표층용 아스팔트 혼합물 두께에 따른 열전달 특성

Heat Transfer Characteristics of Asphalt Mixtures with Different Thicknesses

이관호* · 김성겸**

Lee, Kwanho*, and Kim, Seongkyum**

Abstract

Generally, the main causes of asphalt pavement damage are repeated loads and increased temperatures. The surrounding environment and material factors influence the degree of damage. In this study, the heat transfer characteristics with a change in the asphalt pavement thickness were analyzed. The sample types were the conventional dense asphalt mixture (WC-2), dense asphalt mixture containing 30% recycled aggregate (ReWC-2), and drainage asphalt mixture (PA-13). The mixtures were compacted using a rotary compactor. Thermal accumulation tests on samples with thicknesses of 3, 5, and 10 cm were performed. The values for the 10-cm-thick samples were 1.27 for WC-2, 1.28 for ReWC-2, and 0.91 for PA-13. The thermal conductivity tended to decrease as the pavement thickness increased. An experimental study on the heat transfer characteristics with varying thicknesses of asphalt pavement suitable for energy harvesting was conducted.

Key words : Thermal Conductivity, Asphalt Mixture, Solar Energy, Pavement Thickness, Heat Flux

요 지

일반적으로 아스팔트포장의 반복적인 하중과 열에 의한 파손이 주원인이며, 열에 의한 파손은 주변 환경과 재료적인 요인에 의해 결정되어진다. 이 중 재료적인 요인으로는 해당 혼합물의 공극률(Air Void), 밀도(Density), 열전도도(Thermal Conductivity) 등이 원인이다. 이에 본 연구는 아스팔트 혼합물의 열전달에 대한 연구를 진행하였으며, 이 중 아스팔트 포장 두께 변화에 따른 열전달 특성을 연구하였다. 연구에 사용된 샘플의 종류로는 일반적으로 사용되어지는 밀입도 아스팔트 혼합물 WC-2와 순환골재를 30% 치환 사용한 ReWC-2, 배수성 아스팔트 혼합물인 PA-13을 선회다짐기로 다짐 제작하였다. 샘플의 두께는 3, 5, 10 cm에 대하여 열누적 실험을 진행하였다. 10 cm 기준 열전도도는 WC-2는 1.27, PA-13는 0.91을 보였으며, 포장두께가 증가함에 따라 열전도도는 감소하는 경향을 나타냈다. 이러한 연구결과는 향후 아스팔트 포장의 열에너지 하베스팅에 유용한 기본 자료로 사용될 것이라 판단된다.

핵심용어 : 열전도도, 아스팔트 혼합물, 태양열에너지, 포장두께, 열유속

1. 서 론

우리나라는 1970년 경부고속도로 건설을 시작으로 본격적으로 도로포장 인프라를 구축하기 시작하였다. 경부고속도로 개통 후 국가 경제력의 상승에 따라 도로의 신설 및 확장 건설이 지속적으로 이루어지며 발전해왔다. 통계 자료

에 따르면 2019년 말 기준으로 국내 도로 총연장은 111,314 km이며, 이 중 고속국도 연장은 4,767 km, 일반국도 연장은 14,303 km로 운영·관리 되고 있다(KSIS, 2021).

이러한 국가의 중요한 인프라시설인 도로, 그 중 90% 이상을 차지하는 아스팔트 포장의 특징으로 태양열에너지를 매우 빠르게 흡수하며, 이는 여름철 높은 일사량을 흡수함

*정회원, 공주대학교 사회환경공학과 교수(E-mail: kholee@kongju.ac.kr)

Member, Professor, Department of Civil Engineering, Kongju National University

**교신저자, 정회원, 공주대학교 사회환경공학과 박사 후 연구원(Tel: +82-41-521-9412, Fax: +82-41-568-0287, E-mail: tjdrua0614@kongju.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Post. Doc, Department of Civil Engineering, Kongju National University

으로써 열에 의한 아스팔트 파손의 원인이 되고 있다. 더불어 이러한 열은 도시의 열섬효과의 원인으로 떠오르고 있다. 도시 열섬효과는 도로에 인접한 건물 냉각효율과 도시 전체의 대기 질에 문제가 되며, 이를 개선하고자 많은 전력(에너지 자원)이 요구된다(Wong and Chen, 2009; Shaopeng et al., 2011).

