

동력분산형 차세대고속전철의 충돌안전도 개념설계 연구

A Study on Conceptual Design for Crashworthiness of the Next Generation High-speed EMU

김거영[†] · 조현직^{*} · 구정서^{**}

Geo-Young Kim · Hyun-jik Cho · Jeong-Seo Koo

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

Keywords : High-speed EMU, Crashworthiness, Safety Regulation, Rollingstock, Conceptual Design

요 지 본 논문에서는 국내철도차량안전기준의 충돌안전 요구사항을 만족하는 동력 분산형 고속전철의 충돌안전도 개념설계에 대하여 연구하였다. 국내안전기준에는 36km/h 열차 대 열차 충돌, 15ton 변형체 장애물과 110km/h 충돌 등 2가지 중충돌 사고에 대한 충돌안전성을 요구한다. 한국형 분산형 차세대고속열차는 17ton 축중의 동력집중형 KTX와 달리 13ton 축중을 가지는 2TC-6M로 구성된다. 이론적 수치적 해석을 통하여 주요 압괴구조 및 부품의 평균압괴하중과 변형량을 에너지 흡수 관점에서 충돌안전도 개념설계안으로 도출하였다. 도출된 개념 설계안은 1차원 막대-스프링-댐퍼-질량 동역학 시뮬레이션 결과로부터 국내 충돌안전기준을 잘 만족시킬 수 있음을 보였다.

주요어 : 동력 분산형 고속전철, 충돌안전도, 안전기준, 철도차량, 개념설계

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

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 규정으

로 TSI, GMRT, CFR 등을 들 수 있으며, 최근에는 EU 공동체 국가에 적용할 충돌안전도 규정으로 EN 15227이 제정되어 시행될 예정이다[1-4]. 한편 국내에서는 2004년에 열차의 충돌안전도에 대한 강제 규정이 마련되었으나 세부 시행지침이 마련되지 못하고 있다가 2007년 7월 마침내 철도차량안전기준 시행지침 16조가 고시되었다. 그 내용은 EN 15227과 거의 동등하다[5-8].

본 연구에서는 차세대 고속철도 차량으로 개발 예정인 축중이 13ton인 2TC-6M 편성의 동력분산식 고속철도에 대하여 국내 충돌 안전기준에서 요구하는 중대사고 시나리오인 상대속도 36km/h 열차 대 열차 충돌과 15ton 표준변형체 장애물 충돌 사고시 충격 에너지를 흡수할 수 있는 TC

[†] 책임저자 : 학생회원, 서울산업대학교, 철도전문대학원
E-mail : koojs@snut.ac.kr
TEL : (02)970-6878

^{*} 정회원, 서울산업대학교, 철도전문대학원

^{**} 교신저자 : 정회원, 서울산업대학교, 철도전문대학원 교수

(Train control) 차량 전두부 및 M(Motor) 차량구조의 에너지 흡수 설계사양과 설계 가이드라인을 제시하는 데 목적이 있다.

본 열차의 차량 구조는 아직 결정되지 않았으나 경량화를 고려하여 알루미늄 차체로 개발 될 예정이므로 차체에 적용될 알루미늄 압출재의 압괴 특성은 KHST의 자료를 참조하였다[8-11]. 이러한 조건에서 설계된 에너지 흡수구조/부품과 차체가 철도안전법 35조의 규정과 충돌안전기준 지침 16조를 만족할 수 있도록 개념설계안을 도출하려고 하였다.

2. 충돌에너지 흡수 구조 및 부품 사양도출

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

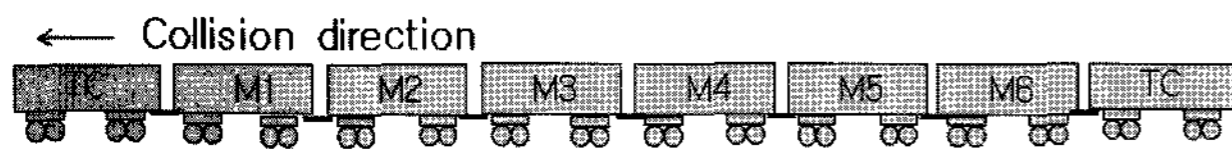


Fig. 1. Configuration of the standard train consist

2.1 전체 충돌에너지 흡수량 산출

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

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

국내 충돌안전기준에서 정의하는 열차의 충돌 질량은 m_t 에서 탑승자 질량의 절반 값을 감해야 된다. 그러나 설계 전에는 실제 열차의 탑승자 질량을 정확히 알 수 없으므로 본 연구에서는 무시하였다. 초기 설계를 위한 가이드라인은 보수적으로 책정하는 것이 바람직한데, 탑승자 질량을 무시하는 것이 이에 부합한다.

상대속도 32km/h의 열차 대 열차 충돌은 고정벽과 18km/h(5m/s) 충돌하는 것과 에너지 흡수측면에서 동가이므로 철도 차량이 흡수하여야 할 에너지를 추정하면 다음과 같다.

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

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

표준변형체 장애물의 초기 운동에너지를 계산하면 다음과

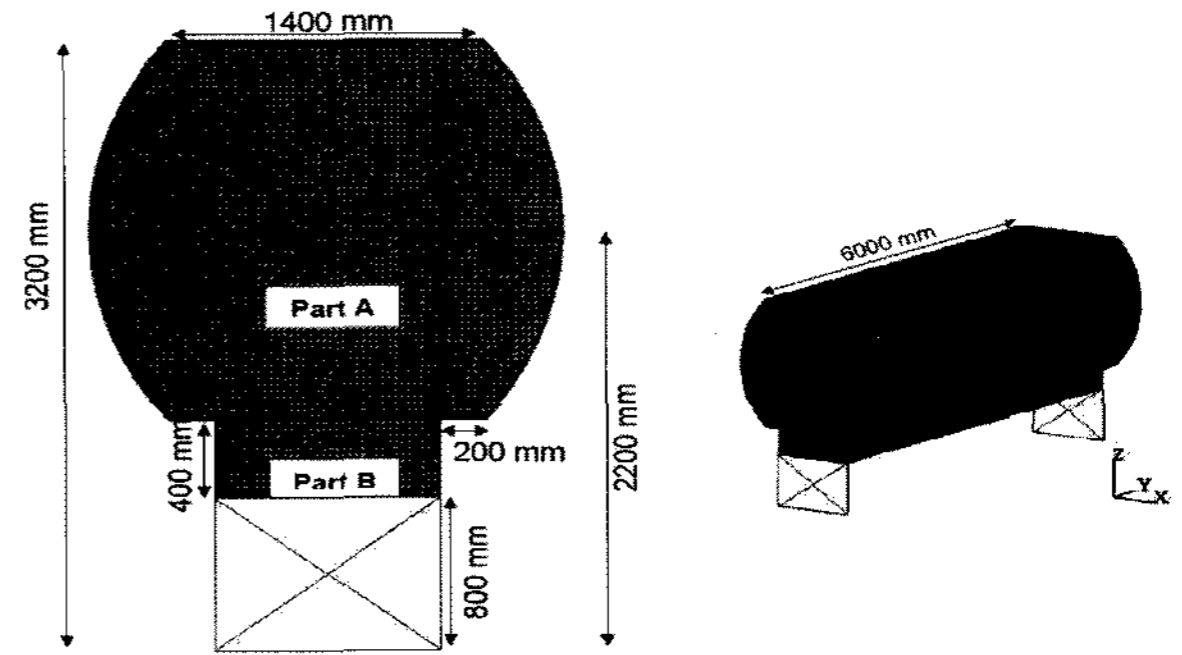


Fig. 2. Configuration and dimensions of the standard deformable obstacle

같다.

$$E = \frac{1}{2}m_o v^2 = \frac{1}{2} \times 15 \times 30.56^2 = 7.0\text{MJ} \quad (3)$$

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

$$E = \frac{m_o \left(\frac{m_o v}{m_o + m_t} \right)^2}{2} = 0.0085\text{MJ} \quad (4)$$

또한 충돌 후 열차의 운동 에너지를 계산하면 다음과 같다.

$$E = \frac{m_t \left(\frac{m_o v}{m_o + m_t} \right)^2}{2} = 0.2352\text{MJ} \quad (5)$$

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 표준 변형체 장애물과의 충돌 사고시 평균 감속도 5g, 최대감속도 7.5g 이하가 발생하도록 규정하고 있다.

각 차량의 질량은 축중으로부터 계산하면 52ton이므로 TC차량과 M1차량의 질량으로부터 변형구역으로 설정한 차량 전두부 및 후미부 압괴구조의 평균 압괴 하중과 최대 압괴 하중은 다음과 같이 구해진다.

$$F_{mean} = ma_{mean} = 52 \times 5 \times 9.81 = 2550\text{kN} \quad (6)$$

$$F_{max} = ma_{max} = 52 \times 7.5 \times 9.81 = 3826\text{kN} \quad (7)$$

2.3 전체 충돌에너지 흡수량 배분

표준변형체 장애물에서 흡수하는 충격 에너지는 변형 량을 알면 쉽게 계산할 수 있으나 충돌 시물레이션을 수행하기 전에는 이것을 알 수 없다. 따라서 이 변형 량을 가정

한 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 595mm로 가정하면 흡수되는 에너지 량은 다음과 같이 구해진다.

$$E = \frac{1}{2}Fd = \frac{1}{2} \times 3.826 \times 0.596 = 1.138\text{MJ} \quad (8)$$

식 (3)에서 식 (4), (5), (8)을 빼면 장애물 충돌시 철도 차량에서 흡수하여야 할 에너지는 5.637MJ 이다. 또한 열차 대 열차 충돌시에는 식 (2)로부터 5.2MJ의 에너지를 흡수하여야 한다.

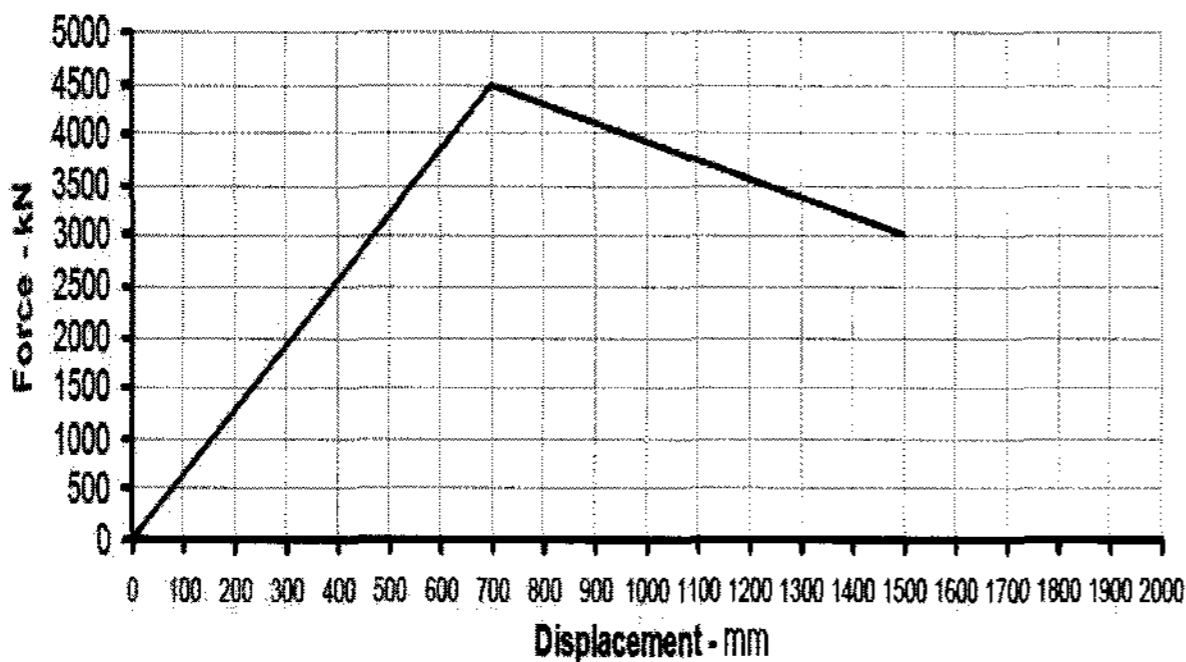


Fig. 3. Force and deformation curve of the standard deformable obstacle

그런데 표준변형체 장애물 충돌 시에는 대부분의 충돌 에너지를 전두부에서 흡수하여야 하므로 여유 있는 설계를 위하여 5.637MJ 전부를 전두부에서 흡수하는 것으로 가정한다.

또 열차 대 열차 충돌의 경우 고정벽에 저속(18km/h)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 2배 수준으로 산정한다. 즉,

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \times 2 = \frac{1}{2} \times 52 \times 52 \times 2 = 1.3\text{MJ} \quad (9)$$

또 후속하는 M1차량도 TC 차량과 2중 충돌 현상을 나타내는데 식 (9)와 같이 1.3MJ의 충격에너지를 흡수하고 가정한다. 나머지 후속하는 차량들의 인터페이스 부분들도 동일하게 가정하면 7.8MJ의 충격 에너지를 흡수할 수 있다.

2.4 압괴구조 및 부품별 에너지흡수 추정

장애물 충돌을 고려하여 변형체 장애물과 전두부에서 식

(6)의 평균 압괴하중 2550kN으로 6.775MJ를 흡수할 때 압괴량을 계산하면 다음과 같다.

$$d_{crush} = \frac{E}{F} = \frac{6.775}{2.55} = 2.657\text{m} \quad (10)$$

여기서 장애물 변형량 0.595m를 빼면 전두부의 변형량은 2.062m가 된다.

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

$$d_{crush} = \frac{E}{F} = \frac{1.3}{2.55} = 0.510\text{m} \quad (11)$$

통상의 경우와[1-3] 같이 TC 차량 전두부의 에너지 흡수 부품들이 에너지흡수식 연결기(OAB), 헤드스톡(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. 이렇게 하면 열차와 장애물의 정면충돌 시 운전자 앞 구간인 전두부에서 대부분의 에너지를 흡수하는데 압괴하중이 가장 작은 완충기부터 압괴되어 에너지 흡수 튜브, 헤드스톡, 헤드스톡과 하니콤 순으로 압괴가 일어나 충돌에너지를 흡수한다.

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

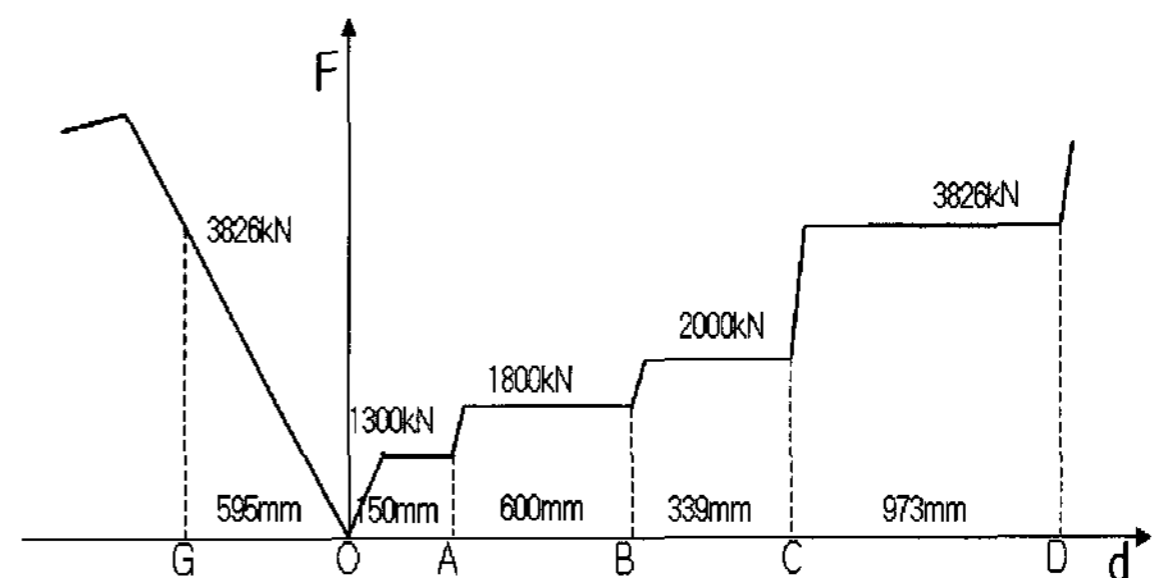


Fig. 4. Force-deformation curve of the front end and obstacle

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

$$E = 2000\text{kN} \times 1312\text{mm} = 2.624\text{MJ} \quad (12)$$

여기서 헤드스톡의 순수 압괴 길이가 1312mm이라면 그 길

이는 70%를 나눈 값인 1874mm 이상이어야 한다.

