

# 아스팔트 혼합물 실린더 시편을 이용한 열역학적 이론의 적용 및 검증

## Application and Verification of Thermodynamics by using Cylindrical Asphalt Mixture Specimen

윤 태 영 Yun, Tae Young  
유 평 준 Yoo, Pyeong Jun

정회원 · 한국건설기술연구원 수석연구원 · 교신저자 (E-mail : tyun@kict.re.kr)  
정회원 · 한국건설기술연구원 연구위원 (E-mail : pjyoo@kict.re.kr)

### ABSTRACT

**PURPOSES :** Evaluation of thermal conductivity and convection properties of asphalt mixture by using thermodynamics.

**METHODS :** In this research, temperature prediction model based on thermodynamics is derived for asphalt mixture in transient state and it is verified with laboratory test results.

**RESULTS :** The derived temperature prediction model shows good agreement with laboratory test results.

**CONCLUSIONS :** It is concluded that the derived model based on thermodynamics and thermal properties in the literature are good enough to capture temperature variation in laboratory test. The approach based on thermodynamics can be applied to more complex temperature simulations.

### Keywords

*thermodynamics, transient heat, thermal conductivity, asphalt*

Corresponding Author : Yun, Taeyoung, Senior Researcher  
Highway Research Division, Korea Institute of Construction Technology,  
283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea  
Tel : +82.31.910.0445 Fax : +82.31.910.0161  
E-mail : tyun@kict.re.kr

International Journal of Highway Engineering  
http://www.ksre.or.kr/  
ISSN 1738-7159 (print)  
ISSN 2287-3678 (Online)  
Received Jul. 8, 2014 Revised Jul. 9, 2014 Accepted Jul. 24, 2014

## 1. 연구배경 및 목적

일반적인 아스팔트 혼합물 또는 개질 아스팔트 혼합물은 생산, 시공 및 공용에서의 온도범위가 크게 다르며, 아스팔트 포장의 수명을 최대화하기 위해서는 온도에 따라 달라지는 역학적 물성의 변화와 열역학적 특성이 생산, 시공 및 공용에 관련된 시방에 적절히 고려되어야 한다. 현재 시방 및 재료평가에는 아스팔트 바인더 및 혼합물의 온도에 영향을 받는 역학적 물성을 반영하기 위하여 점도계, 동전단레오미터 및 동탄성계수, 피로

및 러팅 등의 실험방법이 활용되고 있다. 그러나 이러한 역학적 물성 평가방법들은 아스팔트 혼합물의 시공성 및 거동을 설명하기 위하여 활용될 수는 있으나, 생산 및 현장에서의 포설 및 다짐 또는 공용상태에서의 대기 온도 조건에 따른 시공성의 변화 및 시공성의 변화에 따른 재료의 성능변화를 직접적으로 설명하지는 못한다. 최근 사회적 문제가 되고 있는 포트홀 등을 포함한 아스팔트 포장의 파손이 재료의 생산 및 시공과정에서 적절하지 못한 관리에서 기인한 것을 고려할 때, 포장 혼합

물의 온도에 따른 열역학적 특성을 규명하고 합리적인 근거에 의하여 생산 및 시공에 관련된 시방에 포함하는 과정은 도로포장의 수명을 증대시킬 수 있다는 점에서 의미가 크다. 특히 혼합물의 열역학적 특성이 규명되면 현장 다짐에서 대기온도와 포장 재료의 온도를 활용하여 다짐시간 동안의 혼합물의 내부 온도분포를 예측하고, 이를 바탕으로 중량 및 속도를 고려한 다짐롤러의 적정 다짐횟수에 대한 기준을 정할 수 있다. 또한 국내외에서 연구되고 있는 직접적 가열방법이나 자기장을 이용한 아스팔트 포장의 보수공법이나 현장 재활용 시공법에서도 아스팔트 혼합물의 열역학적 특성 분석이 효율적인 에너지 활용과 직결되기 때문에, 도로포장 재료의 열역학적 특성 정량화는 매우 중요한 의미를 지닌다고 할 수 있다. 수분을 포함하는 도로포장의 도심열섬화 현상 방지를 위하여 활용되는 전산유체해석에서도 보다 신뢰성 있는 근거를 확립하기 위해서는 도로포장 재료의 열전달 특성을 확립하는 것은 매우 중요한 과정이다.

