

투·보수성 시멘트 콘크리트 포장의 열환경 특성(I)

류남형* · 유병림**

*진주산업대학교 조경학과 · **서울대학교 환경대학원

Thermal Environment Characteristics of Permeable Cement Concrete Pavement(I)

Ryu, Nam-Hyong*·Yoo, Byung-Rim**

*Dept. of Landscape Architecture, Jinju National Univ.

**Graduate School of Environment Studies, Seoul National Univ.

ABSTRACT

This study was undertaken to measure and analyze the thermal environment characteristics of the grey permeable cement concrete pavement(GPCCP), the permeable cement concrete brick pavement(PCCBP) compared with impermeable cement concrete pavement(ICCPC) and bare soil(BS) under the summer outdoor environment. Following is a summary of major results.

1) The peak surface temperature was greatest in the GPCCP(54.2°C) followed by ICCP(47.2°C) on August 2, 2002, the hottest day(35.3°C of highest temperature) during the experiment; peak temperature in the ICCP and BS were 45.5°C and 45.3°C, respectively.

2) Analysis of heat budget of the pavements has revealed that the heat environment was worse in the GPCCP than that in the ICCP and that this was mainly due to a low albedo in the former(0.2) relative to that of the latter(0.4).

3) Analysis of heat budget of the pavements has revealed that the heat environment was worse in the GPCCP than that in the PCCBP, BS and that this was mainly due to a decreased latent heat resulting from a time dependent decreasing impact of rainfall.

4) It is necessary to make cool pavements to further studies on light-colored surface materials for attaining high albedo and construction methods which can enhance the latent heat through the continuous evaporation from pavements surface.

5) Vertical arrangement of pavement layers has not been considered in the present study, which has

been focuses on the heat characteristics of the surface layer materials. Accordingly, future studies will have to be empasized on pavement methods including the vertical arrangement of the pavement layers.

Key Words : Surface Temperature, Heat Budget, Albedo, Latent Heat

1. 서론

도시화와 더불어 지표면의 대부분은 아스콘이나 시멘트 콘크리트에 의해 포장이 됨으로써 도시 전체의 열환경을 악화시키고 있다. 도시 전체의 열환경 문제로 대표되는 도시열섬현상은 도로포장에 의한 증발량의 감소, 포장도로나 콘크리트 구조물의 증가에 의한 도시 전체의 열용량의 증대 이외에도, 석유·전기 에너지의 대량소비에 따른 배출열의 증대, 나지면적의 감소, 소하천의 복개에 의한 증발산량의 감소 등 여러 가지 원인에 의해 발생하고 있다. 더욱이 포장화에 의한 영향은 국소적인 열환경에 직접적으로 작용을 하여 생활환경을 악화시키고 있다. 구체적인 예를 들면 한 여름 낮의 아스팔트 포장의 표면온도가 50°C 이상이 되고, 노면으로부터의 반사가 보행자에게 큰 불편감을 주며, 이것에 인접한 건물의 실내환경에도 악영향을 미친다. 또한 아스팔트 및 콘크리트 포장은 낮에 대량의 열을 축열하기 때문에, 야간이 되더라도 기온보다 지표면 온도가 높아서 대기를 계속 가열한다. 이것은 실내환경에 영향을 미치는 것뿐만이 아니고, 냉방부하의 증가를 가져와 광역적으로는 열대야의 발생을 조장하는 요인이 되고 있다(伊藤 등, 1996). 옥외 콘크리트 상에서의 인체의 열수지 해석 결과 지면으로부터의 장파복사가 가장 큰 부하를 주며, 이는 포장 표면온도가 이용자들에게 불편감을 주는 요인이 된다는 것을 의미한다(神田와 土屋, 1995).

1990년대 이후 포장의 열환경에 대한 관심이 높아졌고, 이를 계기로 열환경에 미치는 각종 포장의 영향을 밝히기 위해 실제 도시 내의 포장도로나 모델 포장의 관측치를 사용하여 투수성 포장을 포함한 각종 포장의 열특성에 대해서 조사한 결과를 발표하였다(淺枝 등, 1991; 成田과 關根, 1991; Asaeda *et al.*, 1996; 福田 등, 1997; Asaeda and Ca, 2000). 포장의 고온화 억제

대책으로서는 색채를 바꾸어 알베도를 높이거나, 포장이나 골재에 열전도성이나 비열을 높이며, 포장에 투수성이나 보수성을 가지게 하여 잠열을 높이고, 가로수 등의 그늘에 의한 입사량을 줄이는 방법 등이 있다. 최대 지표면 온도에 영향을 주는 것은 포장의 알베도, 열용량, 열전도율 순이며, 각각이 기준상태의 5배로 되었을 때 최대 포장표면온도는 각각 22%, 9%, 4% 증가한다는 것도 밝혀졌다(木内와 小林, 1999). 아스팔트 콘크리트 포장표면의 최대온도는 알베도 값 0.1이 증가하면 -3.7°C 감소하며, 알베도 값을 0.1에서 0.3으로 높이면 기온이 약 0.6°C 감소하고, 아스팔트 결합체를 살포한 후 굳기 전에 직경이 약 6mm 가량의 자갈을 뿌리고 전압을 함으로써 알베도 값을 자갈 알베도 값의 2/3까지 높일 수 있는 방안도 제시되었다(Pomerantz *et al.*, 2000). 그리고 최근에는 포장의 열환경 개선을 목적으로 포장체의 잠열을 높이는 포장 재료 및 공법에 대한 다양한 연구 결과도 보고되었다(伊藤 등, 1996; 福田 등, 1999a; 1999b; 赤川과 小宮, 2000; 越川 등, 2001). 하지만, 대부분의 투·보수성 포장 재료 및 공법에 대한 연구는 주로 투수성 아스콘 포장에 국한되어 있으며, 투수성 시멘트 콘크리트 포장을 대상으로 한 열환경 연구는 희소하다.

따라서 본 연구는 도시의 열환경을 악화시키는 원인의 하나인 불투수성 포장의 대안으로서 주목을 받고 있는 투수성 시멘트 콘크리트 포장의 열특성을 파악함으로써, 도시 열환경 개선에 기여할 수 있는 투·보수성 시멘트 콘크리트 포장재료 및 포장공법의 개발을 위한 기초자료를 제공하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 우선 투수성 포장의 강도, 투수계수, 열물성, 열환경 개선에 대한 문헌을 조사 분석하였고, 조사분석 결과를 바탕으로 옥외실험을 위한 투수성 포장 공시체를 구축하였으며, 구축된 포장 공시체의 열환경을 관측하였다. 관측된 자료를 근거로 투수성 시멘트 콘크리트 포장 등의 표면온도의 일변화 및 계절변화 그리고 계절별 포장

표면의 열수지 등을 분석 및 고찰하였다.

본 연구의 결과는 경제성, 시공성, 강도, 내구성, 보행성이라는 기능성에만 치중해 왔던 포장에 보행자의 쾌적성, 환경의 보전이라는 기능을 부가시키는데 기여할 것이며, 특히 도시의 열환경을 개선시킬 수 있는 투·보수성 포장재료 및 공법의 개발을 위한 유용한 근거 자료로 이용될 수 있을 것이다.

