

철도안전법과 도시철도안전법을 적용한 도시형 자기부상열차의 충돌안전도 해석

이 현 철 · 구 정 서*

서울산업대학교 철도전문대학원

Crashworthiness Analysis of the Urban Maglev Vehicle according to Korean Railway Safety Law and Urban Transit Safety Law

Hyun-Cheol Lee · Jeongseo Koo*

Department of Rolling Stock System Engineering, SNUT, Seoul 139-743, Korea

(Received 27 February 2009 / Accepted 14 April 2009)

Abstract : This paper studied on the application of the crashworthiness regulations of Korean Railway Safety Law and Urban Transit Safety Law to the urban Maglev vehicle of KIMM. The Urban Maglev vehicle has to comply with the crashworthiness regulations for urban transit vehicles. The collision load cases have been simulated by using explicit finite element analysis. From the numerical results, the crashworthiness regulations of the Urban Transit Safety Law were completely satisfied, but maximum crash pulse requirement in 25 km/h crash event and no plastic deformation requirement in 10 km/h crash event in the Korean Railway Safety Law were not. If a commercial urban Maglev vehicle is developed in the near future, it is necessary that some soft buffing and energy absorbing devices are adopted in its front end so as to satisfy the crashworthiness regulations of the Korean Railway Safety Law.

Key words : Maglev(자기부상차량), Crashworthiness(충돌안전도), Safety law(안전법), Urban transit vehicle(도시철도차량), Crashworthiness regulation(충돌안전도 규정)

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

도시철도 차량은 도시교통체계 등 주변 여건으로 인하여 충돌사고의 위험이 상대적으로 높다. 최근에는 운송효율 제고를 위하여 구조의 경량화, 배차 시간 단축, 운행속도 향상 등이 지속적으로 이루어지고 있으므로, 충돌 사고에 대비한 구조설계의 중요성이 커지고 있다. 도시 철도 차량은 열차 대 열차 충돌뿐만 아니라, 건널목에서 대형 차량과 충돌하는 위험성도 상존하기 때문에 이러한 운행 여건을 감안한 충돌안전기준과 시행지침이 제정되어 시행

되고 있다.

현재 국내의 도시철도차량 충돌안전기준으로는 2000년에 제정 고시된 도시철도안전법의 도시철도 차량 안전기준 22조, 23조, 2007년에 고시된 철도안전법의 철도차량안전기준 35조의 시행지침 16조와 철도차량안전기준 36조가 있다.^{1,2)} 최근 제정된 철도차량안전기준은 도시철도차량안전기준의 미비점을 보완하고 있는데, 그 주요 내용은 2008년부터 유럽에서 모든 종류의 철도차량의 충돌안전도 표준 규정으로 적용하고 있는 EN15227과 동등하다.

이러한 최근의 국내외 법규상 환경변화를 고려하여 본 연구에서는 한국기계연구원에서 설계 및 제작되어 시운전 중인 도시형 자기부상열차를 대상으

*Corresponding author, E-mail: koojs@snut.ac.kr

로 철도차량안전기준 35조의 시행지침 16조/철도차량안전기준 36조와 도시철도차량 안전기준 22조/23조를 적용하여 충돌시물레이션을 수행하고 각 기준에 대한 평가결과를 통해 충돌안전도 설계상의 요구 조건에 대한 차이점을 비교분석하였다.

2. 국내 도시철도 충돌안전기준 분석

2.1 철도안전법의 철도차량안전기준 35조/36조

아래의 Table 1은 철도안전법의 철도차량안전기준 35조 시행지침 16조와 철도차량안전기준 36조의 주요 내용 및 판정 기준을 정리한 것이다. 철도차량 안전기준 35조 시행지침 16조의 25 km/h 열차 대 열차 충돌사고 시나리오는 R1로 정의하였고, 동 36조에서 요구하는 연결충돌 시나리오는 R2로 정의하였다. 한편 철도차량안전기준 35조 시행지침 16조에서 요구하는 상대속도 40 km/h로 15 ton 표준변형체 대형장애물과 충돌하는 사고시나리오는 건널목을 대상으로 한 것이므로 전용선로인 자기부상열차와 관련이 없고, 동 시행지침 15조의 위험도 분석에 의하여 면제받을 수 있으므로 생략하였다.

그리고 Table 1에 기술된 판정기준 중 타고오름 현상 방지 항목은 40 mm 수직 off-set 충돌에서 최소한 1윤축이 선로와 접촉하는 것을 요구하고 있지만 자기부상열차의 경우 대차가 궤도를 감싸고 있으므로 충돌시 타고오름 현상이나 탈선의 발생 가능성이 없어서 본 연구에서는 생략하였다. 또한 생존공

Table 1 Articles 35/36 of the korean railway safety law

구분	사고시나리오	판정기준
안전 기준 35조의 시행지침 16조	상대속도 25 km/h로 연결기를 통해 동일 열차와 충돌(시나리오 R1)	타고오름 방지 및 생존 공간 확보. 충돌에너지는 차량의 모든 에너지 흡수구조 및 장치에서 순차적이고 체계적으로 흡수. 승객 탑승공간의 평균충격감속도 5g, 최대 충격감속도 7.5g 이하 등 요구
	상대속도 40 km/h의 15 ton 표준변형체 대형장애물과 충돌	
안전 기준 36조	상대속도 10 km/h로 연결기를 통해 공차상태인 동일 열차와 충돌(시나리오 R2)	차체에 영구변형이 발생하지 않아야 함

간 유지 항목의 경우, 충돌시 운전실은 원래의 80% 이상 또는 0.75 m 길이와 폭 유지하여야 하고, 객실은 객실길이의 1% 이하로 변형하여야 하며, 출입문 등 승하차 구역은 원래 길이의 30% 이하의 변형 또는 300 mm 이상의 통로공간을 확보하도록 요구하고 있다.

2.2 도시철도안전법의 도시철도차량안전기준 22조/23조

다음 Table 2는 도시철도차량안전기준 22조/23조의 내용과 판정 기준을 정리한 것이다. 제 22조의 상대속도 20 km/h 열차 대 열차 충돌사고 시나리오를 U1로, 또 제 23조의 열차 연결을 위한 충돌조건은 U2로 정의하였다.

Table 2 Articles 22/23 of the urban transit safety law

구분	내용	판정기준
안전 기준 22조	상대속도 20 km/h로 연결기를 통해 동일 열차와 충돌(시나리오 U1)	차체의 끝부분과 볼스터 사이의 차체부에서 압괴 변형하면서 충돌에너지를 흡수해야 함
안전 기준 23조	상대속도 5 km/h로 연결기를 통해 공차상태인 동일 열차와 충돌(시나리오 U2)	차체에 영구변형이 발생하지 않아야 함

3. 도시형 자기부상열차의 충돌해석 모델링

3.1 도시형 자기부상열차의 재원 및 재료물성

한국기계연구원(KIMM)에서 설계/제작되어 시 운행 중인 도시형자기부상열차를 대상으로 연구를 수행하였으며, 2량 1편성인 차량 재원은 Table 3과 같다. 본 차량에 적용된 소재는 알루미늄 합금재인 AL6005이며, 기계적 물성치는 Table 4와 같다. Fig. 1은 AL6005의 응력-변형률 선도를 나타낸 것이다.

