Int. J. Highw. Eng. Vol. 17 No. 4 : 25-31 AUGUST 2015
http://dx.doi.org/10.7855/IJHE.2015.17.4.025

선형 부착성 점탄성 접촉모형의 DEM 적용 및 해석적 방법을 이용한 검증

Implementation and Verification of Linear Cohesive Viscoelastic Contact Model for Discrete Element Method

윤 태 영 Yun, Tae Young | 정회원 · 한국건설기술연구원 수석연구원 · 교신저자 (E-mail : tyun@kict.re.kr)
유 평 준 Yoo, Pyeong Jun | 정회원 · 한국건설기술연구원 연구위원 (E-mail : pjyoo@kict.re.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : Implementation and verification of the simple linear cohesive viscoelastic contact model that can be used to simulate dynamic behavior of sticky aggregates.

METHODS : The differential equations were derived and the initial conditions were determined to simulate a free falling ball with a sticky surface from a ground. To describe this behavior, a combination of linear contact model and a cohesive contact model was used. The general solution for the differential equation was used to verify the implemented linear cohesive viscoelastic API model in the DEM. Sensitivity analysis was also performed using the derived analytical solutions for several combinations of damping coefficients and cohesive coefficients.

RESULTS : The numerical solution obtained using the DEM showed good agreement with the analytical solution for two extreme conditions. It was observed that the linear cohesive model can be successfully implemented with a linear spring in the DEM API for dynamic analysis of the aggregates.

CONCLUSIONS : It can be concluded that the derived closed form solutions are applicable for the analysis of the rebounding behavior of sticky particles, and for verification of the implemented API model in the DEM. The assumption of underdamped condition for the viscous behavior of the particles seems to be reasonable. Several factors have to be additionally identified in order to develop an enhanced contact model for an asphalt mixture.

Keywords
DEM, bouncing ball, linear cohesion, Voigt model, contact model, aggregate

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 Apr. 20. 2015 Revised Jul. 27. 2015 Accepted Jul. 30. 2015

1. 연구배경 및 목적

아스팔트 혼합물은 플랜트에서 가열, 이송, 혼합, 배출 등의 여러 가지 공정을 거쳐 생산되며, 생산된 아스팔트 혼합물은 현장으로 이송되어 포설 및 다짐의 과정을 거쳐 아스팔트 포장으로 적용된다. 이와 같이 다양한 외부 환경에 노출된 아스팔트 혼합물의 생산 및 적용 공정은 최종 생산품이 실내에서 완성되어 재료의 균질성이 확보되는 일반적인 산업분야와는 확연히 다른데, 이러한 요인에 의하여 아스팔트 혼합물의 생산 및 포설, 다짐 공정을 현장에서 정량적으로 모니터링하고 개선하여 재료의 잠재적인 성능을 최대한 활용하는데 한계가 있다. 이와 같은 한계를 극복하기 위한 대안을 제시하기 위한 방법으로는 재료의 동적 거동 및 여건을 모사할 수 있는 이산요소법(Discrete Element Method, DEM)

을 고려할 수 있다.

이산요소법은 재료와 생산 장비와의 상호작용을 반영할 수 있는 다물체 동역학(Multibody Dynamics, MBD) 또는 열역학과의 조합(Coupling)이나 배기, 환기 및 대기와의 영향을 반영할 수 있는 전산유체역학(Computerized Fluid Dynamics, CFD)과의 조합을 통하여 생산 공정의 적합성을 확인하고 이를 개선할 수 있는 대안을 제시하거나 관련된 장비를 개발하거나 보완하기 위하여 최근 다른 산업분야에서 널리 활용되고 있는(Zhang et al. 2008, Zhao and Shan 2013, Kafui et al. 2011, Fries et al. 2011) 수치 해석적 방법이다. 이러한 수치 해석적 방법을 활용하여 재료의 생산 과정을 최적화하는 작업은 파손에 대한 저항성이 향상된 고성능의 도로포장 재료를 개발하는 것만큼의 중요한 의미를 갖는다고 할 수 있다.

