

등가 구형입자를 이용한 DEM에서의 골재 슬럼프 실험 모사

Simulation of Aggregate Slump Test Using Equivalent Sphere Particle in DEM

윤태영 Yun, Tae Young
안상혁 Ahn, Sang Hyeok
남정희 Nam, Jueong Hee
유평준 Yoo, Pyeong Jun

정희원 · 한국건설기술연구원 수석연구원 · 교신저자 (E-mail: tyun@kict.re.kr)
정희원 · 한국건설기술연구원 석사후연구원 (E-mail: shahn@kict.re.kr)
정희원 · 한국건설기술연구원 연구위원 (E-mail: archnam@kict.re.kr)
정희원 · 한국건설기술연구원 연구위원 (E-mail: pjyoo@kict.re.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : Simulation of aggregate slump test using equivalent sphere particle in DEM and its validity evaluation against lab aggregate slump test

METHODS : In this research, aggregate slump tests are performed and compared with DEM simulation. To utilize spheric particles in YADE, equivalent sphere diameter concept is applied. As verification measures, the volume in slump cone filled with aggregate is used and it is compared with volume in slump cone filled with equivalent sphere particle. Slump height and diameter are also used to evaluate the suggested numerical method with equivalent concept

RESULTS : Simulation test results show good agreement with lab test results in terms of loose packing volume, height and diameter of slumped particle clump.

CONCLUSIONS : It is concluded that numerical simulation using DEM is applicable to evaluate the effect of aggregate morphological property in loose packing and optimum gradation determination based on the aggregate slump test simulation result.

Keywords

discrete element method, YADE, aggregate slump test, equivalent sphere concept

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.ijhe.or.kr/
ISSN 1738-7159 (Print)
ISSN 2287-3678 (Online)

1. 연구배경 및 목적

굵은골재의 형상은 아스팔트 혼합물의 배합은 물론 균열 또는 러팅 등의 파손에 대한 저항성에 큰 영향을 미치는 주요요소이다. 이에 따라 골재 또는 입자의 형상 및 입도분포에 관련된 연구는 다양한 분야에서 지속적으로 수행되고 있는데, 특히 토목분야에서 아스팔트 혼합물에서 골재의 형상 및 입도분포는 골재 혼합물의 다

짐도에 큰 영향을 미치며, 골재의 형상은 아스팔트 혼합물의 거동에도 크게 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

아스팔트 혼합물 또는 시멘트 콘크리트 등에 주요한 요소로 사용되는 골재 및 관련된 입자(Particle)의 형상을 정량화하는 연구에서는 2차원 이미지 분석(Image Analysis, IA) 기법을 이용하여 측정된 골재의 특성을 나타내는 편장률, 형상비 등의 요소들을 결정하거나

(Janoo 1998, Kuo et al. 1996, Maerz 2004, Kwan and Mora 2001), 2개의 카메라를 이용한 입체광 이미지 분석(Stereoscopic Image Analysis, SIA)을 이용하여 골재의 표면적 특성을 결정(Broek 1974, Tang et al. 2007, Hu and Stroeyen 2006)하기도 한다. 또한 최근 측정장비의 첨단화에 따라 X-ray CT(Computerized Tomography)를 이용하여 3차원 형상을 측정하여 골재의 형상을 정량화 또는 모형화하는 연구(Garbocki 2002, Lin and Miller 2005, Taylor et al., 2006, Erdgan and Fowler 2005)와 골재 또는 입자의 형상이 골재 간의 다짐이나 아스팔트 혼합물에서의 최적배합에 큰 영향을 미치는 것을 정량화하기 위한 연구(Kozicki and Tejchman 2011, Mollon and Zhao 2012, Ormel 2012, Liu 2011)도 진행되고 있다. 골재의 형상이 혼합물에 미치는 특성을 첨단장비를 이용하거나 수학적 해석방법을 이용하여 모형화하는 가장 큰 이유는 굵은 골재의 형상적 특성이나 입도의 특성을 확인하기 위하여 수행되는 실험이 많은 반복성을 요구하며, 실험 수행자의 숙련도나 실험과정에서 발생하는 오차에 민감하게 반응하기 때문이다.

한편 재료의 이동특성을 분석하거나 다짐의 최적화를 연구하는 산업 또는 연구 분야에서는 운동하는 입자의 거동이나 상호작용을 반복적으로 모사할 수 있는 수치해석적 방법인 개별요소법(Discrete Element Method, DEM)이 점차 확대되어 활용되고 있다. 최근에는 토목 분야에서도 개별요소법을 이용하여 골재의 마찰각 또는 감쇠계수(Damping Coefficient)를 정량화(Mollon and Zhao 2012, Cho et al. 2008, Jo et al. 2009, Hwang et al. 2010)하거나 골재 또는 아스팔트 혼합물의 다짐도(Mora and Kwan 2000, Chen et al. 2012, Lee and Chou 1993)를 평가하기 위한 연구가 수행된 바 있으며, 아스팔트 혼합물의 취성거동(Kim and Buttlar 2005) 또는 소성거동(Ormel 2012)을 모사하기 위하여 개별요소법을 활용하고 있다.

