

고속전철 TGV-K 전체 차량에 대한 충돌안전도 해석 연구

Collision Analysis of Full Rake TGV-K for crashworthy design

구정서*, 송달호*

J. S. Koo, D. H. Song

ABSTRACT

Described in this paper is the result of a study on collision analysis of TGV-K using 1-dimensional model for crashworthy design. Crashworthy design of the front end is very important because majority of the impact energy (more than 70%) is absorbed by the crush of the front end when the train is collided with an obstacle like a tank lorry. Guideline for the crashworthy design can be described from the collision analysis of the whole train using a 1-dimensional model. Since the headstock of TGV-K is not designed in a crashworthy point of view, a conceptual design of the headstock to improve crashworthiness is suggested and evaluated using 1-dimensional collision analysis. The suggested design, which adopts an energy absorber and a crashworthy headstock, shows a good behaviour on the accident scenario of SNCF (collision at 110 km/hr against a movable rigid mass of 15 ton).

1. 서론

자동차 분야에서는 충돌안전도 설계가 매우 중요한 구조설계개념으로 자리잡고 있으나, 철도차량 분야에서는 충돌안전도를 고려한 설계개념의 도입은 최근의 일이다. 지난 10여년간 철도차량 선진국에서는 열차충돌에 관한 많은 연구를 수행하였고, 최근에는 충돌안전도 개념의 설계가 이루어진 차량들이 운행되고 있다. 대표적으로 GEC Alstom에서 개발한 TGV-2N(Duplex)을 들 수 있으며, 동력차의 전두부(6 MJ)와 후미부분 및 동력객차의 승객이 탑승하지 않는 영역에 대한 충격에너지 흡수능력을 획기적으로 제고시킨 것으로 알려지고 있다. 또한 최근에는 2000년대 초반에 운행 예정으로 개발중인 TGV-NG에 대하여 새로운 개념의 에너지 흡수구조를 도입하여 전두부를 설계하고 있다[1].

일반적으로 철도차량의 충돌사고는 대규모의 참사를 불러 일으키는 경우가 많고 전체 차량의 운동에너지 또한 엄청나기 때문에 자동차에 비하여 충돌사고시 위험도가 대단히 높고 차체구조의 안전도 설계의 효과도 미미할 것으로 생각하기 쉽다. 그러나 운전자는 자동차에 비하여 심각한 위험에 노출되는 경우가 있지만, 승객의 경우에는 적절한 안전도 설계에 의하여 매우 높은 안전성을 확보할 수 있다[2]. 이것은 자동차의 충돌이 대개 100 msec 이내에 완료되는데 비하여 철도차량의 충돌은 1~2 sec에 걸쳐서 연쇄충돌의 형태로 이루어지고, 선두차량이 후속차량의 충격력을 완화시켜 주는 역할을 하기 때문이다. 그러나 철도차량에 안전도 설계를 하지 않은 경우에는 연쇄충돌시 인접한 차량들 사이에 타고오름(overriding)현상이 발생하거나 쉽게 탈선하여 전복사고로 이어질 가능성이 매우 높다[3]. 특히 타고오름 사고는 좌굴강도가 매우 큰 언더 프레임 부분이 상대적으로 좌굴강도가 약한 벽 구조를 절단하면서 객실로 침범하여 대형참사를 유발하기도

* 한국기계연구원 신교통연구부, 정희린

한다[4]. 그리고, 충돌안전도 설계는 경충돌사고시, 차체의 파손을 보수가 용이한 소수의 흡수 구조에 국한시켜서 수리비용을 절감하여 주고, 고가의 내장품에 작용하는 충격력을 완화하여 물리적인 피해를 저감시켜주는 기능도 있다. 철도차량은 승객의 탑승거리기준의 사고율은 매우 낮지만 내구수명과 운행거리를 고려할 때 차량에 대한 사고율은 결코 낮은 것이 아니며, 안전도를 고려한 설계 및 제작비용도 전체 차량가격에 대비하여 1% 이하로 낮은 편이어서 경제성이 높은 설계기법으로 알려져 있다[5].

