동력분산형 고속전철의 충돌안전도 설계 가이드라인 도출
Derivation of the Standard Design Guidelines for Crashworthiness of the High-Speed EMU

김거영* 조현직** 구정서***
Kim, Geo-young Cho, Hyun-Jik Koo, Jeong-Seo

ABSTRACT

Through this study, standard design guidelines for the high speed EMU have been derived to meet the crashworthiness requirements of the Korean rollingstock safety regulation. The crashworthiness regulation requires some performance requirements for two heavy collision accident scenarios; a train-to-train collision at the relative speed of 36 kph, and a collision against a standard deformable obstacle of 15 ton at 110 kph. The complete train set will be composed of 2TC-6M with 13 ton axle load, different from KTX with the power car of 17 ton axle load. Using theoretical and numerical analyses, some crashworthy design guidelines were derived in terms of mean crush forces and energy absorptions for main crushable structures and devices. The derived design guidelines were evaluated and improved using one dimensional spring-mass dynamic simulations. It is shown from the simulation results that the suggested design guidelines can easily satisfy the domestic crashworthiness requirements.

1. 서 론

열차 운행시 예기치 못한 원인에 의하여 충돌 또는 탈선이 발생하면 많은 인명과 물질적 피해가 발생된다. 유럽이나 미국과 같은 선진국에서는 2000년 전후에 철도차량의 충돌안전 기준을 제정하여 시행하고 있다. 대표적인 규정으로 TSI, GMRT, CFR 등을 들 수 있으며, 최근에는 EU 공동체 국가에 적용할 충돌안전도 규정으로 EN 15227제정하여 시행될 예정이다.[1-4] 한편 국내에서는 2004년에 열차의 충돌안전도에 대한 강제 규정이 마련되었으나 시행지침이 제정되지 않고 있다가 2007년 7월 마침내 철도차량안전기준 시행지침 16조가 고시되었다. 그 내용은 EN 15227과 거의 동등하다.[6-8]

본 연구에서는 국내 충돌안전기준에서 요구하는 중대사고 시나리오인 상대속도 32 kph 열차 대 열차 충돌과 15 ton 표준변형체 장애물 충돌 사고시 충격 에너지를 흡수할 수 있는 TC 차량 전두부 및 M 차량구조의 에너지 흡수설계 사양과 설계 가이드라인을 제시하는 데 목적이 있다.

본 연구의 모델은 차세대 고속철도 차량으로 개발 예정인 축중이 13 ton인 2TC-6M 편성인 동력분산식으로 하였다. 본 연구에서는 알루미늄 압출재 차체 특성은 KHST의 특성을 참조하였다.[8-11] 이러한 조건에서 설계된 에너지 흡수구조/부품과 차체가 철도안전법 35조의 규정을 만족할 수 있도록 설계 가이드라인을 도출하려고 하였다.

2. 충돌에너지 흡수 구조 및 부품 사양도출

본 연구의 동력분산형 차세대고속열차는 Fig. 1에 나타낸 것과 같으며, 각 차축의 축중은 13 ton으로 산정되었다.

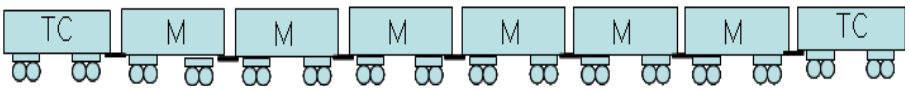

Fig. 1 Configuration of the standard train consist

* 서울산업대학교 철도전문대학원, 석사과정, 학생회원
E-mail :koojs@snut.ac.kr
TEL : (02)970-6878
** 서울산업대학교 철도전문대학원, 박사과정, 정회원
*** 서울산업대학교 철도전문대학원, 교수, 정회원

2.1 전체 충돌에너지 흡수량 산출

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

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

상대속도 32 kph의 열차 대 열차 충돌은 고정벽과 18 kph (5 m/s)충돌하는 것과 에너지 흡수측면에서 등가이므로 철도 차량이 흡수하여야 할 에너지를 추정하면 다음과 같다.

$$E = \frac{1}{2} m_t V^2 = \frac{1}{2} \times 416 \times 5^2 = 5.2MJ \tag{2}$$

한편 Fig. 2 와 같은 표준 변형체 장애물과 110 kph (30.56 m/s)로 충돌하는 사고의 경우, 철도 차량에서 흡수해야 하는 충돌에너지는 정지한 열차에 110 kph로 운동하는 장애물이 충돌하는 것으로 가정하여, 운동 에너지를 계산한 값에서 충돌후 운동에너지와 표준변형체 장애물이 흡수한 에너지를 감하여 구할 수 있다.

