

충돌 후 열차의 차체 가속도 평가 기법 연구

A Study on the Techniques to Evaluate Carbody Accelerations after a Train Collision

김 준 우* · 구 정 서†

Joon-Woo Kim and Jeong-Seo Koo

(2010년 2월 19일 접수 ; 2010년 4월 13일 심사완료)

Key Words : High-speed EMU(동력분산형 고속전철), Collision Acceleration(충돌가속도), Rolling Stock Safety Regulation(철도차량안전규정), Collision Dynamics(충돌동역학)

ABSTRACT

In this study, we suggested several approaches to evaluate the collision acceleration of a carbody under the article 16 of the Korean rolling stock safety regulations. There are various methods to evaluate the rigid body accelerations such as the displacement comparison method by double integration of filtered acceleration data, the velocity comparison method by direct integration of filtered acceleration data, and the analysis method of a velocity-time curve. We compared these methods one another using the 1D dynamic simulation model of Korean high-speed EMU composed of nonlinear springs or bars, dampers, and masses. From the simulation results, the velocity-time curve analysis method and the displacement comparison method are recommended to filter high frequency oscillations and evaluate the maximum and average accelerations of a carbody after a train collision.

1. 서 론

자동차 산업의 경우, 1970년대부터 충돌안전도 연구가 활발히 진행되어 다양한 종류의 안전규제가 법제화되어 있다. 대부분의 법규는 탑승자 상해치를 기준으로 성능을 평가하고 있으며, 근래에는 법규만족 여부보다는 안전 품질관점에서 시장을 지배하는 중요한 요소가 되었다. 반면 철도차량의 경우, 1999년 미국 49CFR에서 고속열차에 대한 충돌안전도 규정 도입 이후⁽¹⁾, EU에서는 2002년 TSI 규정에서 고속열차에 대하여, 2008년 EN15227에서 모든 철도차

량에 대하여 충돌안전도 설계를 요구하고 있다^(2,3). 그러나 철도여객의 특성 상 표준화된 상해치 규정을 제정하기 어려우므로 현재까지 충돌시 차체의 강체운동 가속도 크기를 제한하고 있다.

국내 철도차량은 2007년 7월 국토해양부에서 고시한 철도안전법의 철도차량안전기준 시행지침 제 16조 '철도차량의 표준충돌사고각분'에 근거하여 반드시 각 항목별 충돌안전도 성능을 평가하여야 한다^(4,5). 해당 규정의 항목별 충돌안전도 성능 중 충돌가속도는 승객 탑승부에서 최대 7.5g, 평균 5g 이하의 강체운동 가속도를 가져야 한다.

간단하게 열차의 충돌가속도를 평가하는 방법은 비선형 1차원 스프링-댐퍼-질량으로 이루어진 충돌동역학 모델 해석이며, 이 방법은 각 차체별 에너지 흡수 특성을 반영하여 전체편성차량을 쉽게 충돌해석 할 수 있으므로 설계단계에서 충돌가속도를 평

† 교신저자 ; 정회원, 서울산업대학교 철도전문대학원
E-mail : koojs@snut.ac.kr

Tel : (02)970-6878, Fax : (02)978-6878

* 정회원, 서울산업대학교 철도전문대학원

가하는 방법으로 널리 사용된다⁽⁶⁻⁹⁾.

수치해석 결과로 나온 충돌가속도 데이터에는 충돌 후 질점의 진동과 수치오차 등으로 인하여 불필요한 고주파(high frequency)성분과 노이즈(noise)성분이 포함되어⁽¹⁰⁾ 있어서 승객 거동에 영향을 주는 강제 운동 주파수에 해당하는 가속도 수준을 정확히 평가하기 어렵다. 따라서 규정에 나타난 충돌가속도 수준을 평가하기 위하여 수치해석 결과로 구한 데이터를 적절히 필터링 하거나 후처리 하는 방법이 필요하다. 그러나 철도안전법의 철도차량안전기준 시행지침 제16조에는 열차의 충돌가속도 후처리 방법이 구체적으로 제시되어 있지 않아서 고주파 성분에 의한 데이터 왜곡을 체계적으로 분석해 내는 방법이 필요하다.

이 연구에서는 동력분산형 차세대고속전철차량의 1차원 충돌동역학 모델을 이용하여 차체 강제운동의 충돌가속도 크기를 평가하는 몇 가지 방법을 제시/분석하고 가속도 필터링 기법을 제안하여 국내 고속철도차량에 적합한 철도차량안전기준 시행지침 제16조의 충돌가속도를 평가하는 방법을 제시한다.

2. 충돌동역학 모델개요 및 충돌해석

이 연구의 수치 시뮬레이션에 사용된 동력분산형 차세대고속열차는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 2TC-6M 편성이며, 축중은 13 ton이다.

