

열차의 충돌가속도 크기를 평가하기 위한 방법 연구

A Study on Techniques for Evaluating Collision Acceleration of Rollingstock

김운곤†
Kim, Woon-Gon

김거영*
Kim, Geo-Young

구정서*
Koo, Jeong-Seo

ABSTRACT

In this study, we suggest that several approaches to evaluate the collision acceleration value of a car in the article 35 and the guideline 16 of Korean rolling stock safety regulation. There are various methods to evaluate collision acceleration such as; a displacement comparison method by the double integration of filtered acceleration data, a velocity comparison method by the integration of filtered acceleration data, an analysis method of time-velocity curve, or a differential method of time-velocity curve. We compared these methods one another using 1D dynamic simulation model composed of nonlinear dampers, springs and bars, and masses. Also, we applied these methods to a hybrid model, which is made of 3D shell element model and 2D collision dynamics model, in order to evaluate whether 1D force-displacement curve modeling for energy absorbing structures have an effect on the collision acceleration levels or not.

1. 서 론

현재 국내철도차량은 2007년 7월 국토해양부에서 고시한 철도안전법 35조의 시행지침 제16조 ‘철도차량의 표준충돌사고각본’에 근거하여 각 항목별 충돌안전도 성능을 반드시 평가하여야 한다.^{1,2)} 충돌가속도 평가를 위한 대표적인 방법으로는 1차원 탄소성요소로 이루어진 충돌동역학 모델이 있으며, 이러한 방법은 각 차체별 에너지흡수 특성을 반영하여 전체차량편성을 용이하게 충돌해석 할 수 있으므로 설계단계에서 충돌가속도 평가방법으로 널리 사용되고 있다.³⁻⁶⁾

수치해석 결과로 나온 충돌가속도 데이터는 충돌 후 불필요한 노이즈(noise)성분이 발생하므로 승객의 거동에 영향을 주는 강제 운동 주파수 대역이외의 성분이 포함되어 정확한 가속도 레벨을 평가하기 어렵다. 따라서 규정에 나타난 충돌가속도 레벨 평가를 위해서 수치실험 결과 나온 데이터를 적절히 필터링 하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 1차원 충돌동역학 모델을 이용하여 열차의 충돌가속도 크기를 평가하기 위한 몇 가지 방법을 제시하여 분석한다.

2. 충돌동역학 모델개요 및 충돌해석

본 연구에 사용된 차량모델은 동력분산형 차세대고속열차의 개념설계 모델로서 차량편성은 그림 1에 나타낸 것과 같이 2TC-6M이며, 각 차축의 축중은 13 ton으로 정의되었다. . 충돌 시나리오는 국내 철도차량안전기준 시행지침 16조의 표준충돌 시나리오인 상대속도 36kph 열차 대 열차 충돌을 적용하였으며, 에너지 증가성을 고려하여 18kph 강제벽에 충돌하였다.

† 서울산업대학교 철도전문대학원, 정회원, 석사과정

E-mail : woongoni@naver.com

TEL : (02)970-6878 FAX : (02)970-6009

* 서울산업대학교 철도전문대학원, 정회원

그림 2는 그림 1의 TC차량과 M차량에 대한 스프링-질량의 1차원 충돌동역학 모델의 개념도를 나타낸 것이다. 그림 2에서 흰 원은 비선형 막대요소를 정의하는 절점이며, 검은 원은 대차의 집중질량이 부가된 비선형 스프링 절점이다. 본 연구의 모델은 개념설계 모델이므로 한국형고속열차의 알루미늄 압출차체와 대차의 자료를 원용하여 비선형 막대요소와 비선형 스프링의 하중-변형특성을 정의하였다.⁷⁾

그림 3은 충돌 해석 결과 에너지의 전환 이력을 나타낸 그래프이며, 수치해석과정의 총 에너지 변화량이 0.115% 이내로 일치하였다.