일반적으로 아스팔트 혼합물은 생산, 포설, 다짐되는 고온조건뿐만 아니라 활용되는 상온조건에서도 온도-종속적인 점탄소성(Temperature-Dependent Viscoelastoplastic) 거동을 나타낼 뿐만 아니라(Yun et al. 2009), 온도 종속적인 부착성(Temperature Dependent Cohesive)을 나타내는 것으로 이해할 수 있다. 점탄성과 부착성의 관계는 열역학적으로 명확하게 정의되고 있지 않는 것으로 보이나, 대부분의 점성이 높은 탄성재료는 부착성을 갖고 있으며, 대부분의 부착성이 있는 재료는 점탄성을 나타내는 것에 근거할 때, 일반적인 메소단위(Meso Scale)에서의 재료의 부착성은 인장력에만 저항하는 시간 종속적인 특성을 갖는 점탄성의 개념으로 이해할 수 있다. 한편 재료가 다른 재료와 접촉할 때의 부착을 포함한 동적 거동의 특성은 이산요소법에서 접촉모형(Contact Model)을 이용하여 표현되는데, 아스팔트 혼합물과 같이 혼합재료의 가시적 구분이 가능한 재료의 생산 및 포설, 다짐까지의 공정을 모두 모니터링하여 재료의 성능을 확보하기 위해서는 시간 또는 온도 변화에 따른 굵은 골재, 잔골재, 아스팔트 바인더의 물성 등 개별요소의 물성을 각각 측정하여 혼합물 전체의 성능을 예측하는 실용적 측면에서의 다상 모사(Multiphase Simulation) 기법에 적용하기 쉬운 접촉모형을 결정하는 것이 합리적이다. 이러한 기법을 활용하면 생산과 포설 단계에서의 도로포장 재료의 동적 거동을 분석하여 시설 및 과정을 최적화할 수 있을 뿐만 아니라, 이미 포설되어 차량이 운행중인 도로의 파손에 대한 초기 생산 조건의 영향을 확인할 수 있기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 골재의 탄성계수와 바인더의 시간 및 온도 종속적인 부착성 점소탄성 특성을 반영할 수 있는 정교한 접촉모형의 개발을 위하여 해석적 방법으로 정해가 유도될 수 있는 비교적 단순한 점탄성 모형과 선형 부착모형을 이산요소법의 부착모형으로 개발 및 적용하고 이에 대한 타당성을 검증하고자 하였다.

2. 자유낙하하는 공의 운동방정식

2.1. 해석조건

아스팔트 바인더가 코팅된 골재가 생산 또는 시공장비에서 이동하는 과정은 점탄성 또는 부착성을 갖는 구(Sphere) 또는 골재가 지면으로 낙하하고 튀어오르는 것과 유사한 경우로 가정할 수 있다. Fig. 1은 탄성계수 E_b의 자유낙하하는 구가 탄성계수 E_w의 지면과 접촉한 후 짧은 시간 Δt_{21}동안 아스팔트 바인더 및 기타 손실에 의한 감쇠 이후에 다시 튀어오르는 시점에서의 힘, 시간, 위치 및 속도의 관계를 계략적으로 나타내고 있다.

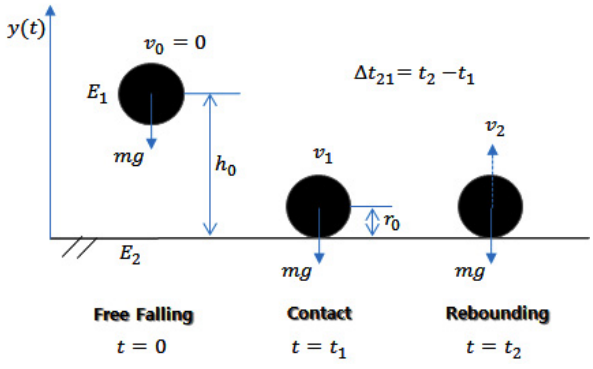

Fig. 1 Schematic Description of Free-falling Ball

접촉이 발생한 시점에서의 아스팔트 바인더로 코팅된 골재의 거동은 다양한 조합의 스프링과 감쇠장치의 조합으로 표현될 수 있다. 이를 위한 가장 단순한 조합으로서 바인더를 포함한 골재의 지지력과 지면의 지지력을 수직으로 연결한 스프링으로 가정하고, 바인더의 점성 및 기타의 감쇠가 이들 스프링에 병렬 작용하는 것으로 가정한 Voigt 모형을 활용할 수 있다. 이때 바인더와 지면 사이의 부착력은 인장에 저항하는 스프링으로 가정되어 Voigt 모형에 병렬로 Fig. 2와 같이 작용한다. Fig. 2에서 공과 지면 사이에서 발생하는 점탄성 거동과 부착특성을 나타내기 위하여 적용될 수 있는 변수 c, k_b, k_w, k_c, L_b, L_w, L 은 각각 감쇠계수, 공의 지지계수, 지면의 지지계수, 부착계수, 공의 지름, 지면의 지름, 총 길이를 나타낸다.

