한국기계가공학회지, 제19권, 제12호, pp. 34~41(2020.12) ISSN 1598-6721(Print)
Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 19, No. 12, pp. 34~41(2020.12)ISSN 2288-0771(Online)

https://doi.org/10.14775/ksmpe.2020.19.12.034

이산 요소법을 이용한 골재 입자의 혼합 및 배출 시 골재 거동 및 강판 마모에 관한 연구

유승훈*, 우호길**,#

*현대자동차 연구개발본부, **충남대학교 공과대학 기계공학부

Discrete Element Method for Defining the Dynamic Behavior and Abrasion of Gravel in Mixer Trucks during Mixing and Discharging

Seung-Hun Ryu*, Ho-Kil Woo**,#

*Automotive R&D Division Hyundai Motor Group.

**Division of Mechanical Engineering, ChungNam Univ.

(Received 09 September 2020; received in revised form 10 October 2020; accepted 12 October 2020)

ABSTRACT

Ready-mixed concrete is unconsolidated concrete typically transported to construction sites by using mixer trucks. A proper rotation of concrete is necessary to prevent its solidification in mixer trucks during transport: in accordance with the manufacturing method and quality inspection prescribed in KSF4009, this movement is maintained after the manufacturing of concrete in professional production plants and the addition of water, solid materials, and admixtures. Unfortunately, mixer truck parts wear out over long periods of time. In order to improve the wear resistance of the main part of mixer trucks, we used a steel plate with good wear resistance or partially added a reinforcement plate. In this study, we first tested the properties of concrete (as required for the DEM), and then carried out mixing and discharge simulations to define the actual operating conditions of mixer trucks. For each condition, we calculated the amount and location of wear. The reliability of our results was finally verified by comparing them with the measurement values. Overall, this study provided basic data for an optimal design of mixer trucks: one that would reduce the vehicles' weight and production costs.

Key Words : Discrete Element Method(이산요소법), Bulk Material(골재), Wear Analysis(마모해석), Mixer Truck(믹서 트럭), Mixing(혼합), Abrasion(마모)

1. 서 론

레디믹스트 콘크리트(Ready-mixed concrete)는 믹서트럭을 이용하여 공사현장까지 운반되는 굳지 않은 콘크리트이다.

시멘트, 물, 고재, 혼화재를 이용하여 KSF4009에 규정된 제조방법, 품질검사 등에 준하여 전문적인 콘크리트 생산 공장에서 제조한 후, 믹서트럭을 이용하여 공사현장까지 운반되는 동안 콘크리트가 굳지 않게 하기 위해서 적정한 회전 속도와 블레이드

Corresponding Author : hkwoo@cnu.ac.kr
Tel: +82-42-821-6574, Fax: +82-42-822-5642

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 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.

의 형상이 중요한 설계 변수이다. 콘크리트에 의한 믹서 트럭의 각 부품은 장기간에 걸쳐 마모가 발생하게 된다. 믹서 트럭 주요부의 내마모 성능 향상을 위해서 내마모 성능이 좋은 강판을 사용하기도 하고, 부분적으로 보강판을 덧붙여 설계하기도 한다. 이러한 설계 변수는 차량의 생산단가 상승과 중량의 증대를 야기 시킬 수 있다.

H. Zhang 등[1]은 믹서 트럭에서의 혼합과 배출 시의 건조한 입자의 거동을 연구하였다. 그리고 R. Deng 등[2]은 믹서 트럭에서의 입자의 축방향 분리 현상에 대해서 연구하였다. Z. Tian 등[3]은 회전하는 드럼에서의 입자 배출 속도에 영향을 미치는 회전 속도에 대한 연구를 수행하였다. S. Akira 등[4]은 입자에 의한 강판의 마모 현상에 대해 연구하였으며, H.K Cao[5]는 콘크리트를 대상으로 혼합 이론을 정리하였다. 콘크리트는 다양한 혼합물로 구성되어 있기 때문에 복잡한 거동을 나타낸다. 대표적인 물성 측정 방법인 슬럼프 테스트를 DEM으로 모사한 S. Remond 등[6]과 Z. Li 등[7]의 연구가 있으나 이것을 믹서 트럭에 적용하지는 않았다. 또, X. Xiao 등[8]은 믹서트럭의 콘크리트 공급 장치에서의 효율을 DEM을 이용하여 연구하였다.

