

# 고속전철 TGV-K 전체 차량의 2차원 충돌해석

## 2-Dimensional Analysis of Full Rake TGV-K on Crashworthiness

구정서\*, 송달호\*  
J. S. Koo, D. H. Song

### ABSTRACT

A study on collision analysis of TGV-K using a 2-dimensional model is described to evaluate its crashworthiness. Two-dimensional analysis gives good information on overriding behaviour and impact forces applied to interconnecting devices such as side buffers, ball & socket joints, hooks, pins, and fingers. Since the headstock of TGV-K is not designed in a crashworthy point of view, its conceptual design for KHST(Korean High Speed Train), under development, is suggested to improve crashworthiness. The suggested design, which adopts an energy absorber and a crashworthy headstock, is compared with the conventional headstock on dynamic behaviour to the vertical direction under the accident scenario of SNCF (collision at 110 km/h against a movable rigid mass of 15 ton). It is concluded that the design modification make little difference in vertical motion. To evaluate validation of the 2-dimensional model, the results for longitudinal motion is compared with those of 1-dimensional one. It is found that the two results are in good agreements.

### 1. 서론

최근에 발생한 독일 ICE의 대형 참사로 인하여 고속전철의 안전도에 대한 경각심이 고조되고 있다. 사고의 직접적인 원인은 탄성차륜의 파손에 의한 탈선인 것으로 밝혀졌으나 대형참사에 이르게 된 주요원인은 동력차와 객차 사이의 차간연결장치가 분리된 것에 있다는 것이 증론이다. 현재 주요한 철도차량 설계 규정(UIC 등)은 정상적인 운행 과정에서 사고가 발생하지 않도록 하는 개념으로 제정되어 있으므로, 이 규정에만 의존하여 설계된 차량은 예상하지 못한 원인에 의하여 열차가 비정상적인 상태로 돌입하게 되면 어떠한 거동을 나타내게 될지 예측이 불가능하고 대비책도 마련되어 있지 못하다. 따라서 최근 주요 철도 선진국들은 이 문제점을 고려할 수 있는 새로운 설계규정의 제정을 서두르고 있다. 실제로 프랑스, 영국, 미국 등은 90년대부터 내부적으로 충돌안전도 설계지침을 제정하여 국내 운행차량에 적용하도록 하고 있으며, 이러한 지침에 의하여 제작되어 운행되는 차량도 여러 종류(TGV-Duplex, TER X7250 등)가 있다[1-5].

철도차량은 자동차와 달리 다수의 차량이 연결되어 있으므로, 각 차량에 대하여 안전도를 고려한 구조설계를 하려면 전체차량에 대한 충돌해석을 수행하여 각 차량의 동력학적 거동을 먼저 해석하여야 한다[5]. 따라서 다물체 동력학을 이용한 전체 차량의 충돌거동 해석과 각 차체의 3차원 보 및 셸 모델 충돌거동 해석을 이용한 축차적 설계기법을 사용하게 되는데, 이 기법을 2단계 접근방법(two level approach)이라고 부르며 철도차량의 안전도 설계와 자동차의 안전도 설계를 구분 지을 수 있는 중요한 방법론적 차이라고 할 수 있다[6]. 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 불가능하

\* 한국기계연구원 신교통기술연구부, 정회원

기 때문이다. 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, 타고오름 현상과 연결부위에 부과되는 충격력을 구하기 위하여 2차원 다물체 동역학 해석 모델을 이용한다.

본 연구에서는 경부 고속전철에 도입된 TGV-K의 차량 편성에 2차원 모델링하여 충돌해석을 수행하고, G7 과제를 통하여 개발하고 있는 한국형 고속전철의 전두부 충격흡수장치를 적용한 경우 충돌거동에 어떠한 변화가 있는지를 검토하였다. 이 연구는 KHST 전두부 구조의 에너지 흡수설계를 평가하고 차간연결장치의 안전도 설계를 위한 가이드 라인을 제공하기 위한 것이다.

## 2. TGV-K의 2차원 충돌해석 모델링

전체차량의 1차원 동역학적 모델을 이용하여 특정한 사고 시나리오에 대한 충돌해석을 수행함으로써 각 차량 차체구조의 에너지 흡수 능력, 탑승자의 생존공간 확보 및 충격가속도 크기 등을 평가할 수 있다[7]. 이러한 1차원 해석은 전체 철도차량에 대하여 설계 가이드 라인을 도출하는데 대단히 중요하지만, 각 단위 차량간의 타고오름 현상과 각 차량 상이의 차간연결기 부품 및 지지 구조에 발생하는 충격력이 전파되는 과정을 분석할 수 없다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 전체차량 편성에 대하여 2차원 모델을 구성하여 충돌해석을 수행하게 되는데, TGV-K와 같이 20편성이나 되는 철도차량에 대하여 2차원 동역학적 모델을 구성하는 것은 매우 복잡하고, 동시에 많은 양의 동특성 관련 기초 자료를 준비하여야 한다.

