

DEM을 이용한 아스팔트 혼합물의 열전도 예측

Heat Transfer Analysis of Cylindrical Asphalt Specimen using DEM

윤 태 영 Yun, Taeyoung | 정회원 · 한국건설기술연구원 수석연구원 · 교신저자 (E-mail : tyun@kict.re.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : Conductive and convective heat transfer simulations for an asphalt mixture were made by using discrete element method (DEM) and similarity principle.

METHODS : In this research, virtual specimens composed of discrete element method particles were generated according to four different predetermined particle size distribution curves. Temperature variations of the four different particles for a given condition were estimated and were compared with measurements and analytical solutions.

RESULTS : The virtual specimen with mixed particles and with the smallest particle show very good agreement with laboratory test results and analytical solutions. As particle size decreases, better heat transfer simulation can be performed due to smaller void ratio and more contact points and areas. In addition, by utilizing the similarity principle of thermal properties and corresponding time unit, analytical time can be drastically reduced.

CONCLUSIONS : It is concluded that the DEM asphalt mixture specimens with similarity principle could be used to predict the temperature variation for a given condition. It is observed that the void ratio has critical effect on prediction of temperature variation. Comparing the prediction for a 4 mm particle specimen with a mixed particle specimen, it is also concluded that predicting the mixed particle specimen temperature is much more efficient considering the number of particles that are directly associated with computational time in DEM analysis.

Keywords

heat transfer, DEM, similarity principle, asphalt mixture, analytical solution

Corresponding Author : Yun, Taeyoung, Senior Researcher
Highway Research Division, Korea Institute of Construction Technology,
283, Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, 10223, 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 May, 30, 2017 Revised Jul, 20, 2017 Accepted Jul, 25, 2017

1. 연구배경 및 목적

이산요소법 또는 개별요소법(DEM; discrete element method DEM)으로 알려진 입자 기반의 수치 해석 기법은 입상 물질의 동적 거동에 대한 예측이 필요한 다양한 공학 분야에서 활발하게 적용되고 있다. 도로 분야에서는 도로포장 재료에 대하여 Chang and Meegoda(1993)에 의하여 최초로 DEM 적용된 것으로

알려져 있으며, 이후 Buttlar and You(2001), Collope et al.(2004), Abbas et al.(2007)와 Liu and Cao.(2009) 등 많은 연구자들에 의하여 그 적용이 확대되었다. 이들 연구에서 DEM은 주로 반복하중 또는 단순하중에 의한 아스팔트 콘크리트 재료에서의 균열 진전(crack propagation) 또는 파손을 모사하기 위하여 활용되었으며, 파괴역학(fracture mechanics)

등의 역학적 이론에 근거한 접촉모형(contact model)이 적용되거나 x-ray CT 또는 3D laser scanner 등을 이용하여 골재의 형상적 특성을 보다 실질적으로 반영하는 방법이 적용되기도 하였다. 한편 Ormel(2012), Chen et al.(2012), Roussel and Coussot(2005) 등은 양생이 완료된 아스팔트 콘크리트 혼합물의 거동을 모사하는 것이 아니라, 다짐 또는 시편 제작 과정과 같은 혼합물의 양생이 완료되기 이전의 거동을 모사하기 위하여 DEM 또는 전산유체역학(CFD; computational fluid dynamics)을 활용한 바 있다. 양생이 완료되기 이전에 대한 수치해석 결과에서 얻어지는 양생이 완료된 시점에서의 골재, 바인더 및 공극의 분포 특성은 유한요소법(FEM; finite element method)이나 DEM을 이용하여 하중 등의 외부 조건에 대한 건설 재료의 수명을 예측하는 초기 조건으로 활용될 수 있는데, 이는 이전의 DEM과 파괴역학을 조합한 연구에서 설명하지 못한 초기 균열 발생(crack initiation) 조건을 설명할 수 있는 근거가 될 수 있다는 측면에서 그 의미가 매우 크다. 일반적인 고분자 화합물과 같이, 온도나 시간 조건에 따라 유동성이 민감하게 변화하는 재료에 대하여 양생이 완료되기 이전의 거동을 신뢰할 수 있는 수준으로 모사하기 위해서는 재료가 존재하는 환경조건의 변화에 따른 재료의 점성(viscosity)이나 항복응력(yield stress)의 변화가 고려된 구성모형이나 접촉모형이 필요하다. 그러나 아스팔트 콘크리트나 시멘트 콘크리트와 같은 건설 재료는 상기의 고분자 재료의 유동 특성을 가질 뿐만 아니라 작은 실험 시편 내에도 셀 수 없는 개수의 미분(fine particle)을 포함하는 것이 일반적이다. 이로 인하여 건설 재료의 혼합 및 다짐 과정은 물론, 비교적 단순한 조건인 양생이 완료된 혼합물에 대해서도 주변 환경과의 상호작용 등에 의하여 발생하는 과도적(transient) 온도의 변화와 이에 따른 재료물성의 변화조차도 DEM 또는 CFD 등을 이용한 수치해석 기법에 활용되지는 못하고 있다. 이러한 해석시간의 문제는 큰 입자 활용 방법(coarse graining method)이나 상사성 이론(similarity principle) 등과 같이 해석 규모를 축소시키거나 입자 수를 저감하는 방법을 활용하여 해결할 수 있는데, 본 연구에서는 최종적으로 조건이 매우 복잡한 양생이 완료되기 이전의 아스팔트 콘크리트의 물성 변화 모사에 상사성 이론을 적용하기 위하여, 조건이 비교적 단순한 양생이 완료된 이후의 아스팔트 콘크리트 혼합물의 열전달 조건에 대한 상사성 이론의 적용 타당성 및 가능성을 확인하고자 하였다. 이를 위하여 4가지 입도가 다른 가상의 DEM 시편을 활용하여 외기 온도 조건에 따

