

태양열 에너지에 의한 아스팔트 포장의 열전달 특성

이관호, 김성겸*
공주대학교 건설환경학부

Thermo-physical Properties of the Asphalt Pavement by Solar Energy

Kwan-Ho Lee, Seong-Kyum Kim*
Dept. of Civil Engineering, Kongju National University

요약 일반적으로 아스팔트 포장체의 열전달에 영향을 미치는 인자는 크게 날씨와 포장체의 재료로 나뉘며, 그 중 포장체의 재료 요인으로는 열-물리적 인자(Thermophysical properties)과 포장체 표면의 인자(Surface property)으로 나뉜다. 본 연구에서는 포장체 전반적인 파손 모형에 기본이 되는 아스팔트의 열-물리적 인자에 대한 실험을 진행하였으며, 평가한 아스팔트의 열전달 특성 인자로는 열전도도(Thermal Conductivity), 비열용량(Specific Heat Capacity), 열확산특성(Thermal Diffusivity), 열방사률(Thermal Emissivity)을 평가하였다. 샘플로 사용한 표층용 혼합물 입도는 밀입도 포장 WC-2와 배수성 포장 PA-13으로 선회다짐기를 이용하여 제작하였다. WC-2와 PA-13의 실험 결과로 열전도도는 $1.18\text{W/m}\cdot\text{K}$ 과 $0.9\text{W/m}\cdot\text{K}$ 로 나타났고, 비열용량은 $970.8\text{J/kg}\cdot\text{K}$ 과 $960.1\text{J/kg}\cdot\text{K}$ 으로 공극률이 더 낮은 혼합물인 WC-2가 혼합된 재료의 양이 많아 비열용량이 더 높은 나타나는 것을 알 수 있었다. 또한 열방사률은 0.9와 0.91, 열확산률은 $5.15\text{m}^2/\text{s}$ 와 $4.66\text{m}^2/\text{s}$ 으로 WC-2가 PA-13 대비 약 10% 더 빠른 열 확산을 보이는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 향후 아스팔트 포장의 열에너지 활용 및 열에너지에 의한 아스팔트 포장의 파손평가 및 모형개발 등에 연구 및 활용에 가장 근간이 되는 자료가 될 것이라 판단되다.

Abstract In general, the factors affecting the heat transfer of asphalt pavement are divided into weather factors and pavement materials. Among them, material factors include the thermophysical and surface properties. An experiment was conducted on the thermo-physical factors of asphalt, which are the basis for the pavement failure model. The thermal conductivity, specific heat capacity, thermal diffusivity, and thermal emissivity were evaluated as the thermo-physical properties of asphalt. The specimens (WC-2 & PA-13) used in the experiment were compacted with a Gyratory Compactor. The experimental results of WC-2 and PA-13 showed a thermal conductivity of $1.18\text{W/m}\cdot\text{K}$ and $0.9\text{W/m}\cdot\text{K}$, specific heat capacity of $970.8\text{J/kg}\cdot\text{K}$ and $960.1\text{J/kg}\cdot\text{K}$, thermal emissivity of 0.9 and 0.91, and thermal diffusivity of $5.15\text{m}^2/\text{s}$ and $4.66\text{m}^2/\text{s}$, respectively. Experiments on the heat transfer characteristics (thermo-physical properties) of asphalt pavement that can be used for thermal failure modeling of asphalt were conducted.

Keywords : Asphalt Mixture, Thermal Conductivity, Specific Heat Capacity, Thermal Diffusivity, Thermal Emissivity

본 논문은 한국연구재단 2019년 태양열 에너지 활용을 위한 아스팔트 포장의 열전달 특성(2018R1D1A3B07045147)에 의해 수행되었음.