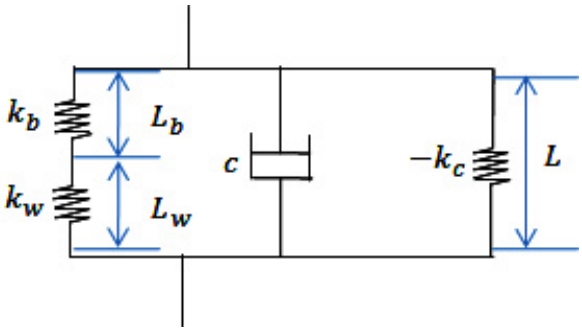

Fig. 2 Mechanical Analog for Ball-floor Normal Contact

2.2. 자유낙하하는 구의 운동방정식

반지름 r_0, 질량 m의 탄성 공이 지면으로부터 공의 중심까지의 높이 h_0에서 저항없이 자유낙하할 때, 지면과 접촉하기 전까지 공의 운동방정식은 다음 Eq. (1)과 같이 나타내어진다. 주어진 공이 지면과 접촉하기 전까지의 임의의 시각과 이때의 위치, 지면에 접촉하는 순간의 시각과 이때의 위치를 각각 t, $y(t)$, t_1, $y(t_1)$ 라고 하면, 주어진 초기조건 Eq. (2)를 이용하여 속도와 위치에 관한 일반해를 각각 Eq. (3)과 Eq. (4)와 같이 구할 수 있으며, 이들의 관계를 이용하여 자유낙하하는 공의 지면과 접촉 전까지의 낙하시간 t_1을 주어진 상수들의 함수로 Eq. (5)와 같이 구할 수 있다.

Differential Equation

$$F_v = m\frac{d^2y}{dt^2} = -mg \tag{1}$$

where, m = mass of sphere, and

g = gravity force.

Initial Condition

$$\frac{dy}{dt}\Big|_{t=0} = 0,\ y(0) = h_0,\ y(t_1) = r_0 \tag{2}$$

where, h_0 = initial height of ball, and

r_0 = radius of ball.

General Solution

$$\frac{dy}{dt} = -gt \tag{3}$$

$$y(t) - y(0) = -\frac{1}{2}gt^2 \tag{4}$$

$$t_1 = \sqrt{\frac{2(h_0 - r_0)}{g}} \tag{5}$$

2.3. 지면과 접촉한 구의 운동방정식

잘 알려진 바와 같이, 중력방향으로 위치한 탄성스프링에 부착된 자중을 갖는 물체가 중력과 초기외력에 의하여 주기적으로 진동하는 문제는 미분방정식(Howell 2013)을 이용하여 표현될 수 있다. 한편 Nagurka and Huang(2006)은 낙하된 탁구공이 반복적으로 지면에서 튀어오르면서 감쇠가 발생하는 문제를 설명하기 위하여 스프링의 진동거동의 해석에 활용되는 미분방정식을 근사적으로 적용하였으며, 이는 탁구공의 수직방향 운동이 지면에 맞닿을 때 감쇠(Damping)의 영향을 받아 거동하는 현상이 탄성스프링에 매달린 물체의 위치거동을 표현하기 위한 운동방정식으로도 표현될 수 있다는 가정에 근거하였다. 따라서 낙하한 구의 지면과 접촉하는 시간 Δt_{12} 동안의 구의 운동방정식은 아래 Eq. (6)과 같이 비동차 2계 미분방정식으로 표현될 수 있으며, 초기조건은 자유낙하하는 공의 t_1에서의 위치와 속도로써 다음 Eq. (7)과 같이 주어진다.

Differential Equation for Ball-Wall Contact without Cohesion

$$F_v = m\frac{d^2y}{dt^2} = c\frac{dy}{dt} - k_v y - mg + k_v r_0 \tag{6}$$

where, c = damping coefficient,

k_v = composite spring coefficient, and

r_0 = radius of ball.

Initial Condition

$$\frac{dy}{dt}\Big|_{t=t_1} = -\sqrt{2g(h_0 - r_0)},\ y(t_1) = r_0 \tag{7}$$

Eq. (6)에서 공과 지면 사이의 지지력을 포괄하는 복합 지지계수 k_v는 Fig. 2와 같은 조건에서, Eq. (8)의 관계를 통하여 Eq. (9)와 같이 k_b과 k_w의 조화평균으로 표현될 수 있다.

$$F_v = k_v\Delta y = k_v(\Delta y_b + \Delta y_w) = k_v\left(\frac{F}{k_b} + \frac{F}{k_w}\right) \tag{8}$$

$$k_v = \left(\frac{k_b k_w}{k_b + k_w}\right) \tag{9}$$

where, k_b = ball spring coefficient,

k_w = wall spring coefficient,

Δy = total displacement $(= \Delta y_b + \Delta y_w)$,

Δy_b = ball spring displacement, and

Δy_w = wall spring displacement.