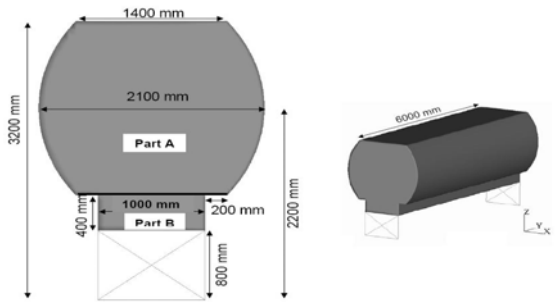

Fig. 2 Configuration and dimensions of the standard deformable obstacle

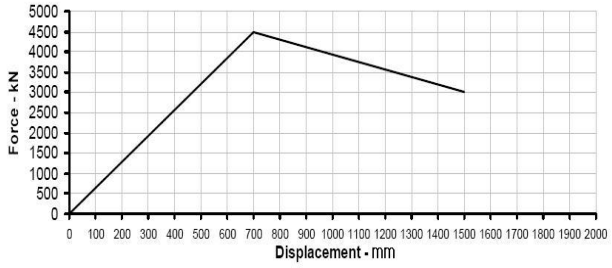

Fig. 3 Force and deformation curve of the standard deformable obstacle

표준변형체 장애물의 초기 운동에너지를 계산하면 다음과 같다.

$$E = \frac{1}{2} m_o V^2 = \frac{1}{2} \times 15 \times 30.56^2 = 7.0MJ \tag{3}$$

완전 비탄성 충돌로 가정하여 충돌후의 장애물 운동 에너지를 계산하면 다음과 같다.

$$E = \frac{m_o}{2} \left(\frac{m_o V}{m_o + m_t} \right)^2 = 0.0085MJ \tag{4}$$

또한 충돌 후 열차의 운동 에너지를 계산하면 다음과 같다.

$$E = \frac{m_t}{2} \left(\frac{m_o V}{m_o + m_t} \right)^2 = 0.2352MJ \tag{5}$$

따라서 표준변형체장애물 충돌 시 장애물과 열차에서 흡수해야 하는 에너지는 6.775MJ 이다. 이 경우 충격 에너지의 대부분을 전두부에서 흡수하게 된다.[12)]

2.2 차량 압괴구조의 초기 압괴하중 추정

국내 충돌안전기준에서는 열차 대 열차 충돌사고와 표준변형체 장애물과의 충돌 사고시 평균 감속도 5g, 최대감속도 7.5g 이하가 발생하도록 규정하고 있다.

각 차량의 질량은 축중으로부터 계산하면 52 ton이므로 TC차량과 M차량의 질량으로부터 변형구역으로 설정한 차량 전두부 및 후미부 압괴구조의 평균 압괴 하중과 최대 압괴 하중은 다음과 같이 구해진다.

$$F_{mean} = ma_{mean} = 52 \times 5 \times 9.81 = 2550kN \tag{6}$$

$$F_{max} = ma_{max} = 52 \times 7.5 \times 9.81 = 3826kN \tag{7}$$

2.3 전체 충돌에너지 흡수량 배분

표준변형체 장애물에서 흡수하는 충격 에너지는 변형 량을 알면 쉽게 계산할 수 있는데, 충돌 시뮬레이션을 수행하기 전에는 이것을 알 수 없다. 따라서 이 변형 량을 가정한 후 충돌에너지 흡수구조 및 부품의 사양을 도출하여 1차원 충돌 시뮬레이션 결과를 분석하여 타당성을 검증할 수 있다.