CD 구간에서 1826kN에 해당하는 영역은 운전실 전방 에너지 흡수부품의 압괴에 의한 충격 에너지 흡수량을 나타내는 것인데 다음과 같다.

$$E = 1826\text{kN} \times 973\text{mm} = 1.776\text{MJ} \quad (13)$$

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

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

TC차량 후미구조는 식 (6), (7), (11)로부터 최대 3826kN의 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 버퍼 세트의 에너지 흡수 특성은 Fig. 5의 OE와 같다.

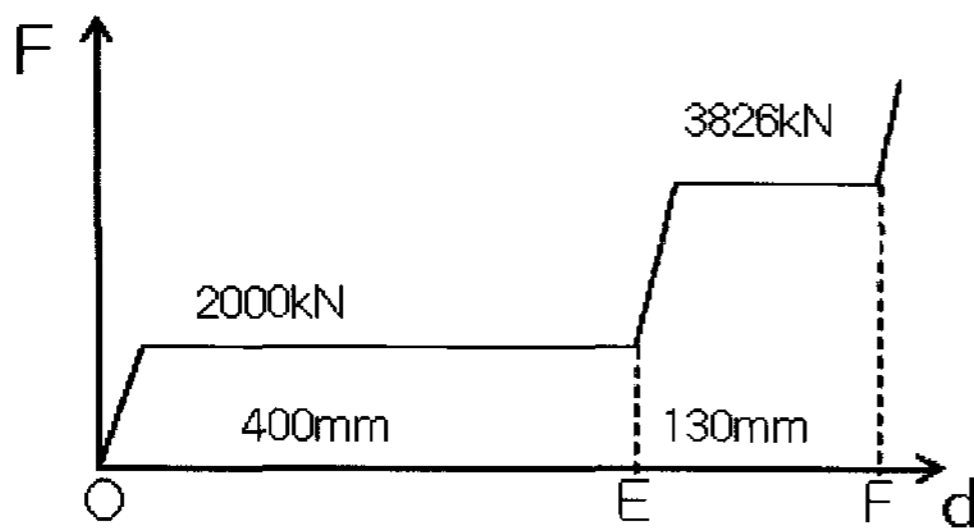


Fig. 5. Force and deformation of the rear end of TC unit

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

3. 1차원 충돌해석을 이용한 초기시양 평가

Fig. 1에 정의된 동력분산형 차세대고속열차를 1차원 막대-스프링-댐퍼-질량 모델을 사용하여 충돌해석을 수행하고 국내 철도안전법의 만족 여부를 평가하였다.

Fig. 6은 동력분산형 차세대 고속전철의 1차원 막대-스프링-댐퍼-질량 모델이다. 차체 구조는 각 구간별 압괴특성을 지닌 Nonlinear beam으로 대차구조는 Elastic spring으로 연결하여 모델링하였다. 이러한 구조와 동특성 자료인 탄성,

댐핑계수 등은 기존 KHST 모델을 준용하였다[13].

TC 차량의 전두부 압괴특성 곡선은 Fig. 4와 같고, 그 외 각 차량 인터페이스의 압괴특성 곡선은 Fig. 5와 같다. 또 승객이 탑승하는 비압괴영역은 알루미늄 압출재의 압괴특성은 8000kN으로 가정되었다.

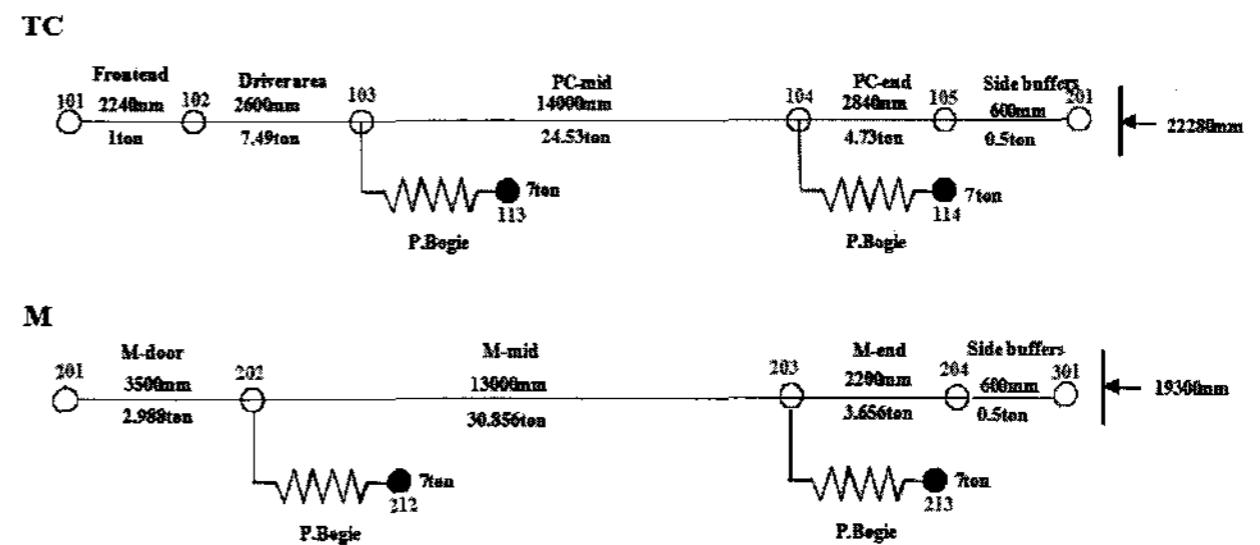


Fig. 6. one dimensional model of the TC and M cars

3.1 변형체 장애물 충돌사고 시뮬레이션

110km/h로 주행하는 열차에 Fig. 2의 표준변형체장애물이 충돌하는 시나리오의 경우 변형 에너지의 증가성을 고려하여 15ton 표준변형체 장애물이 110km/h로 정지한 열차에 충돌하는 것으로 가정하고, 상용프로그램인 Ls-Dyna를 사용하여 1차원 충돌 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 7은 충돌 해석시 에너지의 전환 이력을 나타낸 것이다. 충돌후 잔여 운동 에너지가 0.2445MJ로 식 (4), (5)에서 완전 비탄성충돌이론으로 예측했던 0.2437MJ과 비교하여 0.32% 이내로 잘 일치하며, 수치해석과정의 총 에너지 변화량도 0.18% 이내로 일치하였다.

Fig. 8은 표준변형체장애물의 변형량을 구한 것인데, 423.7mm 정도 변형이 발생하여 당초 가정한 595mm보다 28.7% 정도 적었다. Fig. 9에서는 전두부의 압괴가 1944mm정도 발생하여 Fig. 4에서 정의한 압괴 가능길이 2062mm까지

