

장대화물열차 제동 시 연결기에 발생하는 충격력 해석 및 분석

이정준*, 구정서*[#], 조병진*, 나희승**, 문형석**

*서울과학기술대학교 철도차량시스템공학과, **한국철도기술연구원

Analysis and Evaluation of Reduction of Impact Force in a Coupler when a Long Freight Car Brakes

Jeong Jun Lee*, Jeong Seo Koo*[#], Byung Jin Cho*, Hee Seung Na**, Hyung Seok Mun**

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

**Korea Railroad Research Institute

(Received 7 December 2017; received in revised form 15 January 2018; accepted 8 February 2018)

ABSTRACT

In long freight trains, there is a brake time delay in the neighboring freight cars that causes damage and fractures of couplers, especially the knuckle of them. If there is a problem for couplers in the cars, this could cause a derailment and lead to damage of human life and property damage. In this study, maximum forces on the couplers are studied when a long freight car brakes, with brake delay time and coupler gap. We have made a dynamic model of 50 freight cars and couplers, applying contact between couplers and a characteristic curve for expressing force and displacement of buffers with SIMPACK, a multi-body dynamics program. We use EN 14531-2 from the British Standards Institution, a standard of freight car brakes for the verification of the dynamic model. We also use a simplified method to analyze the dynamic model of 50 freight cars. With changing coupler gap and brake delay time, we do comparative analysis with AAR M-201 from the Association of American Railroads, a standard of AAR couplers. From this result, we find that the standard on fatigue limit is satisfied, such that the brake delay time is within 0.06 second if the coupler gap of the AAR coupler is within 20 millimeters.

Key Words : Long Freight Car(장대화차), Coupler(연결기), Brake Delay(제동지연), Impact Force(충격력), Coupler Gap(연결기 틈새)

1. 서 론

통상 화물철도차량의 편성의 경우 국내에서는 기

관차 1량, 화차(화물을 싣고 수송하는 철도 차량 [貨車, freight car, wagon]) 25량 등의 구성으로 운영 된다. 해외의 경우 중국은 50량, 미국과 러시아는 70~140량으로 편성되어 운영된다.

최근 우리나라와 중국, 러시아를 포함한 동북아

Corresponding Author : koojs@seoultech.ac.kr

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

지역 국가 간의 교역이 지속적으로 증가와 함께 장대화물열차에 대한 관심이 증대되고 있다.^[1]

화물열차의 경우 각 열차 칸별 제동이 시작하는 시점에 차이가 있다. 이러한 제동 지연 시간의 차이로 인하여 연결기의 충격이 발생하게 된다. 이로 인하여 국내외 화차 운행 시 연결기 손상이 빈번하게 일어나고 있다. 특히, 너클과 너클핀이 결합되는 부분이 주로 파괴 되고 있다.^[2-3] 이렇게 중간 연결기가 파괴될 경우 열차의 탈선이나 누락되어 안전상의 문제가 발생 할 수 있다.

이와 관련된 연구에서 트레인-트램의 경우 ADAMS/Rail을 이용한 동역학 해석 사례가 있었고^[4] 화물열차의 경우 열차 급제동 시 발생하는 충격력 및 화차제동특성에 관한 연구가 진행된 적은 있지만 장대화물열차 운행 시 연결기에 발생하는 충격력에 대한 연구는 미흡하다.

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 3량 동역학 모델링하여 공차(20 [ton])와 만 차(80 [ton]) 조건을 이용하여 연결기에 작용하는 충격력을 구하고 이를 시험을 통해 시뮬레이션과 비교하였다.^[6] 본 연구에서는 화물열차 50량을 다물체 동역학 프로그램인 SIMPACK을 이용하여 모델링하고 열차 제동 지연, 틱새량 등에 따른 연결기에 작용하는 충격력을 평가하였다. 또한 이를 미국 연결기 규정인 AAR M-211^[7] 규정과 비교하여 분석하고 피로분석을 통해 연결기의 무한 수명을 위한 방안에 대해서 분석하였다.

