Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 21, No. 6 pp. 490-497, 2020

https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.6.490
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

열에너지 누적에 따른 아스팔트 포장의 열전달 특성 변화

이관호, 김성겸*, 오승식
공주대학교 건설환경학부

Heat Transfer Characteristics of the Asphalt pavement by Solar Energy accumulation

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

요 약 국내 아스팔트 포장 도로는 전체 포장의 약 90%이상을 차지하고 있으며, 건설구조물 중에서는 가장 광범위하게 시공되어지고 있다. 아스팔트 포장의 열전달 특성은 도심지 열섬효과(Heat island effect)에 원인이 되고 있으며, 높은 아스팔트 표면 온도 증가로 인해 파손에 원인이 되고 있다. 이처럼 본 연구에서는 열 변화에 민감한 포장 재료인 아스팔트 혼합물에 태양열 에너지 누적에 따른 열전달 특성 인자를 평가하였다. 평가한 아스팔트 혼합물은 3종류로 밀입도인 WC-2와 배수성 입도인 PA-13, 순환골재를 적용한 WC-2 입도에 대해서 열전달 특성인자(열전도도, 비열용량, 열확산율)와 열에너지 누적에 따른 열전도도변화를 평가하였다. 해당 연구에서 진행한 열누적에 따른 열전도도 실험과 HFM실험 비교 결과, 1.2~2.0배의 차이를 나타냈다. 이는 아스팔트혼합물이 열에너지 누적에 따라 열전도도가 변화한다는 것을 의미한다. 실험결과를 이용하여 아스팔트 혼합물의 표면온도와 입도에 따른 열전도도의 상관관계를 분석하였으며, WC-2 입도의 경우 로그형태의 상관관계를 PA-13의 입도의 경우 선형상관관계를 나타내고 있다. 향후 이러한 열전달 특성 인자는 열에너지에 의한 아스팔트 혼합물의 파손평가 및 모형 개발 연구에 활용 가능한 선행연구가 될 것이라 판단된다.

Abstract Asphalt pavement accounts for more than 90% of the total pavement in Korea. Pavement is most widely constructed among construction structures. The heat transfer characteristics (Thermophysical Properties) of the asphalt pavement cause the heat island effect in downtown areas. An increasing asphalt surface temperature is one of the major causes of damage to asphalt pavement. This study examined the heat transfer characteristic factors according to solar energy accumulation in an asphalt mixture. The specimens (WC-2 & PA-13, Recycled aggregate used WC-2) used in the experiment were compacted with a Gyratory Compactor. The thermo-physical properties (thermal conductivity, specific heat capacity, thermal diffusivity, and thermal emissivity) and solar energy accumulation were evaluated. The thermal accumulation and HFM tests revealed a 1.2- to 2.0-fold difference. This indicates that the thermal conductivity of the asphalt mixture pavement changes with the accumulation of solar energy. An analysis of the correlation of thermal conductivity according to the surface temperature of the asphalt mixture showed that WC-2 was logarithmic, and PA-13 was linear. Experiments on the heat transfer characteristics of asphalt pavement that can be used for thermal failure modeling of asphalt were conducted.

Keywords : Asphalt Mixture, Thermal Conductivity, Thermo-Physical Properties, Porous Asphalt, Dense Graded Asphalt

본 논문은 한국연구재단 2020년 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 April 6, 2020 Revised May 6, 2020
Accepted June 5, 2020 Published June 30, 2020

1.서론

아스팔트 포장은 높은 균일성, 주행성, 및 저소음의 장점으로 고속도로 건설에 널리 적용되었다. 그러나 아스팔트 포장은 검은색 표면과 광범위한 피복면적으로 인해 열이 강한 여름철에 다량의 열 흡수를 통하여 내구성이 현저히 저감되어 파손된다[1]. 또한, 최근 몇 년 동안 여름철 평균기온 상승으로 인한 폭염의 빈도와 강도가 늘어남에 따라 아스팔트 포장 또한 온도증가(가열)현상으로 지속적으로 대기에 열을 발생시켜 열섬효과를 악화시키고 있다[2].