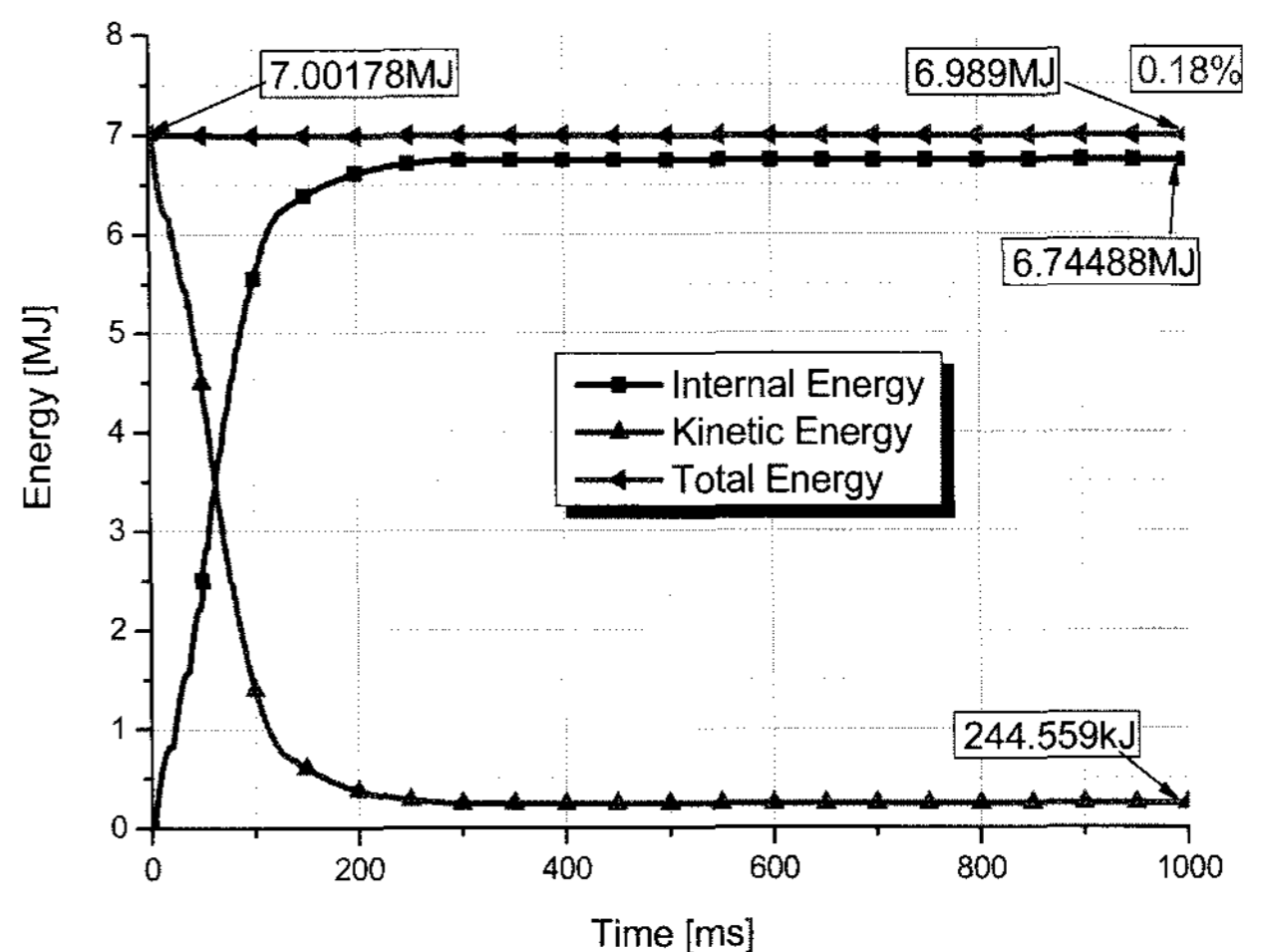


Fig. 7. Energy history curve

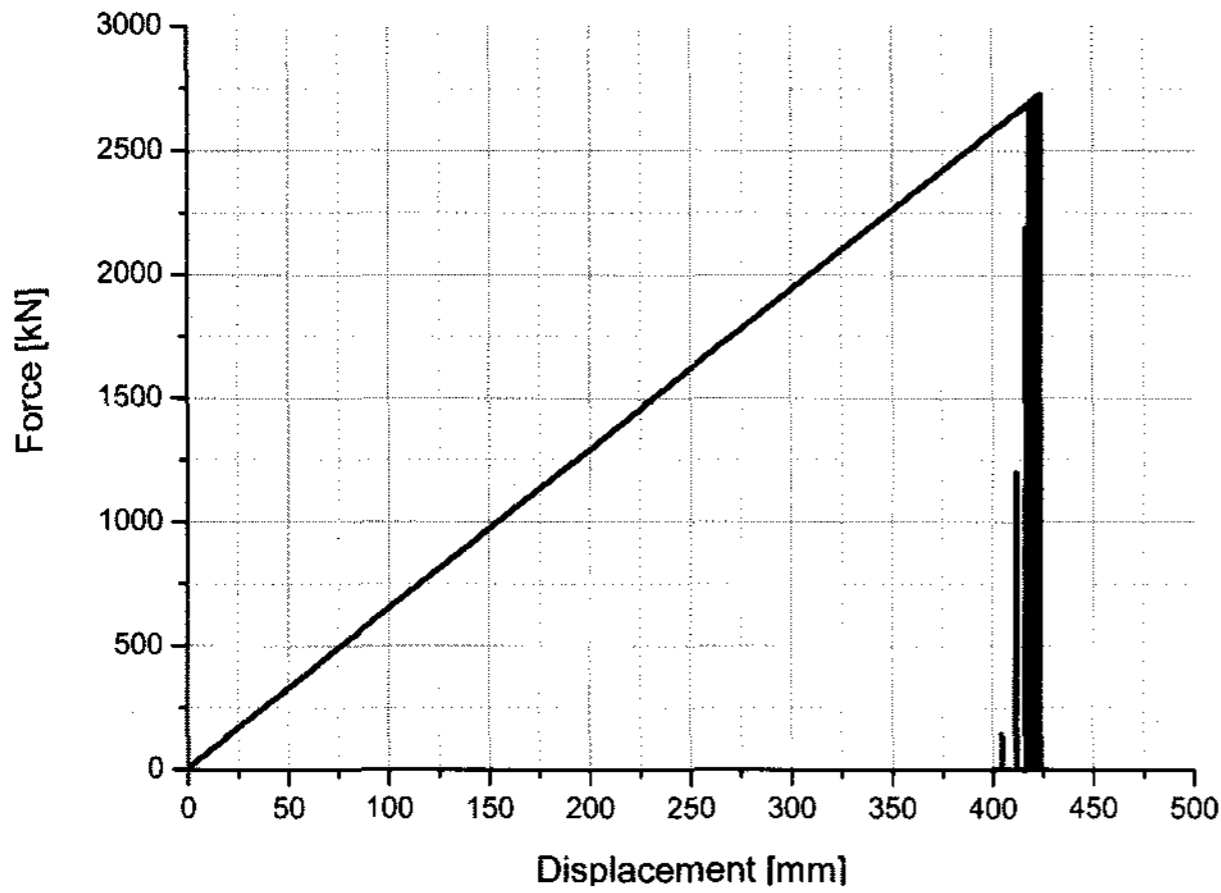


Fig. 8. F- δ curve of the deformable obstacle

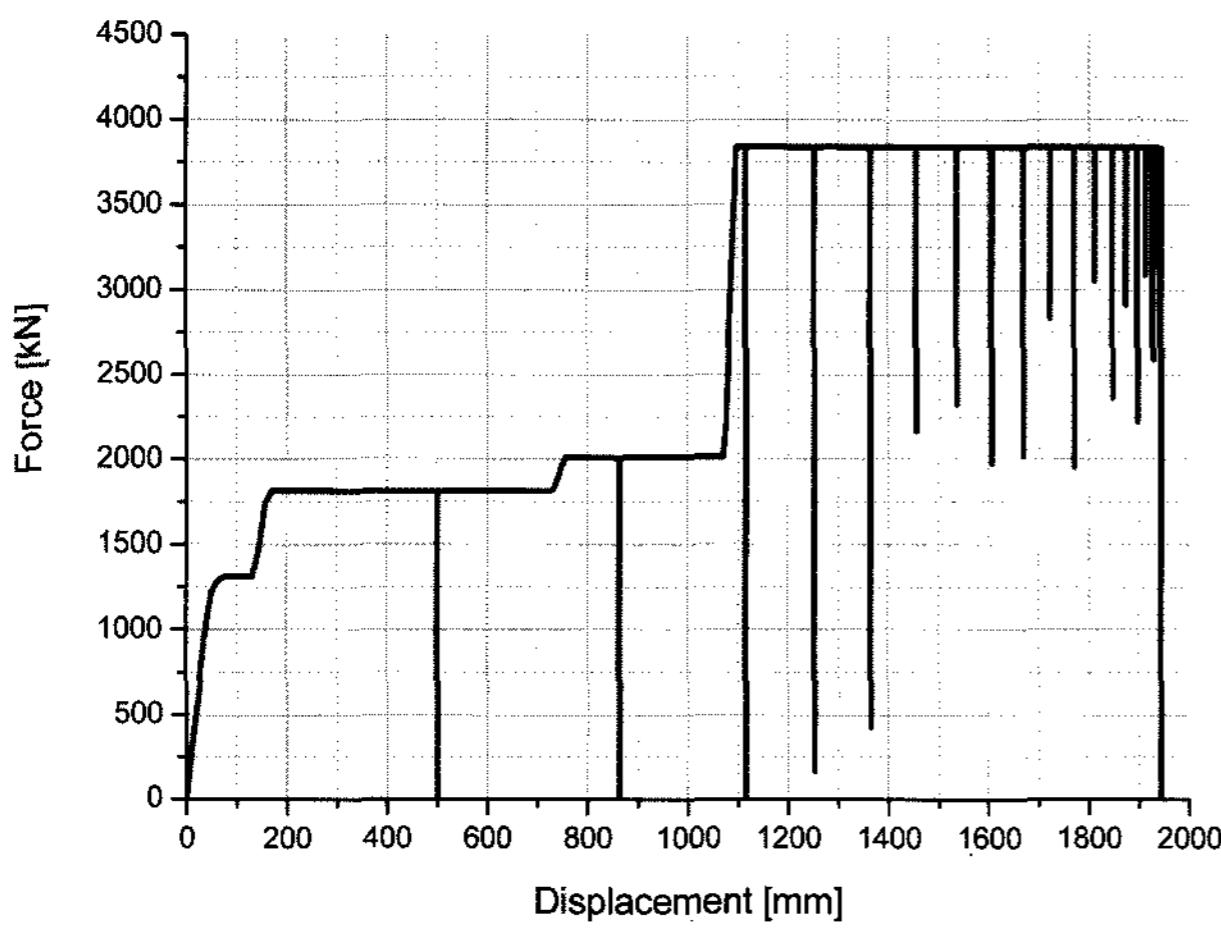


Fig. 9. F- δ curve of the front end

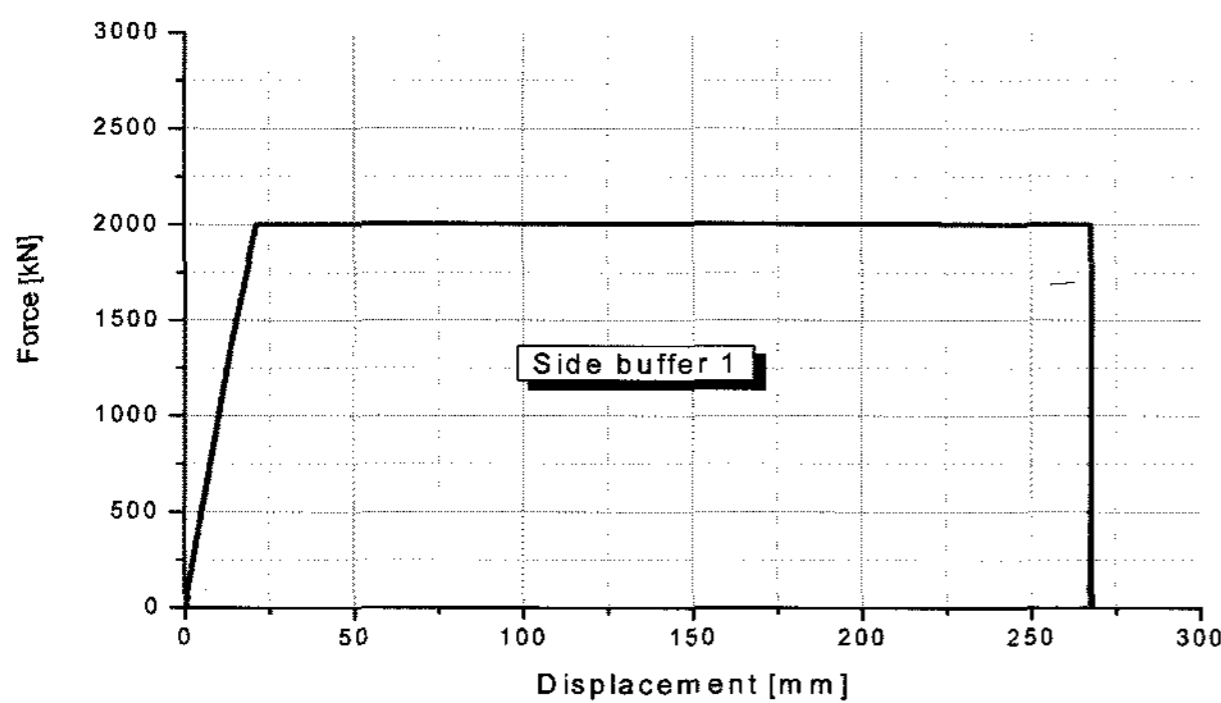


Fig. 10. F- δ curve of the side buffer

는 118mm 여유가 있었다. 한편 Fig. 10은 첫 번째 사이드버퍼의 압괴변형을 나타낸 것인데 최대 허용 변형량인 400mm에는 도달하지 않았다.

한편 Fig. 11, 12는 각각 TC차량과 M1차량의 차실내 가속도를 나타낸 것이다. TC차량과 M1차량은 철도안전법 시행지침 16의 가속도(최대 7.5g, 평균 5g)제한조건을 만

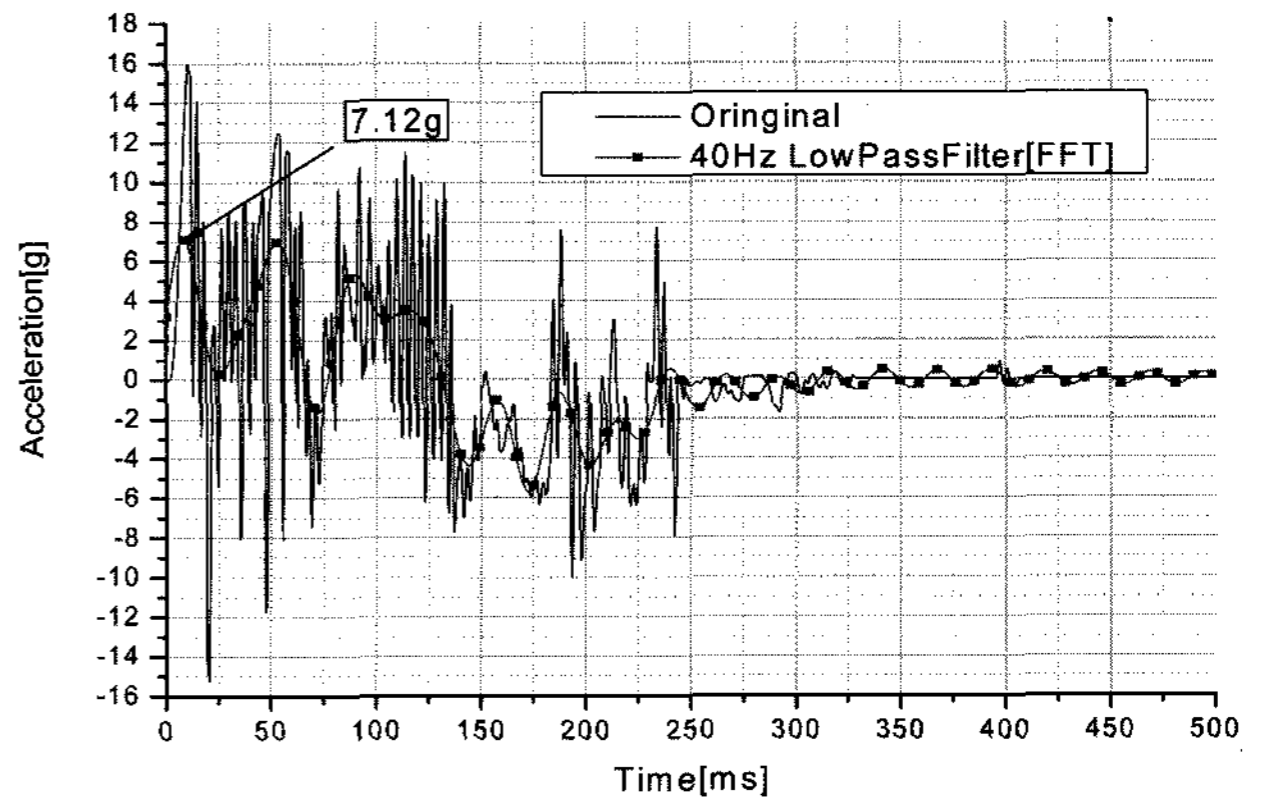


Fig. 11. Acceleration at the TC front passenger section

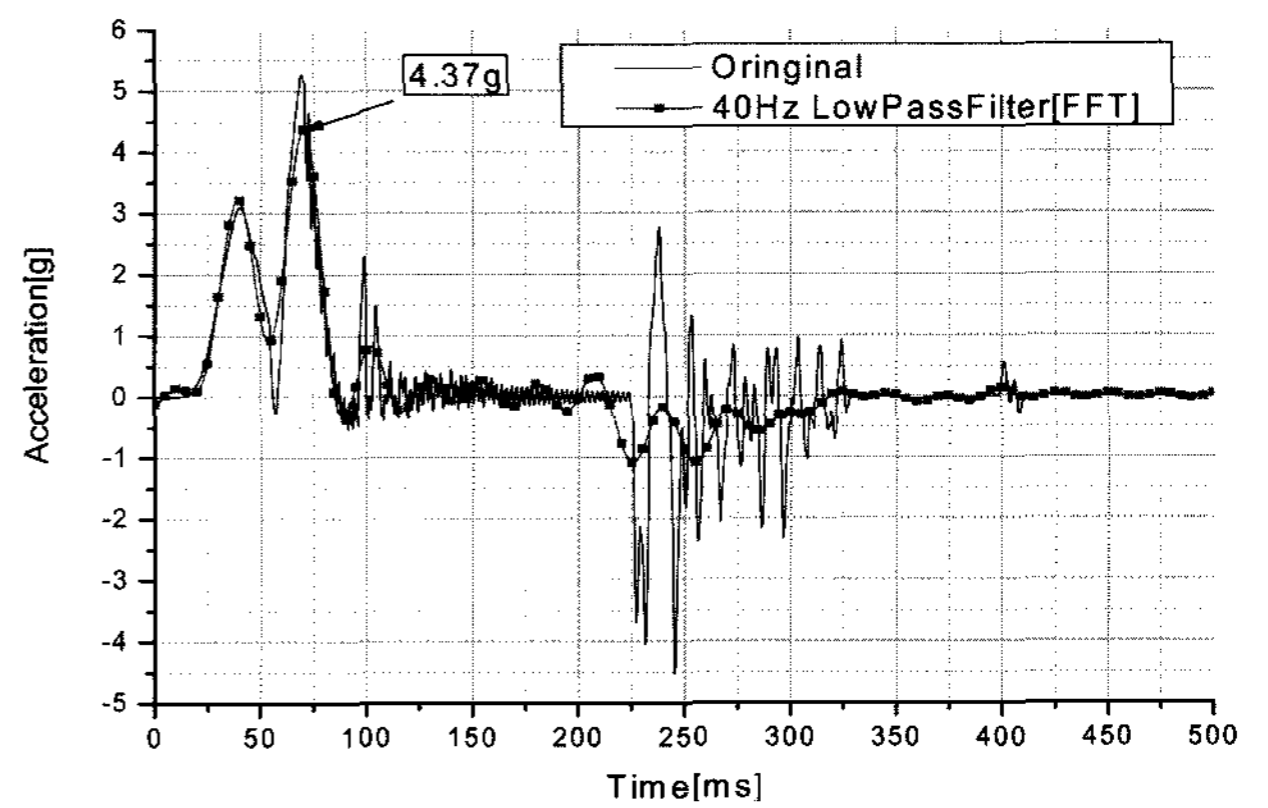


Fig. 12. M1 mid-section acceleration

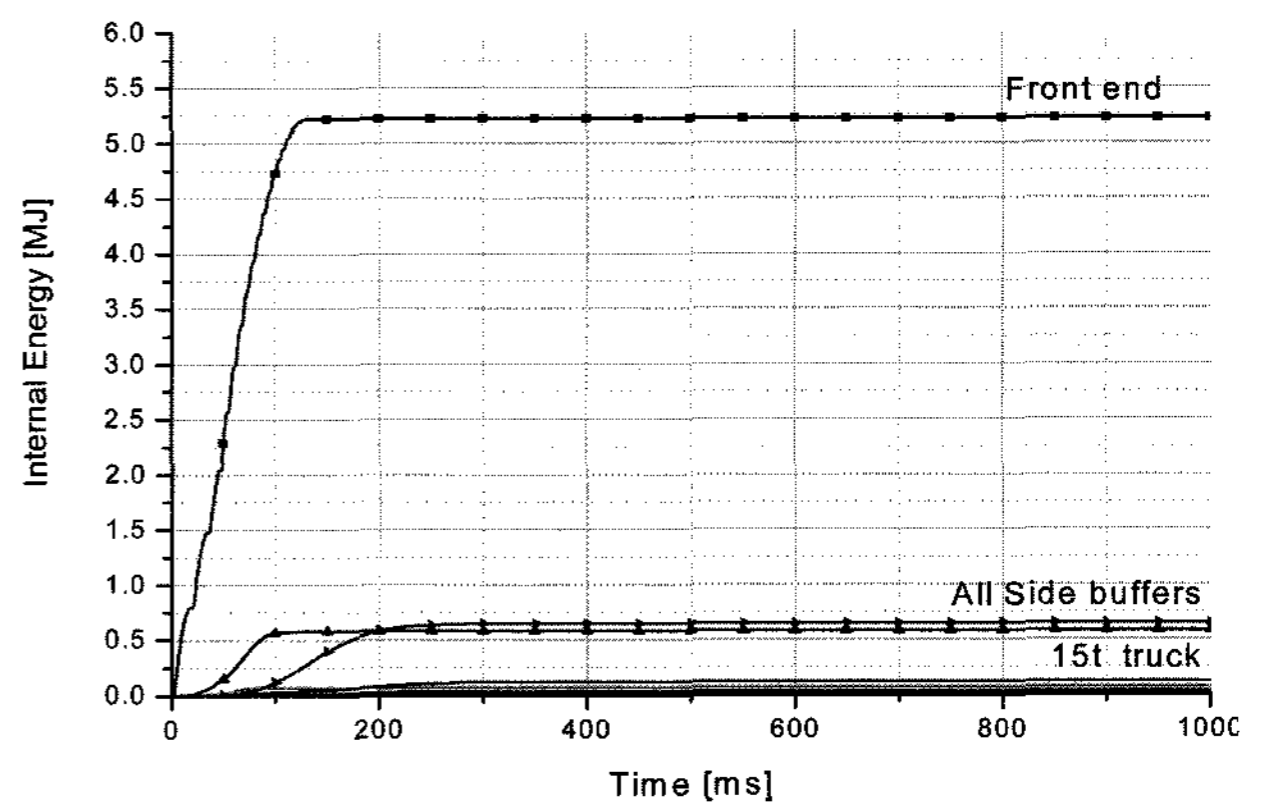


Fig. 13. Absorbed energy in each part

족한다.

Fig. 13은 각 차체 구조 및 부품에서 흡수한 충격에너지량을 나타낸 것이다. 전체운동에너지의 74.58%(5.22MJ)를 전두부에서 그리고 8.28%(0.58MJ)를 변형체 장애물에서 흡수하였고 사이드 버퍼 등 나머지 구조 및 부품에서는 단지 17.15%(1.2MJ)만 흡수(3.67%는 잔여 운동에너지로 존재)하였다.

3.2 열차 대 열차 충돌사고 시뮬레이션

Fig. 1의 동력분산형 차세대고속열차가 정지한 동일 열차와 36km/h로 충돌하는 사고를 1차원 동역학 모델로 시뮬레이션 하였다. Fig. 14는 충돌해석시 에너지의 전환이력을 나타낸 것이다. 초기 운동에너지의 전부가 흡수되었으며, 수치해석과정의 전체 에너지변화량도 0.065%로 잘 일치하였다.

