

신도로 포장재의 표면온도저감효과에 관한 연구

A Study on the Surface Temperature Reduction of New Road Asphalt Pavement

조제만* · 김해동** · 김인수*** · 조성환****

Cho, Jae Man · Kim, Hae Dong · Kim, In Soo · Cho, Seong Hwan

1. 서 론

온실기체 증가로 인한 지구온난화와 도시의 발달에 따른 도시 열섬 현상의 심화로 우리나라를 포함한 중저위도 지역에 위치한 도시에 살고 있는 사람들은 여름철 고온현상으로 고통을 받고 있다. 그래서 1990년대 이래로 이들 여름철 도시의 고온현상을 환경오염의 일종으로 간주하여 대응책을 찾고 있는 것이 세계적 추세이다.

IPCC보고서(2007)에 의하면, 지난 100년 동안에 지구의 평균온도는 약 0.74℃ 상승하였다고 한다. 그런데 같은 기간 동안에 도시열섬화로 인한 도시의 기온상승은 이보다 훨씬 높게 나타났다. 그 예로 전 세계 주요 도시의 지난 100년 동안의 기온상승률을 살펴보면 다음과 같다. 동경 3℃/100년, 뉴욕 1.7℃/100년, 파리 1.6℃/100년, 서울 2.1℃/100년 등으로 보고되었다. 이들 도시의 기온상승률은 지구온난화와 도시열섬화의 영향이 합쳐진 결과인데, 지구평균보다 2-4배나 높게 나타났다.

도시의 기온을 상승시키는 도시 열섬화의 원인으로는, 도시의 지표면이 인공구조물로 포장되는 것이 가장 큰 원인으로 알려져 있다. 오늘 날 도시 지표면 면적의 상당한 부분이 아스팔트와 콘크리트로 덮여감으로써, 녹지와 습윤한 토양, 호수와 하천 등 천연의 지표면이 사라지고 있다. 인공 구조물 중에서도 도로포장은 도시 지표면의 많은 부분을 점하는데, 그 비율은 우리나라의 경우에 대략 20% 내외에 이르고 있다.

포장된 도로는 도시교통 체계를 지탱하는 중요한 사회기반 시설이지만, 자연지형이 차지하고 있던 공간을 대체함으로써 도시기후를 만들어 내는 중요한 요인이 되고 있다. 또한, 아스팔트도로는 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 진행되어 버린다.

이처럼 도로포장은 도시 열섬화를 가져온 책임이 큰데, 이 사실로부터 도로포장을 개선하면 도시 열섬화를 완화할 여지가 크다는 것을 알 수 있다.

아스팔트의 열적 특성 관련 연구를 살펴보면, 안덕순 등은 현장 온도 계측자료를 이용하여 아스팔트 포장재의 시간별, 깊이별 온도예측에 관한 연구를 수행하였으나 온도예측모델을 이용하여 예측한 현장 온도와 실측 온도의 차이에 관한 내용만을 서술하였다. 또한, 도로포장 분야 대부분의 환경친화성을 강조한 논문들은 아스팔트 생산기법과 포장기법에 관한 논문들이 대부분이었다.

본 연구에서는 도로포장의 표면온도를 저감시켜 도시 열섬 억제 효과를 가져오기 위해서 개발하고 있는 보수성(保水性) 포장재와 차열성(遮熱性) 포장재를 대상으로 지표면온도 저감효과에 관한 실외실험과 1D 모델을 이용하여 수치모의를 수행하여, 그 결과를 서로 비교·분석하였다.

* 계명대학교 환경과학과 석사과정 · 이학사 · 053-580-5749(E-mail : zeronimo7@nate.com)

** 계명대학교 환경방재시스템학과 조교수 · 이학박사 · 053-580-5930(E-mail : khd@kmu.ac.kr)

*** 정희원 · 한국도로공사 도로교통연구원 전임연구원 · 공학석사 · 031-371-3407(E-mail : dolbom6@hotmail.com)

**** 정희원 · 동일기술공사 부설기술연구소 연구원 · 공학석사 · 02-3400-5614(E-mail : kapimax@lycos.co.kr)

2. 연구방법

2.1 포장재의 특성

2.1.1 차열성 포장재

차열성 포장재란 다른 말로 고 반사성 포장재라고 불리기도 한다. 이것은 배수성 포장재의 표면에 태양 일사에너지에 대한 반사율이 높은 표면 물질을 도색한 것이다. 최근 가시광선과 근적외 영역 파장대에 대해서 다른 반사율을 나타내는 도료가 개발되었다. 가시광선 영역에 대한 반사율을 높이면 명도가 높아져 보행자의 눈에 불편을 주게 된다. 반면에 최근에 개발된 도료는 가시영역에 대한 반사율을 낮추고 근적외 영역의 반사율을 높이는 방식으로 지면의 일사흡수율을 줄여 지표면 온도를 낮출 수 있게 되었다.

일사가 갖는 복사의 특성으로부터 가시광선보다 긴 파장을 갖는 근적외 복사영역의 열에너지는 전체의 약 50%에 상당한다. 그림 1에 흑색의 고 반사성 도료의 파장대별 반사율을 나타내었다. 가시광선의 반사율이 0, 즉 흑색이지만, 근적외 영역에서는 70% 이상의 반사율을 나타내기 때문에 일사 전체 파장영역에 대해서 반사율을 상정하면 35~40%에 이른다.

