

한국형 고속전철 동력객차 설계초안 모델의 충돌특성 비교연구

A Comparative Study on Crashworthiness for Motorized Trailer of Korean High Speed Train in planing

김현영 *
Kim, Heon-Young

이종근**
Lee, Jong-Keun*

ABSTRACT

The purpose of this study is to suggest the effective analytical procedure using finite element model for the crashworthiness of motorized trailer of high speed train. In the analysis of end-on collision of Motorized Trailer for Korean High Speed Train., deformed pattern, rigidwall force, internal energy and each part section force is obtained. From those indices, we evaluate crashworthiness of motorized trailer for Korean High Speed Train in planning. The numerical results are applied to the design of motorized trailer of Korean high speed train.

Keywords : High Speed Train(고속전철), Motorized Trailer(동력객차),

1. 서 론

21세기 산업 경제적 발전, 교통체제 완비와 더불어 교통수단의 경제성, 신속성, 안전성, 쾌적성 등 첨단 기술화가 매우 중요하게 부각될 전망이다. 우리나라에서도 낙후된 교통체제를 고도화하기 위하여 경부고속전철(TGV-K) 건설사업을 진행하고 있으며, 동시에 이전되는 기술을 토대로 하여 350 km/h급 한국형 고속전철(KHST)기술 개발 사업을 추진 중에 있다. 철도차량, 특히 고속전철의 경우, 향후 예상되는 철도차량의 수요증가와 더불어 고속화·경량화 추세를 감안하면 충돌시 승객의 안전을 제고하는 것은 대단히 중요한 일이다.

고속철도차량이 다른 철도차량이나 기타 장애물과 충돌할 경우 먼저 동력차에서 충돌에너지의 70~80%를 흡수하고, 동력객차에서 15% 정도를, 그리고 객차에서 나머지 충돌에너지를 흡수하는 것으로 분석된다. 각 차량의 연결장치 및 에너지 흡수 구조를 합리적으로 설계함으로써 튀어오름(override)현상, 탈선(derailment) 및 전복(rollover)현상 등의 발생을 현저히 감소시킬 수 있고, 구조물의 압괴로부터 승객의 생존 공간을 확보하고, 2차적인 승객과 차량내부 구성품과의 충돌을 완화할 수 있어서 충돌사고시 인명 피해를 최소화 할 수 있다.^[1]

고속전철 차량편성 중 동력객차(motorized trailer)는 운전실 및 4개의 추진동력을 갖춘 동력차(power car)와 객차(trailer)의 역할을 동시에 하는 차량으로 2개의 구동모터와 객실을 구비한 부수 동력 차량이다.

열차의 충돌해석을 위한 유한요소 모델에는 자동차 충돌해석에서 주로 사용되는 셸(shell) 요소, 8절점 6면체(solid) 요소, 보(beam) 요소, 비선형 스프링 요소가 사용되며, 특히 열차 개발 초기단

* 강원대학교 기계공학과 교수, 정회원

** 강원대학교 기계공학과 석사과정

계, 또는 여러 가지 차체 부재에 대한 충돌특성 연구 등을 수행하기 위하여 정확도는 다소 떨어지더라도 빠른 시간 내에 간단한 형태의 모델링만으로 충돌성향을 파악하여야 한다. Culière, P.^[2]는 3가지 간소화된 모델인 실험 모델, 국부적 유한요소 모델, 간소화된 운동학적인 모델을 사용하여 변형 모형과 수치적 해석 시간을 줄이는 연구 방법을 제시하였다. Sutton, A.^[3] 등은 열차를 수평 자유도만을 사용한 질량/스프링/댐퍼 시스템으로 모델화하여 충돌시에 다양한 변수들의 효과를 분석하였다. Markiewicz, E.^[4] 등은 셸 요소 모델과 하이브리드 모델과의 비교를 통하여 하이브리드 모델링 기법을 제시하였다.

