

고속전철 TGV-K 전두부의 충돌안전도에 관한 연구

A Study on Crashworthiness for the Front Structure of TGV

노규석*, 김유일*, 구정서*, 송달호*
K. S. Rho, Y. I. Kim, J. S. Koo, D. H. Song

ABSTRACT

For a good crashworthy design of train vehicles, it is essential to develop some design and analysis techniques for energy absorbing structures. This paper analyzes the front structure of TGV-K and suggests crashworthy design of Korea high speed train(KHST) using the accident scenario of SNCF(collision with a stationary rigid mass in motion of 15 ton at 110 km/h). Specifically this reserch is concentrated on developing a well-designed protective headstocks using mullticell structures with cutouts to improve crashworthiness of KHST

1. 서론

고속전철의 경우 항공기와 같이 비록 사고의 빈도는 낮지만 일단 사고가 발생하면 많은 인명과 재산의 손실을 입는 대형사고인 경우가 많고, 그러한 경우에 국가적, 사회적인 후유증이 심각하게 된다[1]. 고속전철을 자체 개발하여 상용화한 선진국에서는 고속전철 충돌사고시 승객의 안전도를 확보하기 위한 연구가 10여년전부터 꾸준히 진행되어 왔으며, 이미 새로운 고속전철 개발의 개념설계 단계에서부터 충돌안전도를 고려하고 있는 실정이다[2]. 또 장래에는 유럽연합 소속 국가들이 철도차량의 안전도를 획기적으로 제고하기 위하여 철도차량의 운행제어 및 충돌안전도에 대한 협약을 할 예정으로 있다. 그러나, 국내의 경우에 열차의 충돌안전도에 대한 연구는 최근에 와서야 이루어지기 시작하고 있다. 고속전철은 자동차와 같은 단일체 형식의 차체가 아니라 동력차, 동력객차 그리고 객차가 서로 연결부를 가지고 결합되어 있으므로, 충돌시 복잡한 연쇄충돌 현상과 그것으로 인한 탈선 및 타고오름 현상이 발생하는 등 난해한 역학적 상관관계를 보이므로 탑승객의 부상과 차량의 피해를 줄이기 위해서는 고도의 해석기술이 확보되어야 한다[3].

국철, 지하철, 경전철 등 기존의 철도차량의 경우에도 국내외에서 매년 많은 사고가 발생하고 있다. 이중에는 무거운 화물트럭과의 건널목 사고나 열차 대 열차 사고는 철도차량에 심각한 손상을 주는 경우가 많고, 타고오름, 탈선, 전복 등으로 탑승자뿐만 아니라 승객의 안전에도 큰 문제를 야기한다[4]. 최근 BRR에서는 기존철도 차량에 대하여 충돌안전도를 획기적으로 향상시킬 수 있는 상용화 기술을 개발하여 판매하고 있다. 근래에는 국내 차량업체들도 수출차량에 대하여 충돌안전도 해석 결과를 요구받는 사례가 늘어나고 있고, 선진국에서는 안전도 규정을 제정할 움직임이 있으므로, 본 논문과 같은 연구를 통하여 체계적으로 열차의 안전도 연구를 수행함으로써 환경변화에 능동적으로 대처할 필요성이 있다.

본 연구에서는 프랑스에서 TGV의 안전도설계를 위하여 사용하는 SNCF(프랑스 국철)의 충돌사고 시나리오(110 km/h의 속도로 15 ton 강체물체와 정면충돌)를 사용하여 한국형 차세대 TGV의 충돌안전도 개념설계를 도출하고, 보호용 헤드스톡 구조에 대한 기본설계를 충돌안전도 관점에서 도출하였다.