국외에서는 이러한 아스팔트 포장의 특성을 이용한 열에너지 자원화에 대한 연구가 진행되어지고 있으나, 국내의 경우는 도심지 열섬효과 저감을 위한 공법분야에 치우친 연구가 주를 이루어 진행되고 있을 뿐 근본적인 아스팔트 포장의 열에너지자원화에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

아스팔트 포장체의 온도는 태양에너지의 영향을 주는 흡수 및 반사등을 통해 아스팔트 혼합물의 재료특성에 영향을 받으며 이를 통하여 에너지 균형을 맞추게 된다. 이러한 아스팔트 혼합물의 열전달 특성은 생산 및 운반, 시공, 공용성능 등에 큰 영향을 미친다. 아스팔트 포장체의 열에 의한 거동을 평가하기 위해서 아스팔트 포장체 표면에 발생하는 열전달 및 열역학 특성에 대한 이해 및 이를 바탕으로 한 열전달 특성치 평가가 매우 중요하게 작용한다. 그러므로 아스팔트 포장체의 열에너지 자원화를 하기 위해 근본적으로 아스팔트 혼합물의 열전달 특성치 평가에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 아스팔트 포장의 열에 의한 파손모형개발 및 차후 열에너지 자원화에 근간이 되는 아스팔트 포장 두께 변화에 따른 열전도 특성에 대한 연구를 하였다. 평가에 사용되어진 혼합물의 입도는 일반적인 밀입도 아스팔트 혼합물 입도인 WC-2와 배수성포장 입도인 PA-13입도를 사용하였으며, 추가적으로 재활용 골재 사용 유무에 따른 변화를 평가하기 위하여 WC-2입도에 재활용골재를 30% 치환한 혼합물에 대해서도 평가를 실시하였다.

2. 아스팔트 포장체의 열전달

일반적으로 태양열에너지의 전달은 복사, 전도, 대류로 나누어 이루어진다. 복사의 경우 매개체가 없는 경우 효율적으로 이루어지고 전도의 경우 이동이 없거나 물리적 순환에서 발생된다. 마지막으로 대류의 경우 기체 또는 액체를 매개로 전달이 이루어진다. 대부분 높은 열에너지를 가진 입자에서 낮은 열에너지를 가진 입자로 열에너지가 이동한다. 이처럼 이동되는 입자들의 상호작용으로 대부분의 아스팔트 포장체의 열이동은 전도에 의해 일어나게 된다.

아스팔트 포장체의 열전달은 Fig. 1과 같으며, Fourier's

Fig. 1. Heat Conduction through Asphalt Pavement Section

Law를 적용하여 Eq. (1)과 같이 포장체의 열전달 속도(열유속)를 표현할 수 있다.

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

여기서, Q_x : x길이에 대한 열유속, k : 열전도도(W/mK), A : 포장체의 면적(m^2), $\Delta T/\Delta X$: 단면에 대한 열흐름 방향 온도 구배(K/m), T_2 : 포장체 하부온도(K), T_1 : 포장체 표면온도(K).

아스팔트 포장체의 열전달에 영향을 주는 인자로는 크게 날씨와 포장 재료로 나뉘게 된다. 포장재료는 열-물리적인자와 표면상태로 분류되고 열-물리적인자로는 열전도도, 비열용량, 밀도 등의 인자로 구성되며, 표면인자로는 열에 대한 흡수율, 방사율, 반사율로 분류된다.

열-물리적 인자 중 열전도도(thermal conductivity)는 단위 길이와 시간당 단위 온도만큼 전도 하는데 소요되는 열량을 나타내는 값이며, 비열용량(specific heat capacity)은 단위 질량당 1도를 상승시키는데 필요한 열량의 값, 열확산율(thermal diffusivity)은 열을 재질로 확산하여 확산되는 속도를 나타낸 값, 열방사율(Thermal Emissivity)은 매체의 열평형상태에서 실제 표면과 흑체의 방사된 복사의 비율을 나타낸 값이다. 그 외에 매체의 부피당 질량을 나타내는 밀도(Density)가 중요한 인자로 작용한다.

흡수율은 표면에 방사되는 에너지의 입사량을 0~1의 범위의 비율로 나타낸 값이다. 이러한 수치는 완벽한 반사일 때는 0, 완벽한 흡수일 때는 1을 나타내며, 검은색 아스팔트의 경우 0.82~0.93의 수치를 나타낸다. 이러한 수치는 유입되는 방사량 표면의 색상, 습윤상태, 포장의 평균온도 및 포장표면의 노후 정도에 따라 달라진다.