Fig. 15는 전두부의 압괴량을 구한 것으로 전두부가 1270mm 압괴되어 Fig. 4에서 정의한 압괴 가능길이 2062mm와 비교하면 많은 여유가 있었다. Fig. 16은 TC차량 후미 구조의 변형을 나타낸 것인데 68.2mm(130mm로 설정의

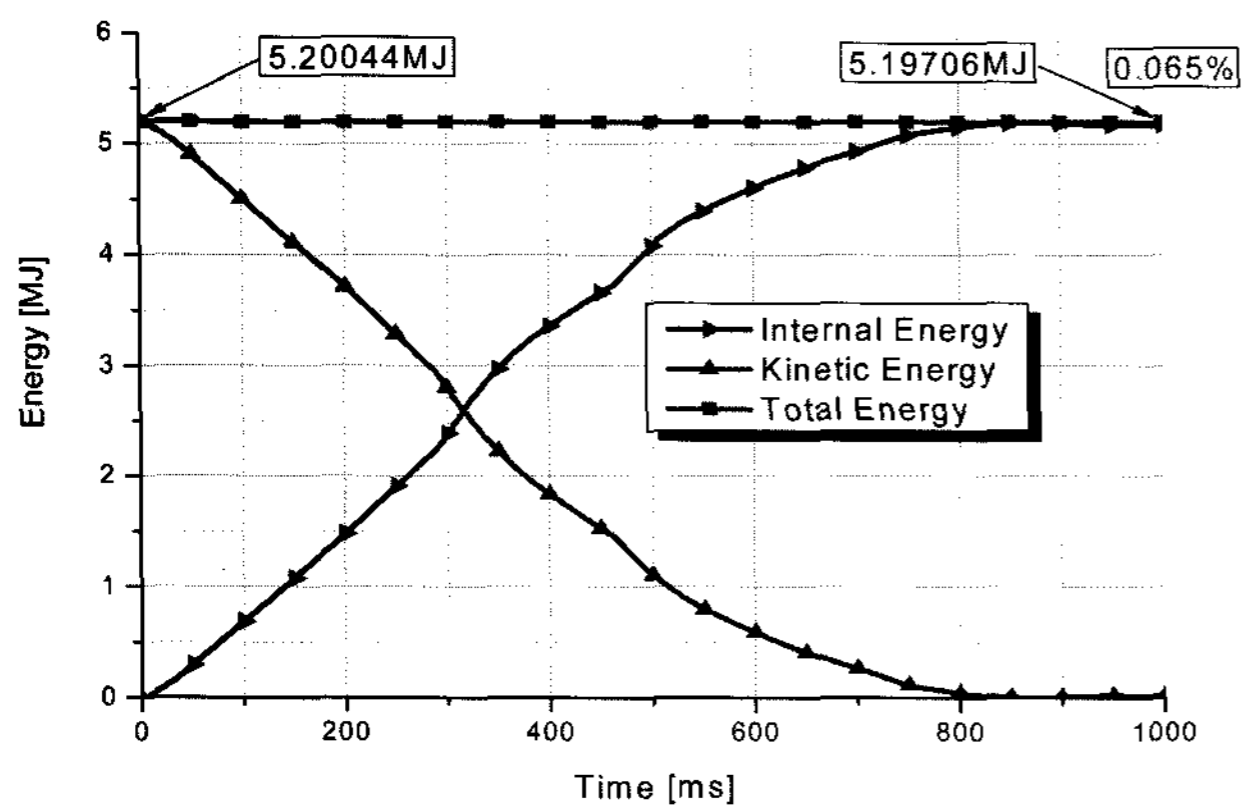


Fig. 14. Energy history curves

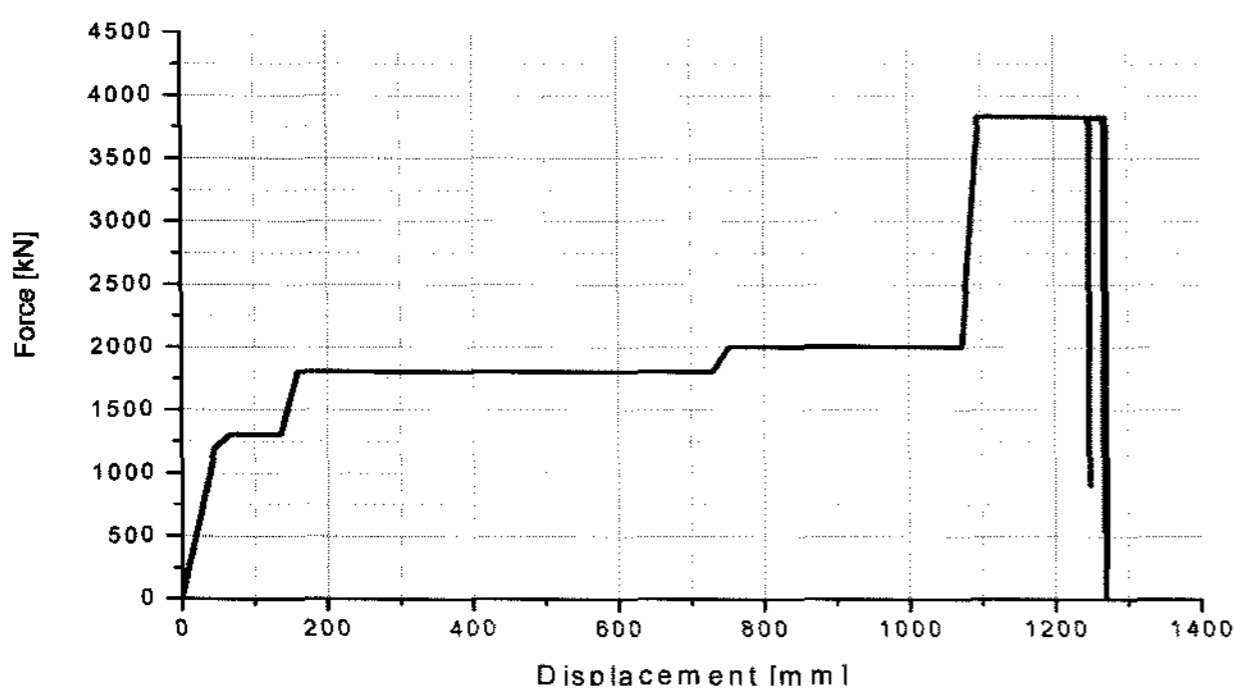


Fig. 15. F-δ curve of the front end

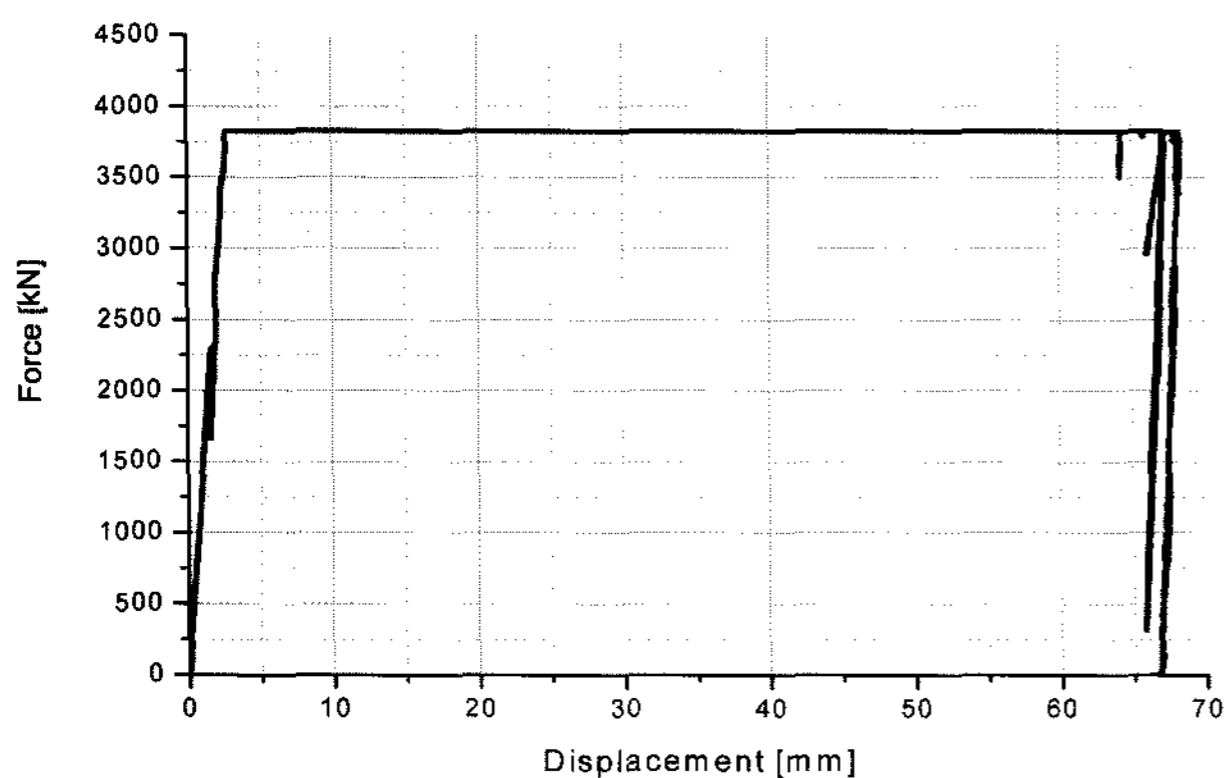


Fig. 16. F-δ curve of the TC end-section

압괴가 발생하여 0.25MJ의 충격 에너지를 흡수하였다. Fig. 17에 나타낸 사이드버퍼의 압괴변형은 최대 허용 변형량인 400mm에 도달하였고 후속하는 1세트의 사이드버퍼도 동일한 현상을 나타내었다.

한편 Fig. 18, 19는 TC와 후속 M1의 차실내 가속도를 필터링한 것인데 가속도 설계제한조건(최대 7.5g, 평균 5g)을 초과한다. Fig. 20에서는 각 차체 구조 또는 부품에서 흡수한 충격 에너지 량을 나타내었다. 전체 운동에너지의 50.6%(2.632MJ)를 전두부에서 그리고 4.89%(0.254MJ)를