실제 현상의 모사 정도가 높은 3차원 개별요소법에서는 대상이 되는 재료의 형상을 표현하기 위하여 다면체, 타원형, 구형 입자를 주로 이용한다. 그러나 실제 입자의 형상이나 면의 거칠기를 제어하여 생산할 수 없는 건설용 자재인 파쇄골재는 그 형상을 위의 입자로 모형화하기 어렵기 때문에, X-ray CT로 얻어진 파쇄골재의 형상과 동일한 반경의 구형 입자 더미(Particle Clump)로 표현하거나 다면체나 겹쳐진 구형 입자 더미(Overlapping Particle Clump)로 모사하는 방법이 적

용되고 있다. 그러나 X-ray CT를 활용한 방법은 고가의 장비를 요구하며 많은 이미지 획득까지의 많은 과정이 요구는 동시에, 파쇄골재를 표현하는 입자의 모형화 과정이 산술적으로 복잡하고 해석시간이 많이 소요되는 단점 때문에 현재 시점에서의 시스템 환경으로는 적용성이 매우 떨어진다. Fig. 1은 앞서 언급된 비균질 입자 더미(a), 구형(b), 타원형(c), 겹쳐진 구형 입자 더미(d)로 파쇄입자를 모형화하는 예(Sallam and Ash, mawy 2004, He 2010)를 나타내고 있다.

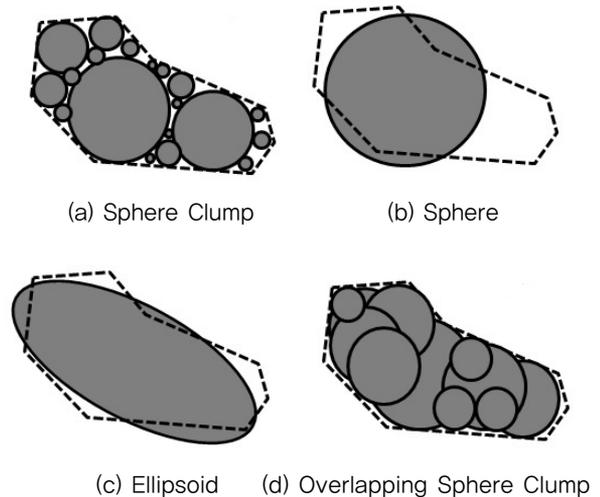


Fig. 1 Particle Simulation Methods

구형 또는 타원형 입자로 파쇄골재를 모형화하여 개별요소법에 적용하는 방법은 해석에 필요한 모형화 과정을 단순화 한다는 장점이 있으나, 지나친 가정에 의한 정밀도를 보장하기 어려운 문제점이 있으며, 잔골재와 달리 입자 형태의 복잡성이 커지는 굵은골재에서는 정밀도에 대한 불확실성이 커지는 경향을 나타낸다. 그러나 골재의 입경을 분류하기 위한 체분석뿐만 아니라 입도곡선 또는 최적 입도 결정을 위한 연구(Vavrik et al. 2002) 등에서 골재의 입형을 구형으로 가정하고 있으며, 장비 및 해석시간 등에 대한 제약을 고려할 때, 굵은골재를 구형으로 가정하거나 타원형으로 가정하고 이에 적절한 보정계수를 도입하는 것은 매우 효율적인 방법이라 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 골재나 아스팔트 혼합물의 다짐성을 평가하거나 다양한 입도의 골재에 대한 최적입도곡선을 선정할 수 있는 가장 합리적인 수치해석적 방법인 개별요소법을 적용하기 위하여, 굵은골재의 특성을 합리적으로 반영할 수 있는 개별요소법에서의 구형 입자와 관련된 변수로 골재 슬럼프 실험을 모사하고 이에 대한 적정성을 평가하고자 하였다.

2. 연구방법

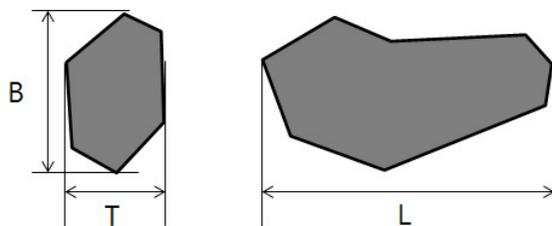
2.1. 실험재료 및 방법

본 연구에서는 골재의 기본적인 형상적 특성을 분석하기 위하여 쇄석 골재터미에서 19mm체를 통과하고 13mm체에 잔류하는 입자의 100개 골재를 실험재료로 선정하였다. 선정된 골재에 대하여 2차원 이미지를 디지털 카메라를 이용하여 촬영하였으며, 버니어 캘리퍼(Vernier Caliper)를 이용하여 2차원 이미지에서 획득할 수 없는 골재의 두께를 측정하였다. 획득된 골재 이미지를 통하여 형상 분류기준들을 결정하기 위하여 자바(Java)를 이용하여 개발된 ImageJ가 사용되었다.

또한 골재 슬럼프 실험을 모사하기 위한 입자의 무게와 개수를 결정하기 위하여, 골재의 단위중량과 100개의 골재에 대한 개별 골재의 중량을 측정하여 골재 각각의 부피를 계산하였으며, 단위중량과 계산된 부피를 바탕으로 해당 골재에 적합한 3차원 구형 입자의 반지름을 결정하였다. 결정된 3차원 구형 입자는 해당 쇄석 골재터미의 슬럼프 실험을 개별요소법으로 모사하는데 사용되었으며, 골재터미의 슬럼프 실험은 일반적인 시멘트 모르타르의 슬럼프를 측정하는 콘 형태의 슬럼프 실험장비(상부지름×하부지름×높이: 10cm×20cm×30cm)를 사용하였다.