이와 같은 연구를 통해서 믹서 트럭과 콘크리트에대한 연구가 수행되었으나, 콘크리트의 물성에 대한 정확한 정의와 콘트리트 입자의 거동에 의한 마모 그리고 혼합과 배출을 동시에 고려하는 해석적인 접근은 없었다. 믹서트럭의 작업 효율성과 내마모 성능을 동시에 고려하기 위해서는 실제 믹서 트럭 운행 조건에서의 마모 해석을 통한 마모 집중 위치와 마모량 예측이 필수적이다. 이산요소법은 골재 입자를 개별적으로 처리할 수 있어 콘크리트의 거동을 모사하고, 이에 대한 Archard wear 이론에 의한 마모량 산출이 가능한 방법이다.

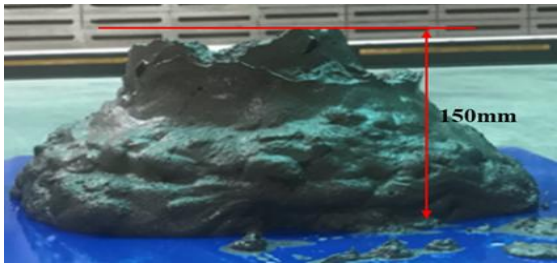
본 연구에서는 콘크리트의 물성을 정의하는 시험을 수행하고 이산요소법에 필요한 물성을 확보한 뒤 믹서 트럭의 실제 운행 조건을 반영한 혼합, 배출 해석을 진행하였다. 각 공정마다 강판의 마모량과 위치를 산출하였고, 실차 측정 값과 비교하여 해석의 신뢰성을 검증하였다. 이러한 연구를 통해서 차량 경량화와 생산비용 절감을 위한 최적설계의 기초 데이터가 확보될 수 있다.

2. 본 론

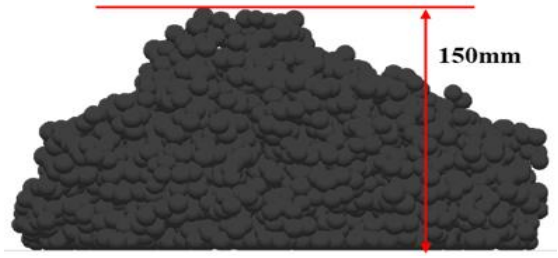
2.1 골재 기초 물성

골재의 주요 물성은 슬럼프 테스트에 의해서 측정되며, 이를 통해서 정 마찰 계수, 회전 마찰계수, 반발 계수와 점성에너지를 얻게 된다. 믹서트럭에서 주로 사용되는 골재의 마찰 물성 확보하기 위해 전문가에 의한 시험을 수행하였고, 동일한 슬럼프 형상과 높이를 얻어 낼 수 있는 해석 파라메터를 얻어 내었다. Fig. 1은 골재의 실험과 이산요소법 시뮬레이션의 사진이다.