II. 재료 및 방법

1. 시험 포장체의 구성재료의 특성

투보수성 포장재료에는 투수성 아스팔트 콘크리트, 잔디블럭, 투수성 점토벽돌 등과 같이 여러 가지 종류가 있으나, 본 연구에서는 실험조건에 따르는 물성의 가공이 용이한 시멘트 콘크리트를 대상으로 열환경을 측정하였다.

1) 표층재료

시험 포장체 표층 콘크리트의 재료의 특성 및 구성은 다음과 같다(표 1, 2 참조)(Ghafoori and Dutta, 1995).

2) 건조상태의 열물성

시험 포장체 구성층 사용재료의 주된 열물성은 다음과 같다(표 3 참조).

포장재료의 비열은 열전도를 측정법인 GHP (Guarded Heat Flow Meter)법(ASTM 1530)을 통해 간접적

표 3. 포장재료의 건조상태 열물성

포장의 종류	비열(c) (kJ/kg · °C)	밀도(p) (kg/m ³)	체적열용량 (kJ/m ³ · °C)
투수콘 및 투수벽돌	0.9	1954	1759
수밀콘	1.0	2200	2200
노상토	0.8	1524	1220
자갈(기층)	0.6	1770	1062
모래(여과층)	0.6	1541	925

으로 측정하였으며, 밀도는 표면건조상태에 있는 공시재료의 중량을 부피로 나누어 산정하였다.

2. 시험 포장체의 구성

포장의 열특성에 관한 기초적 자료를 얻기 위해, 투수성 시멘트 콘크리트 포장(이하 투수콘이라 한다)과 투수성 시멘트 콘크리트 벽돌 포장(이하 투수벽돌이라 한다), 비교용으로 불투수성 콘크리트 포장(이하 수밀콘이라 한다)과 나지를 평면치수 90cm×90cm 되도록 옥외시험포장을 구축하였다. 평면치수 90cm×90cm는 300cm×300cm의 공시체 표면온도는 90cm×90cm의 그것보다 주간은 1°C, 야간은 2°C 정도 높을 뿐이며, 공시체 주위의 열이나 수분의 영향을 무시할 수 있다는데 근거를 두었다(福田 등, 1997).

포장시험체의 단면을 그림 1~4에 나타내었다. 주변으로부터의 전열의 영향을 피하기 위해, 합판과 목재로 사각형 외부박스(내부 규격 1100mm×1100mm×900mm)를 제작하고 하부에 두께 200mm, 주위에 두께

표 1. 투수성 시멘트 콘크리트의 배합

(m³당)

시멘트	자갈	물	실리카흙	AE감수제	비 고
420kg	1680kg (5mm~10mm)	175kg	21kg	1.26kg	시멘트:자갈=1:4(중량비) 물:시멘트비 30% AE감수제: 시멘트 중량의 0.3%

표 2. 불투수성 시멘트 콘크리트의 배합

(m³당)

시멘트	모래	자갈	물	실리카흙	AE 감수제	비 고
350kg	760kg	763.2kg	175kg	17.5kg	1.05kg	AE감수제: 시멘트 중량의 0.3%

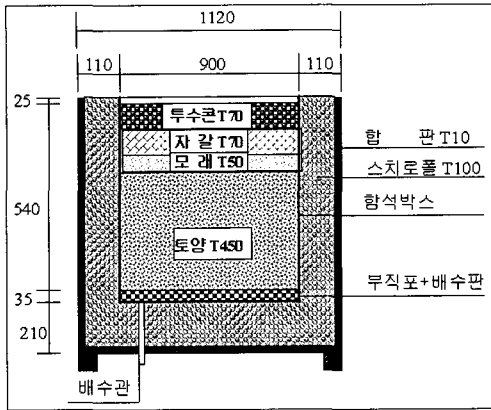


그림 1. 투수콘 포장의 대형시험체 단면도

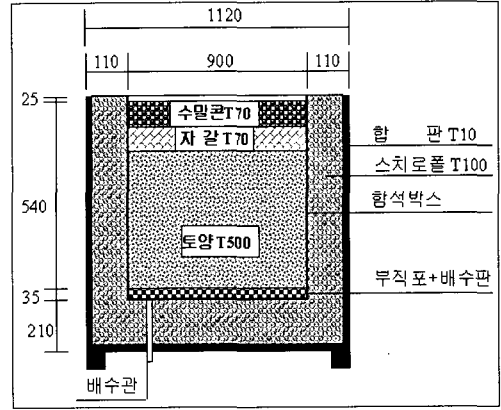


그림 3. 수밀콘의 대형시험체 단면도

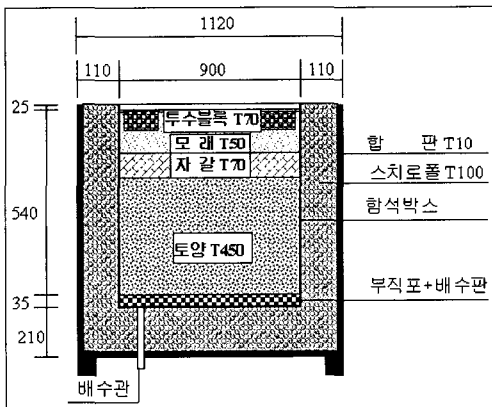


그림 2. 투수벽돌 포장의 대형시험체 단면도

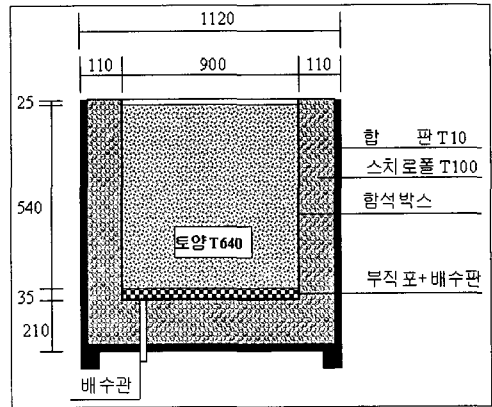


그림 4. 나지의 대형시험체 단면도

100mm의 발포 스티로폴로 단열한 후 함석으로 내부 박스(내부 규격 900mm×900mm×700mm)를 만들어 넣었다. 함석 박스 바닥면에는 원활한 배수를 위해 배수구(φ30mm)를 낸 후 배수판을 깔았으며, 시험체 내의 토양입자가 배수판을 메우는 것을 방지하기 위해 부직포를 깔았다. 부직포 위에 토양(T450mm)을 채우고, 투수콘 포장은 모래(여과층)를 T50mm 간 후, T70mm(기층)을 깔고 T70mm의 포장재를 포설하였으며, 투수벽돌 포장은 갠 자갈(기층)을 T70mm을 간 후, 모래(여과층)를 T50mm를 깔고 T70mm의 포장재를 포설하였고, 수밀콘 포장은 갠 자갈(기층)을 T120mm 간 후, T70mm의 포장재를 포설하였다. 그리고 나지는 박스 최상단으로부터 25mm까지 전부 토양으로 채웠다(成田과 關根, 1991).

포장시험체 상호간의 영향을 최소화하기 위해, 포장 표면의 중심간 거리가 최대한 확보되는 십자형으로 배치하였다.