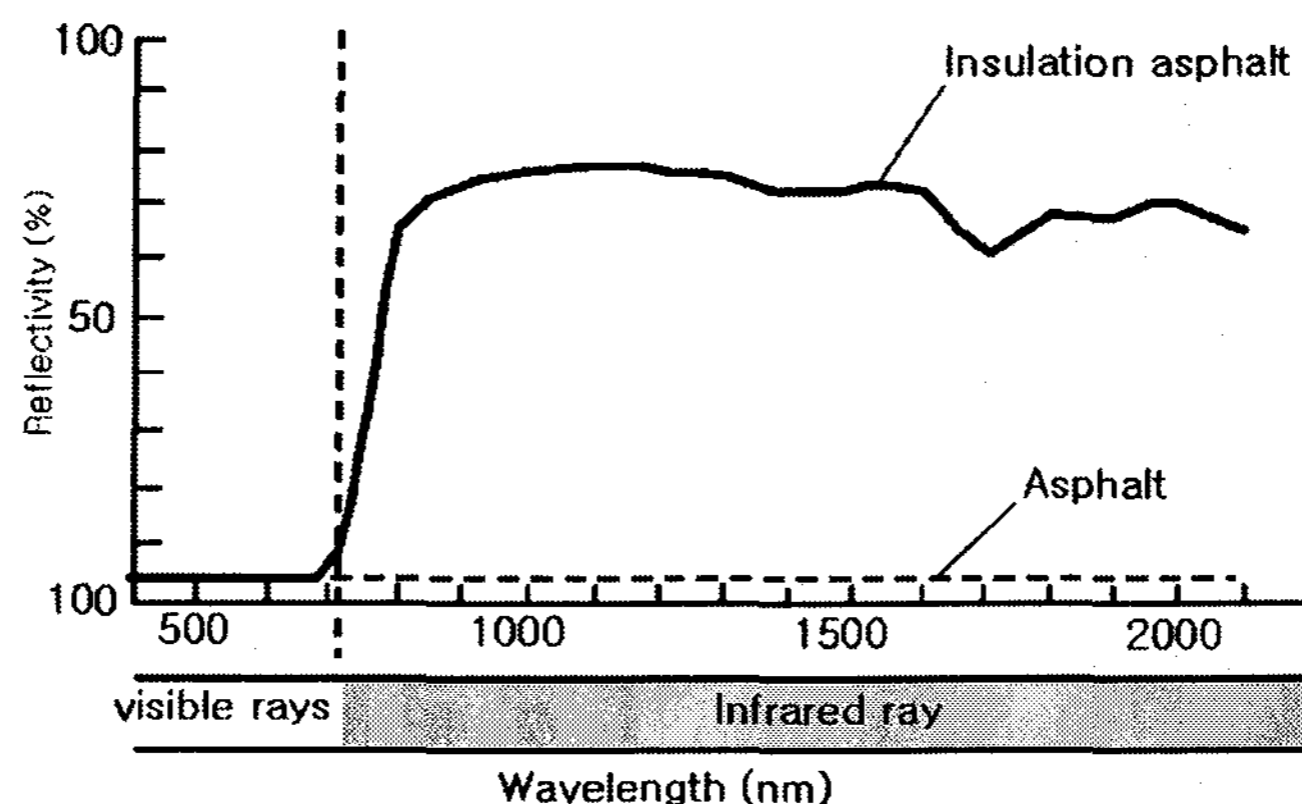


그림 1. 고반사율 포장 재료의 반사율(차열성 포장재)

2.1.2 보수성 포장재

보수성 포장재는, 물을 내부로 침투시키지 않는 기존의 포장구조를 개선하여 천연의 토양과 같이 수분이 내부로 침투되어 저장될 수 있도록 기능을 개선한 것이다.

물을 침투시키는 포장재는 “배수성 포장(투수성 포장)”과 “보수성 포장”이 있다.

아스팔트 포장은 모체가 되는 골재와 아스팔트가 수분을 침투시키지 않으므로 배수성 아스팔트 포장에서는 골재와 골재 사이에 큰 공극을 만들어, 이 공극을 통해 물을 하부로 침투시키는 구조이다. 최근 가장 널리 보급되고 있는 밀입도 포장(기존의 아스팔트)도 원재료는 같지만 공극이 없어서 물을 통과시키지 않는다.

보수성(保水性) 포장재는 배수성 아스팔트의 공극 부분에 수분을 함유할 수 있는 보수재(保水材)를 넣은 구조이다. 보수재로 인해서 물의 침투 능력은 저하되지만, 물을 함유하는 능력은 향상되는 것이다.

2.2 관측 방법

차열성 포장재와 보수성 포장재의 열적 특성을 평가해 보기 위하여 실외실험을 수행하였는데, 그림 2에 실험 장치를 제시하였다. 가로세로 각각 30cm, 두께 5cm인 차열성 포장재와 보수성 포장재를 일사가 원만하게



공급되는 계명대학교 내의 소운동장에 설치하고 일평균 약 $523W/m^3$ 의 일사량을 받을 수 있도록 2007년 6월 19일 10시부터 2007년 6월 20일 10시까지(24시간 동안) 포장재의 표면과 두께 2.5cm(내부), 5cm(바닥) 부분에서 10분 간격으로 표면온도와 내부온도를 측정하였다. 기상자료는 자동기상관측 장비를 이용하여 기온과 습도, 풍향, 풍속을 측정하였고, 포장재의 표면온도는 적외선 온도를, 두께의 2.5cm(내부)와 두께의 5cm(바닥면)의 온도는 FLUKE를 사용하여 측정하였다. 일평균일사량은 기상청에서 제공하는 대상 일의 오전 06시부터 20시까지의 평균자료를 사용하였다. 보수성 포장재의 경우 보수 성능을 평가하기 위해서 실외실험 실시 전 약 24시간 동안 수분을 충분히 공급한 후에 실험에 사용하였다. 차열성 포장재의 표면에는 밝은 회색의 시료가, 보수성 포장재의 표면에는 밝은 상아색의 시료가 고르게 분포되어 있었다. 비교를 위해서 일반 아스팔트도 같은 조건으로 포장재의 지표면과 내부의 온도변화를 측정하였다.

