

도시철도 차량의 충돌안전 기준에 관한 연구

A study on passive safety regulations of Korean standard urban train

구정서*, 노규석*, 조현직*, 권태수**, 최성규**

J. S. Koo, K. S. Rho, H. J. Choi, T. S. Kwon, S. K. Choi

ABSTRACT

In this paper, numerically evaluated is the regulations for crashworthy design of the Korean standard urban train suggested by KRRI. The 4-car consist of K-EMU(Korean Electric Multiple Unit) train developed in recent is analyzed under various collision conditions such as normal coupling, heavy shunt, light and heavy collisions. The collision conditions are assumed as K-EMU collides against another stationary one at 5 kph, 10 kph, 25 kph and 32 kph.

According to the numerical results and bibliographical study, it is necessary that the regulations by KRRI be complemented from crashworthy point of view. Furthermore, the K-EMU train is recommended to adopt a new coupler with an additional energy absorber or a mechanical fuse.

1.서론

열차 사고와 같은 대형 교통사고는 사고 자체의 인적 물적 피해로 인한 경제적인 손실도 막대하지만, 언론의 부정적인 보도로 인하여 이미지 실추, 고객들의 불안심리와 탑승회피 경향 등에 의한 2차적인 피해는 산출하기가 어려운 정도이다. 이런 사고가 발생하지 않도록 열차의 운영 시스템, 유지보수, 제어시스템 등 active safety를 완벽하게 확보하는 것이 가장 중요하지만, 인간의 오류나 천재지변 등으로 발생하는 사고를 완벽하게 방지할 수는 없다. 따라서 사고가 발생하였을 때 탑승자의 피해를 최소화 할 수 있는 passive safety 개념의 차량설계도 매우 중요하다.

도시철도 차량은 도시교통체계 등 주변 여건으로 인하여 충돌사고의 위험이 상대적으로 높다. 최근에는 운송효율 제고를 위하여 구조의 경량화, 배차시간의 단축, 운행속도 향상 등이 이루어지고 있으므로 충돌 사고에 대비한 설계 필요성은 매우 크다. 도시 철도는 열차 대 열차의 충돌뿐만 아니라, 건널목에서 대형 차량과의 충돌 위험성도 상존하고 있으므로, 이러한 운행여건을 감안하여·실정에 맞는 충돌안전기준과 설계 가이드라인을 제정하는 것이 필요하다.

이미 미국이나 유럽국가와 같은 철도 선진국에서는 체계적인 연구를 통하여 각 나라마다 문화와 환경에 적합한 충돌안전기준과 설계 가이드라인의 제정하여 운용하고 있다[1]. 국내에서도 이러한 여건변화에 능동적으로 대처할 수 있는 충돌안전도기준의 제정을 준비하고 있다. 그러나 그동안 고속전철에 대한 충돌안전도 연구[2]는 어느 정도 이루어져 왔으나 도시철도 차량이나 일반국철의 경우에는 국내 연구결과가 거의 없는 실정이므로 본 연구를 통하여 국내 운행될 도시철도 차량의 충돌안전도규정을 시뮬레이션 기법으로 분석하고 평가하는 일[3]이 필요하였다. 또한 본 연구는 향후 도입되어야 할 국내 도시형 철도차량의 충돌안전도 설계 가이드라인을 제정하는 데 기여를 할 것이다.

* 한국기계연구원, 경희원
** 한국철도연구원, 경희원

2. 국내 도시철도 차량의 충돌안전도 규정안 분석

국내 도시철도 차량의 충돌안전도 설계에 관한 조항은 다음의 도시철도 표준화 사양 제24조와 제25조에 명시되어 있다.

제24조 (충돌변형부의 제한)

- ① 구조체는 충돌시 최대한 충돌에너지를 흡수할 수 있는 구조를 가져야 한다.
- ② 각 차량이 시속 20 킬로미터 이내에서 연결기를 통해 충돌할 때 연결기의 흡수능력 이상의 하중이 차체에 작용하면, 차체 다른 부위의 소성변형이 발생하기 전에 차체의 끝단과 볼스터 사이에서 소성변형에 의해 충돌에너지가 흡수되는 구조이어야 하며, 이에 대해 실험 또는 충돌해석을 통해 입증하여야 한다. 다만, 볼스터 방식을 채택하지 아니하는 도시철도 차량은 그러하지 아니하다.