본 연구에서는 설계단계에 있는 한국형 고속전철 동력객차 시작차 모델 A(TT5)와 모델 B(TM1)에 대하여 3차원 셸 모델링을 완성하고, 완성된 3차원 셸 모델을 이용하여 충돌해석을 수행하여, 각 차량에 대한 충돌특성을 비교하고자 하였다. 또한 해석 결과로 얻은 각 부분별 붕괴하중을 프랑스 알스톰사에서 제공한 값들과의 비교를 통하여 모델의 타당성을 검증하고 제작업체의 설계지원을 하고자 하였다.

2. 한국형 고속전철 동력객차의 충돌해석

2.1 시작차 모델 A의 충돌해석

가. 유한요소모델링

한국형 고속전철 시작차 모델 A는 업체에서 제공한 설계 중인 모델 중 첫 번째 모델이다. 현재 우리나라에 들어와 있는 경부고속전철의 동력객차와 외형적으로 다른 점은 승객이 타고 내리는 승강대 부분이 차량의 후미부분으로 이동한 것이다. 내부적으로 살펴볼 때 가장 다른 점은 소재가 강(Steel)에서 알루미늄으로 대체된 것이다.^{[7][8]} 또한 이런 소재 대체시 가져올 수 있는 무게대비 차체 강성을 높이기 위하여 차량의 바닥, 측면, 천장 구조를 일체형 알루미늄 압출재 단면형상을 사용하였다.

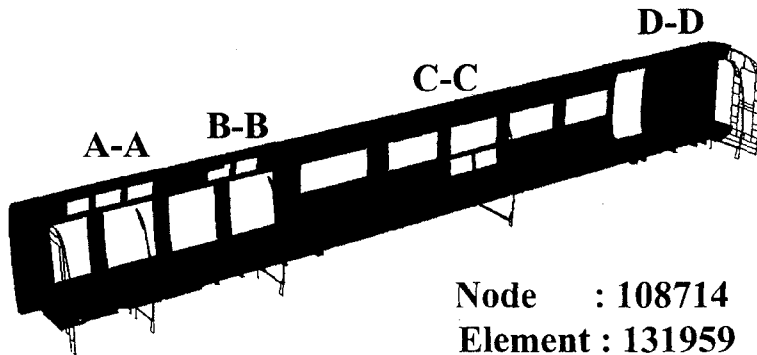


그림 1. The Finite Element Model for Crash Simulation of TT5 in KHST

그림 1은 시작차 모델 A의 유한요소해석 모델로서 요소크기 약 50mm로 전체적으로 균일하게 모델링되어 있다. 해석시간 단축을 위하여 반 모델로 모델링 되어있고, 모델에 사용된 절점수는 108,714개이고, 요소수는 131,959개다. 기존의 경부고속전철 동력객차 유한요소모델의 절점수가 약 50,000개이고, 요소수가 약 60,000개임을 감안할 때 약 두 배 이상의 절점과 요소를 사용하고 있다. 이러한 요소와 절점수의 증가는 앞서 말한 시작차 모델 A의 각 단면 압출재 형상을 보다 정확히 표현하고자 하였기 때문이다. 그림 2의 A-A, B-B, C-C, D-D는 그림 2에서 표시된 동력객차 각 부분의 단면형상을 나타낸 것이다. 그림 3에서 보는 바와 같이 압출재를 나타낸 단면형상은 대부분 삼각형형태를 사용하고 있다. 그림 3, 4, 5는 업체에서 제공한 모델 A의 천장, 측면, 바닥 구조에 관한 도면과 유한요소 모델을 비교한 그림이다.