3.2 도시형 자기부상열차의 3차원 유한요소모델링

도시형 자기부상열차는 좌우 대칭의 구조이므로 Altair사의 Hypermesh를 이용하여 반쪽만을 모델링하였다.³⁾ Table 5는 2량 1편성 차량의 유한요소 모델에 사용된 요소크기, 종류, 개수를 정리한 것이며,

Table 3 Specifications of the urban Maglev vehicle

길이 [mm]	13,500	차체 전두부 끝단~차체후미
높이 [mm]	2,930	차체 최하단~최상단
폭 [mm]	2,816	
공차중량 [kg _f]	22,000	
대차중량 [kg _f]	9,000	3,000 kg _f /set×3set/량
최대승객 증량 [kg _f]	9,050	(입석정원×3배+ 좌석인원)×62 kg _f /인 [입석정원: 최대120명, 좌석인원40명]
편성	2량 1편성	

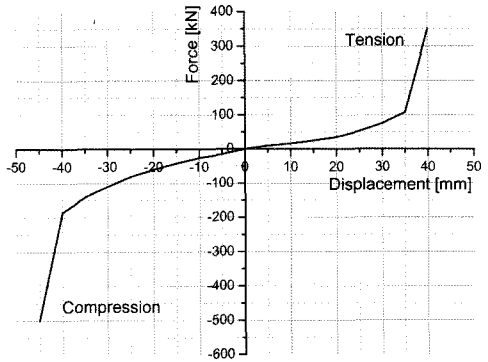


Fig. 3 Force and deformation curve of couplers

끝단에 적용된 연결기의 하중-변형 특성을 나타낸 것이다. 본 2량 1편성 열차의 경우 총 4개의 연결기가 사용되며 두 차량 사이에는 2개의 연결기가 직렬로 연결된다.

Table 4 Mechanical properties of AL6005

적용 재료	밀도 [kg/mm ³]	탄성계수 [kg _f /mm ²]	포아송 비	항복응력 [kg _f /mm ²]
AL6005-T6	2.7E-06	7000	0.29	21.9

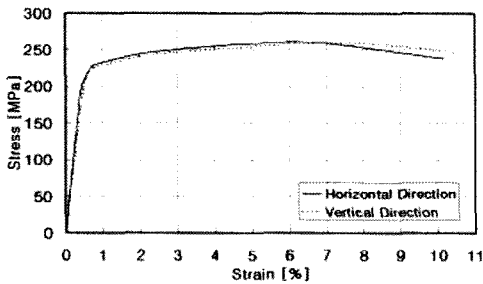


Fig. 1 Strain - stress curve of the AL 6005-T6

Table 5 Finite element model of the Maglev vehicle

평균요소길이 [mm]	35	
절점개수 [EA]	163,655	
요소개수 [EA]	1차원요소	8
	헬요소	195,668
	솔리드요소	3,508

Fig. 2는 편성열차의 형상을 나타낸 것이다.

Fig. 3은 도시형자기부상열차의 개별 차량의 양

3.3 도시형 자기부상열차의 1차원 충돌해석 모델링

도시형 자기부상열차를 1차원 충돌동역학 해석을 하기 위하여 Fig. 4와 같이 전두부(Section A), 출입문(Section B/D), 중앙부(Section C), 차체 후미 부분(Section E)의 다섯 구간으로 나누어서 Fig. 5 ~ Fig. 9와 같이 각 구간의 하중-변형 특성곡선을 구하였다. 여기서 각 구간별 하중-변형 특성곡선은 정의된 구간에서 압괴변형이 잘 표현될 수 있도록 100 ton의 강체를 100kph의 속도로 충돌시켜 각각의 변형 속도효과를 무시하여 충돌속도의 영향이 없도록 재료의 모델을 적용했다.

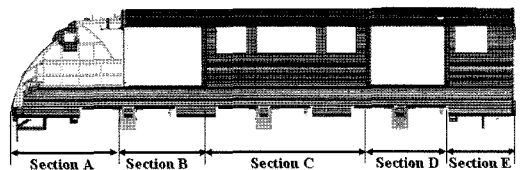


Fig. 4 Definition of the carbody sections



Fig. 2 The complete urban Maglev train model

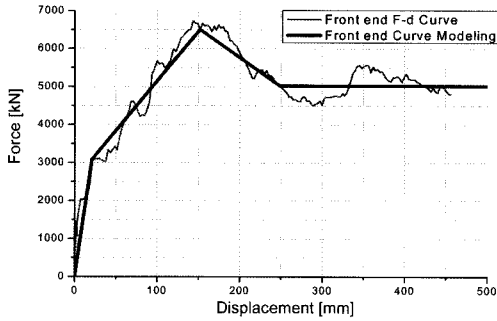


Fig. 5 F-δ curve model of the front end (section A)

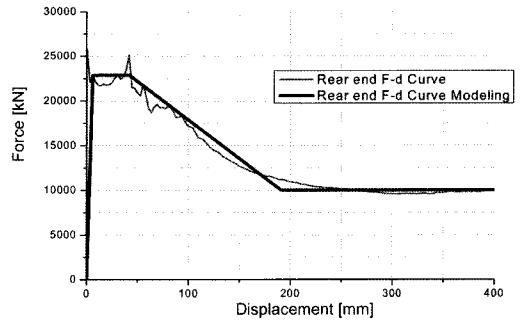


Fig. 9 F-δ curve model of the rear end (section E)

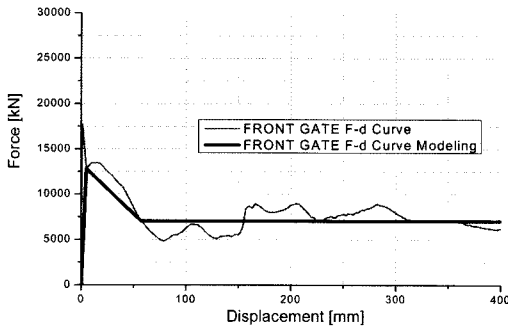


Fig. 6 F-δ curve model of the front gate (section B)