국외에서는 열역학 이론을 적용하여 시공에서의 아스팔트 혼합물의 열전도율(Thermal Conductivity)을 측정하거나(Fwa et al. 1995, Luca and Mrawira 2005, Calson et al. 2010) 다짐조건 제시를 위하여 아스팔트 혼합물의 포설 시의 온도변화(Tegeler and Dempsey 1973)나 깊이에 따른 온도변화(Corlew et al. 1968)를 예측모형을 개발하거나, 이러한 모형을 이용하여 온도예측 소프트웨어를 개발하는 연구가(Chadborn et al. 1996) 미국을 중심으로 진행된 바 있다. 국내에서도 아스팔트 포장의 깊이별 온도분포를 확인하기 위하여 보조기층 또는 노상재료의 열전도율을 측정하기 위한 연구(Rhee et al. 2009)가 진행되기도 하였으며, Park and Kim(2013) 등에 의해서 열전도이론에 대한 현장검증에 관련된 연구가 수행된 바 있다. 본 연구에서는 아스팔트 혼합물에 열역학적 이론을 적용하여 아스팔트 혼합물의 온도변화 모형을 유도하고 이를 실험적으로 검증하고자 하였다. 이를 위하여 일반적으로 사용되는 원통형 아스팔트 시편의 온도변화를 열역학 모형 유도를 통하여 예측하였으며, 이를 검증하기 위하여 실제 온도를 측정할 결과와 비교하였다. 이러한 아스팔트 혼합물의 열에너지 전달에 관련된 특성은 다양한 입도 및 재료로 구성된 다양한 형태의 아스팔트 혼합물의 현장 포장 보수를 위한 기준을 제시하거나 온도조건을 의도에 맞게 통제할 수 없는 현장가속시험이나 도심열섬현상 등을 평가하는 자료로 활용될 수 있다.

## 2. 열전달 방정식의 유도

### 2.1. 열역학 이론의 기본개념

열에너지의 전달은 물리적인 순환 또는 이동이 없는 재료에서 발생하는 전도(Conduction), 매개체가 없을 경우 더 효율적으로 전달되는 복사(Radiation), 기체 또는 액체를 매개로 전달하는 대류(Convection)로 구분된다. 다음 Fig. 1은 도로포장 구조체에서 발생할 수 있는 전도, 복사 및 대류현상을 개념적으로 나타내고 있다.

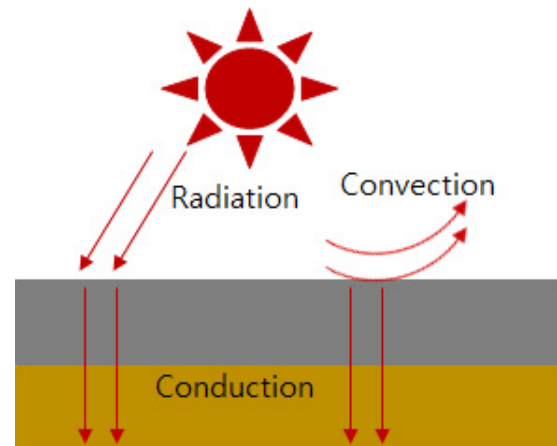


Fig. 1 Conduction, Radiation, and Convection

열역학에서는 열에너지의 전달에 시간을 고려하지 않은 정상상태(Steady State)와 시간을 고려한 과도상태(Transient State)로 구분한다. 실제 현장에서 필요한 아스팔트 포장 재료의 시간에 따른 온도변화를 확인하기 위해서는 복잡한 지배방정식 및 경계조건의 설정이 필요한 과도상태 조건의 해석이 요구된다. 다음 Eq. (1), Eq. (2), Eq. (3)은 각각 고체 또는 정지된 유체에서 전도에 의한 열에너지 흐름을 표현하는 Fourier's Law of Conduction, 유체를 매개로 한 대류에 의한 열에너지의 흐름을 표현하는 Newton's Law of Cooling, 매개체가 필요하지 않은 복사에 의한 열에너지의 흐름을 표현하는 Stefan-Boltzmann Law를 나타내고 있으며, 이들은 다양한 조건의 열전달 해석을 위하여 기본적으로 사용된다.

$$\dot{q}_z = \frac{q_z}{A} = -k \frac{dT}{dz} \quad (1)$$

where,  $\dot{q}_z$  : heat flux in z direction

$q_z$  : rate of heat transfer in z direction

$A$  : surface area normal in z direction

$k$  : thermal conductivity

$T$  : temperature(= K)

$$\dot{q}_s = h(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

where,  $\dot{q}_s$  : surface flux

$T_s$  : surface temperature

$T_\infty$  : fluid temperature far away from the surface

$$\dot{q}_r = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (3)$$

where,  $\dot{q}_r$  : radiation flux

$\epsilon$  : emissivity

재료 내부에서의 에너지가 발생하는 메커니즘이 있는 상태에서 질량의 흐름(Mass Flow) 및 내·외부에서의 에너지 유입 및 유출로 인한 재료의 에너지 변화는 에너지 보존법칙(열역학 제 1법칙)에 의하여 다음 Eq. (4)와 같이 일반적으로 나타내어 질 수 있다.

$$\dot{E}_a + \dot{E}_g - \dot{E}_r = \dot{E} \quad (4)$$

where,  $\dot{E}_a$  : rate of energy added

$\dot{E}_g$  : rate of energy generated

$\dot{E}_r$  : rate of energy removed

$\dot{E}$  : rate of energy change within element

Eq. (4)와 Eq. (1)을 이용하여 주어진 조건에서 평형 방정식에 따라(Latif 2009), 질량의 흐름이 없는 정지된 재료(Stationary Material)에서 열전도율( $k$ )가 일정하고 일정한 에너지( $q''$ )가 발생할 경우에 대하여,  $x$ ,  $y$  및  $z$ 를 각 축으로 하는 3차원 직교 좌표계(Rectangular Coordinates)에서 시간  $t$ 에 따른 열전도를 나타내는 미분방정식은 Eq. (5)와 같이 유도될 수 있으며, 동일한 조건에서 높이, 각도 및 반경을 각각  $z$ ,  $\phi$  및  $r$ 로 나타내는 원통형 좌표계(Cylindrical Coordinates)에서 시간  $t$ 에 따른 열전도를 나타내는 미분방정식은 다음 Eq. (6)과 같이 유도될 수 있다.