2. 화물열차 연결 장치 및 제동 관련 규정

2.1 AAR E형 연결기^[1]

연결기는 열차를 조성하기 위해 차량 간의 연결할 때 필요하다. 국내외 화물열차 차량에는 북미 철도협회 (Association of American Railroads : AAR)에서 북미철도 표준 연결기로 지정한 AAR E형 연결

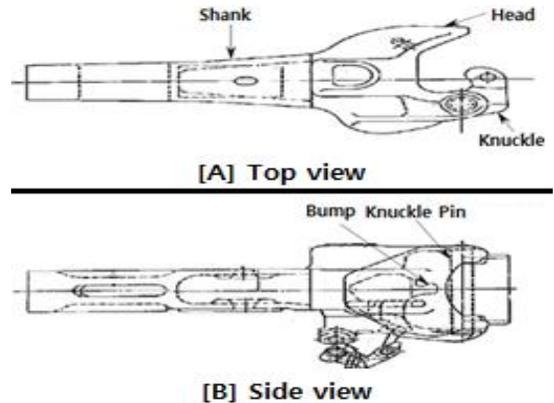


Fig. 1 AAR E type coupler drawing

기를 사용하고 있다. 연결기를 결합할 때에는 한쪽 연결기의 너클을 개방 위치에 놓고 다른 연결기를 밀게 되면 열려있던 너클이 회전하면서 양쪽의 너클이 결합하게 되고 동시에 연결기 헤드 부분에 있는 로크가 내려가면서 너클이 완전히 고정 이 된다.

연결기의 본체는 [Fig 1]과 같이 헤드(Head), 샹크(Shank), 테일(Tail)의 3부분으로 구성되어 있고 추가로 너클과 로크, 로터리 로크, 너클 스로워, 너클 핀 등으로 구성되어 있다. 너클의 뒷부분의 돌기 때문에 너클핀이 파손되어도 연결기가 분리 되지 않는다.

2.2. AAR E형 연결기 소재 물성 및 평가 규정

AAR E형 연결기의 재료는 M-201 Grade E를 사용한다. 이 재료의 기계적 성질은 [Table 1], 화학적 성질 [Table 2]와 같다.

Table 2 Chemical property of AAR E Coupler

Property	C	Si	Mn	P	S	V	Cr
M-201 Grade-E	0.32 Max [%]	1.5 Max [%]	1.85 Max [%]	0.04 Max [%]	0.04 Max [%]	-	-

Table 3 AAR E Coupler requirement

Item	Value	Note
Coupler body (Gr.E)	Breaking strength: 408 [ton], 4002 [kN] Permanent set: 0.76 [mm], 317.5 [ton], 3114 [kN]	AAR M-211
Knuckle (Gr.E)	Breaking strength: 294 [ton], 2884 [kN] Permanent set: 0.76 [mm], 181.4 [ton], 1800 [kN]	AAR M-211

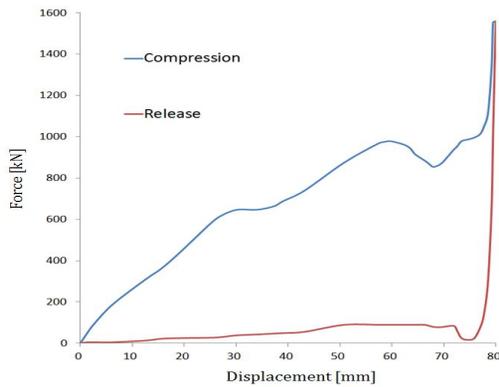


Fig. 3 Force & Displacement curve of Steel Draft Gear

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]

AAR E형 연결기의 평가기준은 [Table 3]과 같이 너클의 영구변형시점을 기준 (181 [ton], 약 1800 [kN])으로 연결기를 평가하였다.

2.3. 화물철도용 완충장치

장대화물열차의 경우 스틸 완충기를 사용하고 있다. 스틸 완충기는 압축 저항력이 고무완충기 보다 2배 이상 크고 에너지 흡수 측면에서 4배 이상 에너지 흡수율이 좋다. 해외의 경우 장대 열차(50량 이상)으로 편성되는 경우가 많으므로 열차 제동 시 연결기에 작용하는 충격력이 크다. 스틸 완충기의 경우도 [Fig 3]와 같이 Loading과 Unloading 시 다른 곡선의 형태로 나타난다. [Fig 3]의 커브는 해외에서 많이 사용되고 있는 Miner Enterprises inc의 Crown SE 모델의 특성 값을 사용하였다.^[8]

2.4. 화물열차 제동 관련 EN 14531-2^[9] 규정

유럽 규격으로 시간 적분법을 이용하여 제동 관련 파라미터를 계산하고 제동거리, 제동시간, 제동력 등을 구할 수 있는 방법을 제시하고 있다. 본 연구에서는 EN 14531-2 부록의 열차 3량 해석 결과를 이용하여 모델링 검증에 활용하였다. 규정 예시의 해석 조건 및 결과는 [Table 4]와 같다.