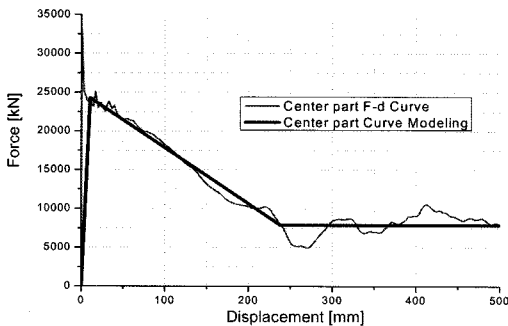


Fig. 7 F-δ curve model of the center part (section C)

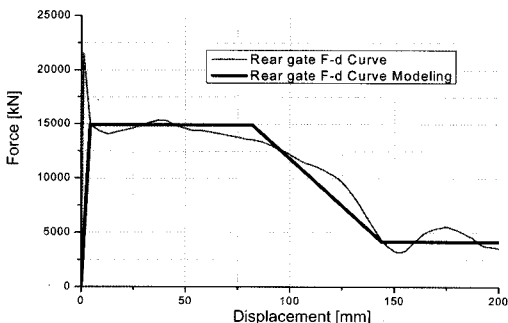


Fig. 8 F-δ curve model of the rear gate (section D)

Fig. 10은 철도차량안전기준 35조 시행지침 16조에서 정상 운행상태의 질량 23,240kg [(공차질량(22,000kg)+착석승객질량(40명×62kg=2,480kg)의 절반)을 차량의 다섯 구간에서 길이별로 질량을 나눈 분포질량 값과 각 구간의 하중-변형 특성곡선을 고려하여 구성한 1차원 충돌동역학 모델이다.^{4,6)}

Fig. 10에서 흰색 동그라미는 차량을 구간으로 나눈 부분을 나타내며, 검은색 동그라미는 차량에서 대차가 연결된 부분, 100단위의 숫자는 절점, 1000단위의 숫자는 절점과 절점을 연결하여 만든 막대요소를 나타낸 것이다.

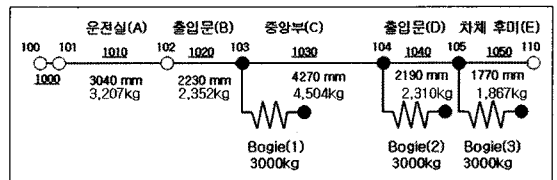


Fig. 10 One-dimensional dynamic model of the Maglev vehicle

4. 충돌사고 시나리오에 따른 충돌해석

충돌사고 시나리오는 Table 1에서 언급한 철도차량안전기준 35조 시행지침 16조와 동 기준 36조의 충돌기준을 각각 시나리오 R1과 R2로 정의하고, Table 2의 도시철도차량안전기준 22조/23조의 충돌기준을 U1과 U2로 정의하였다.^{1,2)}

4.1 충돌사고 시나리오 R1에 의한 충돌해석

철도차량안전기준 35조 시행지침 16조의 동일 열차와 상대속도 25 km/h로 충돌하는 사고 시나리오

R1은 강체 고정벽에 12.5 km/h (3.47m/s)로 충돌하는 것과 동일하므로 자기부상열차 2량 1편성을 고정벽에 충돌시켜 해석하였으며, 충돌해석 소프트웨어는 LSTC사의 LS-Dyna를 사용하였다.⁷⁾

Fig. 11은 강체 고정벽 충돌 후 차량의 에너지 변화량을 나타낸 것인데 이때 전체 에너지의 변화량은 수치해석 오차의 척도로 사용된다. 수치해석 중 전체 에너지 변화량이 3.46%로 일반적으로 수용되는 5%이하의 수준이었다. 한편 이론적으로 초기 운동 에너지를 계산하면 식 (1)과 같다.

$$E = \frac{1}{2} m_i v^2 = \frac{1}{2} \times 46,480 \times 3.47^2 = 280.18 kJ \quad (1)$$

여기서 2량 1편성의 질량(m_i)은 공차질량(22,000kg)에 착석인원(40명×62kg=2,480kg)의 절반을 합한 질량의 2배인 46,480kg이다. 수치해석으로 구한 초기 운동에너지 279.82 kJ과 식 (1)의 이론값은 0.13% 이내로 잘 일치하고 있다.

Fig. 12는 3차원 쉘 모델 충돌해석 시 차체에 작용되는 충격력을 나타낸 것으로 최대 충격력은 3,351 kN이었다. Fig. 13은 차체의 변형을 분석하기 위하여 Fig. 4의 차체를 전두부 부분(A), 여객 탑승부분(BCD), 후미부분(E)으로 나누고 각 부분의 변형량을 구한 것이다. 충돌시 차체의 전두부 부분(A)은 최대 39.02 mm 변형하였고, 여객탑승부분(BCD)은 최대 9.0 mm 변형하였다. 또 후미부분(E)에서는 최대 7.52 mm 변형하였다. 여기서 생존공간유지 판정기준은 여객탑승부분(BCD)의 전체길이 7,240 mm 대비 1% 미만으로 변형(72.4mm 미만)해야 하는 조건

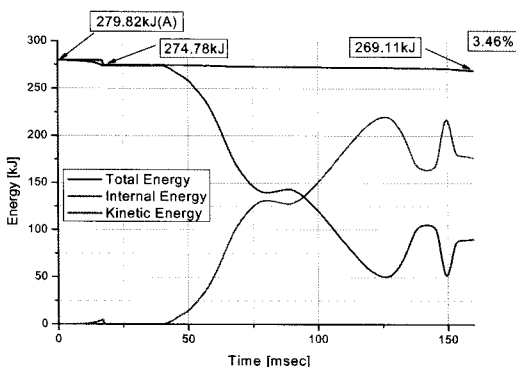


Fig. 11 Energy curves by the scenario R1

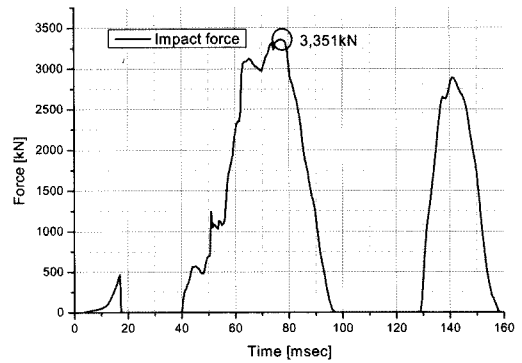


Fig. 12 Impact force on the carbody by the scenario R1

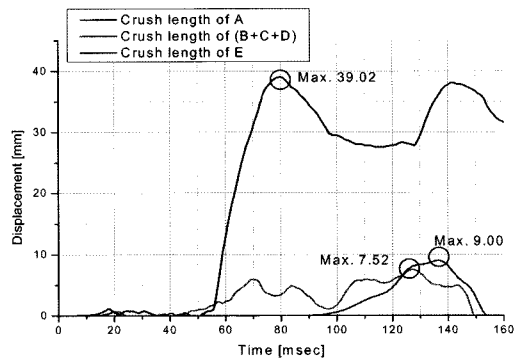


Fig. 13 Crush lengths of the carbody sections by the scenario R1

인데, 여객탑승부분(BCD)의 변형량이 최대 9.0 mm 이므로 철도차량안전기준 35조의 시행지침16조 요구조건을 만족한다.