$$\alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q''}{\rho c_p} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

$$\alpha \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \frac{q''}{\rho c_p} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

where,  $\alpha$  : thermal diffusivity of material

( $= k/\rho C_p$ )

$q''$  : energy generation rate per unit volume

$\rho$  : throughout the material

$c_p$  : density of material specific heat of material( $W/m^2 K$ )

## 2.2. 실린더 시편의 온도변화 미분방정식 유도

항온기(Temperature Conditioning Chamber)에 위치한 실린더 시편 내의 임의의 위치( $r$ ,  $z$ )에서 시간  $t$ 에 따른 온도분포  $T(r, z, t)$ 는  $z$ 축과  $r$ 축을 직교하는 두 번으로 정의되는 두께  $L$ , 폭  $r_0$ 의 직사각 평면에서의  $z$ 축 방향으로의 열에너지 전달을 설명하는 1차원 문제와  $z$ 축을 중심으로 반경  $r_0$ 로 구성되는 곡면에서  $r$ 축을 따라 중심부로 향하는 열에너지 전달을 설명하는 1차원 문제를 동시에 고려한 2차원 과도상태의 문제로 단순화 될 수 있다. Fig. 2는 이와 같은 경계조건을 결정하기 위하여 사용될 수 있는 항온기 내에서의 조건을 나타내고 있는데, 항온기 내에서 가열되거나 냉각된 공기에 의하여 시편에 온도가 변화되므로, Eq. (1)과 Eq. (2)로 표현되는 열에너지의 전도와 대류에 관련된 개념이 적용될 수 있으며, 직사각 평면과 원통형 물체에 대한 온도의 변화를 활용하므로 Eq. (5)의 직교좌표계와 Eq. (6)의 원통형 좌표계를 활용할 필요가 있다. 한편 항온기 내의 시편에서는 지속적으로 일정량의 열에너지를 발생시키는 요인이 없으므로, Eq. (5)와 Eq. (6)에서의  $q'' = 0$ 로 가정할 수 있다.

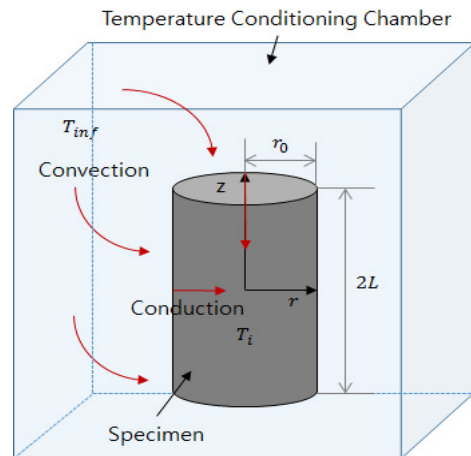


Fig. 2 Schematical Description of Test Condition

따라서 일차원 평면(Plane Wall)에서의 열전도 미분 방정식은 Eq. (5)에서  $z$  방향만을 고려하고 새롭게 정의한 온도함수 Eq. (7)를 Eq. (5)에 대입하여 정리한 Eq. (8)로 표현된다.

$$\begin{aligned} & \text{Temperature Variable} \\ & \theta(z, t) = T(z, t) - T_\infty \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \text{Differential Equation for Plane Wall} \\ & \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t} \end{aligned} \quad (8)$$

중심부에서는  $z$  축을 기준으로 대칭이므로 Eq. (9)와 같은 경계조건이 설정될 수 있으며,  $z = L$  일 때 전도와 대류에 의한 열에너지의 흐름이 동일하다고 할 수 있으므로, 경계조건으로 Eq. (10)을 설정할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{Boundary Condition for Plane Wall} \\ & \frac{\partial \theta(0, t)}{\partial z} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

$$-k \frac{\partial \theta(L, t)}{\partial z} = h[\theta(L, t)] \quad (10)$$

또한 시편온도 초기온도가  $T_i$ 로 주어지는 경우, 초기 조건은 Eq. (11)와 같이 주어질 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{Initial Condition for Plane Wall} \\ & \theta(z, 0) = f(z) - T_\infty \end{aligned} \quad (11)$$

where,  $f(z)$  : symmetrical about the center plane

변수분리법(Separation of Variable Method)을 이용하여 Eq. (8)을 풀고 Eq. (9)~Eq. (11)의 경계조건과 초기조건을 반영하면, 평면에서의 열에너지 전달에 따른 온도의 변화는 다음 Eq. (12)의 형태로 나타내어진다. 특히  $\tau > 0.2$  인 경우, Eq. (12)에서  $n = 2$  이상의 항의 영향이 충분히 작아지므로 Eq. (12)는  $n = 1$  인 경우로 단순화되어 Eq. (14)와 같이 정리될 수 있다. 다음 Table 1은  $n = 1$  일 때, Eq. (13)의 해 (Solution)인  $\lambda_1$ 의 변화와 이에 따른 Eq. (15)의  $A_1$ 의 변화를  $Bi$ 에 따라 나타내고 있다.