른 시편 내부 온도의 변화를 예측하였으며, 이를 실측자료 및 분석적 해(analytical solution)를 이용하여 검증하였다.

2. 아스팔트 콘크리트 시편의 온도 변화

2.1. 온도 변화 조건 및 측정 방법

항온기 내부의 공기의 온도의 변화에 따른 원통형 아스팔트 콘크리트 시편의 온도변화를 측정하기 위하여, 코어링 및 커팅을 통하여 반경 0.05m, 높이 0.15m의 실린더 형태로 아래 Fig. 1과 같이 제작된 공극률 5.5%의 밀입도 아스팔트 혼합물이 활용되었다(Yun and Yoo 2014). 혼합물 시편의 내부와 외부 온도를 동시에 측정할 수 있는 열전대(thermocouple)가 시편 중심과 중심부 측면 표면에 매립 및 부착되었으며, 가로×세로×높이가 0.58×0.565×1.0m, 정밀도가 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 의 EN Standard Tester의 항온기를 이용하여 온도를 조절하였다. Fig. 1은 실험에 사용된 원통형 시편과 EN Standard Tester를 나타내고 있으며, Fig. 2는 Fig. 1을 도식화한 것으로, 높이 $2L$, 지름 $2r_0$ 의 아스팔트 콘크리트 시편 내 임의의 위치(r, z)에서, 시간 t 에 따른 온도 $T_i(r, z, t)$ 의 변화에 영향을 미치는 조건을 나타내고 있다. 시편의 온도는 시편의 온도보다 높거나 낮



Fig. 1 Cylindrical Specimen with Thermocouple in a Temperature Conditioning Chamber

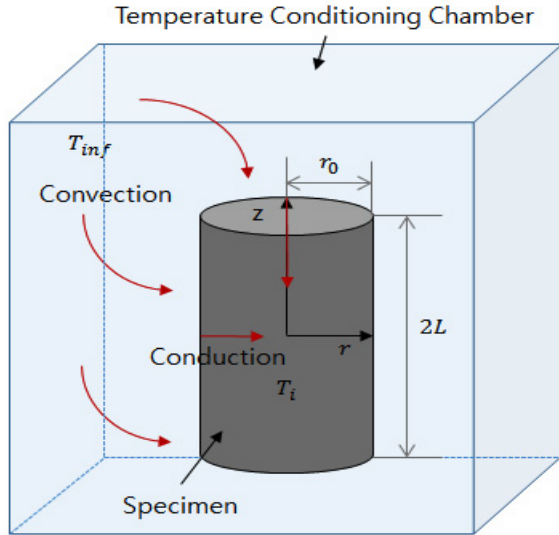


Fig. 2 Schematic Description of Heat Transfer

Table 1. Target and Initial Temperatures

Target temperature (°C)	Air temperature in chamber (°C)	Initial temperature of specimen (°C)
-5.0	-5.0	16.6

은 항온기 내 공기에 의하여 외부로부터 내부로 대류 (convection)와 전도(conduction)를 통하여 변화하는데, Table 1은 이들에 영향을 미치는 목표 공기의 온도 (target temperature) 또는 항온기 내 공기의 온도 (air temperature in chamber)와 시편 중심부의 초기 온도(initial temperature of specimen)를 나타내고 있다. 본 연구에서는 Chadbourn et al.(1996)의 문헌을 참고하여 시편의 열 물성을 결정하였으며, 이 때 비열, 밀도, 열전도율, 열전달계수 및 열확산율은 각각 900J/kg°C, 2,356kg/m³, 1.0W/m°C, 7W/m²°C 및 0.56E-6m²/s이다.