3. 포장체의 열환경 측정

1) 포장체의 온도

각 시험체의 온도는 직경 0.3mm의 K형 열전대(NiCr-Ni)를 직경 15mm의 동튜브에 넣어서 실드한 후, 깊이방향으로 5점(포장체 표면, 포장체 저면, 자갈층 저면, 모래층의 저면, 토양 중간점)에 매설하여 측정하였다. 포장체 표면온도는 표면에 구멍을 파서 열전대를 매설하고 표면을 시멘트 페이스트로 얇게 마감한 후 측정하였다. 포장재료별 온도 측정지점은 다음과 같

표 4. 포장재료별 온도 측정지점

구 분	투수콘	투수벽돌	수밀콘	나지
깊이(cm)	0, 7, 14, 19, 49	0, 7, 12, 19, 49	0, 7, 19, 49	0, 49

다(표 4 참조). 측정된 온도는 5분 간격으로 데이터로거(AHLBORN사, ALMEMO 5590-3)를 통해 PC에 입력하였다(西岡 등, 2002).

2) 지중 열유속

3종류(투수콘, 투수벽돌, 수밀콘 대형공시체)의 노상 토심 35cm에 $\Phi 38.56\text{mm} \times t 3.93\text{mm}$ 의 열유속계(Soil Moisture사, 감도: $32.1\text{-}38.9 \text{ Wm}^{-2}/\text{mV}^{-1}$)를 매설하여 지중 열유속을 측정하였다. 열유속계는 포장의 표면으로부터 수직하(垂直下)방향으로 열이 흐를 때 플러스 값이 되도록 설치하였다. 측정된 지중 열유속은 5분 간격으로 데이터로거(Delta-T사, DL2e)를 통해 PC에 입력하였다(Mayocchi and Bristow, 1995; 福田 등, 1997).

3) 포장체 표면의 입사 및 반사 일사량, 대기 및 포장체 장파복사량

입사 및 반사 일사량과 대기 및 포장체 장파복사량은 포장 시험체의 거의 중앙의 상방 30cm 높이에 설치한 순복사계(net-radiometer, Kipp & Zonen사, CNR1)를 사용하여, 1분 간격으로 자동으로 90° 회전한 후 포장체 위에 정지하였을 때 20초 간격으로 측정을 하였으며, 측정치는 데이터 로거(Soil Moisture사, CR10X)에 입력하였다(福田 등, 1999a; 1999b).

4) 포장시험체의 증발유속

본 연구에서는 소면적($0.9\text{m} \times 0.9\text{m}$)의 공시체를 대상으로 한 실험을 통한 열수지를 해석하기 때문에 TDR 법을 사용하였다(Alvena's and Jansson, 1997). TDR 법은 포장체의 노상, 기층, 여과층에 매설한 TDR (Time Domain Reflectometry, SOILMOISTURE사) 센서를 통해 각 층의 용적수분함량을 3시간 간격으로 자동측정하여, 멀티플렉스를 통해 데이터로거(SOIL-MOISTURE사, Trase System)에 입력하였다. 그리고 측정된 용적 수분함량의 변화량을 통해 증발량을 산정

하였다.

5) 기상조건

각 시험체로부터 약 3m 떨어진 장소에 전도증가우량계(정밀도 $\pm 1\%$, Met One Instruments사, Model 370)를 사용하여 강수량을, 약 2.5m의 높이에서 온습도계(습도 10%~90%에서 정밀도 $\pm 3\%$, 온도: 정밀도 $\pm 0.1^\circ\text{C}$, Met One Instruments사, Model 083C) 및 화살 날개식 풍향풍속계(풍향의 정밀도 $\pm 4^\circ$, 풍속정밀도 10m/s 이하인 경우는 $\pm 0.1\text{m/s}$; 10m/s 이상인 경우는 $\pm 1.1\%$, Met One Instruments사, Model 083C)를 통해 기온과 습도 및 풍속을 측정하였다. 측정치의 시간 평균값은 데이터로거(Met One Instruments사, AUTO-MET)에 입력하였다.

6) 측정장소

주변건물로부터의 영향이 적고 더욱이 개방적인 장소(진주산업대학교 제 3공학관 4층 건물의 옥상, 약 $40\text{m} \times 25\text{m}$)를 실험장소로 하였다. 각 시험체는 서로 약 1m 이상 떨어지게 설치하였다. 연속측정은 2001년 8월 9일부터 2002년 8월 30일까지 계속하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 포장재료별 온도 변화

1) 표면온도의 일변화

2002년 7월 25일~8월 3일 동안의 열전대로 측정된 포장 표면 최고온도의 변화를 다음 그림 5에 나타내었다. 7월 26일 내린 비로 포장 표면온도가 급격히 저하하였으나, 강우로 인한 투수콘 및 수밀콘의 온도 저하 효과는 하루 이상 지속되지 않았다. 이는 토양 표면에서 일어나는 증발의 경과 일수에 따른 변동은 각기 다른 두 개의 건조단계로 나타나며, 1단계는 표면에 적정 수분이 공급되어, 증발은 표면에서의 유용 에너지에 의해 좌우되고, 2단계는 토양 표층이 어느 정도 건조된 후 증발은 아래로부터의 수증기 공급에 의해 좌우되며, 1단계보다 적은 증발이 일어나고, 1단계는 1일 단위(order of day) 이하로 지속된다는 기존의 연구결과로

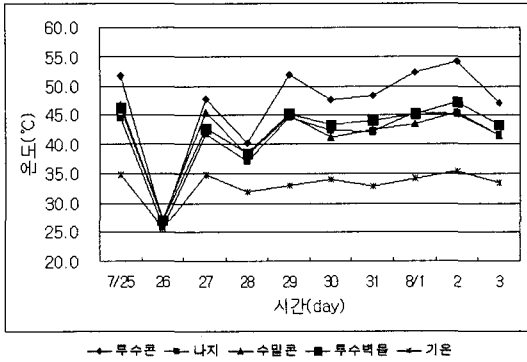


그림 5. 포장 표면 최고온도의 경시적 변화(2002년 7월 25일 ~8월 3일)

볼 때, 투수콘의 1단계 증발은 하루 이상 지속되지 않았기 때문인 것으로 판단되었다(Porte-Agel *et al.*, 2000). 기간 중 기온이 가장 높았던 8월 2일(최고기온 35.3°C)에 있어서 포장 표면의 일 최고온도는 투수콘이 54.2°C로 가장 높았고, 다음으로 투수벽돌이 47.2°C이었으며, 수밀콘과 나지는 45.5°C와 45.3°C로 낮게 나타났다. 이 값은 기준의 연구 결과인 42°C(보통콘크리트), 40~45°C(콘크리트계)보다 다소 높은 값이었다(Asaeda *et al.*, 1996; 福田 등, 1997). 투수콘이 수밀콘보다 최고 8.7°C 높은 표면온도를 나타냈던 것은 알베도(투수콘 0.20~0.21, 수밀콘 0.37~0.41)의 차이 때문이라 판단되었다. 그리고 투수벽돌이 동일재료인 투수콘보다 표면 최고온도가 7.0°C 낮았던 것은 투수벽돌 사이의 줄눈에서의 증발효과인 것으로 판단되었다. 나지도 비가 온 후 며칠이 지나면 수밀콘 포장과 비슷한 표면 최고온도를 나타내는 것은 증발효과가 현저히 떨어지기 때문인 것으로 판단되었다.