제25조 (충돌안전성 평가)

- ① 공차상태의 열차가 시속 5킬로미터의 속도로 연결기를 통하여 제동이 부가되어 있는 거의 동일한 열차와 충돌하였을 때 차체에 손상이 발생하지 아니하여야 한다.
 - ② 공차상태의 제어차량이 강체벽과 충돌할 때를 기준으로 최고 운행속도까지 속도단계별로 차량 충돌속도에 따라 발생하는 구조체의 변형상태를 실험 혹은 충돌해석을 통하여 밝혀야 한다.
- 유럽 선진 각국은 철도 사고에 대비한 자체적인 충돌안전도 설계 가이드라인을 가지고 있는데, Table 1에 영국의 충돌안전도 설계기준이 소개[4]되어 있다. 이러한 기술 조사를 통하여 분석된 외국의 충돌안전도 규정과 국내 도시철도 표준화 충돌안전 규정을 비교하면 국내규정의 큰 차이점을 다음의 세 가지로 요약할 수 있다.

- 1) 충돌안전도 설계에서 가장 중요한 타고오름 방지 설계에 대한 규정[4,5]이 없다.
- 2) 충돌 속도에 대한 규정이 명확하지 않고, normal operation 상태인 5 kph 커플링 규정(UIC, AAR 등의 표준 설계 규정)이 삽입되어 있다.
- 3) 충돌 후 차량이 가져야 할 특성(에너지 흡수, 압괴강도, 감가속도 크기 등)이 명확하지 않다.

Table 1 BRR의 충돌사고 분류 및 설계 가이드라인

Idealized collision	Max. velocity	Max. acceleration	Acceptable consequence
Heavy shunt	4m/s (15khp)	30m/s ² (3g)	Energy dissipated in drawgear with no loss of serviceability
Light collision	8m/s (30khp)	50m/s ² (5g)	Anti-climber engages. Energy dissipated in easily replaceable device
Heavy collision	16m/s (60khp)	60m/s ² (6g)	1 MJ absorbed by structural collapse over a distance of no more than 1m

이러한 문제점들은 운영사와의 협의를 통하여 개선되어야 한다. 현재 선진국의 충돌 설계 기준 속도는 Table 2와 같은 수준이지만 국내 철도 차량업체의 기술적 준비 상황을 고려하여 Table 3의 설계 가이드라인을 우선 적용하고 5년 정도의 유예기간을 주어서 선진국 수준[6-8]으로 강화할 필요가 있다.

Table 2 각국의 충돌 안전도 설계 기준속도

충돌분류	정지 차량과 충돌 속도(km/h):				
	UIC	독일	프랑스	영국	대만(일본)
shunt/coupling	4-10	5	7	5	5
heavy shunt	-	12-15	18	15	-
light collision	-	-	32	30	25
heavy collision	-	36*	65**	60*	50

Heavy collision: *열차 대 열차 충돌, **전널목에서 차량(15t)과의 충돌

Table 3 한국형 도시철도 차량의 충돌 설계 가이드라인

충돌분류	정지된 동일 열차와 충돌 속도	설계가이드라인
shunt/coupling	5 kph	드래프트 기어에서 충격 에너지 흡수.
heavy shunt	10 kph	Coupler의 에너지 흡수장치 (고점성 에너지 흡수재료나 유압식 cartridge 이용)에서 흡수. 이때 충격 가속도는 3g 이하일 것.
light collision	25 kph	충격 에너지를 mechanical fuse에서 흡수하여 차체에 영구변형이 없을 것. 이때 충격 가속도는 5g 이하일 것.
heavy collision	36 kph	차체의 양 끝단에서 에너지 흡수하고, 객실 중앙부에서는 압괴가 발생하지 않을 것. 이때 충격가속도는 6g 이하이며, override가 발생하지 않을 것.

3. K-EMU 열차의 충돌안전도 해석 모델

Fig. 1은 한국형 표준전동차의 차량편성과 해석 모델의 개요를 보여주는 그림이다. 한국형 표준 전동차는 2량의 TC 차량과 2량의 M 차량으로 구성된 총 4량 편성이며 전후좌우 대칭인 형상을 가지고 있다. TC 차량의 전두부에는 연결기가 취부되어 있고, 후방의 TC 차량, M 차량 등도 연결기에 의하여 연결되어 있다. 강체벽과 충돌하는 맨 앞 차량인 TC1은 3차원 셸로 모델링하고 뒤쪽에 이어지는 M1, M2, TC2는 1차원으로 모델링한다. 셸 요소 229,902개, 막대 요소 13개, 스프링 요소 7개이고 절점수는 195,268개로 구성되어 있다. 이 모델은 전체적으로 기하학적인 형상, 하중, 경계조건 등이 좌우 대칭임을 고려한 유한요소 반쪽 모델이다.

