

이산요소법을 이용한 벌크 재료 시뮬레이션에 의한 덤프 트럭 데크 하중산출에 대한 연구

유 승 훈¹·우 호 길^{2†}

¹현대자동차 연구개발본부 책임연구원, ²충남대학교 기계공학부 교수

Structural Analysis of the Deck of a Dump Truck Based on Bulk Material Behavior using the Discrete Element Method

Seung Hun Ryu¹ and Ho Kil Woo^{2†}

¹Senior Research Engineer, Automotive R&D Division, Hyundai Motor Group, Hwaseong, 18280, Korea

²Professor, Division of Mechanical Engineering, ChungNam Univ., Daejeon, 34134, Korea

Abstract

To reduce fuel consumption by reducing the weight of the deck of a dump truck and to design an eco-friendly deck, accurate structural analysis is required. To date, the load on the deck has been calculated based on the hydrostatic pressure or by applying the earth pressure theory. However, these methods cannot be used to determine the non-uniformity of the load on the deck. Load distribution varies depending on the size distribution and interaction of aggregate particles. Compared with the finite element method, the discrete element method can simulate the behavior of aggregate particles more effectively. In this study, major properties were obtained by measuring bulk density and repose. The deck of a 15 ton dump truck was simulated using the obtained properties and bumping, breaking, and turning load conditions were applied. EDEM, which is a discrete element analysis software, was employed. The stress and strain distribution of the deck were calculated by NASTRAN and compared with the measured values. The study revealed that the results derived from a DEM simulation were more accurate than those based on mathematical assumption.

Keywords : discrete element method, bulk material, structural analysis, dump truck

1. 서론

덤프 트럭은 골재와 같은 중량물을 적재하고 장거리를 운반한다. 덤프 트럭의 데크(Deck)는 하중을 견디기 위해 높은 안전율을 적용하여 설계를 해왔다. 최근의 설계 트렌드는 차량 경량화를 통한 연비 절감을 요청하고 있다. 이를 위해서는 데크에 대한 정밀한 구조해석이 필수적이다. Zheng 등(2015)은 덤프 트럭의 실린더 브래킷이 받는 하중을 다 지점 구속법을 사용한 유한요소해석을 통해서 계산하여 강도를 도출했고, Jiang and Wu(2016)과 Chen과 Zhu(2011)와 Gu 등(2012)는 덤프 트럭의 데크의 하중을 받는 프레임에 대한 피로해석을 통해서 수명을 평가하였다. Liu 등(2014)은 덤프 트럭 데크 바닥의 균열에 대해 유한요소해석을 통해서 연구를 하여 균열감소 방

안을 제시하였다. Hwang 등(2017)과 믹서 블레이드에 대한 연구를 수행하였고, Zheng 등(2015)은 이산요소법을 활용하여 광산용 덤프트럭에 적재된 석탄 재료를 모사하여, 트럭 데크에 작용되는 하중을 계산하였다.

이와 같은 연구를 통해서 덤프트럭의 부품과 프레임에 대해서 연구가 수행되었으나 덤프 트럭 데크 전체에 작용하는 하중을 연구한 사례는 없다. 정밀한 구조해석을 위해서는 데크에 작용하는 하중이 정차 시와 운행 중인 상황에서 어떻게 변화하며 집중되는지 알아야 한다.

현재까지의 연구에서는 데크의 적재 하중을 정수압 또는 토압 이론에 근거하여 산출해 왔다. 일반적으로 사용되는 연속체 기반의 유한 요소법은 골재 입자를 개별적으로 처리하는 대신 많은 입자의 물리량을 평균하여 연속체로 취급하여 모델링

† Corresponding author:

Tel: +82-42-821-6574; E-mail: hkwoo@cnu.ac.kr

Received March 24 2020; Revised April 22 2020;

Accepted April 23 2020

© 2020 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

한다. 그러나 연속체 이론을 통해서 데크에 적재되는 골재의 하중 불균일성을 반영할 수 없다. 실제로 골재에 의해 데크에 작용하는 하중은 비 대칭적이고 불균일하다. 또한, 골재의 크기, 점성에 따른 불균일성을 적용할 수가 없다는 한계가 있다. 따라서 골재의 물성과 거동이 반영된 하중 데이터가 외력으로 입력되면 구조해석의 정확도가 향상될 수 있다. 이산 요소법 (DEM)은 가장 적절한 접근 방법이라고 할 수 있다.