Fig. 2에 나타낸 경사면 마찰시험을 통해서는 골재와 강판간의 마찰 물성을 구할 수 있다. 시험과 해석의 Correlation을 통한 골재-강판 간 마찰 물성 확보하기 위해서 주로 사용되는 골재와 Hardox 강판 이용하였고, 일반적인 경사면 마찰 시험 장치 사용하여, 반복 시험을 통한 평균 마찰 계수를 확보했다[9]. 강판 마모 시험을 통해서 골재에 의한 강판의 마모 계수를 구하고 혼합, 배출 해석에 적용하여 각 공정에서의 마모량 및 마모 집중 위치를 산출하는 기초 물성으

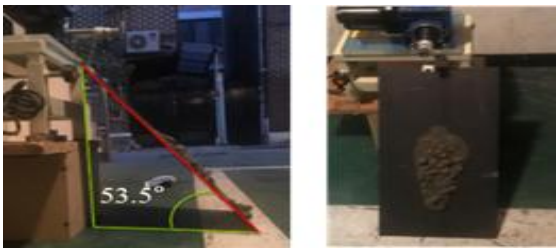


(a) Measurement



(b) DEM Simulation

Fig. 1 Result of concrete slump measurement and simulation



(a) Measurement

(b) DEM Simulation

Fig. 2 Slope friction test and analysis results

Table 1 Material properties of bulk particles

Properties	particle to particle	particle to geometry
Particle size(mm)	20	20
Solid density(g/cc)	4.80	4.80
Poisson's ratio	0.25	0.25
Shear Modulus(MPa)	10.0	10.0
Coefficient of Restitution	0.15	0.15
Coefficient of Static Friction	0.40	0.40
Coefficient of Rolling Friction	0.20	0.17
JKR surface energy(j/m2)	14.11	2.00

로 활용하였다. Table 1은 시험을 통해 얻어진 골재와 강판의 물성을 나타낸 것이다. 골재와 골재, 골재와 믹서트럭 부품간의 거동에는 레디믹스드 콘크리트가 갖고 있는 점성을 고려하기 위하여, JKR 표면 에너지 값을 적용하였다.

2.2 이산요소 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.

대표적인 접촉모델로는 Herts-Mindlin[10] 모델이 있다. 이 모델에서 수직력에 대한 정의는 Hertzian contact theory을 기본으로 하고 있다. 접선력은 Mindlin-Deresiewicz Work[11,12]을 기초로 하고 있다. Normal Force와 Tangential Force는 감쇠 계수가 반발 계수와 관련되고 있다. 접선 마찰력은 쿨롱 법칙을 이용하여 마찰 모델이 구성되고 있다[13].

일반적으로, 법선 방향의 Herts-Mindlin식은 다음과 같이 주어진다.

$$F_{HM}=\frac{4}{3}E^{*}\sqrt{R^{*}}\delta_n^{\frac{3}{2}}-2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta\sqrt{S_n m^{*}}v_n \tag{1}$$

여기서, E^{*}, R^{*}, m^{*}는 두 입자의 등가 영률, 등가 반경, 등가 질량을 말한다.

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

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

$$m^{*}=(\frac{1}{m_i}+\frac{1}{m_j})^{-1}$$

그리고, E_i, E_j, v_i, v_j와 R_i, R_j는 두 입자가 접촉이 일어날 때 각 입자의 영률과 포이송비, 반지름이며 v_n은 수직 방향의 상대속도이다. β 와 S_n (Normal Stiffness)는 다음과 같은 식으로 정의되며 e는 입자 간의 반발 계수이다.

$$\beta=\frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e+\pi^2}} \tag{3}$$

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

$$F_{JKR}=-\sqrt{16\gamma E^{*}\pi a^3} \tag{4}$$

점성을 고려하는 경우, 일반적으로 JKR 모델을 사

용하며, JKR은 Hertz의 완전탄성 모델에 표면력을 더하여 충돌을 정의하였으며[14] 충돌 후 두 입자 사이의 표면에너지에 의해 서로 끌어당기는 힘이 작용한다. 따라서, Hertz-Mindlin 모델과 함께 사용하는 것이 보편적이다[15].