본 연구에서는 모델링의 복잡성을 완화시키면서도 타당성 있는 해를 얻기 위하여 2차원 모델과 1차원 모델을 혼합한 모델을 사용하였다. KHST의 설계 사고 시나리오로 사용하고 있는 SNCF 시나리오(110km/h로 15ton의 강체장애물과 충돌)는 충돌시 열차의 전방에 위치한 몇몇 차량에 큰 충격력을 미치지만 후위의 차량에는 비교적 적은 영향을 미치는 것을 감안하여 전방의 동력차, 동력객차, 후속 객차 3량은 2차원 모델을 구성하고 나머지 차량들은 1차원 모델을 적용한다. 대차, 차간 연결부품 등에 사용된 스프링, 댐퍼 등은 정상작동 영역에서는 일반 차량동역학 해석에서 사용하는 값을 사용하고, 충돌에 의하여 정상영역을 벗어나는 구간에 대해서는 정상영역 값의 10배 이상되는 매우 큰 값을 사용한다. 또 TGV-K의 전두부 압괴특성(conventional design)은 그림 1과 같이 정의되고, KHST에 사용될 전두부의 압괴특성(crashworthy design)은 그림 2와 같이 정의되었다[7].

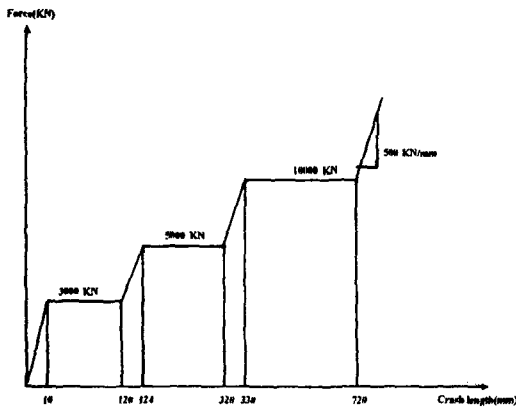


그림 1. 기존 전두부의 압괴거동

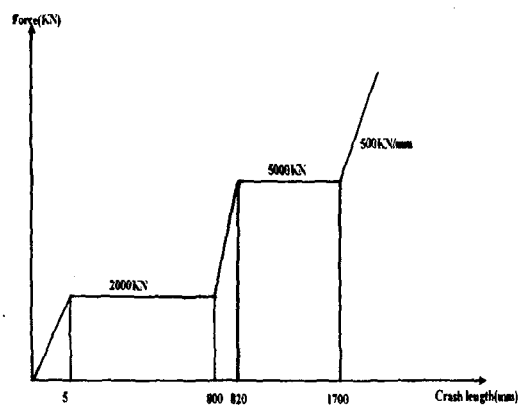


그림 2. 충돌을 고려한 전두부의 압괴거동

그림 3은 TGV-K의 전방 동력차, 그림 4는 후속하는 동력객차, 링구조, 객차 등을 강체와 비선형 특성의 스프링, 댐퍼 등으로 동역학 해석 모델을 구성한 것이다. 여기서 차륜과 레일 사이

의 접촉조건은 인장에 대해서는 매우 연성이고, 압축에 대해서는 강성인 스프링으로 처리하였다. 그림 3의 주요 스프링, 댐퍼 요소는 1차, 2차 현가장치, 피봇, 하니콤 구조, 커플러 및 헤드스톡, 사이드 버퍼 등이며, 그림 4의 주요 스프링 댐퍼 요소는 1차, 2차 현가장치, 피봇, ball & socket 조인트, hook, finger, pin, 상부 4-댐퍼, 하부 4-댐퍼 등이다. 이렇게 구성된 모델은 ESI 사의 PAMCRASH 소프트웨어를 사용하여 충돌해석을 수행한다.