2. 기초 물성 확보

2.1 골재의 물성 실험

골재의 주요 물성은 안식각(Repose Angle) 테스트에 의해서 측정되며, 이를 통해서 정 마찰 계수, 구름 마찰계수, 반발 계수를 얻게 된다. 또한 골재의 진 밀도와 겉보기 밀도를 밀도 측정법을 통해 얻고, 채거름망을 통해 입도 분포를 측정하였다. 본 논문에서는 입자의 크기가 작고 흐름성이 높은 잔골재와 상대적으로 입자의 크기가 크고 흐름성이 낮은 굵은 골재를 대상으로 측정하여 주요 물성을 확보하였다. 각각을 골재1, 골재2라고 지칭한다. 골재1(Gravel1)은 국내 건설현장에서 가장 많이 사용되는 종류의 작은 자갈이다. 골재2(Gravel2)는 주로 하중을 많이 받는 토목 공사의 지반형성을 위한 용도로 쓰이는 굵은 자갈이다. 골재의 크기는 해석시간 효율을 위하여 등가 입자 크기를 사용하였다. Fig. 1은 골재1과 골재2의 사진이다.

골재는 일반적으로 내부와 외부에 물을 포함하고 있다. 따라서 정확한 밀도를 측정하기 위해서는 별도의 건조 과정을 거쳐 수분이 포함되지 않은 골재의 순수한 밀도를 얻어낸다. 골재1의 경우 입자의 겉보기 비중은 2.687으로 계산되었다. 골재입자의 입도 분포는 일반적으로 채거름망을 이용한 입도 분석을 통해서 얻어진다. 골재1의 입도 분포는 Table 1에 나타내었다.



Fig. 1 Gravel 1 and Gravel 2

Table. 1 Particle size distribution of gravel 1

Size(mm)	Mass(g)	Ratio(%)
26	0	0
19	781.6	17
13	2423.8	53
10	1118.6	24
4.75	261.8	6
Total	4603.4	100

골재의 이산요소 시뮬레이션을 위해서는 골재의 마찰 물성이 확보되어야 한다. 대표적인 시험 방법은 안식각 실험으로서 본 논문에서는 골재로 채워진 상부 용기의 바닥을 순간적으로 열어 골재가 하부 용기에 낙하하면서 쌓인 골재터미의 높이와 무게를 측정하는 방법(AASHTO T 326)으로 진행하였다. 이를 통해서 골재의 마찰인자를 측정하였다. 실험결과 골재1은 41.6°, 골재2는 26.0°의 안식각을 얻었다.

2.2 이산요소 해석을 위한 입력변수 산출

이산요소 해석은 탄성계수, 포아송비, 단위중량, 구름 또는 정지마찰계수, 반발력계수(Restitution Coefficient)의 물성을 필요로 한다. Yun 등(2014)에 의하면 이러한 역학적 물성은 해석 대상의 조건에 따라서 결과에 대한 영향력 또는 민감도가 달라지는데, 골재 슬럼프 실험이나 모남정도 실험에서는 골재의 변형이 거의 발생하지 않는 만큼 골재의 전단계수나 포아송비는 해석결과에 크게 영향을 주지 않는다. 따라서 골재의 전단계수와 포아송비는 해석결과에 영향을 최소화하면서 해석 시간을 단축시키기 위한 값을 예비실험을 통하여 선정하였다.