철도차량은 자동차와 달리 다수의 차량이 연결되어 있으므로, 각 차량에 대하여 안전도를 고려한 구조설계가 가능하기 위해서는 충돌에 대한 각 차량의 동력학적 거동이 우선적으로 해석되어야 한다[6]. 따라서 다물체 동력학을 이용한 전체 차량의 충돌거동 해석과 각 차량의 3차원 보 및 셸 모델 충돌거동 해석을 이용한 축차적 설계기법을 사용하게 되는데, 이 기법을 2단계 접근 방법(two level approach)이라고 부르며 철도차량의 안전도 설계와 자동차의 안전도 설계를 구분 지을 수 있는 중요한 방법론적 차이라고 할 수 있다[7]. 이것은 철도차량의 경우에는 차량 1량에 50만개(자동차의 경우 20만개 이하) 정도의 셸 요소를 사용하여 모델링하여야 하는 등 문제의 복잡성으로 인하여 여러 차량을 3차원 셸 모델을 이용하여 동시에 해석하는 것이 불가능하기 때문이다. 따라서 다물체 동력학을 이용한 전체 차량의 해석은 철도차량의 안전도 설계의 승패를 좌우하는 매우 중요한 기술이라 할 수 있다.

충돌시에 전체 차량의 에너지 흡수거동과 각 차량의 축하중 및 가속도를 계산하기 위해서는 막대 요소, 스프링-댐퍼 요소, 질량 등으로 단순화된 1차원 해석 모델을 주로 사용하지만, 타고오름현상과 연결부위에 부과되는 충격력을 구하기 위하여 2차원 다물체 동력학 해석 모델을 이용한다. 현재 유럽에서는 충돌에 의한 탈선거동 등을 해석할 3차원 다물체 동력학 프로그램을 개발 중에 있으나, 실제의 설계에는 적용하지 못하고 있다.

본 연구에서는 우리나라에 도입되는 TGV-K의 동력차 전두부 구조(특히 헤드스톡)가 충돌안전도 관점의 설계가 이루어지지 못하였으므로 이것을 개선할 수 있는 충돌안전도 전두부 구조의 개념 설계를 제시하고 1차원 동력학적 해석을 통하여 충돌안전도를 평가한다. 이 연구는 국가선도 기술개발(G7)과제로 수행되고 있는 한국형 차세대 고속전철의 충돌안전도 해석에 관한 연구로 이루어지고 있는데 전두부 구조의 에너지 흡수능력에 대한 합리적인 설계 가이드 라인을 제공하기 위한 것이다.

2. 충돌안전도를 고려한 전두부 구조

그림1 및 2는 TGV-K의 전두부 충격에너지 흡수구조의 개요를 나타낸 것이다. 열차의 체결시 발생하는 충격력은 커플러에 의하여 흡수되지만 충돌사고의 경우에는 커플러의 에너지 흡수력만으로는 부족하고 헤드스톡과 알루미늄 하니컴이 주요한 에너지 흡수용 구조가 된다.

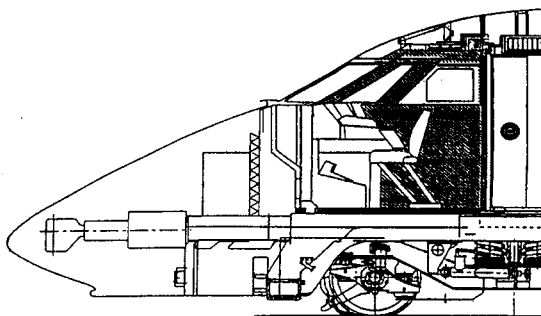


그림1. TGV-K의 전두부

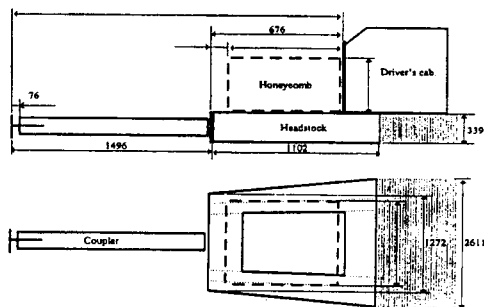


그림2. TGV-K의 전두부 충격 흡수 구조

그림 3은 TGV-K의 전두부 충격 흡수구조를 해석하여 구한 하중-변위 관계 곡선인데 헤드스톡과 하니콤의 압괴하중이 10,000 kN 정도로 운전실의 압괴하중 6,000 kN보다 높아서 에너지 흡수구조의 역할을 제대로 할 수 없음을 알 수 있다. 이것은 처음부터 TGV-K의 전두부 구조에 충돌안전도 설계를 고려한 것이 아니고, 사후에 운전자 보호를 위하여 운전실 전방에 알루미늄 하니콤을 부착하였기 때문이다.