기간 중 기온이 가장 높았던 8월 2일(최고기온 35.3°C)에 있어서 포장표면온도의 경시적 변화를 다음 그림 6에 나타내었다. 표면의 일최고온도는 오후 2~3시경에 나타났으며, 일최저온도는 오전 6~7시경에 나타났다. 포장표면 온도의 일교차는 투수콘이 28.6°C로 가장 높게 나타났고, 다음으로 투수벽돌 22.8°C, 수밀콘 21.1°C, 나지 20.3°C 순으로 낮게 나타났다. 일평균 포장 표면온도도 투수콘이 37.0°C로 가장 높게 나타났고, 다음으로 투수벽돌 36.0°C, 수밀콘 34.9°C, 나지 34.2°C 순으로 낮게 나타났다. 투수콘은 낮은 알베도 때문에 상

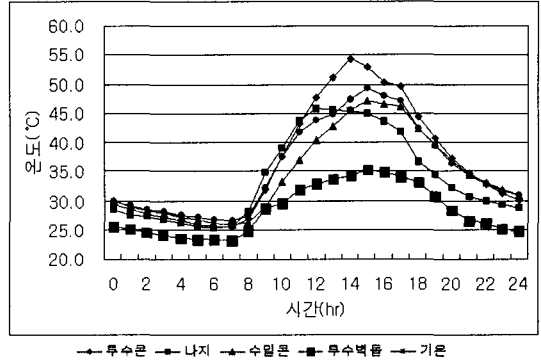


그림 6. 포장 표면온도의 경시적 변화(2002년 8월 2일)

대적으로 높은 최고온도를 나타내었으며, 상대적으로 낮은 최저온도를 나타내었던 것은 낮은 열용량 때문인 것으로 판단되었다.

2) 포장체의 층별 온도변화

2002년 8월 2일 오전 6시부터 8월 3일 오전 5시 사이에 노상, 여과층, 기층, 표층에 있어서 포장 표면의 최고 및 최저 온도를 나타내는 시간에 있어서의 포장재료에 따른 깊이 방향의 온도변화를 다음 그림 7에 나타내었다.

온도경사의 부호를 포장체 내의 열류방향이 지중에서 포장표면으로 향할 때를 마이너스, 역으로 향할 때를 플러스로 전제하고, 각 포장체에 대한 깊이방향의 온도변화를 검토하였다.

포장 표면온도가 가장 낮은 일출직후 아침 6~7시에 있어서 각종 포장의 온도기울기를 비교하면, 표층은 투

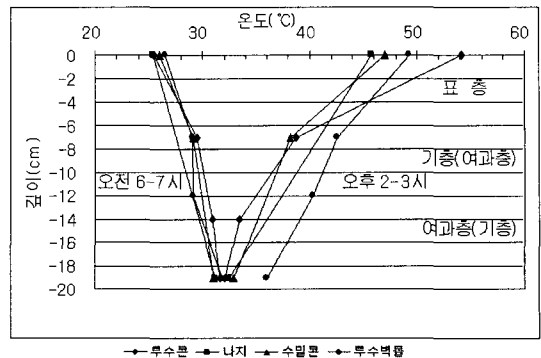


그림 7. 포장 표면온도 최저, 최고 시의 층별 온도 분포(2002년 8월 2일)

수콘(-0.56°C/cm) > 수밀콘(-0.45°C/cm) > 투수벽돌(-0.36°C/cm)의 순으로 가파르게 나타났으며, 다른 포장의 표층 및 기층 그리고 여과층에 해당하는 층(이후 상층이라 한다)인 나지 상층의 온도기울기는 -0.31°C/cm으로 나타났다. 같은 시각에 있어서 기층과 여과층의 온도 기울기를 종합적으로 비교하면, 투수벽돌(-0.24°C/cm) > 투수콘(-0.18°C/cm) > 수밀콘(-0.16°C/cm)의 순으로 가파르게 나타났다. 온도 기울기가 가파르다는 것은 가파른 만큼 대기로의 열방사가 활발하게 일어난다고 있다고 볼 수 있으며, 이는 전날에 가열된 포장이 다음 날 오전 6시까지도 즉 야간 내내 대기를 가열하고 있었다는 것을 의미한다.

포장 표면온도가 가장 높은 오후 2~3시의 각종 포장의 온도기울기를 비교하면, 표층은 투수콘(2.22°C/cm) > 수밀콘(1.28°C/cm) > 투수벽돌(0.96°C/cm)의 순으로 가파르게 나타났으며, 나지의 상층의 온도 기울기는 0.70°C/cm으로 나타났다. 같은 시각에 있어서 기층과 여과층의 온도 기울기를 종합적으로 비교하면, 투수콘(0.55°C/cm) = 투수벽돌(0.55°C/cm) > 수밀콘(0.44°C/cm)의 순으로 가파르게 나타났다. 온도기울기가 가파르다는 것은 그만큼 지중으로의 열전도가 활발하게 일어나고 있다고 볼 수 있다.

2. 복사량 및 열수지

1) 열수지의 산정

지표면에서 열유속을 구하는 방법에는 외상관법, 경도법, 벨크법을 이용한 공기역학적 방법과 Bowen 비법, Penman법 등을 이용한 열수지적인 방법이 있다. 본 연구에서는 열수지적인 방법으로 포장표면에서의 열유속을 구하고자 하였다.

포장표면의 열수지는 식 (2.1)로 나타낼 수 있다 (Mayocchi and Bristow, 1995).

$$0 = R_n - H - LE - G \tag{2.1}$$

여기서 R_n : 순복사, H : 대류열유속, LE : 잠열유속, G : 지중전도열유속
순복사는 그림 8과 같이 태양복사로서 전천일사와

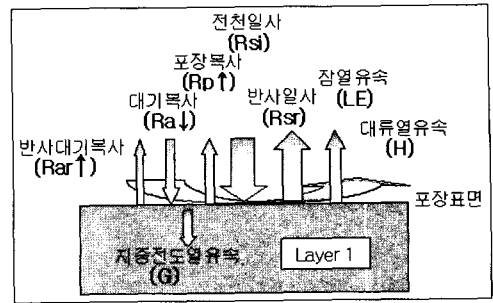


그림 8. 지표면에서의 열수지

반사일사 그리고 대기복사와 반사대기복사, 포장에서의 복사를 포함한다.

(1) 순복사

순복사는 입사와 방사의 합으로서 식 (2.2)와 같이 나타낼 수 있다(Qin, et al., 2002).

$$R_n = R_{si}(1 - \alpha) + R_{a\downarrow} - R_{ar\uparrow} - R_{p\uparrow} \tag{2.2}$$

여기서 R_n : 순복사(W/m²),

R_{si} : 포장면에서의 전천일사,

α : 알베도(표면반사율), $R_{a\downarrow}$: 대기복사,

$R_{ar\uparrow}$: 반사대기복사,

$R_{p\uparrow}$: 포장면에서의 복사

순복사는 전천일사와 반사일사는 일사계로 측정하고, 대기복사와 포장에서의 방사는 지구복사계(pyrradiometer)로 측정하여 산정하였다.