이러한 열섬현상을 낮추기 위한 것 중 하나로 물을 뿌리는 것이 있지만, 이는 마찰계수의 감소로 인해 안전을 확보 할 수 없어 올바르지 않다. 그리하여 현재 태양열에 의한 아스팔트 포장재의 가열현상을 줄이는 연구가 지속적으로 진행되어지고 있다.

아스팔트 포장의 열 흡수는 기초 및 보조기층과 더불어 지구기초를 가열한다. 일부 특수한 지역에서 하부로 향하는 열전달은 매우 위험할 수 있으며, 이러한 예로 영구동토층(Permafrost Region)이 있다. 아스팔트 포장을 이러한 지반에 적용 할 경우 열이 하부로 전달되어져 지지력 약화현상이 일어날 수 있으므로 이러한 현상을 방지하고자 운송 및 포장 공학적으로 많은 기술이 적용된다. 이처럼 아스팔트 포장의 열전달 메커니즘은 보다 구체적이고 근본적인 연구가 요구된다[3,4].

국내에서 아스팔트 포장용으로 주로 이용되는 아스팔트 혼합물은 밀입도 가열아스팔트혼합물, 개질아스팔트 혼합물, 배수성(저소음) 아스팔트 혼합물 등이 있다. 최근에는 생산 및 시공온도를 낮춘 중온아스팔트포장이나 재활용 아스팔트 골재를 30%이상 적용한 순환가열 아스팔트 포장을 국내·외에서 시공 및 적용하고 이다. 이러한 다양한 아스팔트 혼합물은 생산, 시공 및 공용기간 중 각각의 온도범위가 다르고, 저온 및 고온 등 온도변화에 따른 아스팔트 포장의 파손특성이 달라진다. 따라서 아스팔트 포장의 적정한 공용성능을 위해서 아스팔트 혼합물의 열역학적 특성이 생산, 시공 및 공용에 관련된 각종 규정에 반드시 고려되어야 한다[5].

기존에는 점도시험, 동전단레오미터 및 동탄성계수 시험, 피로시험 및 소성변형시험 등과 같이 열전달이 배제된 공용성능 평가 분야에 치우친 시험으로 아스팔트 혼합물 평가가 이루어진다. 이러한 평가를 개선하고자 최근 아스팔트 혼합물의 열전달 특성인자에 관한 연구가 진행되고 있다. 특히 아스팔트 혼합물 특성상 열에너지가 지속적으로 누적되었을 때의 분석이 요구된다[5].

본 연구에서는 일반적으로 사용되어지는 밀입도 아스팔트 혼합물과 배수성 아스팔트 혼합물, 순환 가열 아스팔트 혼합물에 대해하여 열전도 특성 인자를 결정하였다. 평가한 아스팔트의 열전달 특성 인자로는 열전도도(Thermal Conductivity), 비열용량(Specific Heat Capacity), 열확산율(Thermal Diffusivity), 열방사율(Thermal Emissivity)를 평가하였으며,, 추가적으로 각 혼합물별로 열에너지 누적에 따른 열특성인자 값의 변화를 평가하였다. 해당 열전달 특성인자는 열에너지에 의한 아스팔트 포장의 파손평가 및 모형개발 등에 가장 근간이 되는 선행 연구가 될 것으로 판단된다.

2. 아스팔트 포장체 열전달 특성

2.1 열전달의 기본개념

태양열에너지의 전달은 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. 전도는 입자들 상호작용에 의해 발생하는 현상으로 높은 열에너지를 가진 입자에서 낮은 열에너지를 가지는 입자로의 열에너지 이동 현상으로 주로 기체, 액체 및 고체 등에서 나타난다. 아스팔트 포장체에서 열전도는 주로 포장체의 형상, 두께, 재료종류, 온도차이 등에 의해 영향을 받는다.