2.1 충돌동역학 모델개요

Fig. 2는 Fig. 1의 TC차량과 M차량에 대한 스프링-질량의 1차원 충돌동역학 모델의 개념도를 나타낸 것이다. Fig. 2에서 흰 원은 비선형 막대요소를 정의하는 절점이며, 검은 원은 대차의 집중질량인 부가된 비선형 스프링 절점이다. 이 연구의 모델은 개념설계 모델이므로 동력집중식 한국형고속열차의 알루미늄 압출 차체와 대차의 자료를 원용하여 비선형 막대요소와 비선형 스프링의 하중-변형특성을 정의하였다⁽⁹⁾.

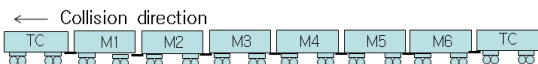


Fig. 1 The full rake consist for Korean High-speed EMU (TC : train control car, M : motor car)

Fig. 3은 에너지흡수식 커플러, 헤드스톡, 하니콤으로 구성된 전두부 에너지 흡수구조의 개요이며, Fig. 4는 충돌시 각 부품들이 흡수하는 전두부의 하중-변형 선도이다. Fig. 4에서 커플러와 에너지흡수 튜브는 750 mm의 변형에서 1800 kN의 압괴 강도를 갖도록 설계되었으며, 헤드스톡은 1100 mm에서 2500 kN과 하니콤은 1200 mm에서 4000 kN의 압괴 강도를 갖도록 설계되었다.

충돌 시나리오는 국내 철도차량안전기준 시행지침 16조의 표준충돌 시나리오인 상대속도 36 kph

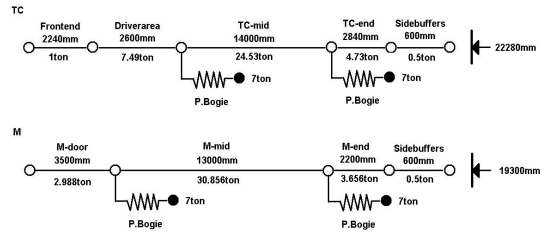


Fig. 2 One dimensional dynamic models for the TC and M cars

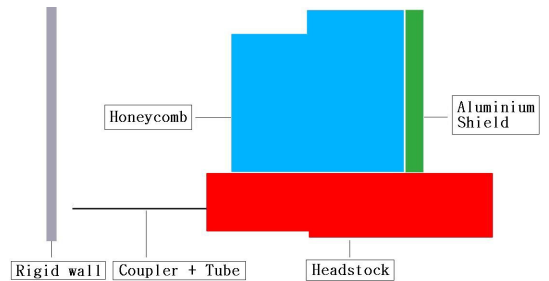


Fig. 3 Collision model of the front end structure

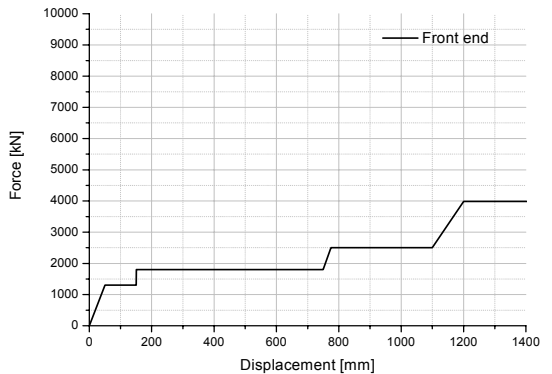


Fig. 4 Input curve of the front end structure

열차 대 열차 충돌을 적용한다. 에너지 흡수 등가성을 고려하여 18 kph 강체벽에 충돌하는 조건으로 Ls-Dyna⁽¹¹⁾를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

2.2 전체 충돌에너지 흡수량 산출

동력분산형 차세대고속열차의 질량(m_t)을 축중으로부터 추정하면 다음과 같다.

$$m_t = 16(\text{대차수}) \times 2(\text{축수}) \times 13(\text{축중}) = 416 \text{ ton} \quad (1)$$

상대속도 36 km/h의 열차 대 열차 충돌은 고정벽과 18 km/h(5 m/s)충돌하는 것과 에너지 흡수 측면에서 등가이므로 철도 차량이 흡수하여야 할 에너지를 추정하면 다음과 같다.

$$E = \frac{1}{2} m_t v^2 = \frac{1}{2} \times 416 \times 5^2 = 5.2 \text{ MJ} \quad (2)$$