본 논문에서는 전단계수 10MPa, 포아송비는 0.25를 사용하였다. 상호작용계수를 구하기 위해서 슬럼프 실험과 동일한



Fig. 2 Experiment and simulation of slump test(1 sphere model)

Table. 2 Particle size distribution of gravel 1

No	Prosperities	Gravel 1	Gravel 2
1	Diameter	19mm	45mm
2	Shape		
3	Solid Density	2687kg/m ³	2661kg/m ³
	Bulk Density	1333kg/m ³	1600kg/m ³
4	Repose angle	41.6°	26.0°
5	Poisson's ratio	0.25	0.4
6	Shear Modulus	10MPa	10MPa
7	Coefficient of Restitution	0.45	0.41
8	Coefficient of Static Friction	0.78	0.61
9	Coefficient of Rolling Friction	0.12	0.21
10	JKR surface energy	10J/m ²	10J/m ²

치수의 해석 모델링을 구현하고, 동일한조건인 입자를 생성하여 슬럼프 실험을 시뮬레이션 한다. Fig. 2는 실험과 시뮬레이션을 비교한 그림이다. Table 2는 최종적으로 도출된 골재의 물성이다. 골재의 정마찰계수와 구름마찰계수의 경우 골재가 갖고 있는 형상을 단순화된 입자로 모델링하였기 때문에 일반적인 값보다 큰 수치를 나타내고 있다.

3. 이산요소 해석

3.1 기본 이론

이산 요소법은 다수의 입자들의 운동 및 상호 작용을 계산하여 시스템의 거동을 해석하는 수치해석법이다. 이산 요소법은 골재의 거동을 효과적으로 전산 모사할 수 있는 방법이다. 이산 요소법에서는 각각의 입자를 하나의 요소로 취급하여 입자간의 상호작용을 접촉모델에 의한 계산으로 얻어낸다(Cundall and Strack, 1979). 대표적인 접촉모델로는 Hertz-Mindlin 모델이 있다(Hertz, 1882; Mindlin, 1949; Mindlin and Deresiewicz, 1953). 이 모델에서 수직력에 대한 정의는 Hertzian contact theory를 기본으로 하고 있다. 접선력은 Mindlin-Deresiewicz Work를 기초로 하고 있다. Normal Force와 Tangential Force는 감쇠 계수가 반발 계수와 관련되고 있다. 접선 마찰력은 쿨롱 법칙을 이용하여 마찰 모델이 구성되고 있다.

일반적으로, 수직력은 다음과 같이 주어진다.

$$F_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta_n^{\frac{3}{2}} \tag{1}$$

이 식에서는 Young's Modulus(E^*), Radius(R^*)로 정의되고 있으며,

$$\frac{1}{E^*} = \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i} + \frac{(1-\nu_j^2)}{E_j} \tag{2}$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j}$$

그리고, 각각 접촉하는 Young's Modulus(E^*), Poisson's Ratio(ν) 그리고 반지름(R)을 가지고 있다. 또한 다음과 같은 경우에 댐핑(Damping) 강도도 존재한다.

$$F_n^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_n^* m^*} \overline{v_n^{rel}} \tag{3}$$

다음 $m^* = \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)^{-1}$ 식은 Equivalent Mass의 식이며, $\overline{v_n^{rel}}$ 은 상대속도의 Normal Component이다.

β 와 S_n (Normal Stiffness)는 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$\beta = \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}} \tag{4}$$

$$S_n = 2E^* \sqrt{R^*} \delta_n$$

e 는 반발 계수이며, Tangential Force F_t , Tangential Cverlap δ_t , 그리고 Tangential Stiffness S_t 로 정의되어

$$F_t = -S_t \delta_t \tag{5}$$

$$S_t = 8G^* \sqrt{R^*} \delta_n$$

로 정의될 수 있다.

