

장대화물열차의 분산제어 제동 시 연결기에 발생하는 충격력 해석 및 분석

조병진*, 이정준*, 심재석**, 구정서**.#, 문형석***

*서울과학기술대학교 철도차량시스템공학과, **서울과학기술대학교 철도안전공학과

***한국철도기술연구원

Analysis and Evaluation of the Distributed Control Braking System of Long Freight Car Brakes

Byung Jin Cho*, Jeong Jun Lee*, Jae Seok Shim**, Jeong Seo Koo**.#, Hyung Seok Mun***

*Department of Rolling Stoke System, Seoul National University of Science and Technology

**Department of Railway Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology

***Korea Railroad Research Institute

(Received 14 November 2018; received in revised form 29 November 2018; accepted 10 December 2018)

ABSTRACT

In long freight trains, there is a brake time delay in neighboring freight cars, which causes damage and fractures in the couplers, especially at their knuckle. A problem in the couplers of the cars can cause derailment and damages of human life and property. In this study, maximum forces on the couplers are studied when a long freight car brakes with the brake delay time and coupler gap. We make a dynamic model of 50 freight cars and couplers, applying contact between the couplers and a characteristic curve to express the force and displacement of the buffers using SIMPACK, which is a multi-body dynamics program. We use EN 14531-2, which is a standard of freight car brakes, to verify the dynamic model. Then, we compare the analyzed impact force with the coupler knuckle standard after applying the two carriages of a locomotive in the model based on the dispersed double head control system. The result shows that all coupler gap conditions satisfy the infinite lifetime of the material when the brake delay time is 0.1 second.

Key Words : Long Freight Car(장대화차), Coupler(연결기), Brake Delay(제동지연), Coupler Gap(연결기 틈새), Distributed Control Braking System (분산제어제동시스템)

1. 서 론

최근 우리나라와 동북아 및 유라시아 지역 국가

간의 철도를 통한 화물 운송에 대한 중요성이 대두되고 있다. 특히, 중국이나 러시아를 통해서 화물 열차를 운행 시 서로 다른 특성을 가지고 있는 제동장치 및 연결기의 상호 인터페이스는 매우 중요하여 지속적으로 연구가 이루어지고 있다.^[1]

현재 국내에서는 기관차 1량에 화차(freight car) 25

Corresponding Author : koojs@seoultech.ac.kr

Tel: +82-2-978-6878, Fax: +82-2-978-6878

량 등의 구성으로 운영되고 있으며, 최근 40량 장대화물열차의 시험운행을 진행하였다. 그러나 국외의 경우 중국은 50량, 미국과 러시아는 70~150량 정도로 이미 대량 편성되어 운영하고 있는 실정이다.^[2]

화물열차의 경우 제동관압력(BP)에 따라 열차의 위치별로 제동이 체결되는 시점에 차이가 있으며, 이로 인하여 연결기에 제동충격이 발생하고 있다. 아울러 연결기 틈새량은 연결기에 충격력을 크게 증가시키는 요인 중에 하나로 판단된다.

국내의 화차 운행 시 연결기 손상이 빈번하게 일어나는 부분은 너클과 너클핀이 결합되는 곳에서 주로 파괴되고 있다. 특히, 중간 연결기가 파괴될 경우 열차의 탈선이나 화물이 선로에 방치되어 안전상의 심각한 문제가 발생할 수 있다.^[2-3]

이러한 문제를 해결하기 위하여 동역학 시뮬레이션을 통한 철도차량 해석 및 분석 연구가 활발하게 이루어지고 있다.^[4]

A Nasr 등은 각각 다른 제동 지연 시간(0.02 sec, 0.06 sec, 0.1 sec)을 적용하여 연결기에 작용하는 충격력을 분석하여 열차 제동 시 제동 지연 시간에 따라 연결기에 어떤 영향을 주는지 평가하였고,^[5] F. Cheli 등은 화물열차 3량을 동역학 모델링하여 공차(20 ton)와 만 차(80 ton) 조건을 이용하여 연결기에 작용하는 충격력을 구하고 이를 시험을 통해 시뮬레이션과 비교하였다.^[6]

