

골재의 동적 거동 모사를 위한 DEM 입력변수의 결정 연구

Determination of DEM Input Parameters for Dynamic Behavior Simulation of Aggregates

윤태영 Yun, Tae Young
유평준 Yoo, Pyeong Jun
김연복 Kim, Yeon Bok

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

ABSTRACT

PURPOSES : Evaluation of input parameters determination procedure for dynamic analysis of aggregates in DEM.

METHODS : In this research, the aggregate slump test and angularity test were performed as fundamental laboratory tests to determine input parameters of spherical particles in DEM. The heights spreads, weights of the simple tests were measured and used to calibrate rolling and static friction coefficients of particles.

RESULTS : The DEM simulations with calibrated parameters showed good agreement with the laboratory test results for given dynamic condition.

CONCLUSIONS : It is concluded that the employed calibration method can be applicable to determine rolling friction coefficient of DEM simulation for given dynamic conditions. However, further research is necessary to connect the result to the behavior of aggregate in packing and mixing process and to refine static friction coefficient.

Keywords

discrete element method, aggregate slump test, angularity test, equivalent sphere particle 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)
Received Dec, 16, 2013 Revised Dec, 20, 2013 Accepted Jan, 9, 2014

1. 연구배경 및 목적

골재의 형상적 특성은 골재 또는 골재와 바인더와의 혼합과정에서의 골재의 거동 및 다짐밀도 등에 영향을 미치는 중요한 인자로서, 이를 수학적으로 또는 역학적으로 정량화하고자 하는 연구들이 다양한 분야의 연구자들(Mollon and Zhao 2012, Cho et al. 2008, Jo et al. 2009, Hwang et al. 2010)에 의하여 수행되고 있다. 특히, 골재의 형상적 특성을 반영한 골재의 거동을 분석하고 임의의 조건을 모사하기 위하여 이산요소법

(Discrete Element Method, DEM)과 같은 수치해석적 방법이 많이 활용되고 있는데, 이러한 연구(Lu and McDowell 2007, Chen et al. 2012, Tutumluer et al. 2012, He et al. 2009, Liu et al. 2012, Kun and Herrmann 1996, Zhang and Zhou 2012, Yun et al. 2013)에서는 주로 체크기와 동일한 지름을 갖는 구형입자(Spherical Particle)를 이용하거나 X-ray CT 등을 통하여 얻은 이미지 자료에서 획득한 골재의 형태를 다면체입자(Polyhedron), 연속된 구형입자, 겹쳐진 구형

입자(Overlapping Sphere Clump)를 이용하며, 골재의 전단실험이나 다짐밀도실험 결과와 이들을 모사하는 수치해석적 결과를 비교하여 수치해석적 모형에 사용되는 입자의 내부마찰각 또는 마찰계수를 결정한다. 그러나 전단실험이나 압축실험과 같이 특정한 실험조건을 만족시키는 DEM 입력변수는 해당 실험조건에서는 만족할 만한 결과를 줄 수 있지만, 시멘트 콘크리트나 아스팔트 콘크리트에서 중요한 설계인자로 고려되는 골재의 부피 특성을 고려하지 못하며 골재의 다짐 또는 바인더와의 혼합과정에서 이들 재료의 다짐밀도의 변화를 예측하거나 재료의 상(Phase)의 변화에 따른 거동을 예측하기 위한 다상 해석(Multi-Phase Analysis)으로의 확장을 위해서는 충분한 조건에서 검토가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 도로포장 재료의 다짐밀도 예측 및 다상해석을 위한 우선과정으로, 굵은골재의 동적거동이 고려되는 조건에서 단순한 실험을 이용하여 DEM 입력변수를 정량화할 수 있는 방법을 검토하고자 하였다. 이를 위하여 골재 단위중량 및 무게를 측정하였으며, 이미지 프로세싱 기법 등으로 형상적 특성을 정량화하고 간단한 실험장비를 이용한 실내실험을 수행하였다.

2. 연구방법

2.1. 실내실험을 통한 골재의 형상특성 정량화

골재의 형상적 특성을 확인하기 위하여 동일한 골재원에서 체분석 실험을 통하여 얻어진 3가지 크기의 쇄색 골재더미 즉, 25mm체를 통과하고 19mm체에 잔류하는 골재더미(19mm 골재), 19mm체를 통과하고 13mm체에 잔류하는 골재더미(13mm 골재), 13mm체를 통과하고 10mm체에 잔류하는 골재더미(10mm 골재)에서 각각 100개의 개별 골재를 선정하였다. 선정된 골재에 대하여 디지털 카메라를 이용하여 2차원 이미지를 촬영하였으며, 이미지 분석 프로그램인 ImageJ를 이용하여 골재의 가로폭과 세로높이를 결정하였다. 2차원 이미지에서 결정할 수 없는 골재의 두께는 버니어 캘리퍼(Vernier Caliper)를 이용하여 측정하였다. 또한 개별골재의 중량 및 수중중량을 측정하여 각각의 골재더미에 대한 단위중량을 결정하여 골재의 기초적인 재료 물성을 정량화하였다.

골재의 형상적 특성은 모양(Shape), 모남정도(Angularity), 표면 거칠기(Texture)의 세 가지로 구분(Massad 2004)하는 것이 일반적이다. 이러한 골재의 형상적 특성은 정밀한 이미지 프로세싱 기법을 사용하여 정량화할 수 있는데, 이렇게 측정된 골재의 형상적 특성은

DEM과 같은 수치해석적 방법에서 부착력, 접착력이나 점성이 없는 입자의 동적거동을 표현하는데 사용되는 주요변수인 회전마찰계수(Rolling Friction Coefficient), 정지마찰계수(Static Friction Coefficient)와 연관 지어질 수 있으며, 이는 DEM을 이용한 동적해석에서 매우 중요한 과정이다. 이를 위하여 본 연구에서는 단순하지만 효과적으로 활용될 수 있는 골재 모남정도 실험(Angularity Test)과 골재 슬럼프 실험을 19mm, 13mm, 10mm 골재에 대하여 5회 반복하여 수행하였다.