* 한국기계연구원 신교통기술연구부, 정회원

2. 전두부 흡수부재의 충돌거동 해석

TGV-K는 2량의 동력차(power car), 2량의 동력객차(motorized trailer), 그리고 16량의 객차(trailer)로 구성되는데, SNCF의 충돌사고 시나리오를 만족시키기 위해서는 80 %의 충격에너지를 흡수하는 동력차 전두부의 설계가 가장 중요하다. 그림 1은 TGV-K 전두부 충격흡수구조의 개요를 나타낸 것이다. 전두부 에너지 흡수구조는 커플러(retractable coupler), 보호용 헤드스톡(protective head stock), 하니콤(honeycomb) 등 3부분으로 구성된다. TGV-K의 경우 운전자 보호용 하니콤은 대략 2 MJ의 충격에너지를 흡수할 수 있도록 설계되어 있으나, 보호용 헤드스톡은 후방 지지구조보다도 압괴하중이 높게 설계되어 있으므로 충격에너지를 흡수하기 어렵다. 이러한 설계는 SNCF 사고 시나리오에서 운전자의 안전을 보장하지 못할 뿐만 아니라 경미한 충돌에서도 차량과 운전자에게 큰 피해가 발생할 우려가 있다[5].

그림 2는 15 ton의 강체 장애물에 58 ton의 동력차가 110 km/h로 충돌하는 사고를 가정하여 28488 개의 셀 요소로 모델링(대칭성을 고려한 반쪽 모델)한 전두부 에너지 흡수구조를 해석한 변형형상과 상당 소성변형도를 나타낸 것이다. 여기서 해석에 사용한 동적 전산코드는 PAMCRASH 이다[6]. 그림 3은 전두부 에너지 흡수구조의 내부에너지 변화와 충돌시 강체벽에 발생하는 반력을 나타내었는데, 하니콤/헤드스톡의 압괴하중이 5,000 kN(전체 모델에 대하여 10,000 kN)으로 반쪽 모델의 압괴하중이 3,000 kN(Alstom사의 설계기준치)인 운전석이 먼저 붕괴될 우려가 있다. 또, 이와같이 높은 압괴하중은 운전자에게 발생하는 감속도의 크기를 줄이고 생존공간을 확보하기 위한 설계에 매우 불리한 요소가 된다.

그림 4는 TGV-K의 보호용 헤드스톡의 압괴양상을 나타낸 것인데, 압괴형상이 전단변형에 의한 전체좌굴(global buckling)의 양상을 나타내고 있다. 이러한 전체좌굴은 구조의 에너지 흡수능력을 현저히 저하시키는 경향이 있으므로 충돌안전도 설계에서는 피하는 것이 바람직하다. 그림 5는 충돌에 의하여 보호용 헤드스톡에 증가된 내부에너지의 변화와 강체벽의 반력을 나타내는데, 보호용 헤드스톡의 최대 압괴길이는 750 mm 정도이며, 충격에너지 흡수능력은 반쪽 모델에 대하여 1.7 MJ이다. 이것은 에너지 흡수 측면에서는 그리 나쁘지 않은 설계라고 할 수 있으나, 평균 압괴하중이 4,480 kN(반쪽 모델에 대하여 2,240 kN)으로서 SNCF의 사고 시나리오를 만족시키기 위하여 권장되고 있는 설계 가이드라인인 평균 압괴하중 3,000 kN(반쪽 모델에 대하여 1500 kN)을 상당히 초과하고 있다. 따라서 TGV-K의 안전도를 향상시키기 위해서는 새로운 개념의 전두부 에너지 흡수구조를 설계하는 것이 필요하다.