현재 국외에서는 유무선 기술을 적용한 화물차량의 분산제어기술을 개발하여 실제운행 제동시스템에 적용하고 있다. 최근 국내에서도 분산제어 시스템 프로토콜 개발을 위하여 화물열차 50량을 연결하여 부산신항에서 진례역까지 총 21km를 왕복운행하는 시험이 진행되었으며, 유선 및 무선 분산제어 시스템 구성방안을 제안하고 검증하는 연구가 수행되었다. 이와 함께 장대화물열차 50량 편성의 상용제동 및 비상제동 특성에 대한 연구도 지속적으로 수행되고 있다.^[7-8]

지난 선행연구로 장대화물열차 50량을 다물체 동역학 프로그램인 SIMPACK을 이용하여 모델링하고 열차 제동 지연 및 틈새량 등에 따른 연결기에 작용하는 충격력을 평가하였다.^[9]

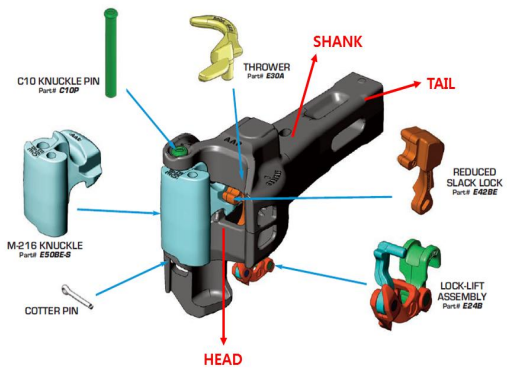


Fig. 1 AAR E coupler drawing

본 연구에서는 실제 비상제동 시험한 데이터를 적용하여 화차 50량의 제동지연 시간 및 공주시간을 산출하였으며, 분산제어 제동을 하는 화물열차의 편성을 2가지로 구성하여 해석 및 분석을 진행하였다.

2. AAR E형 연결기 및 완충장치

2.1 AAR E형 연결기

연결기는 열차의 편성을 조성하는데 차량 간의 연결에 필요한 장치로 국내의 화물열차 차량에는 북미 철도협회 (Association of American Railroads : AAR)에서 표준 연결기로 지정한 AAR E 연결기를 사용한다.

연결기의 본체는 크게 헤드(head), 샹크(shank), 테일(tail)의 3부분으로 구성되어 있고, 헤드 부분은 너클(knuckle)과 로크(lock), 로크 리프트(lock-lift assembly), 너클 스톱워(thrower), 너클 핀(knuckle pin) 등의 구성으로 되어 있다. Fig. 1은 연결기 구성을 설명하기 위하여 Strato inc.의 AAR E 연결기 자료를 참고하였다.^[1, 15]

연결기 테일 부분은 충격을 흡수하는 완충기와 연결되어 사용된다. 국내 화차에는 최대하중 200 ton 용량의 고무완충기(rubber draft gear)를 주로 사용하고 있으며, 해외 화차의 경우 고무완충기가 아닌 스틸완충기 (steel draft gear)를 사용하고 있다.

Table 1 Mechanical property of AAR E coupler

Property	Tensile strength	Yield point
M-201 Grade-E	824 [MPa]	686 [MPa]
Elongation	Reduction of area	Young's modulus
14 % or more	30 % or more	2×10^5 [MPa]
Poisson's ratio	Density	Thermal expansion
0.3	7.85×10^{-6} [kg/mm ³]	1.2×10^{-5} [1/°C]