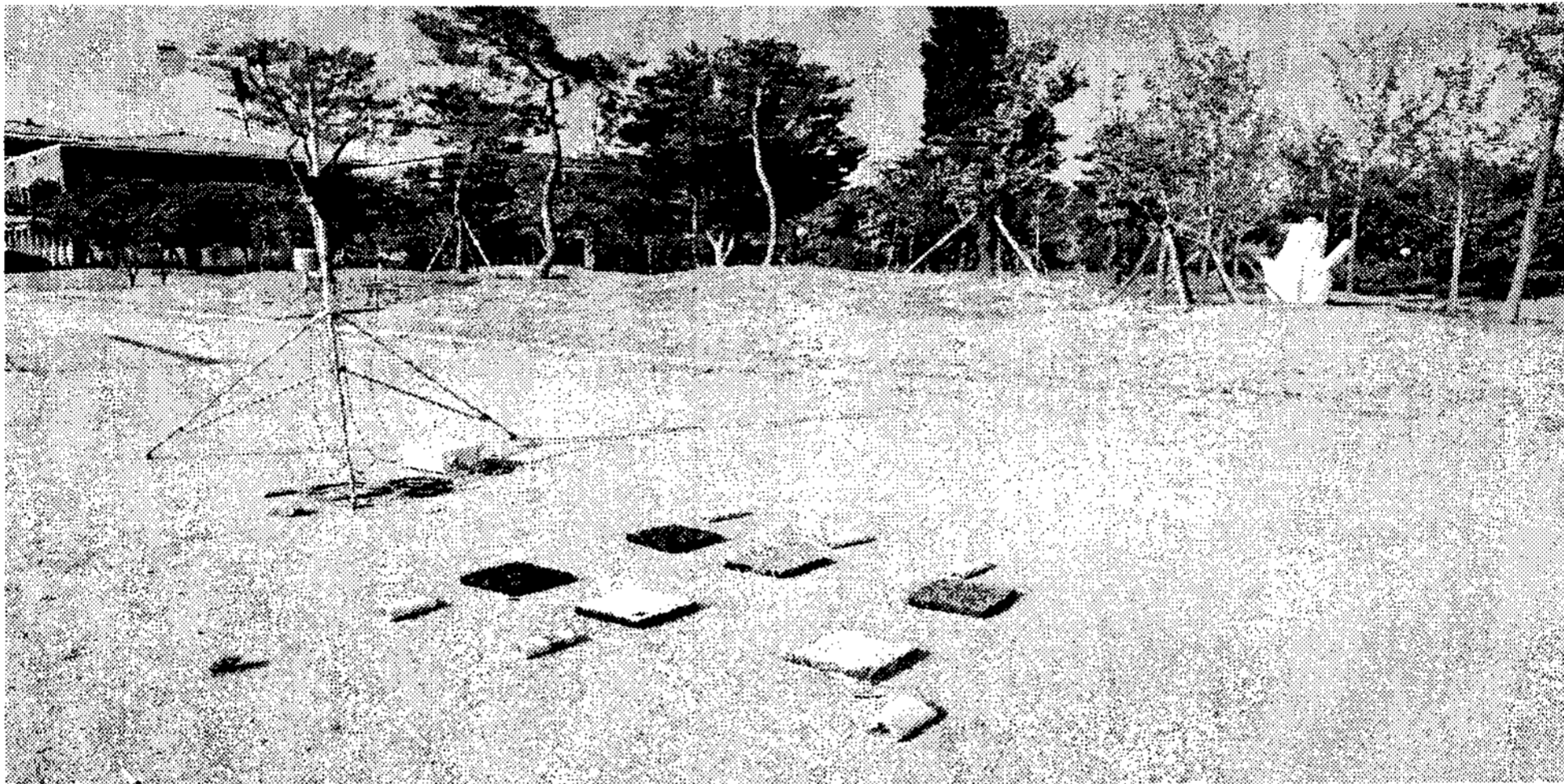


그림 2. 실외 관측 실험

대상일은 2007년 6월 19일로 선정하였다. 그림 3의 일기도를 분석하여 보면 종관기상상태가 동서고기압대형인 날이며, 일조시간은 12.4시간(기상청에서 제공한 값)으로 쾌청한 날이었다.

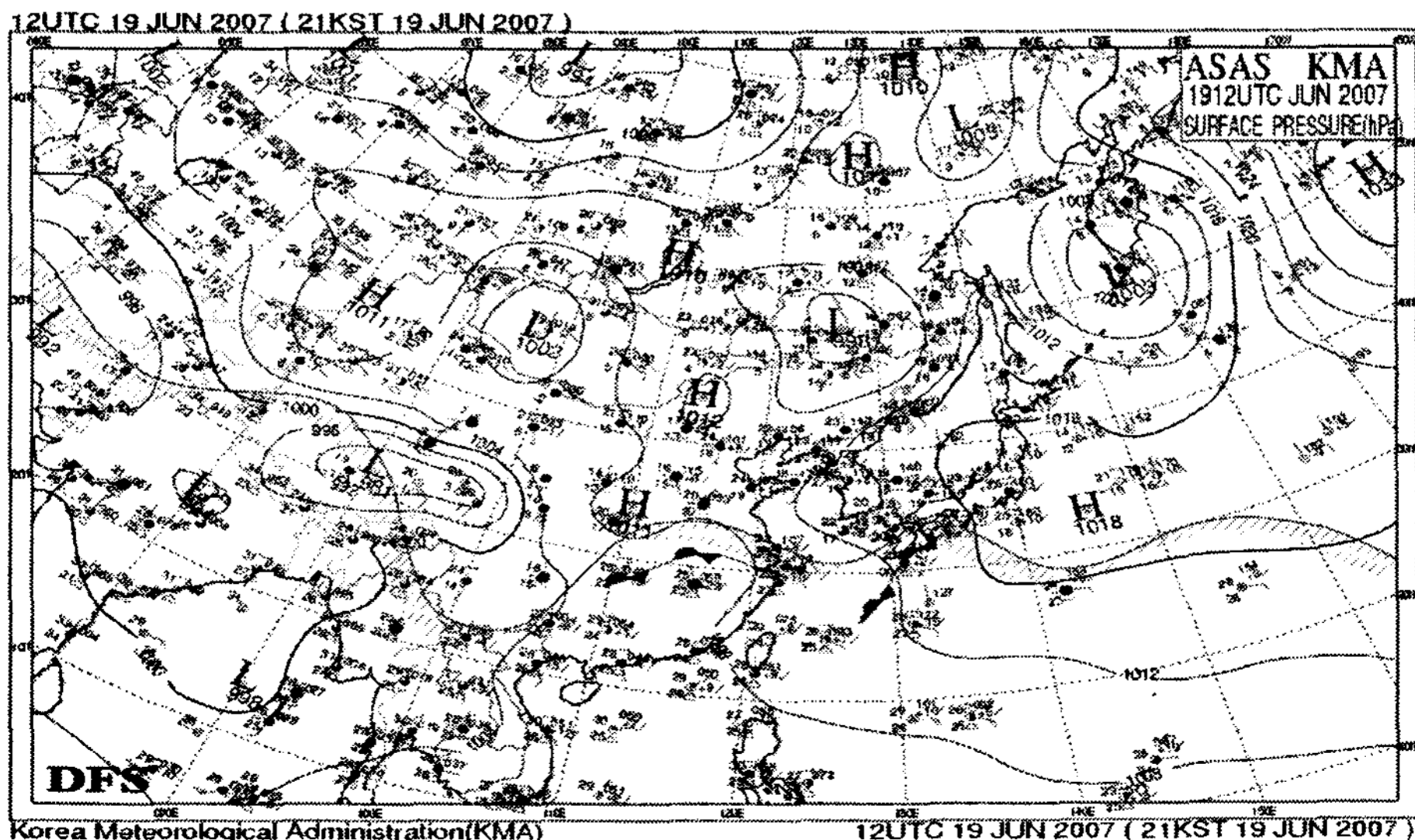


그림 3. 대상일(6월 19일)의 지상12의 12UTC 일기도



2.3 수치모델의 개요

2.3.1 OSU 1D모델

본 연구에 사용된 수치모형은 미국 오리건 주립대학에서 개발한 1차원 지표-대기 결합 대기 경계층 모형 (Oregon State University one Dimensional Planetary Boundary Model)이다(Ek and Kahrt, 1991). 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 예보 모형으로 채택되어 사용되고 있다(M. Ek, and L. Mahrt, 1991).