(2) 지중 열유속

각 층의 내부에서는 대류나 복사에 의한 열전달은 없으며, 오로지 전도에 의한 열전달만 존재한다. 따라서 같이 지표면을 원점으로 하고 수직 아래 방향으로 x 좌표를 설정할 때, x 위치에 있는 dx 두께의 부분에 대해 열수지를 고려하면 식 (2.3)과 같이 된다(Myers, 1971).

$$q_x - q_{x+dx} = q_{stor} \tag{2.3}$$

여기서 q_x , q_{x+dx} , q_{stor} 는 각각 x 위치에서 들어가는 전도열전달(W), $x + dx$ 위치에서 나가는 전도열

전달(W), 물체 내부에 축적되어 온도변화를 일으키는 열량(W)을 나타낸다. 따라서 식 (2.3)은 에너지 보존 법칙이라고 할 수 있다. 식 (2.3)에서 각각의 항은 식 (2.4)~(2.6)과 같이 표현된다. 전도열전달에 관하여는 Fourier법칙을 적용하고 질량을 밀도로 나타내면 식 (2.7)과 같이 된다(Myers, 1971). 본 연구에서의 지중 저장열량은 식 (2.6)을 사용하여 산정하였다.

$$q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \tag{2.4}$$

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \tag{2.5}$$

$$q_{stor} = mc_p \frac{\partial T}{\partial t} = \rho c_p A dx \frac{\partial T}{\partial t} \tag{2.6}$$

여기서 A , k , m , ρ , c_p , T , t 는 각각 단면적 (m^2), 열전도계수 ($W/m \cdot ^\circ C$), 질량(kg), 밀도(kg/m^3), 비열($J/kg \cdot K$), 온도($^\circ C$), 시간(s)을 나타낸다.

(3) 대류 열유속

대류 열의 실무적인 계산에 있어서는 대류 열전달계수를 포함하는 식 (2.7)과 같은 경험식을 사용하였다 (Oliveti *et al.*, 2003).

$$H = h_c (T_s - T_a) \tag{2.7}$$

여기서 H 는 대류열유속이며, h_c 는 대류열전달계수, T_s 는 포장표면온도($^\circ C$), T_a 는 기온($^\circ C$)이다.

위의 경험식은 한정된 범위에서 타당성을 가지므로, 본 연구와 가장 유사한 Hagishima와 Tanimoto(2003)의 일본 구주대학 내 건물 4층 옥상을 대상으로 한 식 (2.8)과 같은 연구 결과를 도입하여 사용하였다.

$$h_c = 2.28 V + 8.18 \tag{2.8}$$

여기서 h_c 는 대류열전달계수, V 는 풍속(m/sec)이다.

(4) 잠열유속

시간증발잠열은 TDR법 및 lysimeter법으로 구한 일 증발량을 식 (2.9)를 이용하여 산정하였다(Porte-Agel *et al.*, 2000).

$$LE_i = E_d \times \frac{R_{mi} - G_i}{R_{nd} - G_d} \times L \tag{2.9}$$

여기서 LE_i 는 시간 i 의 증발잠열(W/m^2), E_d 는 1 일증발량(mm), $R_{mi} - G_i$ 는 시간 i 의 $R_n - G$ (순방사량-지중전도열량)이며, $R_{nd} - G_d$ 는 1일 $R_n - G$ 이고, L 은 증발잠열($25^\circ C$ 에서 $678W/m^2$)이다.

증발잠열 L 의 값은 온도에 따라서 변하며, 식 (2.10)과 같이 나타낼 수 있다(Warrick, 2002).

$$L = 2.501 - 2.370 \times 10^{-3} T \tag{2.10}$$

($r^2 = 0.99995$)

여기서 T 는 온도($^\circ C$)이다.

2) 포장재료별 전천/반사일사량, 장파복사량

2002년 8월 2일의 전천일사량과 포장재료별 반사일사량을 다음 그림 9에 나타내었다. 전천일사량은 오전 12시 및 오후 1시 최고 값($937W/m^2$)을 나타냈으며, 최대 반사일사량은 수밀콘($350W/m^2$)이 가장 큰 값을 나타내었다. 다음으로 투수벽돌($207W/m^2$)과 나지($205W/m^2$)가 비슷하게 나타났고, 투수콘($190W/m^2$)이 가장 낮게 나타났다.

포장재료별 알베도를 다음 표 5에 나타내었다. 알베도는 태양고도가 낮은 아침, 저녁과 같이 입사하는 일사가 작을 때는 지표면이 거울같이 반사하여 높은 알베도를 나타내는 등 일중에도 변화한다. 그리고 토양의 알베도는 수분함량이 증가할수록 감소한다. 그리고 토

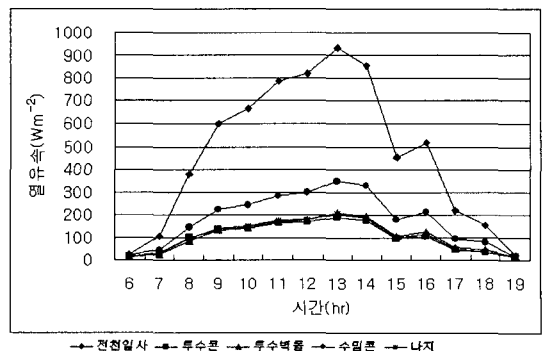


그림 9. 전천일사량과 포장재료별 반사일사량(2002년 8월 2일)

표 5. 포장재료별 알베도(2002년 8월 2일)

구 분	시 각													
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
투수콘	0.58	0.28	0.26	0.22	0.21	0.21	0.20	0.20	0.20	0.21	0.20	0.21	0.23	0.45
투수벽돌	0.59	0.25	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.23	0.23	0.24	0.25	0.30	0.49
수밀콘	0.76	0.40	0.38	0.37	0.37	0.36	0.37	0.37	0.38	0.39	0.41	0.44	0.52	0.71
나 지	0.65	0.26	0.25	0.15	0.17	0.17	0.19	0.21	0.23	0.24	0.24	0.26	0.31	0.42

양의 색상, 질감, 유기물 함량, 표면의 조도 등이 알베도를 좌우한다(Warrick, 2002). 오전 11시부터 오후 3시 사이의 포장체 표면의 알베도는 수밀콘(0.36~0.39)이 가장 큰 값으로 나타났고, 투수벽돌(0.22~0.23), 나지(0.22), 투수콘(0.20~0.21)이 비슷한 값으로 나타났다. 수밀콘의 알베도 값이 가장 크게 나타났던 것은 포장면의 색상이 밝고 표면이 매끈하기 때문이라 판단되었다. 측정된 알베도 값은 기존의 연구 결과인 0.45(수밀콘), 0.25(투수벽돌)보다 조금 낮게 나타났다(淺枝 등, 1991; Asaeda and Ca, 2000).

2002년 8월 2일의 대기 장파복사량과 포장재료별 장파복사량을 다음 그림 10에 나타내었다. 각 포장의 열방사량은 오전 12시~오후 3시에 최고 값으로 나타났으며, 투수콘($631W/m^2$)이 투수벽돌($601W/m^2$)보다 큰 값으로 나타났고, 다음으로 나지($586W/m^2$), 수밀콘($584W/m^2$)의 순으로 나타났다. 이 값은 기존의 연구 결과인 $490\sim 540W/m^2$ 보다 높은 값인데 이는 각종 포장의 표면온도가 $10^{\circ}C$ 정도 높게 나타난 결과로 판단되었다(福田 등, 1997).