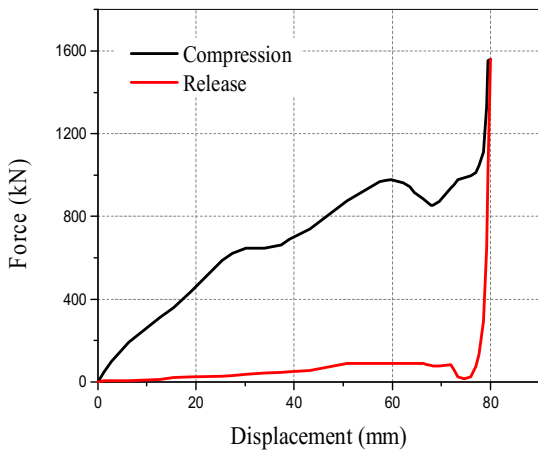


Fig. 2 F-D curve of steel draft gear

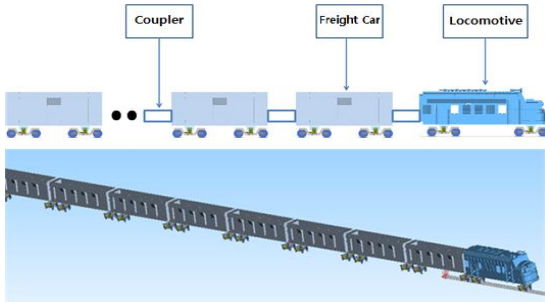


Fig. 3 Dynamic models of 50 freight cars

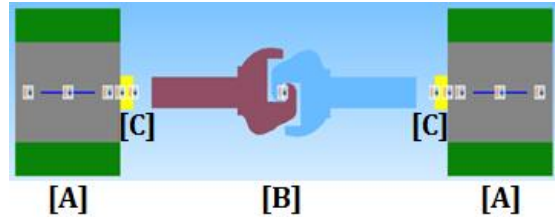


Fig. 4 Dynamic models of coupler and draft gear

스틸 완충기는 압축 저항력이 고무완충기 보다 2배 이상 크고, 에너지 흡수 측면에서 4배 이상 에너지 흡수율이 좋다.

해의 화차의 경우 장대 열차(50량 이상)으로 편성되는 경우가 많기 때문에 열차 제동 시 연결기에 작용하는 충격력이 크므로 완충기 고려 시 에너지 흡수율이 중요하다.

본 연구에서는 Fig. 2와 같이 Miner Enterprises inc.의 Crown SE 스틸 완충기의 특성을 이용하였으며, Fig. 4의 [A] 부분의 입력특성으로 사용되어 동역학 시뮬레이션을 수행하였다.

3. 동역학 시뮬레이션

3.1 동역학 해석 모델링

화물열차 50량 모델링은 다물체 동역학 프로그램인 SIMPACK의 기본 열차모델을 이용하여 모델링 하였으며, 열차의 중량을 Table 2와 같이 기관차, 화차 및 대차 부분으로 나누어 각각 적용하였다.

본 해석에서는 만차(Full car)를 기준으로 해석을 진행하였으며, 스틸 완충기의 완충기 특성 값을 적용하였다. 동역학 해석에 사용된 화물열차의 구성은 Fig 3과 같이 기관차(locomotive) 1량과 화차(freight car) 49량으로 모델링 하였으며, 각각 열차 사이의 연결기 및 완충기(coupler)를 모델링하였다.

연결기 및 완충기의 구성은 Fig 4와 같이 [A] 부분에는 완충기의 특성 커브(F-D curve)를 적용하였고, [B] 부분에는 연결기 간 틈새량과 접촉조건을 적용하였다. [C] 부분은 화물열차 연결기가 회전 시 좌우 작동가능 범위로 13.5°의 구속조건을 적용하여 특정범위 내에서 구동하도록 모델링 하였다.

Table 2 Freight cars mass

Locomotive	-	132 [ton]
Freight cars	Empty	22 [ton]
	Full	88 [ton]
Bogie	-	3.8 [ton]

Table 3 Results and conditions of an example of 3 freight cars in EN 14531-2

Car mass	1st	65.6 [ton]
	2nd	63.6 [ton]
	3rd	87.6 [ton]
Initial speed	200 [km/h]	
Stopping distance	1656.68 [m]	
Stopping time	58 [sec]	
Equivalent deceleration	0.931 [m/s^2]	
Braking force	1st	61073 [ton]
	2nd	59211 [ton]
	3rd	81555 [ton]