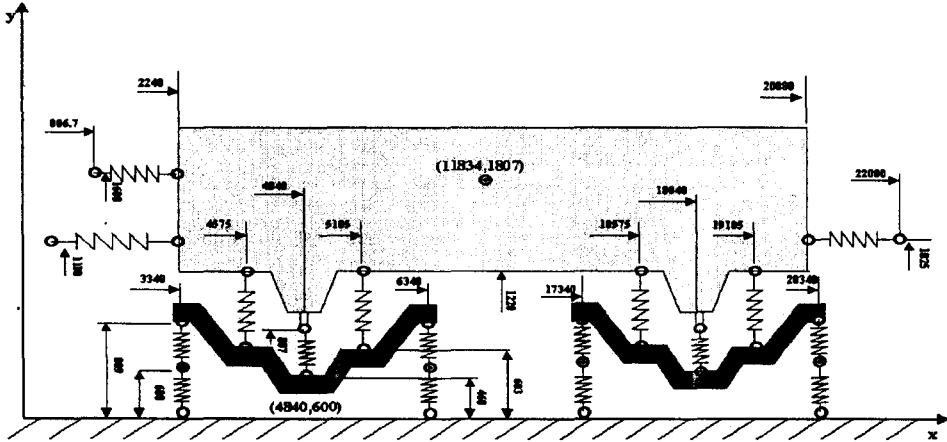


그림 3. 동력차의 동력학 해석 모델

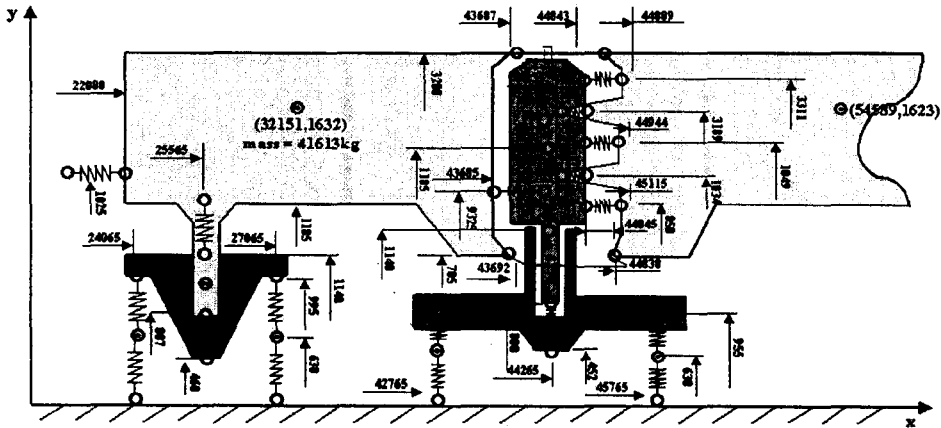


그림 4. 동력객차 및 객차의 동력학 해석모델

### 3. TGV-K의 2차원 충돌 해석

그림 3, 그림 4와 같이 구성된 동력학적 모델을 해석하면 대차와 차체의 상하운동, 연결장치나 지지구조에 부과되는 상하방향의 충격력 등과 같은 1차원 해석에서 얻을 수 없었던 결과를 얻을 수 있다. 그림 5는 SNCF 사고 시나리오 하에서 기존의 전두부 설계와 충돌을 고려한 전두부 설계에 대하여 강제 장애물의 충격력을 해석하여 비교한 것이다. 기존의 설계에서는 10,000 kN 이상의 큰 충격력이 작용하지만, 충돌을 고려한 설계에서는 운전실의 압괴하중 6,000 kN 보다 낮은 5,000 kN의 충격력이 발생한다. 그림 6은 충돌에 의하여 흡수된 변형 에너지를 보여주는 것으로, 기존의 전두부에서는 충돌 초기의 짧은 시간에 많은 에너지를 흡수하지만 충돌 설계가 고려된 전두부에서는 서서히 충격 에너지를 흡수하고, 시간이 경과하면 전체적으로 두 설계가 거의 동일한 량의 에너지를 흡수하게 된다. 그림 7은 기존의 전두부와 충돌을 고려한 전두부에 대하여

헤드스톡과 하니콤의 압괴를 비교한 것이다. 충돌을 고려한 전두부는 헤드스톡과 하니콤의 압괴량이 각각 1,650 mm, 850 mm으로 기존의 전두부의 450 mm, 750 mm보다 거의 2배나 되는 좋은 특성을 보여주고 있다. 이때 헤드스톡과 하니콤에 부과되는 각각의 축방향 충격하중을 그림 8에 비교하여 나타내었는데, 기존의 전두부에서는 헤드스톡과 하니콤 각각 5,000 kN 이상의 큰 충격력이 발생하였으나 충돌을 고려한 전두부에서는 헤드스톡에서 3,000 kN, 하니콤에서 2,000 kN 정도의 충격력이 발생하여 설계 제한조건을 만족시킨다.