2.2. 골재형상 특성 분류 및 기준

골재의 형상을 분류하는 기준으로는 다양한 방법들이 제시되고 있으나, 기본적으로 골재의 길이(Length, L), 폭(Breadth, B), 두께(Thickness, T)를 활용한다. 이 밖에도 위의 세 가지 기준으로 정의될 수 없는 기준으로 골재의 둘레길이(Perimeter), 요철정도(Convexity), 구형정도(Sphericity)나 형상계수(Shape Factor) 등을 활용하기도 하지만, 이들 기준의 대부분은 골재의 다짐과 명확한 관련성이 없는 것으로 보고되고(Mora and Kwan 2000) 있다. Fig. 2는 본 연구에서 사용된 골재의 길이, 폭, 두께를 나타내기 위한 가상적인 측면



(a) Breadth and Thickness

(b) Length

Fig. 2 Particle Dimension Definition

도(a)와 정면도(b)를 나타내고 있는데, 버니어 캘리퍼스(Vernier Caliper)로 측정되는 Feret Diameter와는 다른 것을 알 수 있다.

골재의 길이, 폭, 두께로 결정되는 세장비(Elongation Ratio)와 평편비(Flatness Ratio)의 정의는 다음 Eq. (1) 또는 Eq. (2)와 같으며, 디지털 카메라에 의하여 촬영된 일부 골재는 Fig. 3에 나타나 있다.

$$\text{Elongation Ratio} = \text{Breadth} / \text{Length} \quad \text{Eq. (1)}$$

$$\text{Flatness ratio} = \text{Thickness} / \text{Breadth} \quad \text{Eq. (2)}$$



Fig. 3 Image of Randomly Selected Aggregate

2.3. DEM을 이용한 골재 슬럼프 실험의 모사

개별요소법을 적용하여 입자의 거동을 분석하는 상용 프로그램은 PFC3D, EDEM 등이 있으나, 본 연구에서는 공개 프로그램으로 재료의 다짐도 연구, 시멘트 콘크리트의 취성 파괴해석 등에 적용된 바 있는 YADE를 이용하였다. YADE는 Linux OS를 기반으로 C++와 유사한 Python 언어로 구성되어 있으며, 입자를 모형화하기 위하여 다면체와 구형 입자를 지원한다. YADE는 탄성, 점탄성 클래스와 다양한 동적해석 엔진을 포함하고 있으며 필요에 따라 새로운 입자 또는 물성에 대한 클래스를 프로그래밍할 수 있기 때문에, 골재 및 아스팔트 혼합물의 동적 또는 미시적 거동을 해석하기 위하여 합리적으로 사용될 수 있다(Smilauer V et al. 2012). YADE에서는 삼면체(Tetrahedron)나 구형 단일입자로 표현하기 어려운 형상에 대한 제약을 최소화하기 위하여 외부 프로그램에서 정의된 복잡한 형상을 삼면체나 구형 입자 터미로 표현할 수 있는

기능이 추가되어 있다. Fig. 4는 최초 입자의 위치나 수를 결정하는 단계를 거쳐 하중을 적용하고 입자 간의 상호작용을 수치적으로 평가하는 YADE 해석의 흐름도를 나타내고 있다.

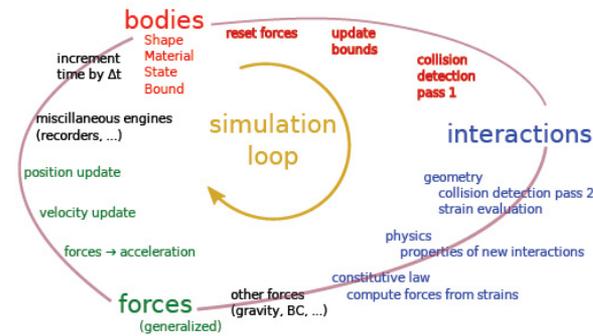


Fig. 4 Typical Simulation Loop in YADE (Smiauer et al., 2012)

본 연구에서 YADE 프로그램은 골재 슬럼프 실험 모사를 위하여 이용되었으며, 위의 실험과정에서 획득하기 어려운 재료의 물성은 실험에 사용된 기구와 바닥의 특성을 반영할 수 있는 기존 연구결과(Huang, 2010)를 참고하였다. 개별요소법 해석에 사용된 재료의 물성은 Table 1에 나타나 있으며, Fig. 5는 골재 슬럼프 실험을 모사하기 위하여 슬럼프 콘에 골재를 자유낙하시킨 예를 나타내고 있다.

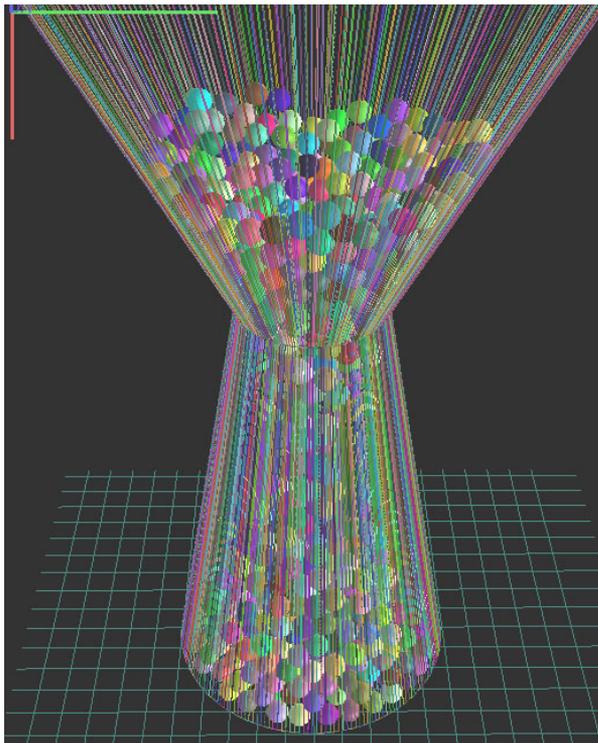


Fig. 5 Simulation of Aggregate Free-Falling in YADE

Table 1. Material Property used in DEM Analysis

	Elastic Modulus (MPa)	Friction Angle (rad)	Damping Coefficient	Density (g/cm ³)
Aggregate	20	0.7679	0.3	2.63
Steel Cone	20,000	0.0872	0.3	50.0
Bottom	20	0.7679	0.3	2.63