식(5)는 Hertz-Mindlin with JKR 접촉모델 식으로 Hertz-Mindlin 식(1)과 JKR 식(4)를 이용한 식으로, 본 연구에서는 Hertz-Mindlin with JKR 접촉모델을 사용하여 골재의 점성과 응집성을 표현하였으며 이때, 접선 방향의 응집성은 고려치 않고 법선 방향의 응집성만을 고려하였다.

$$F_{HMJKR} = \frac{4}{3}E^*\sqrt{R^*}\delta_n^{\frac{3}{2}} - 2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta\sqrt{S_n m^*}v_n - \sqrt{16\gamma E^*\pi a^3} \quad (5)$$

여기서, γ는 입자 간의 표면에너지, a는 두 입자 간의 접촉 면적이다.

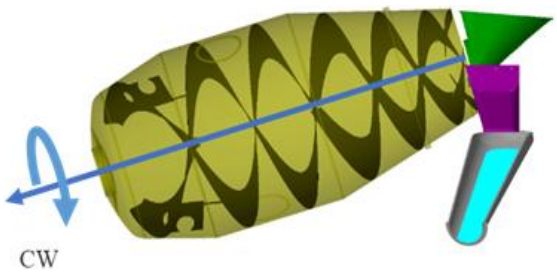
마모를 계산하기 위해서, Hertz-Mindlin 모델에 Geometry의 마모를 Archard Equation에 기초해서 확장시킨 모델을 사용했다. Archard Equation은 다음과 같다.

$$\triangle Q = (\frac{K}{H})F_n \triangle U \quad (6)$$

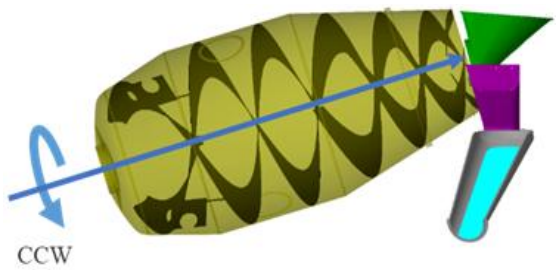
여기서, ΔQ는 생성 된 마모 잔해의 양이고, K는 Archard wear constant이고, H는 재료의 경도이다. ΔU는 Tangential 방향의 이동 거리이다.

2.3 혼합 및 배출 해석

테스트를 통해서 얻어진 물성을 적용하여 15톤 믹서 트럭에 콘크리트 입자를 생성하였고, 혼합 및 배출 해석을 진행하였다. 해석에 사용된 입자의 갯수는 820,000개이다. 혼합 및 배출 해석에 사용한 해석 모델은 Fig. 3과 같으며 혼합 해석의 결과는 Fig. 4에 나타내었다. (a)는 입자를 생성한 뒤 자중에 의해 안정화가 된 직후의 모습으로 혼합이 진행되지 않은 초기 상태이다. (b)는 2rpm의 속도로 총 8회전 했을 때의 모습이다. 혼합해석을 통해서 혼합의 효율성과 혼합 시의 분리 현상을 예측할 수