*Corresponding Author : Seong-Kyum Kim(Kongju Univ.)

email: tjdrua0614@kongju.ac.kr

Received October 1, 2019

Revised November 15, 2019

Accepted January 3, 2020

Published January 31, 2020

1. 서론(연구배경 및 목적)

태양으로부터 지구에 유입되는 태양 에너지의 약 50%가 지구표면에 흡수된다. 국가의 중요 인프라시설 중 하나인 도로, 특히 아스팔트 포장층은 매우 높은 열에너지 흡수 특성을 가지고 있어, 여름철 일사량으로 인해 아스팔트 포장 표면의 온도는 약 60도에서 70도까지 상승한다. 아스팔트 포장 도로는 전체 포장의 약 90%이상을 차지하고 있고, 건설구조물 중에서는 가장 광범위하게 시공되고 있다. 특히, 도심지의 경우 아스팔트 포장의 열전달 특성으로 인해 도시의 열섬효과(Heat island effect)와 표면의 높은 온도로 인한 아스팔트 포장의 파손의 주요 원인이 되고 있다. 이러한 도시 열섬효과는 도로에 인접한 건물 냉각효율 및 도시전체의 대기 질에 나쁜 영향을 주고, 이를 개선하기 위해 많은 전력(에너지)을 소모하게 한다. 이러한 아스팔트 포장의 열에너지를 자원화하기 위한 연구가 국외에서 활발하게 진행되고 있으나, 국내의 경우는 주로 도심지 열섬효과 저감을 위한 공법분야에 많은 관심과 연구가 진행되고 있다[1-2].

아스팔트 포장체의 온도는 태양에너지의 흡수 및 반사 등에 영향을 주는 아스팔트 혼합물의 재료특성에 영향을 받고, 에너지 균형을 맞추게 된다. 이러한 아스팔트 포장체의 열전달 특성은 아스팔트 포장시공을 위한 아스팔트 혼합물의 생산, 운반 및 시공 및 공용성능에 큰 영향을 준다. 아스팔트 포장체의 열적 거동을 평가하기 위해서 아스팔트 포장 표면에 발생하는 열전달 특성과 열역학적 특성에 대한 이해 및 이를 기반으로 한 열전달 특성치 평가가 매우 중요하다. 특히, 열역학적 관점과 열에너지 순환시스템관점에서 아스팔트 포장체의 열전달 특성은 흡수율(absorptivity), 반사(reflective radiation), 방사율(emissivity), 및 열전도도(thermal conductivity) 등이 주요 변수가 된다[3-5].

국내에서 아스팔트 포장에 주로 이용되는 아스팔트 혼합물은 밀입도 가열아스팔트혼합물, 개질아스팔트 혼합물, 배수성(저소음) 아스팔트 혼합물 등이 있다. 최근에는 생산 및 시공온도를 낮춘 중온아스팔트 혼합물이 개발되어 국내외에 시공되고 있다. 또한, 재활용 증진을 위한 순환 가열 및 상온 아스팔트 혼합물 등이 현장에 적용되고 있는 초기단계이다. 이러한 다양한 아스팔트 혼합물은 생산, 시공 및 공용기간 중 각각의 온도범위가 다르고, 저온 및 고온 등 온도변화에 따른 아스팔트 포장의 파손특성이 달라지게 된다. 따라서, 아스팔트 포장의 적절한 공용성능을 위해서 아스팔트 혼합물의 열역학적 특성이 생산,

시공 및 공용에 관련된 각종 규정에 반드시 고려되어야 한다.

현재 아스팔트 바인더 및 혼합물의 온도변화에 의한 열역학적 특성 평가는 주로 점도시험, 동전단레오미터 및 동탄성계수 시험, 피로시험 및 소성변형시험 등을 이용하고 있다. 그러나, 이러한 시험은 아스팔트 혼합물의 종류별로 가지는 열역학적 특성이라기보다는 온도효과에 의한 공용성능 평가분야에 치우치고 있다.

본 연구에서는 아스팔트 포장의 열에너지 활용 및 열에너지에 의한 아스팔트 포장의 파손평가 및 모형개발 등에 연구 및 활용에 가장 근간이 되는 열전달 특성에 대한 연구를 진행하였다. 평가한 아스팔트의 열전달 특성 인자로는 열전도도(Thermal Conductivity), 비열용량(Specific Heat Capacity), 열확산특성(Thermal Diffusivity), 열방사률(Thermal Emissivity)를 평가하였다.

2. 아스팔트 포장체의 열전달 특성

2.1 열전달의 기본개념(열 전달 메커니즘)

태양열에너지의 전달은 Fig. 1과 같이 매개체가 없는 경우 더 효율적으로 전달되는 복사(Radiation), 물리적인 순환 또는 이동이 없는 경우 발생하는 전도(Conduction), 기체 또는 액체를 매개로 전달되는 대류(Convection)로 구분된다.