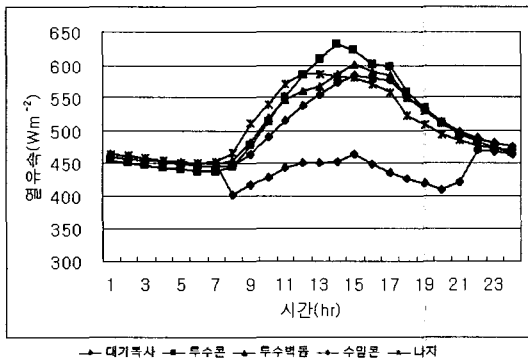


그림 10. 포장재료별 장파복사량(2002년 8월 2일)

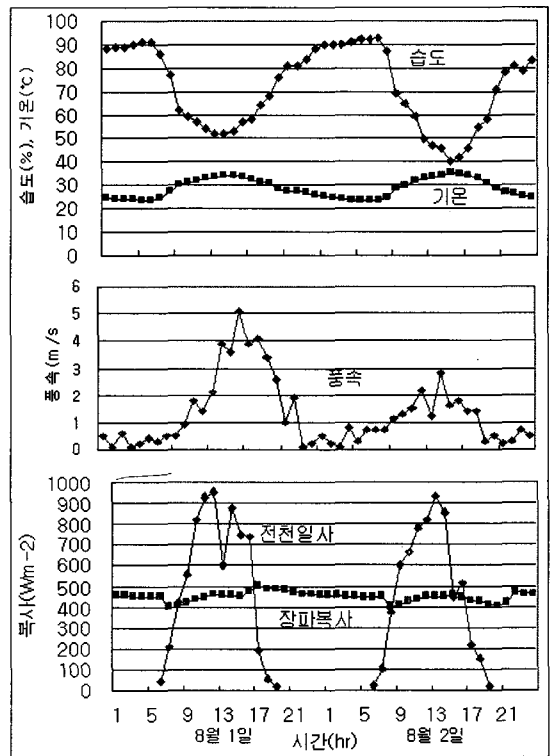


그림 11. 기상 및 복사량의 경시변화(2002년 8월 1~2일)

3) 포장재료별 열수지

2002년 8월 2~3일의 기상 및 복사량의 경시변화를 그림 11에 나타내었다.

2002년 8월 2~3일에 걸친 각종 포장의 열수지를 그림 12~15에 나타내었다.

투수콘의 열수지(그림 12 참조)를 보면, 1일중 최대 대류 열유속은 오후 2시에 $295W/m^2$ 와 $291W/m^2$ 이었으며, 1일중 최대 지중 전도열 유속은 오전 12시에 $335W/m^2$ 와 $316W/m^2$ 이었고, 지중 전도열 유속은 오후 6

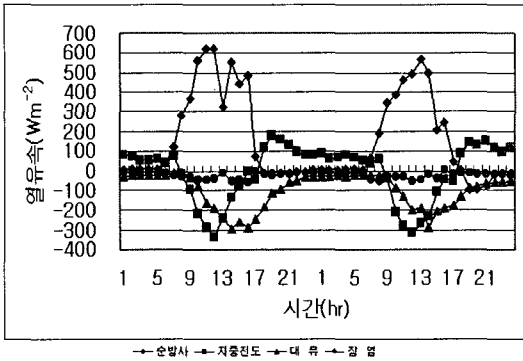


그림 12. 투수콘크리트의 열수지(2002년 8월 1~2일)

시부터 익일 7시 사이에는 기층 또는 여과층에서부터 표층으로 향했다. 또한 표면에서 일어나는 1일중 최대 잠열유속은 60W/m^2 와 54W/m^2 로 나타났는데, 이것은 투수콘 포장도 강우 후 며칠이 경과하면서 외부 복사열에 의해 포장체 내 토양수분의 증기확산이 생겼기 때문이었다(Yamanaka and Yonetani, 1999). 그리고 증발잠열의 일중 동향을 보면, 주간의 증발잠열이 야간의 그것에 비해 크게 나타났는데, 이는 R_n-G 의 값이 주간에는 컸고, 야간에는 작았기 때문이라고 판단되었다. 1일 중 최대 순방사량은 오전 11시와 오후 1시에 각각 624W/m^2 와 565W/m^2 로 나타났다.

투수벽돌의 열수지(그림 13 참조)를 보면, 1일중 최대 대류 열유속은 오후 1시와 4시에 각각 190W/m^2 와 266W/m^2 이었으며, 1일중 최대 지중저장열유속은 오전 12시와 오후 2시에 각각 315W/m^2 와 299W/m^2 이었고, 표면에서 일어나는 1일중 최대 잠열유속은 77W/m^2 와 100W/m^2 로 나타났는데, 잠열유속이 발생한 것은 투수

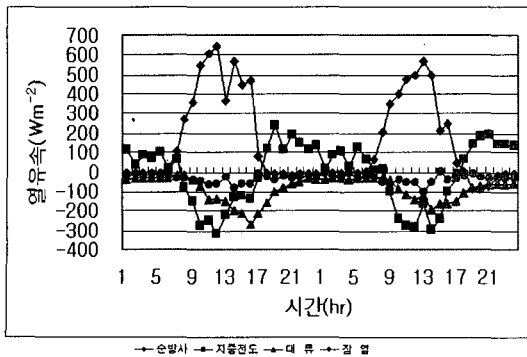


그림 13. 투수벽돌의 열수지(2002년 8월 1-2일)

벽돌 포장도 강우 후 며칠이 경과하면서 외부 복사열에 의해 포장체 내 토양수분의 증기확산이 생겼기 때문이었으며, 더욱이 투수벽돌 사이의 줄눈에서는 토양과 비슷한 정도의 증기확산이 일어났기 때문에 투수콘 포장보다 큰 잠열유속을 나타내었다고 판단되었다. 그리고 증발잠열의 일중 동향을 보면, 주간의 증발잠열이 야간의 그것에 비해 크게 나타났다. 이는 R_n-G 의 값이 주간에는 컸고, 야간에는 작았기 때문이라고 판단되었다. 1일 중 최대 순방사량은 오전 12시와 오후 1시에 각각 641W/m^2 와 569W/m^2 로 나타났고, 오전 0시부터 5시, 오후 7시부터 12시 사이에는 마이너스 값을 나타내고 있었으며, 이 시기에는 지중전도열유속도 기층 또는 여과층에서부터 표층으로 향했다.

수밀콘의 열수지(그림 14 참조)를 보면, 1일중 최대 대류 열 유속은 오후 2시에 255W/m^2 와 165W/m^2 로, 투수콘 및 투수벽돌의 그것보다 낮은 값을 나타냈는데, 이는 수밀콘 포장면의 알베도 값이 높아서 흡수하는 복사 열유속이 작아서, 포장 표면온도와 기온과 차이가 작게 나타났기 때문이라고 판단되었다. 1일중 최대 지중 저장열 유속은 오전 11시와 12시에 각각 231W/m^2 와 235W/m^2 로 투수콘 및 투수벽돌의 그것보다 낮은 값을 나타냈는데 이 또한 표면온도가 낮았기 때문이라고 판단되었다. 표면에서 일어나는 1일중 최대 잠열 유속은 13W/m^2 와 17W/m^2 로 상대적으로 아주 작게 나타났는데, 이는 수밀콘은 강우 후 하루가 지나면 증발량이 0이기 때문에, 표층 하부의 포장층 내에서 일어난 증발량이 반영된 것으로 판단되었다. 1일 중 최대 순방사량은 오전 12시와 오후 1시에 각각 527W/m^2 와 441W/m^2

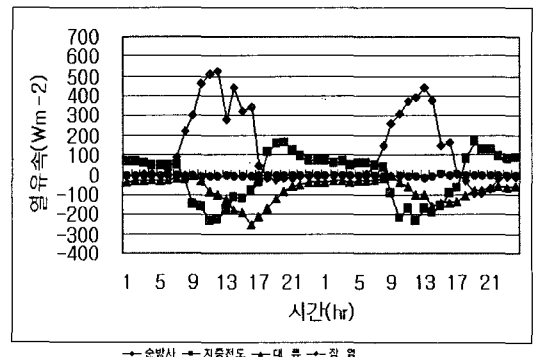


그림 14. 수밀콘의 열수지(2002년 8월 1-2일)

m²으로 나타났고, 오후 6시부터 익일 오전 5시 사이에는 마이너스 값을 나타내고 있으며, 이 시기에는 지중전도열유속도 기층 또는 여과층에서부터 표층으로 향했다.