골재 모남정도 실험은 골재로 채워진 상부 용기의 바닥을 순간적으로 열어 골재가 하부 용기에 낙하하면서 쌓여진 골재더미의 높이와 무게를 측정하는 방법(AASHTO T 326)으로 진행되는데, 실험명칭과는 달리 모남정도 실험에서 하부 용기 위에 골재의 높이나 무게가 골재의 모양, 모남정도 및 거칠기에 의하여 달라지기 때문에 실험의 결과가 단순히 모남정도만을 나타내지는 않는다. 본 연구에서는 실험 및 모사의 편의성을 위하여 모든 크기의 골재더미에 대한 모남정도 실험에 대하여 8kg의 골재를 상부용기에 담아 낙하토록 하였으며, Fig. 1은 모남정도 실험장비를, Fig. 2는 모남정도 실험에서 골재의 높이에 대한 정의를 나타내고 있다.



Fig. 1 Angularity Test Apparatus

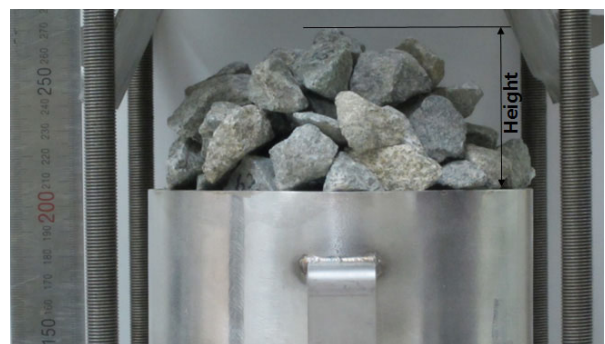


Fig. 2 Height of Aggregates in Angularity Test

골재의 동적거동에 대한 형상적 특성을 평가하기 위해서 추가적으로 수행된 슬럼프 실험은 일반적인 시멘트 모르타르의 슬럼프를 측정하는 콘 형태의 슬럼프 실험장비를 사용하여 일반 시멘트 콘크리트의 슬럼프 실험과 동일한 방법으로 수행되었는데, 추가적으로 슬럼프 콘에 들어간 골재더미의 무게와 퍼진 골재의 지름을 측정하였다.

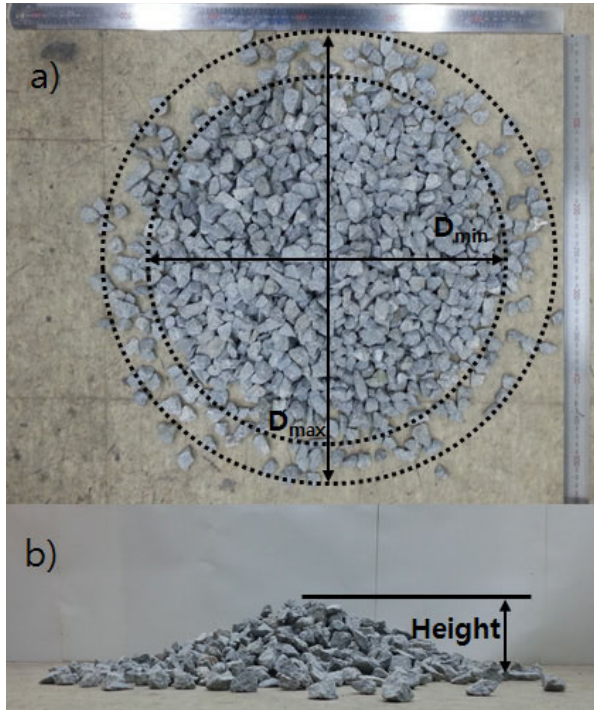


Fig. 3 Determination of Maximum and Minimum Diameter (a) and Height (b) of Aggregates (Yun et al. 2013)

Fig. 3에서 골재 슬럼프 실험을 통하여 얻어진 퍼진 골재의 최소지름, 최대지름 및 높이를 결정하는 방법을 나타내고 있는데, 최소지름은 퍼진골재에 의하여 형성되는 원의 최소지름을 나타내고, 최대지름은 일부 골재를 제외한 골재에 의하여 형성되는 원의 최대지름을 나타낸다. 골재 슬럼프 실험의 결과는 모남정도 실험과 함께 수치해석적 DEM 모사 결과와 비교하여 입력변수를 결정하는데 활용되었다.

2.2. DEM을 이용한 실내실험 모사

DEM 해석에서 골재의 동적거동에 중요한 영향을 미치는 골재의 형상은 앞서 언급된 여러 개의 구형입자로 실제 골재의 형상을 그대로 모사하는 방법이나 다면체 입자를 이용하는 방법이 실제 실험과 수치해석에서 발생하는 형상적 오차의 발생을 최소화할 수 있는 가장 좋은 방법으로 알려져 있다. 그러나 여러 개의 입자로 구

성된 수치해석적 골재를 사용할 경우에는 해석시간이 기하급수적으로 증가하여 실용적인 3차원해석이 어려우며, 이러한 형태의 골재를 사용한 이후에도 마찰계수 등의 입력변수를 실험적으로 결정해야 하므로 골재의 슬럼프 실험 모사 등과 같은 동적거동해석에는 정밀도나 해석시간의 관점에서의 장점이 크지 않아 주로 구형입자가 활용된다. 따라서 본 연구에서는 구형입자를 활용되 100개의 개별 골재의 단위중량과 무게에서 결정된 각각의 골재를 대표할 수 있는 부피를 갖을 수 있는 등가구형입자 개념(Yun et al. 2013)을 활용하였다.