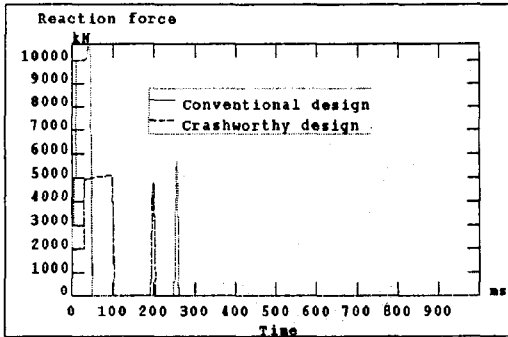


그림 5. 장애물의 충격력

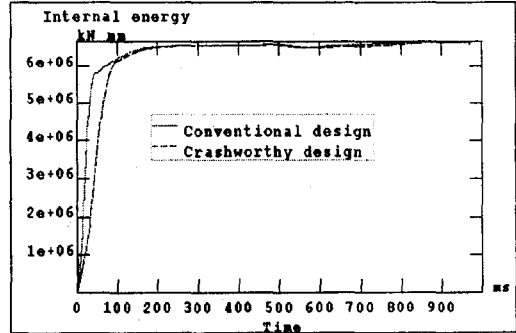


그림 6. 내부 에너지의 변화

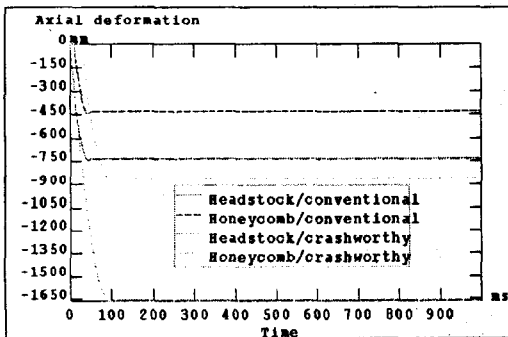


그림 7. 전두부 구조의 변형량

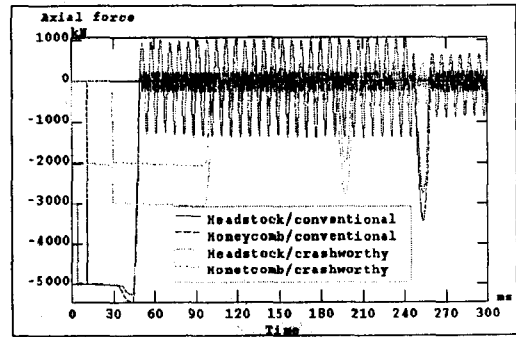


그림 8. 전두부의 충격력

그림 9는 SNCF 사고 시나리오를 사용하여 동력차와 동력객차 사이에 취부되어 있는 사이드 버퍼의 수직 상대변위를 구한 것인데, 다수의 사상자가 발생할 수 있는 타고오름에 의한 압괴의 발생 여부를 예측할 수 있다. 기존의 전두부와 충돌을 고려한 전두부의 경우 모두 45 mm 이하의 수직 상대변위를 나타내고 있는데, 이것은 anticlimbing grip에서 수직방향으로 허용되는 상대변위의 여유공차인 80 mm 이하이므로 사이드 버퍼에 수직하중이 거의 발생하지 않고 타고오름 현상도 발생하지 않음을 나타낸다. 또한 그림 9의 결과는 전두부의 충돌 에너지 흡수 설계 여부가 SNCF의 충돌 사고 시나리오 하에서 타고오름 현상에 큰 영향을 미치지 않음을 나타내고 있다.

전체차량의 1차원 해석에서는 차간 연결부품들의 취부 위치를 고려하여 모델링할 수 없으므로 이들 부품에 발생하는 충격력을 평가할 수 없다. 그러나 전체차량을 2차원으로 해석하면 각 차간 연결장치들에 발생하는 수직, 수평 충격력을 예측할 수 있고, 충돌 사고 발생 후 연결장치의 파손에 의한 차간 분리현상을 규명할 수 있다. 그림 10과 그림 11은 각각 SNCF 사고 시나리오 하에서 링 구조의 연결부품인 ball & socket 연결의 축방향 충격하중과 수직방향 충격하중을 나타낸다. 기존의 전두부를 적용한 해석이나 충돌을 고려한 전두부를 적용한 해석 모두 상당히 비슷한 결과가 얻어졌으며, 축방향에 대하여 최대 3,200 kN 정도, 수직방향에 대하여 최대 400 kN 정도의 충격력이 발생하였다. 그림 12는 hook에 발생하는 수직방향의 충격하중을 구한 것인데 기존의

전두부 모델에서는 최대 450 kN 정도, 충돌을 고려한 전두부 모델에서는 최대 300 kN 정도가 발생한다.