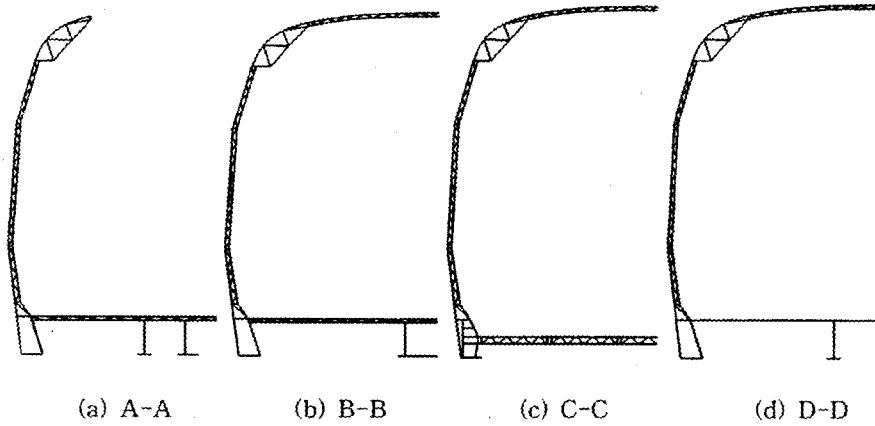


그림 2. Section View of Each Part in Fig. 2

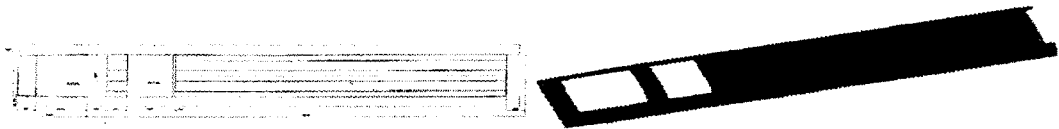


그림 3. The Drawing Design and Finite Element Model of TT5 Roof Assembly



그림 4. The Drawing Design and Finite Element Model of TT5 Side Frame Assembly

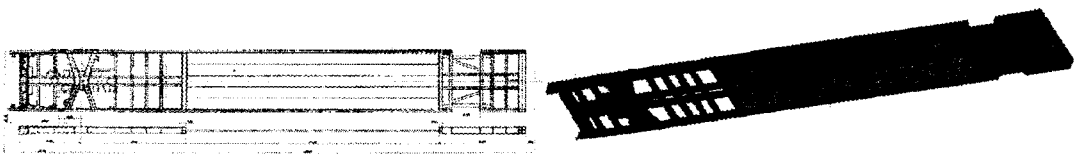


그림 5. The Drawing Design and Finite Model of TT5 Underframe Assembly

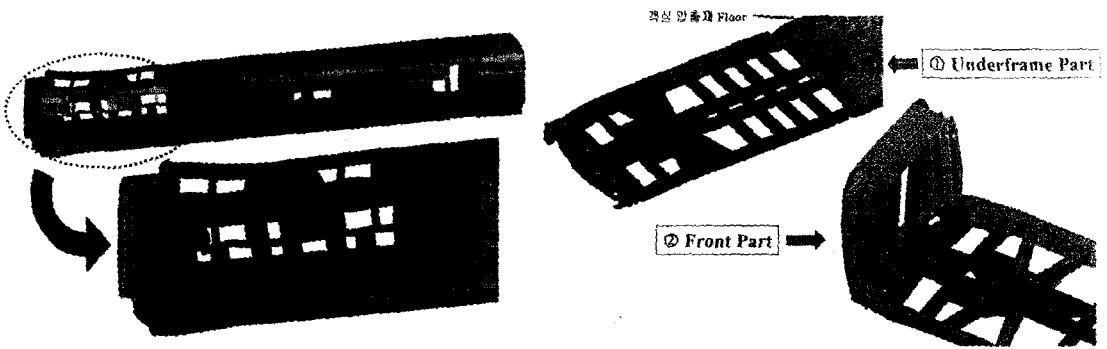
나. 충돌해석

완성된 3차원 셀 모델을 이용하여 프랑스 국유철도(SNCF) 충돌 시나리오 1에 따라서 충돌해석을 수행하였다. 이 시나리오 조건은 시속 110 km/h (30.56 m/s)로 동력객차를 움직이는 15 ton 강체벽에 충돌시켜 에너지 흡수 경로와 변형양상을 살펴보고자하는 것이다. 유한요소 해석시 동력객차 전체 중량 48 ton 중에서 자체 중량 약 10 ton을 제외한 나머지 부분 38 ton을 동력객차 링 구조물에 집중질량으로 부과하였다.^[6]