그림 4는 TGV-K의 전두부 구조에 대하여 충격에너지 흡수에 유리하도록 새로운 개념의 안전도 설계를 도출한 것이다. 본 연구에서 도출된 전두부 에너지 흡수구조의 순차적 압괴 시나리오는 다음의 4단계로 구성된다.

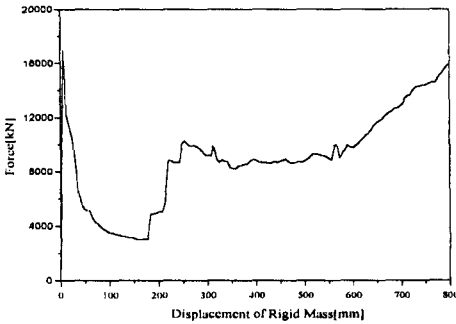


그림3. TGV-K 전두부의 충돌거동

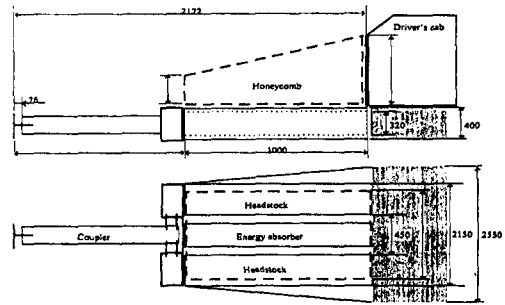


그림4. 안전도를 고려한 전두부 구조

- 단계 1: 2,000 kN 이하에서 유압식 카트리지에 의하여 흡수. 변형 길이는 120mm 이며, 충돌속도에 따라 에너지 흡수량이 변함.
- 단계 2: 2,000 kN의 충격하중에서 커플러의 고정핀 절단.
- 단계 3: 2,000 kN의 충격하중에서 금속튜브의 팽창 또는 복합재료튜브의 압괴에 의하여 에너지 흡수(1.6 MJ). 튜브의 압괴길이 800 mm.
- 단계 4: 5,000kN의 충격하중에서 알루미늄 하니콤과 헤드스톡이 동시에 압괴(4.5 MJ). 헤드스톡의 압괴하중 3,000 kN, 하니콤의 압괴하중 2,000 kN, 압괴길이 900 mm.

위에서 도출된 에너지 흡수 시나리오는 동력차 전두부의 공간 및 구조 배열을 고려한 수회의 시행착오적 설계와 전체 차량의 1차원 해석을 통하여 도출된 것인데, 다음 절에서 기존의 TGV-K의 전두부와 새로운 개념의 설계를 전체 차량의 1차원 충돌해석으로 비교 평가한다.

3. TGV-K 모델을 이용한 1차원 해석



그림5. TGV-K의 전체 차량 1차원 모델링 개요

그림 5는 TGV-K의 충돌사고를 시뮬레이션하기 위하여 전체 차량을 막대 요소, 스프링 요소, 덤

퍼 및 집중 질량 등을 사용하여 1차원 동역학 모델을 만든 개요를 나타낸 것이다. 동력차와 동력 객차는 여러 개의 탄소성 막대 요소를 사용하여 압괴거동을 잘 표현할 수 있도록 하였고, 객차의 경우에는 차량 전체를 1개의 탄소성 막대 요소로 모델링 하였다. 또한 대차, 링 구조와 같이 무거운 구조는 집중질량으로, 여기에 부착되어 있는 연결장치, 스프링, 댐퍼들은 비선형 스프링-감쇠 요소로 동력학적 모델을 구성한다.

충돌해석을 위하여 15톤의 정지한 강체가 110 km/h 속도의 철도차량과 충돌하는 사고를 가정한 프랑스 SNCF의 시나리오를 사용한다. 이 사고 시나리오는 전용선에서 고속으로 주행하던 고속 전철이 도시 근교의 일반철로에서 160 km/h 정도로 감속한 상태에서 500m 전방의 장애물을 발견하여 급제동하였을 때의 충돌속도로 간주되고 있다.