Fig. 14에 나타낸 충돌해석결과를 보면 운전실의 높이방향 최대 변형량은 34.77mm이고 폭 방향의

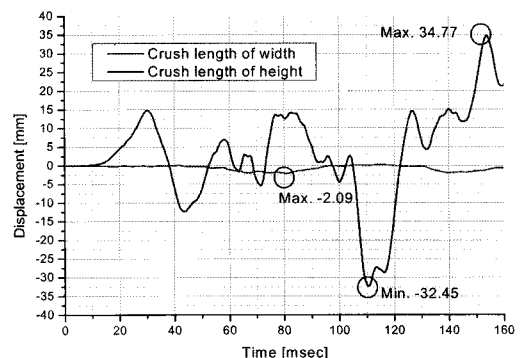
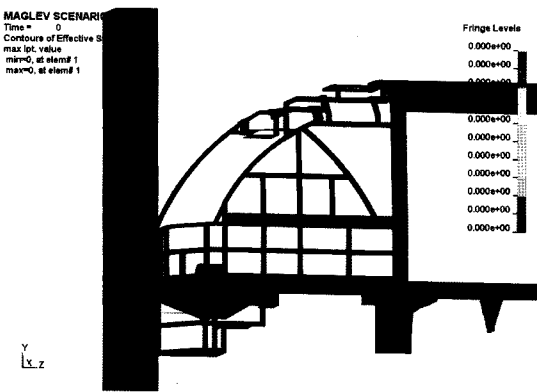


Fig. 14 Deformations of the driver's cabin by the scenario R1

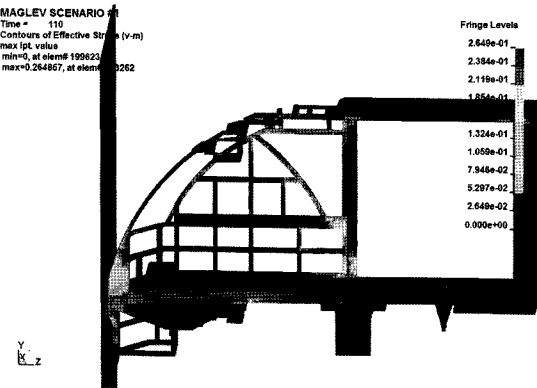
최대 변형량은 2.09 mm이다. 이것은 운전실 폭 2,700 mm에 대하여 운전자 최소 생존 공간인 0.75 m 유지(1950 mm 이하 변형) 또는 운전실 폭 2,700 mm의 80% 이상을 유지(540 mm 이하 변형)해야 하는 조건과 운전실 높이 1,800 mm의 80% 이상을 유지(360 mm 이하 변형)해야 하는 철도차량안전기준 35 조의 시행지침16조 요구조건을 만족한다.

Fig. 15(a)는 시나리오 R1으로 충돌하기 전의 차량 모습이며, Fig. 14(b)는 충돌후 110ms에서 변형 형상을 나타낸 것이다. 여기서 차체 구조물에 압괴 변형이 진행되는 동안 위험요인이 될 수 있는 형태의 침투나 변형현상이 발생하지 않았다.

Fig. 16~Fig. 26은 3.1절의 1차원 충돌동역학해석으로 구한 결과이다. Fig. 16은 차체에 발생하는 충격력 곡선이며, 최대 충격력은 4,470 kN이었다. 이



(a) Before collision



(b) 110ms after collision

Fig. 15 Deformation and von Mises stress by the scenario R1

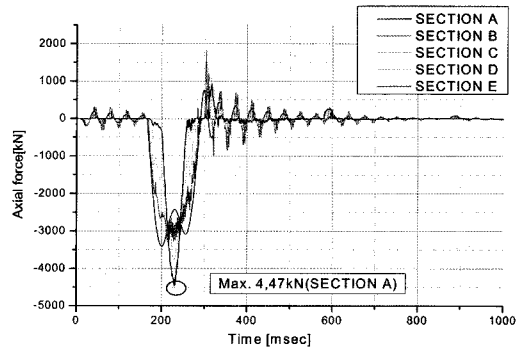


Fig. 16 Axial forces by the scenario R1

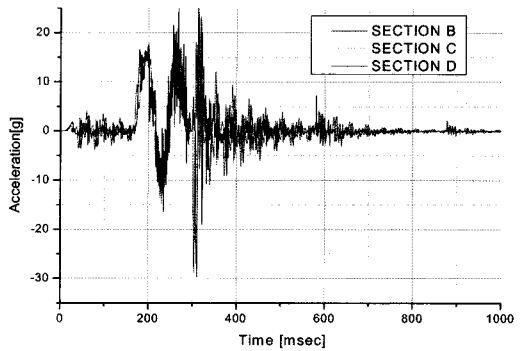


Fig. 17 Axial acceleration by the scenario R1

값은 Fig. 5에서 선형화된 값을 사용하였으므로 3차원 셸모델 충돌해석에서 구한 3351 kN보다 높게 나왔다. Fig. 17은 충돌 후 승객의 2차 충돌안전성 평가 척도인 충돌가속도를 나타내는 것인데, Fig. 4의 승객 탑승부 앞뒤 출입문(Section B, D)과 중앙부(Section C) 충돌가속도 값으로 데이터 필터링을 하지 않은 것이다.

그런데 Fig. 17의 가속도 데이터에는 가속도 응답 중 승객의 거동에 영향을 주는 강체운동 주파수 이외의 고주파성분이 포함되어 있어서 승객안전에 영향을 미치는 가속도 평가가 불가능하다. 일반철도 차량의 경우, 미국은 자동차 평가용 기준인 SAE 60Hz low pass 필터를 기본으로 적용하고 있고,⁸⁾ EU는 Fourier 40 Hz low pass 필터를 기본으로 사용하고 있지만, 국내에서는 철도차량에 대한 필터링 방법이 규정되어 있지 않다.⁹⁾

따라서 본 자기부상열차에 적합한 주파수 필터링 방법을 식별하여 가속도 데이터를 평가해야 하는

데, 미국의 자동차 평가용 SAE 60Hz 필터링 방법과 EU의 Furier 40Hz low pass 필터링 방법을 기본으로 하고 cut-off 주파수를 변경 적용하여 두 방법을 비교하였다.

동역학적 이론에 근거하면 해당 절점의 변위와 속도가 가속도 데이터를 1차례 및 2차례 적분한 결과와 얼마나 잘 일치하는지를 검증함으로써 필터링의 유효성을 평가할 수 있다.