Table 4 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]

3. 다물체 동역학 프로그램을 이용한 장대화물열차 동역학 해석

3.1. 화물차량의 제원

화물열차 50량으로 동역학 모델링하였고 [Table 5]와 같이 기관차, 화차 및 대차의 중량을 적용하였다. 본 해석에서는 만차를 기준으로 해석을 진행하였다.

3.2. 동역학 해석 모델링

다물체 동역학 소프트웨어인 다쏘시스템의 Simpack을 사용하여 동역학 해석을 진행하였다. 스틸 완충기의 완충기 특성 값을 적용하고 연결기 사이의 접촉을 적용하였다. [Fig 4]와 같이 기관차 1량과 화차 49량으로 모델링을 구성하였고 [Fig 5]와 같이 각각 열차 사이의 연결 장치를 모델링하였다. [Fig 5]의 [A] 부분에는 스틸 완충기 [Fig 3]의 특성 커브를 적용하였고 [B] 부분에는 연결기 간 틈새량과 접촉을 적용하였다. [C] 부분에는 연결기의 범위 (약 13.5°)를 적용하기 위해 [Fig 6]와 같은 커브를 적용하여 연결기가 회전 시 특정 범위 내에서 움직이도록 하였다.

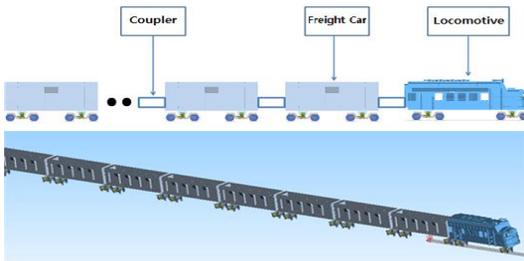


Fig. 4 Dynamic models of 50 freight cars

Table 5 Freight cars mass

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

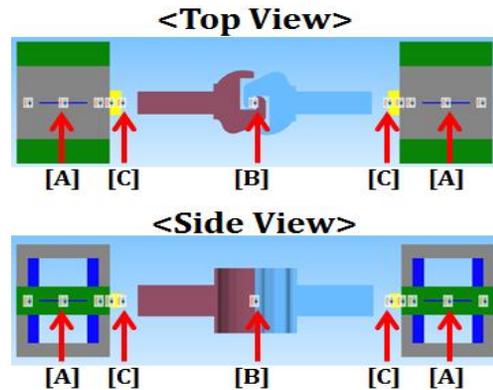


Fig. 5 Simulation models of AAR E coupler and steel draft gear

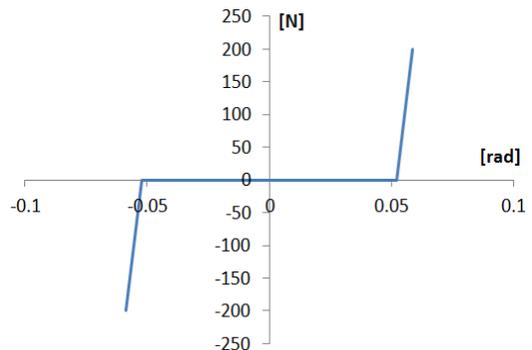


Fig. 6 Characteristic curve for an rotation of AAR E coupler

Table 6 Characteristic curve values for an rotation of AAR E coupler

Angle [rad]	Force [N]
-PI/53.32	-200
-PI/60	0
-1.00E-05	0
1.00E-05	0
PI/60	0
PI/53.32	200

Table 7 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 [%]