$$\theta_{plane\ wall}(z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4\sin(\lambda_n)}{2\lambda_n + 4\sin(\lambda_n)} e^{-\lambda_n^2 \tau} \cos\left(\frac{\lambda_n z}{L}\right) \quad (12)$$

where,  $\theta_{plane\ wall}(z, t)$  = dimensionless temperature  
(=  $(T(z, t) - T_i)/(T_\infty - T_i)$ )

$$\lambda_n \tan \lambda_n = Bi \text{ (eigenfunction)} \quad (13)$$

$Bi$  : Biot number

(dimensionless heat transfer coefficient, (=  $hL/k$ ))

$h$  : convection heat transfer coefficient

$k$  : heat conduction coefficient

$\tau$  : Fourier number(dimensionless time, (=  $\alpha t/L^2$ ))

$t$  : time

$$\theta_{plane\ wall}(z, t) = A_1 e^{-\lambda_1^2 \tau} \cos\left(\frac{\lambda_1 z}{L}\right) \quad (14)$$

$$\text{where, } A_1 = \frac{4\sin(\lambda_1)}{2\lambda_1 + 4\sin(\lambda_1)} \quad (15)$$

Table 1. Variation of  $\lambda_1$  and  $A_1$  for  $Bi$

$Bi$	Plane Wall		Long Cylinder	
	$\lambda_1$	$A_1$	$\lambda_1$	$A_1$
0.01	0.0998	1.0017	0.1412	1.0025
0.02	0.141	1.0033	0.1995	1.005
0.04	0.1987	1.0066	0.2814	1.0099
0.06	0.2425	1.0098	0.3438	1.0148
0.08	0.2791	1.013	0.396	1.0197
0.1	0.3111	1.0161	0.4417	1.0246
0.2	0.4328	1.0311	0.617	1.0483
0.3	0.5218	1.045	0.7465	1.0712
0.4	0.5932	1.058	0.8516	1.0931
0.5	0.6533	1.0701	0.9408	1.1143
0.6	0.7051	1.0814	1.0184	1.1345
0.7	0.7506	1.0918	1.0873	1.1539
0.8	0.791	1.1016	1.149	1.1724
0.9	0.8274	1.1107	1.2048	1.1902

일차원 원통형에서의 열에너지 전달에 따른 온도의 변화는 일차원 평면과 유사한 방법으로 방향만을 고려

하여 긴 원통형(Long Cylinder) 문제로 가정할 수 있으며, 새로운 온도함수, 열전도 미분방정식, 경계조건 및 초기조건을 다음 Eq. (16)~Eq. (20)과 같이 설정할 수 있다. 주어진 미분방정식을 풀면 Eq. (21)과 같이 실린더에서의 열에너지 전달에 따른 온도변화는 다음 Eq. (21)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} & \text{Temperature Variable} \\ \theta(r,t) &= T(r,t) - T_\infty \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} & \text{Differential Equation for Long Cylinder} \\ \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} &= \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} & \text{Boundary Condition for Long Cylinder} \\ \frac{\partial \theta(0,t)}{\partial r} &= 0 \end{aligned} \quad (18)$$

$$-k \frac{\partial \theta(r_0,t)}{\partial r} = h[\theta(r_0,t)] \quad (19)$$

$$\begin{aligned} & \text{Initial Condition for Long Cylinder} \\ \theta(r,0) &= T_i - T_\infty \end{aligned} \quad (20)$$

where,  $T_i$  : initial temperature of specimen

$$\theta_{longcylinder} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_1(\lambda_n)}{\lambda_n J_0^2(\lambda_n) + J_1^2(\lambda_n)} e^{-\lambda_n^2 \tau} J_0\left(\frac{\lambda_n r}{r_0}\right) \quad (21)$$

where,  $\theta_{longcylinder}(r,t)$  = dimensionless temperature  
(=  $(T(r,t) - T_i)/(T_\infty - T_i)$ )

$J_0$ : zeroth order Bessel function of the first kind

$J_1$ : first order Bessel function of the first kind

$Bi$  : Biot number

(dimensionless heat transfer coefficient, (=  $hr_0/k$ ))

$\tau$  : Fourier number(dimensionless time,  
(=  $\alpha t/r_0^2$ ))

한편 Eq. (21)에서  $J_0$ 와  $J_1$ 는 각각 발산하지 않는 제 1종의 영위수와 1위수 Bessel 함수를 나타내는데, 이들은 조건에 따라 미분방정식의 계수가 변화하는 선형상

미분방정식을 의미한다.  $\lambda_n$ 에 따른 Bessel 함수의 값의 변화는 Fig. 3이나 Table 2에 나타난 바와 같으므로, Bessel 함수의 해를 계산하기 어려운 경우에는 활용할 수 있다.