2.2. 분석적 해를 이용한 온도변화 예측

이론적으로 2차원 열역학의 해는 1차원 열역학 해의 곱의 관계에 있으므로, 실험에 사용되는 짧은 원통형 시편에서의 무차원 온도 $\theta_{short\ cylinder}$ 는 일차원 평면과 긴 원통의 곱으로 표현되며, 원통 내에서의 임의의 위치와 시간에 따른 온도는 Eq. (1)과 같이 표현된다. Eq. (1)을 유도하기 위한 일련의 가정과 절차가 필요하지만, 구체적인 내용은 Yun and Yoo(2014)의 연구에서 확인할 수 있다.

$$T(r, z, t) = T_{\infty} + \theta_{short\ cylinder} \times (T_i - T_{\infty}) \quad (1)$$

where, $\theta_{short\ cylinder} = \theta_{plane\ wall} \times \theta_{long\ cylinder}$,

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

$$A_1 = \frac{4 \sin(\lambda_1)}{2\lambda_1 + 4 \sin(\lambda_1)},$$

$\theta_{plane\ wall}(z, t)$ = dimensionless temperature

$$\left(= A_1 e^{-\lambda_1^2 \tau} \cos\left(\frac{\lambda_1 z}{L}\right) \right),$$

$\lambda_n \tan \lambda_n = Bi$ (eigenfunction)

Bi = Biot number,

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

h = convection heat transfer coefficient,

k = heat conduction coefficient,

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

t = time,

$\theta_{long\ cylinder}(r, t)$ = dimensionless temperature

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

J_0 = zeroth order Bessel function of the first kind, and

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

2.3. DEM을 이용한 온도변화 예측

Fabrication of DEM Specimen

정지 마찰계수(static friction coefficient), 회전 마찰계수(rolling friction coefficient), 반발계수(restitution coefficient) 및 탄성계수 등으로 대표되는 부착력이 없는 DEM 입자의 역학적 물성(mechanical property)은 골재 혼합물의 지름별 중량비를 나타내는 입도분포와 함께 특정한 하중조건에서 다져지는 아스팔트 콘크리트 혼합물의 다짐도 또는 공극률(void ratio)에 큰 영향을 미치는 중요한 인자이다. 특히 다짐이 완료된 시점에서 아스팔트 콘크리트의 공극률은 골재를 표현하는 입자와 입자 사이의 접촉점의 개수나 접촉면의 크기와 직접적으로 관련되어 있으므로, 개별 입자의 밀도 및 열 물성(thermal property)과 함께 아스팔트 콘크리트 혼합물 내에서의 열전달을 결정하는 중요한 요소로 이해

할 수 있다. 그러나 공극률이 입도분포 및 입자의 수에 큰 영향을 받음에도 불구하고 DEM을 이용한 수치해석에서는 고려되는 입자 수에 따라 해석시간이 기하급수적으로 증가되므로, 실제 시편과의 차이가 발생하더라도 골재를 표현하는 DEM 입자의 최소 크기를 결정하고 이보다 작은 골재에 대해서는 적절한 가정을 적용하는 것이 합리적이다(Chen et al. 2012). 따라서 본 연구에서는 일반적인 밀입도 아스팔트 콘크리트 혼합물 제작에 사용되는 골재를 표현하기 위하여 밀도 $2,600\text{kg/m}^3$, 지름 13mm, 8mm, 4mm의 3가지 구형 입자만을 활용하였으며, 주어진 입도분포에 따라 이들 입자의 개수를 결정하였다. 또한 위의 3가지 입자가 단일 입도로서 시편을 구성하는 조건을 포함하여 총 4개의 입도 조건을 활용하였다. 이들 DEM 입자 사이의 접촉모형으로는 부착(bonding) 관계를 나타내지 않는 Hertz-Mindlin을 적용하였는데, 어떠한 접촉모형을 활용하더라도 열전달이 접촉점의 수와 면적에 변화를 발생하지 않는다면 접촉모형의 종류가 큰 영향을 미치지 않는다는 점이다. DEM 입자로 구성된 가상의 원통형 아스팔트 콘크리트 시편의 생성을 위하여 DEM 입자가 원통형 시편의 상단부에서 발생(generation)하여 자유낙하되도록 설정하였다. 높이 160mm의 실린더가 DEM 입자로 가득 차고 입자의 운동이 충분히 안정화(stabilization) 되면, 상부의 원형 평면이 입자를 압축(compaction)하도록 하향으로 10mm 이동시켜 다짐을 유도하였으며, 최종적으로는 분리된 상부 원형 평면과 높이 160mm 실린더를 목표 높이 150mm의 실린더와 교환(replacement)하여 골재와 대기와의 대류를 표현할 수 있는 경계가 입자를 구속하여 아스팔트 콘크리트 시편을 형성하도록 하였다. Fig. 3은 위의 방법에 따라 3가지 입자로 구성된 시편을 생성하기 위한 절차를 대표적으로 나타내고 있으며, 단일입도로 구성된 시편도 이와 유사한 방법으로 형성되었다.