프랑스 알스톰사에서는 사고 사례 및 타 차종의 시험으로 동력객차 각 부분별 단면붕괴 하중값을 추정해 놓았다.^[7] 우선 단면붕괴 하중값을 산출하는 부분은 기존의 경부고속전철 동력객차에서 크게 네 부분으로 나눌 수 있다. 첫 번째는 모터블럭(Motor Block), 모터 팬(Motor Fan)이 자리잡는 부분으로 전반부 하부 프레임(Underframe)의 약 1/2 만큼을 A부분으로, 모델의 처음부터 약

2800 mm까지의 거리에 해당된다. 이 부분에서는 약 4500 kN의 단면붕괴 하중값을 요구한다. 그림 2에서는 A-A부분에 해당한다. 두 번째 부분은 나머지 전반부 하부 프레임의 1/2과 승강대를 포함하여 길이 약 3,500 mm 정도로 구성된다. 그림 2에서는 B-B 구간을 의미하고 약 3,700 kN의 붕괴하중값을 요구한다. 세 번째 부분은 그림 C-C에 해당하는 부분으로 승객들을 위한 객실 공간이라고 할 수 있다. 기존 경부고속전철 모델에서 승강대 마지막 부분부터 약 12,000 mm 정도까지의 구간이고 약 4,200 kN의 붕괴하중값을 요구한다. 네 번째 구간은 D-D 구간으로 동력객차 화장실 등의 내장품이 위치하는 곳으로 동력객차 후반부 부분에 해당하고 약 3,700 kN의 단면붕괴하중값을 요구한다. 그렇지만 앞서 말했듯이 시작차 모델 A는 기존의 경부고속전철 동력객차와 달리 승강대 부분이 뒷 부분으로 옮겨져 있기 때문에 기존의 경부고속전철에서 구한 B-B 및 D-D 구간의 값을 비교하는 것이 바람직하지는 않을 수 있다. 그렇지만 시작차 모델 A의 승강대 부분에서 얻은 단면붕괴 하중값과 경부고속전철의 동력객차 승강대 부분에서 구한 값을 비교해 볼 필요는 있다고 판단된다.

그림 6은 45 msec가 경과한 후의 변형양상을 나타내고 있다. 변형양상을 자세히 살펴보면 기존의 경부고속전철 동력객차 보다 상당한 강성을 가지고 있음을 알 수 있다. 기존 경부고속전철 충돌해석시 충돌에너지가 전반부 언더프레임과 승강대 부분에 흡입이나 좌굴 등의 변형으로 많은 충돌에너지를 흡수하고 있는 반면, 시작차 모델 A는 전반부 천장, 동력실 환기구 부분, 그리고 동력실과 객실의 압출재 만나는 언더프레임 부분에 국소 변형을 나타내고 있다. 이는 스텔에서 알루미늄으로의 소재 대체시 충돌강성을 높이기 위해 사용된 일체형 압출재와, I형 부재의 두께 및 형상이 과도한 설계로 제작되었기 때문이라고 판단되어진다.