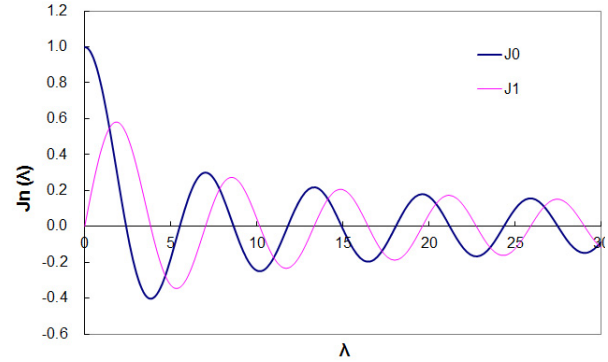


Fig. 3 Values of Bessel Function of The First Kind

Table 2. Values in Bessel Function of The First Kind

$\lambda_n$	$J_0(\lambda_n)$	$J_1(\lambda_n)$
0	1	0
0.1	0.9975	0.0499
0.2	0.99	0.0995
0.3	0.9776	0.1483
0.4	0.9604	0.196
0.5	0.9385	0.2423
0.6	0.912	0.2867
0.7	0.8812	0.329
0.8	0.8463	0.3688
0.9	0.8075	0.4059
1	0.7652	0.44
1.1	0.7196	0.4709
1.2	0.6711	0.4983
1.3	0.6201	0.522
1.4	0.5669	0.5419
1.5	0.5118	0.5579

일차원 원통형 좌표계에서도  $\tau > 0.2$ 인 경우, Eq. (21)에서  $n = 1$ 로 가정하여 다음 Eq. (22)와 같이 단순하게 표현될 수 있다.

$$\theta_{longcylinder} = A_1 e^{-\lambda_1^2 \tau} J_0\left(\frac{\lambda_1 r}{r_0}\right) \quad (22)$$

한편, 2차원 열역학의 해는 1차원 열역학 해의 곱의 관계에 있으므로, 실험에 사용되는 짧은 원통형 시편에서의 무차원 온도  $\theta_{shortcylinder}$ 는 일차원 평면과 긴 원통의 곱으로 표현된 다음 Eq. (23)과 같이 나타내어 질 수 있다. 따라서 원통 내에서의 임의의 위치와 시간에

따른 온도는 Eq. (14), Eq. (15)와 Eq. (22)를 이용하여 다음 Eq. (24)와 같이 표현될 수 있다.

$$\theta_{short\ cylinder} = \theta_{plane\ wall} \times \theta_{long\ cylinder} \quad (23)$$

$$T(r, z, t) = T_{\infty} + \theta_{short\ cylinder} \times (T_i - T_{\infty}) \quad (24)$$

### 3. 실내실험

#### 3.1. 실험조건

정상상태에서 재료의 열류(Heat Flux)나 열전도율을 측정하기 위한 실험방법으로는 ASTM C177을 적용할 수 있으며, 이외에도 Arizona State University의 Calson et al.(2010)이 제시한 방법을 적용할 수 있다. 그러나 이들 방법은 재료의 열전도율만을 측정하기 위한 방법으로 단열에 필요한 장비와 일정한 열에너지를 발생시킬 수 있는 장비가 필요하기 때문에 이론적 열역학 모형을 검증하기에는 많은 비용과 시간이 소모된다. 따라서 본 연구에서는 항온기 내의 시편 내·외부의 온도 변화를 측정하여 검증에 이용하는 간단한 실험을 선정하였다. 이를 위하여 국내에서 일반적으로 사용하는 공극률 5%~6%, 반경 0.05m, 높이 0.15m의 코어링 및 커팅을 통하여 제작된 실린더 형태의 일반적인 밀입도



Fig. 4 Specimen and Environmental Chamber

아스팔트 혼합물에 온도를 측정할 수 있는 열전대(Thermocouple)를 시편 중심과 높이방향 중심부 표면에 매립 및 부착하였다. 실험에는 가로×세로×높이 0.58×0.565×1.0m, 정밀도 ±0.2℃의 EN Standard Tester의 항온기를 이용하였으며, Fig. 4는 실험에 사용된 원통형 시편과 EN Standard Tester를 나타낸다.

### 4. 열역학 이론을 이용한 온도변화 예측

#### 4.1. 실린더 시편의 온도 측정 결과 및 예측

다양한 아스팔트 혼합물의 열전도율, 비열(Specific Heat), 열확산율(Thermal Diffusivity) 등의 범위 등에 대한 연구는 상대적으로 많지 않은 연구자들에 의하여 수행되었으며, Table 3은 이들이 연구결과로 제안한 결과를 정리하여 나타내고 있는데, 이들 열역학 물성은 아스팔트 혼합물의 입도 및 공극에 따라 다른 것으로 알려져 있다.