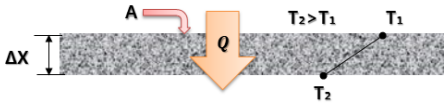

Fig. 1. Heat Conduction Through a Section of Asphalt Pavement

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

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

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 (㎡), △T/△X temperature gradient

in the direction of heat flow for one-dimension (K/m), T_2temperature at depth (K), T_1surface temperature (K).

아스팔트 포장체의 열전달에 영향을 미치는 인자는 Fig. 2와 같이 크게 날씨요인과 포장체의 재료로 나뉜다. 그 중 포장체의 재료 요인으로는 열-물리적 인자(Thermophysical properties)와 포장체 표면의 인자(Surface property)로 나뉜다. 아스팔트 포장체 열전달에 영향을 미치는 표면 인자는 흡수율(Absorptivity) 방사율(Emissivity), 반사율(Reflectivity or Albedo)로 구성된다.

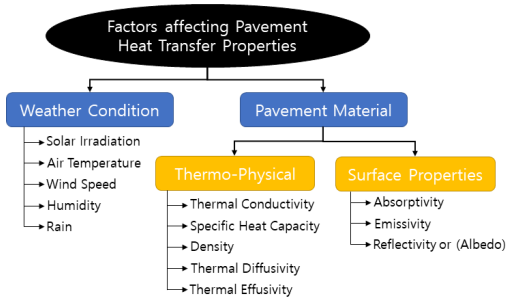

Fig. 2. Factors affecting Heat Transfer Properties of Asphalt Mixture

열전달 및 저장에 영향을 미치는 열-물리적 인자로는 열전도에 의해 단위 길이 및 시간당 1도를 전도 하는데 필요한 열량을 나타내는 열전도도(thermal conductivity), 단위 질량당 단위 온도만큼 상승 시키는데 필요한 열량을 나타내는 비열용량(specific heat capacity), 열이 재질로 확산되는 속도를 나타내는 열확산율(thermal diffusivity), 주변 환경과 열에너지를 교환하기 위한 물질의 능력을 나타내는 계수인 축열계수(thermal effusivity), 밀도(Density)가 있다.

2.2 열전달 특성인자 산출

2.2.1 열전도도

열전도도는 열평형 상태(steady state)의 면적 1㎡ 재료에 양 단면의 온도차를 1°K로 하고 단위 두께(m)당 이동하는 에너지(W) 값을 나타낸 것이다. 대표적인 열전도도 결정하는 방법으로는 HFM(Heat Flow Meter) 방법이 있다. HFM은 ASTM C518, ISO 8301에 따라 열판(Hot plate)과 냉판(Cold plate) 사이에 측정 시료를 배치하고 해당 시료에 열 이동량을 반복적으로 측정한 후 Eq. (2)을 이용하여 열전도도를 결정한다.

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

Where, k_1~ $k_6$calibration constants of the apparatus determined, separately (from testing a sample of known thermal conductivity), $\overline{T}$ 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.

2.2.2 비열용량 (Specific heat capacity)

단위 질량당 단위 온도만큼 상승 시키는데 필요한 열량을 의미한다. 아스팔트 구성 재료의 각각의 열용량과 구성 혼합비율을 이용하여 Eq. (3)과 같이 결정하다. 이때 각각의 포장 재료의 비열용량은 Table 1을 참고하였다.

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

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_BBinder specific heat capacity (J/kg·K.).

Table 1. Specific Heat Capacity of Pavement Constituents [6-9]

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

2.2.3 열방사율

열방사율은 표면이 흑체에 비하여 얼마나 효과적으로 방사하는가를 나타내는 척도이다. 물체의 표면 상태에 크게 의존 되며, 방사율은 0~1 범위에 있으며 흑체의 방사율은 통상 1이라 한다.