Table 4 Comparisons of the results in 3 freight car's simulation

	Braking distance	Braking time
EN 14531-2	1656.68 [m]	58 [sec]
Simpack simulation	1686.76 [m]	61 [sec]
Error	1.8 [%]	5.17 [%]

화물열차의 동역학 모델을 검증하기 위하여 제동거리 산출에 가장 많이 적용되는 EN 14531-2 규정에 따라서 3량 해석 결과를 비교하였다.^[11,12]

이 규정에서는 시간 적분법을 이용하여 제동 관련 파라미터를 계산하고 분석하는 방법을 제시하고 있어 제동거리, 제동시간, 제동력 등을 시뮬레이션과 비교하여 검증하였다.

화물열차는 제동 관련 규정 예시가 없기 때문에 제동력은 고속열차를 기준으로 분석하였으며, 제동 초기속도는 200 km/h로 적용하였다. 각각의 열차 무게에 감속도를 곱하여 제동력 산출하였으며, 제동거리와 제동시간을 분석하였다.

모델링에 사용된 해석 조건을 Table 3에서 확인할 수 있으며, Table 4에 해석 결과를 정리하였다. 해석결과는 EN 14531-2의 제동거리는 1656.68 m 제동시간은 58 sec, 동역학 모델의 제동거리는 1686.76 m 제동시간은 61 sec 이다. EN 14531-2 대비 제동거리를 비교했을 때 약 1.8 %, 제동시간을 비교했을 때 4.9 % 오차가 발생하였다.

이와 같이 EN 14531-2 규정과 동역학 모델의 오차 범위는 미미한 것으로 확인되었으므로, 이 방식으로 열차 50량 모델링을 구성하여도 문제가 없다고 평가하였다.^[9]

연결기의 충격력을 확인하는 동역학 모델링의 경우 해석시간을 단축시키기 위하여 단순화 모델을 적절히 이용하기도 한다. 독일 BD BAHN의 화물열차 동역학 모델링 연구결과를 참고하여 열차의 휠-레일 접촉을 제거하고, 박스 모델링으로 단순화 시켜서 해석시간을 감소와 수치적 안정성을 향상시킬 수 있었다.^[13]

Fig 5는 단순화 모델의 검증을 위하여 휠-레일 접촉 모델과 동일한 중량을 적용하여 각각 5량, 10량, 15량, 20량 조건으로 해석을 수행하였다. 연결기에 작용하는 최대 충격력 값을 비교한 결과 약 1~2 %의 오차가 발생하였으며, Table 5에 해석 결과를 비교 분석하였다.

이와 같이 단순화 모델을 적용하여 해석을 진행하더라도 오차의 범위가 작게 발생하기 때문에 50량 이상의 장대화물열차 모델링 시 단순화 모델을 적용하여 적합하다고 판단된다.

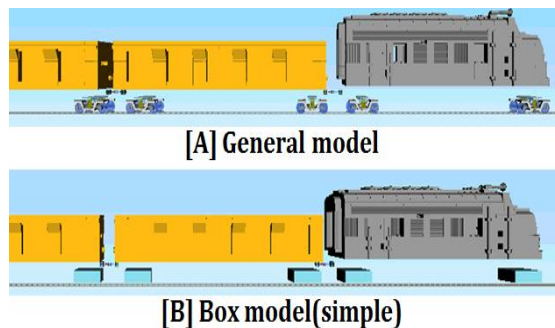


Fig. 5 General model and Box model of Freight cars

Table 5 Comparisons of maximum impulsive forces to the couplers in 5, 10, 15 freight cars

5 freight cars	Maximum impulsive force of Coupler [kN]	
	General	Simple
	230	228
Error	0.86 [%] based on 4th coupler	
10 freight cars	Maximum impulsive force of Coupler [kN]	
	General	Simple
	416	423
Error	1.64 [%] based on 9th coupler	
15 freight cars	Maximum impulsive force of Coupler [kN]	
	General	Simple
	623	628
Error	0.86 [%] based on 14th coupler	

3.2 제동 지연에 따른 최대 충격력 해석

화물열차 50량 해석을 진행하였으며, 해석조건을 Table 6에 정리하였다. 연결기 제동지연시간 0.1 sec에 연결기 틈새량 20 mm일 때의 조건으로 해석을 실시하였다. 해석결과 Fig. 6와 같이 29번째 연결기에서 최대 988 kN 이 발생하였다.