부착력은 자유낙하에 영향을 미치지 않으므로, 부착력이 존재하는 경우에도 구의 자유낙하에 대한 운동방정식과 초기조건은 각각 Eq. (1)과 Eq. (2)로 표현될 수 있으며, 지면과 접촉하고 있는 구와 지면 사이의 부착력이 Eq. (10)의 선형관계를 갖는다고 가정할 때, 접촉이 발생한 순간의 초기조건도 Eq. (7)과 동일하다. 따라서 Fig. 2의 관계에서 부착력이 존재하는 공과 지면의 접촉에 대한 운동방정식은 Eq. (11)과 같이 표현될 수 있다.

$$F_c = -k_c(r_0 - y) = -k_c \Delta y \tag{10}$$

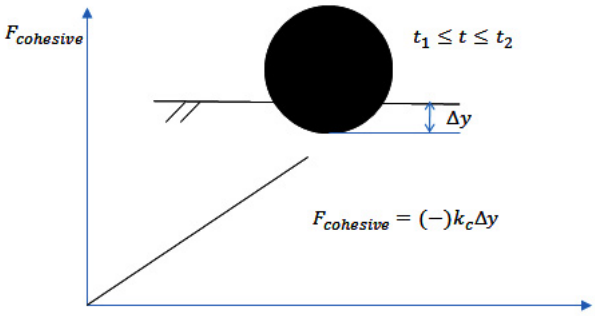

Fig. 3 Linear Cohesion Model

Differential Equation for Ball-Wall Contact with Cohesion

$$F = m\frac{d^2y}{dt^2} = c\frac{dy}{dt} - ky - mg + kr_0 \tag{11}$$

where, $k = k_v - k_c$.

부족감쇠 조건($\lambda^2 - \omega^2 < 0$)에서 Eq. (6) 또는 Eq. (11)과 같이 우변을 상수로 갖는 비동차 2계 미분방정식 일반해는 Eq. (12)와 같이 보함수(Complimentary Function, $y_c(t)$)와 상수형태의 특수해(Particular Solution, y_p)의 합으로 표현된다. 혼합 또는 포설 온도에서 일반적인 아스팔트 혼합물의 거동이 과잉감쇠(Over Damped), 임계감쇠(Critically Damped) 또는 부족감쇠(Under Damped) 조건을 따를지는 실내외 실험을 통한 합리적인 검토가 필요하지만 아스팔트에 코팅된 골재가 지면과 접촉한 후에 튀어오르는 경우가 발생하므로 본 연구에서는 임계감쇠에 가까운 부족감쇠 조건을 가정하였다. 부착력의 존재와 무관하게 주어진 초기조건 Eq. (7)에 따라 Eq. (6)의 탄성 공의 중심부의 위치와 속도를 나타내는 일반해는 각각 다음 Eq. (13) 및 Eq. (14)와 같이 표현되며, 부착력이 있는 경우에는 Eq. (13)과 Eq. (14)에서의 k_v는 $k(= k_v - k_c)$로 대체된다.

$$y(t - t_1) = y_c(t - t_1) + y_p \tag{12}$$

where, $y_c(t - t_1) = e^{-\lambda(t-t_1)}[C_1\cos(\omega_d(t-t_1)) + C_2\sin(\omega_d(t-t_1))]$,

$$m\ddot{y}_p + c\dot{y}_p + ky_p = -mg,$$

$$\lambda = \frac{c}{2m},$$

$$\omega_d = \sqrt{\omega^2 - \lambda^2},$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k_v}{m}},$$

$$C_1 = \text{constant}\left(= \frac{mg}{k_v}\right), \text{ and}$$

$$C_2 = \text{constant}\left(= \frac{\lambda\left(\frac{mg}{k_v}\right) - \sqrt{2g(h_0 - r_0)}}{w_d}\right)$$