Fig. 3과 같이 적외선램프를 이용하여 아스팔트 시편의 열평형 상태의 온도(85℃)까지 도달시킨다. 열에너지가 누적된 시편을 냉각하는 과정에서 5℃ 간격으로 적외선 카메라와 접촉식 온도센서를 이용하여 온도를 계측하

고 이런 출력 값을 Eq. (4) 적용하여 열방사율을 결정하였다.

$$E_{thermal} = \frac{T_I(℃)}{T_s(℃)} \quad (4)$$

Where, $E_{thermal}$ Thermal Emissivity, T_I Infrared camera temperature (℃), T_s Surface Temperature (℃)

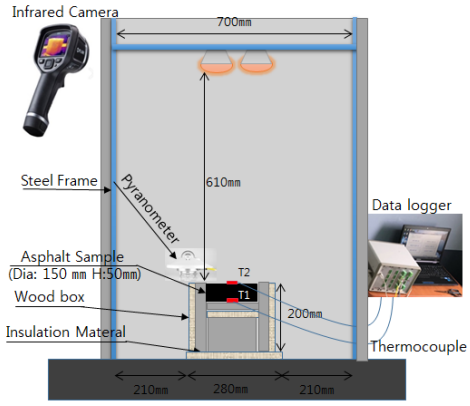

Fig. 3. Emissivity Experimental Setup Schematic Diagram

Fig. 4, 5는 실험세팅 사진과 시편의 열화상 카메라 사진이며, Fig. 6은 실험시편의 온도구간에 따른 열방사율 그래프이다.

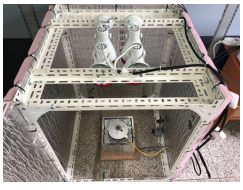

Fig. 4. Emissivity Experimental Setup

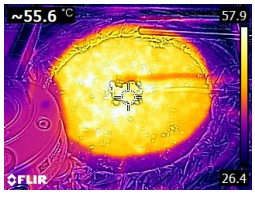

Fig. 5. Infrared Camera Photo

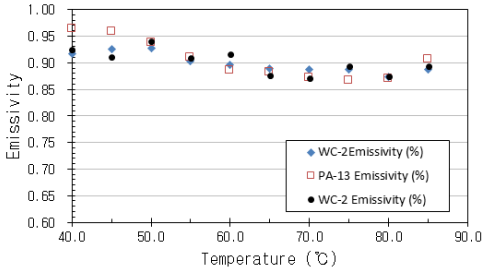

Fig. 6. Emissivity Results of the Test Samples

2.2.4 열확산율

열이 해당 시편에 확산되는 속도를 의미하며, 열확산율이 높을 경우 열의 전도가 빠르고 낮을 경우 재료에 많은 양의 열을 축적되고 소량의 열에너지만 방출하게 된다. 산정 식은 Eq. (5)과 같다.

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

Where, α Thermal diffusivity (㎡/s), ρ Density (kg/㎥)

2.3 열에너지 누적에 따른 열전도도 변화시험

열에너지 누적에 따른 아스팔트 포장의 열전도 특성인자 값을 실시간으로 분석하고자 Fig. 7과 같은 실험을 하였다. 실험에 적용된 적외선램프는 태양열에너지를 모사였으며, 실제 우리나라 여름철 가장 화장한 일사량(1000 W/㎡)이 방사되는 위치에 설치하였다.