표준변형체 장애물의 하중-변형 특성은 Fig. 3과 같은데, 식(7)의 최대 압괴 하중을 고려하여 장애물 변형량을 595 mm로 가정하면 흡수되는 에너지 량은 다음과 같이 구해진다.

$$E = \frac{1}{2}Fd = \frac{1}{2} \times 3.826 \times 0.595 = 1.138MJ \tag{8}$$

식 (3)에서 식 (4), (5), (8)을 빼면 장애물 충돌시 철도 차량에서 흡수하여야 할 에너지는 5.637 MJ 이다. 또한 열차 대 열차 충돌시에는 식(2)로부터 5.2 MJ의 에너지를 흡수하여야 한다. 그런데 표준변형체 장애물 충돌 시에는 대부분의 충돌 에너지를 전두부에서 흡수하여야 하므로 여유 있는 설계를 위하여 5.637 MJ 전부를 전두부에서 흡수하는 것으로 가정한다.

또 열차 대 열차 충돌의 경우 고정벽에 저속(18kph)으로 충돌하므로, 초기 충돌후 반발되어 후속하는 M1차량과 충돌하여 다시 고정벽과 충돌하는 2중 충돌 현상을 나타낸다. 따라서 전두부에서 흡수하는 충격 에너지는 대략 TC 차량 운동 에너지의 2 배 수준으로 산정한다. 즉,

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \times 2 = \frac{1}{2} \times 52 \times 5^2 \times 2 = 1.3MJ \tag{9}$$

또 후속하는 M차량에서도 TC 차량과 2중 충돌 현상을 나타내는데 식 (9)와 같이 1.3 MJ의 충격에너지를 흡수한다. 나머지 후속하는 차량들의 인터페이스 부분들도 동일하게 가정하면 7.8 MJ의 충격 에너지를 흡수할 수 있다.

2.4 압괴구조 및 부품별 에너지흡수 추정

장애물 충돌을 고려하여 변형체 장애물과 전두부에서 식(6)의 평균 압괴하중 2550 kN으로 6.775 MJ을 흡수할 경우 압괴량을 계산하면 다음과 같다.

$$d_{crush} = \frac{E}{F} = \frac{6.775}{2.55} = 2.657m \tag{10}$$

여기서 장애물 변형 량 0.595m를 빼면 전두부의 변형 량은 2.062m가 된다.

또 열차 대 열차 충돌의 경우 TC-M1 인터페이스에서 식(6)의 평균 압괴하중 2550 kN으로 1.3 MJ을 흡수하는 압괴량을 계산하면 다음과 같다.

$$d_{crush} = \frac{E}{F} = \frac{1.3}{2.55} = 0.510m \tag{11}$$

통상의 경우와[1-3] 같이 TC 차량 전두부의 에너지 흡수 부품들이 에너지흡수식 연결기(OAB), 헤드스

톡(BD), 운전실 전방 에너지 흡수부품 (하니콤 또는 대용품: CD)으로 이루어져 있다고 가정하면, 식 (6), (7), (10)로부터 Fig. 4와 같은 전두부 에너지 흡수특성 곡선을 도출할 수 있다.

Fig. 4에서 OAB 구간이 전두부 자동연결기의 에너지 흡수를 나타내는데, OLEO사에서 상용품으로 판매중인 전두부 자동연결기 모델로 공압식 완충기 (150 mm)와 축소형 에너지흡수튜브 (600 mm)에서 1.24 MJ의 충격 에너지를 흡수할 수 있다.