(a) Full Model

(b) Front Part without Roof & Side Ass'y

그림 6. The Deformed Shapes of TT5 Crash Simulation at 45 msec

표 1처럼 각 부분의 단면붕괴 하중값 비교를 통하여도 시작차 모델 A가 기존의 경부고속전철 동력객차 모델보다 과도한 설계임을 알 수 있다. 모델 A의 각 부분별 단면붕괴 하중값은 A부분은 10863 kN, B부분은 10764 kN, C부분은 10351 kN, D부분은 9829 kN의 값을 나타냈다. 하지만 기존 경부고속전철 동력객차 모델의 각 부분별 단면붕괴하중이 A부분이 4427 kN, B부분이 3071 kN, C부분이 3160 kN, D부분이 3128 kN인 점을 감안할 때 약 두 배 이상의 단면붕괴 하중값을 나타내는 걸 알 수 있다. 그림 7, 8의 강체벽 반력과 에너지 비교 그림에서도 경부고속전철 동력객차보다 약 2배 이상의 값의 차이를 보이고 있다. 결국 이렇게 과도히 강성을 높인 시작차 모델 A는 열차 충돌시 발생하는 충돌에너지가 차체의 굽힘 및 좌굴 변형에 의해 흡수되기보다는 승객에게 상해로 돌아간다고 예상할 수 있다.

표 1. Comparison of Each Part Section Force (TT5 & TGV-K)

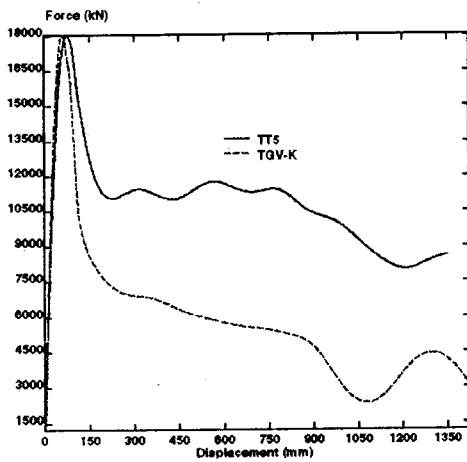
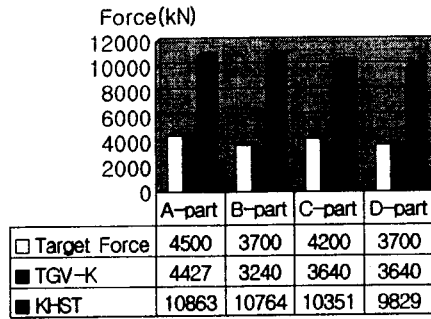