방사율은 외부의 광에너지를 흡수한 표면 반사 시 재복사하거나 재방사하는 에너지의 양을 말한다. 이론적으로 외부 에너지를 모두(100%) 복사하고 표면 반사가 없는 물질을 흑체(Blackbody)라고 하며, 이때의 방사율을 1로 규정하고 있다. 일반적인 물질은 대부분 1보다 낮은 값을 갖게 된다.

반사율은 표면에 입사되는 에너지가 반사되는 비율을 말하며 완벽히 흡수일 경우 1(Blackbody)로 나타낸다. 일반적으로 검은 표면일 때 낮고 밝은 표면의 경우 높은 값을 나타낸다. 아스팔트 포장체의 경우 0.05~0.15의 반사율을 나타낸다.

3 샘플제작 및 실험방법

3.1 시험재료 및 기본물성

해당 실험에 사용된 혼합물의 기본 물성은 Table 1과 같다. 입도는 WC-2 (밀입도 아스팔트 표층)와 PA-13 (배수성 아스팔트 표층)을 이용하였으며, 혼합한 바인더는 WC-2의 경우 일반적인 AP-3, PA-13의 경우 개질 아스팔트(SBS

PMA)를 적용하였다. re_WC-2 (순환가열 아스팔트 혼합물)의 경우 순환골재(구재 아스팔트 1.5%포함)를 30% 혼합한 후 신재 바인더를 4.2% 추가 혼합하여 제작하였다. Fig. 2는 사용된 골재의 입도이며, re_WC2의 경우 골재합성입도를 통하여 WC-2와 동일한 입도로 적용하였다.

시편제작은 현장 다짐과 유사한 선회 다짐기를 이용하여 다짐각 1.25°, 다짐 압력 600 kPa, 다짐속도 30회/mim로 Fig 3과 같이 지름 150 mm에 높이 50 mm의 시편을 제작하였다.

Table 1. Property of Hot Mix Asphalts

Sieve size (mm)		Type of HMA		
		WC-2	re_WC-2	PA-13
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	5.7	4.6
Density (g/m ³)		2.361	2.364	2.013
Air void (%)		4.4	4.4	20.2

Fig. 2. Grading Curve of Aggregate

Fig. 3. Asphalt Specimens

3.2 시험방법

3.2.1 아스팔트 혼합물의 열전달 특성인자 산출

3.2.1.1 열전도도

열평형 상태(steady state)의 단위면적(1 m²) 재료에 양 단면 1 °K의 온도 차이를 두고 단위 두께(m)당 이동되는 에너지(W) 값을 의미한다. 대표적으로 Heat Flow Meter (HFM) 방법이 있으며, HFM은 냉판(Cold plate)과 열판(Hot plate) 사이에 측정 시료를 배치하여 시료에 이동하는 열을 반복적으로 측정한 후 아래 식인 Eq. (2)를 이용하여 열전도도를 결정하게 된다(Garcia et al., 2013).

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

여기서, $k_1 \sim k_6$: 열전도 실험을 통해 결정된 교정상수, $\bar{T}$: 열판과 냉판의 평균온도(K), dT : 열판과 냉판의 온도 차(K), HFM : 열흐름 출력값, l_s : 시편의 두께.

3.2.1.2 비열용량(Specific heat capacity)

단위 질량(kg)당 단위 온도(°K)만큼 상승 시키는데 소요되는 열량을 의미한다. 각각의 포장 재료의 비열용량은 Table 2와 같으며 아스팔트 구성 재료의 혼합비율과 각각의 재료 열용량을 적용하여 Eq. (3)과 같이 결정하였다.

$$c_p = \frac{1}{m_T} [m_A * c_A + m_B * c_B] \quad (3)$$

여기서, c_p : 총 비열용량(J/kg · K), m_T : 총질량(kg), m_A : 골재 질량(kg), c_A : 골재의 비열용량(J/kg · K), m_B : 아스팔트 바인더의 질량(kg), c_B : 아스팔트 바인더의 비열용량(J/kg · K).

3.2.1.3 열방사율

해당 혼합물과 흑체표면의 열이 방사되는 비율을 의미한다. 측정 물체의 표면 상태에 따라 값의 차이가 크게 나타난다. 값의 범위는 0~1이고 흑체의 방사율은 통상 1이다.