General Solution

$$y(t-t_1) = e^{-\lambda(t-t_1)}\left[\left(\frac{mg}{k_v}\right)\cos(\omega_d(t-t_1)) + \frac{\lambda\left(\frac{mg}{k_v}\right) - \sqrt{2g(h_0 - r_0)}}{w_d} sin(\omega_d(t-t_1))\right] + r_0 - \frac{mg}{k_v} \tag{13}$$

$$\frac{dy}{dt}\Big|_{t=t-t_1} = e^{-\lambda(t-t_1)}\left[\frac{\lambda\left(\frac{mg}{k_v}\right) - \sqrt{2g(h_0 - r_0)}}{w_d}(\omega_d\cos(\omega_d(t-t_1)) - \lambda\sin(\omega_d(t-t_1))) - \left(\frac{mg}{k_v}\right)(\omega_d\sin(\omega_d(t-t_1)) + \lambda\cos(\omega_d(t-t_1)))\right] \tag{14}$$

한편 공이 지면과 접촉하여 다시 튀어오르기 전까지의 시간 Δt_{21}은 Eq. (13)에서 $t_1 < t_2$의 조건을 만족하면서 $y(t_2 - t_1) = r_0$를 만족하는 가장 작은 t_2를 수치해석적인 방법을 이용하여 찾는 방법으로 구할 수 있다.

2.4. 지면에서 튀어오르는 구의 운동방정식

지면과의 접촉을 끝내고 튀어오르는 공의 운동방정식은 Eq. (15)와 같이 나타낼 수 있는데, 이 때의 주어진 초기조건 Eq. (16)에 따른 공의 속도와 위치에 대한 일반해는 각각 Eq. (17)과 Eq. (18)과 같이 표현될 수 있다.

Differential Equation

$$F_v = m\frac{d^2y}{dt^2} = -mg \tag{15}$$

Initial Condition

$$\frac{dy}{dt}\Big|_{t=t_2} = v_2, \; y(t_2) = r_0 \tag{16}$$

where, v_2 = outward velocity at time t_2

General Solution

$$\frac{dy}{dt} = -gt + v_2 \tag{17}$$

$$y(t-t_2) - y(t_2) = -\frac{1}{2}g(t-t_2)^2 + v_2(t-t_2) \tag{18}$$

3. 이산요소법에서의 접촉모형

3.1. 입력변수의 결정

이산요소법에서는 입자와 입자 또는 입자와 경계면과의 겹쳐지는 것으로 가정하고, 이를 통하여 입자의 힘과 가속도가 결정되기 때문에 이들 사이에서의 반발을 결정하는 지지계수를 결정하는 것은 매우 중요한 문제이다. 그러나 결합(Bonding)되지 않은 이산요소 입자 사이 또는 입자와 경계면의 탄성계수에서 지지계수를 정확하게 유도하는 방법은 알려져있지 않은데, 이는 입자의 질량 및 상대속도도 충돌하는 입자의 에너지 손실에 영향을 미치기 때문에(Delaney et al. 2007) 다양한 재료 및 조건에 따라서 다양한 해석이 가능하기 때문이다.

따라서 이산요소법 내 대부분의 접촉모형에서는 실제 재료의 입사속력과 반사속력을 활용하여 유도하는 반발계수(Restitution Coefficient)를 지지계수나 감쇠계수를 결정하기 위한 독립변수로 활용하고 있다. 예를 들어, 잘 알려져 있는 Hertz-Mindlin 모형에서는 수직탄성력이 등가탄성계수(Equivalent Elastic Modulus), 등가반경(Equivalent Radius) 및 접면 두께에 의하여 결정되며, 수직감쇠력은 수직탄성력에 적용되는 변수들과 입자의 상대속도, 등가질량 (Equivalent Mass) 및 반발계수로 결정된다.

그러나 본 연구에서는 선형 부착성 점탄성 모형의 이산요소법에서의 적용과 이에 대한 해석적 검증에 목적을 두고 있으므로, 일반적인 점탄성이론을 적용한 모형에서와 같이 입자와 지면 사이의 지지계수와 감쇠계수가 속도나 질량에 영향을 받지 않는 것으로 가정하였다. 다음 Table 1은 해석적 방법으로 유도된 일반해와 이를 이용하여 이산요소법 상용 패키지인 EDEM에 적용된 부착성 점탄성 접촉모형의 계수와 조건을 나타내고 있다.