나지의 열수지(그림 15 참조)를 보면, 1일중 최대 대류 열유속은 오전 12시와 오후 4시에 각각 169W/m²와 196W/m²으로서 투수콘이나 투수벽돌의 그 것보다 낮은 값을 나타냈으며, 1일중 최대 지중 저장 열유속은 오전 9시와 11시에 각각 333W/m²와 289W/m²으로 나타났다. 나지의 대류 열유속이 낮은 것은 토양 상층의 열전도율이나 비열이 모래나 자갈보다 높아서 지중열 저장량이 많으므로 표면온도가 상대적으로 낮게 나타났기 때문이라 판단되었다. 지중의 열유속 방향이 바뀌는 시간이 오후 5시로 다른 포장에 비해 1~2시간 빨리 나타났던 것은 열전도율이 높기 때문이라 판단되었다. 표면에서 일어나는 1일중 최대 잠열유속은 159W/m²와 153W/m²로 나타났는데, 이는 다른 포장에 비해 토양수분의 증발이 많았기 때문이라 판단되었다. 그리고 증발잠열의 일중 동향을 보면, 주간의 증발잠열이 야간에 비해 크게 나타나고 있다. 이는 Rn-G의 값이 주간에는 크고, 야간에는 작기 때문이다. 1일 중 최대 순방사량은 오전 12시와 오후 1시에 각각 616W/m²와 550W/m²로 나타났고, 오후 7시부터 익일 오전 5시 사이에는 마이너스 값을 나타내고 있었으며, 이 시기에는 지중전도열유속도 기층 또는 여과층에서부터 표층으로 향했다.

4) 포장재료별 열수지 비교

2002년 8월 2일 포장재료별 주간 및 야간의 열수지(순방사, 지중전도, 대류, 잠열)의 극한치를 그림 16에

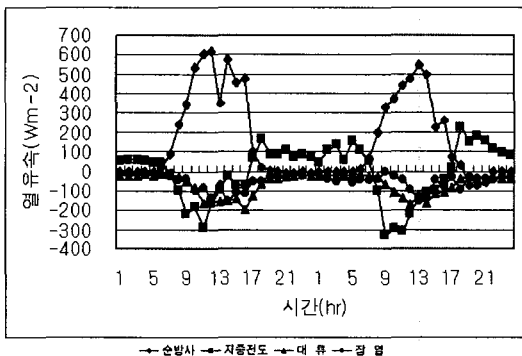


그림 15. 나지의 열수지(2002년 8월 1~2일)

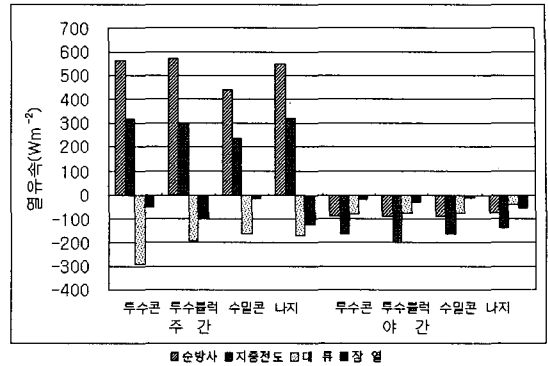


그림 16. 포장재료별 열수지의 극한치 비교(2002년 8월 2일)

나타냈다. 포장 표면을 경계로 대기방향으로의 열유속은 마이너스(-), 지중방향으로의 열유속은 플러스(+)로 표현하였다.

주간의 포장재료별 열수지를 보면 순방사 열유속과 지중전도 열유속은 지중방향으로 향했으며, 대류와 잠열에 의해 지중가열이 완화되는 것으로 나타났다. 순방사량은 수밀콘(441W/m²)이 투수콘(565W/m²), 투수벽돌(569W/m²), 나지(550W/m²)에 비해 낮게 나타났는데 이는 알베도 때문이라 판단된다. 같은 이유로 지중전도량 또한 수밀콘(235W/m²)이 투수콘(316W/m²), 투수벽돌(299W/m²), 나지(324W/m²)에 비해 낮게 나타났다. 대류량은 투수콘(-291W/m²)이 투수벽돌(-190W/m²), 수밀콘(-165W/m²), 나지(-169W/m²)보다 높게 나타났는데, 이는 투수콘의 포장표면온도가 상대적으로 높았기 때문이다. 잠열량은 나지(-125W/m²)와 투수벽돌(-100W/m²)이 투수콘(-54W/m²), 수밀콘(-17W/m²)보다 높게 나타났는데, 이는 나지 표면과 투수벽돌 줄눈을 통해서 토양수분의 증발이 일어났기 때문이다.

야간의 포장재료별 열수지를 보면 순방사 열유속과 지중전도 열유속, 대류 열유속, 잠열유속이 모두 대기방향으로 향했으며, 이는 야간에는 포장이 대기를 가열하는 것을 의미한다. 순방사량은 나지(-76W/m²)가 투수콘(-92W/m²), 투수벽돌(-90W/m²), 수밀콘(-93W/m²)에 비해 낮게 나타났는데 이는 잠열에 의하여 표면온도가 낮아졌기 때문이라 판단된다. 같은 이유로 지중전도량 또한 나지(-143W/m²)가 투수콘(-166W/m²),

투수벽돌(-190W/m²), 수밀콘(-165W/m²)에 비해 낮게 나타났다. 대류량은 나지(-39W/m²)가 투수콘(-82W/m²), 투수벽돌(-75W/m²), 수밀콘(-78W/m²) 보다 낮게 나타났는데, 이는 나지의 포장표면온도가 상대적으로 낮았기 때문이다. 잠열량은 수밀콘(-12W/m²)이 투수콘(-21W/m²), 투수벽돌(-33W/m²), 나지(-56W/m²) 보다 낮게 나타났는데, 이는 수밀콘이 토양수분의 증발을 차단하기 때문이다.

포장재료별 열수지의 결과를 종합해 보면 투수콘, 투수벽돌, 나지는 어두운 표면색 때문에 알베도가 낮아서 많은 열을 흡수하였으나, 나지와 투수벽돌은 잠열에 의해 포장체의 가열을 상당히 완화하여 표면온도가 잠열이 상대적으로 적은 투수콘에 비해 낮았다는 것을 알 수 있다. 반면에 수밀콘은 밝은 표면색과 매끈한 표면 때문에 알베도가 높아서 적은 열을 흡수하였기 때문에 잠열이 미미할지라도 포장체의 가열 정도가 상대적으로 적어서 표면온도가 투수콘 보다는 낮았다는 것을 알 수 있다.