또한 본 연구에서 골재의 동적거동에 대한 수치해석을 위하여 사용된 EDEM은 이산요소법에 근거한 소프트웨어로서 탄성계수, 프와송비, 단위중량, 회전 또는 정지마찰계수, 반발력계수(Restitution Coefficient)의 물성을 필요로 한다. 이러한 역학적 물성은 해석 대상의 조건에 따라서 결과에 대한 영향력 또는 민감도가 달라지는데, 골재 슬럼프 실험이나 모남정도 실험에서는 골재의 변위가 거의 발생하지 않는 만큼 골재의 탄성계수나 프와송비는 해석결과에 크게 영향을 주지 않는다. 따라서 골재의 탄성계수와 프와송비는 해석결과에 영향을 최소화하면서 해석시간을 단축시키기 위한 값을 예비실험을 통하여 선정하였으며, Table 1은 결정된 골재와 실험용기의 물성을 나타내고 있다.

Table 1. Material Property used in DEM Analysis

	Shear Modulus (Pa)	Poisson's Ratio	Restitution Coefficient	Density (g/cm ³)
Aggregate	1.35E7	0.35	0.6	2.73 (19mm)
				2.72 (13mm)
				2.71 (10mm)
Steel	1.35E10	0.4		50.0

한편, 입자의 평면에 존재하는 골재의 퍼짐정도를 모사하는 경우, 특히 구형입자를 이용하여 골재를 모사하는 경우에는 회전마찰계수의 역할이 매우 중요한데, 이는 DEM에서 구형입자의 이동이 회전마찰력으로 대표되는 회전에너지에 의하여 주로 결정되기 때문이다. 한편 두 물체의 이동에 대한 저항성이 두 재료의 마이크로 이하의 범위에서의 상호작용으로 결정되는 것을 감안할 때, 이들 값을 뉴턴역학에서 사용되는 마찰계수만으로 정확하게 정량화할 수 있는지에 대해서는 논란의 여지가 있다. 그러나 본 연구에서는 다양한 분야에서 광범위하게 적용되는 해석시간 및 방법에서 큰 장점이 있는 구형입자를 최대한 활용하기 위하여, 골재의 부피특성을 대표할 수 있는 등가구형입자에 여러 가지 조합의 정지 및 회전마찰

계수를 적용한 수치해석적 모사실험의 결과와 실제 실험의 결과를 비교하였다. DEM을 이용한 수치해석적 모사 실험에서 골재를 표현하기 위하여 결정된 입자의 정지 또는 회전마찰계수의 범위를 각각 0.1~0.2, 0.5~1.0으로 선정하였는데, 이것은 각각의 최대값을 상회하는 골재의 정지 또는 회전마찰력을 적용한 입자를 이용하여 모남정도 실험 모사를 진행할 경우 입자 사이의 마찰력으로 인하여 골재가 낙하하지 않아 실제 실험결과와 달라지는 것을 피하기 위한 것이다. 다음 Table 2는 본 연구의 민감도 분석에서 사용된 마찰계수와 이에 해당하는 경우의 번호(Case Number)를 나타내고 있으며, 마찰계수의 범위 값은 실제 골재의 종류나 크기, 실험조건, 모사에 사용된 입자의 특성에 따라 달라질 수 있다.

Table 2. Rolling and Static Friction Coefficients

Case Number	Static Friction Coefficient						
	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	
Rolling Friction Coefficient	0.10	Case 1	Case 4	Case 7	Case 10	Case 13	Case 16
	0.15	Case 2	Case 5	Case 8	Case 11	Case 14	Case 17
	0.20	Case 3	Case 6	Case 9	Case 12	Case 15	Case 18

DEM을 이용한 골재의 동적거동은 실제 실험과 유사하게 골재의 최초 위치 또는 반복횟수에 따라서 골재의 쌓여진 높이나 퍼진정도가 달라지기 때문에, 실제 실험과 동일하게 수치해석적 모남정도 실험과 슬럼프 실험은 각각 5회 반복되었다. Fig. 4는 모남정도 실험에서 골재가 낙하하는 과정을 나타내고 있는데, 이상의 마찰

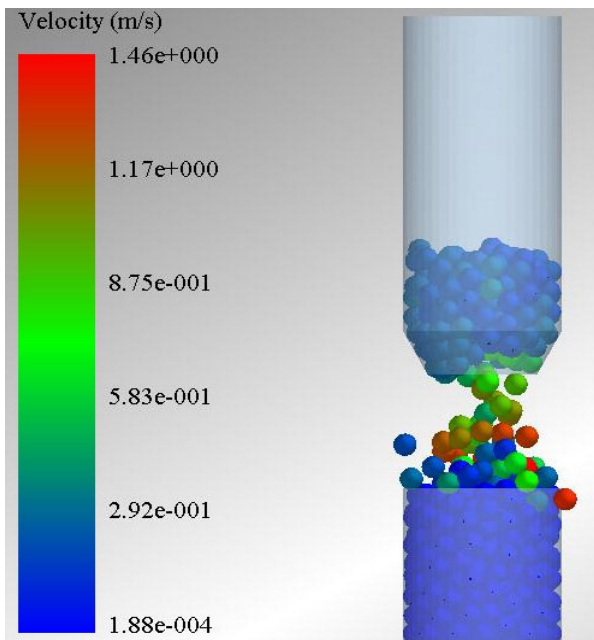


Fig. 4 Simulation of Angularity Test in DEM

계수 조건에서 채워진 골재가 낙하하여 움직임이 없어지는 시점까지의 시간은 2.4초에서 3.3초 이내로 측정되어 실제 실험과 매우 유사한 것으로 나타났다.

다음 Fig. 5와 Fig. 6은 DEM에서의 골재 슬럼프 실험에서 슬럼프 콘이 올라가는 과정과 그에 따라 골재가 퍼졌을 때의 퍼진 정도와 높이를 나타내고 있는데, 실제 실험에서는 골재가 최대 2초 이내에 완전히 정지하는데 반하여 모사 실험에서는 회전마찰계수가 클수록 정지까지의 시간이 감소하는 경향을 나타내었다.