이때 G^* 는 Shear Modulus이며, 추가적으로 Tangential damping은 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$F_t^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_n^* m^*} \overline{v_n^{rel}} \tag{6}$$

3.2 정하중 조건에 의한 하중 산출

기초 물성확보를 통해서 얻어진 값을 적용하여 15 ton 덤프 트럭 데크에 100%의 적재량으로 골재를 적재하고 일반적으로 덤프트럭에 적용되는 하중 조건을 부여하여 이산요소해석을 수행하였다. 이때의 하중의 크기는 중력의 배수로 정의하였고, 골재와 골재 사이의 상호작용을 계산하는 Contact Model은 Hertz-Mindlin 모델과 골재의 점성을 반영할 수 있는 JKR 모델을 사용하였다(Tsuji *et al.*, 1992). Fig. 3은 적재가 완료된 데크와 본문에서 적용한 3가지의 하중조건을 나타낸 것이다. 범핑의 경우 수직으로 자중의 배수, 코너링의 경우 자중과 수평력을 가하고 비틀림 조건의 경우 자중에 비틀림 변위를 가하는 조건이다.

범핑 조건을 적용하여 EDEM의 입자 해석을 수행한 결과는 다음과 같다. 골재1의 경우 최대 압력은 0.16MPa이고, 골재2의 경우 최대 압력은 0.24MPa이다. Fig. 4에서는 범핑 조건 시 골재가 데크에 가하는 압력을 단면으로 나타내었다. 단면은

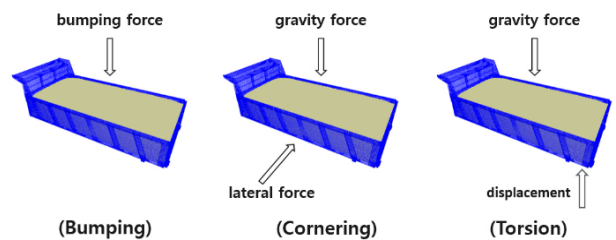


Fig. 3 Load conditions for particle simulation

아래의 Fig. 5에 나타난 형상의 내측 경계면을 기준으로 하였다. 단면의 압력 분포도는 총 3지점의 값을 나타내었다. Fig. 6은 3지점에 대한 위치의 간략도이다. Section1은 프론트와 맞닿아 있는 지점이고, Section2는 중앙지점이다. 그리고 Section3는 리어와 맞닿아 있는 지점이다.

코너링 조건을 적용하여 이산요소 해석 소프트웨어인 EDEM을 활용하여 수행한 결과는 다음과 같다. 골재1의 경우 최대 압력은 0.10MPa이고, 골재2의 경우 최대 압력은 0.17MPa이다. 비틀림 조건을 적용하여 해석한 결과는 다음과 같다. 골재1의 경우 최대 압력은 0.07MPa이고, 골재2의 경우 최대 압력은 0.13MPa이다. 점성이 있는 모래의 물성을 DB를 이용하여 입력한 뒤 해석을 진행하였다. 해석은 정하중 해석 조건 3가지를 동일하게 적용하였고, 그 결과 얻어진 압력 분포는 다음과 같다.