Fig. 18은 Fig. 17에서 제일 높은 값이 나온 Section D부분의 가속도 데이터를 SAE 60Hz를 기본으로 하여 40, 50, 80, 100, 180, 600 Hz 등으로 low pass 필터링한 것이다. Fig. 19는 가속도 데이터를 필터링 한 후 2차례 적분한 것이며, Fig. 20은 Fig. 19의 원 표시 부분을 확대한 것이다. Fig. 20의 결과로부터 SAE 60 Hz 필터링한 가속도를 2차례 적분한 변위는 해당절점 변위와 잘 일치(0.014%이내) 하였다.

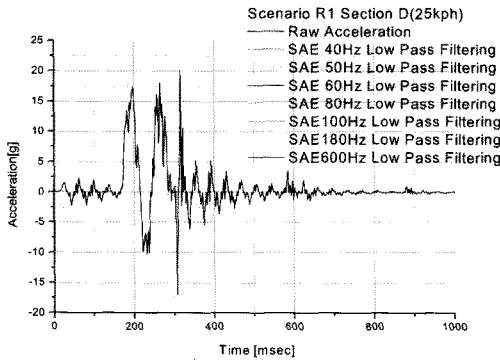


Fig. 18 Accelerations filtered for various cut-off frequencies (Section D)

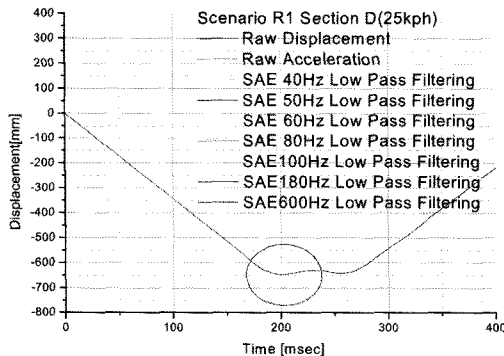


Fig. 19 Double integrations of filtered accelerations (Section D)

한편 Fig. 21은 Section D부분의 가속도 데이터에 대상으로 Furier 40Hz를 기본으로 50, 60, 80, 100, 180, 600Hz까지 low pass 필터링을 한 것이다. Fig. 22는 가속도 데이터를 필터링 한 후 2차례 적분한 것이며, Fig. 23은 Fig. 22의 원 표시 부분을 확대한 모습이다.

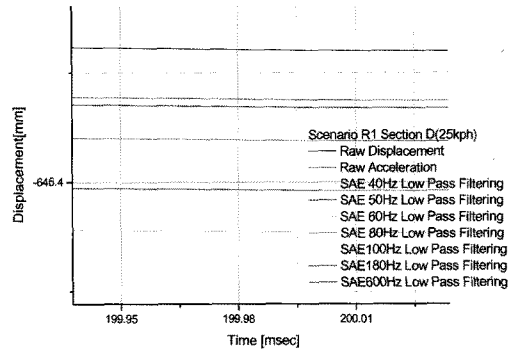


Fig. 20 Details of the integrated displacements

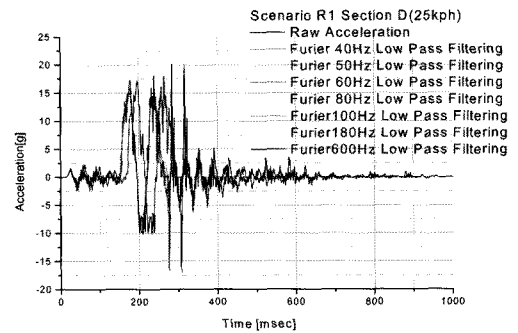


Fig. 21 Accelerations filtered for various cut-off frequencies (Section D)

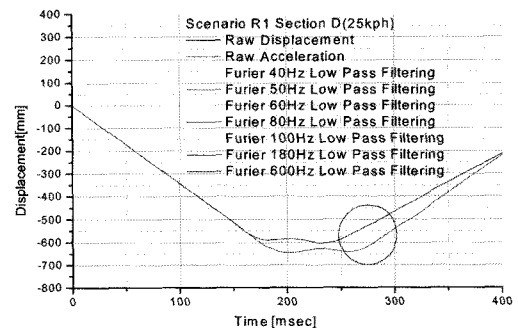


Fig. 22 Double integrations of filtered accelerations (Section D)

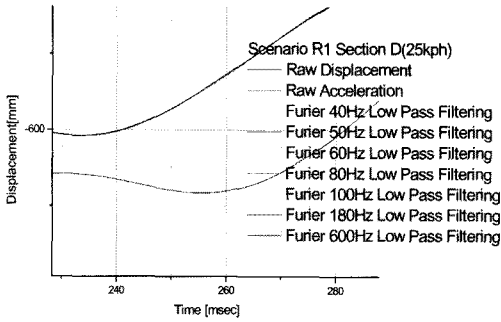


Fig. 23 Details of the integrated displacements

Fig. 23에서 선택된 모든 cut-off 주파수에서 필터링한 가속도를 2차례 적분한 변위는 해당절점 변위와 잘 일치하지 못하였다(9.6% 오차).

미국의 자동차 평가용 SAE 60 Hz의 평가 값과 EU의 철도차량 기준의 Fourier 40 Hz low pass 필터링을 비교한 결과, 미국의 자동차 평가용 SAE 60 Hz의 필터링값이 2차례 적분한 해당절점변위에 0.014% 오차로 가장 잘 일치를 하였다.

Fig. 24는 미국의 SAE60과 유럽의 Fourier 40으로 필터링하여 구한 가속도 값을 비교한 것인데, 최대 가속도 값이 각각 17.38g, 15.74g로 10.45% 차이가 발생하였다.

따라서 미국의 자동차 평가용 SAE 60 Hz의 필터링을 이용하여 Section C부분의 최대 충돌가속도 19.17g를 구하였다. Fig. 25는 SAE 60 Hz low pass 필터링한 충돌가속도이다.

이것은 철도차량안전기준 시행지침 16조의 평가 기준인 최대 충격가속도 7.5 g를 초과하는 것이고,

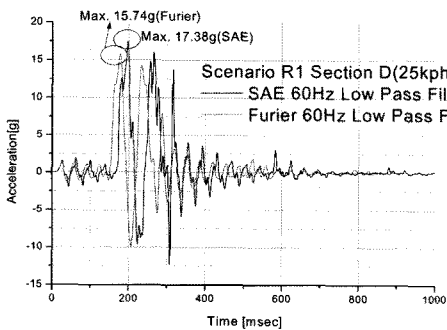


Fig. 24 Comparison of the acceleration data filtered by SAE60 and Fourier 40

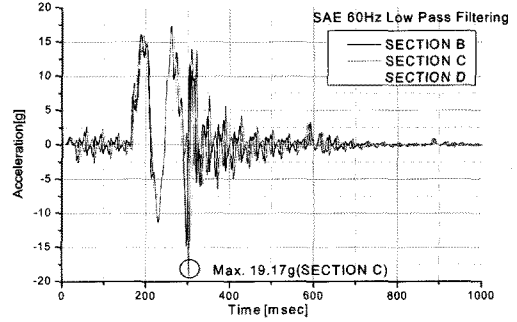


Fig. 25 Axial acceleration by the scenario R1 (SAE 60Hz)

평균 충돌가속도도 10.49g로 평균 충격가속도 평가 기준인 5 g를 초과하였다. 따라서 시행지침 16조의 충돌가속도조건을 만족하지 못하였다.