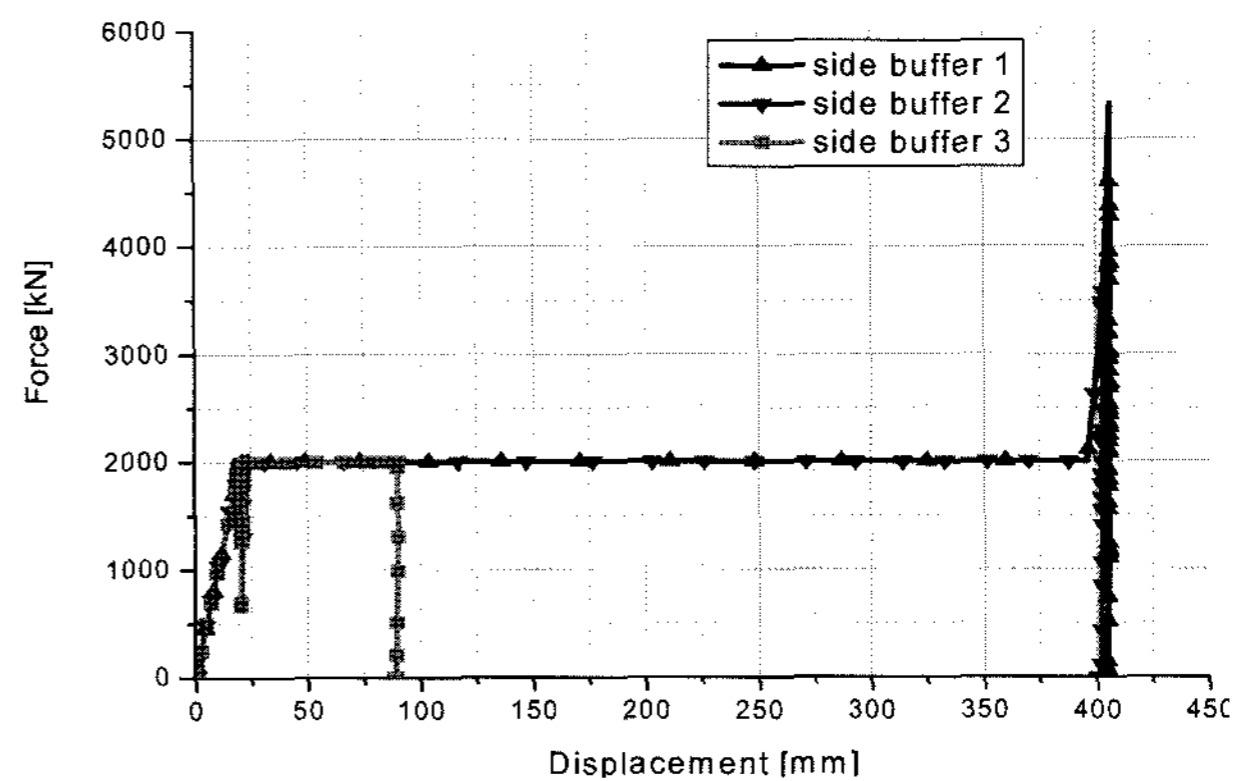


Fig. 17. F-δ curve of the side buffer 1, 2 and 3

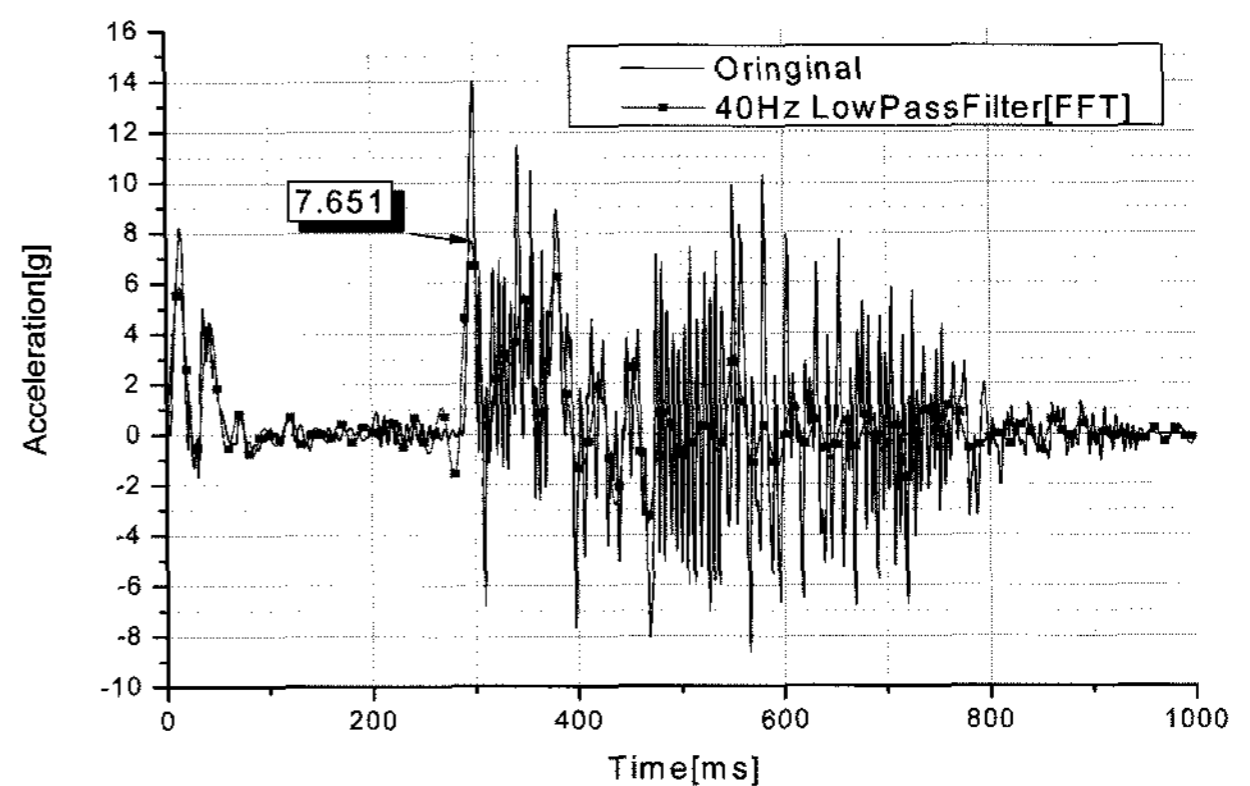


Fig. 18. TC front-section acceleration

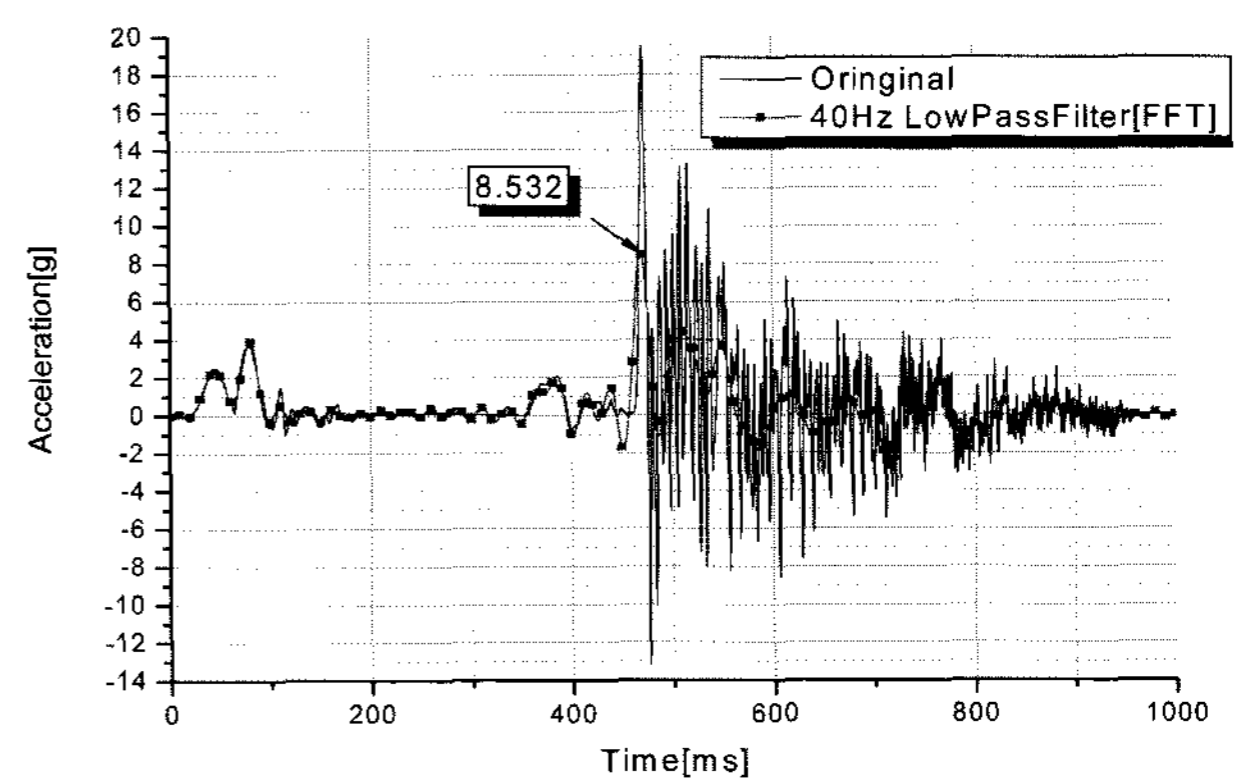


Fig. 19. M1 mid-section acceleration

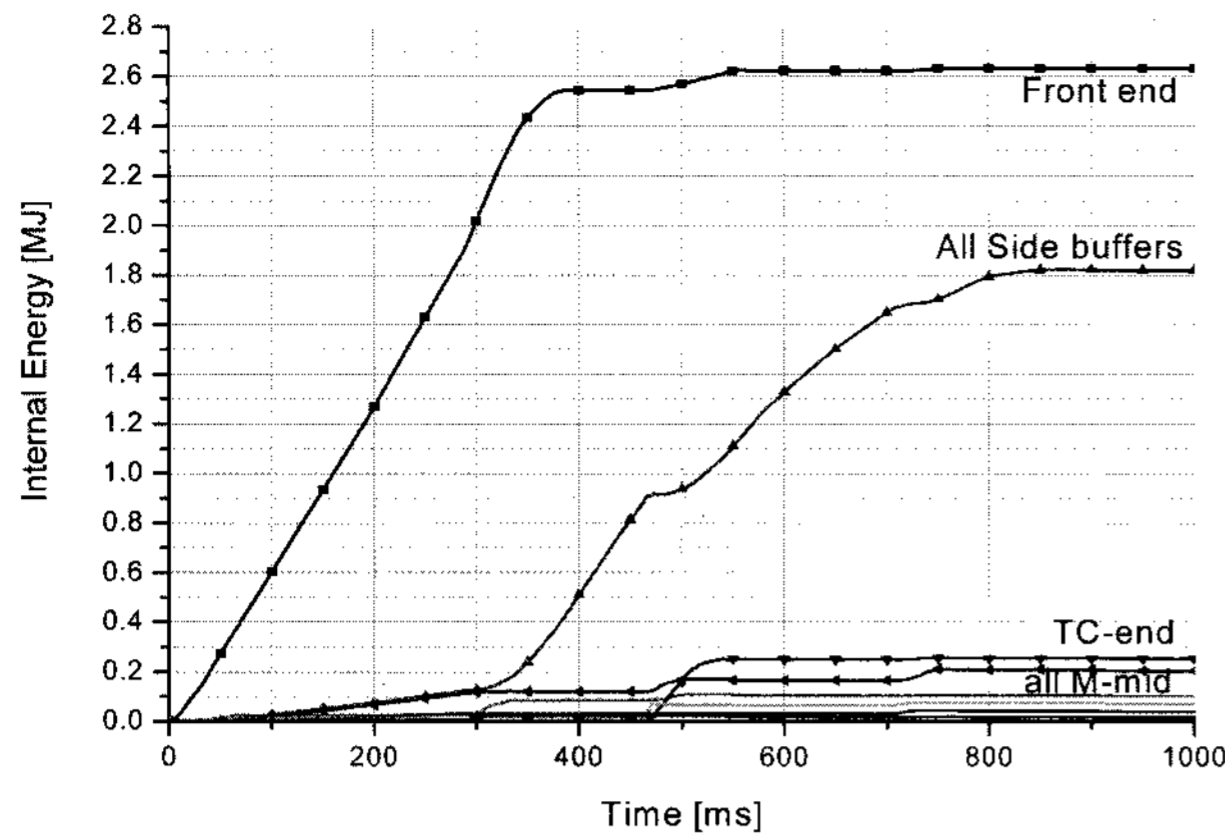


Fig. 20. Absorbed energy in each part

TC차량 후미구조에서 흡수되었다. 또 차량 간 연결된 모든 사이드 버퍼에서는 35.06%(1.823MJ)이 흡수되었고 나머지 구조/부품에서는 단지 9.43%(0.49MJ)만 흡수 하였다.

3.3 충돌해석 결과 평가 및 개선방안

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 운동 에너지의 5.22MJ(74.58%) 를 흡수하고, 열차 대 열차 충돌의 경우 TC차량 후미구조에서 0.254MJ(4.89%), 사이드 버퍼 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

Structure	Collision with obstacle		Collision of train to train	
	Deformation (mm)	Absorbed energy (MJ)	Deformation (mm)	Absorbed energy (MJ)
Obstacle	423.7/crush	0.579/8.28%	-	-
Front end	1944.2/crush	5.22/74.58%	1270.5/crush	2.63/50.62%
Driver's area	9.45/elasticity	-	10.3/elasticity	-
TC-mid	42.4/elasticity	-	51.6/elasticity	-
Side buffer	267.96/crush	267.9/9.25%	406.69/crush	1.82/35.06%
TC-end	1.58/elasticity	-	68.2/crush	0.254/4.89%
M-door	6.11/elasticity	-	16.5/elasticity	-
M-mid	22.6/elasticity	-	40.5/elasticity	-
M-end	5.77/elasticity	-	10.5/elasticity	-

TC차량 전두부 설계에서 고려할 사항은 객실 충격 가속도, 운전실 압피방지 등이다. 이를 위하여 전두부 외형설계가 허용하는 범위내에서 전두부의 압피강도를 낮게 하면 유

리하다. 따라서 전두부의 최고 압피 강도를 526kN 낮게 하여 3300kN으로 재설계하였다. 이 경우 운전실은 최소한 1500kN이 더 높은 4800kN 이상의 압피 강도로 설계하여야 한다.

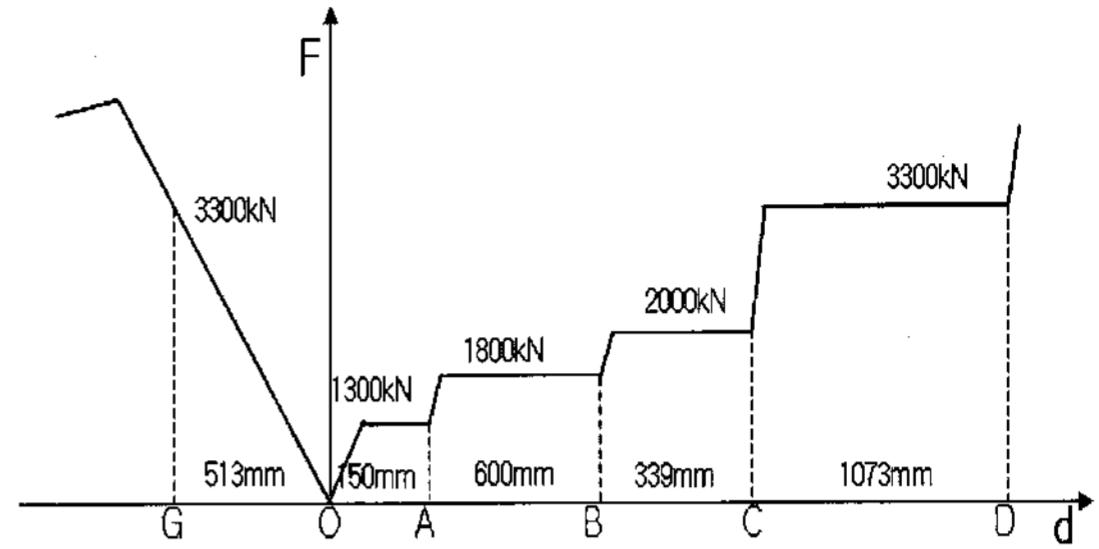


Fig. 21. Modified force and deformation curve of the front end

TC차량 후미구조 설계에서 고려할 사항은 후속하는 M1 차량의 충격가속도와 정적구조강도 조건이다. 그런데 현재 설계된 TC차량 후미구조의 압피강도인 3826kN은 경험적으로 UIC 구조강도 설계조건(2000kN에서 항복강도조건)을 만족시킬 수 있는 충분한 수준이다. Fig. 18, 19에서 보듯이 TC차량과 M1 차량의 충격 가속도가 철도안전법 요구조건인 최대 7.5g, 평균 5g를 만족시키지 못하므로 TC차량후방구조를 Fig. 22와 같이 현재에서 3300kN로 15%정도 낮게 설정하였다. 이 압피 강도 수준을 유지하면서 UIC 구조강도 설계조건을 만족시킬 수 있도록 상세설계에서 세심한 정적강도 설계가 필요하다.

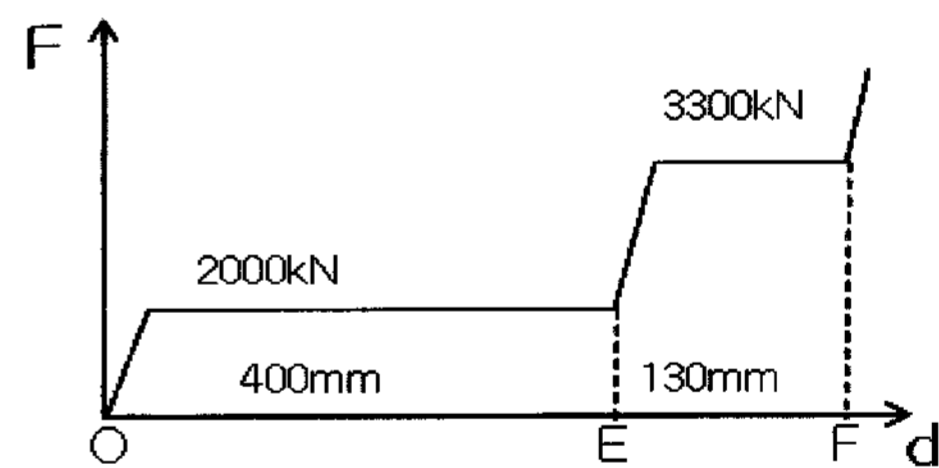


Fig. 22. Modified force and deformation of the rear end

4. 개선된 TC차량의 압피모델 평가

4.1 변형체 장애물 충돌사고 시뮬레이션

Fig. 23은 표준장애물 충돌 해석시 에너지의 전환 이력을 나타낸 것이다. 수치해석과정의 총 에너지 변화량은 0.226% 이내로 일치하였다.

Fig. 24는 표준변형체장애물의 변형량을 구한 것인데, 374.4mm 정도 변형이 발생하여 1차 해석결과인 423.7mm 보다 13.1% 정도 적었다. Fig. 25에서는 전두부의 압피가 2148mm정도 발생하여 Fig. 21에서 정의한 압피 가능길이

2162mm에 거의 도달하였다. 한편 Fig. 26은 사이드 버퍼의 압괴변형을 나타낸 것인데 최대 허용 변형량인 400mm에는 도달하지 않았다.

한편 Fig. 27, 28은 각각 TC차량과 M1차량의 차실내 가속도를 나타낸 것인데, 철도안전법 시행지침 16의 가속도 제한조건을 만족한다. Fig. 29는 각 차체 구조 또는 부품