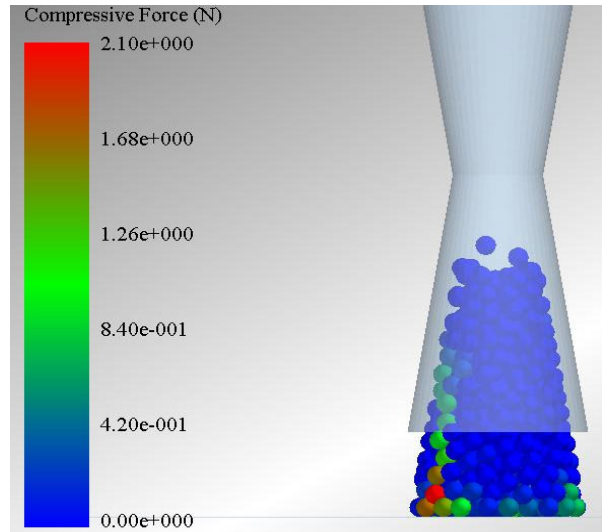


Fig. 5 Simulation of Aggregate Slump Test in DEM

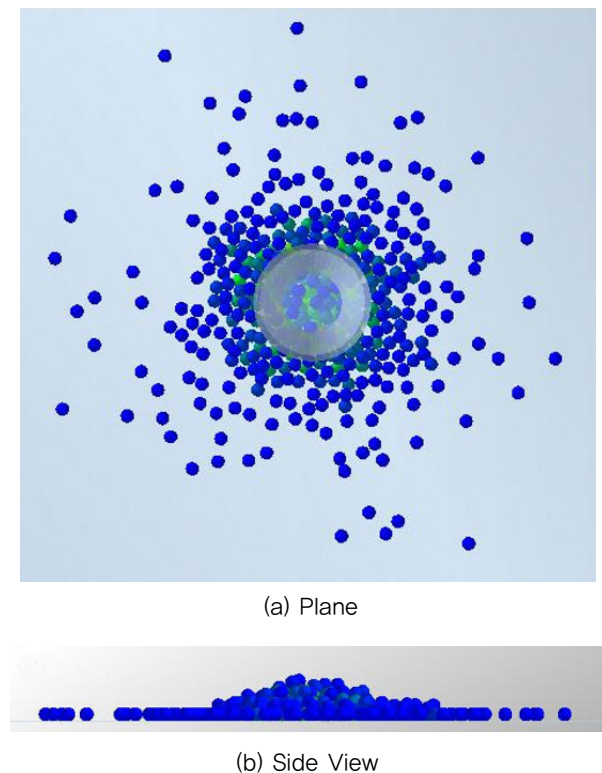


Fig. 6 Simulation Result of Aggregate Slump Test in DEM

3. 실험 결과 및 분석

3.1. 골재의 형상 특성

다음 Fig. 7, Fig. 8과 Fig. 9는 이미지 분석과 버니어 캘리퍼를 이용하여 얻은 19mm, 13mm 및 10mm 골재의 길이, 폭, 두께와 해당 개별골재의 단위중량과 중량을 이용하여 결정한 등가구형입자의 지름을 나타내고 있다. 실선은 길이, 폭, 두께의 평균값을 나타내며, 각 값의 분포로 보아 선택된 100개가 전체 골재의 형상을 충분히