4.2 충돌사고 시나리오 R2에 의한 연결충돌 해석

철도차량안전기준 36조에서 요구하는 차량의 연결충돌은 상대속도 10 km/h로 연결기를 통해 공차 상태인 동일열차와 충돌하는 조건이며, 본 해석에서는 강제 고정벽에 5 km/h (1.38 m/s)로 충돌 조건으로 해석하였다.

Fig. 26은 3차원 셀모델 충돌해석 후 전체 에너지의 변화량인데, 1.78%로 일반적으로 수용되는 5% 이하의 수준이다. 또한 차량의 초기 운동 에너지는 공차질량이 22,000kg인 2량 1편성의 총질량 44,000 kg (m_i)를 적용하여 식 (2)와 같이 구해진다.

$$E = \frac{1}{2} m_i v^2 = \frac{1}{2} \times 44,000 \times 1.38^2 = 41.9 kJ \quad (2)$$

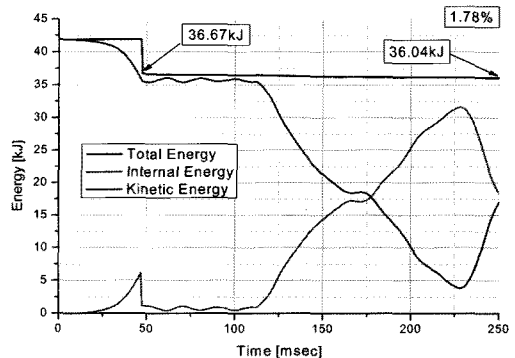


Fig. 26 Energy curves by the scenario R2

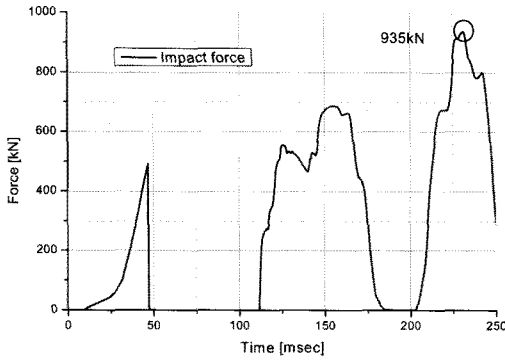


Fig. 27 Impact force on the carbody by the scenario R2

이 값은 수치해석으로 구한 초기 운동에너지 41.89 kJ과 0.02% 이내로 잘 일치하였다.

충돌시 차체에 작용하는 최대 충격력은 Fig. 27에 나타내었다. 충돌시나리오 R2에서는 상대속도 10 km/h 충돌시 최대 충격력 935 kN이 발생하였다. 도시형 자기부상열차에 적용된 연결기 용량인 500 kN을 초과하여 차량에 영구변형이 발생한다. 또 150 ms에서 구해진 최대 응력 값 (Von-Mises)이 264 MPa ($26.92 \text{ kg}_f/\text{mm}^2$)로 AL6005의 항복응력 215 MPa ($21.9 \text{ kg}_f/\text{mm}^2$)를 초과하였으며, 충돌시 차체에 항복을 초과하는 응력이 발생하지 않아야 하는 조건을 만족하지 못하였다. 이를 만족시키려면 충돌에너지에 항복응력 이하에서 흡수할 수 있도록 연성인 대용량 연결기를 채용하여야 한다.

4.3 충돌사고 시나리오 U1에 의한 충돌해석

도시철도차량 안전기준 22조에서 요구하는 동일 열차와 상대속도 20 km/h로 연결 충돌하는 사고 시나리오 U1은 강제 고정벽에 10 km/h (2.78 m/s)로 충돌하는 조건으로 해석하였다.

Fig. 28은 3차원 쉘모델 충돌해석 후 전체 에너지 변화량을 나타낸 것인데 1.72% 수준으로 잘 수렴되고 있다. 또 초기 운동에너지는 식(3)과 같이 추정할 수 있으며, 2량 1편성의 질량(m_t)은 공차질량 (22,000kg) 값의 2배인 44,000 kg으로 정의하였다.

$$E = \frac{1}{2} m_t v^2 = \frac{1}{2} \times 44,000 \times 2.78^2 = 169.75 \text{ kJ} \quad (3)$$

Fig. 28에서 수치적으로 구한 초기 운동에너지

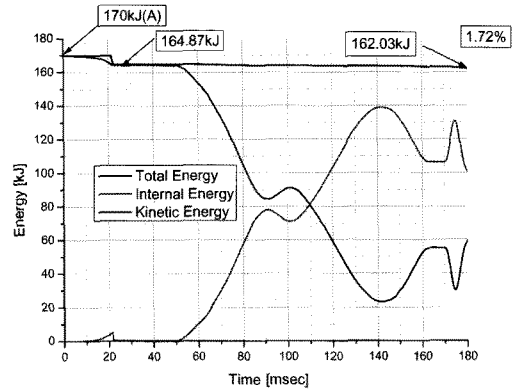


Fig. 28 Energy curves by the scenario U1

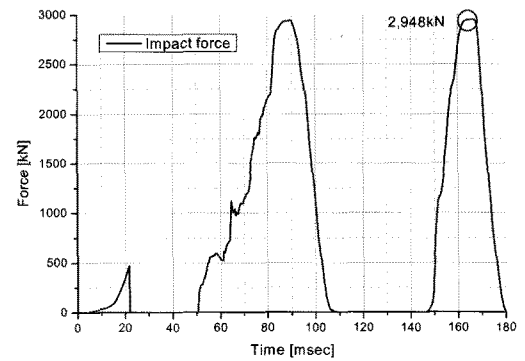


Fig. 29 Impact force on the carbody by the scenario U1

는 170 kJ이므로 식 (3)의 이론적 예측 값과 0.15% 차이로 잘 일치한다. 또한 충돌시 차체에 작용하는 최대 충격력은 Fig. 29에 나타난 바와 같이 2,948 kN이었다.