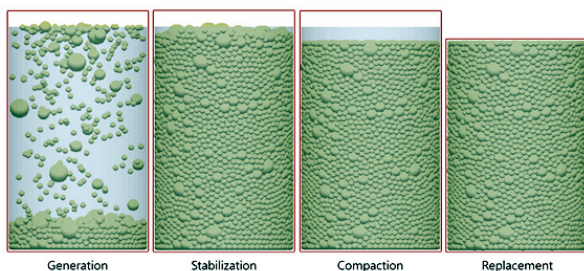


Fig. 3 Particle Specimen Generation Process

Adjustment of Bulk Density

위의 방법으로 생성된 3개의 입자로 구성된 가상 시편

의 총중량은 2.198kg으로 실제 시편의 총중량 2.356kg과 서로 다를 수 밖에 없는데, 이는 당연히 두 시편의 겉보기 밀도(bulk density)에도 차이를 발생시킨다. 총중량을 총부피(0.001178m^3)로 나누어 계산하는 겉보기 밀도는 열전달에 큰 영향을 미치므로, 3가지 입자로 구성된 가상 시편이나 단일입자로 구성된 시편의 겉보기 밀도는 합리적인 방법을 통하여 실제 시편과 유사한 수준으로 조정되어야 할 필요가 있다. 본 연구에서는 이를 위하여 굵은 골재를 나타내는 13mm, 8mm, 4mm의 DEM 입자들 표면에 4mm 미만의 잔골재와 아스팔트 바인더가 굵은 골재를 표현하는 입자의 표면에 비례하여 Fig. 4와 같이 부착되어 있는 것으로 가정하였다.

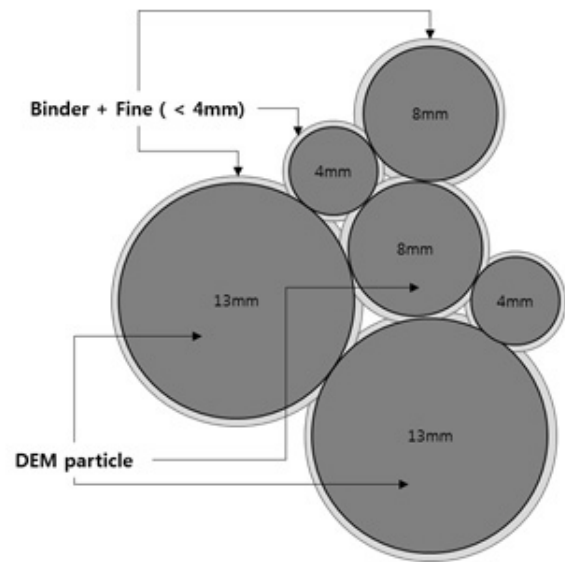


Fig. 4 Consideration of Fine Aggregates and Binders

Table 2는 3가지 굵은 골재가 혼합되어 생성된 대표적 가상 시편 제작에 사용된 굵은 골재를 나타내는 입자의 지름(diameter), 개수(number of particles), 표면적의 합(surface area of particles), 부피의 합(volume of particles), 무게의 합(mass of particles)을 나타내며, 이들 굵은 골재에 부착된 잔골재와 바인더의 무게(mass of fine aggregates and binder), 조정된 굵은 골재의 무게(adjusted mass of particles) 및 밀도(adjusted density of particles)를 나타낸다.

Table 2의 마지막 컬럼에서 입자의 지름이 작을수록 특정한 무게에 대한 표면적이 커지므로, 굵은 골재의 지름이 작을수록 밀도가 더 작은 값으로 조정되는 것을 확인할 수 있다. 가상적으로 부착된 잔골재와 아스팔트 바인더의 총중량은 가상 시편과 실제 시편의 총중량 차이

Table 2. Volumetric Properties Used in Adjusted Density of Particles

Diameter (mm)	Number of particles	Surface area of particles (m ²)(a)	Volume of particles (m ³)(b)	Mass of particles(kg)(c)	Mass of fine aggregates and binder (kg)(d)	Adjusted mass of particles (kg)(e)	Adjusted density of particles (kg/m ³)(f)
13	197	1045.93 (1.48%)	0.0002266183	0.589207482	0.002335739	0.591543221	2,565
8	760	4035.06 (5.70%)	0.0002037428	0.529731164	0.009010972	0.538742136	2,460
4	12,385	65755.58 (92.82%)	0.0004150253	1.079065867	0.146843266	1.225909133	1,847
Total		70836.56 (100%)	0.0008453861(g)	2.198004514(h)	0.158189976 (i)	2.35619449	
				(c)=(b)x 2600kg/m ³	(i)=2.356kg-(h) (d)=(i)x(a)	(e)=(c)+(d)	(f)=(e)/[(b)+(d) / (i)x (0.001178x94.5%-(g))]

인 0.158kg와 같으며, 단일입도로 구성된 아스팔트 콘크리트 시편의 총중량도 2.356kg이 되도록 유사한 방법으로 입자의 밀도를 조정하여, 각 가상 시편은 공극률, 접촉점의 수, 접촉면의 면적을 제외하고 모든 역학적 물성 및 열물성이 동일한 조건이 될 수 있도록 하였다.