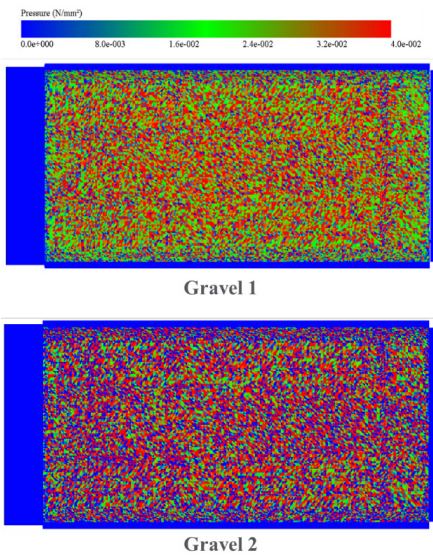


Fig. 4 Pressure on deck of bumping condition

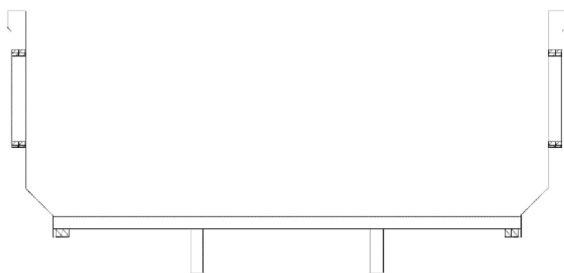


Fig. 5 Section view of deck FEM mesh

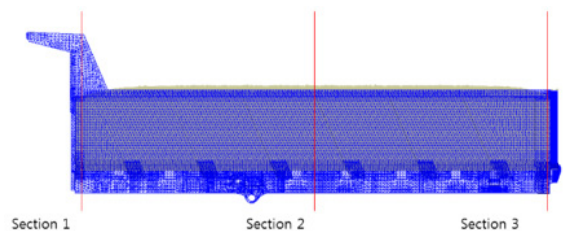


Fig. 6 3points of section for measuring pressure distribution

Table. 3 Particle size distribution of gravel 1

Gravel type	Condition	Bumping		Cornering		Torsion	
		Value	Max	Avg.	Max	Avg.	Max
2	no JKR	0.24	0.030	0.17	0.019	0.13	0.013
	JKR	0.16	0.022	0.1	0.014	0.07	0.009
1	JKR	0.15	0.023	0.22	0.016	0.08	0.006
	Database	0.13	0.022	0.08	0.013	0.14	0.009

범핑 조건의 최대 압력은 0.15MPa이고, 코너링 조건의 최대 압력은 0.22MPa이며, 비틀림 조건의 최대 압력은 0.08MPa이다. Fig. 7과 Table 3은 각 하중조건과 골재의 조건에 따른 압력 분포를 나타낸 것이다.

4. 덤프트럭 데크의 구조해석

4.1 산출 하중을 적용한 구조해석

덤프 트럭 데크의 구조해석은 이산요소법 해석을 통해서 얻어진 데크의 하중을 외력으로 입력하여 구조해석 소프트웨어인 NASTRAN을 이용하여 응력 분포를 계산하였다. 이때, 비틀림 조건 구조해석은 데크의 하중과 별도의 프레임 비틀림 변위조건을 조합하여 응력 분포를 계산하였다. 또한, 기존 방법에 의한 해석결과와 비교를 하였고, 범핑 조건의 경우 응력의 집중 부위와 크기가 잘 일치 하는 것을 확인할 수 있었다. 코너링 조건의 경우에는 기존의 정수압 기준의 해석결과와 상이한 부위에 응력이 집중하였다. 이것은 코너링 시 적재함의 골재

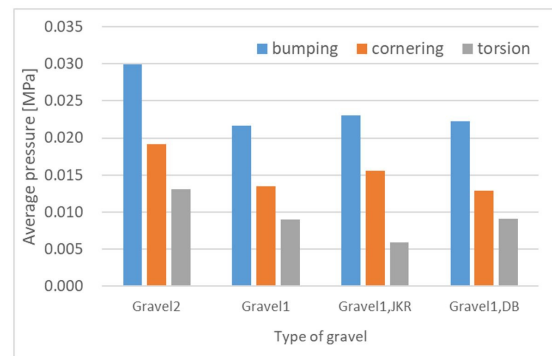
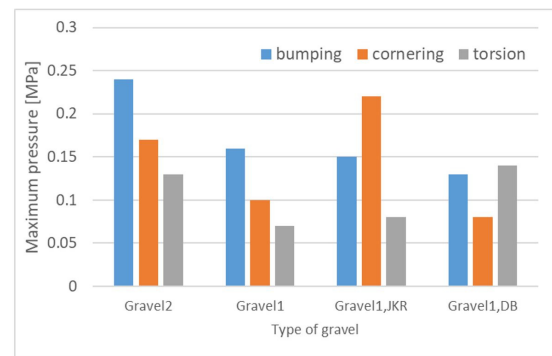


