

# 한국형 고속전철의 운전실 압괴방지 설계

## Driver's Cab Design of KHST for Survival Space

노규석\*, 구정서\*, 김유일\*, 송달호\*

K. S. Rho, J. S. Koo, Y. I. Kim, D. H. Song

---

### ABSTRACT

Because a driver is located in the front end of KHST, he is most likely to be insured at collision accidents. So, it is very important to design some survival space for the driver. To evaluate the driver's safety of KHST (Korean High Speed Train), the front structure of power car is analysed using PAMCRASH under the SNCF accident scenario(collision against a movable rigid mass 15 ton at 110 km/h). Because the driver's cab of KHST is a modified version of TGV-K, which is not so strong as to protect him, it turns out to be inadequate to guarantee his survival space. Therefore it is recommended to redesign the driver's cab in a crashworthy point of view like the case of TGV-Duplex or NEC.

---

### 1.서론

고속전철은 사고의 빈도는 낮지만 일단 사고가 발생하면 대형사고로 이어지는데, 작년 6월에 발생한 독일 고속전철인 ICE의 사고가 대표적인 사례라 할 수 있다. 현재 주요한 철도차량 설계규정(UIC 등)은 정상적인 운행과정에서 사고가 발생하지 않도록 하는 개념으로 제정되어 있으므로, 이 규정에만 의존하여 설계된 차량은 예상하지 못한 원인에 의하여 차량이 비정상적인 상태로 돌입하게 되면 어떠한 거동을 나타내게 될지 전혀 예측할 수도 없고 대책도 마련할 수 없으므로 대형사고의 위험이 그만큼 높아진다[1-4].

지난 10여년간 철도차량 선진국에서는 열차충돌에 관한 많은 연구를 수행하였고, 최근에는 충돌 안전도 개념의 설계가 이루어진 차량들이 운행되고 있다. 대표적으로 GEC Alsthom에서 개발한 TGV-Duplex를 들 수 있으며, 동력차의 전두부와 동력객차의 승객이 탑승하지 않는 영역에 대한 충격에너지 흡수능력을 획기적으로 제고시킨 것으로 알려지고 있다. 그러나 국내에는 충돌관련 안전도에 대한 연구가 충분히 이루어지지 못하고 있다. 특히, 고속전철은 사고발생시 충격에너지를 적절히 흡수할 수 있고 탑승자의 생존공간을 확보할 수 있는 설계기술을 개발하는 것이 매우 중요하다[5].

본 연구에서는 SNCF에서 사용하는 충돌 사고 시나리오 하에서 TGV-K의 전두부 구조를 충돌 안전도 개념에서 개조 설계한 한국형 고속전철(KHST) 전두부가 충격에너지를 충분히 흡수하고 운전실의 압괴가 발생하지 않아서 운전자의 안전을 확보할 수 있는 지를 수치해석적으로 평가한다. 충격력을 분산할 수 있는 여러 가지 부재 배열에 대하여 한국형 고속전철의 운전실 거동을 비교 분석하고, 운전자의 안전을 도모할 수 있는 설계 방향을 제시한다.

---

\* 한국기계연구원 신교통기술연구부, 정회원

## 2. KHST의 운전실 압괴방지 설계

TGV-K 전두부를 SNCF의 충돌사고 시나리오로 적용하여 충돌해석을 하면 헤드스톡이 너무 강하게 설계되어서 하니컴과 헤드스톡이 좌굴되지 않고, 운전실 하부구조가 먼저 붕괴되어 전체적으로 에너지 흡수효율이 매우 떨어지는 양상을 나타낸다[6].

KHST 전두부의 충돌안전도 설계에서는 충격에너지를 효과적으로 흡수하기 위해서 운전실이 압괴되는 것을 방지하여야 하는데, 이를 위해서는 운전실의 강도를 높이면 되나 중량의 제약을 받게 된다. 그림 1의 하부구조를 보면 전방의 충격에너지 및 하중을 후방으로 분산하여 전달하도록 하는 구조적 배열로 이루어져 있다[7]. 충격력을 후방으로 분산하려면 하부구조뿐만 아니라 상부구조의 배열도 중요한데 이를 위해서 그림 2와 같이 side-wall이 하중을 잘 분산하도록 설계하는 것이 필요하다. 그림 3에서는 TGV-K의 하부구조를 부분개량(minor change)하여 강도를 증가시키기 위한 대안으로 side-sill의 개방단면을 폐쇄단면으로 바꾸고, 운전실 하부프레임의 두께를 증가시켜 충돌안전도 설계에 적합하도록 하여야 한다.