앞에서 도출한 전두부 충격 흡수구조의 개념설계와 기존 TGV-K의 전두부구조를 사용하여 전체 차량의 1차원 충돌거동을 계산하여 전두부의 압괴특성, 각 차량에 부과되는 충돌하중, 운전자 및 승객의 충돌가속도 등을 서로 비교하였다. 그림 6은 충돌시 강체 장애물에 작용하는 충격력을 기존의 전두부와 안전도를 고려한 전두부 모델에 대하여 비교하여 나타낸 것이다. 기존의 전두부 모델에서는 헤드스톡(하니콤 포함)의 압괴하중이 높으므로 10,000 kN 정도의 큰 충격력이 발생되지만, 안전도를 고려한 전두부 모델에서는 5,000 kN 이하의 충격력만 작용된다. 그림 7은 충돌시 전두부구조에 발생하는 충격력을 나타낸 것이다.

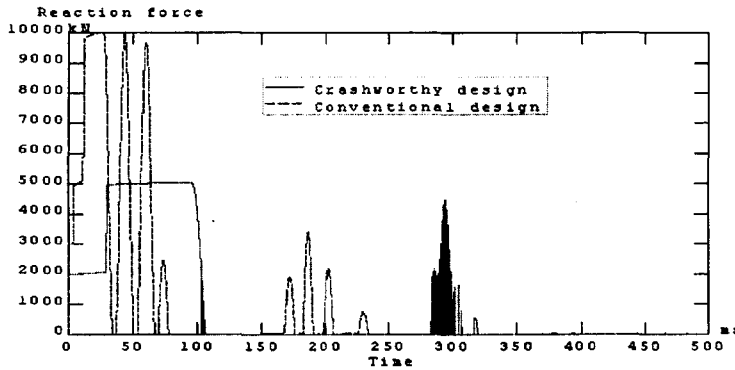


그림6. 충돌시 강체 장애물에 작용하는 충격력

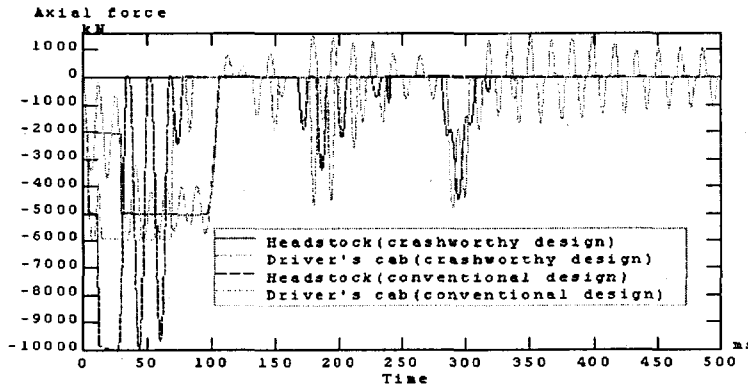


그림7. 충돌시 전두부 구조에 작용하는 충격력

그림 8은 헤드스톡/하니콤과 운전실의 압괴에 의하여 흡수되는 내부 에너지를 나타낸 것이다.

안전도를 고려한 전두부 모델에서는 헤드스톡과 하니콰에서 6 MJ의 충격에너지를 흡수하고 운전실은 에너지를 흡수하지 않는다. 그러나 기존의 전두부 모델은 헤드스톡과 하니콰에서 3 MJ을, 운전실에서 2.3 MJ의 충격에너지를 흡수한다. 이것은 운전실의 압괴에 의하여 운전자의 안전에 심각한 영향을 미칠 수 있음을 나타내고 있다.