Fig. 7 Maximum pressure and average pressure on deck

가 이동하여 발생한 하중이 반영된 것이다. 비틀림의 결과에서는 굽은 자갈인 골재2의 결과가 정수압 조건 보다 13.8% 큰 응력값을 나타내었다. 굽은 골재의 하중 집중에 의한 현상이다. Fig. 8은 코너링 조건에서 골재1과 골재2가 데크에 가한 하중을 단면도로 나타낸 것이다. 골재의 크기 차이에 의한 하중의 차이를 확인할 수 있다. 단면의 위치는 데크의 중앙에 해당한다. Fig. 9는 범핑과 코너링의 경우이며, 구조해석을 진행한 결과이다. 데크 상판에 가해지는 하중을 기존의 수정된 정수압 조건과 이산요소해석을 통해서 얻어진 조건으로 적용하여 해석을 수행한 결과이다. 범핑의 경우 유사한 응력 분포와 각각 579.4MPa와 501.7MPa로 최대값의 차이가 크지 않음을 알 수 있다. 그러나 코너링의 경우 응력 분포가 상이하며 특히 측면의 응력이 크게 작용함을 알 수 있다. 최대값은 249.9MPa와 691.9MPa로 상당히 큰 차이를 나타내고 있다.

Fig. 10은 이산요소 해석을 통해서 구한 결과를 통해서 얻어진 데크의 각 면에 가해진 하중을 다항식의 형태로 보정한 그래프이다. 3가지의 하중 조건과 기존의 가정 즉 수정된 정수압 조건에 의한 하중을 나타내었다. 기존 가정에 의한 하중은 벽면에서 상당부로 갈수록 과도하게 평가되고 있고, 바닥면의 하중 또한 과도하게 평가되고 있음을 알 수 있다. 다양한 골재의

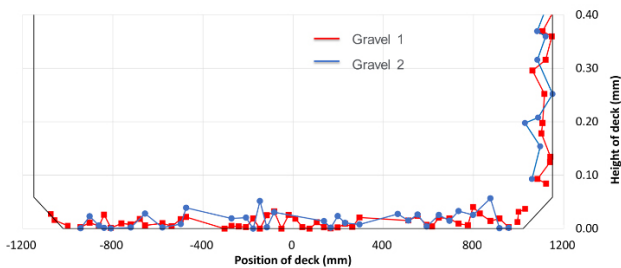


Fig. 8 Deck load section 2 by size of gravel(cornering condition)

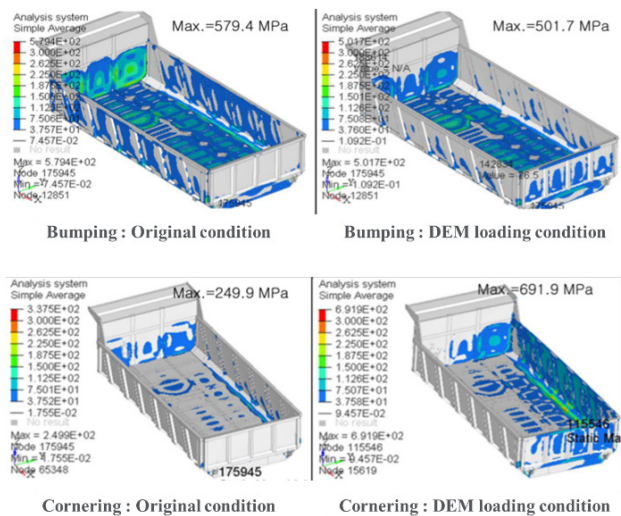


Fig. 9 Structural analysis results of different load conditions according to gravel size