그림 4는 TGV-K의 운전실 구조에 개념설계한 KHST 보호형 헤드스톡과 하니컴을 모델링한 유한요소 반쪽 모델이고[6], 메쉬 크기는 평균 35 mm인 11,424개의 솔리드 요소와 19,831개의 셸 요소로 구성하였으며 전체 절점수는 32,232개이다. 이때 SNCF 충돌사고 시나리오를 적용하여 충돌해석한 0 ms, 20 ms, 60 ms에서의 변형형상과 상당 소성변형도를 나타낸 것이며, 유한요소해석에는 충돌전용 소프트웨어인 PAMCRASH가 사용되었다[8]. 운전실이 쉽게 압괴되어 헤드스톡과 하니컴이 제대로 충격에너지를 흡수하지 못함을 알 수 있다.

그림 5는 운전실 아래의 하부구조가 쉽게 붕괴되기 때문에 side-wall의 구조를 변경하여 헤드스톡의 충격력을 분산하도록 모델링하였다. 솔리드 요소 11424개, 셸요소 20022개, 전체 절점수 32454개로 이루어진 유한요소 반쪽모델로서 충돌해석한 변형형상과 상당 소성변형도를 나타낸 것인데, side-sill이 먼저 좌굴되면서 하부구조가 쉽게 붕괴되어 개념설계한 KHST 보호형 헤드스톡과 하니컴이 충격에너지를 흡수하지 못한다.

그림 6은 하니컴을 그림 10의 TGV-Duplex와 같이 변경하여 어떤 양상으로 압괴되는지 충돌해석한 변형형상과 상당 소성변형도이다. 평균 메쉬크기가 35mm인 11067개의 솔리드 요소와 20022개의 셸 요소로 구성하였으며, 전체 절점수는 32130개이다. 운전실 하부구조가 붕괴될 뿐만 아니라 하니컴의 충격력을 운전실 상부구조가 후방으로 분산시키지 못하기 때문에 운전실 전체가 붕괴된다.

그림 7은 그림 6의 side-wall의 앞 구조를 'x'로 변경하면 충격력을 얼마나 견디는지 충돌해석하여 보았다. 이때 솔리드 요소 11067개, 셸 요소 20355개, 전체 절점수 32356개로 구성된 유한요소 반쪽 모델로서, 0 ms, 20 ms, 60 ms에서의 변형형상과 상당 소성변형도를 나타낸다. 그림 6과는 달리 보강이 안된 뒷 side-wall은 쉽게 붕괴되지만 'x'로 강성을 높인 앞 구조는 충격력을 어느 정도 잘 견딜 수 있다. 그러므로, 운전실이 압괴되지 않기 위해서는 상부구조와 하부구조의 강도를 증가시켜 전방의 충격력을 후방으로 분산하는 구조로 설계하는 것이 필요하다.

그림 8은 하부구조가 쉽게 좌굴되지 않도록 하기 위하여 side-sill의 개방된 단면을 두께 6 mm인 판을 첨가하여 사각형 폐쇄단면으로 모델링하였고, 운전실 아래에 있는 하부 프레임의 두께를 4 mm에서 6 mm로 변경하였으며 side-wall의 앞 구조는 'x'로, 뒷 구조는 '/'로 강화하였다. 이 모델은 솔리드 요소 11,424개, 셸 요소 20,938개, 전체 절점수 33,021개로 구성하였으며, 메쉬 크기는 평균 35 mm이다. 그림 8의 전두부 단면형상을 보면 중량의 제약을 받기 때문에 단지 두께를 크게하여 운전실의 강도를 높일 수만은 없어서 운전실의 압괴가 어느 정도 허용됨을 알 수 있다. 그림 9는 각각 충돌에 의하여 전두부에 흡수된 내부에너지와 강체벽의 반력을 나타낸 것인데 평균 압괴하중이 반쪽 모델에 대하여 2,300 kN(전체 모델에 대하여 4,600 kN)으로 설계가이드라인인

평균 압괴하중 2,500 kN(전체 모델 대하여 5,000 kN)에 근접한 결과를 얻을 수 있다[6]. 도표 1은 TGV-K와 KHST의 중량을 비교한 것인데 반쪽 모델에 대하여 203 kg이 증가함을 알 수 있다.