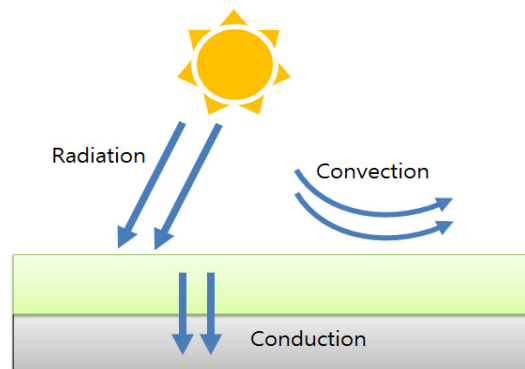


Fig. 1. Radiation, Conduction and Convection

전도는 입자들 상호작용에 의해 발생하는 현상으로 높은 열에너지를 가진 입자에서 낮은 열에너지를 가지는 입자로의 열에너지 이동 현상으로 주로 기체, 액체 및 고

체 등으로 나타난다. 아스팔트 포장체에서 열전도는 주로 포장체의 형상, 두께, 재료종류, 온도차이 등에 의해 영향을 받는다.



Fig. 2. Heat conduction through a section of asphalt pavement

Fig. 2은 Fourier's theory를 적용한 아스팔 혼합물의 열전달이며, 아스팔트 포장체의 열유속(Heat flux)는 Eq. (1)과 같이 표현된다.

$$Q_x = -kA \frac{\Delta T}{\Delta X} = -kA \frac{(T_2 - T_1)}{\Delta X} \quad (1)$$

Where, Q_x rate of conductive heat transfer in the x direction (W), k transport property known as thermal conductivity of the medium (W/mK), A surface area (m^2), $\Delta T/\Delta X$ temperature gradient in the direction of heat flow for one-dimension (K/m), T_2 temperature at depth (K), T_1 surface temperature (K).

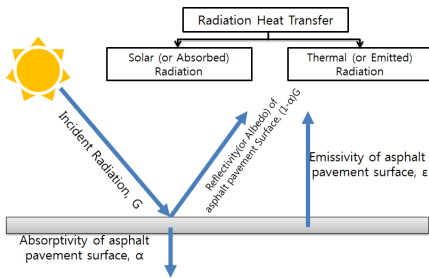


Fig. 3. Heat transfer by radiation of asphalt pavement

원자 또는 분자의 전자구성 변화로 인해 전자기파 또는 광자의 형태로 물질이 방출되는 에너지를 복사에너지라 한다. 이와 관련된 주요 요소로는 흡수, 반사, 방출 등이 있다. Fig 3은 아스팔트 포장체의 복사열의 이동을 나타낸 그림이며, 그림과 같이 아스팔트 포장체의 복사열은 열복사(thermal or emitted radiation)와 흡수된 에너지의 복사(absorbed radiation)로 구성된다. 열방사는 가열된 물체의 온도가 낮아지면서 방사되는 것으로 0.1 ~ 100 μm 범위의 파장을 가지는 전자기 스펙트럼을

의미한다. 물체로부터 방사되는 열량($Q_{emitted}$)은 Stefan-Boltzman Law를 이용하여 Eq. (2)와 같이 결정된다.

$$Q_{emitted} = \epsilon \sigma A T_s^4 \quad (2)$$

Where, ϵ emissivity property (range 0 ~ 1), σ Stefan-Boltzman constant $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$, T_s surface temperature (K)

흡수된 에너지의 방사는 전자기 스펙트럼에서 약 0.3~3 μm 파장 대역에서 방출되는 전자기 복사이다. 파장의 절반은 눈에 보이는 단파형태이고, 나머지 절반은 적외선 및 자외선 영역에 포함된다. 흡수된 에너지의 방사량 $Q_{absorbed} = \alpha A Q_{incident}$ 으로 나타낸다.

대류는 고체표면과 인접한 액체 또는 움직이는 기체 사이의 열전달 현상을 의미한다. 대류는 자연대류 및 인공대류로 구성된다. 대류에 의한 열전달 특성은 뉴턴의 법칙(Newton's Law)을 바탕으로 Eq. (3)과 같이 대류에 의한 열전도율로 표현 할 수 있다[5-6].

$$Q_{con} = h_c A \Delta T = h_c A (T_s - T_f) \quad (3)$$

Where, Q_{con} rate of convection heat transfer(W), h_c heat transfer coefficient (W/m² K), A surface area (m^2), T_s surface temperature (K), T_f fluid temperature (K).