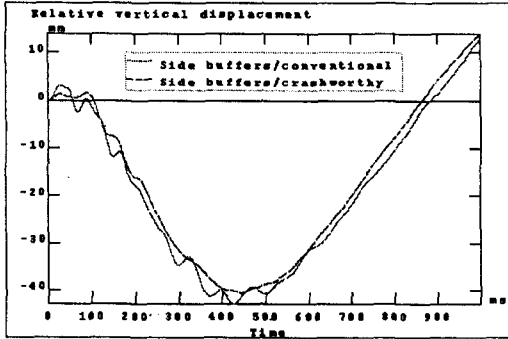


그림 9. 사이드 버퍼의 수직상대변위

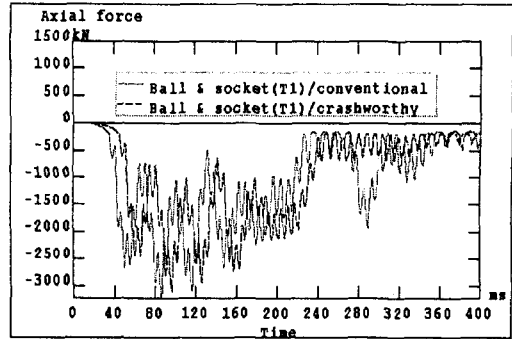


그림 10. Ball & socket 연결의 축하중

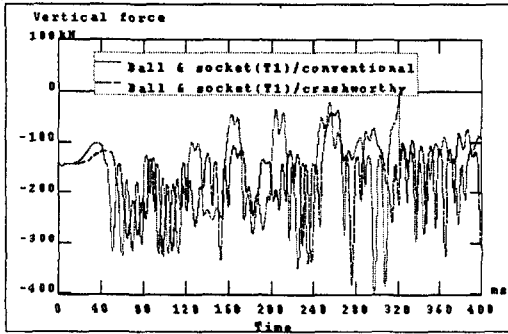


그림 11. Ball & socket 연결의 수직하중

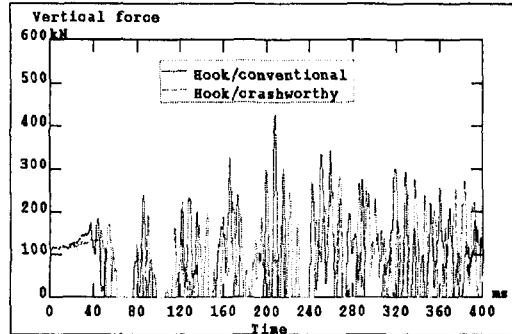


그림 12. Hook의 수직하중

그림 13과 그림14는 각각 링 구조의 상부 핀과 하부 핀에 작용하는 축방향의 충격하중을 구한 것인데, 동력차 전두부의 충돌안전도 설계 여부와 상관없이 상부 핀에는 최대 1,300 kN 정도, 하부 핀에는 최대 2,300 kN 정도의 충격력이 발생한다. 이렇게 구한 연결부위의 충격력을 이용하면 차간분리와 탈선을 방지하는데 유익한 충돌안전도 설계를 할 수 있다.

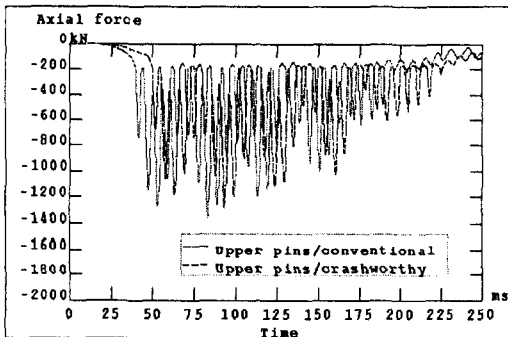


그림 13. 상부 pin의 축하중

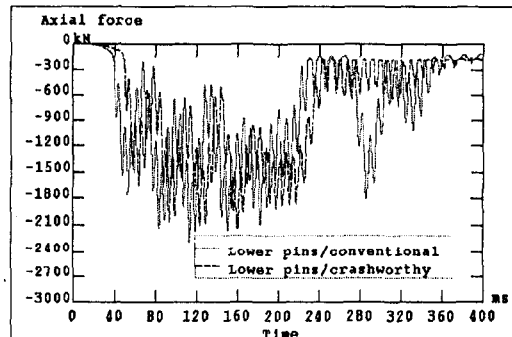


그림 14. 하부 pin의 축하중

그림 15~그림 17은 동력차, 동력객차, 후속객차에 발생하는 충격 가속도를 기존의 전두부 모델과 충돌안전도를 고려한 모델에 대하여 비교한 것이다. 동력차의 경우 기존의 모델에서는 17 g

정도의 큰 가속도가 발생하지만 충돌을 고려한 모델에서는 6 g 정도로 대폭 줄어든다. 이 가속도는 동력차를 강체로 가정했을 때 구해지는 동력차 전체에 대한 평균 값이라고 할 수 있다. 한편, 동력객차와 후속객차의 충격가속도는 기존의 설계와 충돌을 고려한 설계에서 유사한 결과를 나타내고 있다.