Fig. 4와 같이 적외선램프를 이용하여 아스팔트 시편의 열평형 상태의 온도를 85 °C까지 도달시킨 후 열누적된

Table 2. Specific Heat Capacity of Pavement Constituents (Lee and Kim, 2020)

Pavement Constituents	Specific Heat Capacity (J/kg*K)
Granite	790
Quartzite	701~800
Limestone	908
Basalt	804
Bitumen	2,093

Fig. 4. Schematic Diagram of the Emissivity Experiment

시편을 냉각시키는 과정에서 5 °C 간격으로 접촉식 온도센서와 적외선카메라를 이용하여 온도 계측하였다. 출력된 온도값을 Eq. (4)를 적용하여 열방사율을 결정하였다(Incropera et al., 2013).

$$E_{thermal} = \frac{T_f(^\circ\text{C})}{T_s(^\circ\text{C})} \quad (4)$$

여기서, $E_{thermal}$: 열방사율, T_f : 적외선 카메라 온도(°C), T_s : 직접식 온도계를 통한 표면온도(°C).

Fig. 5는 실험세팅 사진이고 Fig. 6은 시편의 열화상 카메라 사진이다. Fig. 7은 실험에 적용한 시편의 온도구간에 따른 열방사율 그래프이다.

3.2.1.4 열확산율

열이 해당 물체에 확산되는 속도를 의미하며, 열확산율이 높을수록 열의 전도가 빠르고 낮을수록 재료에 높은 양의 열에너지를 축적하여 소량의 열에너지만 방출하게 된다. 해당 산정 식은 Eq. (5)와 같다(Incropera et al., 2013).

$$\alpha = k / (c_p * \rho) \quad (5)$$

여기서, α : 열확산율(m^2/s), ρ : 밀도(kg/m^3).

3.2.2 열에너지 누적 실험을 통한 열전도도 변화

열에너지 누적에 따른 아스팔트 혼합물의 열특성 인자값을 분석하고자 Figs. 8, 9와 같이 시험 준비하였다. Fig. 8은 열전달 시험의 단면과 수치를 나타낸 그림이다. 시험에

Fig. 5. Emissivity Experimental Preparation

Fig. 6. Infrared Camera Picture

Fig. 7. Emissivity Experiment Results

Fig. 8. Schematic Diagram of the Thermal Accumulation Test

Fig. 10. Asphalt Sample Preparation

Fig. 9. Laboratory Thermal Accumulation Test Preparation

Fig. 11. PA13 Sample Setup by Thickness

하여 실시간으로 아스팔트 혼합물의 열전도도를 측정할 수 있게 하였다. 열전도도 산출 식은 아래 Eq. (6)과 같다.

$$k = \frac{H_f(t) * H_s}{T_s(t) - T_b(t)} \quad (6)$$

여기서, $H_f(t)$: 열 유속값(W/m^2), H_s : 시편의 높이(cm), $T_s(t)$: 아스팔트 혼합물 상부온도($^{\circ}C$), $T_b(t)$: 아스팔트 혼합물 하부온도($^{\circ}C$).

또한, 포장두께 변화에 따라 Fig. 8을 바탕으로 적외선 램프와 실험을 진행하는 시편표면의 거리를 610 mm로 세팅하여 실험을 진행하였다. Fig. 11은 높이가 각각 다른 PA-13 시편의 세팅 사진이다.

4. 실험결과

4.1 열전달특성인자 실험결과

각각의 입도별 열전달 특성인자 시험결과 값은 Table 3과

태양열에너지를 모사하고자 적외선램프를 사용하였으며, 일사량계(Pyranometer)를 이용하여 실제 국내 여름철 매우 화상한 일사량($1,000 W/m^2$)이 방사되는 지점에 설치하였다.

Fig. 9는 실제 시험을 진행하는 사진으로써 상부에서 적외선램프로 일사량을 가하여 바닥에 있는 아스팔트 시편에 열이 누적되는 구조로 준비하였다. 또한 아스팔트 시편 표면과 하부의 온도변화, 시편과 린콘크리트(Lean concrete) 사이의 열유속량, 아스팔트 표면에 가해지는 일사량을 실시간으로 측정할 수 있도록 세팅하였다.