Determination of Wall Conductive Heat transfer Coefficient

한편 공기와 물체 사이의 대류로 인한 열전달률(heat flux rate)는 열유속(heat flux)에 시편의 표면적의 곱으로 표현된다. 여기에서 열유속은 다시 열대류계수(convective heat transfer coefficient, h)와 물체와 공기의 온도차로 다음 Eq. (2)와 같이 나타내어지는 것을 잘 알려진 사실이다.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{air-surface} \\ = \dot{q}_{air-surface} A_s = h A_s (T_{air} - T_{surface}) \end{aligned} \quad (2)$$

where, $\dot{Q}_{air-surface}$ = heat transfer rate b/w air and specimen,

$\dot{q}_{air-surface}$ = heat flux b/w air and specimen,

A_s = total contact area b/w particle and geometry,

h = convective heat transfer coefficient, and

T = temperature.

아스팔트 콘크리트 시편을 DEM 입자로 모사하는 조건에 대하여 대류(convection)에 의한 열전달 해석을 이론적으로 동일조건 하에서 수행하기 위해서는 항온기

의 형태와 공기의 흐름조건을 고려한 CFD와의 결합(coupling)을 통한 해석이 필요하지만, 이와 같은 방법은 DEM 하나만을 활용한 해석보다 훨씬 더 큰 계산 자원을 요구한다.

시편과 공기 사이의 열전달(heat transfer)이 대류가 아닌 시편과 이를 둘러싼 경계물질에 의한 전도(conduction)에 의하여 이루어진다고 가정할 수 있다면, CFD 없이 DEM만으로도 시편의 온도변화를 모사할 수 있다. 실제로 항온기 내의 공기의 온도가 목표온도에 도달하는 시간은 시편의 온도가 목표온도에 도달하는 시간에 비하여 상대적으로 매우 짧기 때문에 이러한 가정은 합리적으로 적용될 수 있다(Yun and Yoo 2014). 이와 같이 연속체 이론에 근거하여 열대류와 DEM과 경계물질로 단순화된 열전도가 서로 유사하게 고려될 수 있음은 Fig. 5와 같이 개념적으로 표현될 수 있다.

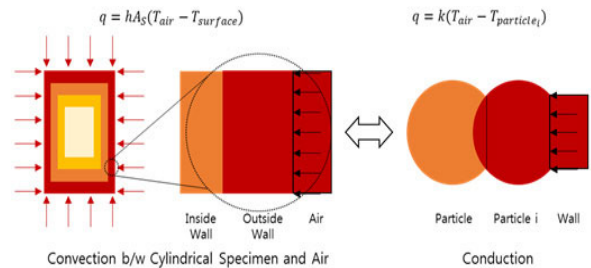


Fig. 5 Analogy of Heat Transfer for Quasi-static Condition

Chaudhuri et al. (2006)은 운동하는 DEM 입자 사이의 전도에 의한 열유속을 열전도계수와 입자와 입자 사이의 온도차이 곱으로 다음 Eq. (3)과 같이 제안한 바 있는데, Eq. (3)은 일정한 공극률과 형태를 유지하면서 존재하고 있는 원통형 아스팔트 콘크리트 시편과 같이 유사 정적(quasi-static) 조건의 입자에 대해서도 제약 없이 활용될 수 있다. 또한 앞서 언급한 바와 같이, 입자의 크기가 충분히 작고 공기의 온도가 일정하게 유지되

는 경우, 실제 실험을 통하여 결정될 수 있는 Eq. (2)의 열대류계수와 Eq. (3)의 입자 열전도계수(conductive heat transfer coefficient of particle, $k_{particle}$), 탄성계수, 압축력 및 지름 등을 활용하면 Eq. (3)에서 유일한 미지수인 경계 열전도계수(conductive heat transfer coefficient of wall, k_{wall})는 역산을 통하여 결정될 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{air-surface} &= \dot{Q}_{wall-particle} \\ &= \dot{q}_{wall-particle} A = k(T_{wall} - T_{particle}) \end{aligned} \quad (3)$$

where, A = contact area of particles with wall

k = conductive heat transfer coefficient

$$\left(= 4 \frac{k_{particle} \times k_{wall}}{k_{particle} + k_{wall}} \left(\frac{3}{4} \frac{F_N \times r^*}{E^*} \right)^{\frac{1}{3}} \right),$$

k_{wall} = conductive heat transfer coefficient of wall,

$k_{particle}$ = conductive heat transfer coefficient of particle,

F_N = mean normal force,

r^* = geometric mean of particles radii from Hertz's elastic contact theory,

E^* = equivalent Young's modulus

$$\left(\frac{1}{E^*} = \frac{(1 - \nu_{particle}^2)}{E_{particle}} + \frac{(1 - \nu_{wall}^2)}{E_{wall}} \right),$$

$E_{particle}$ = elastic modulus of particle,

E_{wall} = elastic modulus of wall,

ν_{wall} = poisson's ratio of particle, and

$\nu_{particle}$ = poisson's ratio of wall.