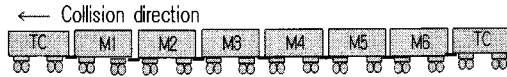


그림 1. The full rake consist for the high speed EMU

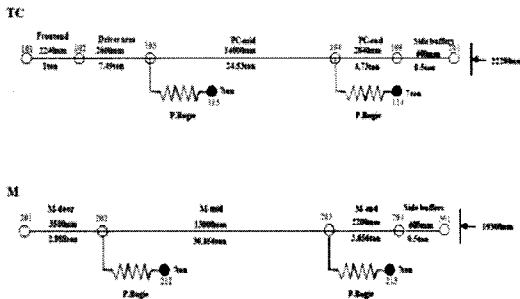


그림 2. One dimensional models for the TC and M cars

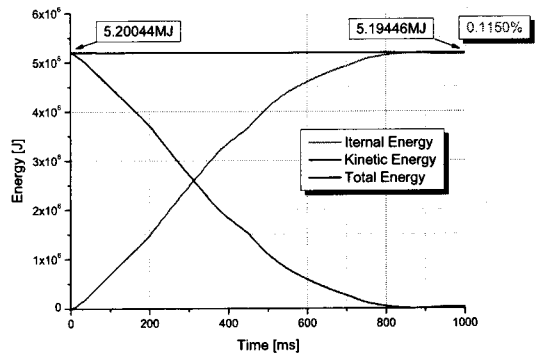


그림 3. Energy history curve

3. 충돌가속도 평가방법

3.1 가속도 필터링 평가 방법

그림 4는 운전자 구간의 앞 절점에서의 시간-가속도 곡선을 나타낸 것이다. 가속도 그래프를 보면 알 수 있듯이 탄소성요소인 스프링-댐퍼로 구성된 1차원 변형체 요소 모델이므로 승객의 거동에 영향을 주는 강체 운동 주파수 대역이외의 성분이 포함되어 충격 가속도 레벨이 상당히 높아 정량적 가속도 평가를 수행하기에 어려움이 있음을 알 수 있다. 따라서 충돌안전도 성능을 평가하기 위해서는 적절한 데이터 필터링 방법이 요구된다.

본 절에서는 열차의 충돌가속도 크기를 평가하기 위한 가속도 필터링 방법으로 가속도의 적분을 이용한 변위 비교법 및 속도 비교법, 속도곡선 분석법을 제시한다.

3.2 변위 비교법 및 속도 비교법

일반적인 수학 이론을 통해 가속도를 적분하면 속도가 되고, 속도를 적분하면 변위가 된다는 것을 알 수 있다.

변위 비교법은 해당 절점의 필터링된 가속도 데이터를 2차 적분하여 수치해석 결과 나타난 절점의 변위와 비교하여 필터링 주파수의 유효성을 판단하는 방법이다. 적분할 경우에는 적분 상수를 적용하게 되는데, 본 해석에서 사용된 초기속도는 18kph이므로 이를 단위 환산하여 $-5mm/ms^2$ 로 적용하였다.

해석 결과로 나온 가속도 데이터를 10Hz에서 60Hz까지 FFT 로우패스 필터링을 하고[그림 5], 필터

링 된 가속도 데이터를 두 번 적분하여 시간-변위 그래프로 나타낸다. 그림 6에서 필터링하지 않은 가속도 데이터를 적분한 변위 곡선(Not filtering)은 절점에서 추출한 변위 곡선(Raw displacement curve)과 일치함을 알 수 있다.

속도 비교법은 변위 비교법과 같은 방법으로 시간-속도 곡선을 통하여 가속도 필터링 방법의 유효성을 분석하는 방법이다. 변위 비교법과 속도 비교법에서는 그림 6과 그림 7에서 보는 바와 같이 60Hz 로우패스 필터링 한 경우 필터링 주파수에서 유발되는 데이터의 왜곡정도가 가장 적은 것을 알 수 있다. 이 경우의 운전자구간의 충돌가속도는 그림 8과 같으며 최대 충돌가속도는 5.72g를 나타내었다.