3. 차세대 전두부 충돌흡수구조의 개념설계

본 절에서는 한국형 차세대 TGV의 충돌안전도를 대폭 향상시키기 위하여 새로운 전두부구조의 개념설계를 도출하며, 충격에너지 흡수의 목표는 6 MJ 이상이다. 이 전두부 구조의 에너지 흡수능력을 최대한 높이고, 압괴영역에서 순차적으로 발생하는 압괴를 얻기 위하여, 다중벽과 절개를 가진 헤드스톡, 소성성형 원리를 이용한 튜브 팽창형 에너지 흡수부재 등 새로운 개념의 설계기법이 도입된다. 그림 6은 커플러, 튜브 팽창형 에너지 흡수부재, 헤드스톡, 하니콤의 배열설계에 대한 개요를 나타낸 것이다. 커플러의 중앙에 배치된 유압 카트리리지(cartridge)는 2,000 kN 이하의 하중에서 약간의 에너지를 흡수할 수 있으나, 그 흡수량은 충돌속도에 따라 다르다. 커플러의 충격하중이 2,000 kN 이상이면 커플러를 지지하는 핀이 절단되며, 커플러의 충격력은 튜브 팽창형 에너지 흡수부재에 전달되어 압괴를 일으킨다. 튜브 팽창형 에너지 흡수부재의 초기 설계 가이드 라인은 전두부의 공간배치와 에너지 흡수능력을 고려하여, 압괴하중을 2,000 kN, 압괴길이를 800 mm로 결정하였다. 헤드스톡과 하니콤의 반작용력으로 운전실에 작용하는 충격력은 운전실에 압괴가 발생하지 않아야 함을 고려할 때 5,000 kN 이하이어야 하며, 하니콤의 물성치와 배치 가능한 공간을 고려하면 하니콤의 압괴하중은 2,000 kN, 헤드스톡의 압괴하중은 3,000 kN로 결정

된다.

전두부에서 6 MJ의 충격에너지 흡수를 달성하기 위하여 각 부재에 대하여 배분된 에너지 흡수량은 다음과 같다.

Energy absorber = 1.6 MJ
Protective headstock = 2.7 MJ
Honeycomb structure = 1.8 MJ

4. 차세대 헤드스톡의 설계

4.1 절개가 있는 다중벽 구조

그림 7은 이상적인 보호용 헤드스톡의 압괴거동을 예시한 것인데, 일정한 압괴하중하에서 붕괴되는 것을 보여준다. 실제 헤드스톡의 경우는 초기 붕괴하중이 매우 높고, 압괴하중은 상대적으로 낮은 경향이 있다. 본 연구에서는 초기 붕괴하중을 가능한 한 낮게 하면서 평균 압괴하중을 높일 수 있는 설계를 도출하기 위하여, 다양한 기하학적 형상의 구조에 대하여 시행 착오적 충돌 설계 및 해석을 수행하였다. 차세대 헤드스톡의 해석에 사용될 충돌조건은 앞에서 해석한 TGV-K의 보호용 헤드스톡과 동일하게 설정하였다. 그림 8의 유한요소모델은 다중벽으로 이루어진 판 구조물로서 한쪽 보호용 헤드스톡의 반쪽 모델이며, 내벽의 중간에 20 mm의 절개를, 또 충돌부위의 세로방향의 내벽에 대하여 10 mm와, 가로방향의 내벽에 대해서는 20 mm의 절개를 가진다. 그림 8에 나타난 보호형 헤드스톡의 압괴형상은 규칙적인 국부좌굴 모우드를 가지고 있으므로 충격에너지 흡수에 유리하다. 그림 9는 각각 내부에너지와 강체벽의 반력을 나타내었는데, 구해진 설계의 압괴길이는 780 mm(전체 부재길이의 78 %)으로 좋은 특성을 보여준다. 또한, 구해진 압괴길이와 그림 9의 내부에너지 선도를 이용하면 전체 모델에 대하여 1,400 kN(양쪽 헤드스톡에 대하여 2,800 kN)의 평균 압괴하중을 얻을 수 있다. 그리고 전체 모델에 대한 초기 붕괴하중도 2,400 kN(양쪽 헤드스톡에 대하여 4,800 kN)으로 양호한 결과를 나타내고 있다.

본 설계는 길이가 1000 mm인 양쪽 헤드스톡에 대하여 2.18 MJ의 충격에너지를 흡수할 수 있다. 그러나, 설계목표인 2.7 MJ을 흡수하기 위해서는 헤드스톡의 길이를 1,150 mm정도로 해야 하며, 이러한 치수 변경은 전두부 흡수구조의 설계에서 반영되어야 한다. 보호형 헤드스톡의 기본설계를 요약하면 다음과 같다.