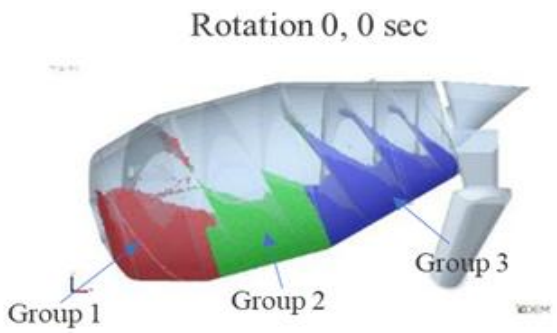


(a) Mixing condition

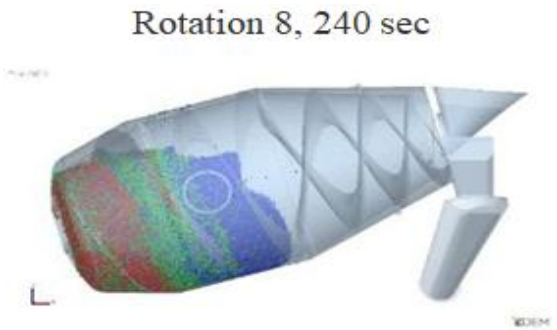


(b) Discharging condition

Fig. 3 Mixer truck model for simulation



(a) Initial state



(b) Converged state

Fig. 4 Mixed analysis results

있다. 배출 해석을 통해서는 배출 후 콘크리트의 잔류량 및 배출 효율성 등을 얻을 수 있다. 입자 추적을 통한 반경 방향의 입자 거동을 살펴보면 Y. Tan[16] 등의 결과와 유사한 거동을 확인할 수 있다. Fig. 5는 입자 추적을 통한 궤적을 나타낸 그림이다.

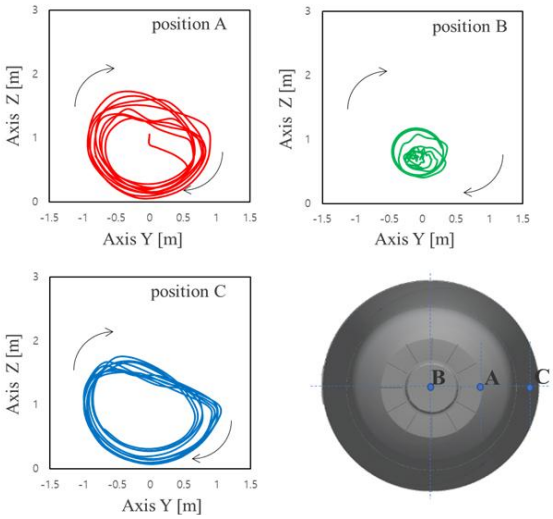
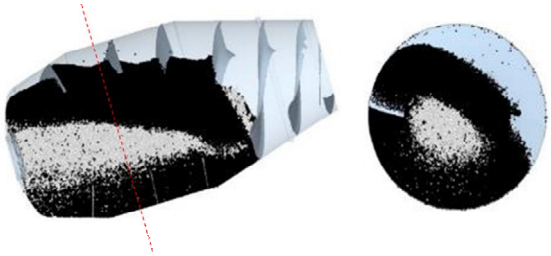
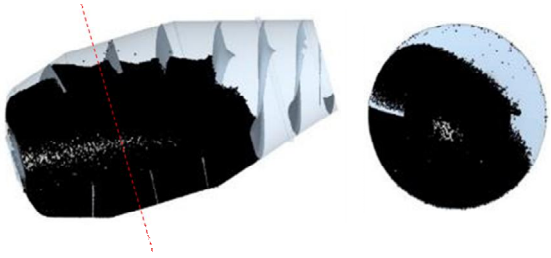


Fig. 5 Trajectory of aggregate particles during mixing



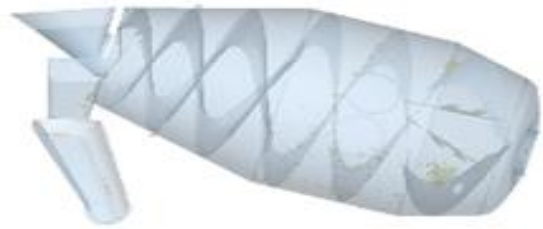
(a) Dead zone in case of 0.1m/s



(b) Dead zone in case of 0.02m/s

Fig. 6 Dead zone according to rotating speed

(a) Remaining amount in case of 6rpm



(b) Remaining amount in case of 14rpm

Fig. 7 Aggregate remaining amount upon discharge

믹서 트럭의 혼합 공정에서 중요한 목표는 데드존이 형성되지 않는 것이다. 데드존은 골재가 상대적으로 적은 속도의 거동을 하는 영역으로 기준 속도에 따라서 판별 할 수 있다. Fig. 6은 축 방향과 원주 방향의 단면도를 통해서 골재 입자의 속도분포를 비교한 그림이다. (a)는 기준 속도 0.1m/s의 경우, (b)는 기준 속도 0.02m/s 일 때이다. 혼합 공정 시 골재의 평균속도는 0.02m/s이므로 골재의 거동이 적절함을 평가 할 수 있다.