도표 1. TGV-K와 KHST의 중량 비교

	TGV-K	KHST	비교
Headstock	130	208	△78
Front side-wall	17	35	△18
Rear side-wall	15	22	△7
Side-sill 보강	×	44	△44
Underframe 보강	×	21	△21
Honeycomb	45	80	△35
Total			△203

위의 표에서 보듯이 운전실을 구성하고 있는 프레임 구조의 보강을 위하여 180kg의 중량이 증가되는 것은 축중의 크기에 제한을 받고 있는 현실에서 중대한 설계상 문제점이 되고 있다. 상세 설계단계에서는 헤드스톡과 하니콤의 중량을 20% 정도 줄일 수 있을 것으로 예상되고 있으나, 적어도 360kg 정도의 중량증가를 감수하여야 한다. 따라서 중량증가를 최소화하려면 새로운 개념의 전두부 및 운전실 개념설계가 필요하다.

### 3. Alsthom의 전두부 설계

프랑스 알스톰에서는 최근 몇 종류의 신 개발 차종에 대하여 충돌안전도 설계를 고려하였는데, 대표적인 것으로는 TGV-Duplex, NEC, XTER7500, MI2N 등을 들 수 있다. 첫 2차종은 고속열차이고 뒤의 2차종은 도시형 열차이다.

본 연구에서 고려하고 있는 전두부의 충돌안전도 설계는 TGV-Duplex를 기본개념으로 참고하는 것이 매우 도움이 될 것으로 판단된다. TGV-Duplex는 개발초기에 새로운 동력차를 개발하지 않고 TGV-Reseaux의 동력차를 차용하여 운행한 것으로 알려지고 있으며, 그 후 충돌안전도 측면이 획기적으로 보강한 현재의 동력차를 개발한 것으로 알려지고 있다. KHST의 충돌안전도 설계를 대폭 향상시키기 위해서 고려하여야 할 사항을 살펴보면, 운전실 전방구조는 UIC 규정을 만족시키면서 종전에 비하여 압괴가 잘 발생할 수 있도록 설계하여야 한다. 운전실 구조는 종전에 비하여 강도를 대폭 보강하여 설계하여야 하고, 그림 10의 TGV-Duplex 전두부 구조와 같이 전방의 충격력을 후방으로 분산하여 전달할 수 있는 구조적 배열로 이루어져야 한다. 이때 상부구조와 하부구조의 강도 배분이 중요한데 TGV-Duplex의 강도배분을 그대로 활용하여도 무방하리라 생각된다. 그림 11에서 TGV-Duplex의 하중작용 조건과 정적강도 설계를 살펴보면 waist는 UIC의 700 kN보다 800 kN이 증가된 1500 kN이고, rail은 UIC의 400 kN보다 증가된 700 kN이며 운전실 하부 프레임은 3000 kN에서 탄성조건을 만족하여야 한다[9]. 또한, 그림 12의 미국 NEC의 충돌안전도 설계를 살펴보면 TGV-Duplex 전두부의 구조와 마찬가지로 전방의 충격을 후방으로 분산하도록 상부구조와 하부구조의 강성을 적절히 배분하여 충돌안전도 설계에 적합하게 하였다.

사고발생시 운전자가 긴급하게 대피할 수 있는 refuge를 마련하는 것이 요즈음의 추세인데, refuge라는 것은 운전자가 전방의 사고 요인을 발견하여 비상제동을 작동한 후, 사고 발생시까지 대략 2-3초 가량의 여유가 생길때 안전하게 대피할 수 있는 공간을 말한다. 도시형 철도처럼 운전실 후방에 있는 출입문을 통하여 객실로 대피하는 것도 refuge의 한 형태이고, 운전실 후방에 객실이 없는 경우에는 후방에 압괴가 쉽게 발생하지 않는 구조적 영역을 설정해 주는 것도 refuge

의 한 형태인데 column과 bar를 이용하여 그림 13처럼 어렵지 않게 refuge를 구성할 수도 있다. 또는 운전자가 대피할 수 있는 안전한 장소가 있으면 그곳으로 용이하게 대피할 수 있도록 통로를 설정해 주는 것도 하나의 방법이다.