Fig. 2와 Fig. 3은 각각 M-car와 TC-card의 구조적 특성을 고려하여 막대 요소, 스프링 요소, 감쇠요소, 집중질량 등을 사용하여 1차원 동력학적 모델(반쪽모델)을 구성한 것이다. 열차의 전두부와 각 차량의 연결부에는 Fig. 4의 스프링 특성을 가진 draft gear가 취부되어 있다. 차체에 부착된 대차는 집중질량으로 표현되며, 이것과 결합되어 있는 연결장치는 Fig. 5와 같이 비선형 스프링 요소로 모델링된다. 이렇게 구성된 1차원 충돌해석 모델은 프랑스 ESI사의 PAMCRASH[9]를 사용하여 해석한다.

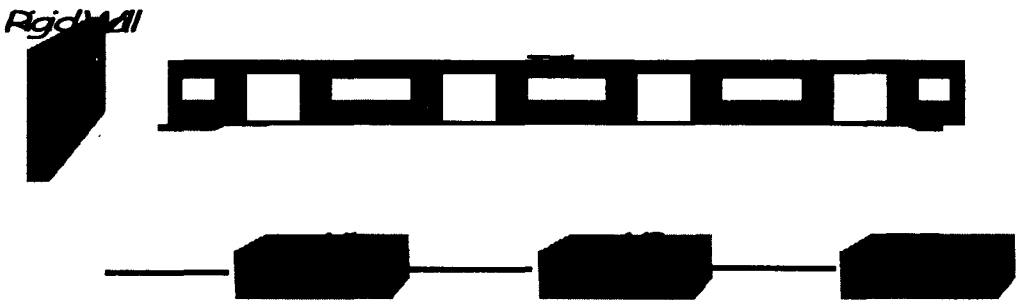


Fig. 1 Geometry and FE model used for city-train (half model)

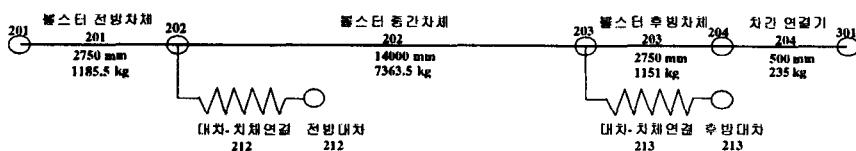


Fig. 2 One-dimensional model of the M-car

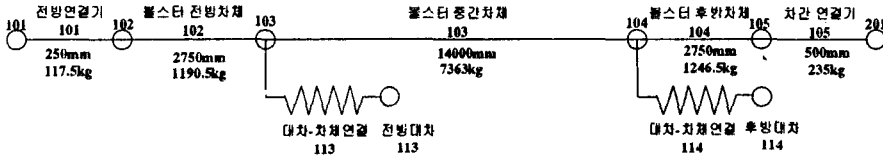


Fig. 3 One-dimensional model of the TC2

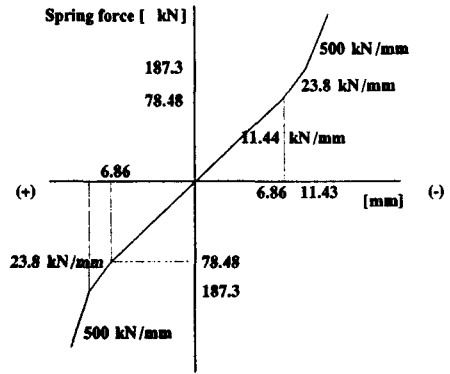
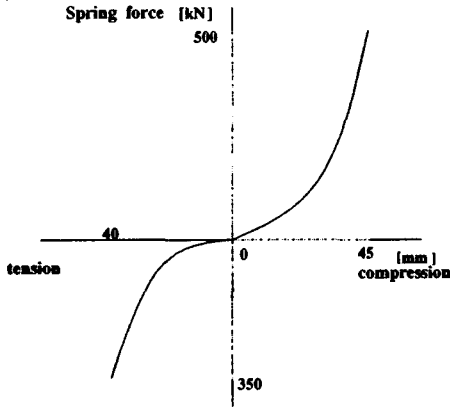


Fig. 4 Spring behavior of the draft gear

Fig. 5 Spring behavior of bogie-underframe link

4. K-EMU 열차의 충돌안전도 규정 검토

제 24조 2항의 검토

강체벽과 20 km/h에서 연결기를 통해 충돌할 때 연결기의 흡수능력 이상의 하중이 차체에 작용하면, 차체 다른 부위에 소성변형이 발생하기 전에 차체의 끝단과 볼스터 사이에서 소성변형에 의하여 충돌에너지가 흡수되는 구조인지를 검토하기 위하여 충돌해석을 하였다.