그림 7. Comparison of Rigid-Wall Force

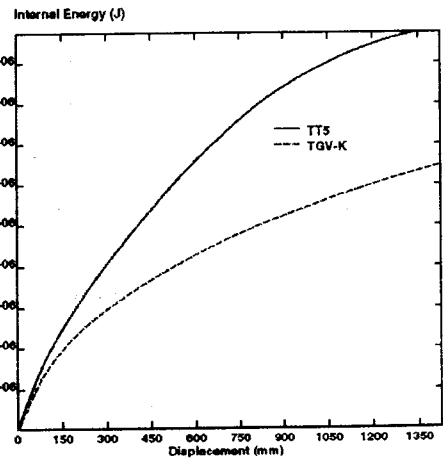


그림 8. Comparison of Internal Energy

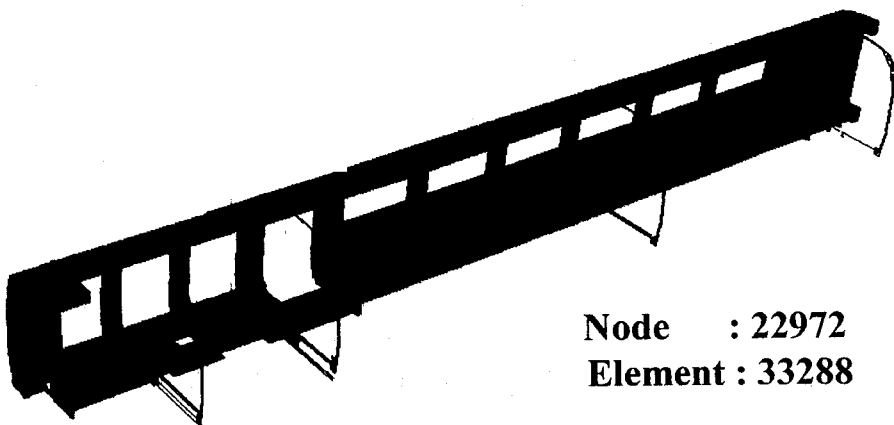


그림 9. The Finite Element Model for Crash Simulation of TM1 in KHST

2.2 시차차 모델 B의 충돌해석

가. 유한요소모델링

시차차 모델 B는 한국형 고속전철 설계 과정에서 만든 두 번째 모델이다. 외형적으로는 시차차

모델 A의 승강대가 차량 후미 구조로 이동한 반면 시작차 모델 B는 경부고속전철 동력객차와 거의 같은 외형구조를 가지고 있다. 시작차 모델 B 역시 알루미늄 동력객차로 무게대비 차체 강성을 높이기 위하여 압출재 형상의 단면구조를 가지고 있다. 그림 9는 유한요소모델로 전체적으로 약 100mm 크기의 요소를 사용하였다. 유한요소모델에 사용된 쉘 요소수는 33,288 개이고, 절점수는 22,972 개다. 시작차 모델 A와 같이 해석시간 단축을 위하여 반 모델로 모델링하였다. 그림 10, 11, 12는 천장, 측면, 바닥 구조를 나타내고 있다.