2.2 아스팔트 포장 열전달 특성에 영향을 미치는 인자

아스팔트 포장체의 열전달에 영향을 미치는 인자는 크게 날씨요인과 포장체의 재료로 나눌 수 있다. 그 중 포장체의 재료 요인으로는 열-물리적 인자(Thermophysical properties)과 포장체 표면의 인자(Surface property)으로 나뉜다.

아스팔트 포장체 열전달에 영향을 미치는 표면 인자는 흡수율(Absorptivity) 방사율(Emissivity), 반사율(Reflectivity or Albedo)로 구성된다. 흡수율은 표면에 방사된 에너지의 입사량을 나타내는 비율로 일반적으로 0~1의 범위로 한다. 이러한 수치는 완벽한 반사일 때 0, 완벽한 흡수인 1을 의미한다. 이는 유입되는 방사량, 표면 색상, 습윤 상태, 포장의 평균 온도 및 포장 표면의 노후 정도 등에 따라 달라지며, 일반적으로 아스팔트 포장체의 흡수율은 0.82~0.93을 나타낸다. 이러한 수치는 아스팔트 표면의 노후화로 인해 밝아지는 색상 정도에 따라 현저히 감소하는 경향을 보인다.

열역학 평형 상태의 물질에 파장, 방향, 온도의 방사율

는 그 물질의 흡수율과 동일하다. 방사율은 외부의 광에너지를 흡수 후 일부는 재방사하거나 표면 반사 시 재복사하는 에너지 비율을 말한다. 이론적으로 외부 에너지를 100% 복사하고 표면 반사하지 않는 물질은 흑체(Blackbody)라하며, 이때의 방사율은 1로 규정된다. 일반적인 물체는 표면의 상태에 따라 다르나 대부분 1보다 작은 값을 갖게 된다. 방사율 또는 알베도는 표면으로 입사되는 에너지의 반사되는 양의 비율로 완벽한 흡수일 경우 1(흑체일 경우)로 나타낸다. 일반적으로 어두운 표면일 때 낮고 밝은 표면일 때 높으며, 아스팔트 혼합물의 경우 0.05~0.1, 노후화 된 경우 0.1~0.15의 방사율을 나타낸다.

열전달 및 저장에 영향을 미치는 열-물리적 인자로는 열전도에 의해 단위 길이당, 시간당 1도를 전도 하는데 필요한 열량을 나타내는 열전도도(thermal conductivity), 단위 질량당 단위 온도만큼 상승 시키는데 필요한 열량인 비열용량(specific heat capacity), 열이 재질로 확산되는 속도를 나타낸 열확산율(thermal diffusivity), 같은 온도에서 실제 표면에서 방사된 복사와 흑체에 방사된 복사의 비율(Thermal Emissivity), 밀도(Density) 이 있다.

본 연구에서 일반적으로 사용되어지는 밀입도 아스팔트 혼합물과 배수성 혼합물을 이용하여 아스팔트 포장체의 열에너지 전달 특성 인자를 산출하였고 열에너지 누적에 따른 열특성인자 값의 변화를 실험을 통하여 평가하였다.

3. 실험재료 기본물성

실험에 사용되어진 아스팔트 혼합물의 기본 물성은 Table 1과 같다. 골재 입도는 일반적으로 사용되어지는 미립도 아스팔트 표층인 WC-2(KS F 2349)와 공극률이 높은 배수성 아스팔트 표층인 PA-13를 이용하였다. 결정된 샘플은 실제 사용되어지는 두 아스팔트 혼합물 입도로서 공극률 차이에 의한 열전달 차이를 알아보기 위함이다. 사용되어진 바인더는 WC-2의 경우 AP-3, PA-13의 경우 고분자 개질 아스팔트 (SBS PMA)를 사용하였다. 시편제작은 현장 다짐과 유사한 선회 다짐기를 이용하여 다짐각 1.25°, 다짐 압력 600kPa, 다짐속도 30회/mim로 지름 150mm에 높이 50mm의 시편을 제작하였다.