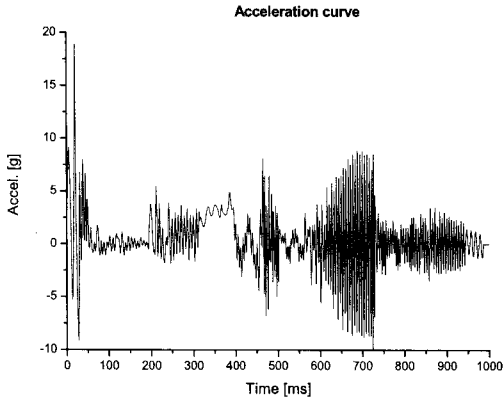


그림 4. Time-acceleration curve

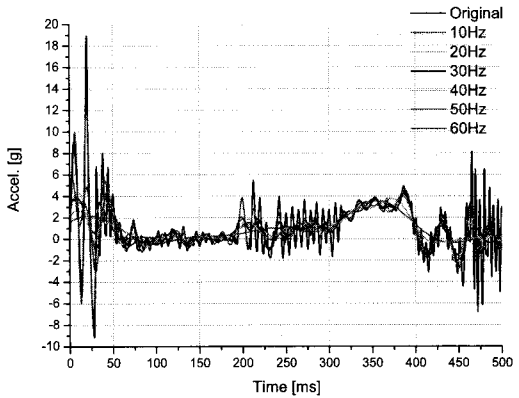


그림 5. Filtering acceleration curve

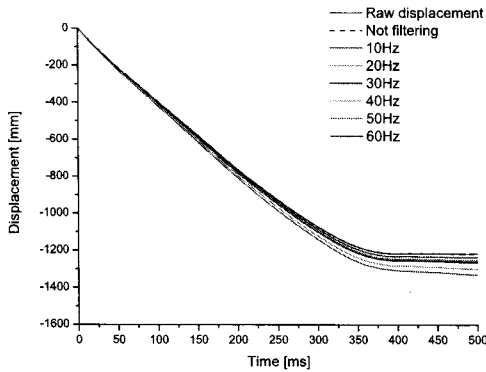


그림 6. Time-displacement curve

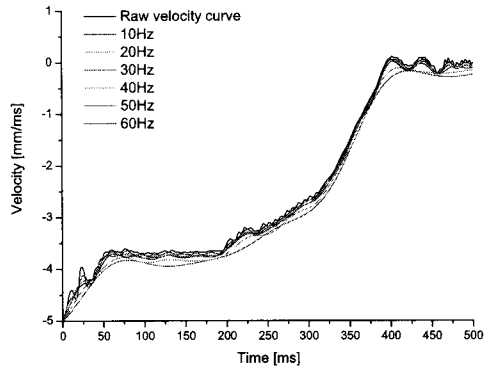


그림 7. Time-velocity curve

3.3 속도곡선 분석법

속도곡선 분석법은 절점에서 추출한 시간-속도 곡선에서 최대 가속도를 구하고, 이 값을 원래의 가속도 곡선을 필터링한 그래프와 비교하여 유효한 필터링 주파수를 선정하는 방법이다.

즉 시간-속도 곡선에서의 최대 가속도 A_{max} 는 $(V_f - V_i)/(T_f - T_i)$ 와 같고, 이는 그래프에서 기울기와 같다. 따라서 계산한 최대 가속도 값과 10Hz에서 60Hz까지 필터링한 각각의 가속도의 최고값을 비교하여 유효한 필터링 주파수를 찾는 방법이다. (V_i : 초기속도, V_f : 최종속도)

그림 8은 운전자 구간의 앞 절점에서의 시간-속도 곡선을 나타낸 것인데 각 시간 영역에서의 기울기는 가속도를 의미하며, 속도곡선에서는 특별한 필터링 없이 최대 가속도를 평가 할 수 있다.

표.1 Maximum acceleration
(from velocity curve)

CASE	Time [ms]	Velocity [mm/ms]	A_{max} [g]	Filtering frequency [Hz]
1	initial	0	5.46	45
	final	11		
2	initial	16	8.63	70
	final	23.25		
3	initial	29.75	2.97	25
	final	50.55		
4	initial	330.5	3.17	7
	final	400		

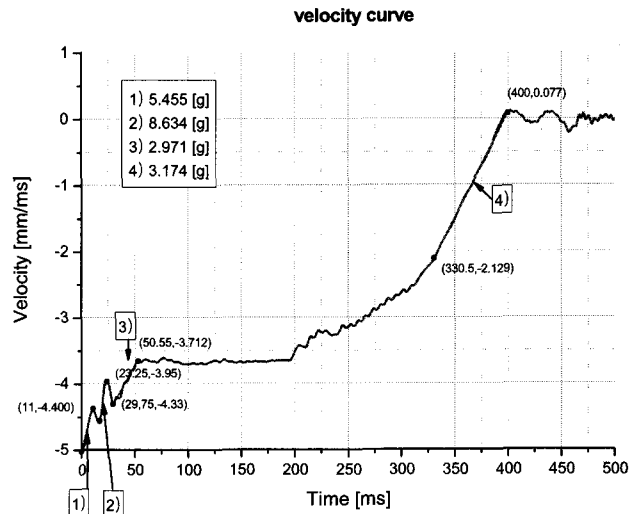


그림 8. Time-velocity curve

표 1에서 최대 가속도는 16ms에서 23.25ms까지의 시간에서 약 8.63g가 발생하였으며, 이 경우를 주파수로 나타내면 70Hz와 같다. 필터링 주파수 선정 후 이를 검증하기 위해 각각의 cut-off 주파수로 가속도를 필터링한 후, 적분하여 속도 곡선과 비교하여 잘 일치하는 것을 확인하여야 한다. 그 결과는 그림 9와 같다.

