 물성변화가 중규모 기상장의 흐름변화에도 영향을 미치는데, 이상적인 도심과 경작지를 고려한 수치실험에서 이들 포장재의 열적 변화가 전원 풍의 강도를 2배 이상 약화시키는 것으로 평가되었다.
- 본 연구를 통하여 보수성 포장재의 물리적 특성에 따른 중규모 순환장의 변화 양상을 살펴보았다 그러나 본 연구는 2차원 수치실험상 수평적으로 균일한

조건을 가정하여 실시되었기 때문에 다양한 토지이용도가 혼재되어 있는 실제 상황에서 나타나는 보수성 포장재에 따른 영향력 강도의 차이가 나타날 수 있다.

그러나 수치실험으로 확인된 보수성 포장재의 잠열 특성 경향성은 일치한다. 그리고 이러한 연구결과와는 도심지내 도로 표면의 온도 저감 개발의 기초자료로 이용될 수 있을 것이다. 특히 도심지 열섬의 저감 및 쾌적한 인간생활을 위한 도심지표면 개발 계획을 수립하는데도 일조할 것이다. 본 연구는 포장재 표면의 온도 변화와 이에 따른 2차원적인 기류 변화에 관하여 살펴본 것이며, 좀 더 다양한 규모의 3차원적인 영향 평가가 추후에 필요하리라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 “장수명 친환경 도로 포장 재료 및 설계 시공 기술 개발 사업”의 일환으로 진행되었으며, 본 연구를 지원해주신 국토해양부와 한국도로공사에 감사드립니다.

참고문헌

김인수, 한의석, 이광호, 2008, 열섬완화 아스팔트 포장기술. 도로, 10, 11-16.

김병훈, 강준구, 이재웅, 여운광, 2001, 실험을 통한 투수성 포장재의 우수유출 저감효과에 관한 연구. 한국토목학회 학술발표 논문집, 1281-1384.

박승범, 이병재, 이준, 장영일, 2007, 슬래그골조와 플라이 애시를 이용한 강섬유 보강 포장용 투수 콘크리트의 역학적 특성에 관한 실험적 연구. 한국도로학회, 9, 93-104.

이순환, 김인수, 김해동, 2008, 도로포장 기술 개선에 따른 대기 경계층의 열 변화에 관한 연구. 한국대기환경학회지, 24, 551-561.

이순환, 이화운, 김유근, 2002, 복잡지형에서 도시화에 따른 대기오염 확산에 관한 시뮬레이션. 한국대기환경학회지, 18, 67-83.

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

Asaeda, T. and Ca, V.T., 1993, The subsurface transport of heat and moisture and its effect on the environment: A numerical model. Boundary Layer Meteorology, 65, 159-179.

Dierkes, C., Kuhlman, L., Kandasamy, J., and Angelis, G., 2002, Pollution retention capability and maintenance of permeable pavements. Proceedings of the ninth international conference on urban drainage, Portland, USA, 8-

13.

Hagishima, A. and Tanimoto, J., 2003, Field measurements for estimating the convective heat transfer coefficient at building surface. Building Environment, 38, 873-881.

Kikuchi, Y., Arakawa, S., Kimura, F., Shirasaki, K., and Nagano, Y., 1981, Numerical Study on the Effects of Mountains on land and Sea Breeze Circulation in the Kanto District. Journal of Meteorological Society of Japan, 59, 723-737.

Kimura, F. and Kuwagata, T., 1993, Thermally induced wind passing from plain to basin over a mountain range. Journal of Applied Meteorology, 23, 1538-1547.

Klemp, J.B. and Durran, D.R., 1983, An upper boundary condition permitting internal gravity wave radiation in numerical mesoscale models. Monthly Weather Review, 11, 430-444.

Kondo, J., 1994, Mizuzuyunkan no Kisyougaku. Asakura Press, Japan, 137 p. (in Japanese)

Kondo, J., Nakamura, T., and Yamazaki, T., 1991, Estimation of the solar and downward atmospheric radiation. Tenki, 38, 41-48. (in Japanese)

Lee, S.H. and Kimura F., 2001, Comparative studies in the local circulations induced by land-use and by topography. Boundary Layer Meteorology, 101, 157-182.

Lee, S.H. and Kim, H.D., 2008, Effects of regional warming due to urbanization on daytime local circulations in a complex basin of the Daegu Metropolitan Area, Korea. Journal of Applied Meteorology and Climate, 47, 1427-1441.

Lee, S.H. and Kim, H.D., 2009, Modification of nocturnal drainage flow due to urban surface heat flux. Boundary Layer Meteorology (now print).

Mellor, G.L. and Yamada, T., 1982, Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. Reviews of Geophysics and Space Physics, 20, 851-875.

Orlanski, I., 1976, A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows. Journal of Computational Physics, 21, 251-269.

Oleson, K.W., Bonan, G.B., Feddema, J., and Vertenstein, M., 2008, An urban parameterization for a global climate model. Part II: Sensitivity to input parameters and the simulated urban heat island in offline simulations. Journal of Applied Meteorology and Climate, 47, 1061-1076.

Oliveti, G., Arcuri, N., and Ruffolo, S., 2003, Experimental investigation on thermal radiation exchange of horizontal outdoor surfaces. Building and Environment, 38, 83-89.

Prasad, B.N. and Saini, J.S., 1988, Effect of artificial roughness on heat transfer and friction factor in a solar heater. Solar Energy, 41, 555-560.

720 김인수 · 이순환 · 김해동 · 서영찬

Pomerantz, M., Pon, B., Akbari, H., and Chang, S.C.,
2000, The effect of pavement's temperatures on air tem-

perature in large cities, Berkely CA. Lawrence Berkeley
National Laboratory, LBNL-43442, 22 p.

2009년 7월 7일 접수
2009년 8월 6일 수정원고 접수
2009년 9월 15일 채택