Table 1. Parameters for Analytical and Numerical Solution

h_0(m)	r_0 (m)	g (m/sec^2)	ρ_b(m/sec^3)
0.5	0.01	9.81	2600
k_b (N/m)	k_w (N/m)	c (N·sec/m)	k_c (N/m)
1E6	1E8	0, 20, 40, 60	0, 1E5, 3E5, 5E5

4. 모형의 검증 및 민감도 분석

4.1. 접촉모형의 검증

다음 Fig. 4는 상용 패키지인 EDEM에서의 공의 자유낙하를 모사하면서 얻어진 결과 중 특정시각에서의 화면을 나타내고 있다. 이산요소법은 모사의 정확성이 time step에 따라 수치해석적 오차가 증대될 수 있기 때문에, 약 2.6E-5초의 비교적 낮은 time step을 적용하였다.

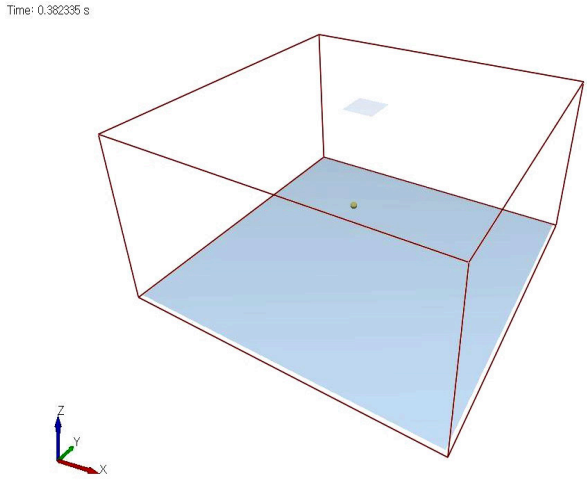

Fig. 4 DEM Simulation by Using Linear Adhesive Voigt Model

Fig 5 (a)는 감쇠계수와 부착계수가 모두 0인 완전탄성조건에서, Fig. 5 (b)는 감쇠계수가 존재하면서 부착력이 존재하는 조건에서 상용 패키지에서 얻어진 높이방향의 구의 중심의 위치와 해석적 방법으로 얻어진 높이방향의 구의 중심의 위치를 비교한 결과를 나타내고 있다. Fig. 5의 상단과 중간은 각각 시간에 따른 구의 중심의 수직방향 위치, 지면과 접촉하고 있는 구의 중심의 수직방향 위치를 나타내고 있으며, 하단은 구가 지면과 접촉하고 있는 시간동안 스프링과 같은 진동 거동을 한다고 가정했을 때의 주어진 감쇠 및 부착조건에서의 구의 중심의 위치를 나타내고 있다. 하단의 접촉시간 동안의 구의 중심의 위치는 향후 구가 몇 회 더 튀어오를지에 대한 계략적인 지표로 활용할 수기 때문에 유용하게 활용될 수 있다. Fig. 5에서 나타난 바와 같이, 이산요소법과 해석적 방법으로 얻어진 공의 위치는 극단적인 두 가지 계수의 조건에 무관하게 거의 완전히 일치하

는 것으로 나타나, C++로 코딩된 선형 부착성 점탄성 접촉 API(Application Programing Interface)를 통하여 문제없이 상용 패키지에 적용되었음을 알 수 있다.

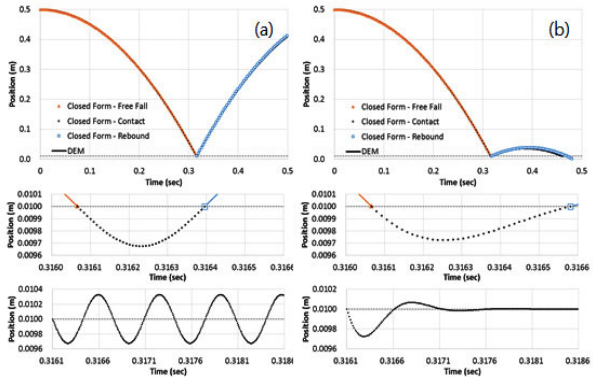

Fig. 5 Comparison of Closed form Solution with DEM Solution (a) c=0, k_c=0 (b) c=60, k_c=5E5

4.2. 감쇠계수와 부착계수에 따른 변화

아스팔트 바인더에 코팅된 골재는 일반적인 혼합 및 다짐온도범위에서 완전탄성거동을 나타내지 않는다. 본 연구에서는 해석적 또는 수치 해석적 모형의 적절성을 계략적으로 평가하기 위하여 계수에 따른 구의 거동을 분석하였으며, 이에 따른 다양한 감쇠계수와 부착계수가 구의 거동에 미치는 영향은 Fig. 6과 Fig. 7에 나타난 바와 같다.