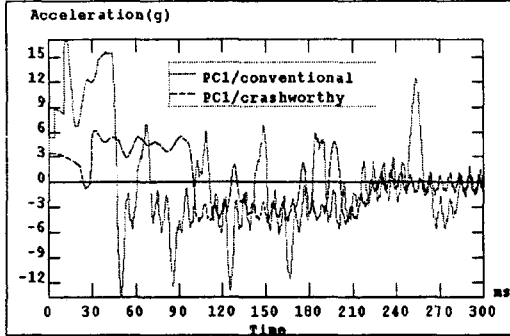


그림 15 동력차의 충격가속도

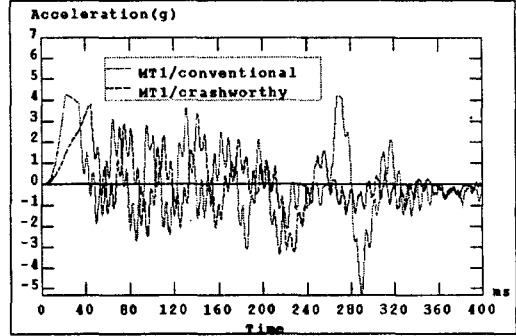


그림 16 동력객차의 충격가속도

#### 4. 2차원 해석과 1차원 해석의 비교

앞에서 구한 2차원 해석의 타당성을 객관적으로 검증하기 위해서는 실차시험을 실시해야 하지만, 현실적으로 매우 어려운 문제이다. 그러나 앞에서 해석한 1차원 모델과 2차원 모델은 독립적으로 구성된 것이기 때문에 이 결과들을 상호 비교함으로써 간접적으로 모델링의 타당성을 보일 수 있을 것이다. 만약 모델링이나 데이터 입력에 오류가 있다면 2차원 해석으로 구한 수평방향의 동적거동이 1차원 해석 결과와 부합하지 않을 것이다. 본 연구에서는 1차원 및 2차원 해석 결과를 비교하기 위하여 충돌을 고려한 전두부 모델에 대하여 SNCF의 사고 시나리오를 적용하여 해석한다.

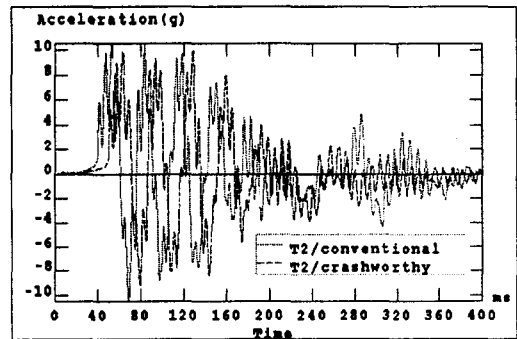


그림 17. 제2객차의 충격가속도

그림 18은 1차원 모델과 2차원 모델에 대하여 강체 장애물에 발생하는 충격력을 비교하여 나타낸 것이다. 2차원 모델의 경우에 충돌 지속 시간이 약간 짧아지는 현상을 제외하고는 거의 일치된 결과를 보여준다. 이러한 현상은 1차원 해석의 경우 차체가 탄소성 재료로 모델링되었으나 2차원 해석에서는 강체로 모델링되었기 때문에 발생한다. 그림 19는 충돌에 의하여 흡수된 변형 에너지인데, 1차원 해석과 2차원 해석의 결과가 잘 일치하고 있다. 그림 20과 그림 21은 각각 5번째 객차 및 17번째 객차에 발생하는 축방향의 충격하중을 1차원 해석과 2차원 해석에 대하여 비교한 것인데, 2차원 해석에서 충격파의 전파속도가 30 ms 정도 빠르고 크기도 400 kN 정도 작게 나타난다. 이러한 차이는 2차원 해석에서 처음 5량의 차량을 강체로 모델링하고 수직방향의 운동을 허용하였기 때문에 전체적으로 파동현상이 감소되고 충격력도 적게 나타나는 것으로 설명할 수 있다.