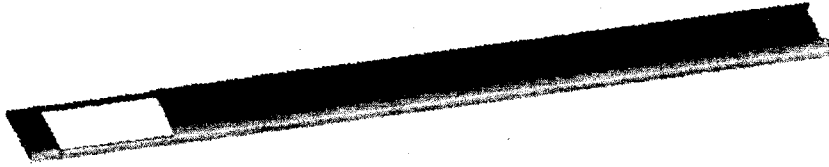


그림 10. The Finite Element Model of TM1 Roof Assembly

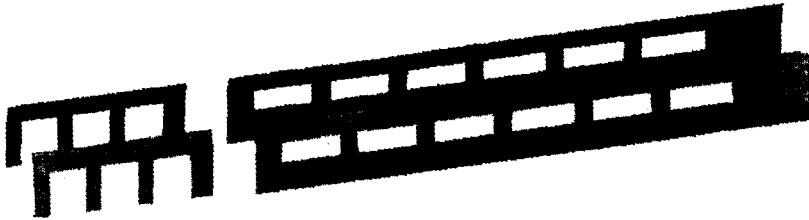


그림 11. The Finite Element Model of TM1 Side Frame Assembly

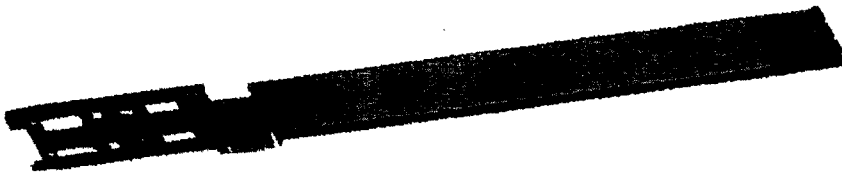


그림 12. The Finite Element Model of TM1 Underframe Assembly

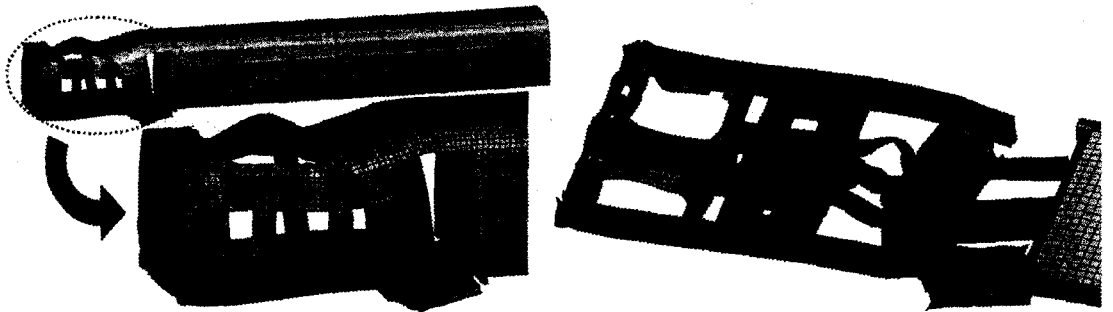
나. 충돌해석

앞서 논한 바와 같이 프랑스 국유철도 시나리오 1에 따라 시속 110 km/h로 15 ton 강체벽에 충돌시켜 차체의 변형양상, 강체벽의 반력, 충돌에너지 흡수 및 각 부분의 붕괴하중값을 경부고속전철 동력객차와 비교하여 한국형 고속전철 동력객차 설계를 평가 지원하고자 하였다. 해석 경계 조건은 동력객차 전체 중량 48 ton 중에서 자체 중량 약 48 ton 중에서 자체 중량 14 ton을 제외한 나머지 중량 34 ton을 동력객차 후반분 링 구조물에 집중질량으로 부과하였다.

그림 13은 45 msec후의 변형양상을 나타내고 있다. 전체적인 변형양상이 경부고속전철 동력객차와 아주 흡사한 것으로 판단된다. 하지만 승강대 부분의 높은 강성으로 인하여 승강대 바닥 부분이 거의 변형을 하지 않고 있다. 오히려 승강대 바닥부분이 충돌시 좌굴 및 굽힘 등의 변형을 통한 에너지 흡수보다는 승강대 부분이 동력실의 뒷 부분을 밀고 들어가는 형상을 볼 수 있다.

표 2는 시작차 모델 B의 충돌해석 수행 후 얻은 단면 붕괴하중값을 기존의 경부고속전철 동력객차에서 구한 값과 비교한 그래프이다. 그림 14는 강체벽의 반력을 경부고속전철 동력객차와 비교한 그래프로 초기 최대값의 차이가 있으나 평균값은 거의 같게 나오고 있다. 그림 15의 에너지 비교 그래프에서도 마찬가지로 전체적인 에너지 흡수도 경부고속전철 동력객차와 거의 같은 값을

나타내고 있다. 수치적인 결과로서 비교하여 본다면 시작차 모델 A보다 시작차 모델 B가 경부고속전철 동력객차에 훨씬 근접한 결과를 나타내고 있다.



(a) Full Model

(b) Underframe Part without Roof and Side Ass'y

그림 13. The Deformed Shape of TM1 Crash Simulation at 45 msec

표 2. Comparison of Each Section Force (TM1 & TGV-K)

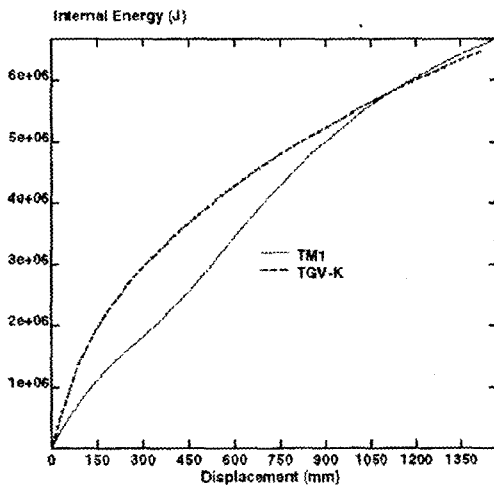
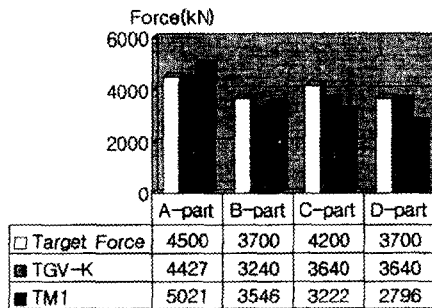