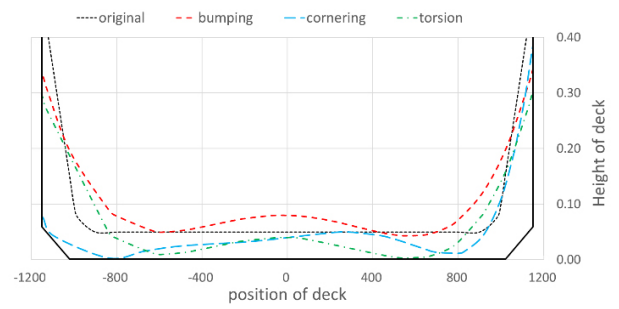


Fig. 10 Deck load section 2 by loading conditions

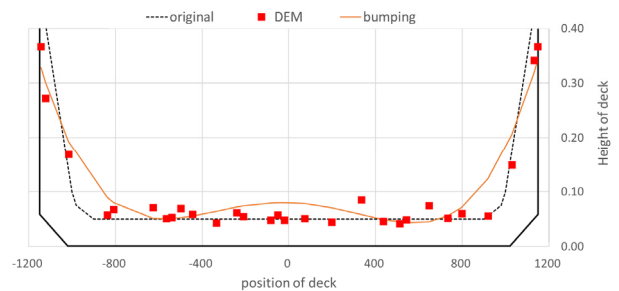


Fig. 11 Deck load section 2 by bumping conditions

종류와 하중 조건 등을 고려하여 정밀한 하중 프로파일을 얻어낸다면 데크의 경량화 설계 기준을 제안할 수 있다. Fig. 11은 범핑 조건 하에서 입자 시뮬레이션의 결과와 그 적합 곡선을 나타낸 것이다.

4.2 횡방향 하중 조건 검토

코너링 조건에서 횡방향 하중에 따라 골재의 일부가 실제와 달리 데크를 이탈하는 현상이 발생한다. 합리적인 해석 조건을 산출하기 위해 횡방향 하중을 0.8G, 0.5G, 0.4G, 0.3G로 적용하여 해석을 수행하였다. 각 케이스마다 골재에 작용하는 하중의 작용 각도는 Table 4와 같다. 골재1의 안식각은 41.6°이다.

Case1의 경우 골재의 안식각에 가까운 작용각도로 하중이 부여된다. 따라서, 골재의 안식각이 무너지게 된다. 골재의 맞물림이 와해되면서 골재가 이탈하기 쉬워지게 된다. 그러나 Case2부터는 하중의 작용각도가 27도 이하로서 골재 안식각의 65%의 각도이다. 따라서 골재의 맞물림 만으로도 골재의 이탈이 방지되는 효과를 확인할 수 있다. Fig. 12는 횡방향 하중이 중력의 0.8배일 때의 경우이다. 오른쪽 측면으로 골재의 이탈이 일어나는 것을 확인할 수 있다.

Table. 4 Angle of force applied on gravel

Case	Gravity Force(G)	Lateral Force(G)	Loading Angle(°)
1	1	0.8	39
2	1	0.5	27
3	1	0.4	22
4	1	0.3	17

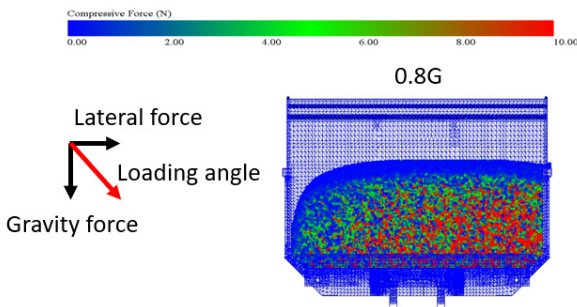


Fig. 12 Deflection of gravel by lateral load 0.8G

References

Chen, Y., Zhu, F. (2011) The Finite Element Analysis and the Optimization Design of the Yj3128-type Dump Truck's Sub-Frames Based on ANSYS, *Proc. Earth & Planet. Sci.*, 2, pp.133~138.

Cundall, P.A., Strack, O.D. (1979) A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies, *Geotech.*, 29, pp.47~65.

Gu, Z., Mi, C., Wang, Y., Jiang, J. (2012) A-Type Frame Fatigue Life Estimation of a Mining Dump Truck based on Modal Stress Recovery Method, *Eng. Fail. Anal.*, 26, pp.89~99.

Hertz, H. (1882) On the Contact of Elastic Solids, *J. Reine Angew. Math.*, 92, pp.156~171.

Hwang, S.P., Park, S.H., Sohn, D.W. (2017) Effects of Design Parameters of Mixer Blades on Particle Mixing Performance, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 30(4), pp.363~370.