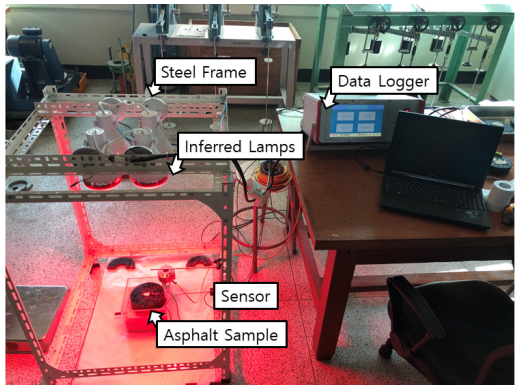

Fig. 7. Thermal Accumulation Test Setup

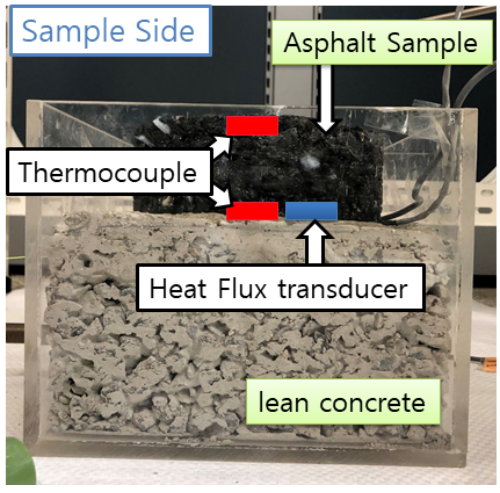

Fig. 8. Test Setup for Asphalt Sample

Fig. 7의 아스팔트 샘플의 세팅 단면은 Fig. 8과 같다. 아스팔트 시편 하부에 린콘크리트(Lean concrete) 배합 슬래브를 설치하여 일반적으로 사용되는 아스팔트 포장체 단면을 모형화하였다. 또한 Fig. 8과 같이 시편 중앙부에 열유속계와 온도센서를 부착하여 실시간으로 아스팔트 시편의 열전도도를 예측할 수 있게 하였다. 열전도도 산출 식은 Eq. (6)과 같다.

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

Where, Hf(t) heat flux through the asphalt sample at time (W/㎡), H_s Height of asphalt sample (㎝), $T_s(t)$ Surface Temperature (℃), $T_b(t)$ bottom Temperature (℃)

3. 실험재료 기본물성

실험에 사용되어진 아스팔트 혼합물의 기본 물성은 Table 2와 같다. 입도는 미립도 아스팔트 표층인 WC-2와 배수성 아스팔트 표층인 PA-13을 이용하였으며, 사용되어진 바인더는 WC-2의 경우 AP-3, PA-13의 경우 고분자 개질 아스팔트 (SBS PMA)를 사용하였다. 순환가열 아스팔트 혼합물의 경우 첨가되는 골재에 30%를 순환 골재(구재 아스팔트 1.5%포함)로 대처해서 혼합하였으며, 바인더 첨가량은 중량대비 4.2%를 추가 혼합하였다. 사용된 골재의 입도는 Fig. 9와 같으며 순환골재를 사용한 혼합물(re_WC2)은 골재합성입도를 통하여 Table 2의 WC-2와 동일한 입도를 적용하였다.

시편제작은 현장 다짐과 유사한 선회 다짐기를 이용하여 다짐각 1.25°, 다짐 압력 600kPa, 다짐속도 30회/mim로 Fig. 10과 같이 지름 150㎜에 높이 50㎜의 시편을 제작하였다.

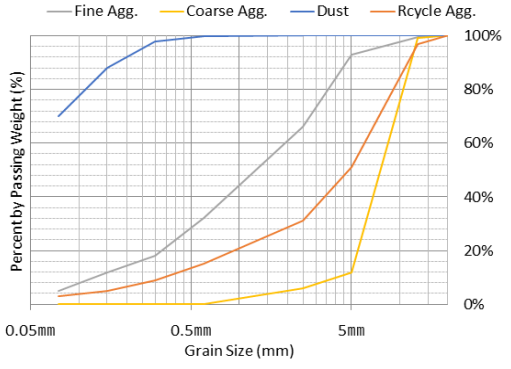

Fig. 9. Grading Curve of Aggregate

Table 2. Property of Hot Mix Asphalts

Type of HMA / Sieve size(㎜)		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/㎥)		2.361	2.364	2.013
Air void (%)		4.4	4.4	20.2