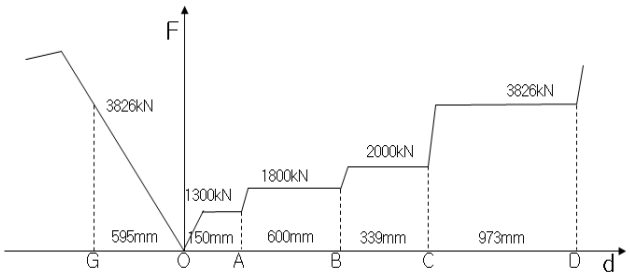

Fig. 4 Force-deformation curve of the front end and obstacle

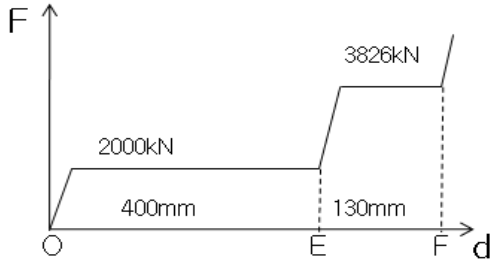

Fig. 5 Force and deformation of the rear end of TC unit

한편 BD 구간에서 2000 kN에 해당하는 영역은 헤드스톡의 압괴에 의한 충격 에너지 흡수량을 나타내는 것인데, 다음과 같이 구해진다.

$$E = 2000kN \times 1312mm = 2.624MJ \tag{12}$$

여기서 헤드스톡의 순수 압괴 길이가 1312 mm 이려면 그 길이는 70%를 나눈 값인 1874 mm 이상이어야 한다. CD 구간에서 1826 kN에 해당하는 영역은 운전실 전방 에너지 흡수부품의 압괴에 의한 충격 에너지 흡수량을 나타내는 것인데 다음과 같다.

$$E = 1826kN \times 973mm = 1.776MJ \tag{13}$$

여기서 알루미늄 하니콤이 사용된다면 순수 압괴 길이가 973 mm를 80 %로 나눈 값인 1081 mm 이상이어야 한다. Fig. 4에 나타난 전두부의 충격 에너지 흡수량을 모두 합하면 5.64 MJ이 된다.

CD 구간에서 압괴하중이 3826 kN이므로 후방의 운전실 구조는 최소한 3826 kN에 1500 kN을 높인 수준의 압괴강도를 가져야 한다.[12] 또한 운전실 후방에서 후미 TC 대차까지의 구간은 8000 kN의 압괴강도를 가진다고 가정한다. 이것은 알루미늄 압출재 차체인 KHST 객차의 압괴강도 자료를 준용한 것이다.

TC차량 후미구조는 식(6), (7), (11)로부터 최대 3826 kN의 압괴강도 (Fig. 5의 EF 구간)를 가진다고 설계할 수 있다. 또 TC차량 후미에 장착되는 사이드 버퍼는 각 차량 인터페이스에 각각 1세트씩 장착된다. 현재 KTX에도 장착되어 있고 OLEO사에서 상용품으로 판매하는 사이드 버퍼의 에너지 흡수 특성은 Fig. 5의 OE와 같다.

이외에도 M 차량 사이에 장착되는 사이드 버퍼 6 세트는 4.8 MJ의 에너지를 흡수할 수 있다.

3. 1차원 충돌해석을 이용한 초기사양 평가

Fig. 1에 정의된 동력분산형 차세대고속열차를 1차원 스프링-질량-댐퍼 모델을 사용하여 충돌해석을 수행하고 국내 철도안전법의 만족 여부를 평가하였다. TC 차량의 전두부 압괴특성 곡선은 Fig. 4와 같고, 그 외 각 차량 인터페이스의 압괴특성 곡선은 Fig. 5와 같다. 또 승객이 탑승하는 비압괴영역은 알루미늄 압출재의 압괴 특성은 8000 kN으로 가정하였다. 이것은 알루미늄 압출재로 제작되므로 국내 압출재 고속철도차량의 특성을 원용한 것이다.

3.1 변형체 장애물 충돌사고 시뮬레이션

110 kph 로 주행하는 열차에 Fig. 2의 표준변형체장애물이 충돌하는 시나리오의 경우 변형 에너지의 등가성을 고려하여 15ton 표준변형체 장애물이 110 kph로 정지한 열차에 충돌하는 것으로 가정하여 1차원 충돌 시뮬레이션을 수행 하였다. Fig. 6은 충돌시 해석시 에너지의 전환 이력을 나타낸 것이다. 충돌후 잔여 운동 에너지가 0.2445 MJ로 식(4), (5)에서 완전 비탄성충돌이론으로 예측했던 0.2437 MJ과 비교하여 0.32% 이내로 잘 일치하며, 수치해석과정의 총 에너지 변화량도 0.18% 이내로 일치하였다.