3. 실험 결과 및 분석

3.1. 골재의 형상 특성

Fig. 6은 이미지 분석에서 얻은 길이와 폭 및 실측을 통하여 얻어진 골재의 두께를 나타내고 있으며, 실선은 각각의 평균값을 나타낸다. 실험에 사용된 골재의 평균 길이, 폭, 두께는 각각 2.58cm, 1.91cm, 1.15cm로 나타났다. 각 값의 분포로 보아 선택된 100개가 전체 골재의 형상을 충분히 대표할 수 있는 것으로 판단되었다.

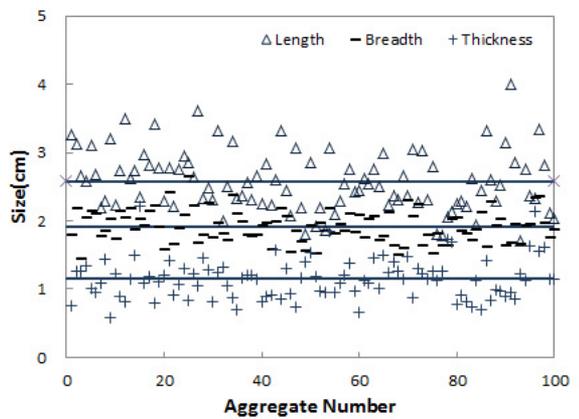


Fig. 6 Length, Breadth, and Thickness of Selected Aggregate

Fig. 7은 Lee and Chou(1993)에 따라 세장비와 편평도를 이용하여 구분된 해당 100개 골재를 나타내고 있다. Lee and Chou(1990)에 따르면 해당 구역에 따라 골재의 입형은 두꺼운 판(Thick Plate), 구, 짧은 봉(Short Rod) 및 타원체(Ellipsoid)로 구분되는데, 선정된 대부분의 골재가 구형 및 타원체로 구분되는 것을 알 수 있다. 그러나 위의 Fig. 3에서 나타난 바와 같이, Lee and Chou(1993)이 제시한 골재의 형상 특성은 육안으로 구분하기 충분하지 않은 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 개별 골재의 무게를 나타내며, 평균 골재의 무게는 5.63g으로 계산되었다. 3가지 임의의 골재를 이용하여 측정된 골재의 단위중량은 2.63g/cm³으로 나타났다.

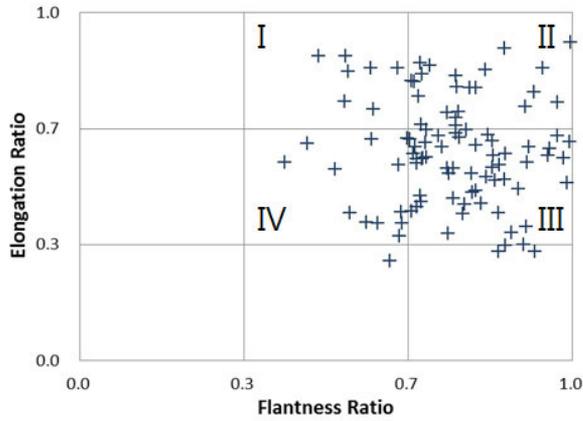


Fig. 7 Elongation Ratio vs. Flatness Ratio
(I : Thick Plate, II : Sphere, III : Short Rod, IV : Ellipsoid)

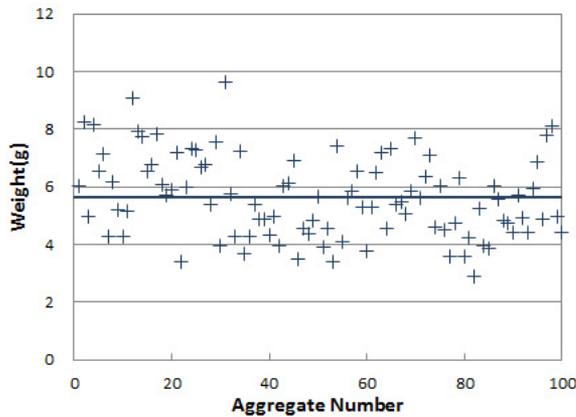


Fig. 8 Weight of Selected Aggregate

골재의 형상과 부피는 다짐도에 직접적인 영향을 미치는 요소로서 개별요소법을 이용하기 위해서는 이를 활용하기 위한 적절한 방법이 제시되어야 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 부피산정을 위하여 기존의 구분형식의 타당성을 확인하고자 하였는데, Fig. 9에 Lee and Chou(2000)이 제시한 기준에 따라 두꺼운 판, 구, 짧은 봉, 타원체의 기하학적 특성으로 계산된 골재의 부피(Volume based on Shape)가 측정된 단위중량 및 각 골재의 중량을 이용하여 계산된 개별 골재의 부피(Volume based on Weight)에 대하여 나타나 있다. 개별 골재의 부피를 Lee and Chou(1993)이 제시한 기준으로 결정할 경우 실측을 바탕으로 계산된 부피보다 약 1.8배 크게 계산되는 것으로 나타났다. 이는 Lee and Chou(1993)에서 제시된 기준이 실제 골재의 표면성질을 직접적으로 고려하고 있지 않으며 최대 길이, 폭, 두께를 이용하여 입자를 구분하는 형태를 취하여 골재의 부피 특성을 적절히 반영하지 못하기 때문이다. 오히려 Fig. 10과 같이, 모든 골재를 8면체로 가정

하여 계산된 부피(Volume of Bounding Box/3)와 무게에 의하여 결정된 부피의 상관성이 더 높은 것으로 나타났으나, 개별요소법에서 삼면체를 활용할 경우에는 단순화의 장점이 반영되지 않으며 기존의 실험적 입도분석 방법과 차이가 발생하는 단점이 있다. 한편 Fig. 10에서 나타난 결과를 다양한 골재에 일반화하기 위해서는 더 많은 골재원에 대한 분석이 필요할 것으로 판단된다.