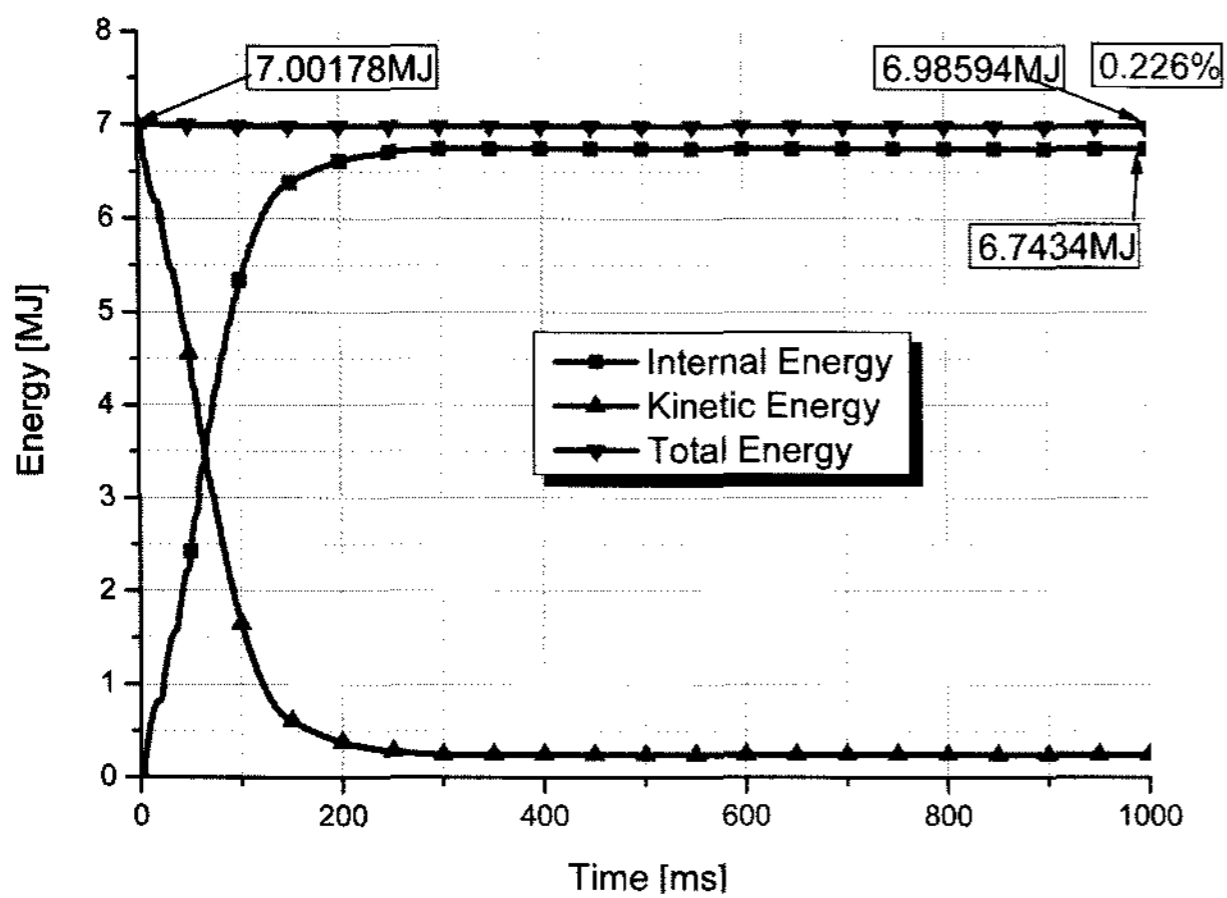


Fig. 23. Energy history curve for the modified model

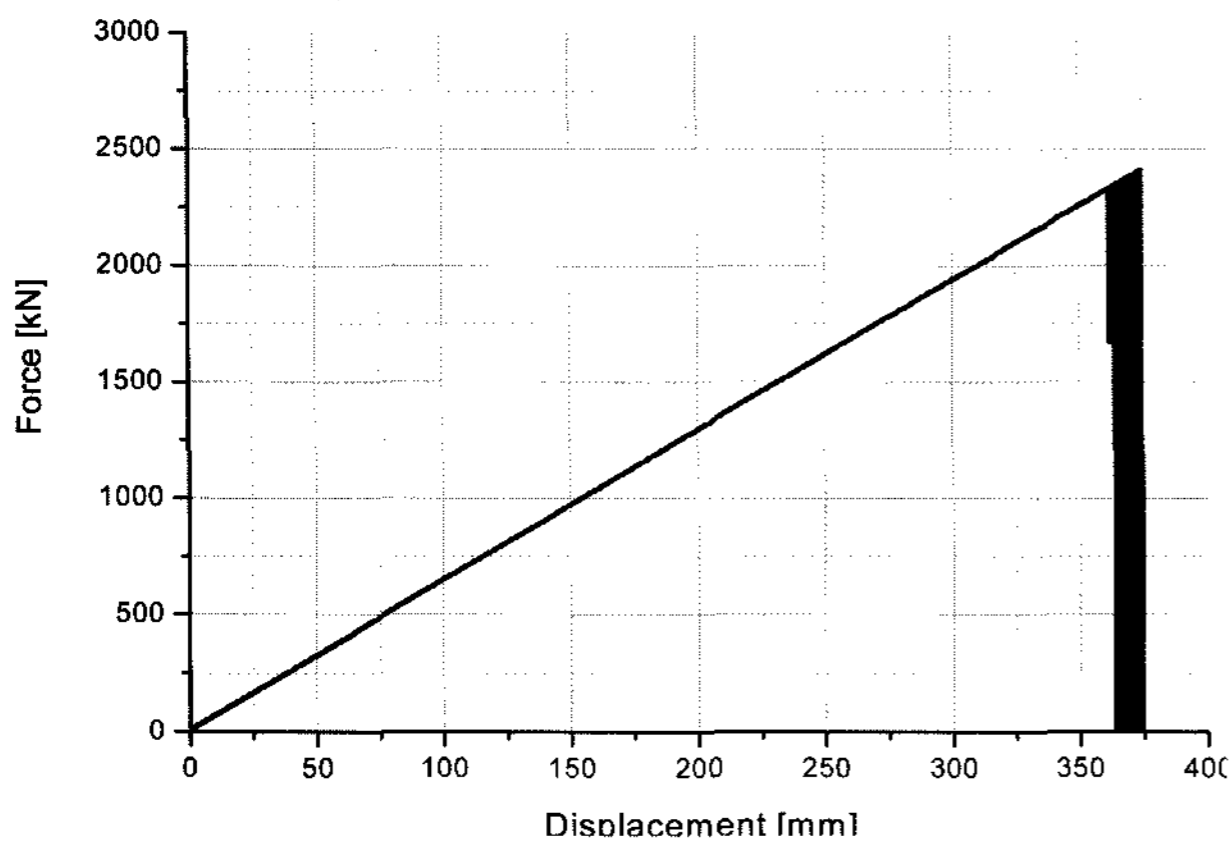


Fig. 24. F-δ curve of the deformable obstacle

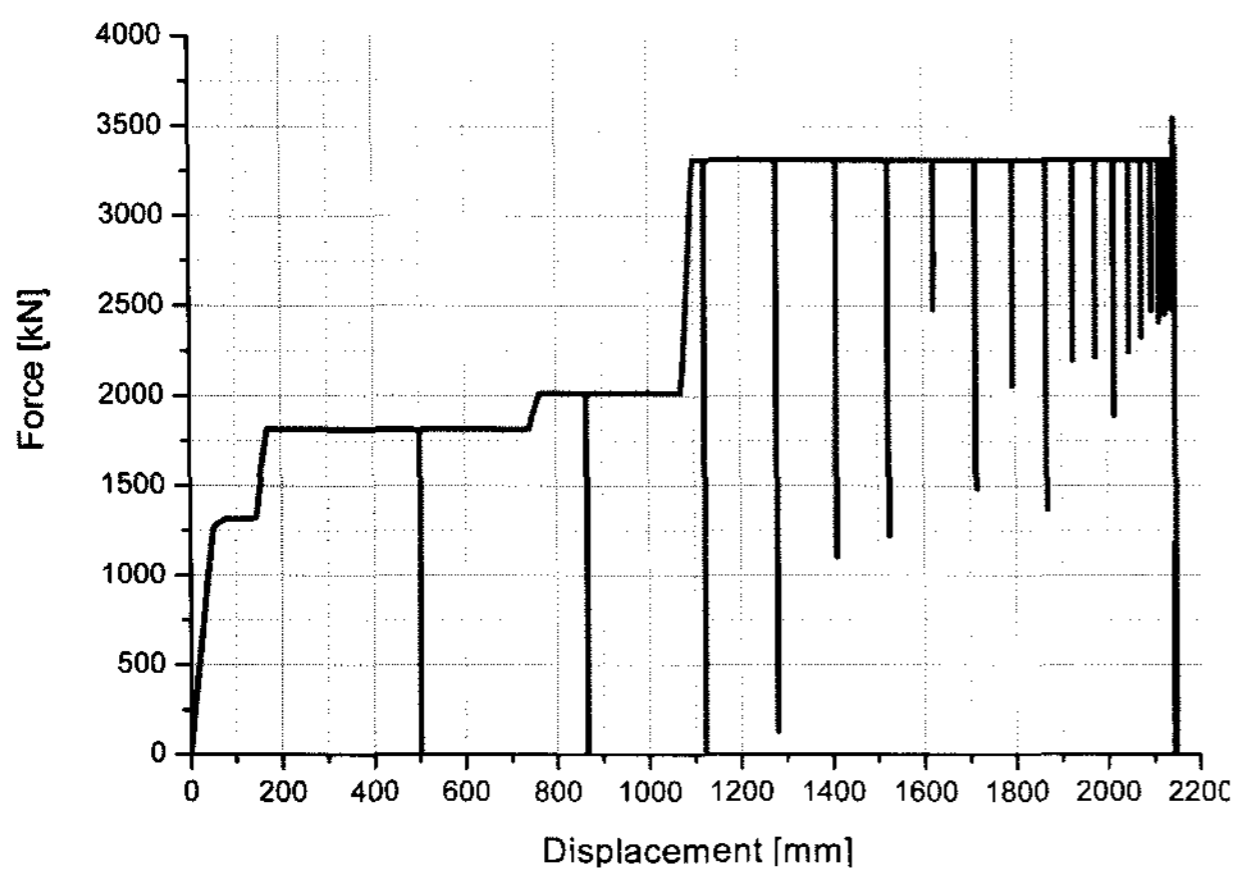


Fig. 25. F-δ curve of the front end for the modified model

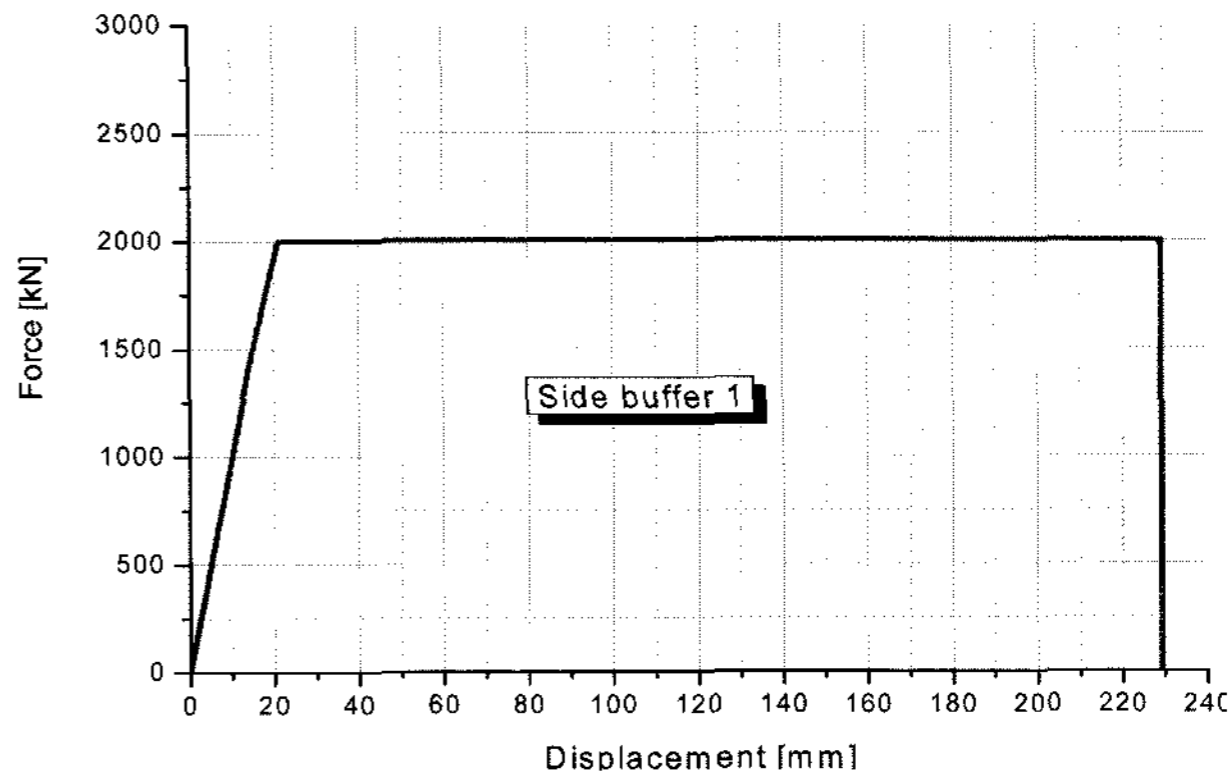


Fig. 26. F-δ curve of the side buffer for the modified model

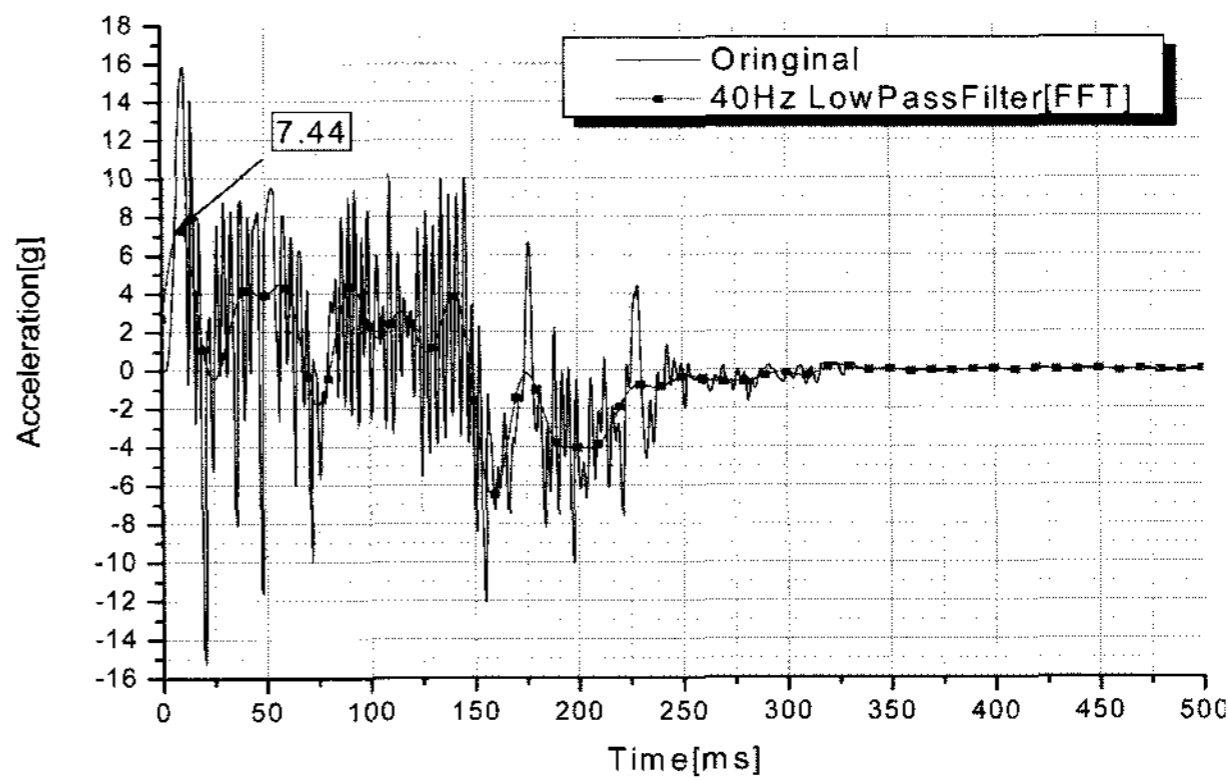


Fig. 27. TC front-section acceleration for the modified model

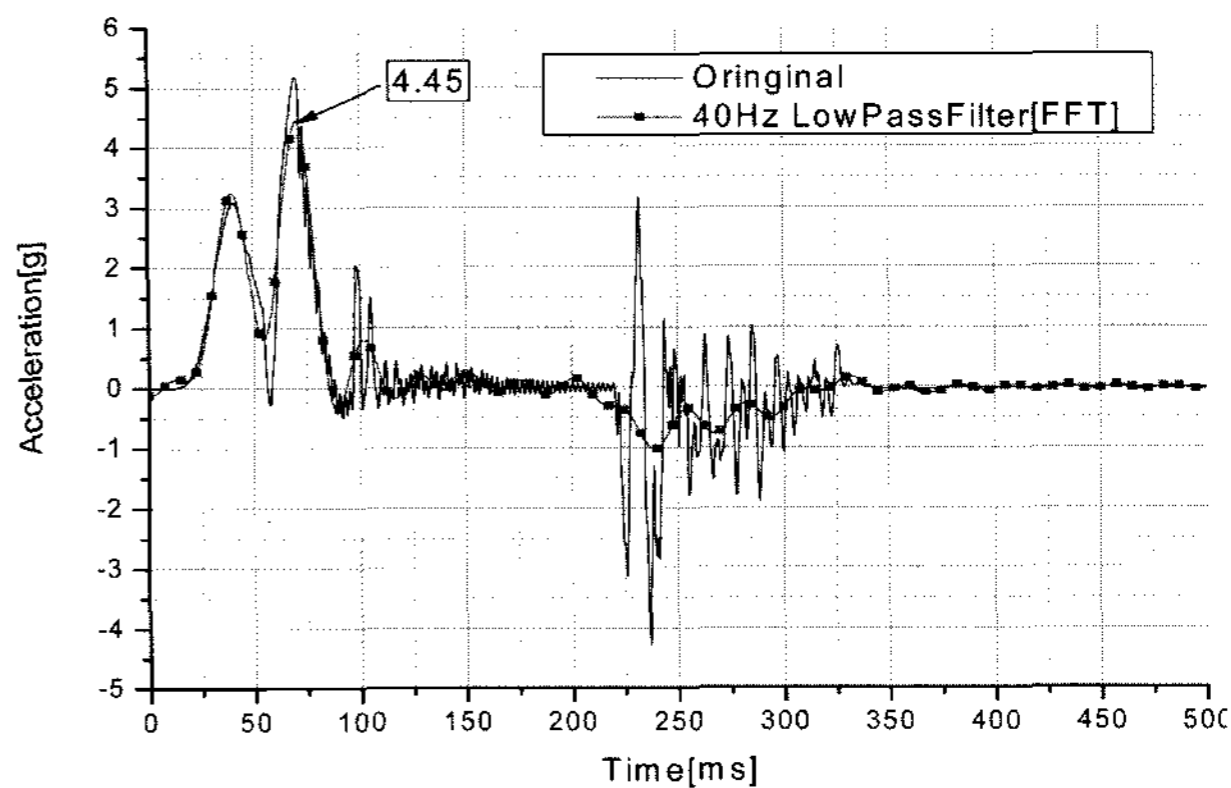


Fig. 28. M1 mid-section acceleration for the modified model

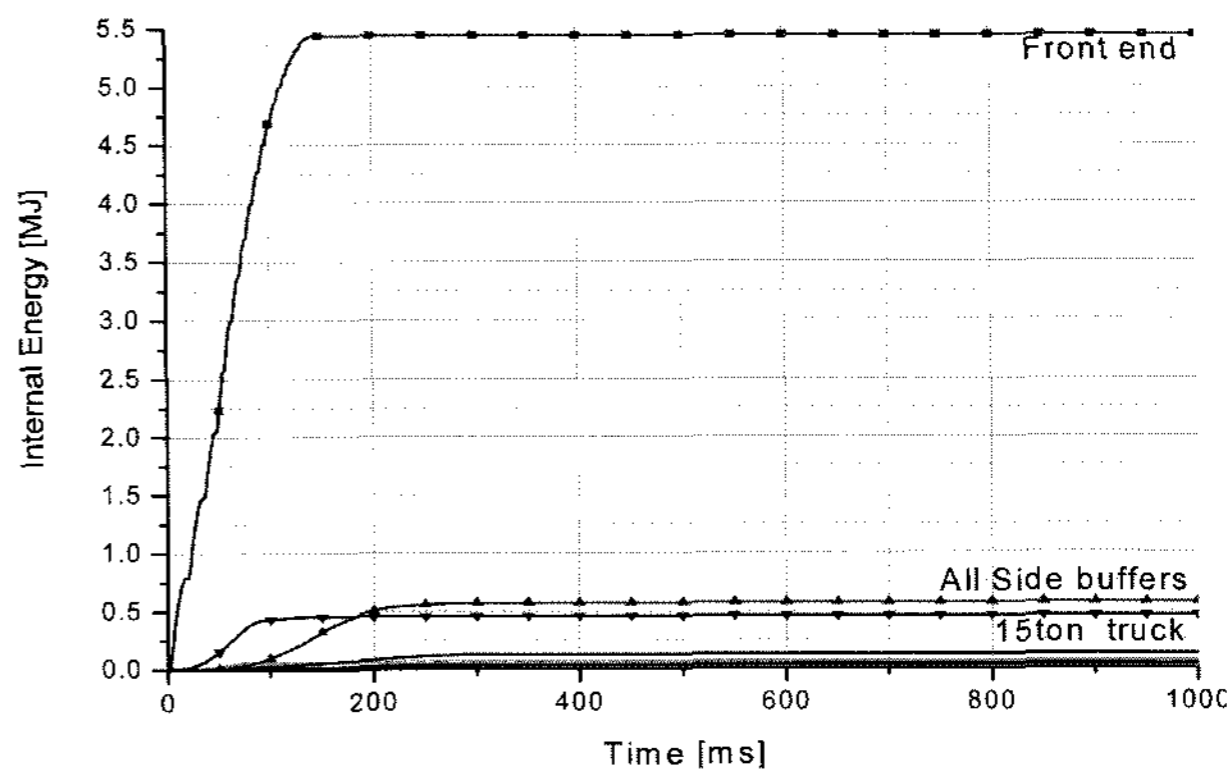


Fig. 29. Absorbed energy in each part