- 헤드스톡의 길이 : 1,150 mm
- 초기 붕괴하중 : 4,800 kN
- 평균 압괴하중 : 2,800 kN
- 압괴길이 : 900 mm
- 흡수에너지 : 2.7 MJ

4.2 원형을 절개한 다중벽 구조

절개를 가진 보호형 헤드스톡은 낮은 초기 붕괴하중, 높은 평균 압괴하중을 얻을 수 있는 등 좋은 충돌에너지 흡수특성을 가지고 있지만, 절개된 내벽을 용접하는 어려움이 있을 것으로 판단되므로 제작이 용이하면서도 비용이 적게 드는 설계를 도출할 필요가 있다. 그림 10은 길이 1,000 mm, 가로 450 mm, 세로 300 mm인 헤드스톡의 반쪽 유한요소모델로써, 벽면에 $R_1=60$ mm, $R_2=40$ mm의 원을 절개하였다. 그림 11은 헤드스톡에 흡수된 내부에너지와 강체벽의 반력을 나타내

었다. 흡수된 충격에너지는 양쪽 모델에 대하여 2.06 MJ(한쪽 헤드스톡에 대하여 1.03 MJ)이고, 평균 압괴하중은 양쪽모델에 대하여 2,940 kN(한쪽 헤드스톡에 대하여 1,470 kN)으로 설계 가이드 라인인 3,000 kN에 근접한다. 초기 붕괴하중은 양쪽 모델에 대하여 9,200 kN(한쪽 헤드스톡에 대하여 4,600 kN)로 다소 높으나, 보호형 헤드스톡을 지지하는 후방구조의 좌굴강도 설계에 의하여 이러한 문제를 해결할 수 있다. 그러나, 압괴길이가 700 mm(전체 길이의 70%)로 짧은 것이 단점이다. 설계목표인 2.7 MJ을 흡수하기 위해서는 헤드스톡의 길이를 1,280 mm정도로 해야 하며, 이러한 치수변경은 전두부 흡수구조의 배열설계에 의해서 충분히 고려되어야 한다. 보호형 헤드스톡의 기본설계를 요약하면 다음과 같다.

- 헤드스톡의 길이 : 1,280 mm
- 초기 붕괴하중 : 9,200 kN
- 평균 압괴하중 : 2,940 kN
- 압괴길이 : 900 mm
- 흡수에너지 : 2.7 MJ

5. 결론

차세대 TGV의 초기 설계목표는 전두부에서만 6 MJ 이상 에너지를 흡수하는 것이다. 전두부에서 충격에너지를 흡수하는 주요 메커니즘은 커플러 후방 에너지 흡수부재, 보호용 헤드스톡, 하니컴 구조 등이다. 그러나, 전두부의 주요 에너지 흡수구조의 치수설계는 전두부의 외형설계와 밀접하게 연계되어 있으므로 외형설계가 이루어지기 전에는 상세한 치수를 결정하는 것은 곤란한 일이다.

본 연구에서는 유한요소 충돌해석을 통하여 TGV-K의 보호형 헤드스톡이 충돌안전도 개념의 설계가 이루어지지 않았음을 보이고 차세대 한국형 TGV의 전두부 충격흡수구조를 위한 개념설계와 보호형 헤드스톡의 기본설계를 도출하였다. 절개가 있는 다중벽 구조의 헤드스톡은 충격에너지 흡수특성이 좋으나 제작상 난점이 예상되고, 원형을 절개한 다중벽 구조는 제작면에서 유리하나 헤드스톡의 길이가 너무 길어지는 경향이 있으므로 추후 계속되는 수정설계와 실험적 연구를 통하여 보완되어야 한다.