2.3 수치해석 결과

Fig. 5는 충돌 해석 결과 에너지의 전환 이력을

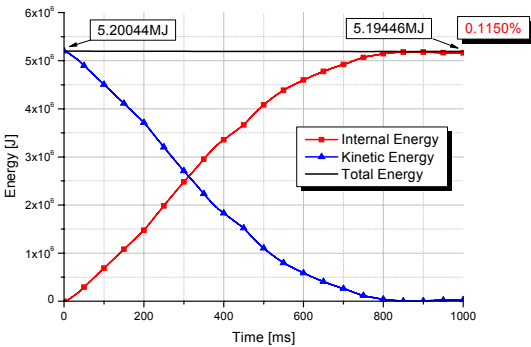


Fig. 5 Energy history curve

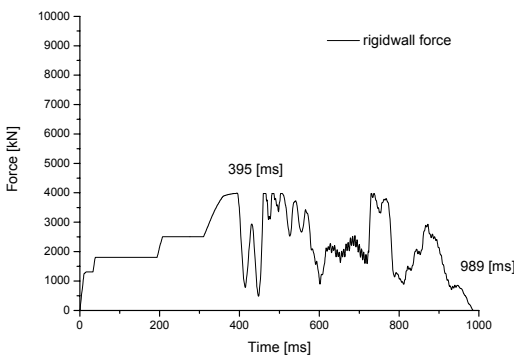


Fig. 6 Rigid wall reaction force

나타낸 그래프이며, 수치해석결과 전체 흡수 에너지는 식 (2)의 이론값 5.2 MJ과 거의 유사하였다. 또한 수치해석과정의 총 에너지 변화량이 0.115 % 이내로 일치함을 알 수 있다. Fig. 6은 충돌시 강체벽에 작용되는 충격력 곡선으로 열차 전두부의 압괴 특성이 나타나 있다.

3. 충돌가속도 평가

시뮬레이션을 이용한 철도차량의 충돌 가속도 평가는 미국의 경우 자동차 차체 충돌 평가 기준인 SAE60 필터를 적용하고 있고, EU에서는 푸리에 40 Hz 로우패스 필터를 사용하고 있다. 국내의 경우는 철도차량에 적합한 차단주파수(cut-off frequency) 결정과 필터링 방법이 정립되어 있지 않다. 따라서 국외에서 수행하는 가속도 데이터 필터링 방법의 특징을 살펴보고, 국내 철도에 적용 가능한 몇 가지 방법을 분석한다.

3.1 가속도 필터링 평가방법

미국 철도차량의 충돌가속도 평가에 사용하는 SAE60 필터에는 Butterworth 필터를 사용하고 있으며^(12,13), 이는 100 Hz 로우패스 푸리에 필터와 유사하다⁽¹⁴⁾. 반면 유럽(EU)에서 고속철도차량의 경우는 통상 푸리에 40 Hz 로우패스 필터를 사용하고 있다⁽¹⁵⁾. Fig. 7은 동일한 가속도 데이터에 미국과 유럽의 규정을 적용하여 필터링한 가속도-시간 그래프이다. 최대 충돌 가속도는 미국의 평가 기준 일 때 14.3 g, 유럽의 기준 일 때 4.3 g로 서로 상당한

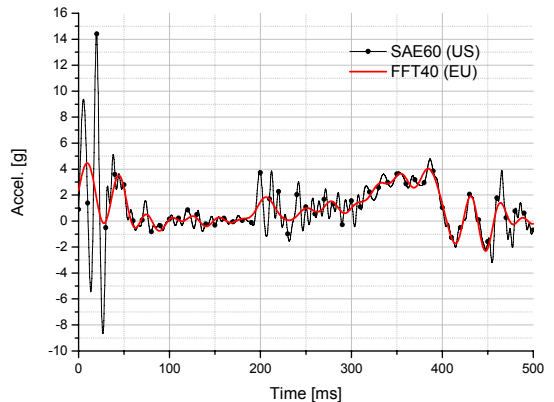


Fig. 7 Comparison of the filtered acceleration curves

차이가 있다. 최대 충돌 가속도 관점에서 보면 차단 주파수가 높은 미국(US) 필터링 방법이 차단주파수가 낮은 유럽(EU)의 경우보다 높다. 따라서 국내 철도차량안전기준에서 요구하는 최대 충돌가속도를 평가하기 위하여 차단주파수 선정이 중요하다.

3.2 1차원 충돌해석 결과

이 절에서는 국내 철도에 적용 가능한 몇 가지 충돌 가속도 크기를 평가하는 방법에 대하여 알아보고, 열차의 1차원 충돌 동역학 시뮬레이션 결과를 적용하여 평가한다.

Fig. 8은 운전자 구간 앞 절점의 가속도-시간 곡선을 나타낸 것이다. 비선형요소인 스프링-댐퍼-질량으로 구성된 1차원 변형체 요소 모델이므로 승객의 거동에 영향을 주는 강제 운동 주파수 대역 외의 고주파 성분이 포함되어 있어 정량적 충돌가속도 평가에 어려움이 있다. 따라서 탑승자의 충돌안전도 성능을 평가하기 위하여 적절한 차단주파수 결정 방법이 요구된다.

열차의 충돌가속도를 평가하는 차단주파수 결정 방법으로 가속도의 적분을 이용한 변위 비교법, 속도 비교법, 속도곡선 분석법을 적용한다.