Application of Similarity Principle to Heat Transfer

상사성 이론을 적용하면 유사정적 조건에서 DEM을 이용한 열전달 모사는 열물성과 시간에 상사계수(scale factor)를 적용하여 해석시간을 크게 단축시킬 수 있다. 예를 들어, 초(second)가 기본 단위인 DEM 해석에서 위에서 사용된 열전도율 $1.0\text{kJ/s/m}^{\circ}\text{C}(=1.0\text{W/m}^{\circ}\text{C})$ 을 $60\text{kJ/min/m}^{\circ}\text{C}$ 로 환산하여 적용하는 동시에 시간단위의 초를 분으로 가정하면, 결과의 변화 없이 해석시간이 1/60로 단축될 수 있다. 열물성에 대하여 적용할 수 있

는 상사성 이론의 유도 및 적용 방법은 선행 논문(Yun and Park, 2016)에서 확인할 수 있다. Fig. 6은 상사성 이론을 적용하여 초기 중심의 온도가 16.6°C 인 시편이 목표온도 -5°C 로 변화하는 과정을 DEM을 이용하여 3가지 시간단위에 대하여 해석한 결과를 나타내고 있는데, 상사성 이론에 의하여 결정된 열전도율을 활용하여도 결과상의 차이가 전혀 없는 것을 확인할 수 있다.

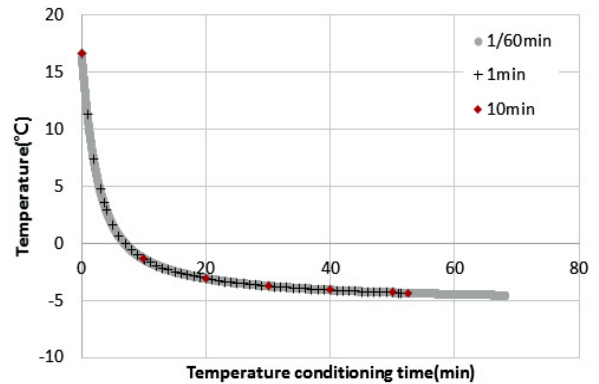


Fig. 6 Estimated Temperatures by Using Similarity Principle

3. 해석결과 비교

3.1. DEM을 이용한 입자조건별 해석결과 비교

Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9와 Fig. 10은 각각 13mm 단일 입도 시편, 8mm 단일입도 시편, 4mm 단일입도 시편 및 세 가지 입도가 혼합된 시편에 대하여 동일한 초기 시편 온도(16.6°C)와 공기 온도(-5.0°C) 조건에 의하여 시간에 따라 변화하는 시편 중심부의 온도를 시각적으로 나타내고 있다. 각 그림에서 0sec, 5sec, 10sec, 20sec, 30sec로 표현된 숫자는 상사계수 600이 적용되지 않은 최소시점으로 부더의 시간을 나타내고 있는데, 상사계수를 적용하면 실제 실험에서 사용된 시간인 0분, 50분, 100분, 200분, 300분 이후의 시간을 나타내는 것을 알 수 있다. Fig. 7~Fig. 9에서 가상의 시편의 총중량이 실제 시편과 동일한 총중량이 되도록 입자의 밀도를 조정했음에도 불구하고 입자의 지름이 작아질수록 시편의 온도 변화가 빨라지는 것을 명확하게 확인할 수 있는데, 이러한 사실을 근거로 공극이 줄어들수록 공극이 전혀 없는 연속체로 가정된 시편의 온도 변화의 양상과 동일해질 것임을 예측할 수 있다. Fig. 7의 13mm 입자만을 활용한 조건에서는 5시간이 지난 이후에도 시편의 온도가 평형을 이루지 못하였으며, 온도의 전달은 다짐도가 상대적으로 낮은 시편 상부에서 시편 하부보다

늦어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 DEM을 이용한 열전도 해석에서는 접촉점의 수와 접촉면의 넓이가 열전도에 미치는 영향이 매우 크기 때문이며, 연속체로 가정 한 해석과 유사한 결과를 얻기 위해서는 동일한 결보기 밀도를 발생시키도록 입자의 밀도를 조정하고 동일한 열물성을 활용하는 것으로는 부족하다는 것을 의미한다. 또한 다양한 온도 조건에서 매우 정확한 예측결과를