지표면-대기 결합 모형으로 자유대기 역학모형, 경계층 난류 혼합과 생성모형, 토양모형, 캐노피 모형, 지표면 열수지 모형, 경계층 구름 모수화, 장파-단파 복사 모형 등으로 구성되어 있으며, 본 연구에는 1.04버전이 이용되었다.

특히 아스팔트의 구조 변화에 따른 지표면 온도 변화를 보기 위하여 토양 모형을 세분화하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 토양 모형을 다층화하고 최상층을 아스팔트로 가정하여 계산을 실시하였다. 아스팔트 표면의 에너지 분포를 평가하기 위해서는 단순한 지표면의 열적인 요인뿐 아니라 지층과 대기 중의 열적인 요소를 이해하여야 한다. OSU 1D의 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 온도도 예보 방정식은 아래와 같다.

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial (Kt \frac{\partial T}{\partial z})}{\partial z}$$

여기서 C, T는 각각 열용량과 온도이고, Kt는 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.

$$Kt \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) = G$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=0} = 0 = \frac{\theta - T_{soil}}{\delta z}$$

여기서 d는 지중열 플럭스를 나타내며, θ 는 지표면의 온위, T_{soil} 은 토양의 상층부 온도의 나타낸다. 여기서 계산된 지중열을 이용하여 최종적인 지표면의 열수지는 아래의 식과 같다.

$$(1-a)S \downarrow + L \downarrow - \sigma(\theta_s)^4 = G + H + lE$$

이를 통하여 최종적으로 지표면온도가 결정된다. 이때 S, L, H, lE는 각각 단파, 장파 복사, 현열, 잠열을 의미한다. 그리고 σ 와 l은 각 Stefan-Boltzmann 계수와 증발효율을 의미한다.

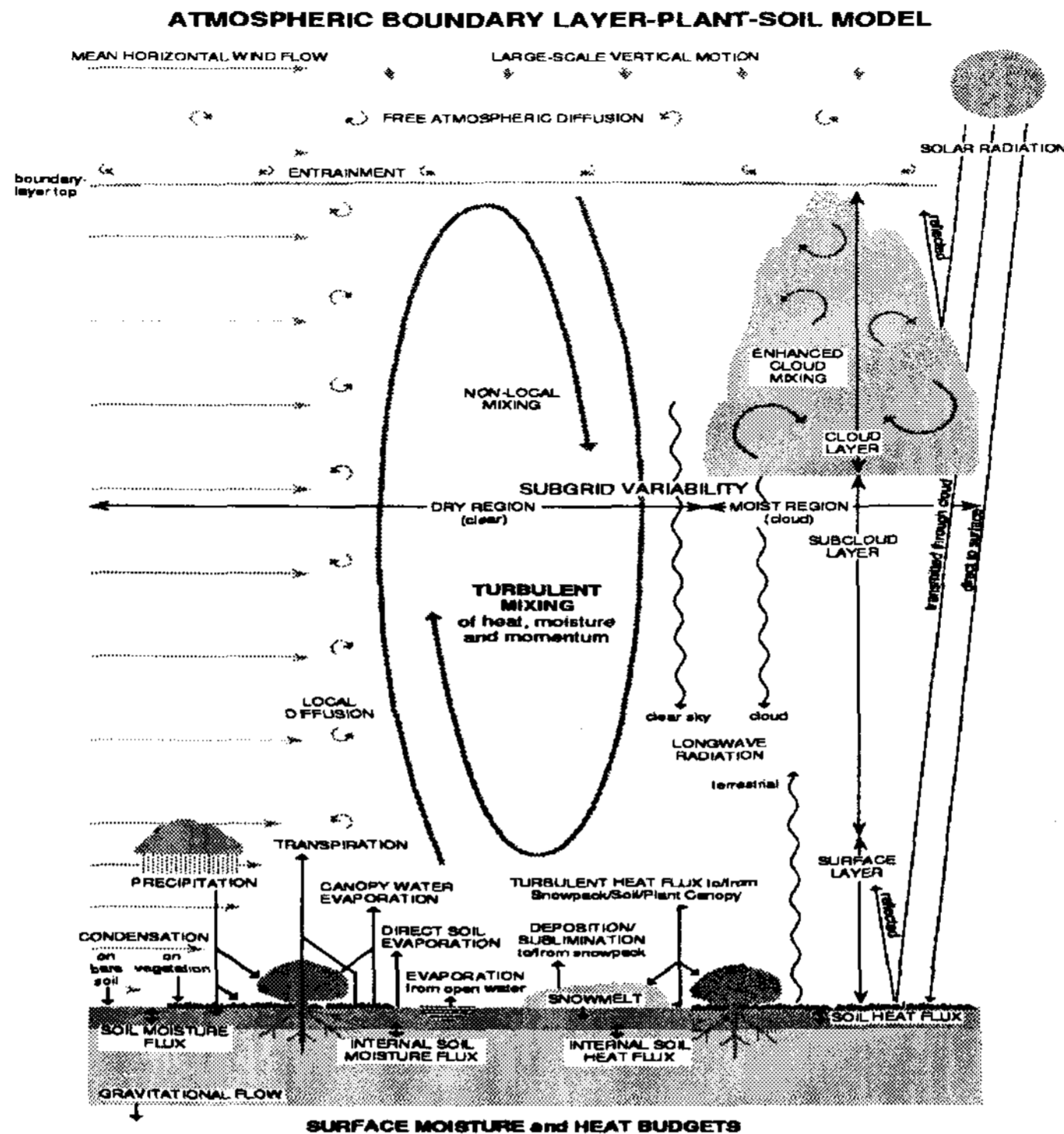


그림 4. OSU 1D 모델의 개념도

그림 4에 OSU 1D 모델의 개념도를 제시하였다. 전체적으로 대기-식생-지면으로 구성되며, 다양한 토지 상태에 적용된다. 일반적으로 도시지역의 다양한 토지이용도가 나타나지만 본 연구에서는 아스팔트 환경을 고려하기 때문에 식생 캐노피 층과 대기 또는 지중과의 열적인 교환은 고려하지 않았다. 즉, 지표면과 대기의 직접적인 열 교환 환경만을 평가하는 수치실험을 실시하였다.

계산조건은 아스팔트 포장재의 알베도에 따른 지면온도와 대기온도의 변화를 보기 위해 지표면의 알베도를 0.1, 0.3, 0.6의 3가지로 구분하였다. 그리고 심층토양의 함수율은 아스팔트에 의한 증발이 제어된다고 가정하여 0.001의 작은 값을 주었으며, 초기 지표면의 수분 역시 아스팔트를 가정하여 거의 0에 가까운 값을 주었다. 이러한 초기 수분 조건은 지표면열수지방정식에서 잠열 플럭스를 적게 만드는 요인으로 작용한다. 대기층은 고도 4Km까지 총 38개 층으로 하였으며, 복사는 대구지역의 8월 15일의 일사량을 기준으로 설정하였다.