Fig. 30은 Fig. 4에서 정의된 각 구간에 발생하는 변형량을 나타 낸 것이다. 충돌시 차체의 전두부 끝단부터 첫 번째 대차구간으로 정의된 전두부구간(A)에서 최대 23.03 mm 변형하면서 충돌에너지를 흡수하였고, 여객탑승영역인 구간(BCD)에서는 최대 6.61 mm 변형하였다. 그러나 후미구간(E)에서는 6.26 mm가 변형하였다. 여기서 여객탑승구간(BCD)의 최대 변형량인 6.61 mm는 해당구간 길이 7,240 mm 대비 1% 미만이므로 승객의 안전에 영향을 미치지 않는 수준이고, 대부분의 변형이 전두부에서 먼저 발생하였다.

또한 Fig. 31과 같이 차체 구조물에 압기가 진행 되는 동안 위험요인이 될 수 있는 형태의 침투와 변

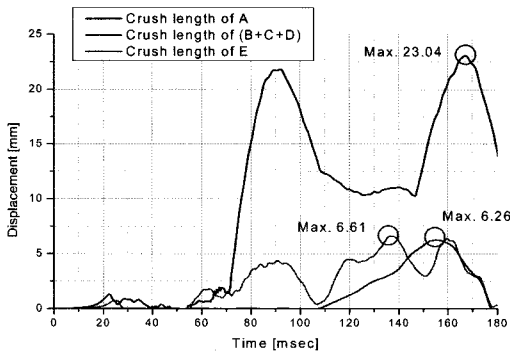
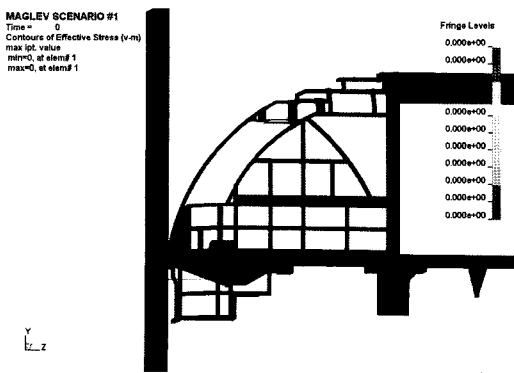
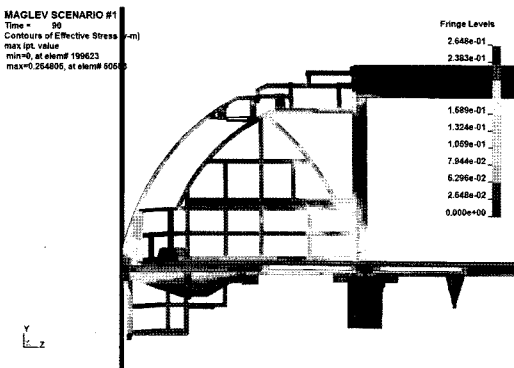


Fig. 30 Crush lengths of the carbody sections by the scenario U1



(a) Before collision



(b) 90ms after collision

Fig. 31 Deformation and von Mises stress after collision by the scenario U1

형형상이 발생하지 않았다. 따라서 도시철도차량안전기준 제 22조의 요구조건을 만족한다.

4.4 충돌사고 시나리오 U2에 의한 충돌해석

도시철도차량안전기준 23조에서 요구하는 공차 상태의 열차와 상대속도 5 km/h로 연결 충돌하는 시나리오 U2는 강제 고정벽과 2.5 km/h (0.69 m/s)로 충돌하는 조건으로 해석하였다.

Fig. 32에서 충돌후 전체 에너지 변화량은 0.09% 이하로 수렴된 결과를 나타내었다. 또 차량의 초기 운동 에너지는 공차질량이 22,000 kg인 2량 1편성의 총질량 44,000 kg (m_t)를 적용하여 식 (4)와 같이 구해진다.

$$E = \frac{1}{2} m_t v^2 = \frac{1}{2} \times 44,000 \times 0.69^2 = 10.6 \text{ kJ} \quad (4)$$

Fig. 32에서 수치적으로 구해진 초기 운동에너지는 10.47kJ로서 식 (4)의 이론적 예측값과 1.22% 차이로 일치하였다.

충돌시 연결기에 작용하는 최대 충격력은 Fig. 33에 나타난 바와 같이 392 kN으로 도시형 자기부상 열차에 적용된 연결기용량 500 kN을 초과하지 않았다

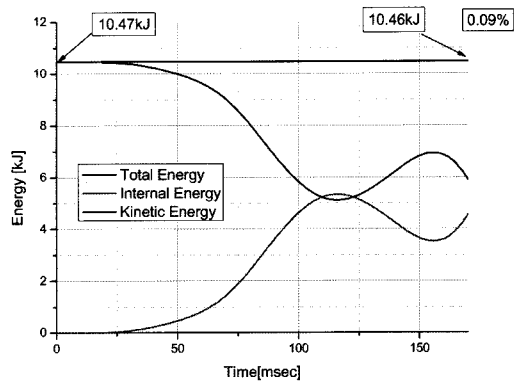


Fig. 32 Energy curves by the scenario U2

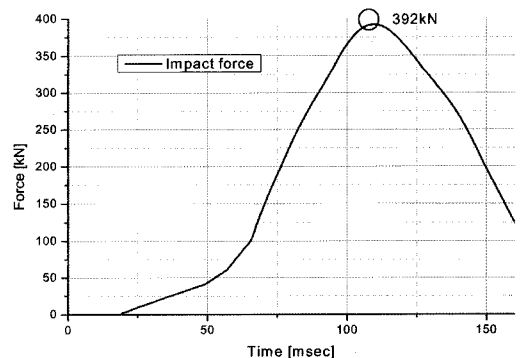
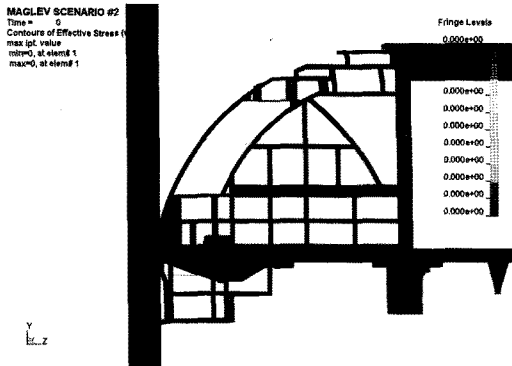
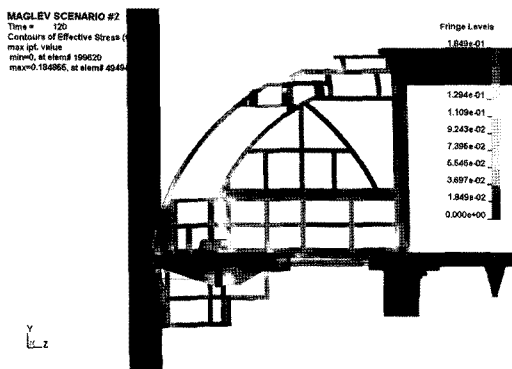


Fig. 33 Impact force at the coupler by the scenario U2



(a) Before collision



(b) 120ms after collision

Fig. 34 Deformation and von Mises stress by the scenario U2

다. 또 3차원 쉘 모델 충돌해석 후 120 ms에서 구해진 Fig. 34의 최대 응력 값(Von-Mises)은 184 MPa ($18.76 \text{ kg}_f/\text{mm}^2$)로 AL6005의 항복응력 215 MPa ($21.9 \text{ kg}_f/\text{mm}^2$) 이하 이었다. 따라서 도시철도차량 안전기준 제23조의 요구조건을 만족한다.