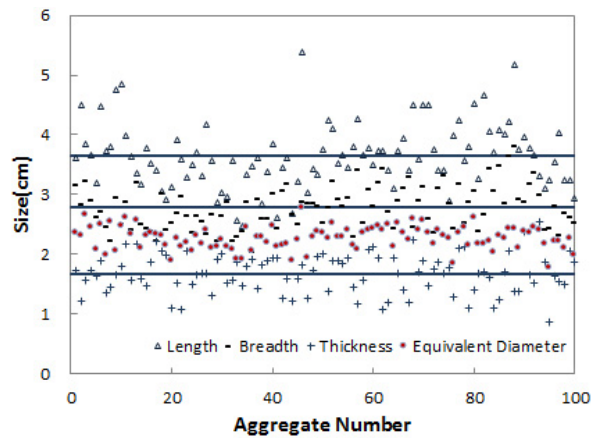


Fig. 7 Dimensions of 19mm Aggregates

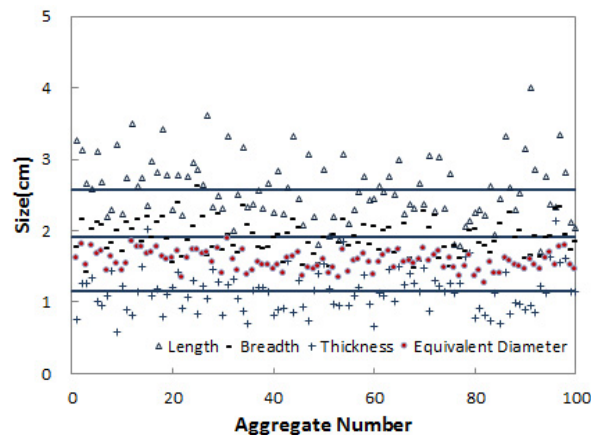


Fig. 8 Dimensions of 13mm Aggregates

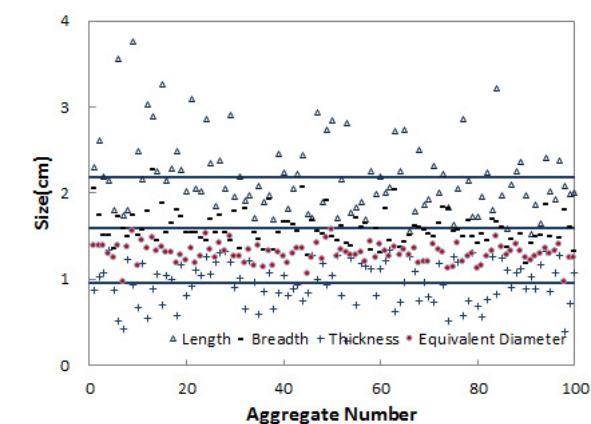


Fig. 9 Dimensions of 10mm Aggregates

대표할 수 있는 것으로 판단된다. 19mm, 13mm 및 10mm 골재의 등가구형입자의 지름은 각각 2.27cm, 1.57cm 및 1.29cm로 나타났는데, 등가구형입자의 지름이 해당 골재의 통과 및 잔류 체크기 내에 존재하는 것으로 결정되어 등가구형입자가 골재의 부피 특성을 적절히 나타낼 수 있을 뿐만 아니라 체크기로 골재를 구분하는 기존 골재 구분 개념도 만족시키는 것을 알 수 있다.

Table 3은 Fig. 7~Fig. 9에 나타나 있는 평균값과 함께 해당골재의 잔류체 크기와 측정된 단위중량을 이용하여 계산된 구형골재의 무게를 나타내고 있다. Table 3의 계산된 중량(Calculated Weight)와 평균중량을 비교하면 각각의 골재들을 모형화하기 위해서 DEM에서 잔류 체크기를 구형입자의 지름으로 이용할 경우 실제 무게와 입자의 무게가 크게 달라지는 문제를 확인할 수 있는데, 특히 10mm 골재의 경우에는 100개 골재의 평균 무게가 3.14g인 것에 반하여 잔류 체크기와 단위중량으로 계산된 구형입자의 무게가 1.42g으로 큰 오차가 발생한다.

Table 3. Material Property used in DEM Analysis

	Density (g/cm ³)	Weight (g)	Thickness (cm)	Breadth (cm)	Length (cm)	Calculated Weight (g)
19mm Aggregate	2.73	17.06	1.67	2.79	3.64	9.81
13mm Aggregate	2.72	5.63	1.15	1.91	2.58	3.13
10mm Aggregate	2.71	3.14	0.96	1.59	2.19	1.42

3.2. 실내실험 결과 및 DEM 역학적 변수 결정

다음 Table 4는 각각의 골재터미에 대하여 수행된 모남정도 실험결과를 나타내고 있는데, 일반적인 다져진 골재의 밀도 경향과는 다르게 골재의 크기가 클수록 용기에 남은 골재의 무게가 증가하며, 각각의 골재에 의하여 쌓여진 골재의 높이도 증가하는 경향이 나타났다. 이러한 경향은 짧은 낙하시간 동안 자중으로 다져지는 모남실험의 조건이 일반적인 다짐밀도시험의 조건과 서로 다르기 때문으로 판단된다. 한편 골재 크기에 따른 용기에 남은 골재 무게의 차이는 명확한 경향을 나타내었으나, 골재 높이의 차이에 대해서는 명확한 경향을 나타내지 않았으며, 특히 13mm 골재와 10mm 골재는 높이의 차이가 거의 발생하지 않았다. 이러한 결과는 실제적으로 두 골재의 크기의 차이가 상대적으로 매우 작아 골재의 크기 특성을 나타내기가 충분하지 않은 동시에, 동일

한 골재원에서 채취되어 모남정도나 표면 거칠기에서 유사한 특성을 갖기 때문에 판단된다. 따라서 제한된 공간을 짧은 시간동안 채우는 골재더미의 밀도는 골재의 크기에 명확한 영향을 받지만 쌓여지는 높이는 골재의 크기에서 보다 골재의 형상적 특성에 더 큰 영향을 받을 것으로 보이며, 골재와 용기의 크기 차이에서 발생하여 밀도에 영향을 미치는 Wall Effect가 낙하 다짐밀도에 주는 영향이 골재의 크기보다 크지 않은 것으로 판단된다.

Table 4. Angularity Test Result

Trial Number	1	2	3	4	5	Average	
Weight (g)	19mm	4903.9	4969.3	5139.9	4966.2	4974.1	4990.7
	13mm	4700.3	4713.2	4762.3	4810.1	4722.6	4741.7
	10mm	4680.7	4638.6	4681.9	4636.9	4689.4	4665.5
Height (mm)	19mm	63	64	69	66	77	67.8
	13mm	60	61	64	70	63	63.6
	10mm	65	62	62	62	62	62.6

다음 Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12는 실내실험을 모사하여 19mm, 13mm, 10mm 골재에 대한 수치해석적 모남정도 실험결과를 나타내고 있다.