에서 흡수한 충격 에너지 량을 나타낸 것이다. 전체 운동 에너지의 77.69%(5.439MJ)를 전두부에서 그리고 6.51%(0.4558MJ)를 변형체 장애물에서 흡수하였고, 사이드 버퍼 등 나머지 구조/부품에서는 단지 15.8%(1.106MJ)만 흡수(3.69%는 잔여 운동에너지로 존재)하였다.

4.2 열차 대 열차 충돌사고 시뮬레이션

Fig. 30은 열차 대 열차 충돌 해석시 에너지의 전환 이력을 나타낸 것이다. 수치해석과정의 전체 운동 에너지 변

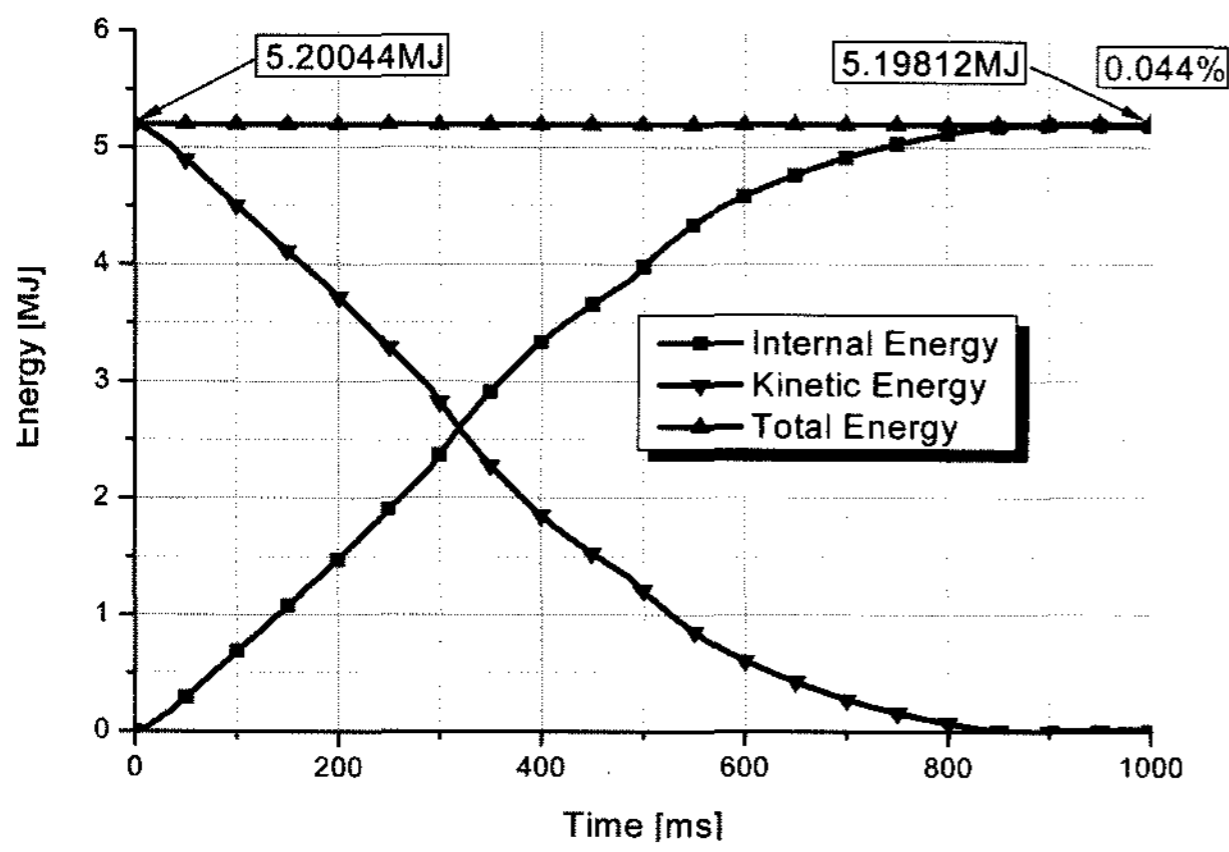


Fig. 30. Energy history curve for the modified model

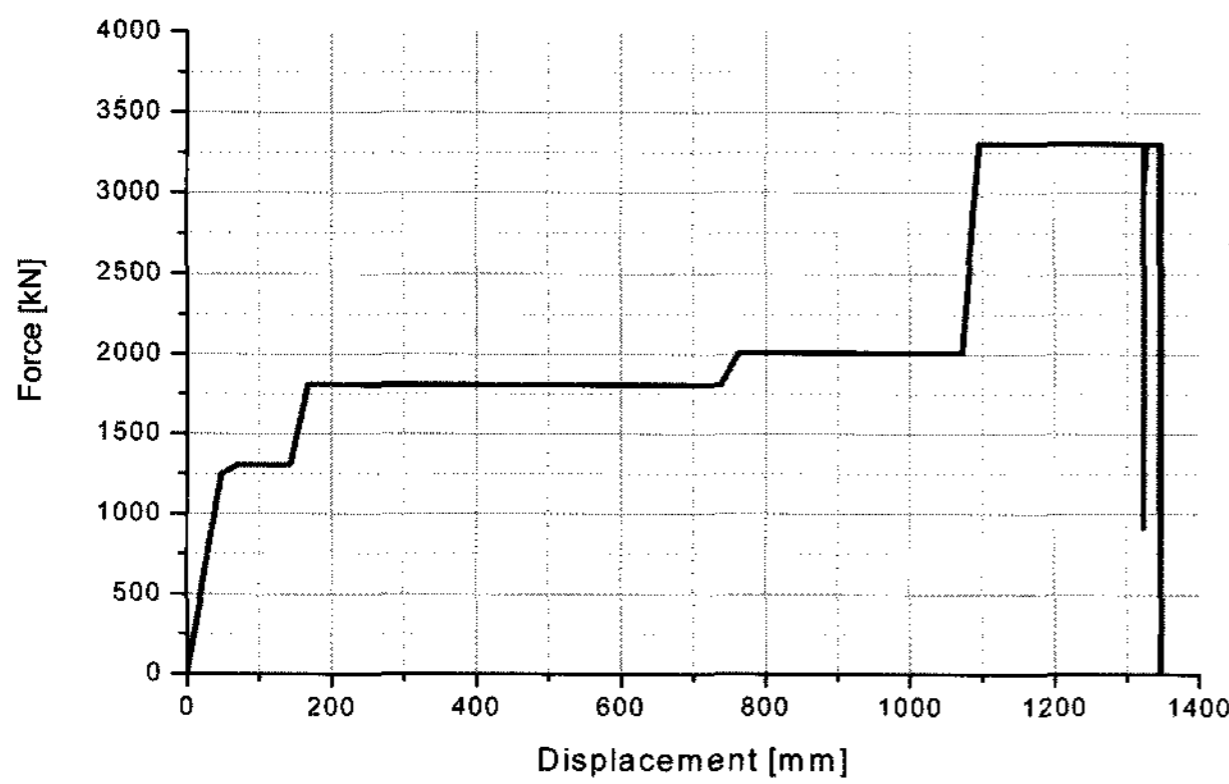


Fig. 31. F-δ curve of the front end for the modified model

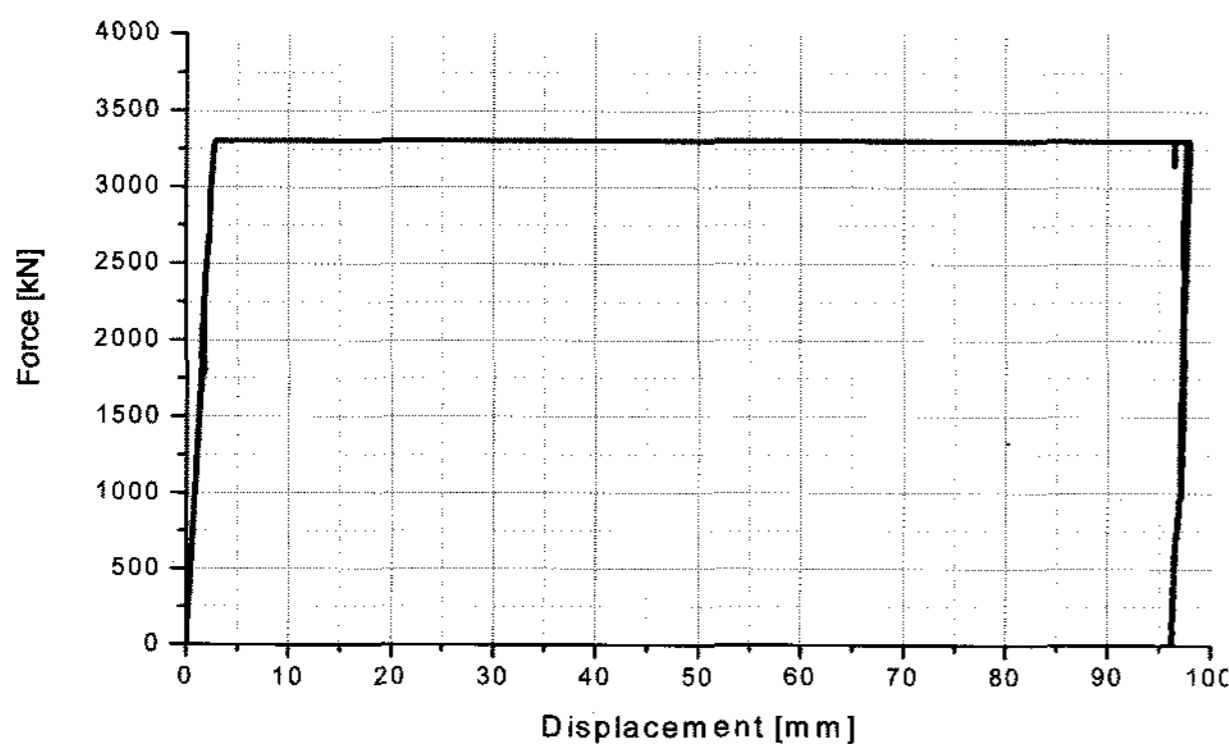


Fig. 32. F-δ curve of the TC end for the modified model

화량도 0.044% 이내로 잘 일치하였다.

Fig. 31은 전두부의 압괴량을 구한 것으로 전두부가 1347mm 압괴되어 Fig. 21에서 정의한 압괴 가능길이 2162mm와 비교하면 많은 여유가 있었다. Fig. 32는 TC차량 후미구조의 변형을 나타낸 것인데 98mm 정도의 압괴가 발생하여 0.3194MJ 정도의 충격 에너지를 흡수하였다. Fig. 33의 사이드버퍼 압괴변형은 앞에서부터 2세트가 최대 허용 변형량인 400mm에 도달하였다.