배출 해석의 결과는 Fig. 7과 같다. 배출 시간에 따른 골재 입자의 잔류량을 나타내었다. 6rpm으로 배출하여 1.5ton의 골재가 약 95% 배출되었다. 마지막 2분간은 현장의 조건을 반영하여, 14rpm으로 배출 속도를 높여 해석을 진행하였다. 최종적으로 골재가 0.07% 잔류하였다. 이것은 현장과 유사한 결과치임을 확인하였다.

2.4 마모 해석

실차를 측정하여 얻은 마모량과 해석의 마모량을 비교하였다. 다음은 슈트의 마모 분포이다. 해석의 마모량이 계측량의 분포와 유사함을 확인할 수 있다. 마모의 집중 분포가 전방에 집중되어 있으며, 실제 측정치보다 다소 보수적으로 평가됨을 알 수

있다. 이를 통해서 향후 설계 가이드를 제시할 수 있다.

Fig. 8는 믹서 트럭 부품 중 마모가 집중되는 블레이드에 대한 마모 해석 결과이다. 혼합, 배출 시 전방 블레이드(1~4) 마모도가 집중되고, 후방 블레

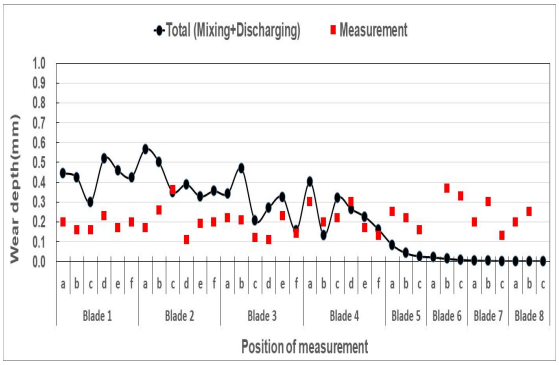


Fig. 8 Wear analysis result (blade)

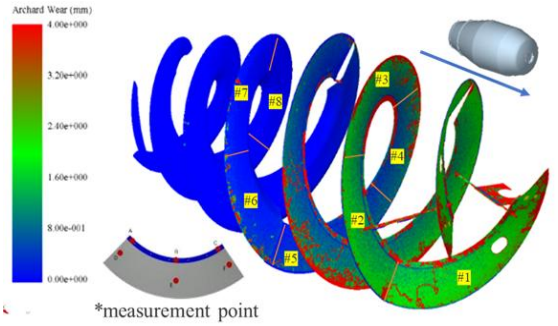


Fig. 9 Wear distribution (blade)

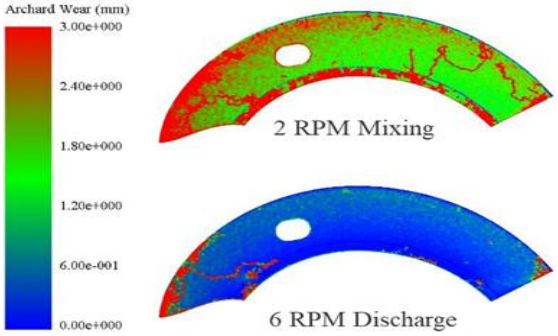


Fig. 10 Wear distribution of mixing and discharge (No. 1 blade)