#### 4. 결론

기존의 TGV-K는 전두부의 에너지 흡수능력이 부족하고 충돌시 헤드스톡의 압괴하중이 매우 높아서 운전자의 탑승공간이 먼저 압괴된다. 이를 보완하기 위해서 충돌안전도를 고려한 KHST 운전실의 구조를 강화시켜 충돌사고시 충분한 충격에너지를 흡수하고 운전실의 압괴도 증량을 크게 늘리지 않는 범위 내에서 방지하려고 하였으나, TGV-K의 전두부 구조를 부분 개량한(minor change) 구조는 운전실의 압괴를 방지하는데 한계가 있다. 그러므로 KHST는 TGV-Duplex나 미국 NEC의 동력차 전두부처럼 전방의 충격력을 후방으로 분산하도록 상부구조와 하부구조의 강성을 적절히 배분하여 설계하는 것이 필요하다.

#### 참고문헌

1. J. H. Lewis(1994), "Development of crashworthy vehicle structures for railways", WCCR, pp.893-900.
2. L. T. Kisielewicz, and K. Ando(1993), "Crashworthy rolling stocks," *PUCA'93*, pp.73-81.
3. A. Marissal, B. Marguet, P. Drazetic, and Y. Ravalrd(1992), "Comportement au choc de vehicules guides", *Revue Technique Gec Alstom*, No.9, pp.55-62.
4. 김동성, 송달호, 박용환(1997), "고속철도 안전기술 개발을 위한 조사사업", 한국기계연구원.
5. T. Ohnishi(1994), N. Kawakami, and A. Sano, "Crashworthiness of train", WCCR, pp.482-487.
6. 노규석, 구정서, 김유일, 송달호(1998), "고속전철 전두부의 개선된 충돌안전도 설계", 한국 ESI '98 conference 논문집, pp.117-127
7. M. S. Pereira and J. A. C. Ambrosio, "Design methodologies for train crashworthiness using multibody dynamics", IDMEC notes, pp.1-42.
8. ESI(1999), "PAM-System Manual"
9. L. M. Cleon, "Nouvelle conception des vehicules ferroviaires vis a vis de la resistance au choc", SNCF notes, pp.960-971.