그림 22와 그림 23은 동력차와 제 5번 객차의 속도를 1차원 해석과 2차원 해석에 대하여 비교한 것이다. 1차원 해석의 경우는 차체가 탄소성 재료로 모델링되어 있으므로 2차원 해석에 비하여 파동이 심하게 나타나지만 평균적인 관점에서 보면 두 결과는 상당히 잘 일치한다는 것을 알 수 있다. 그림 24 ~ 그림 26은 각각 동력차, 동력객차, 제 5객차의 충격가속도를 1차원 해석과 2차원 해석에 대하여 비교하여 나타낸 것이다. 동력차의 경우에는 차체 재질의 영향을 많이 받으

므로 1차원 해석에서 증폭된 파동을 나타내지만, 평균적인 관점에서 보면 2차원 해석 결과와도 어느 정도 일치한다. 동력객차와 제 5객차의 충격가속도는 1, 2차원 해석이 모두 잘 일치하는 양상을 나타내고 있다.

이상과 같이 주요한 차체의 충격력, 속도, 충격가속도 등을 1차원 해석과 2차원 해석에 대하여 비교해 본 결과, 현상론적으로 설명할 수 없을 정도의 큰 오차는 발생하지 않았으며, 전반적으로 잘 일치하고 있다.

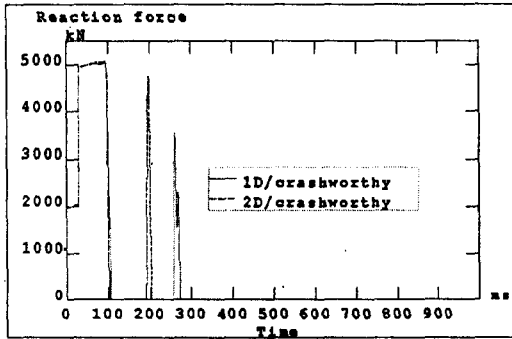


그림 18. 장애물의 충격력

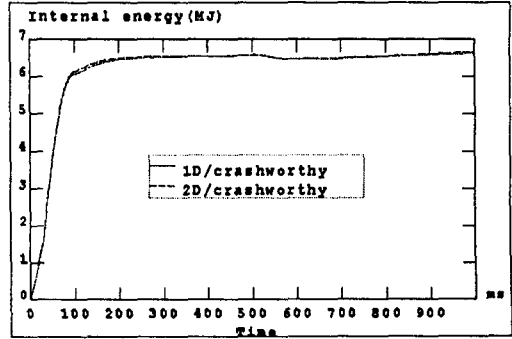


그림 19. 내부 에너지 변화

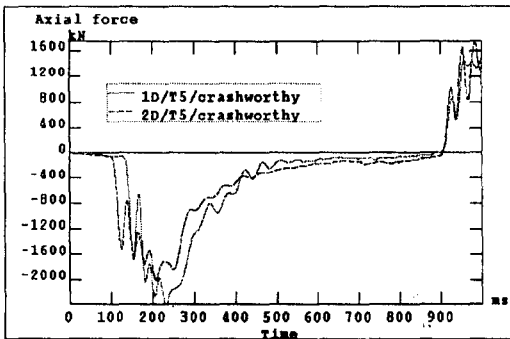


그림 20. 제 5객차의 축하중

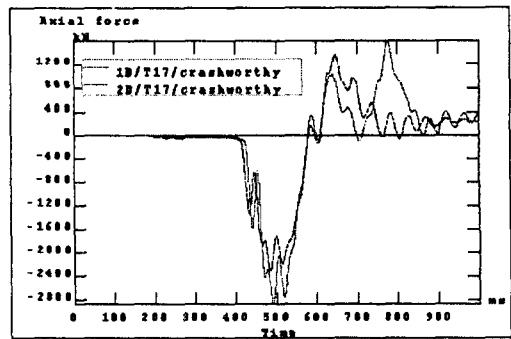


그림 21. 제 17객차의 축하중

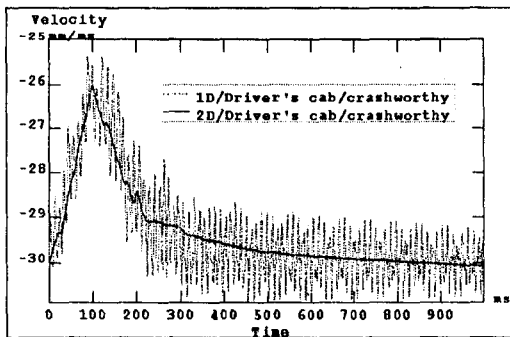


그림 22. 운전실의 속도

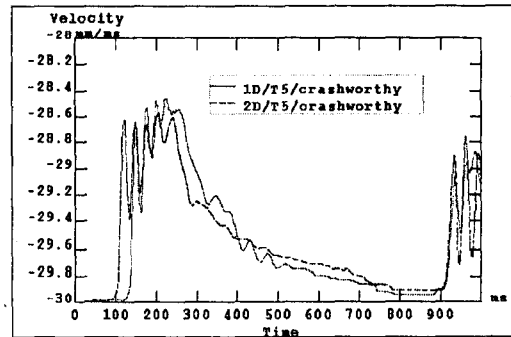


그림 23. 제 5객차의 속도

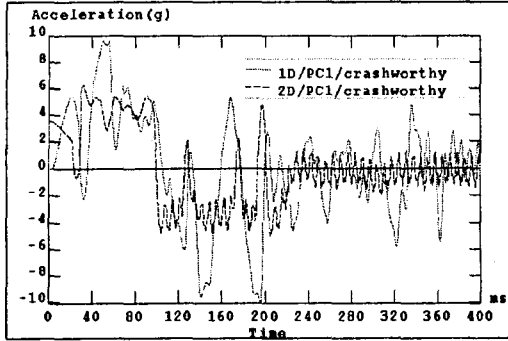


그림 24. 동력차의 가속도

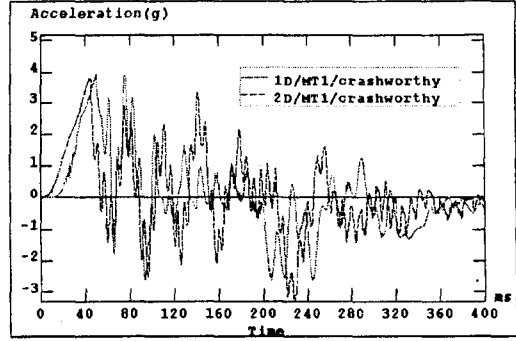


그림 25. 동력객차의 가속도