Fig. 6은 40 ms에서의 변형과 Von-Mises 응력상태를 나타낸 것인데, 차체의 끝단과 볼스터 사이뿐만 아니라 door 후방 부위에서도 소성이 발생하므로 24조 2항을 만족시키지 못한다. 차체의 끝단과 볼스터 사이에 압괴영역을 설정하거나 mechanical fuse와 같은 충격 흡수장치를 설치하여 에너지 흡수 능력을 높이면 이러한 현상을 줄일 수 있다. 그러나 24조 2항에서 정의한 소성변형의 제한 조건은 지나치게 엄격하므로 '소성변형'을 '압괴변형'으로 수정하는 것이 바람직하다고 판단 된다.

제 25조 1항의 검토

공차상태의 열차가 시속 5 km/h의 속도로 연결기를 통하여 제동이 부가되어 있는 거의 동일한 열차와 충돌하였을 때 차체에 손상이 발생하는지를 분석하기 위하여 충돌해석을 하였다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 충돌 후 72 ms에서의 최대응력은 208.8 MPa인데, 항복점 215 MPa이므로 차체에 영구변형이 발생하지 않는다. 따라서 표준 도시철도차량은 25조 1항을 만족시킨다. 그런데 이 충돌 조건은 UIC 규정 등에 의하여 정상운영 상태에서 연결 또는 조차를 위하여 요구되는 기본적인 설계 사양과 차이가 없으므로 당연히 얻어지는 결과라고 할 수 있다.

제 25조 2항의 검토

표준 도시철도차량이 5 km/h, 12.5 km/h, 18 km/h, 30 km/h의 속도로 강체벽과 충돌할 때 발생하는 구조의 변형상태를 분석하였다.

Fig. 8은 5 km/h로 고정벽에 충돌한 후, 60 ms에서의 압괴거동과 Von-Mises 응력상태를 나타낸 것인데, 차체 앞뒤의 볼스터에서 항복이 발생하며 최대 응력은 233.6 MPa이다. Fig. 9는 강체벽에 발생하는 반력을 나타낸 것인데, 드래프트 변형량이 최대 허용 압축변형인 45 mm을 초과하는 54.8 mm이므로 연결기만으로는 충돌에너지를 충분히 흡수할 수 없다. 만약 보조 에너지 흡수 장치가 부착된 연결기를 사용하면 이러한 문제를 해소할 수 있다.

Fig. 10은 고정벽과 12.5 km/h로 충돌한 후, 40 ms에서의 압괴거동과 Von-Mises 응력상태를 나타낸 것이다. 5 km/h로 고정벽에 충돌할 때와 마찬가지로 앞뒤의 볼스터에서 항복이 발생하는데, 최대 응력은 277.8 MPa이다. 이러한 경충돌에서 차체의 손상을 방지하려면 연결기 후방에 mechanical fuse을 설치하는 방법이 있다.

Fig. 11은 18 km/h로 고정벽에 충돌한 후, 40 ms에서의 압괴거동과 Von-Mises 응력 상태를 나타낸 것으로, 차체 양쪽의 볼스터 뿐만 아니라 앞쪽의 센터실과 뒤쪽 도어 부위에서도 항복이 발생하였다.

Fig. 12는 고정벽에 30 km/h의 속도로 충돌한 후 압괴거동과 Von-Mises 응력상태를 40 ms에서 나타낸 것이다. 드래프트 기어와 연결되는 앞쪽의 센터실, 양쪽 볼스터와 양쪽 도어 부위에서 항복이 발생하였다.