3.3 변위 비교법

일반적인 역학 이론을 통해 가속도를 적분하면 속도가 되고, 속도를 적분하면 변위가 된다. 변위 비교법은 해당 절점의 필터링 된 가속도 데이터를 2차례 적분한 후 수치해석 결과인 절점의 변위와 비교하여 필터링 주파수의 유효성을 판단하는 방법

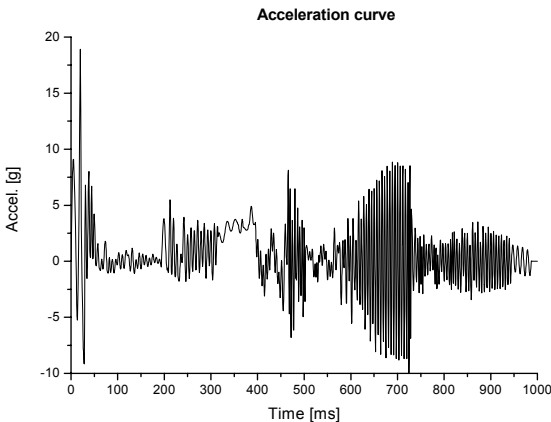


Fig. 8 Acceleration-time curve of the cab

이다. 적분할 경우에는 적분 상수를 적용하게 되는데, 이 해석에서 사용된 초기속도는 18 kph이므로 이를 단위 환산하여 -5 mm/ms로 적용하였다.

Fig. 9는 해석결과 가속도 데이터를 10 Hz에서 75 Hz까지 FFT 로우패스 필터링을 하여 간략히 나타낸 그림이고 Fig. 10은 필터링 된 가속도 데이터를 두 번 적분하여 변위-시간 그래프로 나타낸 것이다.

Fig. 10에서 차단주파수 60 Hz~75 Hz로 필터링 한 가속도 데이터를 적분한 변위 곡선은 절점에서 추출한 원래 변위 곡선(raw displacement curve)과 잘 일치한다.

3.4 속도 비교법

속도 비교법은 변위 비교법과 유사한 기법으로 절점의 속도-시간 곡선을 이용하여 가속도 필터링

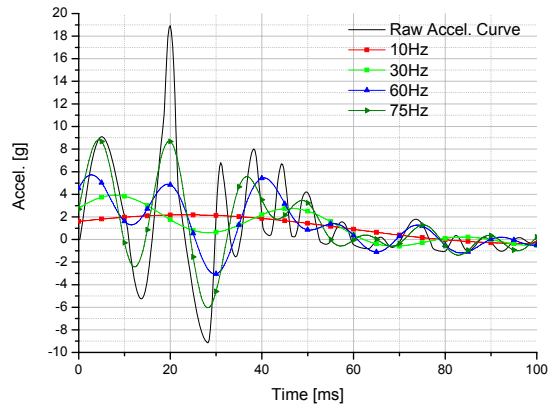


Fig. 9 Filtered acceleration-time curves of the cab

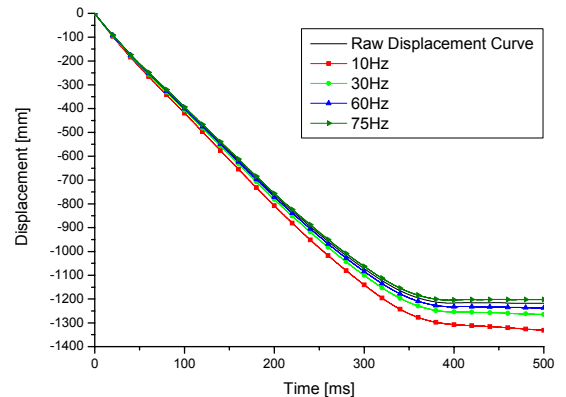


Fig. 10 Displacement-time curves of the cab

방법의 유효성을 분석하는 방법이다. Fig. 9와 같이 추출된 가속도 데이터를 10 Hz에서 75 Hz까지 로우패스 필터링하고, Fig. 11과 같이 필터링 된 가속도 데이터를 적분하여 속도-시간 곡선으로 나타낸다. 각각의 속도 곡선과 절점에서 추출한 원래 속도 곡선(raw velocity curve)을 비교하여 유효한 가속도 필터링 주파수 대역을 선정한다.

변위 비교법과 속도 비교법에서는 Fig. 10과 Fig. 11에서와 같이 60 Hz~75 Hz 사이의 로우패스 필터링 주파수 대역에서 데이터의 왜곡이 가장 적다.

이것은 60 Hz~75 Hz로 로우패스 필터링한 가속도 데이터가 강제 변위거동을 잘 표현하며 유효한 충돌가속도 결과를 얻을 수 있음을 의미한다.