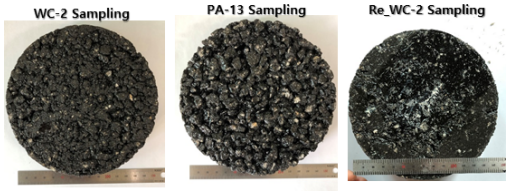

Fig. 10. Asphalt Specimens

4. 실험 결과

4.1 열전달 특성인자 실험결과

각 시편의 열전달 특성인자 값은 Table 3과 같다. 시편으로 사용된 혼합물에 대한 열전도도 실험 결과 밀입도인 WC-2입도가 배수성 포장 PA-13 입도 보다 약 31% 큰 값을 나타냈으며, 이는 혼합물의 공극률 차이로 인해 샘플 부피 내에 혼합물과 공기의 열전도도가 달라생기는 차이로 판단되다. 순환골재 사용에 따라 열확산율 3%차이를 보이나 이는 분석에 사용되는 인자 값(열전도도, 비열용량)이 WC-2의 인자 값과 미미한 차이로 나타나는 현상으로 실제 결과에서는 순화골재사용 유무와 상관없이 열확산율이 매우 유사하다고 판단되다. 하지만 배수성 입도의 경우 열확산율에 사용된 골재의 비율과 열전도도 차이로 인해 11% 감소한 값을 나타냈다. 그 밖에 비열용량, 열방사율의 경우 재활용골재 및 입도와 상관없이 ±1%의 유사한 열전달 특성 값을 나타냈다.

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

Type of HMA	WC-2	PA-13	reWC-2
Total weight (kg)	1.968	1.745	1.959
Percentage of bitumen by mass (kg)	0.104	0.077	0.106
Percentage of limestone by mass (kg)	1.867	1.668	1.853
Density (kg/㎥)	2361	2013	2364
Thermal conductivity (W/m·K)	**1.18**	**0.9**	**1.17**
Specific Heat capacity (J/kg·K)	**970.8**	**960.1**	**971.9**
Thermal Diffusivity (x10-7) (㎡/s)	**5.25**	**4.66**	**5.09**
Average thermal Emissivity	**0.90**	**0.91**	**0.90**

4.2 열에너지 누적에 의한 열전도도 변화

Fig. 11은 열에너지 누적에 따른 해당시편의 상·하부의 온도차(⊿Temperature)를 타나낸 그래프이다. 전체적으로 초기 1시간은 아스팔트 혼합물 상부만이 열에너지 누적의해 온도차이가 급격하게 높아졌으나 5시간 이후에는 시편 하부로 열전달이 일어남으로써 일정한 온도차이를 이루는 것을 알 수 있다. 각각의 시편의 상·하부의 온도차는 공극률이 20%대로 높은 PA-13이 높게 나타냈고, 공극률이 4%대인 reWC-2와 WC-2는 비교적 낮은 상·하부 온도차를 나타냈다.

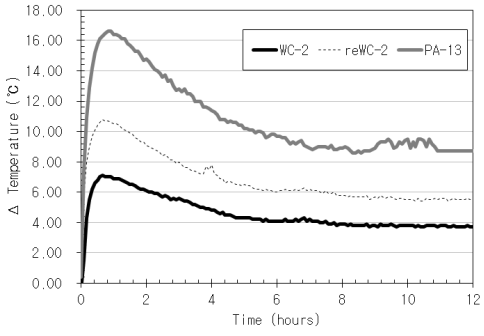

Fig. 11. ⊿Temperature versus Time

시간경과에 따른 열유속의 경우 Fig. 12와 같다. 열유속 센서 특성상 아스팔트 시편 하부의 온도와 린콘크리트 상부의 온도차에 의해 발생되는 값으로 온도차가 높으면 높을수록 열유속값이 높게 나타냈다. 공극률이 낮은 WC-2입도에 비해 공극률이 높은 PA-13입도가 하부에 위치하는 린콘크리트 슬래브에 열전달이 비교적 적게 되어 PA-13입도가 평균 약 20%정도 높은 값을 지속적으로 나타냈다.