AAR M-211 규정에 따르면 AAR E 연결기의 경우 연결기 몸체에서 3114 kN, 너클에서 1800 kN 이상 가해질 때 연결기의 영구변형이 발생하지 않을 것으로 명시되어 있다.^[10] 아울러 화물열차를 운행 시 제동에 의하여 연결기에 지속적인 충돌이 발생하기 때문에 피로해석이 필요하다.

AAR E 연결기의 재질의 피로한도 323 MPa 을 참고하여 해석결과를 분석하였으며,^[14] 선행연구 결과 피로한도를 만족시키기 위해서는 연결기의 작용하는 충격력이 790 kN 이하로 발생해야한다.^[9]

Table 6 Conditions for simulation analysis of 50 freight cars

Train weight	Locomotive	132 [ton]
	Freight car	88 [ton]
Velocity before braking		80 [km/h]
Deceleration		0.931 [m/s^2]
Braking force	Locomotive	123 [kN]
	Freight car	82 [kN]
Braking delay		0.1 [sec]
Brake equivalent response time		4 [sec]
Coupler gap		20 [mm]

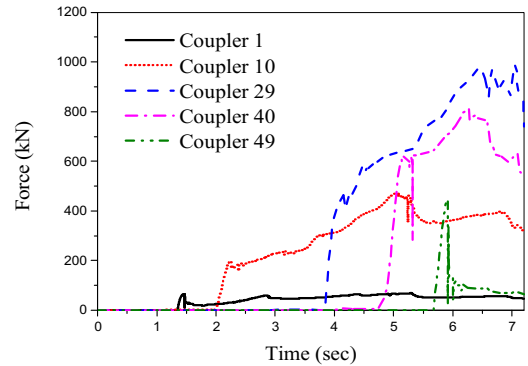


Fig. 6 Results of coupler forces in 50 freight cars

3.3 제동시험 데이터를 이용한 해석 결과

유진기공업(주)에서 한국철도공사의 신조차량 전기기관차 도입 시 39량 편성시험을 진행하였다.

시험은 12량과 39량에서 만차 최대제동압력을 측정하여 이 결과를 바탕으로 Table 7에서와 같이 화차 50량의 제동지연 시간 및 공주시간을 산출하였다.^[8]

이를 고려하여 제동 지연시간과 공주시간을 동역학 모델에 적용하였으며, 연결기의 틈새량을 5~50 mm 까지 변화시키면서 해석을 수행하였다.

해석결과 Fig. 7과 같이 틈새량이 50 mm 이상일 때 너클의 영구변형 기준을 넘었으며, 모든 결과에서 연결기 너클의 피로수명 기준인 790 kN을 넘어 만족시키지 못 했다.

Table 7 Experiment results about brake delay

Emergency brake	Brake delay time	Brake equivalent response time
Locomotive	0.4 [sec]	1.8 [sec]
1 car	0.2 [sec]	2.8 [sec]
10 car	0.7 [sec]	4.3 [sec]
20 car	1.2 [sec]	5.8 [sec]
30 car	1.7 [sec]	7.0 [sec]
50 car	2.9 [sec]	8.7 [sec]