75 Hz 로우패스 필터링 한 경우의 운전자구간의 충돌가속도는 Fig. 12와 같으며 최대 충돌 가속도는 8.7g이었다.

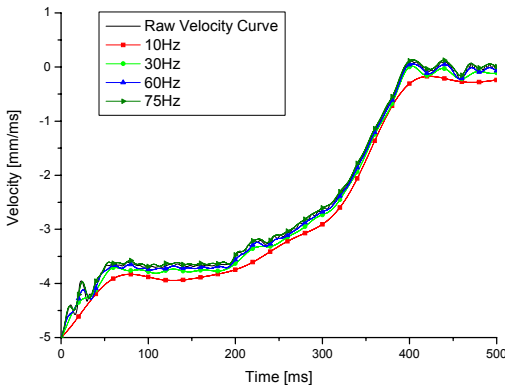


Fig. 11 Velocity-time curves

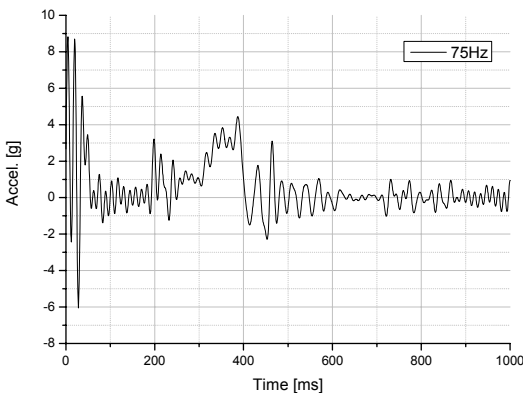


Fig. 12 Acceleration curve of the cab filtered with 75 Hz low-pass

3.5 속도곡선 분석법

속도곡선 분석법은 절점에서 추출한 속도-시간 곡선에서 최대 가속도를 구하고, 이 값을 절점에서 추출한 속도-시간 곡선을 로우패스 필터링한 그래프와 비교하여 유효한 주파수를 선정하는 방법이다⁽¹⁶⁾. 이 연구에서는 차단주파수 10 Hz~75 Hz까지 로우패스 푸리에 필터링 하였다.

즉 속도-시간 곡선에서 최대 가속도 a_{max} 는 다음 식과 같고, 이것은 속도-시간 곡선 그래프에서 가장 경사진 기울기와 같다.

$$a_{max} = (V_f - V_i) / (T_f - T_i) \quad (3)$$

여기서 V_i 는 최대경사구간의 초기속도, V_f 는 구간의 최종속도, T_i 는 구간의 시작시간, T_f 는 구간의 최종시간이다.

Fig. 13은 운전자 구간의 앞 절점에서의 속도-시간 곡선을 나타낸 것인데 각 시간 영역에서 곡선의 기울기는 가속도를 의미하며, 속도곡선에서는 특별한 필터링 없이 식(3)에 의하여 최대 가속도를 구할 수 있다.

Table 1은 Fig. 13에서 얻어낸 최대충돌가속도(그래프의 기울기)를 수치로 나타낸 것이다. 필터링주파수 계산은 Fig. 13 곡선의 속도변동 구간별 주기를 바탕으로 식(4)를 적용하여 계산하였다. 주기는 구간 1)은 0~16 ms, 구간 2)는 16~29.25 ms, 구간 3)은 29.25~62.50 ms, 구간 4)는 330.5~415.5 ms로 각각 설정하였다.

Table 1 Maximum acceleration from the velocity curve

Case	Time [ms]	Velocity [mm/ms]	a_{max} [g]	Filtering frequency [Hz]
1	Initial	0.00	-5.00	62.50
	Peak	11.00	-4.40	
	Final	16.00	-4.58	
2	Initial	16.00	-4.58	75.47
	Peak	23.25	-3.95	
	Final	29.25	-4.32	
3	Initial	29.25	-4.32	24.24
	Peak	50.55	-3.71	
	Final	70.50	-3.68	
4	Initial	330.50	-2.13	11.76
	Peak	400.00	0.08	
	Final	415.50	0.00	

$$\text{Filtering frequency} = \frac{1}{T} \text{ [Hz]} \quad (4)$$

속도 곡선 분석을 통해 16~23.25 ms인 구간 2)에서 최대 충돌가속도가 8.69 g 발생하였고, 이 속도 구간을 주파수로 환산하면 75.47 Hz이다.

Table 2는 가속도 데이터를 Fig. 9와 같이 10 Hz에서 75 Hz까지 FFT 로우패스 필터링을 하고, 최대 가속도를 나타낸 표이다. 식 (3)으로 계산한 Table 1의 결과와 Table 2의 해당 필터링 주파수 결과를 최대가속도와 발생시간에 대하여 비교하면 Fig. 13에 표시된 속도 파형에 대한 최대 가속도를 확인할 수 있다. Fig. 13의 파형 2)는 75 Hz 필터링으로 최대가속도를 구할 수 있다.

Table 2 Filtered maximum accelerations for each time section

Filtering Freq. [Hz]	0 ~ 16 [ms]		16 ~ 29.25 [ms]		29.25 ~ 62.50 [ms]		330.5 ~ 441.5 [ms]	
	T [ms]	a [g]	T [ms]	a [g]	T [ms]	a [g]	T [ms]	a [g]
10	16.00	2.11	23.50	2.18	29.75	2.14	356.00	3.56
20	10.00	2.65	16.00	2.54	29.75	1.87	372.50	3.75
30	7.75	3.91	16.00	2.76	46.25	2.76	386.50	4.25
40	9.50	4.47	16.00	3.21	44.25	3.52	384.50	4.04
50	3.75	3.70	16.00	3.47	43.25	4.50	385.50	4.20
60	2.75	5.72	19.50	4.88	40.50	5.45	388.50	4.48
70	3.75	7.89	19.75	7.36	36.75	5.56	387.25	4.48
75	4.50	8.83	19.75	8.70	36.75	5.56	387.00	4.44