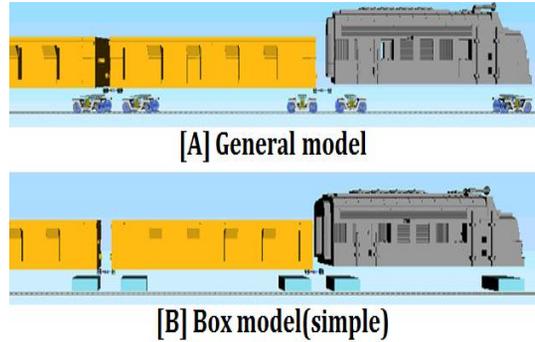


Fig. 7 General model and Box model of Freight cars

3.3 동역학 해석 모델링의 검증

Simpack을 이용한 동역학 화물열차 모델링의 검증은 위해서는 실제시험이 필요하지만 데이터가 없기 때문에 EN 14531-2 부록의 열차 3량 해석 결과를 비교하여 Simpact 모델링이 올바르게 되었는지 검증하였다. 해석결과를 [Table 7]와 같은 결과를 얻었다. 제동거리를 비교했을 때 약 1.8 [%]의 오차가 발생하였으므로 이 방식으로 열차 50량 모델링을 구성하여도 문제가 없다고 판단하였다.

3.4 해석시간 단축을 위한 단순화 모델링

화물열차 10량으로 편성하여 열차 충격력 산출 시 1~2일의 해석 시간이 소요되었다. 50량의 장대 화물열차 편성하여 열차 충격력 산출 시 최소 3~4일의 해석시간이 예상되었다. 이를 해결하기 위해서는 동역학 모델링 단순화 하는 것이 필요했다. Simpact 유저 미팅 자료를 참고하여 단순화 모델링 및 해석을 하였고 이를 단순화 하지 않은 모델링 해석결과를 비교 분석하였다.

[Fig 7]과 같이 휠-레일 접촉을 제거하고 대차를 박스 모델링으로 단순화 시켜서 해석 시간 감소와 수치적 안정성을 높이는 방법을 사용하였다.

화물열차 General 모델링과 Simple 모델링을 각각 5량, 10량, 15량으로 편성하여 연결기에 작용하는 충격력을 비교하였다.

Table 8 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	

해석결과 [Table 8]와 같이 연결기에 작용하는 최대 충격력을 기준으로 비교 시 약 1~2 [%]의 오차가 발생했다. Simple 모델링으로 해석을 진행해도 용인할 정도의 오차가 발생했기 때문에 화차 50량 모델링 시 Simple 모델링을 적용하여 해석을 진행하였다.

3.5 열차 제동 지연에 따른 연결기에 작용하는 최대 충격력 해석

[Table 9]의 해석 조건을 적용하여 화물열차 50량 해석을 진행한 결과, [Fig 8]와 같이 29번 째 연결기에서 최대 약 988 [kN]이 발생하였다. AAR E형 연결기의 경우 [Table 3]와 같이 1800 [kN]이상 가해질 때 연결기의 영구변형이 발생하므로 본 해석에서는 이 규정을 만족함을 알 수 있다.

하지만 화물열차 운행 시 연결기에 지속적인 충동이 발생하기 때문에 피로해석이 필요하다. 본 연구에서는 해외 학술대회논문의 AAR 연결기의 재질의 피로한도(323 [MPa])를 참고하여 해석결과를 분석하였다.^[10]

[Fig 9]와 같이 [A] 부분에 도출된 데이터 값의 충격력을 가하고 [B] 부분은 너클핀과 락커에 의해서 고정하여 해석을 진행하였다.

해석결과 [Fig 10]와 같이 약 405 [MPa]이 발생하여 피로한도 기준을 만족시키지 못했다. 피로한도인 323 [MPa]을 만족시키기 위해서는 [Fig 11]와 같이 연결기의 작용하는 충격력이 790 [kN]이하로 발생해야한다.