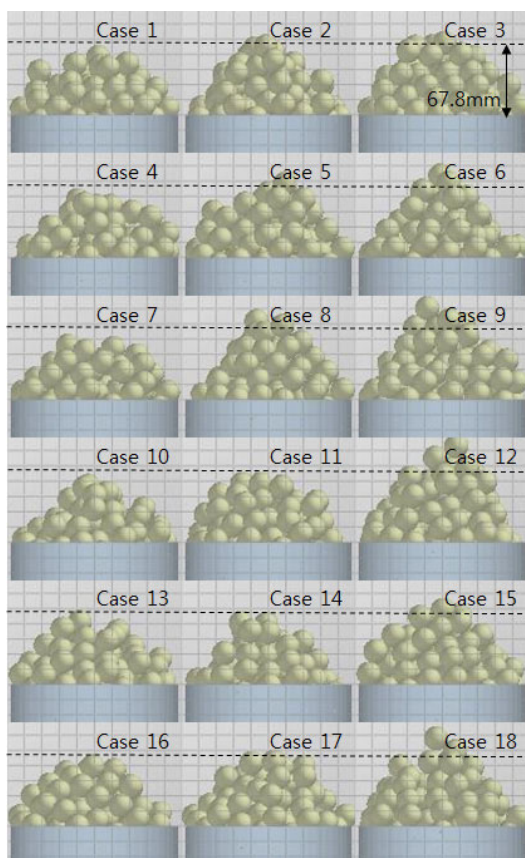


Fig. 10 Angularity Test Simulation for 19mm Aggregates in DEM

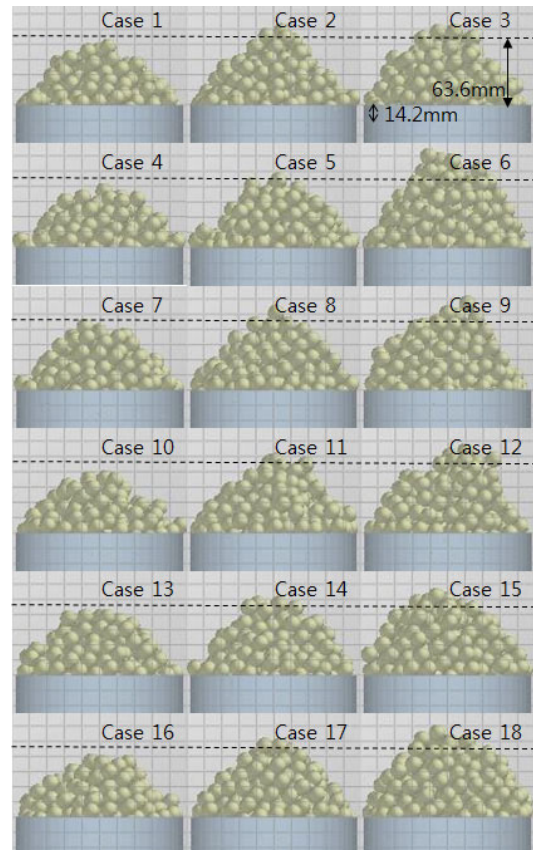


Fig. 11 Angularity Test Simulation for 13mm Aggregates in DEM

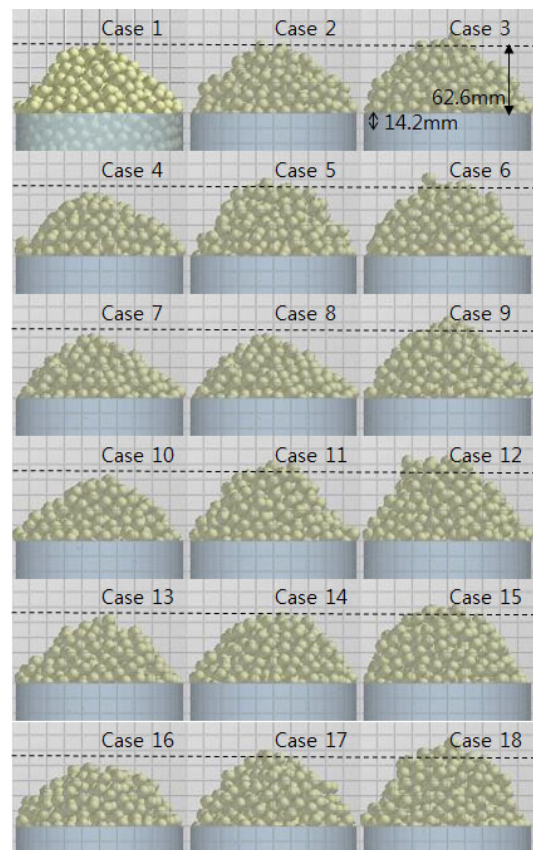


Fig. 12 Angularity Test Simulation for 10mm Aggregates in DEM

DEM에서의 모남정도 실험은 실내실험 결과와 유사하게 골재의 크기가 작아질수록 높이가 낮아지는 경향을 나타내었으며, 입력변수로 사용된 회전마찰계수가 증가함에 따라서 쌓여진 높이가 증가하는 경향을 나타내어 구형입자가 실제 모남정도 실험을 모사하는 데에는 문제가 없는 것으로 나타났다. 그러나 정지마찰계수의 변화에 따른 쌓여진 높이의 변화는 명확하게 나타나지 않았는데, 이는 앞서 언급한 바와 같이 구형입자를 사용하는 DEM 모사에서 정지마찰계수의 역할이 크지 않기 때문으로 판단된다. 한편, 일부의 경우를 제외하고 수치해석적 모남정도 실험에서도 골재의 크기가 작아짐에 따라서 용기 내에 존재하는 골재의 무게가 작아지는 것으로 나타나 실내실험의 경향을 대체적으로 잘 반영하는 것으로 나타났다. 그러나 회전마찰계수가 0.2인 Case 3, 6, 9, 12, 15, 18의 경우에는 모든 정지마찰계수와 골재종류에 대하여 과다한 높이값이 나타났다. 또한 용기 내에 존재하는 골재 무게의 절대값은 19mm, 13mm, 10mm 골재의 실측 평균값에 비하여 대략 8%, 10%, 12% 정도 커서, 구형입자를 이용한 DEM 해석이 골재더미의 밀도를 과다 평가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 모사실험에서 사용된 입자가 골재의 부피를 대표할 수 있으며, 마찰계수에 의하여 지배되는 쌓여진 골재의 높이가 실내실험과 유사한 결과를 나타내는 것을 고려할 때, 골재의 형태를 그대로 나타내는 비구형 입자보다 다짐밀도를 높게 평가하는 구형입자가 갖는 형상적 한계에 의한 것으로 판단된다.