Fig. 7은 표준변형체장애물의 변형량을 구한 것인데, 423.7 mm 정도 변형이 발생하여 당초 가정한 595 mm보다 28.7% 정도 적었다. Fig. 8에서는 전두부의 압괴가 1944 mm정도 발생하여 Fig. 4에서 정의한 압괴 가능길이 2062 mm까지는 118mm 여유가 있었다. 한편 Fig. 9는 첫 번째 사이드버퍼의 압괴변형을 나타낸 것인데 최대 허용 변형량인 400 mm에는 도달하지 않았다.

한편 Fig. 10, 11 은 각각 TC차량과 M1차량의 차실내 가속도를 나타낸 것이다. TC차량과 M1차량은 철도안전법 시행지침 16의 가속도 (최대 7.5g, 평균 5g)제한조건을 만족한다.

Fig. 12 은 각 차체 구조 또는 부품에서 흡수한 충격 에너지 량을 나타낸 것이다. 전체 운동 에너지의 74.58% (5.22 MJ)를 전두부에서 그리고 8.28% (0.58 MJ)를 변형체 장애물에서 흡수하였고 사이드 버퍼 등 나머지 구조/부품에서는 단지 17.15% (1.2 MJ)만 흡수 (3.67%는 잔여 운동에너지로 존재)하였다.