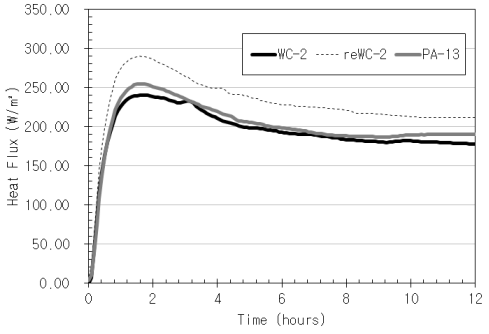

Fig. 12. Heat Flux versus Time

앞서 Fig. 11의 시편의 상하부 온도 차이에서도 예상할 수 있듯 시편의 열전도도는 WC-2가 최대 2.4W/m·K, re-WC-2가 1.9W/m·K, PA-13이 1.1W/m·K를 나타냈다. 이러한 결과는 앞서 실험 된 HFM결과와는 비교하였을 때 1.2~2.0배 높은 값을 나타냈다. 이처럼 단순 시편을 대상으로 하는 열전도도시험은 주변 환경이 모사된 실험에 비해 비교적 낮은 열전도도 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

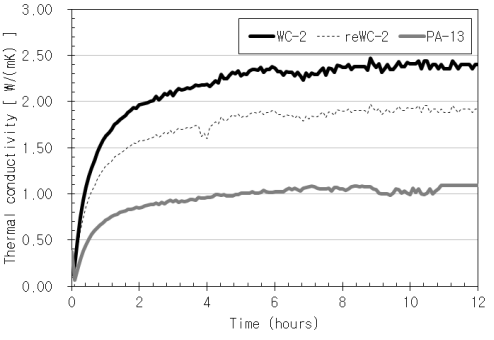

Fig. 13. Thermal Conductivity versus Time

Fig. 14는 태양열 에너지 누적에 따라 변화하는 아스팔트 표면 온도를 이용하여 해당 아스팔트의 열전도도를 예측할 수 있는 그래프이다. 해당 그래프에서 공극률이 높은 배수성 아스팔트 혼합물의 경우 선형형태의 상관관계(R^2=0.98)를 갖고 있으며, 미립도 혼합물의 경우 로그형태의 높은 상관관계를 나타내고 있다.

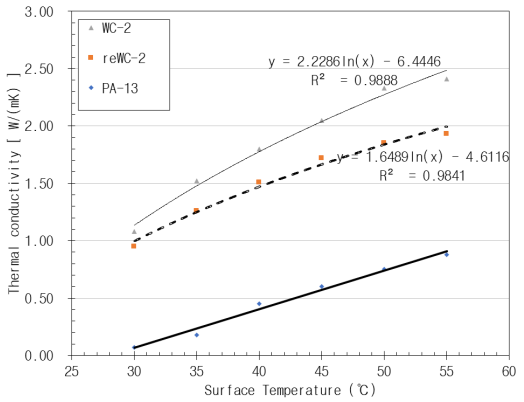

Fig. 14. Thermal Conductivity versus Surface Temperature

추가적으로 해당 열전도도를 바탕으로 산정한 아스팔트 표면 온도에 따른 열확산율 그래프는 Fig. 15와 같은 결과를 나타낸다.

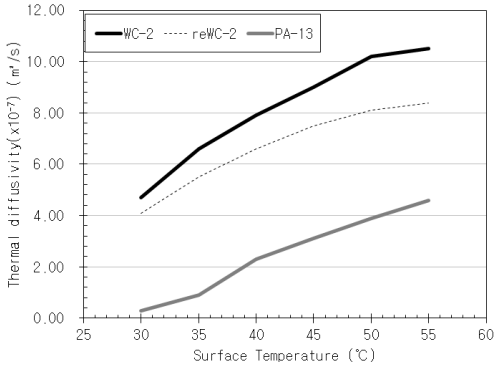

Fig. 15. Thermal Diffusivity versus Surface Temperature

5. 결론

아스팔트 혼합물의 열에너지에 누적에 따른 열전도 특성인자 변화에 대해 연구를 통해 다음과 같이 결과를 도출하였다.

(1) HFM을 통한 열전도도 실험 결과 밀입도인 WC-2 입도가 PA-13 입도 보다 약 31% 큰 값을 보이며, 이는 혼합물의 공극률 차이로 인해 샘플 부피 내에 혼합물과 공기의 열전도도가 달라 생기는 차이로 판단되다.