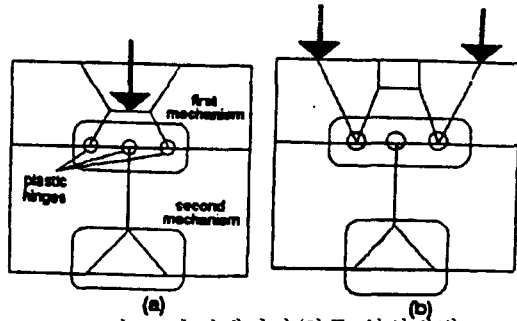


그림 1. 충격에너지/하중 분산방법

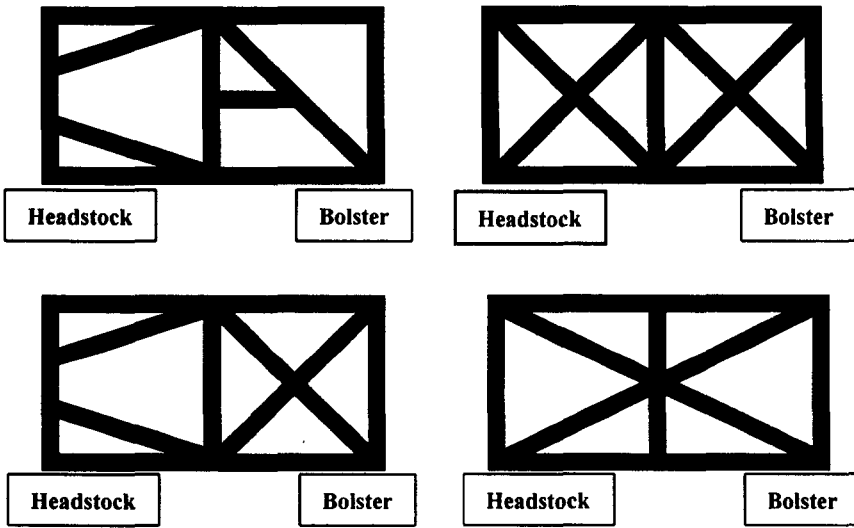


그림 2. Side-wall의 하중분산 대책(Layout)

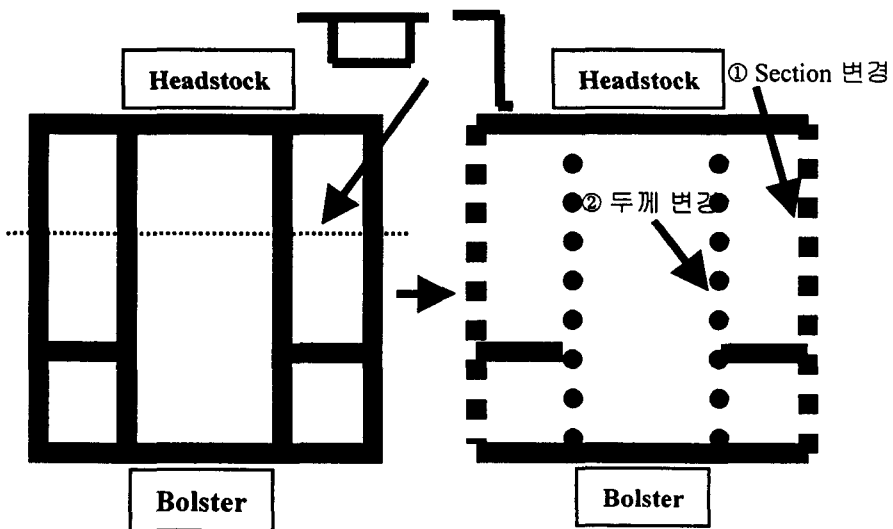
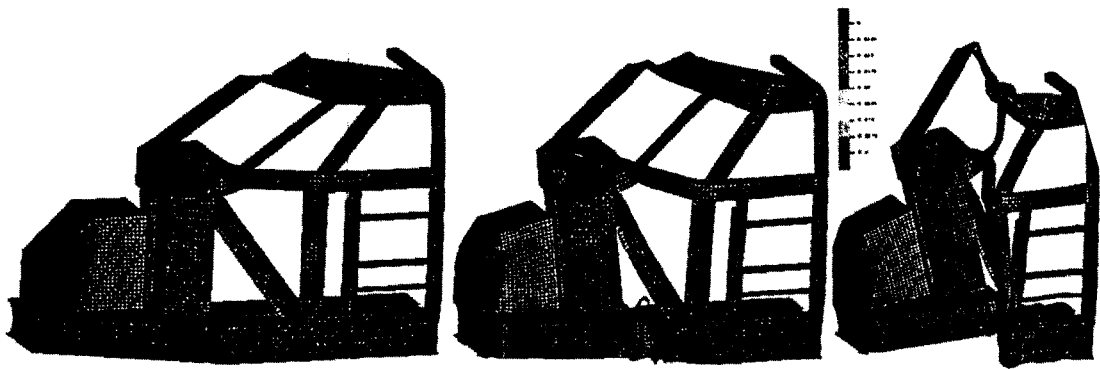


그림 3. Underframe의 보강대책(Layout)