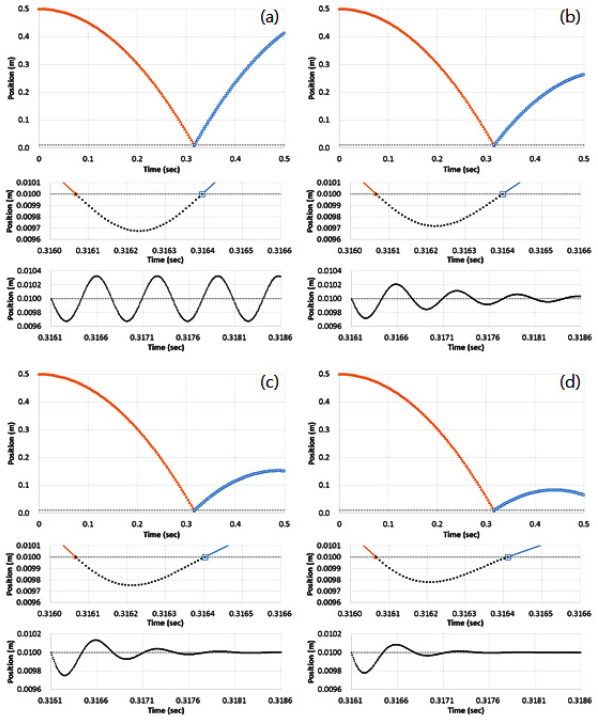

Fig. 6 Y-directional Position of Ball for k_c=0 (a) c=0 (b) c=20 (c) c=40 (d) c=60

Fig. 6에서 나타난 바와 같이, 일정한 지지계수에 대하여 감쇠계수가 증가함에 따라 구와 지면과의 접촉시간이 증가하며, 증가된 접촉시간에 따라 지면을 벗어나는 구의 초기속도가 감소하여 튀어오르는 높이가 감소한다. 또한 주어진 초기조건에서 완전탄성거동을 나타내는 구의 지면과의 접촉시간은 약 0.00033초로 Fig. 6의 (a)에 나타난 바와 같은데 감쇠계수가 증가함에 따라서 접촉시간이 점차 증가하는 것을 확인할 수 있다. 한편 감쇠계수가 일정한 경우에 대하여 부착계수의 증가에 따른 구의 거동 변화는 Fig. 7에서 확인할 수 있는데, 이는 Eq. (14)에서 확인한 바와 같이 부착계수는 지지계수를 선형적으로 감소시키는 역할을 하기 때문인 것을 알 수 있다.

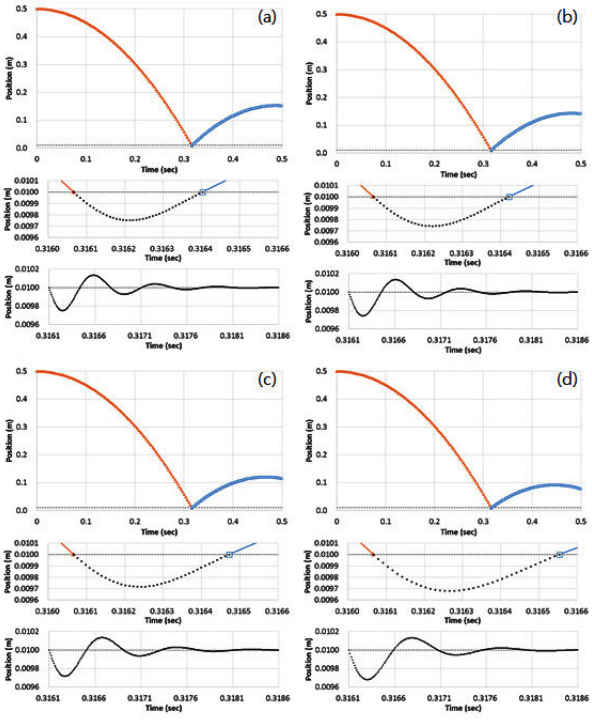

Fig. 7 Y-directional Position of ball for c = 40 (a) k_c=0 (b) k_c=1E5 (c) k_c=3E5 (d) k_c=5E5

5. 결론 및 향후 연구

5.1. 결론

본 연구에서는 선형 부착성 점탄성 모형을 이산요소법에 근거한 수치해석 패키지의 API를 활용하여 적용하였으며, 해석적 정해를 유도하여 이산요소법의 결과를 검증하였다. 또한 다양한 감쇠계수와 부착계수 조건에 따른 점탄성 구의 거동을 분석하여 아스팔트 바인더로 코팅된 골재의 거동을 이산요소법으로 모사하기 위하여 필요한 사항을 확인하였다. 이상의 검토와 민감도

분석에 따른 구체적인 결론은 다음과 같다.