그림 14. Comparison of Rigid-Wall Force

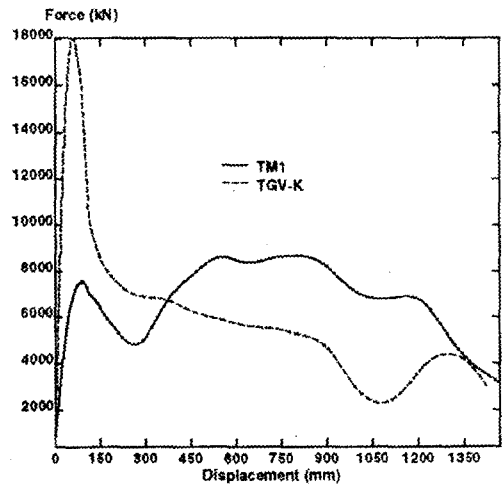


그림 15. Comparison of Internal Energy

3. 결 론

한국형 고속전철의 시작차 모델 A와 B에 대하여 3차원 셸 모델링을 완성하였다. 이렇게 완성된 각각의 모델을 이용하여 프랑스 국유철도의 시나리오 1에 따른 충돌해석을 수행하였다. 해석 결과로 도출된 강체벽의 반력, 내부 에너지, 각 부분별 붕괴하중값을 경부고속전철 동력객차와 비교하였을 때, 첫 번째 시작차 모델 A가 기존의 경부고속전철 동력객차에 비해 약 두 배 이상의 강성을 가짐을 알 수 있었다. 결국 철도 차량 충돌시 과도한 강성을 가지도록 설계된 시작차 모델 A는 충돌로 발생한 에너지의 대부분을 승객이 받게 될 것으로 판단된다. 두 번째 시작차 모델 B는 경부고속전철 동력객차와 거의 같은 강성과 에너지 흡수도를 나타내고 있다. 하지만 상대적으로 강성이 높은 승강대 부분으로 인하여 고가의 장비가 실려있는 동력실에 심한 변형을 유발할 것으로 예측된다.

후 기

본 논문의 연구는 G7(선도기술개발) 고속전철기술개발사업(건설교통부 주관, 과학기술부 및 산업자원부가 협조)의 일환으로 한국기계연구원이 주관하여 수행하고 있는 “충돌안전도 해석기술개발” 과제에서 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자에게 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Kisielwicz, L. T.(1992), "French Design Practice and Applications for Crashworthy Rolling Stocks", PUCA '92 PAM Users Conference, pp.17-23
- [2] Culière, P.(1996), "PAM-CRASH Train Crashworthiness Applications", PUCA '96 PAM Users Conference, pp.129-131
- [3] Sutton, A. and Lewis, J. H.(1982), "Elastic/Plastic Interaction of Rakes of Rail Vehicles", Structural Impact and Crashworthiness, ed by J/Morton, pp.783-797, Elsevier, London
- [4] Markiewicz, E. , Milcent, G., Drazetic, P. and Ravalard, Y.(1994), "Shock Behavior of Rolling Stock Vehicles - A Hybrid Approach", PUCA '96 PAM Users Conference, pp. 115-122
- [5] 김현영, 김상범, 한재형(1998), "고속전철 동력객차 언더프레임에 대한 충돌특성 연구", 한국철도학회, '98추계학술대회 논문집, pp. 385-392
- [6] 김현영, 한재형(1997), "3차원 보모델을 이용한 고속전철 동력객차의 충돌특성 연구", 대한기계학회, '97 추계학술대회 논문집 A. pp. 448-455
- [7] 김현영, 한재형, 이종근(1998), "고속전철 동력객차의 유한요소 모델링과 충돌 성능 평가", 대한기계학회, '98 추계학술대회 논문집 A, pp. 616-621
- [8] 김현영, 한재형, 이종근(1998), "고속전철 동력객차에 대한 충돌특성 연구" '99 한국철도학회논문집 제2권, pp. 16-27