참고문헌

1. J. H. Lewis(1994), "Development of crashworthy vehicle structures for railways", WCCR, pp. 893-900.
2. H. Waldeck, "Crashworthiness simulations of the ICE power unit", KRUPP notes, pp. 975-983.
3. T. Ohnishi(1994), N. Kawakami, and A. Sano, Crashworthiness of train, WCCR, pp. 482-487.
4. L. T. Kisielewicz, and K. Ando(1993), "Crashworthy Rolling Stocks", PUCA'93, pp. 73-81.
5. Lewis J. H. (1994), "Development of Crashworthy Vehicle Structures for Railways", World Railway Research Conference, Paris
6. ESI(1997), "PAM-System Manual"

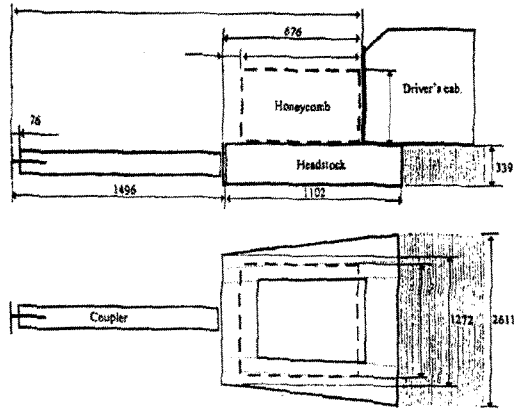


그림 1. TGV-K의 전두부구조 배치

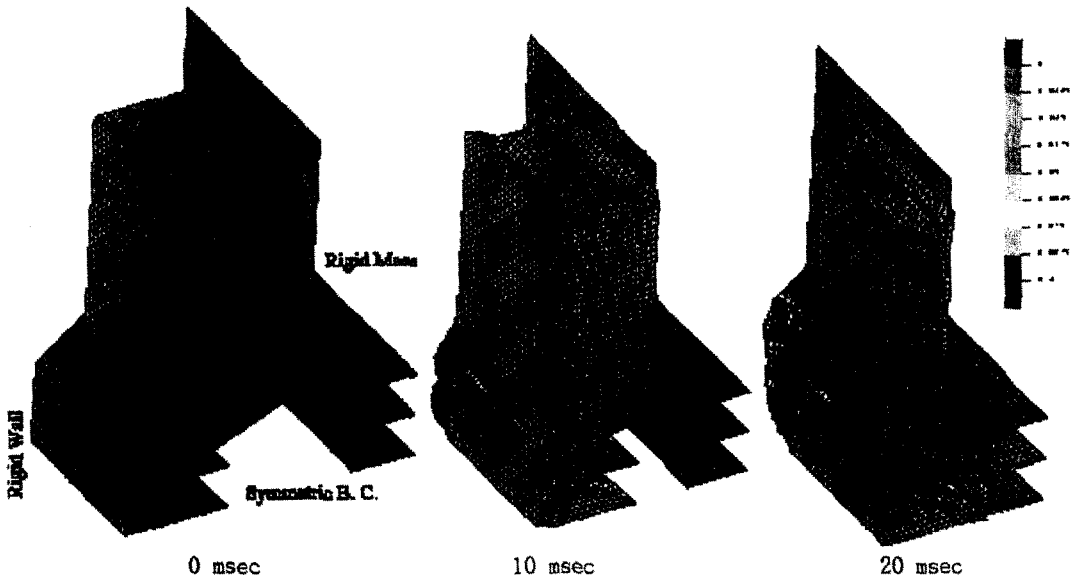


그림 2. TGV-K 전두부 에너지 흡수구조의 충돌변형거동(반쪽모델)

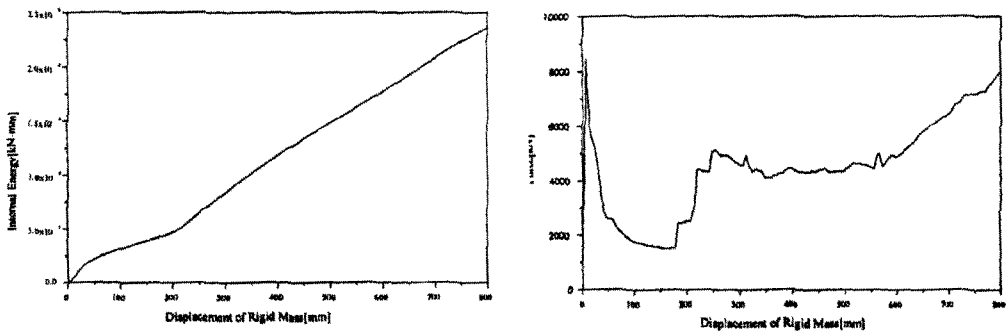


그림 3. TGV-K 전두부 에너지 흡수구조의 내부에너지 및 강체력 반력(반쪽 모델)