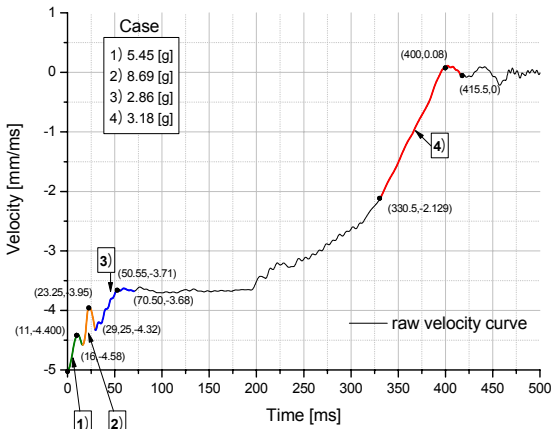


Fig. 13 Velocity-time curve of the cab

3.6 속도곡선 분석법과 데이터 재현성 검증

속도곡선 분석법으로 속도-시간 곡선의 16 ms에서 23.25 ms까지 구간에서 최대 충돌가속도가 8.69 g

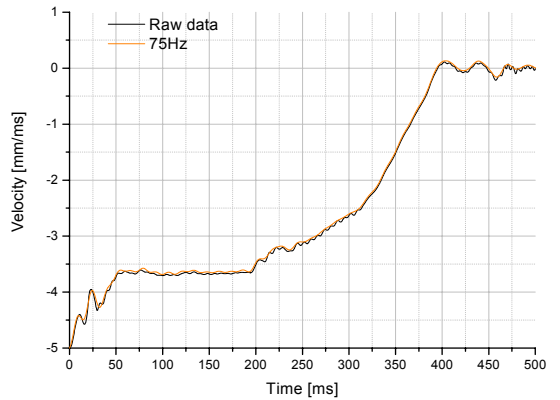


Fig. 14 Velocity-time curves of the cab

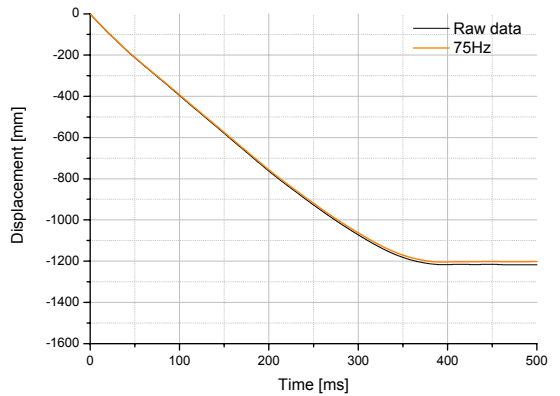


Fig. 15 Displacement-time curves of the cab

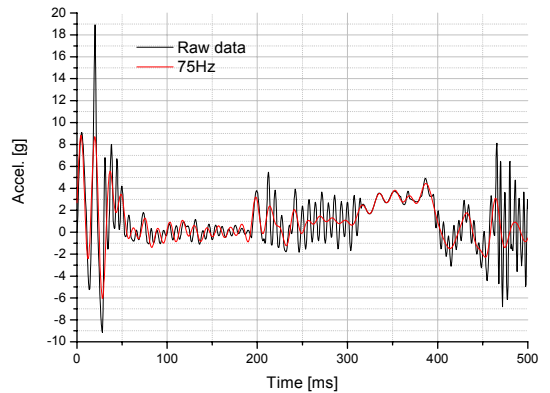


Fig. 16 Acceleration-time curves of the cab

만큼 발생하였는데, 이것은 가속도 데이터를 75 Hz 로우패스 필터링 하였을 때 최대 충돌가속도가 8.70 g로 가장 유사하였다. 따라서 속도 곡선 분석법을 적용한 결과, 75 Hz 로우패스 필터가 충돌 가속도를 평가하기 위한 유효한 필터링 주파수로 판단된다.

또한 75 Hz 로우패스 필터링에 의한 속도 및 변위의 재현성을 검증하기 위해 속도 및 변위 비교법을 적용하여 분석하였다.

가속도 데이터를 75 Hz 차단주파수로 필터링한 후, 1차로 적분하여 속도-시간 곡선과 비교하니 Fig. 14와 같이 잘 일치하였으며, 2차로 적분 후 변위-시간 곡선과 비교하니 Fig. 15와 같이 약 1.2%의 차이가 발생하여 재현성이 양호하였다. Fig. 14의 raw data는 운전자 구간의 절점에서 직접 추출한 속도-시간 데이터이며, Fig. 15의 raw data는 운전자 구간의 절점에서 직접 추출한 변위-시간 데이터이다.

열차의 충돌 가속도 평가용 데이터 필터링 방법 연구결과, 이 연구에서 제시한 속도 분석 방법을 통해 동력 분산형 차세대 고속열차의 개념설계 모델의 경우에는 75 Hz 로우패스 필터링이 가속도 평가에 유용한 것으로 판단되며, Table 2와 Fig. 16에서 보는 바와 같이 운전자 구간의 최대 충돌 가속도는 약 8.7 g이었다.