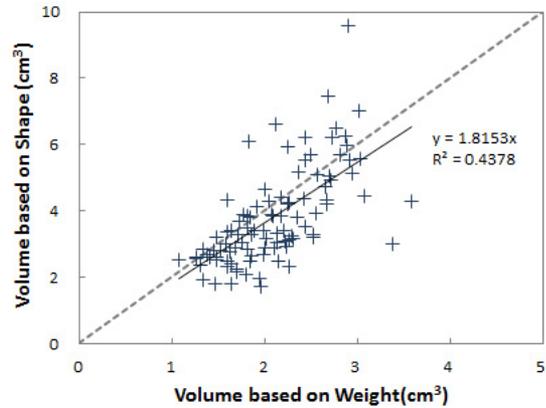


Fig. 9 Volume based on Shape vs. on Weight

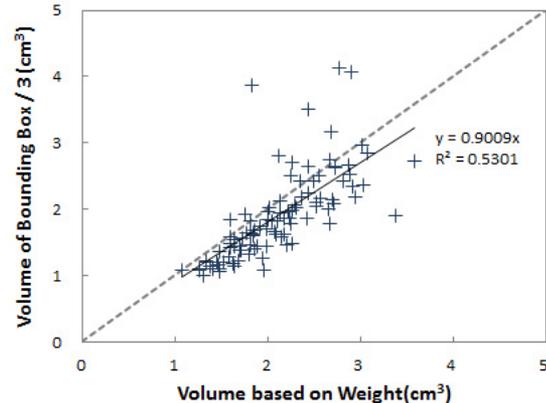


Fig. 10 Volume of Bounding Rectangular/3 vs. Volume based on Weight

3.2. 구형 입자의 등가지름(Equivalent Diameter) 산정

골재무게와 단위중량을 근거로 계산된 개별 골재의 부피는 골재의 형상적 특성을 나타내지는 못한다. 그러나 골재의 형상적 특성이 골재의 마찰각에 영향을 미치는 것을 고려할 때, 각각의 골재를 동일한 부피를 갖는 구형 입자로 가정하고 마찰각을 적절히 고려하는 방법을 가정할 수 있다. 이러한 방법은 아스팔트 혼합물이나 시멘트 콘크리트 포장에서 골재의 형상에 따른 파손형상이나 재료의 거동을 정밀하게 예측하기에 적절한 방

법이 아닐 수 있으나, 도로 포장용 골재는 특정한 세장비나 편평비를 만족해야 사용할 수 있는 기준이 존재하며, 골재더미의 다짐도나 입도분포곡선을 결정할 때 골재를 구형으로 가정하는 조건과 동일하기 때문에 합리적으로 적용할 수 있는 대안이다. 한편 Fig. 11에 나타난 바와 같이, 시멘트 입자의 경우에는 입자간의 상호작용에 큰 영향을 미치는 표면적이 측정된 부피 또는 구형으로 가정된 부피와 높은 상관성을 나타내는 것으로 나타나 이와 같은 가정이 유효할 것으로 나타났다.

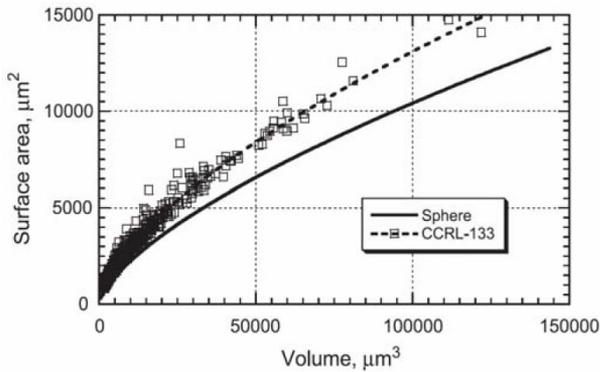
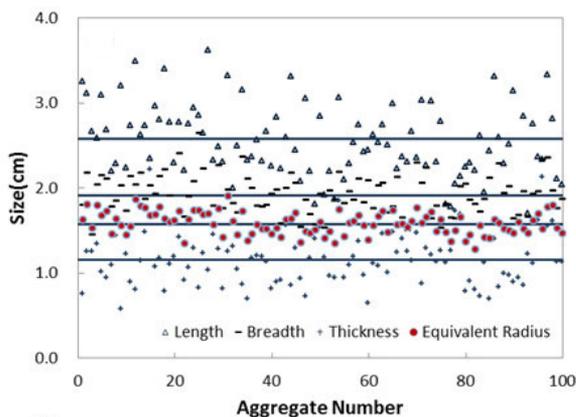
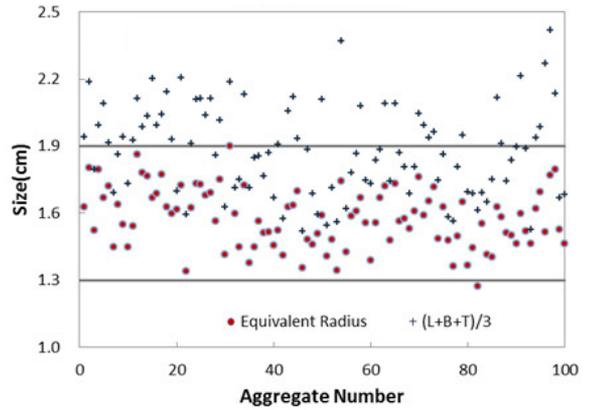