Table 3. Thermodynamic Material Properties

Thermal Conductivity (W/m°C)	Specific Heat (J/kg°C)	Thermal Diffusivity a×10 <sup>-6</sup> (m <sup>2</sup> /s)	Source
0.76			Turner and Malloy
0.80 ~ 1.06	850 ~ 870	0.37 ~ 0.53	Jordan and Thomas
1.21	920	0.59	Corlew and Dickson
1.21 ~ 1.38	840 ~ 1090		Tegeler and Dempsey
1.49			Kersten
0.85 ~ 2.32			O' Blenis
2.28 ~ 2.88		1.15 ~ 1.44	Kavianipour
1.611 ~ 1.624		0.51 ~ 0.57	Luca et al.
1.35	820 ~ 910	0.58 ~ 0.65	Nguyen et al.
0.6 ~ 2.6	900	0.51 ~ 1.25	Bruce et al.

일반적으로 재료의 열역학적 물성은 Fig. 5~Fig. 10과 같은 시간-온도곡선의 기울기를 결정하는데 역할을 하고 있으나, 다른 밀도가 높은 재료에 비해서는 민감도는 상대적으로 크지 않은 것으로 고려된다. 따라서 본 연구에서는 실험에서 사용된 혼합물과 가장 유사한 밀입도 혼합물을 사용한 Chadbourn et al. (1996)의 제안값에 따라 비열 900J/kg°C, 밀도 2000kg/m<sup>3</sup>을 재료 계수로 활용하였으며, 열전도율은 1.0W/m°C, 열전달계수는 7W/m<sup>2</sup>°C을 이용하였다. 따라서 밀도, 비열, 열전

도율의 함수인 열확산율은  $0.56E-6m^2/s$ 으로 계산되었다. 열역학적 재료물성은 온도에 따라 변화하지 않는 것으로 가정하였는데, 다음 Table 4는 시편의 크기, 유도된 미분방정식 Eq. (24)와 Table 3의 재료상수를 적용하여 목표온도  $-5^{\circ}C$ 의 실험조건에 대하여 중심부의 온도변화를 예측한 예를 나타내고 있다.

Table 4. Temperature Prediction Example (@ $-5^{\circ}C$ )

Plane Wall				Long Cylinder				Short Cylinder	
x	0			r	0	J0	0.99		
t (sec)	$\tau$	$\theta_{wall}$	T (x,t)	t (sec)	$\tau$	$\theta_{cyl}$	T (r,t)	$\theta_{wall} \times \theta_{cyl}$	T (x,r,t)
0	0	1.07	18.1	0	0	1.08	18.3	1.15	20.0
360	0.03	1.05	17.8	360	0.08	1.00	16.6	1.06	17.9
720	0.07	1.03	17.4	720	0.16	0.93	15.1	0.96	15.9
1080	0.10	1.02	17.1	1080	0.24	0.86	13.7	0.88	14.1
1440	0.14	1.00	16.7	1440	0.32	0.80	12.3	0.81	12.5
1800	0.17	0.99	16.4	1800	0.4	0.74	11.1	0.74	11.0
2160	0.21	0.97	16.0	2160	0.48	0.69	9.99	0.67	9.63

Table 5는 열역학 모형에서 온도를 예측하기 위하여 측정된 항온기 내 공기의 온도(Air Temperature in Chamber)와 시편 중심부의 온도(Initial Temperature of Specimen)를 나타내고 있다. 실제로는 항온기 내의 공기의 온도는 약 20분이 지나야 목표온도에 도달하지만, 온도 조절을 시작한 초기에도 항온기 내의 온도와 시편 중심부의 온도가 충분히 크기 때문에 측정된 항온기 내의 공기의 온도를 경계조건으로 적용할 필요는 없다.

Table 5. Target, Air, and Specimen Temperatures

Target Temperature ( $^{\circ}C$ )	Air Temperature in Chamber ( $^{\circ}C$ )	Initial Temperature of Specimen ( $^{\circ}C$ )
-5.0	-5.0	16.6
6.0	6.0	-4.7
10.0	10.0	5.1
21.0	21.0	18.1
31.0	31.0	19.8
41.5	41.5	20.2

Fig. 5~Fig. 10은 예측에 고려된 목표온도  $-5^{\circ}C$ ,  $6^{\circ}C$ ,  $10^{\circ}C$ ,  $21^{\circ}C$ ,  $31^{\circ}C$  및  $41.5^{\circ}C$ 에서 측정된 항온기 내부의 공기(Air in Chamber), 시편 중앙부(Specimen Center), 시편 표면(Specimen Surface) 및 유도된 열역학 미분방정식을 이용한 시편 중앙부에서의 온도 예측(Prediction(Center))을 나타내고 있다.

일반적으로 목표온도가 항온기 내의 공기의 온도보다 높을 경우, 항온기 내의 공기온도는 온도설정 후 20분 즈음에 목표온도 이상으로 올라가고 이후 점차 온도가 내려가면서 안정화되는 경향을 나타내었으며, 목표온도가 낮을 경우에는 Fig. 5와 같이 완만하게 감소하는 경향을 나타내었다. 이와 같은 항온기 내의 공기의 온도는 항온기의 크기와 가열기 및 냉각기의 성능에 따라 달라지는 것이 일반적이다. 시편의 내·외부 온도는 모든 경우에서 유사한 경향을 나타내었으나, 시편 내·외부의 온도차가  $1^{\circ}C$  이하로 매우 작아지는 조건은 초기온도와 목표온도의 변화에 따라서 달라지는 것이 확인되었다.