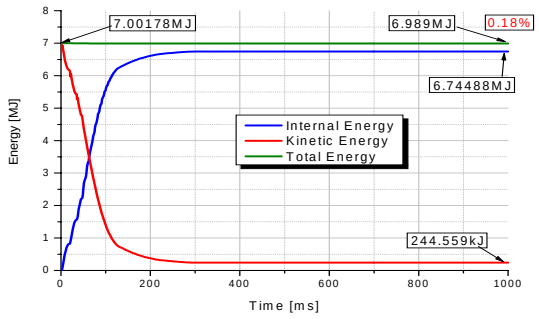

Fig. 6 Energy history curve

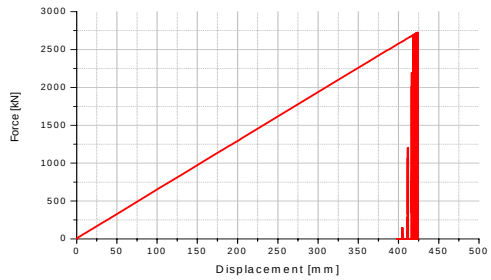

Fig. 7 F−δ curve of the deformable obstacle

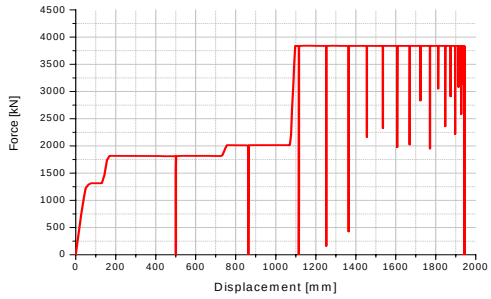

Fig. 8 F−δ curve of the front end

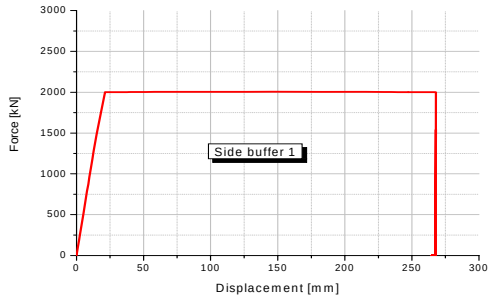

Fig. 9 F−δ curve of the side buffer

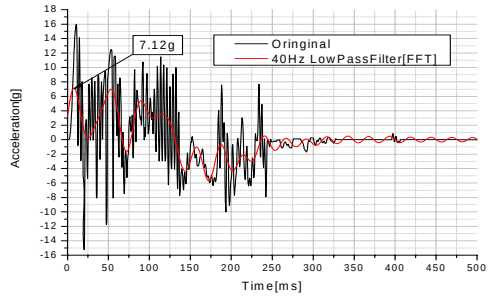

Fig. 10 Acceleration at the TC front passenger section

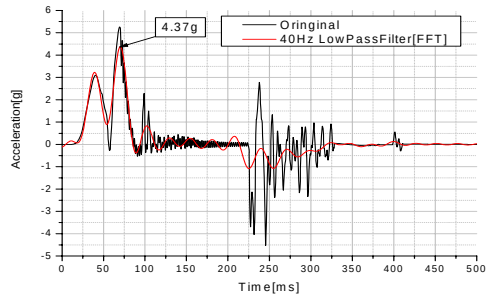

Fig. 11 M1 mid−section acceleration

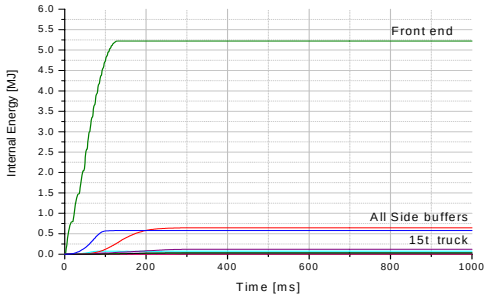

Fig. 12 Absorbed energy in each part

3.2 열차 대 열차 충돌사고 시뮬레이션

Fig. 1의 동력분산형 차세대고속열차가 정지한 동일 열차와 36 kph로 충돌하는 사고를 1차원 동역학 모델로 시뮬레이션 하였다. Fig. 13은 충돌해석시 에너지의 전환 이력을 나타낸 것이다. 초기 운동에너지의 전부가 흡수 및 저장 되었으며, 수치해석과정의 전체 에너지 변화량도 0.065% 이내로 잘 일치하였다.

Fig. 14는 전두부의 압괴량을 구한 것으로 전두부가 1270 mm 압괴되어 Fig. 4에서 정의한 압괴 가능 길이 2062 mm와 비교하면 많은 여유가 있었다. Fig. 15는 TC차량 후미구조의 변형을 나타낸 것인데 68.2 mm 정도 (130 mm로 설정)의 압괴가 발생하여 0.25 MJ 정도의 충격 에너지를 흡수하였다. Fig. 16에 나타낸 사이드버퍼의 압괴변형은 최대 허용 변형 량인 400 mm에 도달하였고 후속하는 1 세트의 사이드버퍼도 동일한 현상을 나타내었다.

한편 Fig. 17, 18은 TC와 후속 M1의 차실내 가속도를 40Hz low pass 필터링한 것인데 가속도 설계제한조건 (최대 7.5g, 평균 5g)을 초과한다.

Fig. 19에서는 각 차체 구조 또는 부품에서 흡수한 충격 에너지 량을 나타내었다. 전체 운동 에너지의 50.6% (2.632 MJ)를 전두부에서 그리고 4.89% (0.254 MJ)를 TC차량 후미구조에서 흡수되었다. 또 차량 간 연결된 모든 사이드 버퍼에서는 35.06% (1.823 MJ)이 흡수되었고 나머지 구조/부품에서는 단지 9.43% (0.49 MJ)만 흡수 하였다.