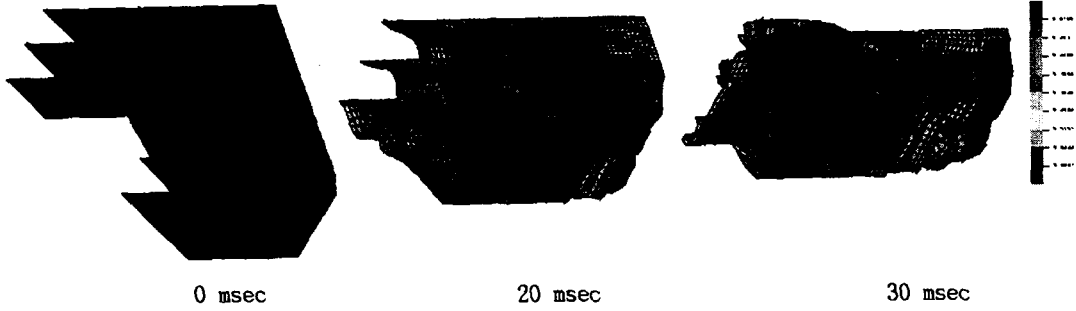


그림 4. TGV-K 보호용 헤드스톡의 충돌변형거동(반쪽 모델)

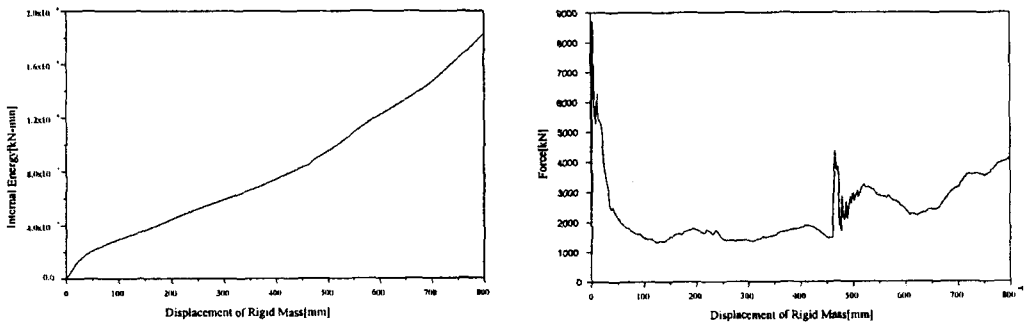


그림 5. TGV-K 보호용 헤드스톡의 내부에너지 및 강체벽 반력(반쪽 모델)