3. 연구결과

3.1 관측결과

3.1.1 실외실험

본 연구의 결과는 2007년 6월 19일 10시부터 2007년 6월 20일 10시까지 관측한 자료 중 포장재의 표면온도와 기상청에서 제공하는 일사량을 이용하여 제시하였다.

그림 5는 대상 일의 일사량과 포장재 특성에 따른 표면 온도의 시간대별 변화를 제시하였다. 그 결과를 살펴보면 포장재의 표면 온도는 일사의 영향으로 실외실험이 시작한 오전 10시부터 모든 포장재 온도가 상승하고 13시에 가장 높은 온도 값을 나타내었다. 13시를 정점으로 표면의 온도가 급격히 감소하여 일사량이



거의 없는 19시 이후에는 포장재 모두 비슷한 온도분포를 나타내고 있다. 포장재별 특성에 따른 표면온도 최고값을 살펴보면 지표면은 53℃, 아스팔트는 62℃, 보수성 포장재는 44.6℃, 차열성은 44.7℃로 신도로포장재(보수성, 차열성 포장재)가 일반 아스팔트보다 약 17.4℃ 낮음 알 수 있다. 이는 신도로포장재가 도시 열섬 억제에 탁월한 효과가 있음을 의미한다. 또한, 실험이 시작한 10시에 보수성 포장재가 차열성 포장재의 표면 온도보다 낮게 관측된 것은 보수성 포장재가 실험 시작 전 약 24시간 동안의 수분 공급이 원인으로 판단된다.

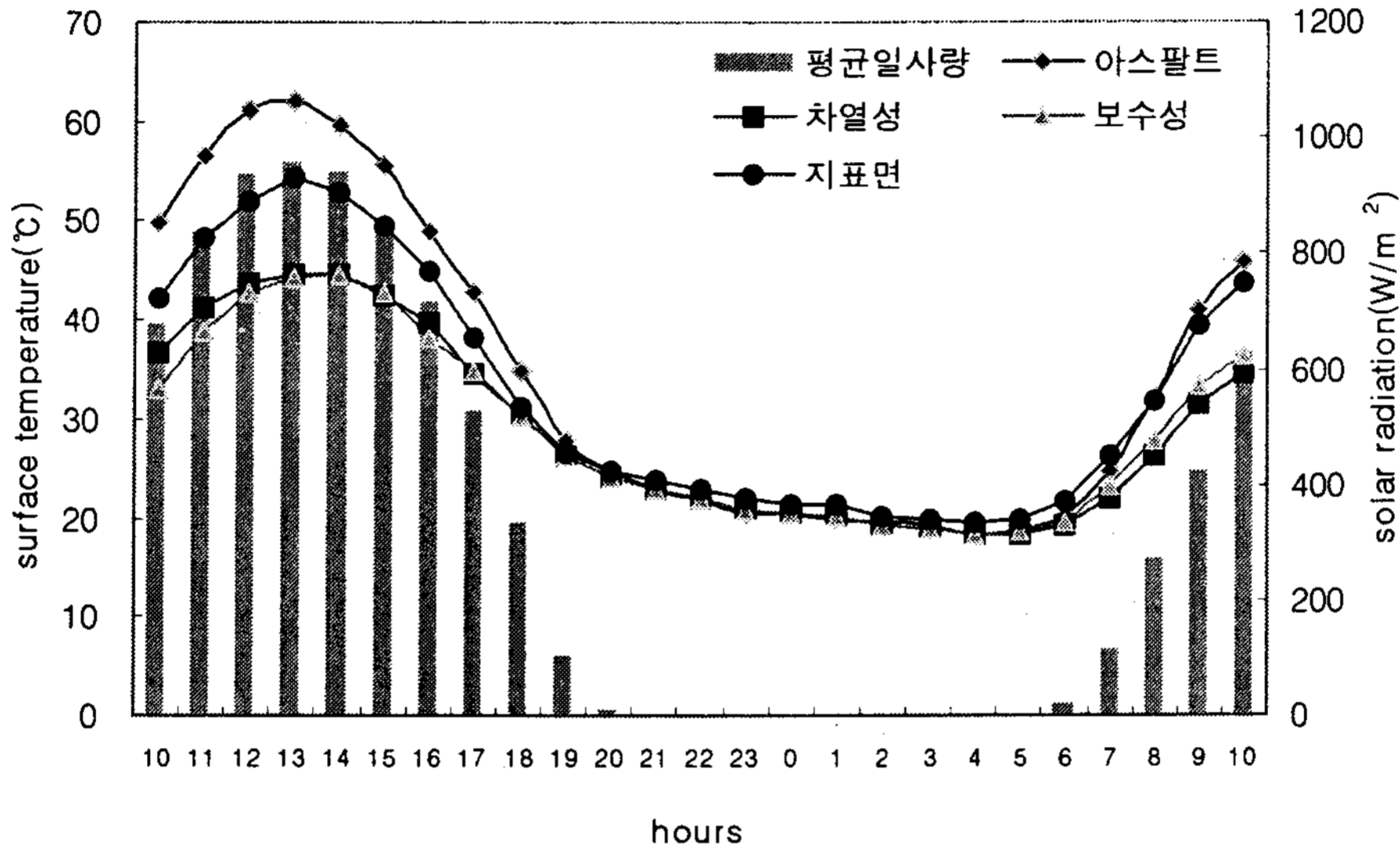


그림 5. 일사량과 포장재 특성에 따른 표면온도의 시간변화

3.2 수치모의 결과

본 수치모의는 아스팔트 포장재의 알베도에 따른 지면온도와 대기온도의 변화를 보기 위해 지표면의 알베도를 0.1(아스팔트), 0.3(보수성 포장재), 0.6(차열성 포장재)의 3가지로 구분하였고 심층토양의 함수율은 아스팔트에 의한 증발이 제어된다고 가정하여 0.001의 작은 값을 주었으며, 초기 지표면의 수분 역시 아스팔트를 가정하여 거의 0에 가까운 값을 주었다. 이러한 초기 수분 조건은 지표면 열수지방정식에서 잠열 플럭스를 적게 만드는 요인으로 작용한다. 대기층은 고도 4Km까지 총 38개 층으로 하였으며, 복사는 2007년 8월 15일의 대구기상대에서 제공하는 일사량을 조건을 이용하여 OSU 1D 모델을 실행하였다. 아래부터는 알베도 0.1은 아스팔트, 알베도 0.3은 보수성 포장재, 알베도 0.6은 차열성 포장재로 표기하기로 하겠다.