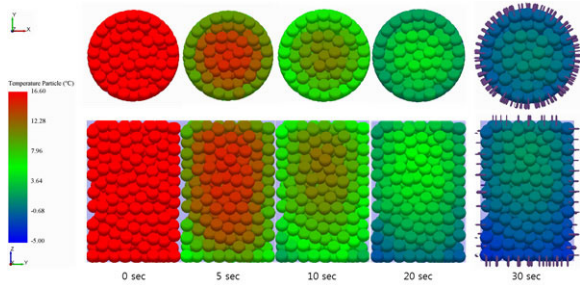


Fig. 7 Temperatures Variation of 13mm Particle Specimen

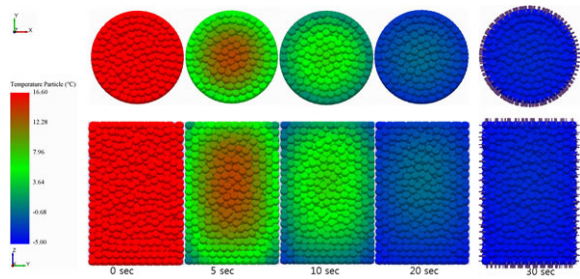


Fig. 8 Temperatures Variation of 8mm Particle Specimen

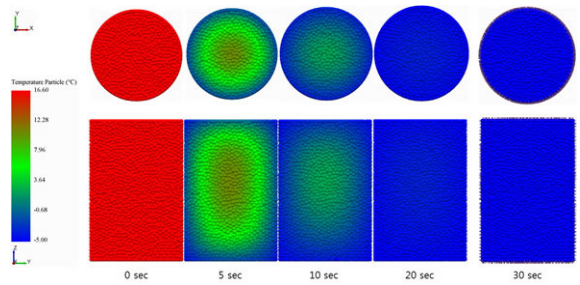


Fig. 9 Temperatures Variation of 4mm Particle Specimen

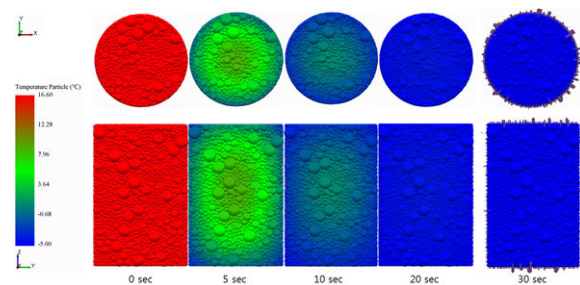


Fig. 10 Temperatures Variation of Mixed Particle Specimen

나타내는 분석적 해(Yun and Yoo 2014)는 실제 시편을 연속체로 가정한 만큼, DEM에서 신뢰할 수 있는 결과를 얻기 위해서는 시편의 공극률이 특정한 값보다 작아야 하는 것을 의미한다고도 이해할 수 있다. Fig. 10은 3개의 다른 지름으로 구성된 시편의 온도변화를 나타내고 있는데, 골재의 크기에 따른 열전도의 차이가 가시적으로 표현되는 것을 알 수 있으며, 이는 실제 실험실 실험에서 기대되는 결과와 유사하다. Fig. 7~Fig. 10에서 30sec에서의 짧은 직선은 입자와 경계와의 접촉을 나타내고 있는데, 입자의 크기가 작을수록 접촉력과 접촉수가 방향이나 위치에 따라 크게 달라지지는 않으나 입자의 크기가 커질수록 그 차이가 발생할 수 있으며, 이는 온도변화에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다.

3.2. 분석적 해와 DEM을 이용한 해석결과 비교

Fig. 11은 Fig. 7~Fig. 10에 활용된 가상의 DEM 시편에 대하여 시간에 따른 온도의 변화를 연속적으로 나타내고 있으며, 비교를 위하여 실측된 온도와 분석적 해를 활용하여 예측된 온도를 동시에 나타내고 있다. Fig. 11에서 알 수 있는 바와 같이, 공극률이 낮은 4mm 입자로 구성된 시편과 3개의 입자가 혼합되어 구성된 시편의 온도가 실측된 온도와 거의 일치하는 결과를 나타내는 것을 알 수 있다. 특히 3개의 입자가 혼합되어 구성된 시편의 온도는 분석적 해를 활용하여 예측한 결과보다 초기온도 변화 등에 대해서도 더 좋은 결과를 나타냈는데, 실제 혼합된 시편의 입자수가 4mm 입자만 활용한 시편에 비하여 입자수가 매우 작아 더 짧은 시간의 수치해석을 통하여 결과를 얻을 수 있음을 고려할 때, 본 연구에서 제안된 바와 같이 실제 시편의 입도분포를 고려하여 3가지 굵은 골재를 활용하고, 표면적에 비례하여 굵은 골재의 밀도를 조정하는 방법이 정확성이나 속도의 측면에서 매우 효율적인 것을 알 수 있다.