1. 스프링의 진동해석에 사용되는 운동방정식의 일반해는 선형 부착성을 나타내는 점탄성 재료의 경계와의 부착거동을 나타내는데 활용될 수 있다. 또한 낙하하는 구의 일반해의 유도를 통하여 다양한 조건에서의 구의 거동을 손쉽게 예측할 수 있다.
2. Voigt 모형에 병렬로 연결된 선형 부착성 점탄성 모형에서는 부착계수가 구와 지면의 지지력을 감소시키는 역할을 하는 것으로 고려되므로 손쉽게 일반해를 유도할 수 있는 장점이 있다. 따라서 구의 거동에 대한 점탄성의 영향이 부착력보다 작은 경우에는 상기의 제시된 형태의 모형을 활용하는 것이 합리적이다.
3. 감쇠계수의 증가는 접촉시간을 증대시키는 부착력의 증대와 유사한 역할을 한다.
4. 다짐이 완료된 상온 조건에서의 아스팔트 혼합물의 부착력은 지지계수와 감쇠계수의 조합 등 다양한 형태의 인장력에 저항하는 힘을 나타내는 구성모형으로 표현될 수 있다. 그러나 혼합, 포설 및 다짐, 교통하중에 영향을 받는 전체 과정을 이산요소법으로 모사하기 위해서는 낙하와 같은 조건을 반영할 수 있는 압축력에 저항하는 힘을 나타내는 구성모형이 필요하다.

5.2. 향후 연구내용

이상의 결론에 따른 향후 연구내용은 다음과 같다.

1. 아스팔트 바인더는 잘 알려진 바와 같이 열유변학적으로 단순한(Thermorheologically Simple) 재료이므로 열전도 등이 발생하는 전체 생산 공정의 물성의 표현을 단순화화하기 위해서는 시간-온도 중첩이론(Time-temperature Superposition Principle)을 적용할 필요가 있다.
2. 본 연구에서 적용된 Voigt 모형은 가장 단순하게 점탄성 거동 또는 감쇠현상을 표현할 수 있는 모형으로 효율적이기는 하지만, 실제적인 아스팔트 혼합물의 거동을 표현하기 위해서는 보다 복잡한 모형이 필요성을 검토할 필요가 있다.
3. 아스팔트 매스틱(Mastic) 또는 아스팔트 혼합물의 상온에서의 거동을 나타내기 위해서는 인장력에 저항하는 온도 종속적 부착성 점탄성 모형의 활용 가능성이 높으므로, 이를 위해서는 복잡한 모형의 한계인 해석시간을 단축시킬 수 있는 수치해석적 알고리즘의 개발이 필요하다.
4. 본 연구에서는 수직방향 지지계수, 감쇠계수 및 부착계수를 고려하였으나, 접면에 대하여 수평방향에 대한 이들 계수의 고려방법에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업 재원으로 수행되었습니다.

REFERENCE

Delaney, G., Inagaki, S., and Aste, T. 2007, Fine tuning dem simulations to perform virtual experiments with threedimensional granular packings. Lect. Notes Complex Syst 8, 169-186.

Fries, L., Antonyuk, S., Heinrich, S., and Palzer, S. 2011, DEM?CFD modeling of a fluidized bed spray granulator, Chem. Eng. Sci., Vol. 66, 2340-2355

Howell K. 2013, Ordinary differential equations: An Introduction to the Fundamentals UAH, Hayden-McNeil Publishing.

Kafui, DK.. Johnson, S., Thornton, C. and Seville, JPK. .2011. Parallelization of a Lagrangian-Eulerian DEM/CFD code for application to fluidized beds. Powder Technol., Vol. 207, 270-278

Nagurka, M., Huang, S. 2006, A Mass-Spring-Damper Model of a Bouncing Ball, Int. J. Engng. Vol. 22. No. 2, 393-401

Yun, T., Underwood, BS., and Kim, YR., 2009, Time-temperature superposition for HMA with growing damage and permanent strain in confined tension and compression, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 22, Issue 5, 415-422.

Zhang, MH., Chu, KW., Wei, F., and Yu, AB. 2008, A CFD?DEM study of the cluster behavior in riser and downer reactors, Powder Technol., Vol. 184, 151-165.

Zhao, J., Shan, T., 2013, Coupled CFD-DEM simulation of fluid-particle interation in geomechanics, Powder Technology. Vol. 239, 248-258