Table 1. Property of hot mix asphalts

Type of HMA		WC-2	PA-13
Sieve size(mm)			
passing (%)	20	100	100
	13	99.4	99.1
	5.0	63.2	26.1
	2.5	44.8	17.6
	0.6	22.2	8.2
	0.3	13.7	6.3
	0.15	9.9	5.1
	0.08	5.1	3.5
Optimum Asphalt Content(%)		5.6	4.6
Density (g/m ³)		2.450	2.468
Air void (%)		4.8	20

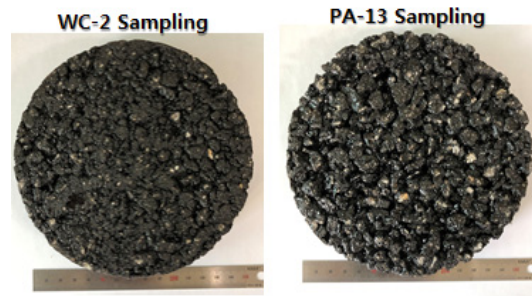


Fig. 4. Asphalt specimens

4. 실험 방법 및 결과분석

4.1 열전도도

열전도도는 열평형 상태(steady state)의 면적 1m² 재료를 양 단면의 온도차를 1°K로 하고 단위 두께(m)당 이동하는 에너지(W)를 나타낸 값이다. 따라서 단위는 W/mK이다. 열전도도가 높은 재료는 열전달이 빠른 반면 낮은 재료는 단열재 역할을 한다. Table 2는 포장 재료의 열전도도를 나타낸 표이다.

Table 2. Thermal conductivity of pavement constituents[7-9]

Aggregates/Pavement Constituents	Range of Thermal Conductivity (W/m K)
Quartzite	5.5-7.5
Granite	3.0~4.0
Limestone	1.5~3.0
Basalt	1.3~2.3
Bitumen	0.15~0.17
Air	0.024
Water	0.6

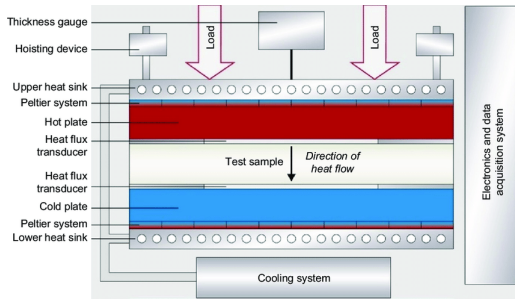


Fig. 5. Heat Flow Meter[10]

기존 열평형상태 방법(Steady State Method)은 열평형 상태에 도달하는 시간이 오래 소요되고 열 유속을 정확히 측정하기 어려운 단점을 가지고 있다. 이를 보완한 HFM 방법은 ASTM C518, ISO 8301에 따라 열평형 상태일 때의 열전도도를 측정하였다. 실험은 Fig. 4와 같이 측정 시료를 두 개의 판 사이에 넣어 측정을 한다. 측정이 시작되면 열판(Hot plate)과 냉판(Cold plate)로 열이 흐르게 되고 열은 시료를 통해 열유속계(Heat flux transducer)에 전달되고 그 열을 전압 값(voltage)으로 변환하게 된다. 열전도가 끝나고 열평형 상태가 되면 열전도도로 변환된 값을 읽어 데이터화 한다. 이런 과정을 온도를 변화 하며 반복적으로 측정하는 방식이며, 산출 근거 식은 Eq. (4)와 같다.

$$k = \frac{l_s [(k_1 + (k_2 \bar{T})) + (k_3 + (k_4 \bar{T})HFM) + (k_5 + (k_6 \bar{T})HFM^2)]}{dT} \quad (4)$$

Where, $k_1 \sim k_6$ calibration constants of the apparatus determined, separately (from testing a sample of known thermal conductivity), \bar{T} average temperature of the hot and cold plates (K), dT Hot plates temperature - cold plates temperature (K), HFM heat flow meter output, l_s thickness of the slab.

해당 시편의 열전도도는 WC-2 경우 1.18W/m·K로 나타났고 PA-13의 경우 0.90W/m·K로 나타났다.

4.2 비열용량 (Specific heat capacity)

비열용량은 단위 질량당 단위 온도만큼 상승 시키는데 필요한 열량을 의미한다. 열량변화와 물체의 온도 변화관계는 다음 Eq. (5)과 같다.

$$\Delta Q = m c_p \Delta T \quad (5)$$

Where, ΔQ heat gain or loss(J), m mass (kg), c_p specific heat capacity (J/kg K), ΔT temperature change (K).