(2) 열확산율은 분석에 사용된 열전도도와 비열용량에 따라 차이를 보였으며 이러한 값은 골재의 입도차이가 근본적이므로 순환골재 사용 유무에는 큰 영향이 없었으나 배수성입도와의 차이에서는 열확산율이 약 11% 감소한 값을 나타냈다.

(3) 비열용량, 열방사율의 경우 재활용골재 및 입도 차이와 상관없이 ±1%의 유사한 열전달 특성 값을 나타내므로 해당 열전달 인자는 골재의 입도 및 골재 상태와는 무관하다 분석된다.

(4) 도로단면을 모사한 아스팔트 포장체의 열에너지 누적에 따른 열전도도 변화량은 HFM 시험결과에 1.2~2.0배 차이를 보이고 있으며, 이는 해당 시편이 열 누적에 따라 열전도도가 변한다는 결과를 보여주고 있다.

(5) 열에너지 누적에 대한 아스팔트 상부표면온도와 열전도도 상관관계는 PA-13 경우 선형상관관계로 나타났으며, 미립도 혼합물의 WC-2경우 $y=1.6489\ln(x)-4.6116$, (R^2 = 0.9841), reWC-2 경우 $y=2.2286\ln(x)-6.4446$, (R^2 = 0.9888)와 같은 로그형태의 추세선을 나타낸다. 이는 해당 그래프를 바탕으로 제한된 혼합물 입도에 대해 상부표면온도만으로 아스팔트의 열전도도를 예측할 수 있게 되었다.

(6) 본 연구 결과는 향후 열에너지에 의한 아스팔트 파손 모형 및 개발에 중요한 인자로 사용 될 것이라 판단된다.

References

[1] Yang, W., Gu, H., and Shan, Y. *"Influence of pavement temperature on urban heat island."* J. Highway Transp. Res. Dev., Vol25, No.3, pp147-152. 2008

[2] Mitchell, S. O. *"Concrete keeps its cool"* Masonry Construction, Vol21, No.6, pp74. 2008

[3] R. Li, L. Zhao, Y. Ding, T. Wu, Y. Xiao, E. Du, G. Liu, Y. Qiao. *"Temporal and spatial variations of the active layer along the Qinghai-Tibet Highway in a permafrost region"*, Chinese Science Bulletin, Vol57, No.35, pp4609-4616. Nov. 2012
DOI : http://dx.doi.org/10.1007/s11434-012-5323-8

[4] S. Wang, J. Chen, J. Zhang, Z. Li. *"Development of highway constructing technology in the permafrost region on the Qinghai-Tibet plateau"* Sci. China Ser. E-Technol. Sci., Vol52, pp497-506. Feb. 2009
DOI : https://doi.org/10.1007/s11431-008-0355-7

[5] Kwan-Ho Lee & Seong-Kyum Kim. "Thermo-physical Properties of the Asphalt Pavement by Solar Energy", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol21, No.1, pp717-724. Jan. 2020
DOI : https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.1.717

[6] Sundberg, J., *"Thermal properties of soils and rocks"*, GEOLOGISKA INSTITUTIONEN Publ. A57, 1988. pp38-39

[7] Somerton, W. H., *"Thermal properties and temperature-related behavior of rock/fluid systems"*, Elsevier, March 1992. pp.256

[8] Banks, D., *"An introduction to thermogeology: ground source heating and cooling"*, John Wiley & Sons. 2008, pp.339

[9] 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. 2009
DOI: https://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 겸(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

오 승 식(Seung-Sig Oh) [정회원]

- 1990년 11월 : 한국토지공사 입사
- 1991년 2월 : 고려대학교 토목공학과 (공학사)
- 2003년 8월 : 건국대학교 부동산학과 (석사)
- 2019년 12월 ~ 현재 : 한국토지주택공사 서울지역본부장

〈관심분야〉
도로공학 및 지반공학