Fig. 11 Surface Area vs. Volume for Cement Grains (Huan, 2009)

Fig. 12는 골재의 무게와 단위중량을 이용하여 계산된 개별 골재의 부피와 동일한 부피를 갖는 구형 입자의 등가지름(Equivalent Diameter)의 분포(a)와 측정된 (길이+폭+두께)/3 (b)과의 비교를 나타내고 있다. 등가지름의 평균값, 최대값과 최소값은 각각 15.9mm, 19.0mm, 12.8mm로 나타나 19번체를 통과하면서 13mm체에 잔류하는 해당 골재의 크기 특성을 적절히 나타내는데 문제가 없는 것으로 나타났으며, 본 연구에서는 이러한 결과에 따라 15.9mm를 구형 입자의 지름



(a) Size Comparison with L, B, T



(b) Maximum and Minimum Radius

Fig. 12 Distribution of Radius of Equivalent Sphere

으로 결정하였다. 또한 Fig. 12(b)에서는 선정된 특정한 골재에 대해서 등가지름이 골재에서 측정된 중간값인 폭(Breadth)와 두께(Thickness) 사이에 존재하며 (길이+폭+두께)/3의 값 보다는 다소 작은 것으로 계산되는 특성을 확인할 수 있다.

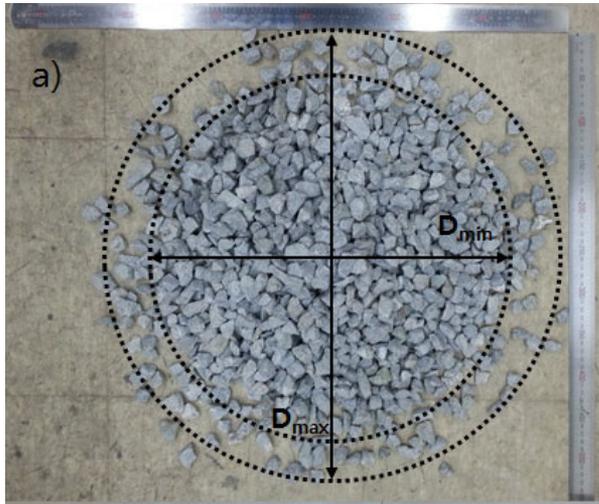
3.3. 골재 슬럼프 실험 및 DEM을 이용한 모사

Table 2는 골재 더미에 대하여 수행된 슬럼프 실험결과를 나타내고 있다. 굵은골재의 슬럼프 실험은 매우 좋은 반복성을 나타내어 골재의 입형특성을 간접적으로 평가하기 위하여 적절한 실험방법으로 평가되었으며, 5회를 반복한 골재 슬럼프 실험에서 높이, 무게, 최대 및 최소지름은 각각 9.0cm, 7432.6g, 51cm, 41cm로 나타났다.

Table 2. Aggregate Slump Test Result

Trial Number	1	2	3	4	5	Average
Height (cm)	9.0	8.9	8.8	9.4	9.0	9.0
Weight (g)	7435.8	7484.4	7430.7	7410.1	7402.1	7432.6
Maximum Diameter(cm)	51	53	52	51	50	51
Minimum Diameter(cm)	42	41	38	41	44	41

Fig. 13은 실제 실험에서 최대반경과 최소반경(a)과 높이(b)를 결정하는 방법을 나타내고 있으며, Fig. 14는 지름 15.9mm, 총 무게 7432.6g의 1,343개의 구형 입자를 자유낙하시켜 채워진 슬럼프 콘을 나타내고 있다.