아스팔트 혼합물의 비열용량은 아스팔트 구성 재료의 각각의 열용량과 구성 혼합비율을 이용하여 Eq. (6)과 같이 산정되었다. 아스팔트 혼합물의 비열 용량은 다음 식과 같이 산정 된다. 또한, Table 3는 포장 재료의 비열용량이며, Table 4는 각 온도에 따른 포장재료의 비열 용량을 나타낸 표이다.

$$c_p = \frac{1}{m_T} [m_A * c_A + m_B * c_B] \quad (6)$$

Where, c_p total specific heat capacity (J/kg·K.), m_T Total mass (kg), m_A aggregate mass (kg), c_A aggregate specific heat capacity (J/kg·K.), m_B Binder mass (kg), c_B Binder specific heat capacity (J/kg·K.).

Table 3. Specific Heat Capacity of Pavement Constituents [7-9,11]

Aggregates/Pavement Constituents	Specific Heat Capacity (J/kg K)
Quartzite	701~800
Granite	790
Limestone	908
Basalt	804
Bitumen	2093

Table 4. Mean values of dry-state specific heat capacity of pavement components (Max variation of $\pm 7\%$) (Dehdezi, 2012)

Components	c_p (J/kg K)							
	-10℃	0℃	7℃	17℃	27℃	37℃	47℃	57℃
Limestone	793	838	859	878	892	904	917	931
Quartzite	609	629	642	659	675	693	709	724
Copper slag	628	670	679	691	701	712	723	734
natural sand	610	637	655	679	698	711	721	734
Lytag	620	712	741	767	778	787	799	812
Rubber	1194	1292	1326	1369	1406	1444	1485	1523
Handened Cement Paste	877	1021	1094	1241	1458	1714	1978	2300
Ferag	521	552	562	575	586	589	609	618

산정결과 WC-2 경우 970.8J/kg·K로 나타났고 PA-13의 경우 960.1J/kg·K로 나타났다. 기본적으로 공극률이 더 낮은 혼합물인 WC-2가 혼합된 재료의 양이 많아 비열용량이 더 높은 것을 알 수 있다.

4.3 열방사율

열방사율은 아스팔트 혼합물의 표면이 흑체에 비하여 얼마나 효과적으로 방사하는가를 나타내는 척도이다. 물체의 표면의 상태에 크게 의존되며, 방사율은 0~1 범위에 있으며 흑체의 방사율은 통상 1이라 한다.

Fig. 6과 같이 사용되는 시편의 상부와 하부의 온도센서 깊이 열평형을 이룰 때까지 적외선 램프를 이용하여 가열한다. 본 연구의 아스팔트 샘플의 열평형 온도는 85℃를 나타냈다. Fig. 7과 같이 아스팔트 샘플이 열평형 상태에 도달하게 되면 태양열에너지를 모사한 적외선 램프를 끄고 적외선 카메라를 이용하여 시편의 표면 온도를 수시로 촬영하고 접촉식 온도 센서를 데이터 로거에 연결하여 계측을 시작한다. 적외선 카메라로 촬영한 영상의 온도와 아스팔트에 직접 접촉된 온도 센서를 이용하여 Eq. (7)으로 열방사율을 결정하였다.

$$\text{방사율} = \frac{\text{적외선 열화상카메라 온도}(^{\circ}\text{C})}{\text{접촉식 온도}(^{\circ}\text{C})} \quad (7)$$