4.5 철도차량안전기준과 도시철도안전기준에 의한 해석결과 비교

Table 6은 국내 도시형자기부상열차에 철도차량 안전기준을 적용한 충돌해석결과이며, Table 7은 도시철도차량안전기준을 적용한 결과이다.

철도차량안전기준의 경우 순차적 변형조건만 만족하고 충격가속도조건(제 35조)과 연결충돌조건(제 36조)은 만족하지 못하였다. 그러나 도시철도차량안전기준의 경우는 충돌변형조건(제22조)과 연결충돌조건(제23조)을 모두 만족시켰다.¹⁾

따라서 철도차량안전기준 제 35조 및 36조를 만족시키려면 연결기 완충성능을 제고하고 연결기 후방에 별도의 보조 에너지흡수 장치를 채용할 필요가 있다.²⁾

5. 결론

본 연구에서는 국내 시운전 도시형자기부상열차를 대상으로 철도차량안전기준 35조(시행지침 16조) 및 36조, 도시철도차량 안전기준 22조 및 23조에 제시되어 있는 4가지 충돌조건에 대하여 충돌해석을 수행하여 다음과 같은 결론은 얻었다.

첫째, 본 도시형 자기부상열차는 도시철도차량 안전기준 22/23조를 모두 만족하였다.

둘째, 본 도시형 자기부상열차는 철도안전법의 철도차량안전기준 35조(시행지침 16조)에 의거한 충돌해석결과는 생존공간 확보와 충돌변형부 제한 조건들은 만족하였지만, 승객의 2차 충돌안전 평가 기준인 충돌가속도 조건은 만족시키지 못하였다.

Table 6 Crashworthiness by the Korean Railway Safety Regulation

		철도차량안전기준		
		기준 35조 (시행지침 16조)	기준 36조	수치 해석 모델
		정면충돌사고 (시나리오R1)	연결충돌안전성 (시나리오R2)	
충돌속도(km/h)		25	10	
최대충격력(kN)		3,351	935	3D
생존 공간	운전실 변형량 (mm)	높이 34.77 폭 2.09 (O)	평가 기준 없음	3D
	승객탑승부 변형량 (mm)	7.52 (O)		3D
충돌 변형부 제한조건		순차적 압괴 변형(O)	차체 변형 발생 (X)	3D
최대 응력 (MPa) (215MPa 이하)		평가기준 없음	264 (X)	3D
변형 및 충격력 종합 평가		만족	불만족	
충돌가 속도	평균 (5g)	10.49 (X)	평가 기준 없음	1D
	최대 (7.5g)	19.17 (X)		1D
충격가속도 종합평가		불만족	해당 없음	

Table 7 Crashworthiness by the Urban Transit Safety Regulation

		도시철도차량안전기준		
		기준 22조	기준 23조	수치 해석 모델
		정면충돌사고 (시나리오U1)	연결충돌안전성 (시나리오U2)	
충돌속도(km/h)		20	5	
최대충격력(kN)		2,948	392	3D
생존 공간	운전실 변형량 (mm)	평가 기준 없음	평가 기준 없음	3D
	승객 탑승부 변형량 (mm)	평가 기준 없음		3D
충돌 변형부 제한조건		순차적 압괴 변형 (O)	차체 영구 변형 없음 (O)	3D
최대 응력 (MPa) (215MPa 이하)		평가 기준 없음	184 (O)	3D
변형 및 충격력 종합 평가		만족	만족	
충돌가속도		평가 기준 없음	평가 기준 없음	
충격가속도 종합 평가		해당 없음	해당 없음	

* 평가기준 만족 여부 O: 만족, X: 불만족

이 때 도시형 자기부상열차의 충격가속도 필터링에 SAE 60 Hz low pass 필터링이 적합하였다.

셋째, 본 도시형 자기부상열차는 철도안전법의 철도차량안전기준 36조에 의거한 충돌해석에서 본 차량에 장착된 연결기의 용량을 초과하는 충격력이 발생하였고, 이로 인해 항복을 초과하는 응력이 차체에 발생하여 철도차량안전기준 36조에 만족하지 못하였다.

따라서 국내 시운전 도시형 자기부상열차는 철도안전법의 철도차량안전기준에서 요구하는 충돌가속도 조건을 만족시키기 위하여 연성인 대용량 전두 연결완충기와 에너지 흡수 튜브 등과 같은 보조적인 충격 완화 장치의 적용이 필요하다.

후 기

본 연구는 국토해양부에서 지원하고 한국철도기술연구원에서 진행 중인 철도종합안전기술개발사업(No. SR06008)의 연구결과를 응용한 것으로서 도움을 주신 관계자들에 감사드립니다.

References

- 1) Regulations on the Railway Safety Criterion of Urban Rolling Stock, MOCT Ordinance 413, 2004.
- 2) Regulations on the Railway Safety Criterion of Rolling Stock, MOCT Ordinance 455, 2007.
- 3) Altair, Altair Hypermesh User's Manual Versio 7.0.
- 4) H. J. Cho, J. S. Koo and Y. H. Youn, "An Evaluation of Crashworthiness on the KHST using 1D Collision Dynamics," 2002 Autumn Conference of the Korean Society for Railway, pp.47-53, 2002.
- 5) J.-S. Koo, D.-S. Kim, H.-J. Cho, T.-S. Kwon and S.-K. Choi, "Analysis on the Crashworthiness of the Full Rake Korean Electric Multiple Unit Train," The Korean Society for Railway, Vol.3, No.1, pp.27-33, 2000.
- 6) L. T. Kisielewicz and Ando, "Crashworthy Rolling Stocks," PUCA'93, pp.27-33, 1993.
- 7) LSTC, LS-DYNA Keyword User's Manual Version 970.
- 8) K. Jacobsen and D. Tyrell, "Rail Car Impact Test with Steel Coil : Collision Dynamics," ASME RTD 2003-1655, pp.73-82, 2003.
- 9) R. A. MacNeill and S. W. Kirkpatrick, "Vehicle Postmortem and Data Analysis of a Passenger Rail Car Collision Test," The 2002 ASME/IEEE Joint Rail Conference, pp.1-8, 2002.