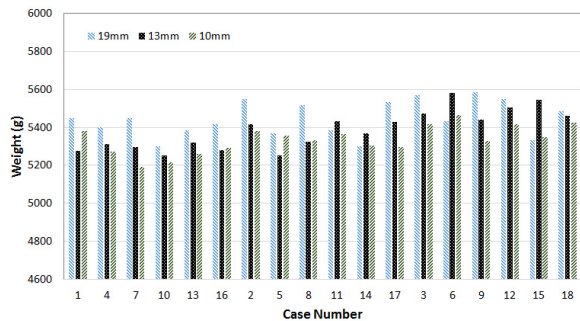


Fig. 13 Weight of Aggregate on the Bottom Container

Table 5는 각각의 크기의 골재 더미에 대하여 5회에 반복하여 수행된 골재 슬럼프 실험결과를 나타내고 있다. 굵은골재의 슬럼프 실험은 골재의 쌓여진 높이, 슬럼프 콘 내의 무게, 퍼진정도의 기준에서 골재의 크기에 따른 차이를 구분할 수 있는 충분한 반복성을 나타내었으며, 이는 골재의 입형특성을 간접적으로 평가하기 위한 적절한 실험방법임을 의미한다. 특히 골재의 크기가 작아짐에 따라서 퍼진정도는 커지면서 쌓여진 골재의 높이는 낮아지는 것으로 확인되었으며, 슬럼프 콘에 들어가

는 골재의 중량도 증가하는 경향을 나타내었다. 이러한 경향은 실제 실내실험에서 수차례에 걸쳐 슬럼프 콘을 해당 골재로 채우는 과정에서 골재가 일반적인 다짐조건과 유사한 방법으로 충분히 다져지기 때문으로 판단된다. Fig. 14는 골재 크기별 3개 반복실험에서 얻어진 골재의 퍼진정도를 나타내고 있으며, Fig. 14 내의 원들은 19mm, 13mm, 10mm 골재에 대하여 5회 반복을 통하여 얻어진 최소지름(D_{min})의 평균값인 378mm, 432mm, 468mm를 나타내고 있다. 원과 골재가 생성하는 원형 퍼짐형태를 고려할 때 Fig. 2에서 정의된 D_{min} 을 잘 나타내며, 실험 사이의 편차도 크지 않은 것으로 판단된다. Fig. 15는 Table 5를 그래프화한 것으로 골재크기에 따른 무게와 높이의 경향이 명확하게 나타난다.

Table 5. Aggregate Slump Test Results

Aggregate	Trial Number	Height (mm)	Weight (g)	D_{min} (mm)	D_{max} (mm)
19mm	1	95	7421.9	380	510
	2	96	7464.1	350	510
	3	99	7451.1	390	470
	4	94	7403.2	380	470
	5	97	7439.7	390	470
	Average	96	7436.0	378	486
13mm	1	90	7435.8	450	500
	2	89	7484.4	410	490
	3	88	7430.7	450	510
	4	94	7410.1	450	520
	5	90	7402.1	400	550
	Average	90	7432.6	432	514
10mm	1	86	7474.0	450	580
	2	86	7501.0	460	560
	3	82	7544.3	460	520
	4	91	7525.4	500	590
	5	94	7551.7	470	540
	Average	88	7519.3	468	558

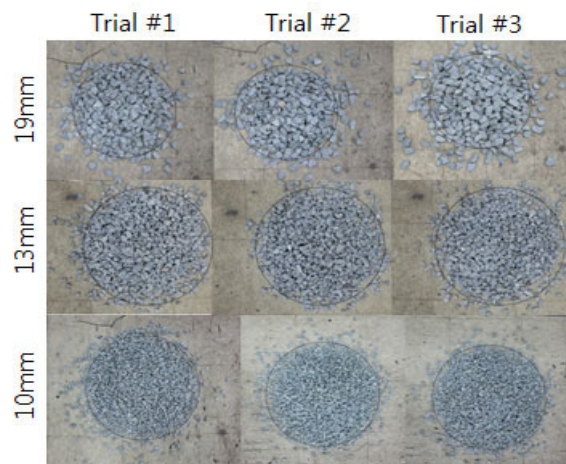


Fig. 14 Spread Example of Aggregate Slump Tests

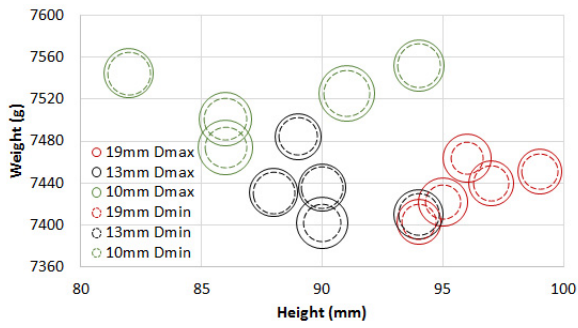


Fig. 15 Simulation of Aggregate Slump Test in DEM

Fig. 16, Fig. 17, Fig. 18은 각각 19mm, 13mm, 10mm 골재 슬럼프 실험에 대하여 수치해석적으로 모사하여 얻은 골재의 퍼짐정도를 나타내고 있다.



Fig. 16 Aggregate Slump Test Simulation for 19mm Aggregates in DEM

Table 3의 단위중량과 평균무게를 이용하여 19mm, 13mm, 10mm 골재에 대하여 등가구형입자의 지름을 결정하고 각각 7436g, 7432g, 7519g의 입자를 슬럼프 콘에 넣어 모사실험을 수행하였다. 골재 모남정도 실험과 같이 회전마찰계수에 따른 골재의 퍼짐정도는 명확한 경향을 나타내지만 정지마찰계수의 영향은 명확하지 않은 것으로 나타났다. 모든 골재의 크기에 대하여 0.1의 회전마찰계수가 적용된 Case 1, 4, 7, 10, 13, 16에서는 실제실험에 비하여 과다한 골재의 퍼짐이 관찰되었다.