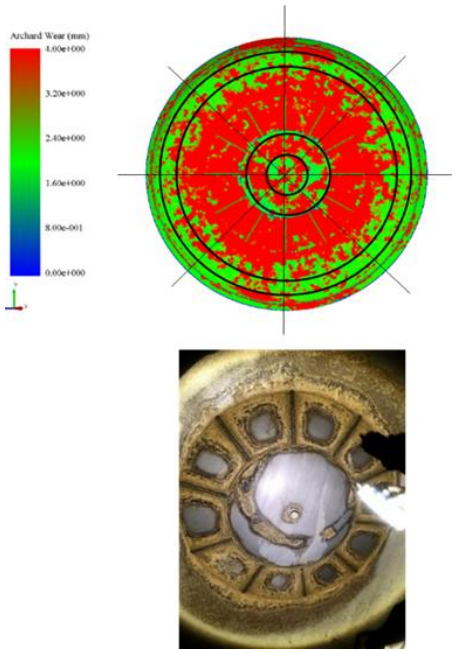


Fig. 11 Wear distribution of mixing and discharge (Head Plate)

이드는 측정 불가한 한계와 시뮬레이션에서의 콘크리트 장입 공정을 생략했기 때문에 6~8번 블레이드 마모량에는 오차가 존재한다. Fig. 9는 마모해석 결과 마모량의 분포이다. 전반 부 블레이드에 마모량이 집중되고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 10은 혼합과 배출 시의 마모 패턴의 차이를 나타낸 그림이다. 입자에 의한 하중이 블레이드에 적게 작용 되어 마모 누적량이 적음을 확인할 수 있다. Fig. 11는 헤드 플레이트의 마모량과 실제 부품의 마모 사진이다. 유사한 패턴을 확인할 수 있다.

2.5 마모 수명 예측

실측 차량의 운행 기록은 21개월, 2,270회(cycles) 운행이다. 이를 기반으로 하여 1회전당 마모량을 통해서 얻어진 해석 마모량을 통해서 허용 마모 기준에 따른 마모 수명을 예측한다. 실차의 운영 조건으로부터 주 5일 운행 기준, 1일 평균 5회의 운행으로 가정하여 수명을 산출하였다. Table 2는 해석을 통해 얻어진 마모량과 예측 수명을 나타낸 것이다.

Table 2 Predicted life and simulated wear amounts

Parts	Wear amount (μm/cycle)	Predicted life time (year)
Head Plate	0.50	9.3
Drum	0.19	12.2
Blade	0.22	14.2
Hopper	0.70	6.6
Chute	0.62	7.5

보강판 없이 원판으로만 구성 되어진 해드플레이트, 드럼의 경우에는 원판의 두께 기준 100% 소실될 때까지의 마모량을 산출하고, 상대적으로 마모량이 많은 블레이드와 호퍼, 슈트의 경우 보강판의 두께가 100% 소실되는 때까지의 마모량을 산출하였다. 이러한 기준으로 마모수명을 산출하면 슈트의 경우 Table 2에서와 같이 약 7.5년이 산출된다. 이것은 제품의 보증 연한을 넘는 값으로 내마모 설계가 충분함을 의미한다. 수명예측에 있어서 이와 같은 접근은 실제 마모가 보강판의 끝단부에 집중되어 있기 때문에 보강판의 50% 소실을 기준으로 계산한 것이다. 그리고 보강판은 믹서트럭의 강성과 무관하게 내마모 성능 향상을 위해 부착된 부위이기 때문에 마모로 인한 차량의 강성 저하 등은 발생하지 않는다.

3. 결 론

레디믹스드 콘크리트를 혼합, 배출 및 이송하는 믹서트럭은 콘크리트 입자에 의한 하중과 함께 마모에 매우 취약하다. 내마모 설계의 최적화를 위해서는 입자 해석 기법을 도입하여 보다 현실적인 마모 예측과 혼합 및 배출 성능과의 상관관계를 연구할 필요가 있다. 이산요소법(DEM)을 적용하여 믹서트럭의 혼합, 배출, 마모 성능을 분석한 본 연구에서는 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 각종 시험을 통해서 골재와 강판의 정도 높은 물성을 확보하였다.
2. 혼합 및 배출 해석을 통해서 믹서 트럭 주요부품의 마모분포와 마모량을 예측하였다.
3. 예측된 마모량과 마모 집중부위를 실차 계측치와의 비교를 통해서 해석의 신뢰성을 검증하였다.
4. 믹서 트럭 주요 부품의 내마모 수명을 예측하였고, 이에 따른 내마모 최적 설계를 위한 기본 데이터와 해석 모델을 구축하였다.