그림 6의 수치모의 결과를 살펴보면 표면온도의 시간대별 변화는 아스팔트가 가장 높고, 보수성 포장재, 차열성 포장재 순임을 알 수 있다. 표면온도의 차는 온도 차가 가장 큰 12시의 경우, 보수성 포장재는 약 10℃, 차열성 포장재는 약 22℃ 정도의 일반아스팔트보다 낮음을 알 수 있다.

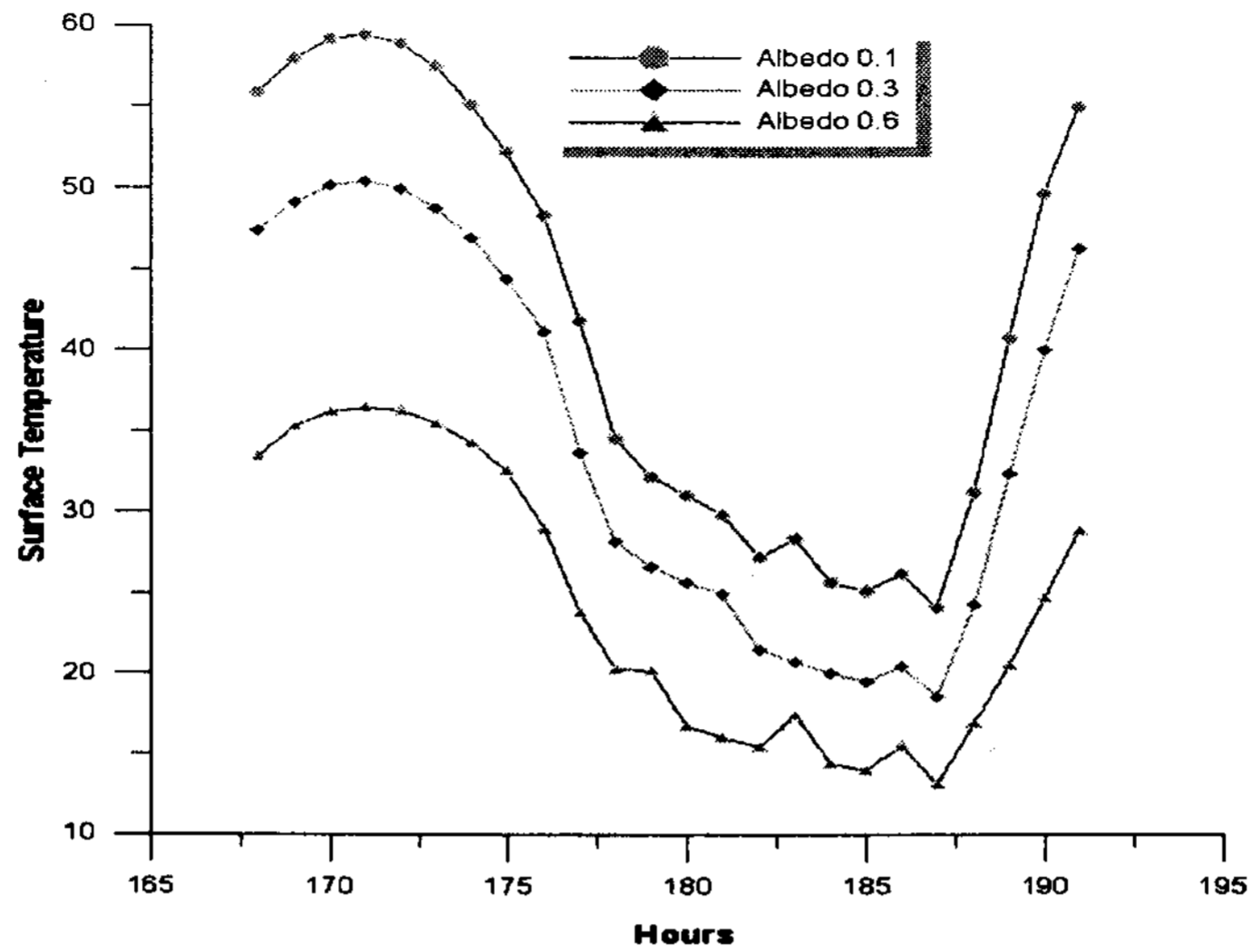


그림 6. OSU 1D 모델을 이용한 수치모의 결과

3.3 관측결과와 수치모의 결과의 비교

실의실험을 통해 얻어진 관측 자료와 OSU 1D 모델을 통해 얻어진 수치모의 결과를 Mintab을 사용하여 포장재별 상관관계를 분석하여 그림 7~9에 제시하였다. 상관관계는 수치가 “1”에 가까울수록 높은 상관관계를 나타낸다.

상관관계를 분석해 본 결과, 일반 아스팔트의 경우 상관관계가 0.948을 나타내었고 보수성 포장재는 0.958, 차열성 포장재는 0.979의 상관관계를 나타내었다. 3개의 포장재 모두 높은 상관관계를 나타내었고, 특히 차열성 포장재의 경우는 가장 높은 상관관계를 나타냄을 관찰할 수 있었다.