한편 수치해석적 골재 슬럼프 실험 모사에서 쌓여진 골재의 평균 높이는 Fig. 19에 나타났는데, 역시 회전마찰력에 의하여 그 정도가 결정되며, 주어진 민감도분석 변수 값 중에서는 19mm 골재에 대해서는 회전마찰



Fig. 17 Aggregate Slump Test Simulation for 13mm Aggregates in DEM



Fig. 18 Aggregate Slump Test Simulation for 10mm Aggregates in DEM

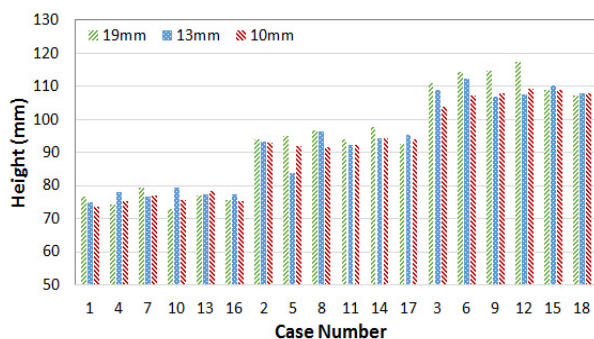


Fig. 19 Height of Aggregate Slump in Simulation

력 0.15 또는 0.20을 적용하는 것이, 13mm와 10mm골재에 대해서는 회전마찰력 0.15를 적용하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

이상에서의 실험편차를 고려한 회전마찰력계수의 범위 및 민감도분석에 사용된 값 중의 제안값은 다음 Table 6과 같다. Table 6의 팔호 안의 값은 민감도분석에 사용되지 않았으나 오차의 정도를 고려하여 보다 나은 결과를 나타낼 수 있는 제안값을 나타낸다.

Table 6. Determination of Recommended Rolling Friction Coefficient

	Angularity Test	Slump Test		Recommended Rolling Friction Coefficient
	Height	Spread	Height	
19mm Aggregate			< 0.20 > 0.10	0.15 (0.18)
13mm Aggregate	< 0.20 > 0.10	> 0.10	< 0.20 > 0.10	0.15 (0.14)
10mm Aggregate			< 0.20 > 0.10	

4. 결론 및 요약

본 연구에서는 일반적인 구형입자의 동적인 거동을 모사하기 위한 DEM 해석에서의 입력변수를 기초 물성 실험, 골재 모남정도 실험 및 슬럼프 실험을 통하여 제시하였으며, 이에 대한 결론은 다음과 같이 정리될 수 있다.

1. DEM에서 구형입자를 이용하여 골재의 동적인 거동을 모사하기 위한 입력변수 결정에는 골재 모남정도 실험과 슬럼프 실험이 사용될 수 있다.
2. 구형입자에 동적인 거동에 대하여 골재의 정지마찰력은 그 결과에 거의 영향을 미치지 않으며, 회전마찰력에 의하여 결정된다.
3. 골재의 다짐실험 모사에서는 정지마찰력의 영향이 동적거동 모사에 비하여 훨씬 큰 영향을 미칠 것으로 예상되므로, 정지마찰력은 단일골재의 다짐에 따른 밀도변화에서 결정하는 것이 합리적이다.
4. 골재의 부피를 대표하는 등가구형입자를 활용하는 경우, 입력변수를 변화시켜 골재의 높이 및 퍼진정도 등을 적절히 모사할 수 있다.
5. 그러나 골재의 부피를 대표하는 등가구형입자는 골재의 무게 및 밀도의 변화 경향을 나타낼 수는 있으나 그 절대값에서는 대략 10% 정도의 오차를 발생시킬 수 있다.

6. 골재의 동적거동 뿐만 아니라 다짐밀도를 정확하게 예측하기 위해서는 골재의 골격 및 부피를 대표할 수 있으며 해석시간을 단축시킬 수 있는 대표입자의 결정 알고리즘이 필요하다.
7. 또한 입력변수 정량화의 정확성을 향상시키기 위하여 골재 퍼짐현상을 정량적으로 평가할 수 있는 방법의 개발이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업 재원으로 수행되었습니다.

References

- AASHTO. 2009. Standard Method of Test for Uncompacted Void Content of Coarse Aggregate. 2009. AASHTO T 326.
- Chen J, Chen J, Wu J, Liu Y, Zhao Y. 2012. Mechanical Evaluation of Different-Size Particles in Compacted Aggregate Structure using Three-Dimensional Discrete Element Method. CICTP
- 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.
- He H, Guo Z, Streven P, Stroeven M, Sluys LJ. 2009. Characterization of the Packing of Aggregate in Concrete by a Discrete Element Approach. Materials Characterization. Vol. 60. 1082-1087.
- Hwang TJ, Cho JY, Lee KH. 2010. Gradation Curve of Aggregate Using Digital Image Process. Korean Society of Hazard Mitigation. Vol 10. No 1.
- 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.
- Kun F, Hermann HJ. 1996. A Study of Fragmentation Process using a Discrete Element Method. Compt. Methods Appl. Mech. Engrg. Vol 138. 3-18.
- Liu Y, You Z, Zhao Y. 2012. Three-Dimensional Discrete Element Modeling of Asphalt Concrete: Size Effects of Elements. Construction and Building Materials. Vol. 37. 775-782
- Lu M, McDowell MC. 2007. The Importance of Modelling Ballast Particle Shape in The Discrete Element Method. Vol 9. 69-80
- Mollon G, Zhao J. 2012. Realistic Generation and Packing of DEM Sand Samples. Advances in Civil Environmental and Materials Research ACEM
- Tutumluer E, Huang H, Bian X. 2012. Geogrid-Aggregate Interlock Mechanism Investigated Through Aggregate Imaging-Based Discrete Element Modeling Approach. Int. J. Geomech. Vol 12. 391-398
- Yun TY, Ahn SH, Nam JH, Yoo PJ. Simulation of Aggregate Slump Test using Equivalent Sphere Particle in DEM. 2013. International Journal of Highway Engineering. Vol 15. Issue 5. 21-29.
- Zhang C, Zhou X. 2012. Evaluation of the Packing Density of Non-spherical Particles using Discrete Element Cluster Algorithm. Journal of Information and Computational Science Vol. 16. 4969-4977