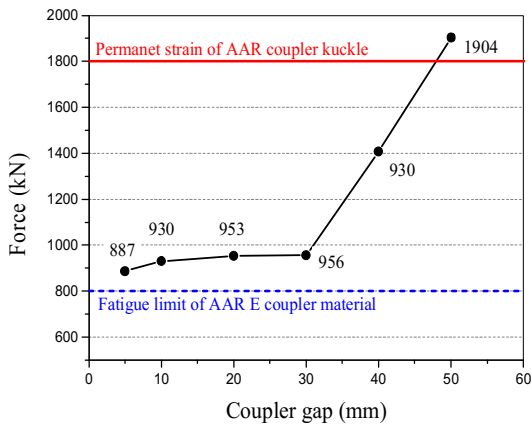


Fig. 7 Results of maximum coupler force according to experiment data

3.4 열차 편성 변화에 따른 해석 결과

분산중련제어 시스템은 Fig. 8과 같이 기관차 2대를 화차 앞뒤에 나누어 연결하고 앞의 기관차(제어 기관차)가 뒤의 기관차(피제어기관차)를 유선 혹은 무선으로 제어하는 기술이다.^[7]

특히 50량 이상의 장대화물열차를 운행을 위한 핵심기술로 미국, 중국, 호주 등 일부 국가에서만 운용되고 있다. 최근 국내에서도 기술 개발을 시작했으며, 열차의 길이가 총 1.2 km에 달하는 80량 시험운행에 성공하였다.

본 논문에서는 분산중련제어 시스템을 적용하여 50량 화물열차 편성을 Fig. 9와 같이 2가지로 구성하여 연결기 틱새량 20~100 mm, 제동 지연시간을 0.1 sec로 고정하여 해석을 수행하였다.

Simulation A의 경우 양쪽 끝에 기관차를 편성하여 양쪽에 끝에서 부터 동시에 제동 (분산중련 무

선제어 시스템)이며, Simulation B는 기관차를 처음과 중간(26량)에 연결하여 동시에 제동하는 제어 방법을 적용하였다.

해석결과 Fig. 10과 같이 모든 틱새량 조건에서 연결기 너클 재질의 무한 수명 기준을 만족시킴을 알 수 있었고, Simulation A가 Simulation B 보다 모든 틱새량 조건에서 충격력이 작게 나옴을 알 수 있었다.

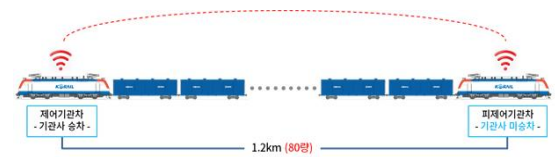


Fig. 8 Schematic diagram of LOCOTROL system

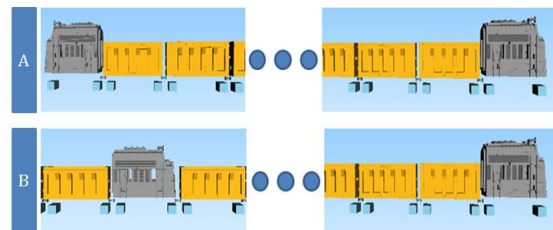


Fig. 9 Two different train configuration systems

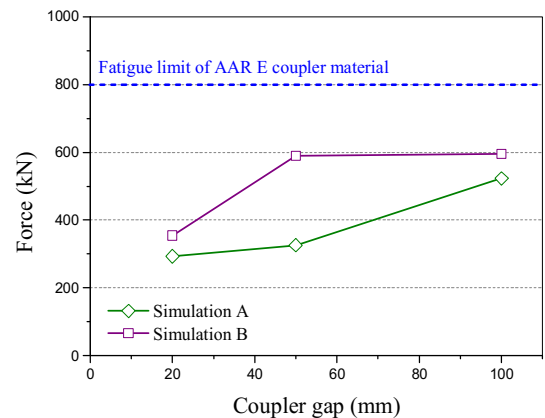


Fig. 10 Results of maximum coupler force according to Two different train configuration systems

6. 결 론

본 논문에서는 50량 이상의 장대화물열차의 효율적인 운영을 위하여 열차 편성 변화에 따른 연결기 충격력을 다물체 동역학 프로그램인 SIMPACK을 이용하여 해석 및 분석하였다.

해석 조건으로 연결기의 틈새량, 제동지연 및 공주시간, 열차 편성 변화 (분산중련제어 시스템)으로 해석을 수행하였으며, 아래와 같이 결론을 정리하였다.