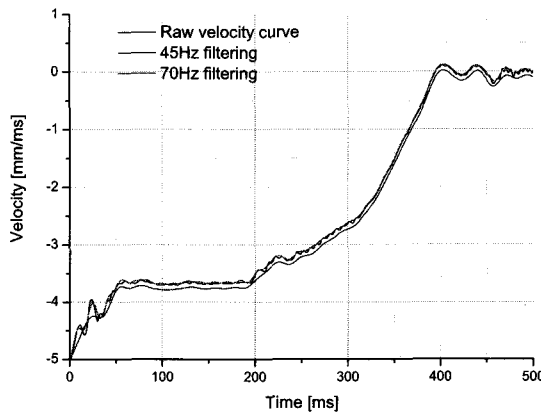


그림 9. Time-velocity curve

5. 결론

열차의 충돌가속도 크기를 평가하기 위한 방법 연구에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 절점에서 가속도 데이터의 유효성과 적절한 데이터 필터링 주파수를 판단하기 위해 변위 비교법 및 속도 비교법, 속도곡선 분석법을 적용하여 가속도 필터링 주파수를 분석해 보았다.
- 2) 변위와 속도를 통해 분석한 결과 60Hz 로우패스 필터링 하였을 경우, 필터링 주파수에서 유발되는 데이터의 왜곡정도가 가장 적은 것을 알 수 있다. 이는 60Hz로 로우패스 필터링한 가속도 데이터가 물리적 변위거동을 잘 표현하며 유효한 충돌가속도 결과를 얻을 수 있음을 설명하는 것이다. 60Hz 로우패스 필터링 한 경우 운전자 구간의 최대 충돌가속도는 5.716g를 나타내었다.

- 3) 속도 분석법을 통해 찾아낸 적절한 필터링 방법은 70Hz 로우패스 필터링 이었으며, 운전자 구간의 최대 충돌가속도는 약 8.63g를 나타내었다.

국내철도차량은 철도안전법 35조의 시행지침 제16조 ‘철도차량의 표준충돌사고각본’에 근거하여 충돌가속도 레벨을 평가하기 위해서는 이와 같이 변위 비교법, 속도 비교법, 속도 분석법 등의 다양한 방법을 통해 평가하는 것이 바람직하리라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부에서 연구비를 지원하여 한국철도기술연구원에서 진행 중인 차세대고속철도기술개발사업의 연구결과로서 관계자들에 감사드립니다.

참고문헌

1. 국토해양부 (2007), 철도안전법 제16조(철도차량의 표준충돌사고각본) 별표 13 ‘표준충돌사고 각본 세부기준’
2. 구정서, 조현직, 권태수 (1997), “철도차량의 충돌안전도 설계를 위한 사고 시나리오 제정 연구”, 한국철도학회 07 춘계학술대회 논문집, pp. 661-670
3. L. T. Kisielewicz and K. Ando(1993), "Crashworthy rolling stocks", PUCA '93, pp.73-81
4. J. H. Lewis (1994), "Development of crashworthy vehicle structures for railways", WCCR, pp.893-900
5. D. Tyrell (1995), "Train Crashworthiness Design for Occupant Survivability", ASME, Vol.30
6. LS-DYNA user's Manual(2003) Version 970, Livermore Software Technology Corporation
7. 구정서 외 13인(2000), 설계기반기술 세부분야 : 충돌안전도 해석기술 개발 5차년도 보고서.
8. ADT/SOR (2001), SAFETRAIN/final report, "Train Crashworthiness for Europe" 2006 Dublin Conference
9. Edwin L. Fasanella, Karen E. Jackson (2002), "Best Practices for Crash Modeling and Simulation", NASA/TM-2002-211944
10. Karina Jacobsen, David Tyrell (2003), "Rail Car Impact Test with Steel Coil : Collision Dynamics", ASME RTD 2003-1655, pp. 73-82
11. Masamichi KATO, Kazushi TERADA (2006), "Development of an Evaluation Type Train Protection System to Prevent Secondary Accidents", International Rail Safety Conference,
12. 조현직, 구정서, 김운곤, 송달호 (2008), "철도안전법 시행지침 16조의 충격가속도 평가를 위한 객차의 데이터 필터링 연구", 한국철도학회 08 춘계학술대회 논문집