따라서 포장면에 의한 도시열환경 악화를 완화하기 위해서는 포장 표면색을 밝게 하여 알베도를 높이고, 포장체에서 지속적인 증발이 일어날 수 있는 재료나 공법에 대한 방안을 강구하여야 할 것으로 판단된다.

IV. 결론

본 연구는 여름철 투·보수성 시멘트 콘크리트 포장의 열환경을 파악하기 위해 옥외에 투·보수성 포장 공시체를 구축하고 열환경의 변화를 관측하였다. 관측된 자료 중 기온이 가장 높았던 2002년 8월 2일(최고기온 35.3℃)의 자료를 근거로 투·보수성 시멘트 콘크리트 포장 등의 표면온도의 일변화, 포장체의 층별 온도변화, 포장표면의 열수지 등을 분석 및 고찰한 결과는 다음과 같다.

1. 포장표면의 최고 온도는 투수콘(54.2℃)이 가장 높았으며, 다음으로 투수블럭(47.2℃), 수밀콘(45.5℃), 나지(45.3℃)의 순으로 높게 나타났다.
2. 공시 포장의 열특성을 분석한 결과 투수성 시멘트 콘크리트 포장이 수밀성 시멘트 콘크리트 포장 보다 더 극한적인 열환경을 나타냈다. 이는 투수성

시멘트 콘크리트 포장면의 알베도(0.2)가 수밀성 시멘트 콘크리트 포장의 알베도(0.4)보다 높은 것이 주된 원인으로 판명되었다.

3. 공시 포장의 열특성을 분석한 결과 투수성 시멘트 콘크리트 포장이 투수성 벽돌 포장이나 나지보다 더 극한적인 열환경을 나타냈으며, 이는 투수성 시멘트 콘크리트 포장은 투수성 벽돌 포장이나 나지에 비해 잠열이 상대적으로 작은 것이 주된 원인으로 판명되었다.
4. 포장에 의한 도시열환경의 악화를 완화하기 위해서는 포장 표면색을 밝게 하여 알베도를 높이고, 포장체에서 지속적인 증발이 일어날 수 있는 재료나 공법에 대한 방안을 강구하여야 할 것으로 판단되었다.
5. 본 연구에서 도출된 계량적인 수치는 상대적인 비교치로서의 의미는 있지만, 여러 가지 오차 요인을 내포하고 있어서 정량적인 데이터로 활용하기에는 많은 한계가 있다. 따라서 열환경에 대한 정량적인 분석을 위해서는 세부 항목별로 실험의 정밀도를 높인 후속 실험이 필요하다.
6. 본 연구에서는 포장재 표층 재료에 대한 열특성에 주안을 두었기 때문에, 포장체 단면구성에 대한 검토가 누락되어 있다. 따라서 포장체 단면구성 등의 포장공법에 중점을 둔 후속 연구가 추후 이루어져야 할 것이다.

인용문헌

1. 木内 豪, 小林裕明(1999) 快適な都市環境創造のための舗装の高温化抑制策に関する検討. 土木學會論文集 622(VII-11): 23-33.
2. 福田萬代, 深澤邦彦, 荒木美民, 藤野毅, 淺枝隆(1997) 夏季自然狀態での各種舗装の熱環境緩和特性に関する實驗的研究. 土木學會論文集 571(V-36): 149-158.
3. 福田萬代, 越川喜孝, 辻井 豪, 淺枝隆, 藤野毅(1999a) 夏季に給・散水した保水性舗装の熱環境緩和特性に関する實驗的研究. 土木學會論文集 613(V-42): 225-236.
4. 福田萬代, 淺枝隆, 藤野毅(1999b) 冬季自然狀態における保水性舗装の熱環境緩和特性に関する實驗的研究. 土木學會論文集 634(V-45): 243-254.
5. 西岡 眞捨, 鍋島美奈子, 三木信博, 津郷俊二(2002) 保水性舗装材料の熱的性能に関する實驗(その2). 日本建築學會大會學術講演梗概集(北陸), 565-566.
6. 成田健一, 關根 毅(1991) アスファルト舗装面の表面溫度と熱收支の解析. 地理學評論 64(A-2): 125-137.

7. 神田 學, 土屋信夫(1995) 微氣象に基づいた屋外における人體の熱環境解釋. 土木學會論文集 509(II-30): 53-44.
8. 越川喜孝, 辻井 豪, 吉田健二(2001) 透水性を有する保水性舗裝に關する檢討. 土木學會第56回年次學術講演會 V-088: 176-177.
9. 伊藤幸廣, 松浦誠司, 辻 正哲(1996) 地表面溫度低減機能を有するインターロッキングブロック舗裝に關する研究. 土木學會論文集 544(V-32): 11-20.
10. 赤川宏幸, 小宮英孝(2000) 表面を連続的に濕潤できる舗裝體に關する實驗的研究. 日本建築學會計劃系論文集 530: 79-85
11. 淺枝 隆, ヴタンカ, 北原正代(1991) 道路舗裝の熱環境に及ぼす影響. 環境システム研究 19: 89-93 4).
12. Asaeda, T., V. T. Ca, and A. Wakio.(1996) Heat Storage of Pavement and Its Effect on the Lower Atmosphere. Atmospheric Environment 30(3): 413-427.
13. Asaeda, T., and V. T. Ca(2000) Characteristics of permeable pavement during hot summer weather and Impact on the thermal environment. Building and Environment 35: 363-375.
14. Alvenäs, G., and P-E. Jansson(1997) Model for evaporation, moisture and temperature of bare soil: calibration and sensitivity analysis. Agricultural and Forest Meteorology 88: 47-56.
15. Ghafoori, N., and S. Dutta(1995) Laboratory Investigation of Compacted No-Fines Concrete Pavement for Paving Materials. Journal of Materials in Civil Engineering, 7(3): 183-191.
16. Hagishima, A., and J. Tanimoto(2003) Field measurements for estimating the convective heat transfer coefficient at building surfaces. Building and Environment 38: 873-881.
17. Mayocchi, C. L., and K. L. Bristow(1995) Soil surface heat flux: some general questions and comments on measurements. Agricultural and Forest Meteorology 75:43-50.
18. Myers, G. E.(1971) Analytical Methods in conduction heat transfer. McGraw-Hill: 263-293.
19. Oliveti, G., N. Arcuri, and S. Ruffolo(2003) Experimental investigation on thermal radiation exchange of horizontal outdoor surfaces. Building and Environment, 38: 83-89.
20. Pomerantz, M., B. Pon, H. Akbari and S. C. Chang (2000) The Effect of Pavement's Temperatures on Air Temperature in Large Cities, Berkley CA:Lawrence Berkley National Laboratory, LBNL-434.
21. Porte-Agel, F., M. B. Parlange, A. T. Cahill and A. Gruber (2000) Mixture of time scales in evaporation : Desorption and self-similarity of energy fluxes. Agronomy Journal 92: 832-836.
22. Qin, Z., P. Berliner, and A. Karnieli(2002) Numerical solutions of a complete surface energy balance model for simulation of heat fluxes and surface temperature under bare soil environment. Applied Mathematics and Computation 130: 171-200.
23. Warrick, A. W.(2002) Soil Physics Companion. CRC Press
24. Yamanaka, T., and T. Yonetani(1999), Dynamics of the evaporation zone in dry sandy soils. Journal of Hydrology 217: 135-148.

원 고 접 수 : 2004년 12월 16일

최종수정본 접수 : 2005년 1월 25일

3인의명 심사필