Table 9 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]

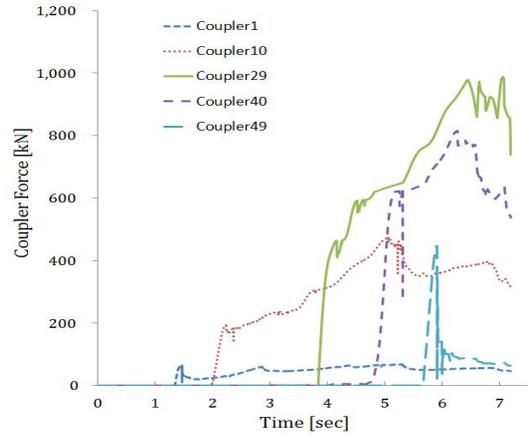


Fig. 8 Results of coupler forces in 50 freight cars

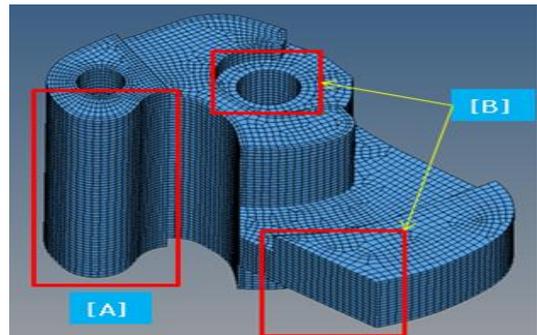


Fig. 9 Boundary conditions of AAR coupler knuckle for fatigue analysis

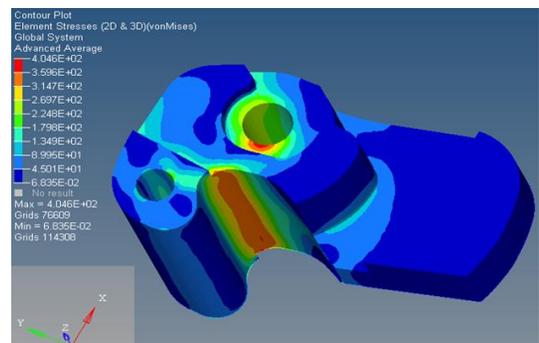


Fig. 10 Results of AAR coupler knuckle for fatigue analysis

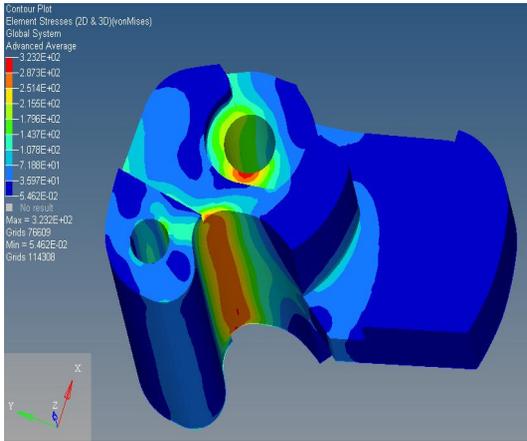


Fig. 11 Coupler force for satisfying fatigue limit

3.6 해석 조건에 따른 연결기에 작용하는 최대 충격력 해석

연결기에 작용하는 충격력의 크기는 열차 간 제동지연 시간, 결합된 연결기 틈새량 변화에 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 이 2가지를 고려한 조건을 적용하여 해석을 하고 이를 AAR E 연결기의 평가 기준과 비교하였다.

첫 번째는 연결기 틈새량을 변화시키면서 해석을 진행하였다. 열차 간 제동지연 시간은 0.1 [sec]로 고정하고 틈새량을 5 [mm]부터 50 [mm]까지 증가시키면서 해석을 진행하였다. 해석결과 [Fig 12]과 같이 틈새량이 40 [mm] 이상에서는 연결기의 너클의 영구변형 기준을 넘어서었다. 그리고 모든 틈새량 조건에서 연결기 너클 재질의 무한 수명 기준을 만족시키지 못했다.

두 번째는 열차 간 제동지연시간을 변화시키면서 해석을 진행하였다. 첫 번째 해석 결과에서 틈새량이 5 [mm]~20 [mm]까지는 연결기에 작용하는 최대 충격력이 큰 차이가 없었으므로 열차 간 열차 간 틈새량은 2 [mm]로 고정하고 제동지연시간을 0.1 [sec]부터 연결기 너클 영구 무한 수명기준을 만족할 때까지 제동지연시간을 줄이면서 해석을 진행하였다. 해석결과 [Fig 13]과 같이 제동지연시간이 0.06 [sec] 이하에서 연결기의 너클의 영구변형 기준을 만족시킴을 알 수 있다.