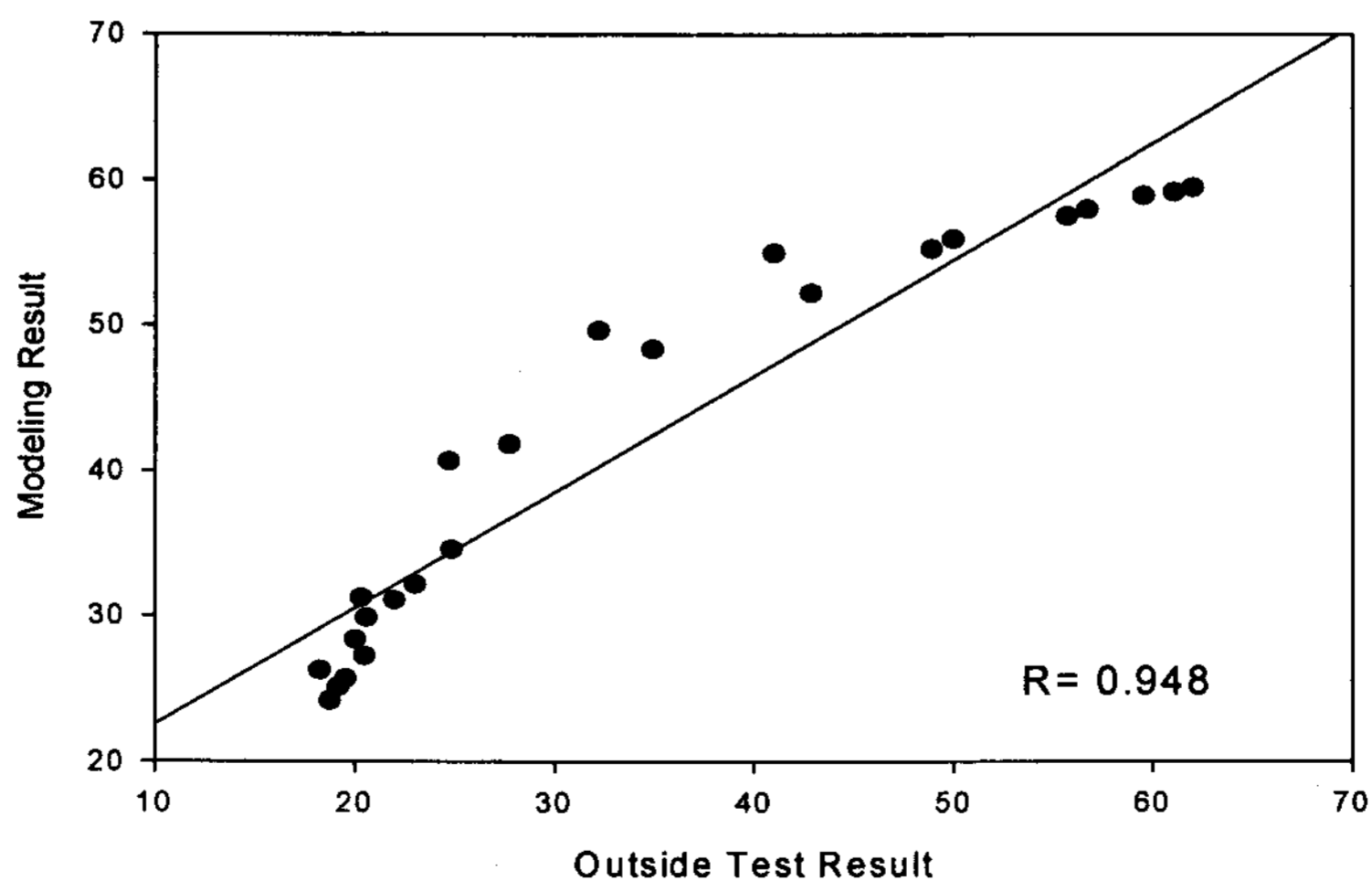


그림 7. 일반 아스팔트의 상관관계 분석 그래프

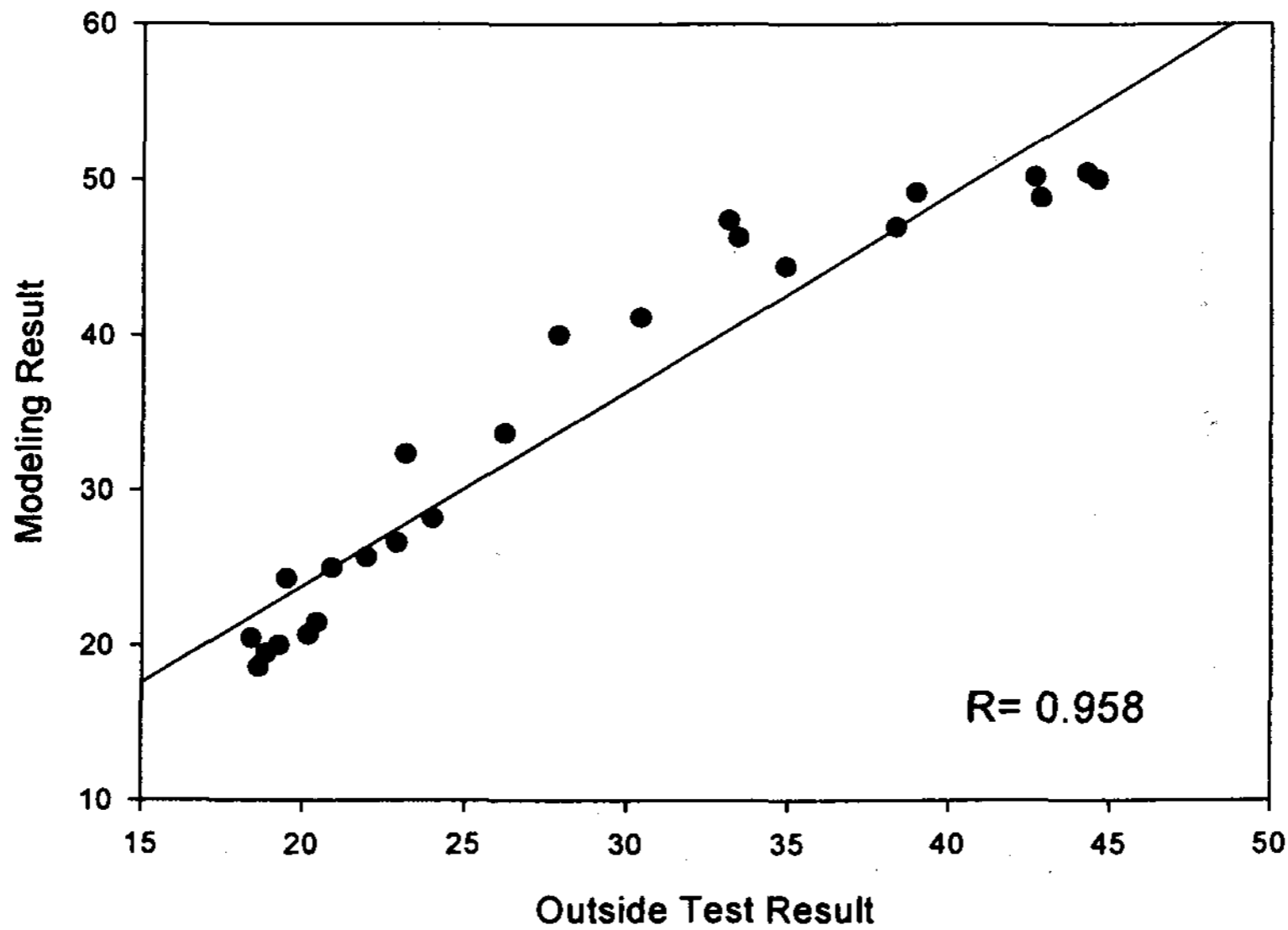


그림 8. 보수성 포장재의 상관관계 그래프

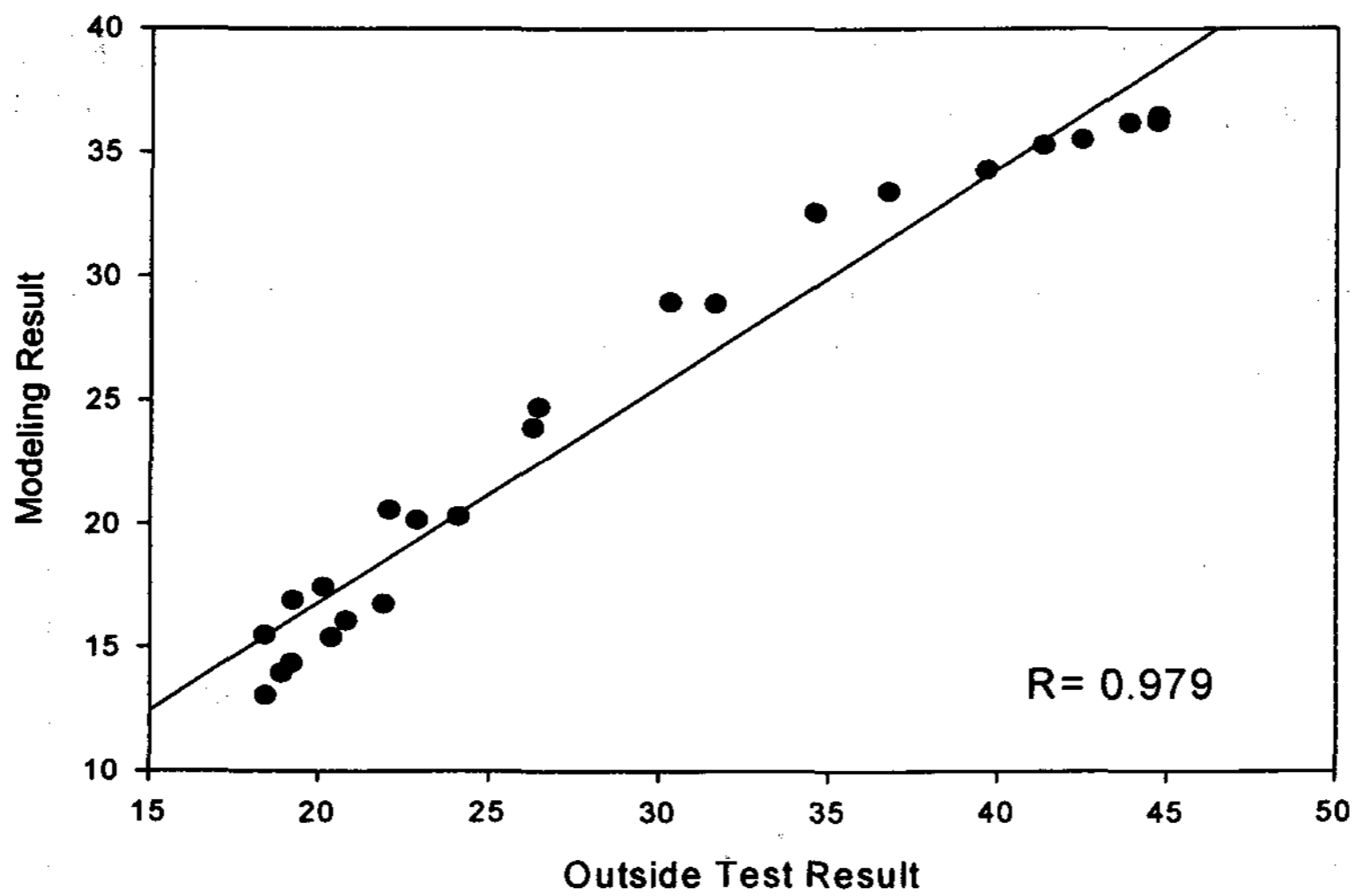


그림 9. 차열성 포장재의 상관관계 그래프

4. 결론

본 연구에서는 도로 포장의 표면온도를 저감시켜 도시 열섬 억제 효과를 가져오기 위해서 개발하고 있는 보수성(保水性) 포장재와 차열성(遮熱性) 포장재를 대상으로 지표면온도 저감효과에 관한 실외실험과 OSU 1D 모델을 이용하여 수치모의를 수행하였다. 또한, 관측결과와 모델결과의 비교를 위하여 상관분석을 실시하였다.



그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실외실험의 결과 일사량에 따라 보수성과 차열성 포장재가 일반 아스팔트 포장재에 비해 최대 약 17.4℃이상의 온도저감효과가 있음을 알 수 있었다.
- (2) OSU 1D 모델의 수치모의 결과는 알베도 값이 높은 보수성, 차열성 포장재가 표면 도료 처리를 하지 않은 일반 아스팔트보다 표면 온도가 각각 약 10℃, 약 22℃의 차를 보였다.
- (3) 실외실험 결과와 수치모의 결과의 상관관계를 분석해본 결과 각각의 포장재 별로 상관관계 수치의 차이는 있지만 3가지 포장재 모두 약 0.9 이상의 높은 상관관계를 나타내는 것을 관찰할 수 있었다.

본 연구의 결과를 통해 제작된 보수성, 차열성 포장재가 도시 열섬 억제에 효과가 있다는 사실을 확인할 수 있었다. 이를 통하여 여름철 도시의 열섬현상으로 인한 도로주변 열환경을 완화하는 신도로 포장재의 개발에 기반을 마련할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 “장수명·친환경 도로포장 재료 및 설계 시공기술 개발(CTRM)”의 1세세부 과제 일환으로 작성되었습니다.