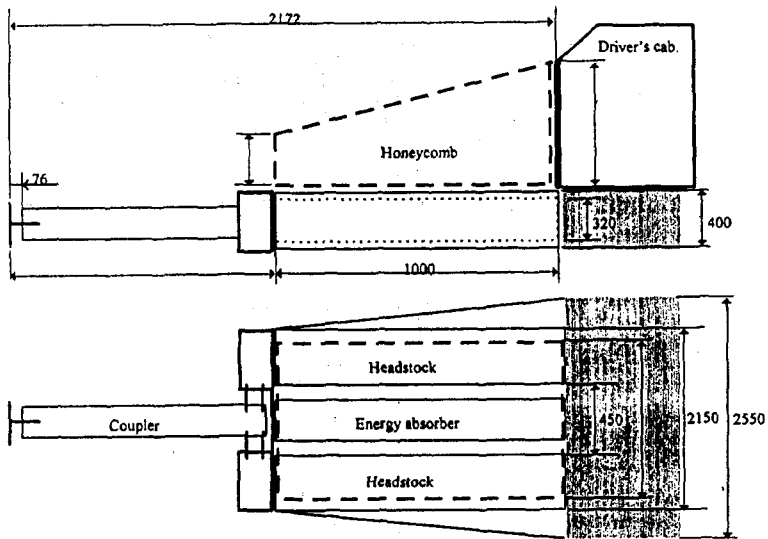


그림 6. 차세대 TGV-K 전두부구조의 개요

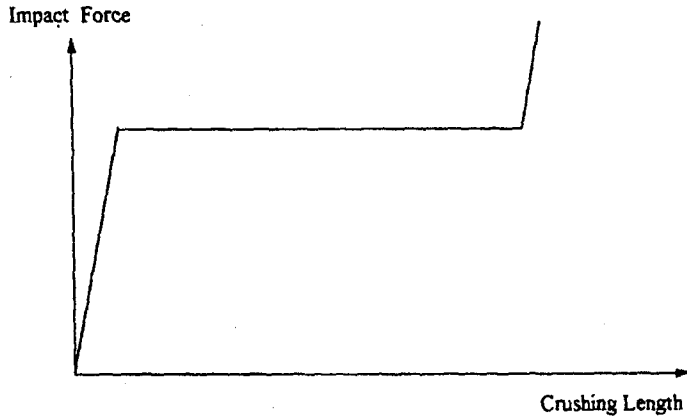


그림 7. 보호용 헤드스톡의 이상적 충돌변형 양상

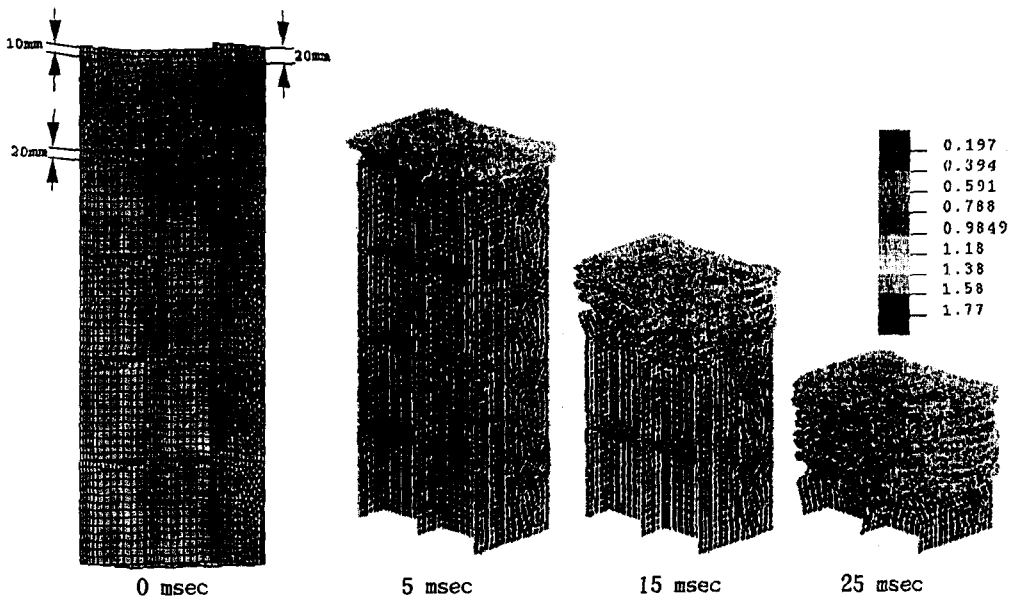


그림 8. 절개가 있는 다중벽구조 헤드스톡의 충돌변형거동(한쪽 헤드스톡의 반쪽 모델)

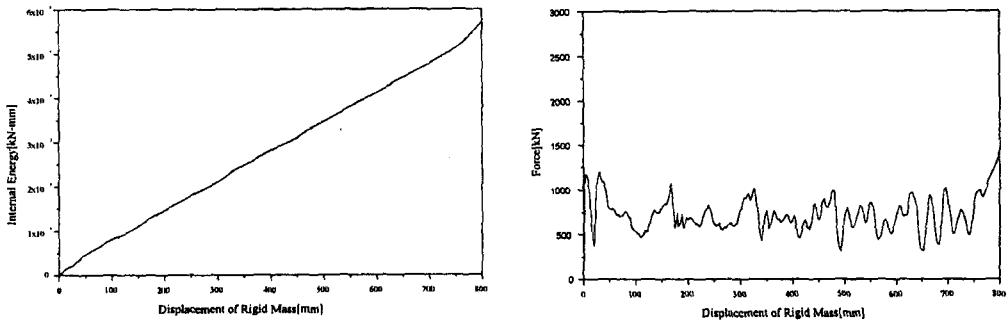


그림 9. 절개가 있는 다중벽구조 헤드스톡의 내부에너지 및 강체력 반력(한쪽 헤드스톡의 반쪽 모델)