한편 열역학 모형을 이용한 예측결과는 Fig. 8을 제외한 모든 경우에서 매우 정확한 것으로 나타났으며, 이는 예측에 사용된 열역학 재료물성, 열역학 모형에서의 가정 및 경계조건이 매우 만족할만한 상태인 것을 나타낸다. 한편 일부 문헌에서는 온도에 따라 아스팔트 혼합물의 열전도율이 달라지는 온도 종속적 열전도율(Temperature Dependent Thermal Conductivity Coefficient)에 대한 연구를 진행한 바 있으나, 주어진 원통형에서는 이에 대한 온도분포의 변화가 민감하지는 않은 것으로 확인되었다. 그러나 바인더의 종류, 골재의 종류 및 입도, 공극률 및 재료의 형태에 따른 열전도율의 변화가 있을 것으로 예상되므로, 이들 변수의 실제 포장 구조에 대해서 고려한 검증이 필요할 것으로 판단된다.

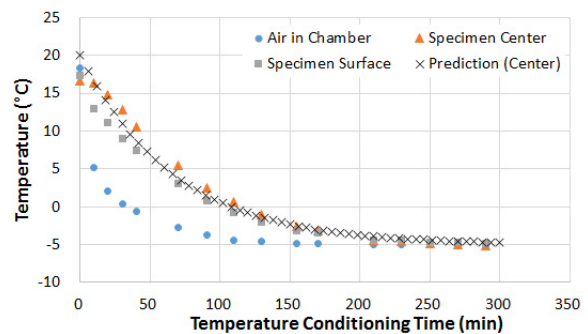


Fig. 5 Comparison of Test Result with Prediction at  $-5.0^{\circ}C$

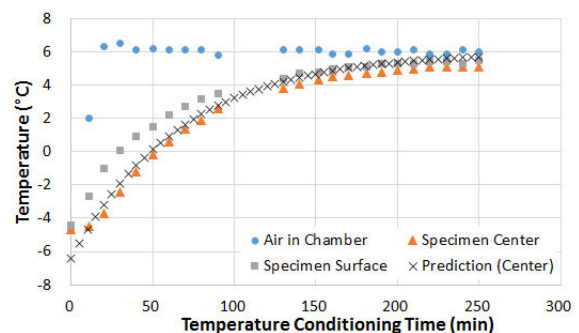


Fig. 6 Comparison of Test Result with Prediction at  $6.0^{\circ}C$

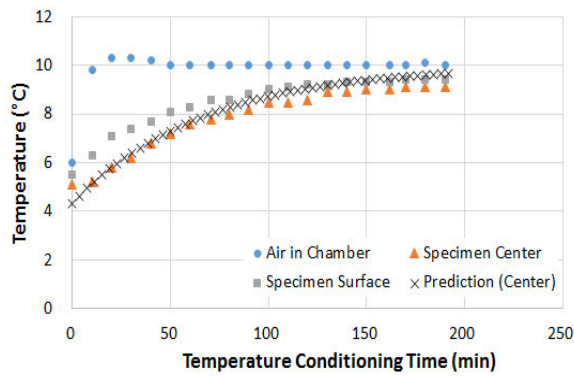


Fig. 7 Comparison of Test Result with Prediction at 10.0°C

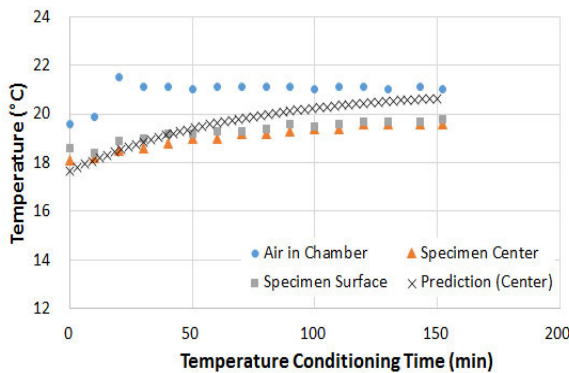


Fig. 8 Comparison of Test Result with Prediction at 21.0°C

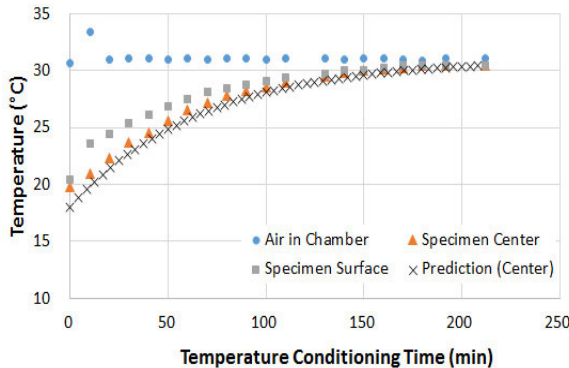


Fig. 9 Comparison of Test Result with Prediction at 31.0°C

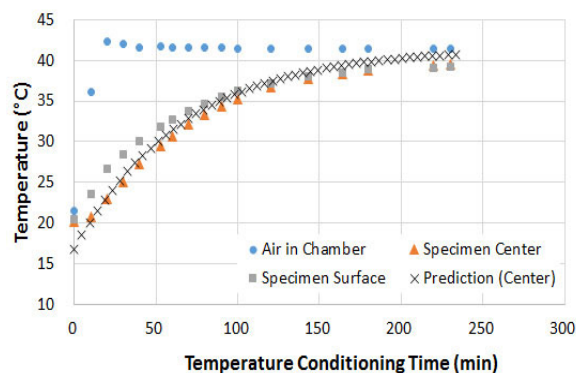


Fig. 10 Comparison of Test Result with Prediction at 41.5°C

## 5. 결론 및 요약

본 연구에서는 열역학 이론과 기존 문헌의 연구결과를 이용하여 향온기 내의 원통형 아스팔트 혼합물 시편에 대한 온도변화를 예측하였으며, 이에 대한 결론은 다음과 같다.

1. 향온기 내의 공기의 온도변화로 실험시편의 온도의 변화는 열역학 이론에 근거한 미분방정식을 유도하여 비교적 정확하게 예측할 수 있다.
2. 향온기 내의 원통형 시편의 온도 예측을 위해서는 대류와 전도에 의한 열에너지 전달방법을 고려하는 것이 타당하며, 주어진 시편의 형태는 긴 원통형과 평면의 조합으로 가정하는 것은 합리적이다.
3. 아스팔트 혼합물의 기본적인 열역학적 재료물성으로 여러 문헌에서 제시된 값들은 이상에서 주어진 조건을 개략적으로 예측하는데 충분히 사용될 수 있다.
4. 향온기가 짧은 시간동안 공기의 온도를 충분히 상승시킬 수 있으며, 주어진 아스팔트 혼합물과 같이 열전도율 및 밀도가 다른 재료에 비하여 상대적으로 매우 낮은 경우에는 향온기 내의 온도를 목표온도와 동일한 것으로 가정하는 것은 실용적 측면에서 가능하다. 그러나 동탄성계수의 보정을 위하여 사용되는 알루미늄 시편 등 다른 재질의 시편을 사용하거나 다른 형태의 시편을 사용하는 경우에는 추가적인 검증이 필요할 것으로 판단된다.
5. 향후 도로포장 재료로 사용될 것으로 예측되는 흑연(Graphite) 또는 탄소나노튜브(Carbon Nanotube) 및 새로운 재료에 대하여 시공에서의 작업성뿐만이 아닌 품질확보를 위한 기준의 근거를 마련하기 위해서는 열역학적 분석이 필요하며, 이는 도심열섬화현상을 평가하기 위한 기초자료로도 활용될 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업 재원으로 수행되었습니다.