4. 평균가속도 평가

이 절에서는 필터링 된 가속도 데이터를 이용하여 평균 충돌가속도를 계산하는 방법을 제시하고 타당성을 분석하였다.

4.1 누적평균을 이용한 평균가속도

철도차량안전기준 시행지침 제16조에서는 평균 가속도 평가는 접촉하중이 발생 후 소멸 시간까지 하도록 정의하고 있다⁽⁴⁾. 이러한 개념의 평균가속도는 다음과 같이 가속도의 누적평균 값으로 구할 수 있다.

$$a_{avg} = \frac{\int_0^T a(t) dt}{T} \quad (5)$$

식 (5)에 의하여 운전자 구간의 가속도를 75 Hz 로우패스 필터링하여 각 시간까지 누적된 평균가속도 곡선을 나타내면 Fig. 17과 같다.

Fig. 6의 강체벽 접촉력 하중곡선에서 1차적으로 접촉하중이 급감하는 시간은 395 ms이고 완전히 소멸되는 시간은 989 ms이다. 누적 평균곡선을 보면 평균가속도는 395 ms에서 1.273 g이고 989 ms에서는 0.510 g이다.

4.2 속도곡선을 이용한 평균가속도

속도-시간 곡선에서 기울기는 평균 가속도이다. 식 (6)은 속도 곡선에서 평균가속도 구하는 식이다.

$$a_{avg} = (V_f - V_i) / (T_f - T_i) \quad (6)$$

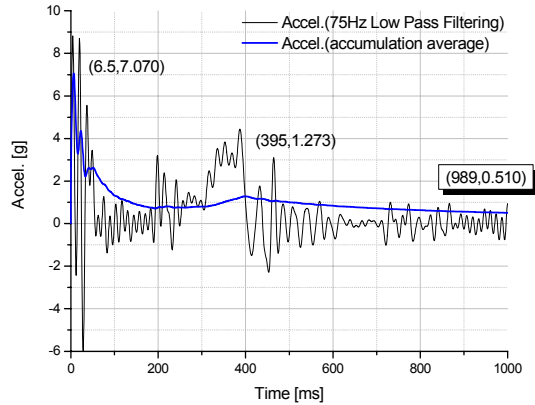


Fig. 17 Accumulated average acceleration-time curve of the cab

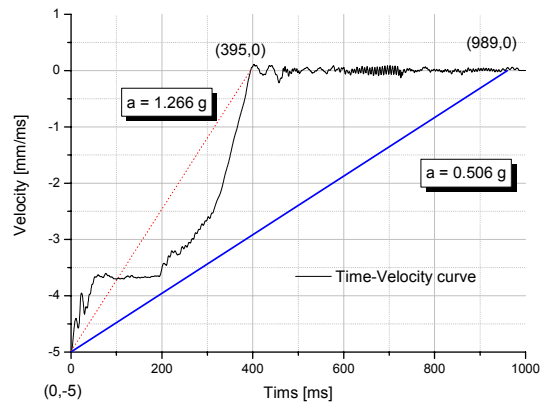


Fig. 18 Linear fittings for the velocity-time curve of the cab

여기서 V_i 는 평균속도 계산 구간의 초기속도, V_f 는 구간의 최종속도, T_i 는 구간의 시작시간, T_f 는 구간의 최종시간이다.

Fig. 18은 운전자 구간 앞 절점의 속도-시간 곡선에서 직접 평균 가속도를 계산한 것이다. 속도-시간 곡선에서 최초 속도가 0이 되었을 때(395 ms)의 평균가속도와 접촉하중이 발생한 후 소멸되는 시간(989 ms)까지의 평균가속도를 계산하였다. 속도곡선 분석법에 의한 평균가속도는 395 ms에서 1.266 g이고 989 ms에서는 0.506 g로 앞 절에서 누적평균을 이용하여 구한 결과와 유사함을 알 수 있다.

4.3 최대충돌가속도 및 평균충돌가속도 평가

철도차량안전기준 시행지침 제16조에 의하면 열차의 충돌안전도 설계는 3차원 유한요소모델 시뮬레이션으로 충돌가속도의 최대 및 평균치를 평가 검증하도록 하고 있다. 따라서 초기 설계단계에서 사용하는 1차원 충돌동역학 모델의 경우도 속도 및 변위의 재현성이 확인되는 차단주파수로 필터링하여 가속도 크기를 평가하는 것이 필요하다. Table 3은 75 Hz 로우패스 필터링하여 구한 분산형 차세대 고속전철 개념설계의 운전자 구간 최대가속도이다.

철도차량안전기준 시행지침 제16조에서는 평균가속도 평가는 접촉하중이 발생한 후 소멸되기까지의 시간(989 ms)에 대하여 하도록 하고 있지만 참고문헌 (16)에서는 속도가 0에 도달하는 시간에 대하여 평균가속도를 구하고 있다. 평균가속도를 보수적으로 평가하려면 속도가 0에 도달하는 시간(395 ms)에 대한 값을 사용할 필요가 있다.