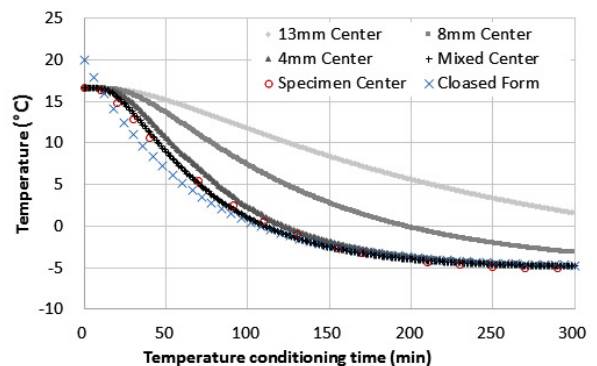


Fig. 11 Temperature Variation of Mixed Particle Specimen

4. 결론 및 요약

본 연구에서는 DEM을 이용하여 가상의 원통형 시편을 생성하여 열전달에 대한 해석을 수행하였으며, 여기에서는 지름은 13mm, 8mm, 4mm의 DEM 입자만이 고려되었다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. DEM을 이용하여 항온기 내의 실린더형 아스팔트 콘크리트 시편의 온도변화를 열전도만을 활용하여 모사할 수 있다.
2. DEM을 이용한 열전달 해석에서, 입자의 크기가 작아질수록 해석시간은 급격하게 증가하지만, 입자의 크기가 작아질수록 분석적 해 또는 실측결과와 매우 근접한 결과를 나타내었다. 이는 입자의 크기가 작아질수록 접촉점의 수와 접촉면의 넓이가 증가하여 연속체 조건에 가까워지기 때문이라고 추정할 수 있다.
3. DEM을 이용하여 아스팔트 콘크리트 시편의 열전도를 모사하는 방법으로는 3개의 굵은 골재의 표면적을 활용하여 이들의 밀도를 조정하는 방법이 가장 효율적이다.
4. DEM을 이용하여 시편의 열전도를 모사하는 방법은 다짐과정에 의한 국부적 다짐도 차이와 이로 인한 열전도의 차이를 표현할 수 있다. 이는 FEM과 같이 기존 연속체 기반 수치해석에서 얻을 수 없는 반면에 혼합물의 균열이 생성되는 초기조건을 제시할 수 있기 때문에 매우 중요한 의미를 갖는다.
5. 상사성 이론은 유사정적 조건의 입자에 대한 열전달 해석에 적용할 수 있으며, 결과의 차이 없이 해석시간을 크게 단축시킬 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 이공분야 기초연구사업 중 신진연구자 지원사업(NRF-2015R1C1A1A01051871)의 재원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Abbas, A, Masad, E, Papagiannakis, T, Harman, T, 2007. "Micromechanical modeling of the viscoelastic behavior of asphalt mixture using the discrete-element method", *International journal of geomechanics*, Vol.7, No.2, pp.131-139.
- Buttlar, WG, and You, Z. 2001. Discrete element modeling of asphalt concrete: Microfabric approach. *Transportation Research Record*. 1757, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp.111-118.
- Chadborn BA, Luoma JA, Vewcomb DE, Voller VR. 1996, Consideration of hot-mix asphalt thermal properties during compaction, *American society of testing and materials*, STP 1299, pp.127-141.
- Chang GK, Meegoda NJ. 1993, Simulation of the behavior of asphalt concrete using discrete element method, *Proc., 2nd Int. conf. on Discrete Element Method*, pp.437-448.
- Chaudhuri, B, Mehrotra, A, Muzzio, FJ, Tomassone, MS, 2006. Cohesive effects in powder mixing in a tumbling blender. *Powder technology*. Vol.165, pp.105-114.
- Chen, J, Huang, B, Chen, F, Shu, X. 2012. Application of discrete element method to Superpave gyratory compaction. *Road materials and pavement design*. Vol.13, No.3, pp.480-500.
- Collope, AC, McDowell GR, Lee Y, 2004. Use of the distinct element method to model the deformation behavior of an idealized asphalt mixture, *International Journal of Pavement Engineering*, Vol.5, Issue 1, pp.1-7.
- Liu, Q, Cao, D, 2009. Research on material composition and performance of porous asphalt pavement", *Journal of materials in civil engineering*, Vol.21, No.4, pp.135-140.
- Ormel, TJ, 2012. Modeling asphalt with discrete and continuum methods University of Twente.
- Roussel, N, Leroy, SR, 2005. From mini-cone test to abrams cone test: measurement of cement-based materials yield stress using slump tests, *cement and concretes research*, Vol.35, pp.817-822.
- Yun T, Park, HM, 2016. Feasibility study on similarity principle in discrete element method, *International journal of highway engineering*, Vol.18, No.2, pp.51-60.
- Yun, T, Yoo, PJ, 2014. Application and verification of thermodynamics by using cylindrical asphalt mixture specimen, *International journal of highway engineering*, Vol.16, Nu. 4, pp.87-95.