아스팔트 시편 하부에 린콘크리트 배합 슬래브를 설치하여 실제 아스팔트 포장체 단면 상부를 모형화하였다. 또한 Fig. 10과 같이 시편 중앙부에 온도센서와 열유속계를 설치

Table 3. Thermo-Physical Properties of the Asphalt Mixtures Results

Type of HMA	WC-2	reWC-2	PA-13
Total weight (kg)	1.968	1.959	1.745
Percentage of limestone by mass (kg)	1.867	1.853	1.668
Percentage of bitumen by mass (kg)	0.104	0.106	0.077
Density (kg/m ³)	2,361	2,364	2,013
Thermal conductivity (W/m · K)	1.18	1.17	0.90
Specific Heat capacity (J/kg · K)	971	972	960
Thermal Diffusivity (x10-7) (m ² /s)	5.25	5.09	4.66
Average thermal Emissivity	0.90	0.90	0.91

같다. 대표적인 열전달 인자인 열전도도의 경우 혼합물의 밀도 값과 비례하여 증가하는 값을 나타냈으며 이러한 결과는 샘플 내부에 존재하는 골재(약 1.7~4.0 W/m·k)와 아스팔트 바인더(약 1.05~1.52 W/m·k), 공기(약 0.025 W/m·k)의 배치에 따른 열전도도 차이에 생기는 현상으로 PA-13입도가 WC-2입도 보다 약 31% 낮은 값을 보인다. 순환골재 사용 유무 변화로는 열확산율, 열전도도, 비열용량 값이 WC-2와 reWC-2가 유사한 값을 나타냄으로써 순환골재 사용과 열전달 특성인자 결과는 무관하다고 판단되었다. 하지만 PA-13의 경우 열확산율에서 열전도도 차이와 사용된 골재량의 차이로 인해 11% 낮은 값을 보였다. 그 외에 비열용량, 열방사율의 경우 입도와 재활용골재 사용 유무와 상관없이 $\pm 1\%$ 의 유사한 값을 나타냈다.

4.2 포장 두께에 따른 열전도도 변화

국내 지역 기후 특성에 따라 열전도도에 의한 파손 및 기타 연구 자료로 사용할 수 있도록 제한된 범위에서 포장 두께에 따른 열전도도 변화 시험을 진행하였다. 시험에 적용되어진 아스팔트 표준용 샘플 두께는 3 cm, 5 cm, 10 cm로 진행을 하였으며, 열 누적 시간은 24시간으로 진행하였다. 그 밖에 시험조건은 앞서 언급한 3.2.2절과 동일한 조건에서 진행하였다.

각각 혼합물의 시간에 따른 해당 시편의 상·하부 온도차 이 그래프는 Figs. 12~14와 같다. 상·하부온도차 그래프는 초기 1시간 동안 급격하게 증가한 후 서서히 시편의 하부에도 열이 전달됨으로써 감소하는 그래프를 보이고 8시간이 지난 후에는 평행되는 값을 나타낸다. 각각의 케이스에 따른 시편은 두께가 증가함에 따라 상·하부 온도 차이는 해당 그래프와 같이 동일한 경향을 타냈으며, 이는 해당 혼합물의 열이 상부에서 하부로 전달되는 길이(두께)가 증가함으로써 나타나는 차이로 판단된다.

각각 혼합물의 시간에 따른 해당 시편의 열유속 그래프는 Figs. 15~17과 같다. 모든 입도 종류에 대해서 시편의 두께가 증가함에 따라 열유속값이 감소하는 경향을 나타냈으며, 이는 아스팔트 혼합물의 시편 두께가 얇을수록 상부 복사열

Fig. 12. Δ Temperature versus Time for WC-2 **Fig. 13.** Δ Temperature versus Time for PA-13 **Fig. 14.** Δ Temperature versus Time for reWC-2

이 하부로 빠르게 전달되어 하부 린콘크리트 표면과의 온도 차이로 나타나는 현상으로 판단된다. 즉, 아스팔트 혼합물의 포장 두께가 두꺼우면 아스팔트 상부에서 하부로 도달되는 시간이 지연되어 열유속값이 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 해당 그래프의 최대 열유속 값과 두께 3 cm 기준에서의 두께 5 cm와 10 cm의 감소량은 Table 4와 같다.

Figs. 18~20은 각각 혼합물별 태양복사열이 지속적으로 가해질 경우 포장 두께에 따른 아스팔트 열전도도 그래프이다. 모든 시편의 종류에 대해서 포장 두께가 얇아질수록

Table 4. Maximum Heat Flux Result According to Thickness

Type	Max Heat Flux (W/mm^2), (Thickness 3 cm Reference reduction rate)		
	Thickness 3 cm	Thickness 5 cm	Thickness 10 cm
WC2	311, (-%)	240, (22.8%)	111, (64.3%)
PA13	302, (-%)	224, (25.8%)	131, (56.6%)
reWC2	299, (-%)	232, (22.4%)	150, (49.8%)

Fig. 15. Heat Flux versus Time for WC2

Fig. 18. Thermal Conductivity versus Time for WC2

Fig. 16. Heat Flux versus Time for PA13

Fig. 19. Thermal Conductivity versus Time for PA13

Fig. 17. Heat Flux versus Time for reWC2

Fig. 20. Thermal Conductivity versus Time for reWC2

열전도도는 크게 나타났으며, 대부분 10시간 이후에는 비교적 일정한 값에 수렴되는 열전도도를 나타내었다. Fig. 21은 포장두께에 따른 열전도도 값을 정리한 막대그래프이며, Table 5는 두께 3 cm기준에서 열전도도 값의 감소량을 나타낸 표이다.