1. 실차시험에서 도출한 제동지연 시간 및 공주시간을 적용하여 충격력 해석 및 분석하였으며, 연결기 너클 기준과 비교한 결과 틈새량이 50 mm 이상이 되었을 때 연결기 너클의 영구변형이 발생하였고, 모든 틈새 조건에 재료의 무한 수명을 만족시키지 못 했다.
2. 분산중련 무선제어 시스템을 참고하여 기관차 2량을 모델링의 적용하여 충격력 해석 및 분석하여 이를 연결기 너클 기준과 비교한 결과 제동 지연시간이 0.1 sec 일 때, 모든 틈새량 조건에서 재료의 무한 수명을 만족시켰다.
3. 분산제어 시스템을 적용하기 위한 화물열차 편성 구성 및 연결기 종류별 인터페이스 개발의 기초자료로 활용이 가능하다.
4. 향후 우리나라와 동북아 및 유라시아 지역 국가간의 철도를 통한 화물 운송에 국가 간 서로 다른 제동특성에 대비하여 본 연구결과를 적용하여 활용이 가능할 것으로 판단된다.

후 기

“본 논문은 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비 지원(17RTRP-B118949-02)에 의해 연구되었음”

REFERENCES

1. Na, H. S., "A study about cargo transportation system and transshipment optimization for technology for a connection of railway between

North and South Korea and Northeast Asia continent", Korea Railroad Research Institute, 2015.

2. Chunduru, S. P., Kim, M. J., Mirman, C., "Failure analysis of railroad couplers of AAR type E", Engineering Failure Analysis, Vol. 18, No. 1, pp. 374-385, 2011.
3. RAILWAY INVESTIGATION REPORT, "Transportation Safety Board of Canada", Report No. R13D0054, R111V0039, CANADA, 2013.
4. Byon, S. K., Lee, D. H., Choi, H. Y., "Design of Railway Vehicle Wheel Profile Suitable for Dual-rail Profile", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, No. 3, pp. 30-37, 2017.
5. Nasr, A., Mohammadi, S., "The effects of train brake delay time on in-train forces", Journal of Rail and Rapid Transit, Vol. 224, No. 6, pp. 523-534, 2010.
6. Cheli, F., Gialleonardo, E., Melzi, S., "Freight trains dynamics: effect of payload and braking power distribution on coupling forces", International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, Vol. 55, No. 4, pp. 464-479, 2017.
7. Lee, K. M., Lee, J. H., Yoon, Y. K., "A Study on the wire reduction design and effect analysis for the train vehicle line", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 18, No. 12 pp. 778-784, 2017.
8. Lee, D. K., Park, S. W., Lee, G. Y., Kim, K. N., Shin, P. W., "Brake system characteristics analysis in domestic long freight train configuration" 2017 Autumn Conference of The Korean Society Railway, pp. 359-362, 2017.
9. Lee, J. J., Koo, J. S., Cho, B. J., Na, H. S., Mun, H. S., "Analysis and Evaluation of Reduction of Impact Force in a Coupler when a Long Freight Car Brakes", "Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 17, No. 1, pp. 130-137, 2018.
10. Association of American Railroads, Couplers and

Yokes, AAR Approved-Purchase and Acceptance, AAR M-211, 2017.

11. Choi, D. B., Lee, K. M., Yoon. Y. K., "A Study on Train Braking Performance Assessment Methods Using Braked Weight Percentage", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 17, No. 11 pp. 545-551, 2016.
12. British Standards Institution, Railway applications. Methods for calculation of stopping and slowing distances and immobilization braking, BS EN 14531-2, 2015.
13. Behringer S. "Calculation of the momentum drive and travelled distance of freight trains Multi-body simulation with SIMPACK", SIMPACK User Meeting, 2014.
14. Alves, L., Borges, M., Ferreira, J., Sisdelli, A., Castro, E., "Improving the draft system components performance for iron ore transportation", 11th International Heavy Haul Conference, pp. 610-616, 2015.
15. Strato inc. "Product information,"(2016) <http://www.stratoinc.com/>(accessed 30, Nov., 2018)