### References

- ASTM C177. Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus
- Carlson, JD, 2010. Determining Thermal Conductivity of Paving Materials Using Cylindrical Sample Geometry, Journal of Materials in Civil Engineering Vol 22. Issue 2. 186-195.
- Corlew, J.S. Dickson, P.F., 1968. Methods for Calculating



- Temperature Profiles of Hot-Mix Asphalt Concrete as Related to the Construction of Asphalt Pavements. Asphalt Paving Technology Proceedings: Association of Asphalt Paving Technologists Technical Sessions, Vol. 37, 101-140.
- Chadbourn BA, Luoma JA, Vewcomb DE, Voller VR. 1996, Consideration of Hot-mix Asphalt Thermal Properties during Compaction, American Society of Testing and Materials, STP1299. 127-141.
- Fwa TF, Low BH, Tan SA, 1995, Laboratory Determination of Thermal Properties of Asphalt Mixture by Transient Heat Conduction Method, Paper prepared for the 74th Annual Meeting of the Transportation Research Board, January 22-28, Washington, D.C.
- Latif MJ. 2009. Heat Conduction. Third Edition. Springer.
- Luca J and Mrawira D, 2005, New Measurement of Thermal Properties of Superpave Asphalt Concrete, Journal of Materials in Civil Engineering. No 17. 72-79.
- Park DW and Kim IT, 2013, Thermal Properties of Permeable Friction Asphalt Mixture and Estimation of Temperature Profiles. International Journal of Pavement Engineering. Vol. 14 Issue 8 752-759
- Rhee SK, Kim IT, Heo JM, Jeon JM, and Han YJ, 2009, Characterization Thermal Property of Pavement Materials. Proceeding: International Journal of Highway Engineering. No 11. 597-602.
- Tegeler, P.A. and Dempsey, B.J., 1973. A Method of Predicting Compaction Time for Hot-Mix Bituminous Concrete. Asphalt Paving Technology, Proceedings: Association of Asphalt Paving Technologists Technical Sessions, Vol. 42, pp. 499-523.