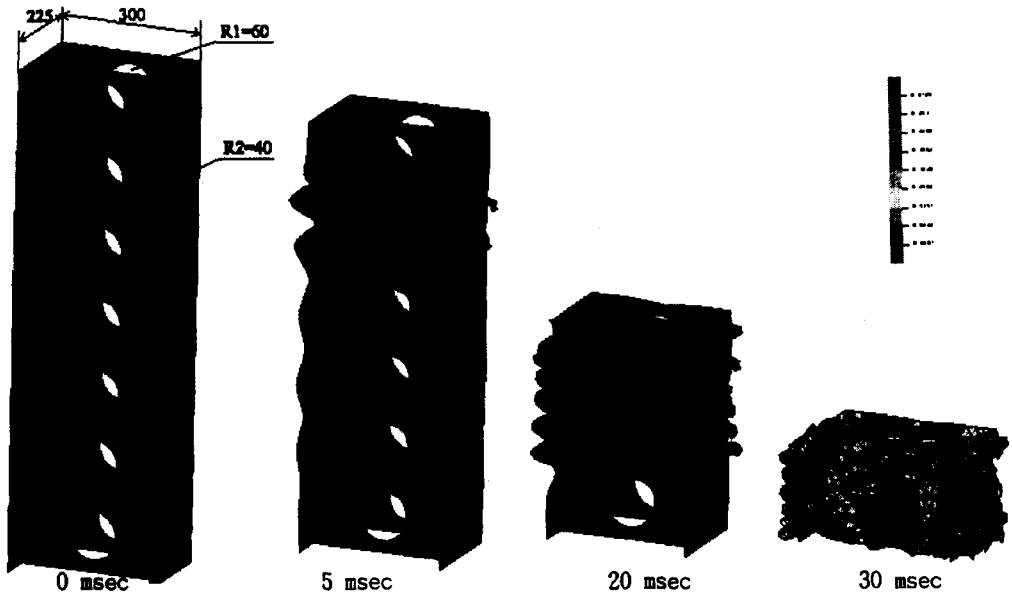


그림 10. 원형을 절개한 다중벽구조 헤드스톡의 충돌변형거동(한쪽 헤드스톡의 반쪽 모델)

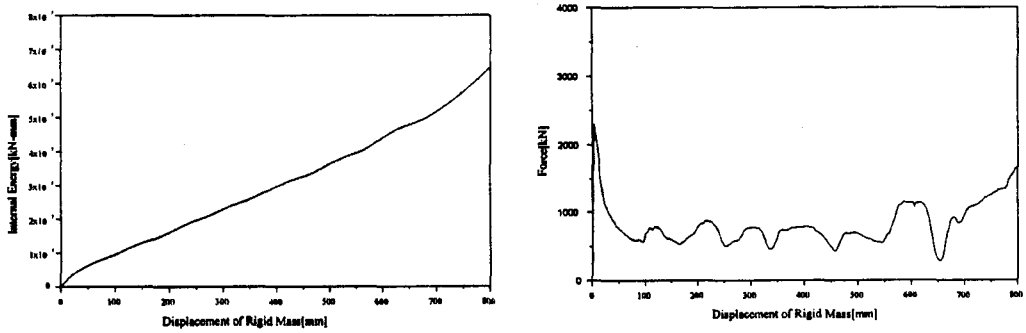


그림 11. 원형을 절개한 다중벽구조 헤드스톡의 내부에너지 및 강체벽 반력(한쪽 헤드스톡의 반쪽 모델)