(a) Maximum and Minimum Diameter-Top View



(b) Height-Side View

Fig. 13 Dimension of Aggregate Slump

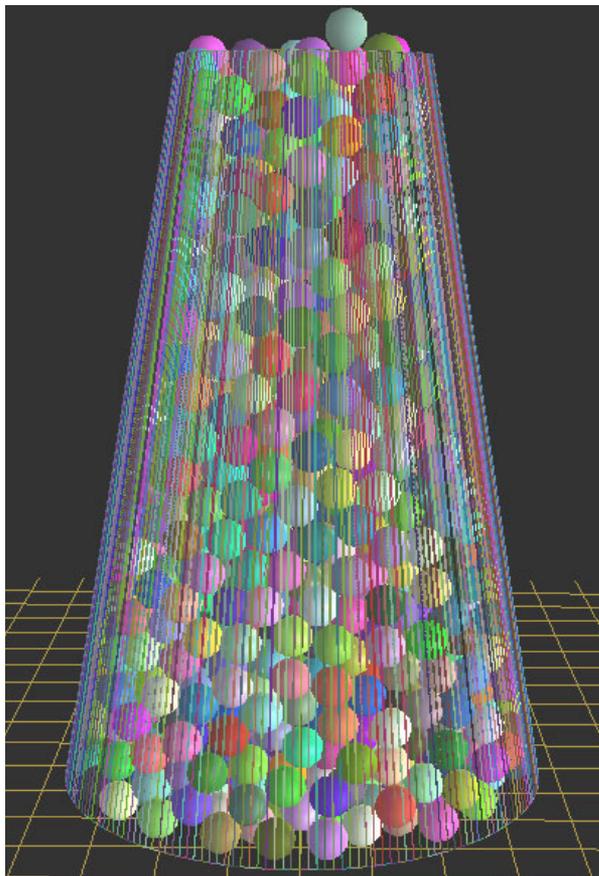


Fig. 14 Slump Cone Filled with Sphere Particles

한편 Fig. 14에서 사용된 입자의 무게는 Table 2에서 나타난 평균 무게에 비하여 약 11g 정도 무거운데, 이는 골재 2개에 해당하는 상대적으로 작은 무게이다. 그러나 슬럼프 콘을 채운 입자는 실제 실험에서 콘을 넘치지 않고 적절히 채워져, 모형에서 사용된 구형 입자의 직경과 재료의 물성이 해당조건에 대하여 매우 합리적인 것을 알 수 있다. 실제 슬럼프 실험을 개별요소법으로 모사한 결과는 Fig. 15에 나타나 있는데, 측정된 직경과 높이는 각각 38cm와 8.0cm로 측정(Table 3)되었다. 측정된 직경은 실내 골재 슬럼프 실험에서 나타난 최소 반경과 유사한 결과를 나타내었으나, 높이는 평균값과 약 0.9cm의 오차를 나타내었다.

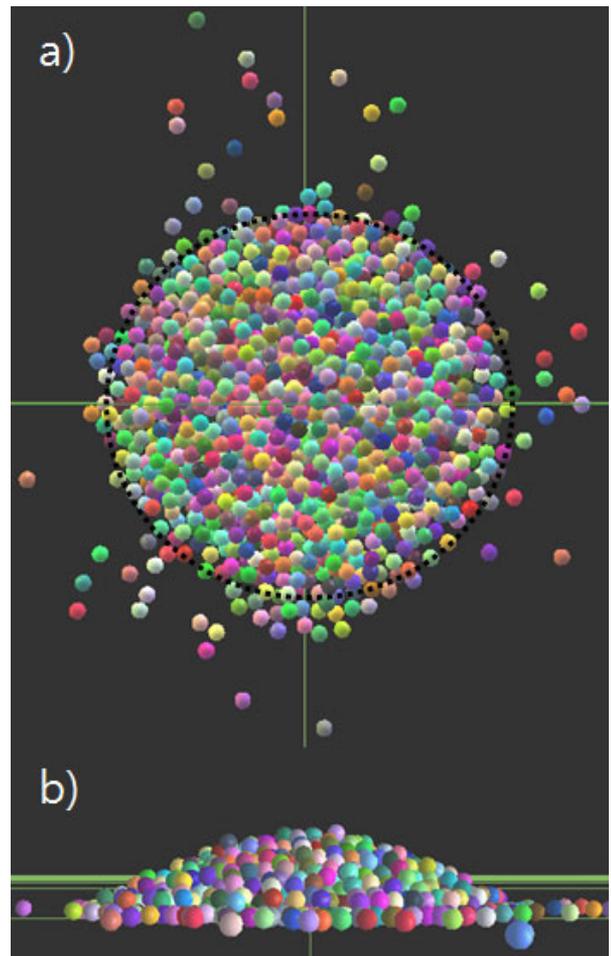


Fig. 15 Dimension of DEM Aggregate Slump

(a) Maximum and Minimum Diameter-Top View
(b) Height-Side View

Table 3. Aggregate Slump Test Result

	Simulation Result
Height (cm)	8.0
Weight (g)	7434.0
Diameter (cm)	38

개별요소법에서 계산된 골재 더미의 높이에 대한 오차는 부피 또는 퍼진골재의 직경 등 다른 계산된 값에 비하여 상대적으로 크게 발생하였는데, 이는 골재의 형상적 특성을 마찰각과 감쇠계수만으로 모사하기 때문인 것으로 추측할 수 있으나, 기존 문헌의 값을 활용한 것을 고려했을 때 매우 합리적인 결과임을 알 수 있다.

4. 결론 및 요약

본 연구에서는 일반적인 혼합물에 사용되는 임의의 골재 더미 중 19mm체를 통과하고 13mm체에 잔류하는 골재에 대하여 이미지 분석법으로 입형특성을 결정하였으며, 입형특성과 실내실험에서 측정된 단위중량 등을 이용하여 구형 입자의 등가반경을 결정한 후 골재 슬럼프 실험을 개별요소법으로 모사하였다. 수치해석적 슬럼프 실험에서의 슬럼프 콘 내의 골재 부피는 실내 실험에서의 슬럼프 콘 내의 골재 부피와 매우 유사한 것으로 나타났으며, 개별요소법을 이용한 수치해석적 슬럼프 실험결과 또한 실제 실험과 유사하게 나타났다. 본 연구에서는 이상의 연구결과에 대하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 기존의 골재 입형기준(Lee and Chou 1993)은 골재의 부피적 특성을 적절히 반영하지 못하며, 특히 개별요소법에서 그대로 적용하기에는 적절하지 않다.
2. 구형 입자를 사용하기 위하여 골재의 단위중량과 개별골재의 중량을 이용하여 결정된 등가직경은 골재의 다짐특성을 잘 나타내며, 이는 개별요소법에서 슬럼프 콘을 채우는 정도로 확인되었다.
3. 구형 입자를 이용하여 모사된 슬럼프 실험결과에서는 골재 슬럼프 실험을 잘 나타내었으나 평균높이에서 다소의 오차가 발생하는 것을 확인하였다.
4. 그러나 기존의 골재 분류방법이 골재의 특정체 통과를 기준으로하며, 입도분포곡선 및 최적화 다짐이론 등이 구형 골재를 가정하고 있으므로, 개별요소법에서 구형 입자를 가정한 다짐도나 입도분포에 대한 연구는 매우 활용성이 높을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업 재원으로 수행되었습니다.