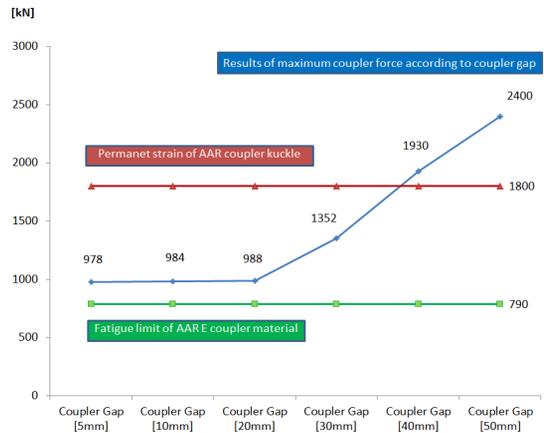


Fig. 12 Results of maximum coupler force according to slack amounts

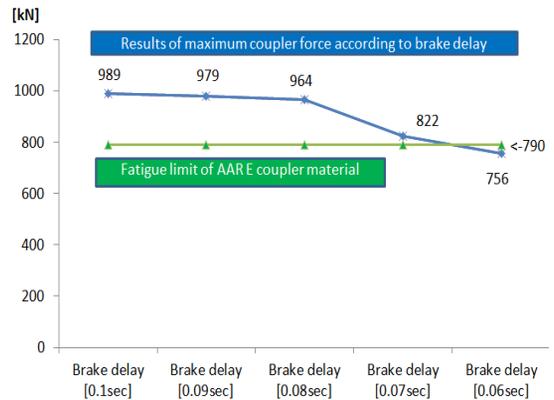


Fig. 13 Results of maximum coupler force according to brake delay

4. 결론 및 고찰

본 논문에서는 50량 이상의 장대화물열차 운영을 위해 다물체 동역학 프로그램인 Simpack을 이용하여 화물열차와 연결 장치를 모델링하였다. 이 결과를 미국 연결기 규정인 AAR M-211 규정과 해외 학술대회논문의 피로평가 값으로 평가하였다. 현재 국내에서는 관련 연구가 많지 않은 실정이며, 본 연구를 통해서 장대열차운행 시 제동 시 연결기에

작용하는 충격력을 평가하고 화물열차 운행 시 연결기의 충격을 줄일 수 있는 조건을 제시하고자 했다. 해석조건을 연결기의 틈새량, 열차 간 제동지연 시간으로 두고 해석을 수행하였으며, 아래와 같이 결론을 정리하였다.

1. 연결기 틈새량 변화에 따른 충격력 해석 및 분석하여 이를 AAR E 연결기 너클 기준과 비교한 결과 제동 지연시간이 0.1 [sec]일 때 틈새량 40 [mm] 이상 시 연결기 너클의 영구변형이 발생하였다. 또한 모든 틈새량 조건에 재료의 무한 수명을 만족시키지 못했다.

2. 열차 간 제동 지연 시간 변화에 따른 충격력 해석 및 분석하여 이를 연결기 너클 기준과 비교한 결과 틈새량이 20 [mm] 일 때, 제동지연시간이 0.06 [sec] 이하에서 재료의 무한 수명을 만족시켰다.

3. 틈새량을 20 [mm] 이하로 유지하면서 제동지연시간을 0.06 [sec]이하로 유지하여 열차를 편성하면 연결기 재질의 피로한도 보다 작은 응력 값이 발생하기 때문에 연결기의 무한 수명을 만족시킬 수 있다.

후 기

“본 논문은 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원(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. Seshu, P., Chunduru, Meung, J., Kim, Cliff Mirman, "Failure analysis of railroad couplers of AAR type E", Heliyon Partner Journal, 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", SAGE journals, 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, 2016.
7. Association of American Railroads, Couplers and Yokes, AAR Approved-Purchase and Acceptance, AAR M-211, 2017.
8. Miner Enterprises, Crown SE
9. British Standards Institution, Railway applications. Methods for calculation of stopping and slowing distances and immobilization braking, BS EN 14531-2, 2015.
10. 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.