REFERENCES

1. Tan, Y., Deng, R., Zhang, H., and Jiang, S., “Study of mixing and discharging of dry particles in a truck mixer,” Particulate Science and Technology, Vol. 38, No. 3, pp. 271–285, 2020.
2. Deng, R., Tan, Y., Zhang, H., Xiao, X., and Jiang, S., “Experimental and DEM studies on the transition of axial segregation in a truck mixer,” Powder technology, Vol. 314, pp. 148–163, Jun. 2017.
3. Tian, Z., Yu, H., and Han, C., “Quantitative Analysis of Discharging Speed of a Horizontally Rotating Drum with Internal Baffles by Using DEM Simulation,” MS&E, Vol. 790, No. 1, p. 012043, 2020.
4. Sato, A., Kano, J., and Saito, F., “Analysis of abrasion mechanism of grinding media in a planetary mill with DEM simulation,” Adv. Powder technology, Vol. 21, No. 2, pp. 212–216, 2010.
5. Mazanec, O., Lowke, D., and Schießl, P., “Mixing of high performance concrete: effect of concrete composition and mixing intensity on mixing time,” Materials and structures, Vol. 43, No. 3, pp. 357–365, 2010.
6. Remond, S. and Pizette, P., “A DEM hard-core soft-shell model for the simulation of concrete flow,” Cement and concrete research, Vol. 58, pp. 169–178, 2014.
7. Li, Z., Cao, G., and Tan, Y., “Prediction of time-dependent flow behaviors of fresh concrete,” Construction and Building Materials, Vol. 125, pp. 510–519, 2016.
8. Xiao, X., “Numerical Investigation on the Effect of the Particle Feeding Order on the Degree of Mixing Using DEM,” Procedia engineering, Vol.

102, pp. 1850-1856, 2015.
9. Lee, S. Yang, C., Park, J., “Validation and experiments of friction coefficient for discrete element method,” in Proceedings of the KEPA Spring Conference, pp.3346-3347, 2016.
10. Hertz, H., On the contact of elastic solids, J. Reine und Angew. Math., Vol. 92, pp. 156-171, 1982.
11. Mindlin, R. D., Compliance of Elastic Bodies in Contact, in The Collected Papers of Raymond D. Mindlin Volume I, New York, NY: Springer New York, pp. 197-206, 1989
12. Mindlin R. D. and Deresiewicz H., Elastic Spheres in Contact Under Varying Oblique Forces, in The Collected Papers of Raymond D. Mindlin Volume I, New York, NY: Springer New York, pp. 269-286, 1989,
13. Cundall, P. and Strack, O., “A discrete numerical model for granular assemblies,” Géotechnique, Vol. 29, No. 1, pp. 47-65, 1979.
14. Johnson, K. L. and Kendall, K. and Robert, K. A. D., “Surface energy and the contact of elastic solids,” Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 324, No. 1558, pp. 301-313, 1971.
15. Lyu, J. and Park, J., “Analysis of Particle Packing Process by Contact Model in Discrete Element Method,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers,, Vol. 18, No. 3, pp. 59-65, 2019.
16. Xiao, X. and Tan, Y. and Zhang, H. and Jiang, S. and Wang, J. and Deng, R. and Cao, G. and Wu, B., “Numerical investigation on the effect of the particle feeding order on the degree of mixing using DEM,” Procedia Engineering, Vol. 102, pp. 1850-1856, 2015.