References

- Janno VC. 1998. Quantification of Shape, Angularity, and Surface Texture of Base Course Materials, *Special Report 98-1. CRREL*. US Army Corps of Engineers.
- Kuo CY, Frost JD, Lai JS, Wang LB. 1996. Three-Dimensional Image Analysis of Aggregate Particles from Orthogonal Projections. *Transportation Research Record* 1526: 98-103.
- Maerz NH. 2004. Technical and Computational Aspects of the Measurement of Aggregate Shape by Digital Image Analysis. *J. Comput. Civil Eng.* Vol 18. No. 1. 10-18
- Kwan AKH, Mora CF. 2001. *Effect of Various Shape Parameters on Packing of Aggregate Particles*. Mag. Concr. Res. 53 2 91-100.
- Broek D. 1974.0 Some Contributions of Electron Fractography to the Theory of Fracture. *Int. Metallurgy. Rev.* Vol 19. 135-182
- Tang X, De Rooij MR, Van Duynhoven J, Van Breugel K. 2008. Dynamic Volume Change Measurement of Cereal Materials by Environmental Scanning Electron Microscopy and Videomicroscopy. *J Micorsc.* Vol 230. No 1. 100-107.
- Hu J., and Stroeven P. 2006. Shape Characterization of Concrete Aggregate. *Image Anal Stereol.* 43-53
- Garboczi Ej. 2002. Three-Dimensional Mathematical Analysis of Particle Shape Using X-ray Tomography and Spherical Harmonics: Application to Aggregates used in Concrete. *Cem. Concr. Res.* Vol 32. No 10. 1621-1638.
- Lin Cl, Miller JD. 2005. 3D Characterization and Analysis of Particle Shape Using X-ray Microrotomography (XMT). *Powder Technol.* Vol 154. No 1. 61-69.
- Taylor MA, Garboczi EJ, Erdogan ST and Fowler DW. 2006. Some Properties of Irregular 3D Particles. *Powder Technol.* Vol 162. No 1. 1-15.
- Erdgan ST, Fowler DW. 2005. Determination of Aggregate Shape Properties Using x-ray Tomographic Methods and the Effect of Shape on Concrete Rheology. *International Center for Aggregates Research.*
- Kozicki J, Tejchman J. 2011. *Numerical Simulations of Sand Behavior Using DEM with Two Different Descriptions of Grain Roughness*. International Conference on Particle-based Methods-Fundamental and Applications
- Mollon G, Zhao J. 2012. Realistic Generation and Packing of DEM Sand Samples. *Advances in Civil, Environmental and Materials Research ACEM*
- Jo SA, Cho GC, Lee SW. 2009. Evolution of Particle Crushing and Shear Behavior with Respect to Particle Shape Using PFC. *Journal of Korean Geotechnical Society.* Vol. 25 No 10. 41-53.
- Hwang TJ, Cho JY, Lee KH. 2010. Gradation Curve of Aggregate Using Digital Image Process. *Korean Society of Harzad Mitigation.* Vol 10. No 1.
- Cho NK, Yoo CS, Lee DY. 2008. Modeling Direct Shear Test of Crushed Stone Using DEM. *Journal of Korean Geotechnical*

- Society*. Vol 24. No 1. 15-23.
- Ormel TJ, 2012. *Modeling Asphalt with Discrete and Continuum Methods* University of Twente
- Liu Y. 2011. *Discrete Element Methods for Asphalt Concrete: Development and Application of User-Defined Microstructural Models and a Viscoelastic Micromechanical Model*. Michigan Technological University
- Sallam AM, Ashmawy AK., 2004. *The Modified Overlapping Rigid Clusters Method for Modeling Angular Particles Using DEM*
- He H. 2010. *Computational Modeling of Particle Packing in Concrete*. Technology University of Delft
- Chen J, Huang, B, Chen F, Shu X. 2012 Application of Discrete Element Method to Superpave Gyrotory Compaction. *Road Materials and Pavement Design*. Vol.13. No. 3. 480-500
- Lee H, Chou E. 1993. Survey of Image Processing Applications in Civil Engineering Digital Image Processing: Techniques and Applications in Civil Engineering. *ASCE Proceedings of the EF/NSF Conference*. 203-210
- Mora CF, Kwan AKH. 2000. Sphericity, Shape Factor, and Convexity Measurement of Coarse Aggregate for Concrete Using Digital Image Processing. *Cement and Concrete Research*. 351-358
- Kim J, Buttlar W. 2005. Micromechanical Fracture Modeling of Asphalt Mixture Using the Discrete Element Method. *Advances in Pavement Engineering*. 1-15.
- Varvrik WR, Pine WJ, Huber G, Carpenter HS, Bailey R. 2002. Bailey Method for Gradation Selection in HMA Design, *Transportation Research Board Circular*
- Smilauer V, Catalano E, Chareyre B, Dorofeenko S, Duriez J, Gladky A, Kozicki J, Modense C, Scholtes L, Sibille, L, Stransky J, Thoeni K. 2012. *Yade Documentation*
- Huang H. 2010. *Discrete Element Modeling of Railroad Ballast Using Imaging based Aggregate Morphology Characterization* University of Illinois at Urbana-Champaign
(접수일 : 2013. 4. 10 / 심사일 : 2013. 5. 6 / 심사완료일 : 2013. 8. 12)