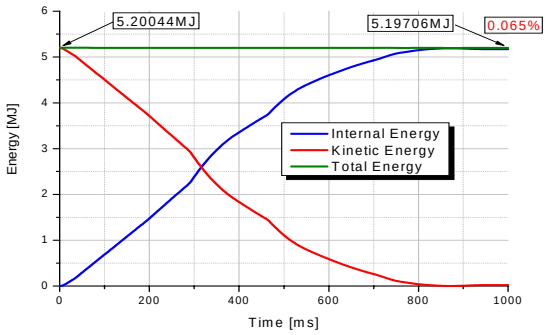

Fig. 13 Energy history curve

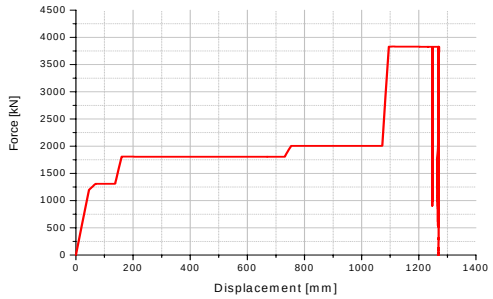

Fig. 14 F−δ curve of the front end

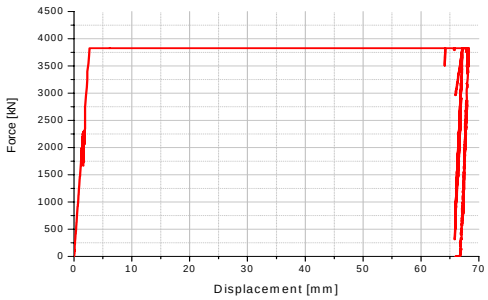

Fig. 15 F−δ curve of the front end

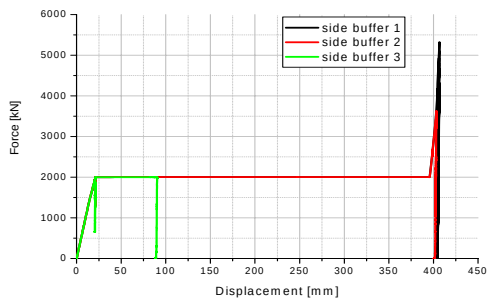

Fig. 16 F−δ curve of the side buffer 1, 2 and 3

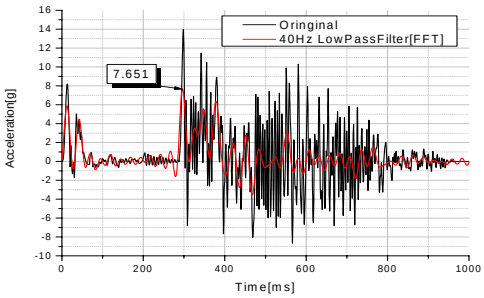

Fig. 17 TC front-section acceleration

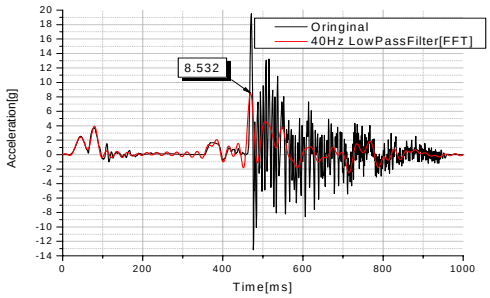

Fig. 18 M1 mid-section acceleration

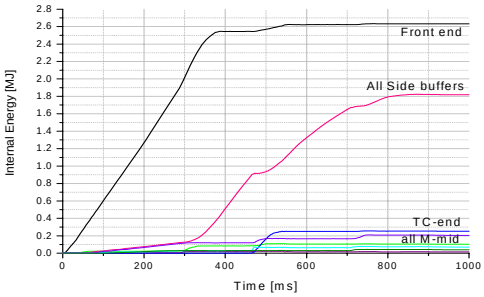

Fig. 19 Absorbed energy in each part

3.3 충돌해석 결과 평가

Table 1은 앞에서 해석한 표준 변형체 장애물 충돌과 열차 대 열차 충돌에 대하여 주요 구조/부품들의 변형 량과 에너지 흡수량을 정리한 것이다.

표준변형체장애물과 충돌의 경우, 전두부에서 전체 운동에너지의 5.22MJ (74.58%) 를 흡수하고, 열차 대 열차 충돌의 경우 TC차량 후미구조에서 0.254MJ (4.89%), 사이드버퍼 1.823MJ (35.06%)를 흡수하여 TC-M1 인터페이스 및 사이드 버퍼에서 전체 운동에너지의 2.077MJ (39.95%)를 흡수하였다.