Jiang, X.L., Wu, Z. (2016) Dump Truck Cylinder Bracket Finite Optimization Design, *Int. Conf. Robots & Intelligent System (ICRIS)*, pp.171~174.

Liu, X., Liu, D., Cheng, X., Si, M. (2014) Analysis of the Crack of Heavy Dump Truck Cargo Body Floor, *Appl. Mech. & Mater.*, 723, pp.3~6.

Mindlin, R.D. (1949) Compliance of Elastic Bodies in Contact, *J. Appl. Mech*, 16, pp.259~268.

Mindlin, R.D., Deresiewicz, H. (1953) Elastic Spheres in Contact under Varying Oblique Forces. *Trans. ASME, J. Appl. Mech*, 20.

Tsuji, Y., Tanaka, T., Ishida, T. (1992) Lagrangian Numerical Simulation of Plug Flow of Cohesionless Particles in a Horizontal Pipe, *Powder Technol.*, 71, pp.239~250.

Yun, T.Y., Yoo, P.J., Kim, Y.B. (2014) Determination of DEM Input Parameters for Dynamic Behavior Simulation of Aggregates, *Int.J. Highw. Eng*, 16(1), pp.21~30.

Zheng, S., Cheng, K., Wang, J., Liao, Q., Liu, X., Liu, W. (2015) Failure Analysis of Frame Crack on a Wide-Body Mining Dump Truck, *Eng. Fail. Anal.*, 48, pp.153~165.

5. 결론

골재나 곡물 등 분체를 주로 적재하게 되는 덤프 트럭의 데크는 불균일한 분포 하중을 받는다. 분체는 압력분포가 유체와 다른 거동을 갖고 있다. 데크의 과잉 설계를 피하고, 최적의 설계를 하기 위해 정수압뿐 아니라 입자(Particle)해석 기법을 도입하여 시뮬레이션에 적용할 필요가 있다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

골재 입자의 크기는 데크의 압력 분포와 비례함을 확인하였고, 정수압 조건의 경우 골재 입자 크기에 대한 고려 불가능한 점을 보완할 수 있다.

골재의 점성에 대한 하중 산출을 통해서 골재의 함습량이 골재 거동에 영향을 주어 점성이 높을수록 데크의 압력이 비례하여 증가함을 확인했다.

골재의 입자해석을 통해서 얻어진 하중 분포를 통해 기존의 가정에 의한 하중의 현실적인 수정이 가능함을 확인했다.

코너링 조건의 경우 실험상에서 골재 이탈이 없는 것을 고려하여 더 합리적인 해석 조건을 제안하였다.

감사의 글

본 연구는 현대자동차의 지원을 받아 수행되었습니다.

요 지

덤프 트럭 데크의 경량화를 통한 연료 소비를 줄이고 에코 친화적인 설계를 위해서는 정확한 구조 분석이 필요하다. 지금까지 데크의 하중은 정수압 또는 토압 이론을 기반으로 계산되었다. 이 방법으로 데크의 하중 불균일을 계산할 수 없다. 하중 분포는 골재 입자의 크기 분포 및 상호 작용에 따라 달라진다. 이산요소법은 유한요소법보다 효과적으로 골재의 거동을 시뮬레이션할 수 있다. 본 논문에서는 벌크 밀도와 안식각을 측정하여 주요 특성을 얻었다. 15톤 덤프 트럭 데크는 범핑, 브레이킹 및 회전 시의 운동 조건을 적용하여 얻은 하중을 사용했다. 시뮬레이션은 이산요소해석 소프트웨어인 EDEM을 사용했다. 데크의 응력 및 변형 분포는 NASTRAN에 의해 계산되었다. 측정된 값과 비교하였고, 이를 통해 DEM 시뮬레이션의 결과는 수학적 가정에 의한 결과보다 정확함을 확인하였다.

핵심용어 : 이산요소법, 벌크 재료, 구조 해석, 덤프 트럭