참고문헌

1. 우에다, 니시오까, 나베시마, 나카오 (2004), “고반사성 포장의 반사율과 표면온도저감효과”, 일본건축학회 발표 논문
2. 노성열 (2005), “저소음 아스팔트 포장의 설계 및 시공”, 구미서관, pp.3-23
3. 류남형, 유병림, 2006, 투·보수성 시멘트 콘크리트 포장의 열물성 및 수분보유 특성이 표면온도에 미치는 영향, 한국조경학회지, 34(1), 21-36.
4. 서울특별시 (2005), “서울 2005 도시생태현황도”, 도면 해설집
5. 장은숙(2005), “아파트 단지내의 열섬효과가 대기오염물질 확산에 미치는 영향해석을 위한 열유동장 수치모의,” 한국환경과학회지 14(6): 577.
6. 안덕순, 박희문, 엄병식, 김제원 (2006), “현장 계측자료를 이용한 아스팔트 포장체 온도 예측 연구”, 대한토목학회논문집, 26(1), 67-72
7. 이현영(2000) 한국의 기후: 법문사
8. Ichinose, T., 1999, Local climate change related with land use change since the near modern period, Environmental system research, Vol. 27, 115-126.
9. Landsberg, H. E. (1981) Urban Climate : Academic Press
10. Moriyama, M., 2004, Heat Island, Kaku-Gei Press, 121-131pp.
11. M. Ek, and L. Mahrt, 1991, OSU 1D PBL model user's guide, Oregon state university, 117p