Table 1 Comparison of the simulation results

차체구조	장애물 충돌		열차 대 열차 충돌	
	변형량(mm)	흡수량(MJ)	변형량(mm)	흡수량(MJ)
Obstacle	423.7/압괴	0.579/8.28%	-	-
Front end	1944.2/압괴	5.22/74.58%	1270.5/압괴	2.63/50.62%
Driver's area	9.45/탄성	-	10.3/탄성	-
TC-mid	42.49/탄성	-	51.699/탄성	-
Side buffer	267.96/압괴	267.9/9.25%	406.69/압괴	1.82/35.06%
TC-end	1.589/탄성	-	68.2/압괴	0.254/4.89%
M-door	6.111/탄성	-	16.599/탄성	-
M-mid	22.67/탄성	-	40.59/탄성	-
M-end	5.77/탄성	-	10.5/탄성	-

4. 결 론

동력분산형 차세대고속열차를 모델로 한 충돌안전도 설계 가이드라인 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 전두부는 장애물 충돌 시나리오를 적용하여 전체 운동 에너지의 70% 이상을 흡수할 수 있도록 설계하여야 하며, 또 표준변형체장애물의 압괴 강도와 충격 가속도 조건을 고려하여 타당한 압괴강도를 산출하여야 한다.
2) TC차량 후미구조는 열차 대 열차 충돌 시나리오를 적용하여 전체 운동 에너지의 4% 이상을 흡수할 수 있도록

설계하여야 하며, 정적 강도 조건과 충격 가속도 조건을 고려하여 타당한 압괴강도를 가져야 한다.

3) 장애물 충돌 시나리오와 열차 대 열차 충돌 시나리오를 동시에 고려할 때 전두부에서는 5 MJ 이상, 동력차 후미구조에서는 0.2 MJ 이상의 충격 에너지 흡수 설계를 하는 것이 필요하다.

본 연구에서 제시된 충돌설계 사양에 대한 가이드라인은 철도안전법 시행지침 16의 가속도 (최대 7.5g, 평균 5g)제한조건을 만족하도록 개선된 압괴모델로 재평가 되어야 한다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부에서 연구비를 지원하여 한국철도기술연구원에서 진행 중인 차세대고속철도개발사업의 연구결과로서 관계자들께 감사드립니다.

References

1) J. H. Lewis, "Development of crashworthy vehicle structures for railways", WCRR'94, pp. 893-900, 1994
2) T. David, "Passenger Rail Train-to-Train Impact Test Volume I: Overview and Selected Results", Final Report, DOT/FRA/ORD-03/17, July 2003
3) D. C. Tyrell, K. J. Sevrson and B. J. Marquis. "Train Crashworthiness Design for Occupant Survivabil -ity", ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, AMD-Vol 210, pp. 59-74, 1995
4) FCD(2005). Crashworthiness Requirements for Railway Vehicle Bodies, EN15227
5) 철도차량 안전기준에 관한 규칙, 건설교통부령 제 455호, 2005.7.8 공포
6) 철도차량 안전기준에 관한 지침, 건설교통부고시 제2005-438호, 2005.12.22
7) 철도차량 안전기준에 관한 지침, 건설교통부고시 제2006-247호, 2006.7.7
8) J. S. Koo, Y. H. Youn, "Crashworthy Design and Evaluation on the Front-end Structure of Korean High Speed Train", International Journal of Automative Technology, Vol. 5, No. 3, pp. 173-180, 2004
9) J. S. Koo, J. H. Jik, D. S. Kim and Y. H. Youn, "An Evaluation of Crashworthiness for the Full Rake KHST Using 1-D Dynamic Model", Journal of Korea Society for Railway, Vol. 4, 3, pp. 94-101, 2001
10) 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", Korean Society for Railway, Vol. 3, No. 1, pp.27-33, 2000
11) H. S. Han and J. S. Koo, "Simulation of train crashes", Vehicle System Dynamics", Vol. **40**, 6 , pp. 435-450, 2003
12) AEIF/TSI, The technical specification for Interoperability relating to the rolling stock subsystem of the trans-European high-speed rail system, May 30, 2002.