Table 3 Maximum acceleration of the cab

Filtering frequency [Hz]	Maximum accel. (from velocity curve) [g]	Maximum accel. (from filtering) [g]
75	8.69	8.70

Table 4 Average acceleration of the cab

Filtering frequency [Hz]	Average accel. (velocity curve) [g]		Average accel. (accumulation) [g]	
	395ms	989ms	395ms	989ms
75	1.266	0.506	1.273	0.510

5. 결 론

철도차량안전기준 시행지침 16조에서 요구하는 열차 충돌가속도 크기를 평가하려고 1차원 충돌 동역학 해석 결과에 변위 비교법 및 속도 비교법, 속도곡선 분석법을 적용하여 비교 연구를 수행하였다. 이 연구에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 국내 법규에서 요구하는 최대 충돌가속도 제한 조건은 데이터 후처리 방법에 따라서 큰 차이가 난다. 고주파 성분을 배제하면서 최대가속도를 분석하려면 먼저 속도곡선 분석법을 적용하여 적절한 차단주파수를 선정하여 가속도의 로우패스 필터링을 실시하고 1번 적분하여 해당 절점의 속도-시간 곡선과 비교한 후, 2번 적분하여 변위-시간 곡선과 비교하여 재현성을 검증하는 방법이 추천된다.

(2) 평균충돌가속도는 데이터 후처리 방법에 민감하지 않으며 그 크기를 평가하기 위하여 속도곡선 분석법을 적용하거나 가속도-시간 곡선에 대한 가중평균계산 방법을 통하여 산출할 수 있다. 두 가지 경우의 결과가 잘 일치하였다.

(3) 동력 분산형 차세대 고속열차의 개념설계 모델의 경우, 시뮬레이션 결과에 속도곡선 분석 방법을 적용하니 가속도 평가에 75 Hz 로우패스 필터링이 가장 적합하였으며, 운전자 구간의 최대 충돌가속도는 약 8.7 g이며, 평균 충돌가속도는 약 0.51 g였다. 최대충돌 가속도는 데이터 후처리에 민감하였으나 평균가속도는 거의 일정하였다.

최근 EU에서 개정된 TSI 규정과 EN15227 표준에서 데이터 필터링에 민감한 최대 가속도 제한조건을 없애고 평균 가속도 크기만 제한하는 추세이므로 국내에서도 향후 법규 개정 시 고려할 필요가 있다.

후 기

이 연구는 국토해양부에서 지원하여 한국철도기술연구원에서 진행 중인 차세대고속철도개발사업 연구결과의 일부를 활용하여 수행된 것으로서 관계자들과 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) FRA, 1999, The Code of Federal Regulations, "Title 49 Transportation, Department Of Transportation Part 238 - Passenger Equipment Safety Standards".
- (2) AEIF/TSI, 2002, "The Technical Specification for Interoperability Relating to the Rolling Stock Subsystem of the Trans-European High-speed Rail System".
- (3) AFNOR, 2008, "Railway Applications - Crashworthiness Requirements for Railway Vehicle Bodies," European Standard, EN15227.
- (4) MOCT Ordinance 278, 2007, "Regulations on the Railway Safety Criterion of Rolling Stock".
- (5) Koo, J. S., Cho, H. J., Kwon, T. S., 1997, "A Study on Establishing the Accident Scenarios for Crashworthiness of Rolling Stocks," Korean Society for Railway, pp. 661~670.
- (6) Kisielewicz, L. T. and Ando, K., 1993, "Crashworthy Rolling Stocks," PUCA '93, pp. 73~81.
- (7) Lewis, J. H., 1994, "Development of Crashworthy Vehicle Structures for Railways," WCCR, pp. 893~900.
- (8) Tyrell, D., 1995, "Train Crashworthiness Design for Occupant Survivability," ASME, AMD-Vol. 210, pp. 59~74.
- (9) Kim, K. Y., Cho, H. J., Koo, J. S. 2008, "A Study on Conceptual Design for Crashworthiness of the Next Generation High-speed EMU," Korean Society for Railway, Vol. 11, No. 4, pp. 300~310.
- (10) Kim, B. G., Kim, Y. C. and Chai, J. B., 2008, "Study on the Characteristics of the Energy Transmission in a Structure," Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 413~415.
- (11) LS-DYNA User's Manual, 2003, Version 970, Livermore Software Technology Corporation.
- (12) Severson, K. J., Tyrell, D., Perlman, A. B., 2000, "Rail Passenger Equipment Collision Tests : Analysis of Structural Measurements," U.S. Department of Transportation, November 6, ASME RTD Vol. 19.
- (13) Jacobsen, K., Tyrell, D., 2003, "Rail Car Impact Test with Steel Coil: Collision Dynamics," ASME RTD 2003-1655, pp. 73~82.
- (14) Society of Automotive Engineers, 1995, "Recommended Practice: Instrumentation for Impact Test Part-1, Electronic Instrumentation," SAE J211/1.
- (15) ADT/SOR, 2006, SAFETRAIN/final Report, "Train Crashworthiness for Europe," 2006 Dublin Conference.
- (16) Fasanella, E. L., Jackson, K. E., 2002, "Best Practices for Crash Modeling and Simulation," NASA/TM-2002-211944, Final Report.