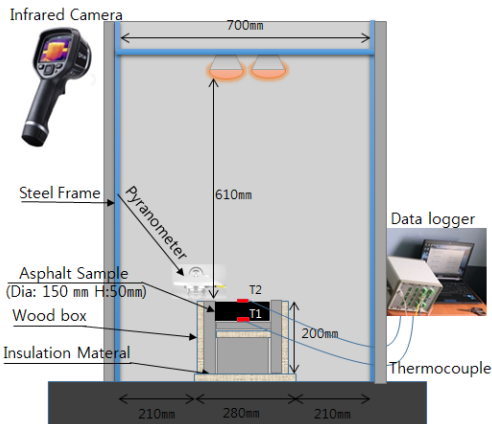


Fig. 6. Experimental setup schematic diagram

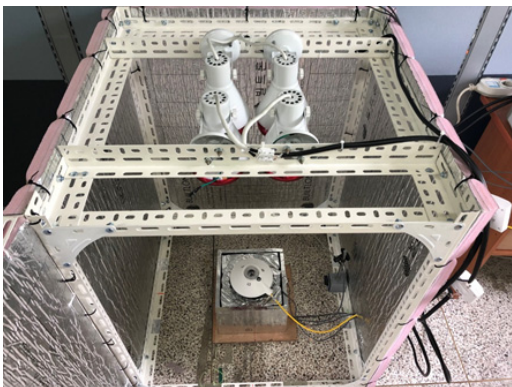


Fig. 7. Emissivity Experimental setup

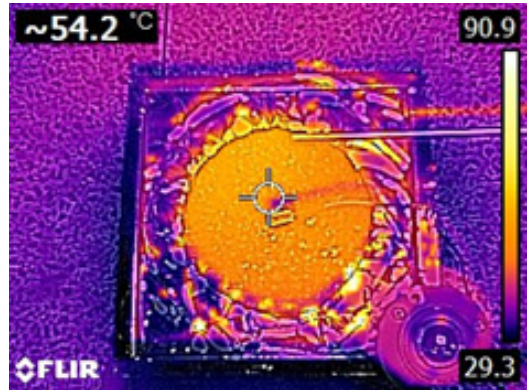


Fig. 8. Infrared camera photo

Fig. 9은 각 시편의 45 ~ 85℃온도에 따른 열방사율을 타나낸 그래프이다. 이러한 데이터의 평균을 열방사율로 이용하였고, 결과적으로 WC-2 경우 0.9 PA-13는 0.91로 유사한 값을 나타냈다.

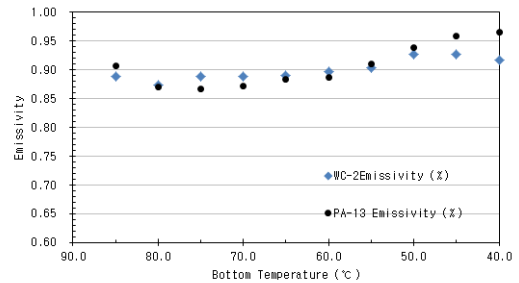


Fig. 9. Emissivity results of the test samples

4.4 열확산율

열확산율은 열이 아스팔트 혼합물로 얼마나 빨리 확산되는 척도이다. 즉, 열확산율이 높으면 열의 전도가 빠르고 낮을 경우 재료에 많은 량의 열을 축적되고 소량의 열 에너지만 방출하게 된다. 산정 식은 Eq. (8)과 같다.

$$\alpha = k / (c_p * \rho) \quad (8)$$

Where, α Thermal diffusivity (m^2/s), ρ Density (kg/m^3)

Table 6과 같이 해당 시편들의 열확산율은 WC-2 경우 5.25 m^2/s , PA-13의 경우 4.66 m^2/s 로 나타났다. 제한된 시험결과이나 WC-2가 PA-13 대비 약 10% 더 빠른 열 확산을 보이는 것을 알 수 있다.

Table 6. Thermal Diffusivity results

	Thermal conductivity (W/m·K)	Specific Heat capacity (J/kg·K)	Density (kg/m ³)	Thermal Diffusivity (x10 ⁻⁷) (m ² /s)
WC-2	1.18	970.8	2361	5.25
PA-13	0.9	960.1	2013	4.66

Table 7. Thermo-physical Properties of the asphalt mixtures results

Type of HMA	WC-2	PA-13
Total weight (kg)	1.968	1.745
Percentage of bitumen by mass (kg)	0.104	0.077
Percentage of limestone by mass (kg)	1.867	1.668
Density (kg/m ³)	2361	2013
Thermal conductivity (W/m·K)	1.18	0.9
Specific Heat capacity (J/kg·K)	970.8	960.1
Thermal Diffusivity (x10 ⁻⁷) (m ² /s)	5.25	4.66
Average thermal Emissivity	0.90	0.91