한편 Fig. 34는 TC차량의 차실내 40Hz low pass 필터

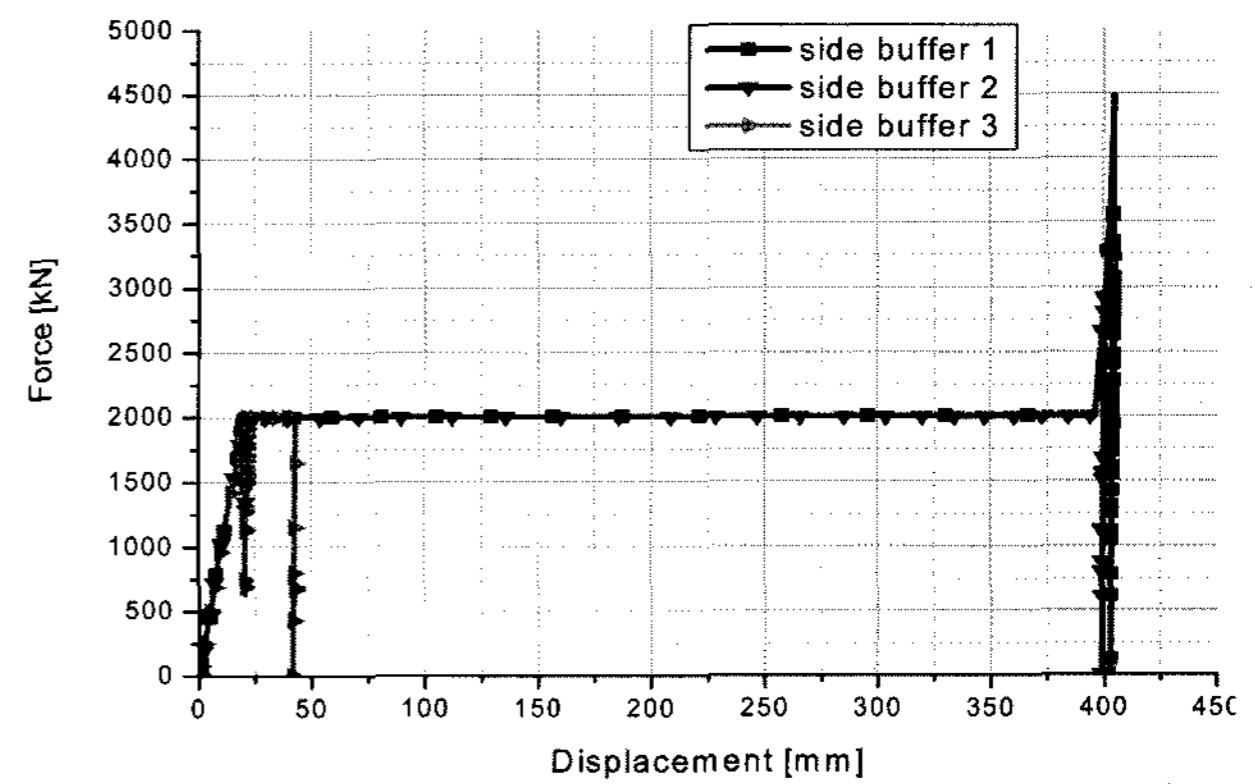


Fig. 33. F-δ curve of the side buffer for the modified model

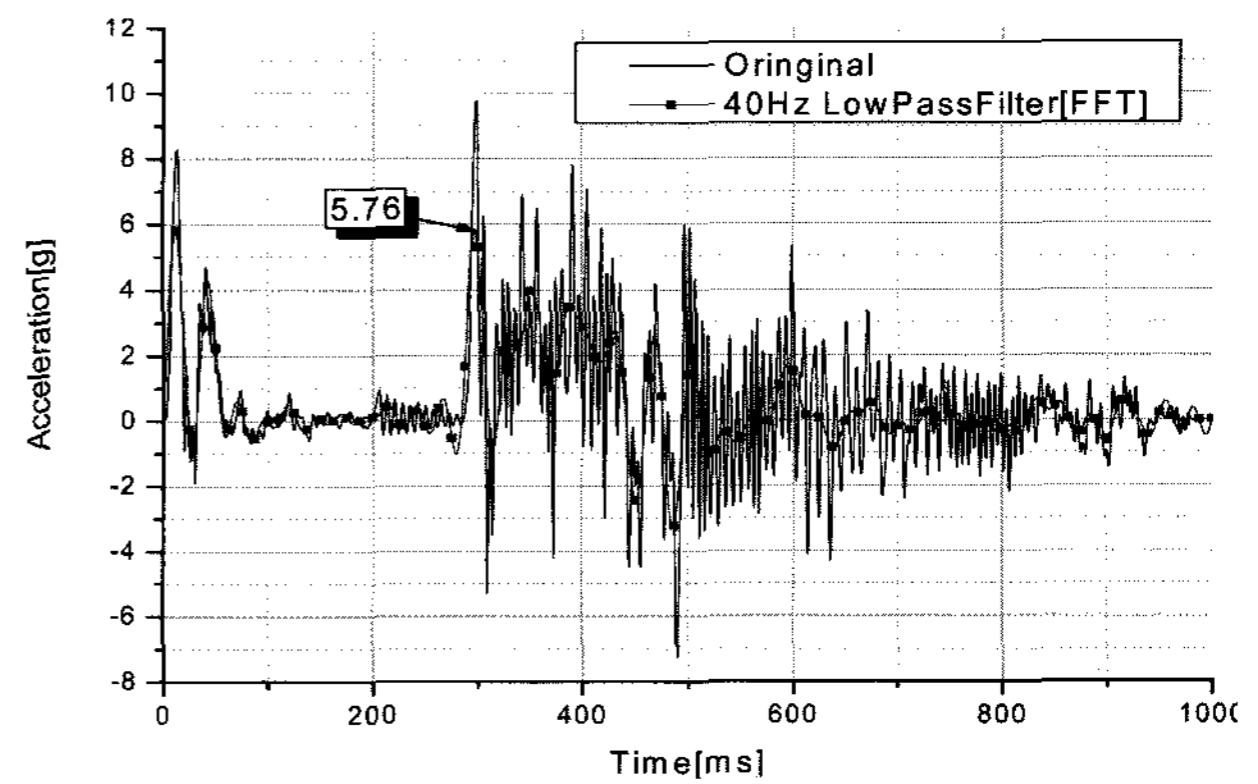


Fig. 34. TC front-section acceleration

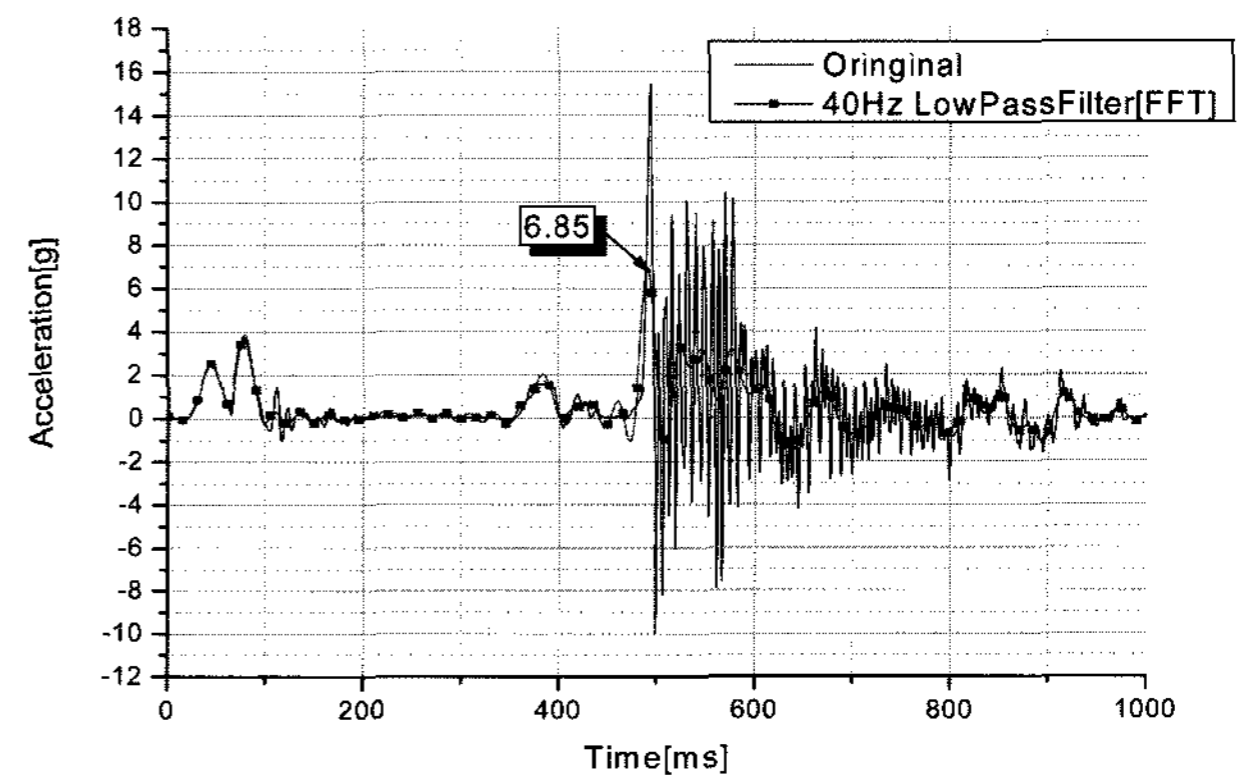


Fig. 35. M1 mid-section acceleration for the modified model

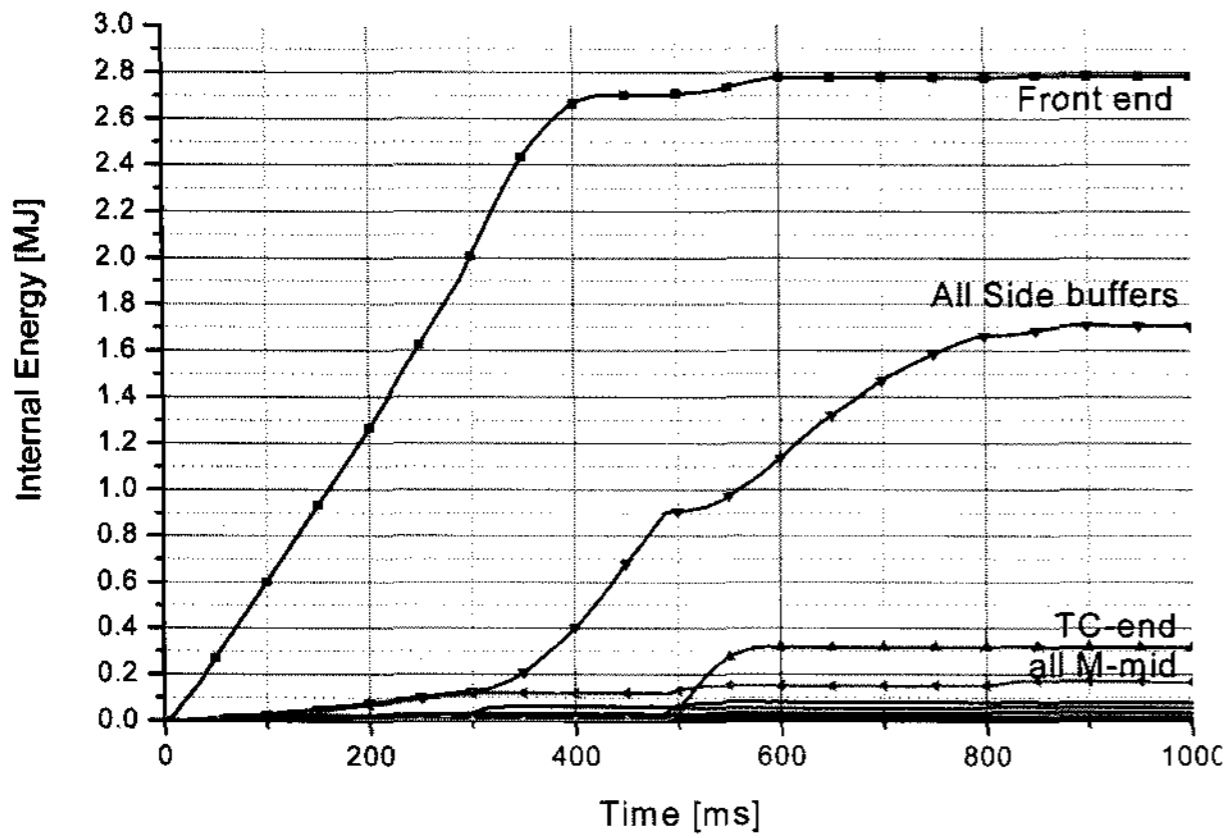


Fig. 36. Absorbed energy in each part for the modified model

링한 가속도를 나타낸 것이고, Fig. 35는 M1차량의 차실내 가속도를 나타낸 것인데 가속도 설계제한조건을 만족한다. Fig. 36에서는 각 차체 구조와 부품에서 흡수한 충격 에너지량을 나타내었다. 전체 운동 에너지의 53.56% (2.785MJ)는 전두부에서 그리고 6.14%(0.3194MJ)는 TC차량 후미구조에서 흡수되었다. 또 전체 차량에 취부된 사이드 버퍼에서는 32.82%(1.706MJ)이 흡수되었고 나머지 구조/부품에서는 단지 7.48%(0.3891MJ)만 흡수되었다.

4.3 개선된 충돌해석 결과 평가

Table 2는 개선된 TC차량 압괴모델에 대하여 표준 변형체 장애물 충돌과 열차 대 열차 충돌 시나리오를 적용하여 해석한 주요 구조/부품들의 변형량과 에너지 흡수량을 정리한 것이다.

표준변형체장애물과 충돌의 경우 전두부에서 전체 운동 에너지의 5.439MJ(77.69%)를 흡수하였다. 또 열차 대 열차 충돌의 경우 TC차량 후미구조에서 0.3194MJ(6.14%), 사

이드버퍼에서 1.706MJ(32.82%)를 흡수하여 TC-M1 인터페이스 부분에서 전체 운동에너지의 2.026MJ(38.96%)를 흡수하였다.

5. 결론

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

- 1) 전두부는 장애물 충돌 시나리오를 적용하여 전체 운동 에너지의 77.6% 수준인 5.44MJ을 흡수할 수 있도록 설계하여야 하며, 또 표준변형체장애물의 압괴 강도와 충격 가속도 조건을 고려하여 3300kN 수준의 압괴강도를 가져야 한다.
- 2) TC차량 후미구조는 열차 대 열차 충돌 시나리오를 적용하여 전체 운동 에너지의 6.14% 수준인 0.319MJ을 흡수할 수 있도록 설계하여야 하며, 정적 강도 조건과 충격 가속도 조건을 고려하여 3300kN 수준의 압괴강도를 가져야 한다.
- 3) 이와 동시에 TC 차량 전두부의 압괴 가능길이는 2149mm 이상이어야 하며, TC 차량 후미부의 압괴 가능길이는 98mm 이상 확보되어야 한다.
- 4) 기존의 동력집중식 고속열차와 달리 선두차인 TC차량에 승객이 탑승하므로 충격감속도 저감을 위하여 전두부의 평균압괴하중은 낮게 하고 압괴길이는 길게 하여야 한다.

본 연구에서 제시된 충돌설계 사양에 대한 가이드라인은 추후 차체구조 및 부품의 기본설계 과정에 반영되고 설계된 실제구조물에 대한 유한요소모델의 충돌해석을 통하여 평가되어야 한다.

감사의 글

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

참고문헌

1. J. H. Lewis (1994), "Development of crashworthy vehicle structures for railways", WCRR'94, pp. 893-900.
2. T. David (2003), "Passenger Rail Train-to-Train Impact Test Volume I: Overview and Selected Results", Final Report, DOT/FRA/ORD-03/17, July.
3. D. C. Tyrell, K. J. Severson, and B. J. Marquis (1995), "Train Crashworthiness Design for Occupant Survivability", ASME Interna-

Table 2. Comparison of the simulation results

Structure	Collision with obstacle		Collision of train to train	
	Deformation (mm)	Absorbed energy (MJ)	Deformation (mm)	Absorbed energy (MJ)
Obstacle	374.4/crush	0.455/6.51%	-	-
Front end	2148.8/crush	5.439/77.6%	1347.8/crush	2.785/53.5%
Driver's area	8.4/elasticity	-	8.5/elasticity	-
TC-mid	38.2/elasticity	-	44/elasticity	-
Side buffer	229.38/crush	0.568/8.12%	405/crush	1.706/32.8%
TC-end	1.84/elasticity	-	98/crush	0.319/6.14%
M-door	6.08/elasticity	-	14/elasticity	-
M-mid	22.6/elasticity	-	34/elasticity	-
M-end	5.78/elasticity	-	8.5/elasticity	-

- tional Mechanical Engineering Congress and Exposition, AMD-Vol 210, pp. 59-74.
4. FCD (2005), Crashworthiness Requirements for Railway Vehicle Bodies, EN15227.
 5. 철도차량 안전기준에 관한 규칙(2005), 건설교통부령 제 455호, 2005.7.8 공포.
 6. 철도차량 안전기준에 관한 지침(2005), 건설교통부고시 제2005-438호, 2005.12.22.
 7. 철도차량 안전기준에 관한 지침(2007), 건설교통부고시 제2007-278호, 2007.7.9.
 8. J. S. Koo and Y. H. Youn (2004), "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.
 9. J. S. Koo, J. H. Jik, D. S. Kim, and Y. H. Youn (2001), "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.
 10. J. S. Koo, D. S. Kim, H. J. Cho, T. S. Kwon, and S. K. Choi (2000). "Analysis on the Crashworthiness of the Full Rake Korean Electric Multiple Unit Train", Korean Society for Railway, Vol. 3, No. 1, pp.27-33.
 11. H. S. Han and J. S. Koo (2003), "Simulation of train crashes", Vehicle System Dynamics, Vol. 40, 6 , pp. 435-450.
 12. AEIF/TSI (2002), The technical specification for Interoperability relating to the rolling stock subsystem of the trans-European high-speed rail system, May 30.
 13. 구정서 외 13인(1999), "설계기반기술 세부분야: 충돌안전도 해석기술 개발 4차년도 보고서".
- 접수일(2008년 5월 19일), 수정일(2008년 6월 20일), 게재확정일(2008년 6월 20일)