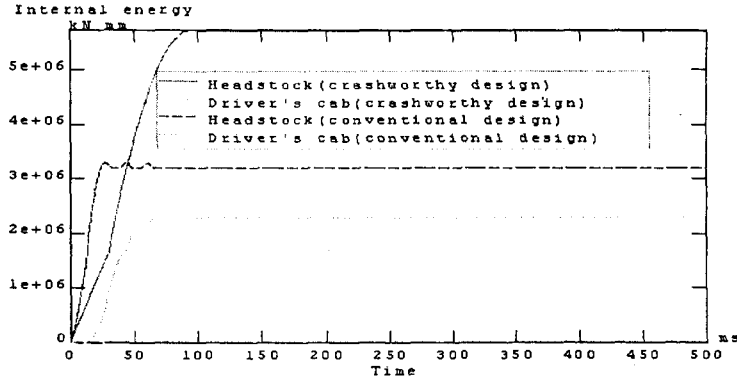


그림8. 전두부의 압괴에 의하여 흡수되는 내부 에너지

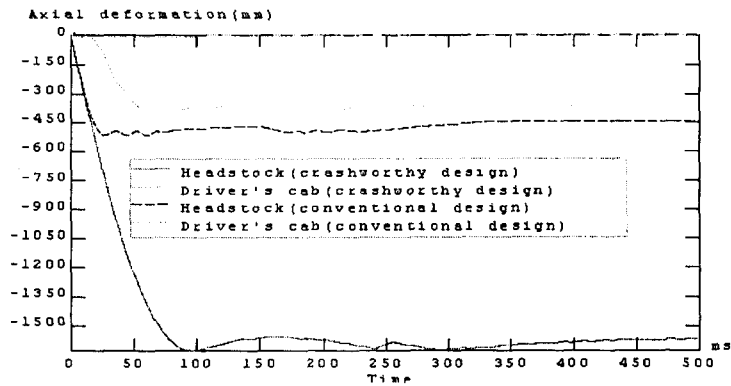


그림9. 전두부 구조의 변형량

그림 9는 전두부 구조의 변형량을 나타낸 것이다. 안전도를 고려한 전두부 모델에서는 운전실 구조의 변형이 탄성범위내에서 발생하지만, 기존의 전두부 모델에서는 350 mm 이상의 압괴가 운전실에 발생한다. 그림 10은 운전실에 발생하는 충격 가속도를 40 Hz로 필터링하여 나타낸 것이다. 안전도를 고려한 전두부 모델에서는 운전실에 최대 5.5 g 정도의 충격가속도가 발생하지만 기존의 전두부 모델에서는 65 g 이상의 충격가속도가 발생하여 운전자의 안전에 큰 문제를 야기시킬 수 있다.

그림 11은 동력차 차체와 사이드 버퍼(buffer)의 변형량을 나타낸 것이다. 차체 중앙부위의 변형은 안전도를 고려한 모델에서는 15 mm 정도의 압괴가 발생하고, 기존의 전두부 모델에서는 50 mm 정도의 압괴가 발생하여 안전도를 고려한 설계가 좋은 특성을 보여 준다. 그러나 동력차 차체에 압괴가 발생하지 않도록 설계하려면 전두부의 에너지 흡수능력을 약간 높여야 할 것으로 생각된다. 사이드 퍼퍼의 압괴는 두 가지 해석 모델 모두에 대하여 280 mm 이하로서 사이드 버퍼의 최대압괴길이 400 mm를 넘지 않으므로 사이드 버퍼의 에너지 흡수능력은 충분하다. 또한 두 가지

모델 모두 동력차의 후미구조에는 압괴가 발생하지 않는다.