감소량 추세는 WC2와 reWC2는 두께에 따른 감소량이 유사한 값을 나타냈으나 공극률이 높고 PA13의 경우 두께 3 cm와 5 cm에서의 증감 폭이 비교적 크게 나타났다.

Fig. 22는 아스팔트 두께에 따른 최대 열전도도의 추세를 나타낸 그래프이다. 이처럼 Fourier's Law를 적용한 열전

Fig. 21. Thermal Conductivity versus Thickness

Table 5. Thermal Conductivity Result According to Thickness

Type	Thermal Conductivity (W/mk), (Thickness 3 cm Reference reduction rate)		
	Thickness 3 cm	Thickness 5 cm	Thickness 10 cm
WC2	2.62, (-%)	1.82, (30.8% ↓)	1.27, (51.5% ↓)
PA13	1.82, (-%)	1.15, (46.6% ↓)	0.91, (57.5% ↓)
reWC2	2.78, (-%)	1.74, (37.1% ↓)	1.28, (53.7% ↓)

Fig. 22. Thermal Conductivity versus Asphalt Thickness

도도 값은 아래 추세선과 같이 포장체 두께 증가에 따라 각각 변화되는 값을 보인다.

5. 결 론

아스팔트 포장두께에 따른 열전달 특성변화에 대한 연구를 통해 다음과 같이 결과를 도출하였다.

- (1) 아스팔트 포장단면과 유사한 조건에서 여름철 가장 화창한 일사량을 모사하여 열누적 실험을 진행하였다.
- (2) HFM를 통한 혼합물별 열전도도 차이는 샘플 내부에 존재하는 골재와 아스팔트 바인더, 공기의 배치에 따른 열전도도 차이에 생기는 현상으로 PA-13입도가 WC-2 입도 보다 약 31% 낮은 값을 나타낸다.
- (3) 열전달특성인자 실험에 대하여 순환골재 사용 유무에 따른 열특성인자 값 변화는 무관하다고 판단된다.
- (4) 포장 두께에 따른 상·하부 온도변화는 두께별 온도의 크기는 차이하지만 경향은 유사하게 보여주고 있다.
- (5) 열유속 변화의 경우 두께가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이며 이러한 현상은 두께 10 cm 이상에는 10 cm 두께와 동일한 값을 나타낸다.
- (6) 열전도도 변화의 경우 두께가 얇아질수록 높은 값을 보인다.
- (7) 본 연구 결과는 향후 열에너지에 의한 아스팔트 파손 모형 및 열에너지 하베스팅에 중요한 인자로 사용될 것이라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 2021년 일반연구지원사업(지역대학우수과목)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Garcia, A., Norambuena-Contreras, J., and Partl, N. (2013). Experimental evaluation of dense asphalt concrete properties for induction heating purposes. *Construction and Building Materials*, Vol. 46, pp. 48-54.
- Incropera, F.P., Lavine, A.S., Bergman, T.L., and Dewitt, D.P. (2013). *Principles of heat and mass transfer*. USA: J. Wiley & Sons.
- Korean Statistical Information Service (KSIS). (2021). *Road condition statistics by year*. Retrieved Feb 15, 2021, from <https://kosis.kr/>
- Lee, K.H., and Kim, S.K. (2020). Thermo-physical properties of the asphalt pavement by solar energy, *Journal of the Korea Academia-Industrial*, Vol. 21, No. 1, pp. 717-724 (in Korean).

- Shaopeng, W., Mingyu, C., and Jizhe, Z. (2011). Laboratory investigation into thermal response of asphalt pavements as solar collector by application of small-scale slabs. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, pp. 1582-1587.
- Wong, N.H., and Chen, Y. (2009). *Tropical urban heat islands*. KS Abingdon, UK: Taylor & Francis.

Received	■	June 11, 2021
Revised	■	June 11, 2021
Accepted	■	June 22, 2021