## 5. 결론

TGV-K의 전체차량 편성을 대상으로 2차원 해석모델을 구성하고 SNCF 사고 시나리오를 적용하여 충돌해석을 수행하였는데, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 전두부의 충돌설계 여부는 전체 차량의 축방향 충돌거동에는 큰 영향을 미치지만 수직방향의 거동에는 무시할 수 있을 정도의 작은 영향을 미친다.
- (2) SNCF 사고 시나리오에 의한 사이드 버퍼의 수직상대 변위가 45 mm 정도이므로 타고오름 현상이 발생할 우려는 없다.
- (3) Ball & Socket 연결의 수평, 수직방향 최대 충격하중은 각각 3200 kN, 400 kN 이고, hook의 최대 수직 충격하중은 400kN이다.
- (4) 전체차량의 1, 2차원 해석 모델을 비교한 결과, 동력차의 가속도 거동을 제외하고는 상당히 근접하는 결과를 얻을 수 있었는데, 이 결과는 2차원 모델에서 첫 5량의 차체가 강체로 모델링되었음을 감안하면 타당한 것으로 판단된다.

여기서 개발된 전체차량의 2차원 해석기술은 KHST의 충돌안전도 설계에 활용될 수 있는데, 특히 연결기 부품이나, 지지구조 등 충돌에 의하여 큰 힘이 발생하는 구조부품의 안전도설계에 유용하게 활용될 수 있다.

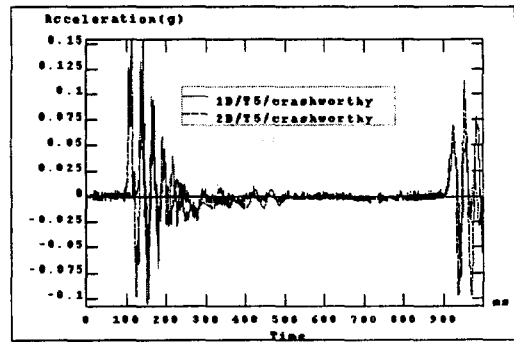


그림 26. 제 5객차의 가속도

## 참고문헌

1. 구정서, 송달호 외 7(1997), "고속전철의 충돌안전도 해석기술개발에 관한 연구보고서", 한국기계연구원.
2. 김동성, 송달호, 박용환(1997), "고속철도 안전기술개발을 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. 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.
6. 구정서, 송달호(1998), "고속전철 TGV-K 전체 차량에 대한 충돌안전도 해석연구," 철도학회 창립기념 1998년도 춘계학술대회논문집, pp.361-368.