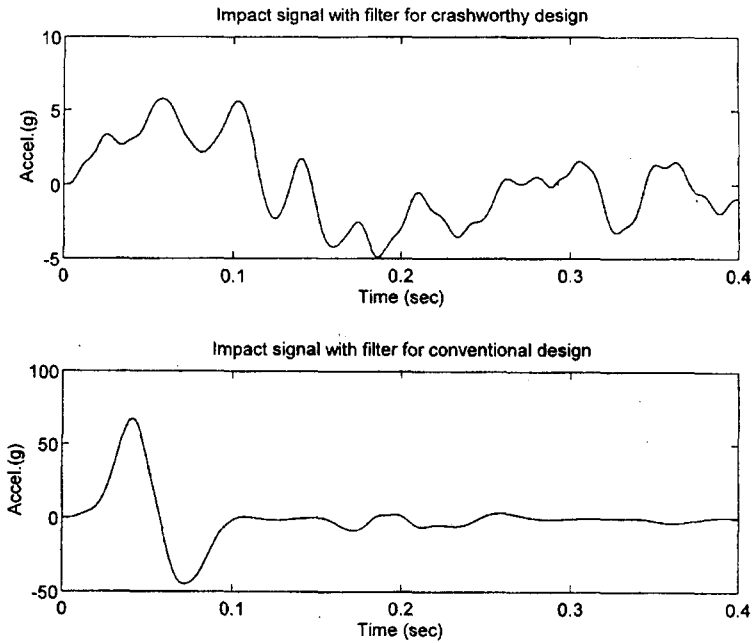


그림10. 운전실에 발생하는 충격가속도

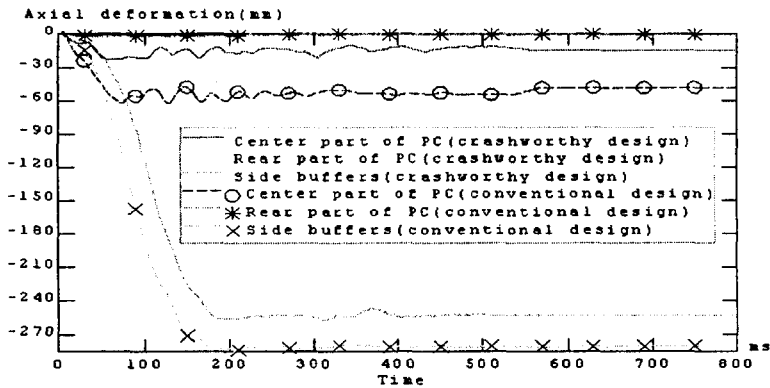


그림11. 동력차 차체와 사이드 버퍼의 변형량

그림 12는 전방 동력객차의 승객탑승공간에 발생하는 가속도를 나타낸 것이다. 안전도를 고려한 전두부 모델에서는 최대 2.9 g의 가속도가 발생하고, 기존의 전두부 모델에서는 3.5 g의 가속도가 발생한다. 이러한 가속도 값은 SNCF 충돌안전도 설계에서 권장하고 있는 5 g 이하의 가속도 조건을 만족시킨다.

그림 13은 17번 객차에 발생하는 가속도를 보여 주는 것이다. 17번 객차는 후방에 질량이 큰 동력객차 및 동력차와 연결되어 있으므로 비교적 큰 가속도가 유발된다. 본 해석에서는 두 가지

모델 모두 최대 가속도가 5 g 이하인 유사한 가속도 곡선을 보여주고 있다. 17번째 객차에 발생하는 가속도의 크기는 전방 동력객차의 가속도보다 크지만 가속도의 작용시간을 고려한 충격량은 그 반대인 것을 알 수 있다.