Fig. 6 Von-Mises stress distribution (20 kph rigidwall impact)



Fig. 7 Deformed shapes and Von-Mises stress distribution (2.5 kph rigidwall impact)



Fig. 8 Deformed shapes and Von-Mises stress distribution (5 kph rigidwall impact)

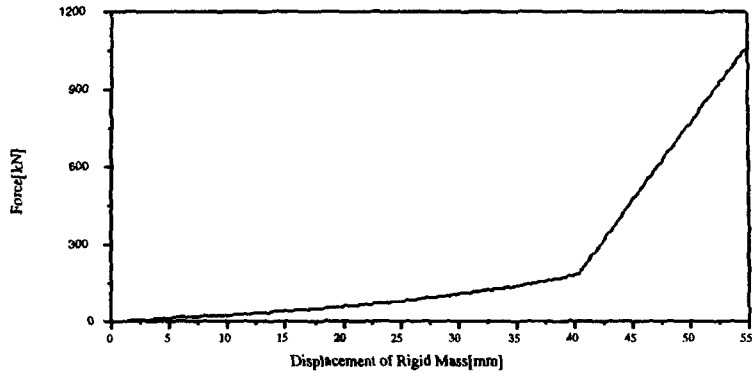


Fig. 9 Deformation - rigid wall force of TC1(5 kph rigidwall impact, half model)



Fig. 10 Deformed shapes and Von-Mises stress distribution (12.5 kph rigidwall impact)

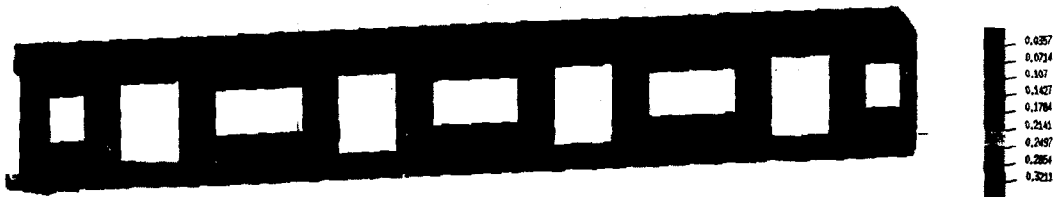


Fig. 11 Deformed shapes and Von-Mises stress distribution (18 kph rigidwall impact)



Fig. 12 Deformed shapes and Von-Mises stress distribution (30 kph rigidwall impact)

5. 결론

국내 도시철도 차량의 표준화 사양 중 충돌안전도와 관련된 24조 2항, 25조 1항 및 2항의 타당

성을 검토하기 위하여 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 정지한 동일 차량과 5, 10, 25, 36kph로 충돌하는 시나리오에 대하여 변형, 충격 가속도 크기, 타고오름 형상을 제한하는 새로운 설계 가이드 라인을 제안하였다.
- 2) 24조 2항에서 정의된 '소성변형' 제한은 너무 엄격하므로 '압괴변형'의 제한으로 완화할 필요가 있다.
- 3) 25조 1항의 5kph 충돌은 UIC 규정 등 기존의 설계 규정과 중복되고 충돌 안전도 설계 목적에 부합하지 못하므로 최소 10kph 이상으로 상향 조정하는 것이 필요하다. 이때 차량과 승객 보호를 위하여 mechanical fuse를 설치할 필요가 있다.
- 4) 25조 2항에서는 충돌 해석 속도가 구체적으로 명시되어 있지 않으므로 구체적으로 제시할 필요가 있다. 본 연구에서는 5, 12.5, 18, 30kph 강체벽 충돌을 사용하였다.

참고문헌

1. L. T. Kisielewicz, and K. Ando(1993), "Crashworthy Rolling Stocks", PUCA'93, pp.73-81.
2. 규정서, 송달호 외 7인(1999), "고속전철의 충돌안전도 해석 기술 개발에 관한 연구보고서", 한국기계연구원.
3. 규정서, 노규석, 박성하(1999), "도시철도차량 충돌안전기준 제정에 관한 연구", 한국기계연구원
4. A. Scholes and J. H. Lewis(1993), Development of crashworthiness for railway vehicle structures, IMechE, Proc Instn Mech Engrs, Vol. 207, pp.1-16.
5. L. M. Cleon(1994), Tolerance a la collision des materials ferroviaires: optimisation de la securite passive des structures de vehicule, WCCR'94, pp.885-891.
6. E. J. Lombard(1995), Amtrak's high speed trainset program, 1995 IEEE/ASME Joint Railroad Conference, pp.1-7.
7. R. A. Smith(1995), Crashworthiness moves from art to science, Railway Gazette International, April, pp.227-230.
8. C. Oyan(1998), "Dynamic Simulation of Taipei EMU Train", Vehicle System Dynamics, Vol. 30, pp.143-167.
9. ESI(1999), "PAM-Crash Manual".