5. 결론

도로에 적용되어지는 두 가지 입도인 WC-2 밀입도와 PA-13 배수성 포장의 열전달 인자 도출 실험을 진행하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- (1) 시편으로 사용된 혼합물에 대한 열전도도 실험 결과 WC-2는 1.18W/m·K, PA-13는 0.90W/m·K로 결과적으로 밀입도 혼합물이 배수성 포장 혼합물 보다 약 31% 큰 값을 나타냈으며, 이는 혼합물의 공극률 차이로 인해 샘플 부피 내에 혼합물과 공기의 열전도도가 달라 생기는 차이로 판단된다.
- (2) 비열용량은 WC-2 경우 970.8J/kg·K로 나타났고 PA-13의 경우 960.1J/kg·K로 나타났다. 이 또한 공극률이 더 낮은 혼합물인 WC-2가 혼합된 재료의 양이 높아 비열용량이 더 높은 것으로 판단된다.
- (3) 열방사율 시험을 통해 45 ~ 85°C온도에 평균을 열방사율은 WC-2는 0.90, PA-13는 0.91을 나타냈다. 열확산률은 WC-2 경우 5.15m²/s, PA-13

의 경우 4.66m²/s로 나타났다.

- (4) 본 연구의 결과와 같이 아스팔트 포장 표면에 발생하는 열전달 특성에 대한 실험을 진행하므로써 아스팔트의 열적 거동 및 파손 모형을 평가하는 기초 자료로 활용 될 것이 판단된다.

References

- [1] SHAOPENG, W., MINGYU, C. & JIZHE, Z. "Laboratory investigation into thermal response of asphalt pavements as solar collector by application of small-scale slabs", Applied Thermal Engineering, Vol31, No.10, pp1582-1587, Jul. 2011
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.01.028>
- [2] Wong, N. H., Y. Chen, "Tropical urban heat islands", p.272, Taylor & Francis, Abingdon, UK, 2008, pp272
DOI: <http://dx.doi.org/10.4324/9780203931295>
- [3] Stempihar, J. J., Pourshams-Manzouri, T., Kaloush, K. E. & Rodezno, M. C., "Porous Asphalt Pavement Temperature Effects for Urban Heat Island Analysis", Transportation Research Record, Vol2293, No1, pp123-130, Jan. 2012
DOI: <http://dx.doi.org/10.3141/2293-15>
- [4] Bergman, T. L., Incropera, F. P., DeWitt, D. P. & Lavine, A. S. "Fundamentals of heat and mass transfer" p.1072, John Wiley & Sons, 2011, pp1072
- [5] Incropera, F. P., Lavine, A. S., Bergman, T. L. & DeWitt, D. P. "Principles of heat and mass transfer", p.1000, John Wiley & Sons, 2017, pp1000
- [6] Cengel, Y. A., "Heat Transfer: A practical Approach", p.896, WBC McGraw Hill, 2002 pp896
- [7] Sundberg, J., "Thermal properties of soils and rocks", p327, GEOLOGISKA INSTITUTIONEN Publ. A57, 1988, pp38-39
- [8] Somerton, W. H., "Thermal properties and temperature-related behavior of rock/fluid systems" p.256, Elsevier, March 1992. pp.256
- [9] Banks, D., "An introduction to thermogeology: ground source heating and cooling", p.339 John Wiley & Sons. 2008, pp.339
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/9781444302677>
- [10] Hilton LTD, P. A. 1994. "Experimental operating and maintenance manual:Netzsch HFM363/3/1" p.16, Netzsch. pp.7
- [11] Busby, J., Lewis, M., Reeves, H. & Lawley, R., "Initial geological considerations before installing ground source heat pump systems", Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, Vol42, No.3, pp.295-306, Aug. 2019
DOI: <http://dx.doi.org/10.1144/1470-9236/08-092>

이 관 호(Kwan-Ho Lee)

[종신회원]



- 1991년 2월 : 고려대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1996년 12월 : 미국 Purdue Univ. Civil Eng.,(공학박사)
- 2006년 9월 ~ 현재 : 국립공주대학교 건설환경학부 교수

<관심분야>

도로공학 및 지반공학

김 성 검(Seong-Kyum Kim)

[정회원]



- 2010년 2월 : 국립공주대학교 건설환경공학과 (공학사)
- 2012년 2월 : 국립공주대학교 방재공학과 (공학석사)
- 2017년 2월 : 국립공주대학교 건설환경공학과 (공학박사)
- 2017년 2월 ~ 현재 : 국립공주대학교 건설환경공학과 (Post. Doc.)

<관심분야>

도로공학 및 지반공학