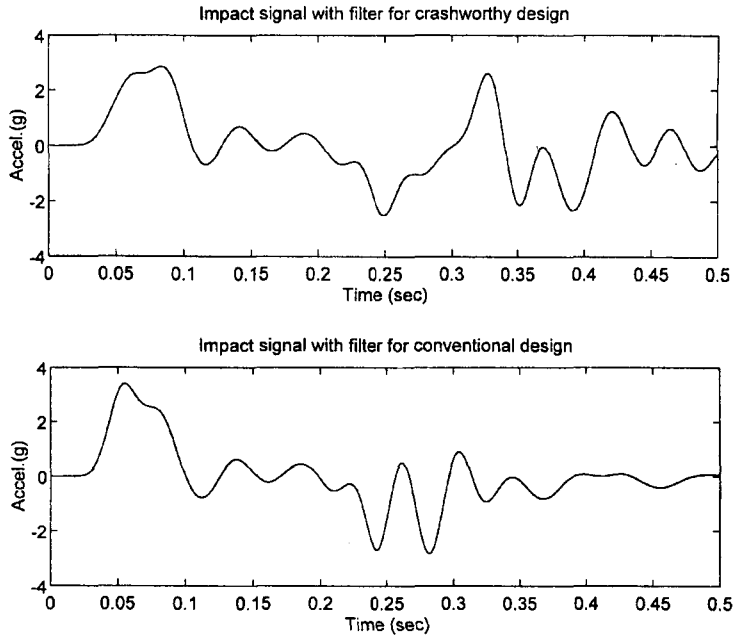


그림12. 전방 동력객차의 가속도

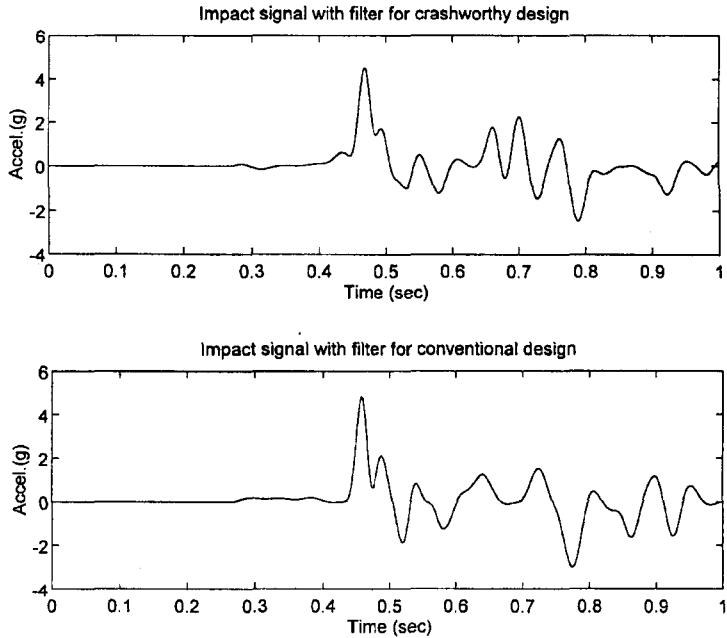


그림13. 17번 객차의 가속도

4. 결론

TGV-K의 전체 차량에 대하여 SNCF의 사고 시나리오를 적용한 1차원 충돌해석을 수행하였다. 기존의 TGV-K 전두부 구조와 충돌안전도를 고려한 전두부 설계개념에 대하여 전체 차량의 1차원 충돌해석을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 기존의 TGV-K는 전두부의 에너지 흡수능력이 부족하고 충돌시 압괴하중이 매우 높아서 운전자의 탑승공간이 압괴(350 mm 이상)되고, 큰 충격가속도(65 g 이상)가 발생하는 현상을 보였다.
- 2) 안전도를 고려한 전두부는 6 MJ 이상의 에너지 흡수가 가능하며, 충돌사고시 충분한 충격에너지를 흡수하여 운전실의 압괴가 발생하지 않으면서 충격가속도를 최대 5.5 g 이하로 관리할 수 있다.
- 3) 전방의 동력객차에 발생하는 충격가속도는 기존의 전두부 모델에서는 최대 3.5 g의 충격가속도가, 안전도를 고려한 설계 모델에서는 최대 2.9 g의 충격가속도가 발생하여 두 가지 해석 모델 모두 SNCF의 가속도 제한 규정을 만족한다.
- 4) 후방에 질량이 큰 동력객차 및 동력차와 연결되어 있는 17번 객차에는 비교적 큰 가속도가 유발되는데, 해석 결과 두 가지 모델 모두 최대 가속도가 5g 이하이며 유사한 가속도 곡선을 나타내고 있다.

이상의 결과를 요약하면 전두부의 안전도 설계는 동력차의 충돌피해를 저감시키는데 매우 중요하며, 특히 운전자의 생존공간 확보와 충격가속도 저감에 결정적인 역할을 한다. 본 연구에서 제안한 전두부 충격에너지 흡수구조는 SNCF의 충돌안전도 설계 가이드 라인을 잘 만족시키고 있음을 알 수 있다.

참고문헌

1. 규정서 외8(1997), "고속전철의 충돌안전도 해석 기술 개발에 관한 연구보고서", 한국기계연구원.
2. 김동성, 송달호, 박용환, "고속철도 안전기술 개발을 위한 조사사업", 한국기계연구원.
3. L. T. Kisielewicz, and K. Ando(1993), "Crashworthy Rolling Stocks", PUCA'93, pp.73-81.
4. J. H. Lewis(1994), "Development of Crash Vehicle Structures for Railways", WCRR'94, pp.893-900.
5. 백남욱, 장경수, 김효식, 강부병(1997), "철도차량 총서", 기전연구사.
6. A. Marissal, B. Marguet, P. Drazetic, and Y. Ravauld(1992), "Comportement au Choc de Vehicules Guides", Revue Technique Gec Alsthom, No.9, pp.55-62.
7. L. T. Kisielewicz(1992), "French Design Practice and Applications for the Crsahworthiness of Rolling Stocks", PUCA'92, pp.17-23.