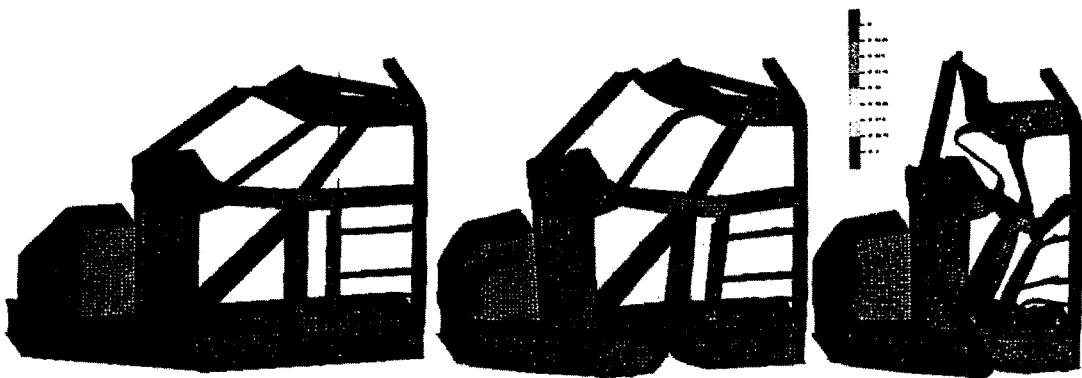


0 msec

20 msec

60 msec

그림 4. KHST 전두부의 충돌변형거동(모델 1 : 반쪽 모델)

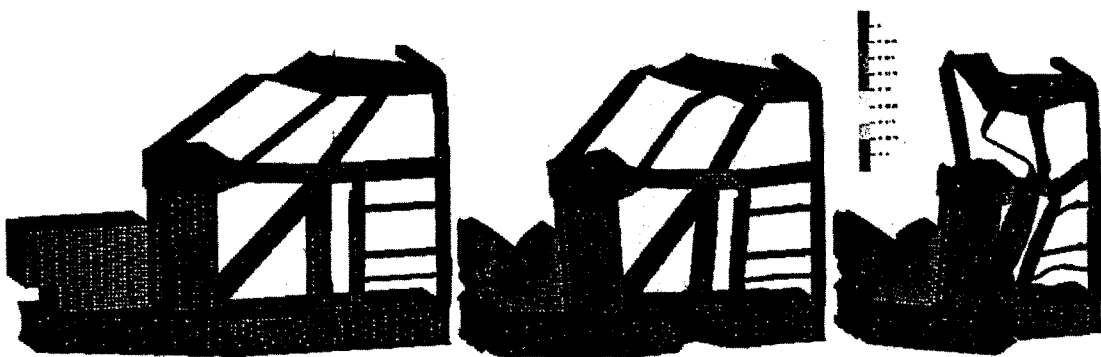


0 msec

20 msec

60 msec

그림 5. KHST 전두부의 충돌변형거동(모델 2 : 반쪽 모델)



0 msec

20 msec

60 msec

그림 6. KHST 전두부의 충돌변형거동(모델 3 : 반쪽 모델)

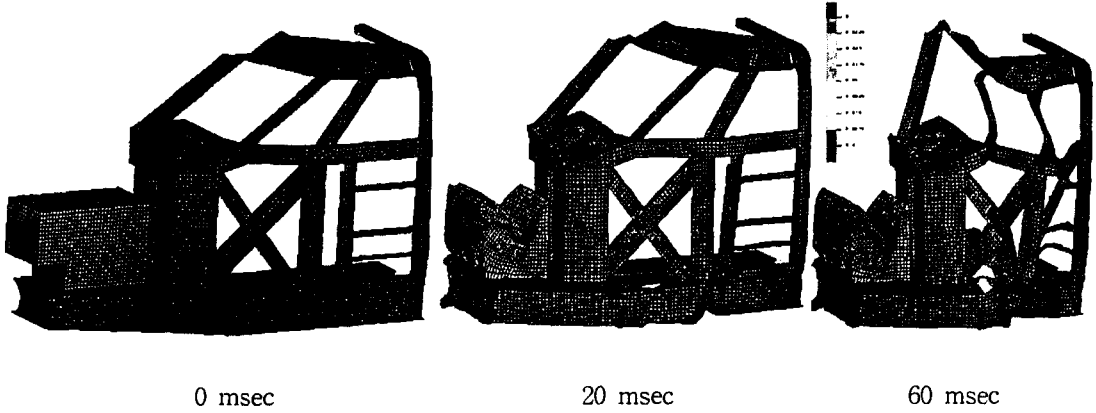


그림 7. KHST 전두부의 충돌변형거동(모델 4 : 반쪽 모델)

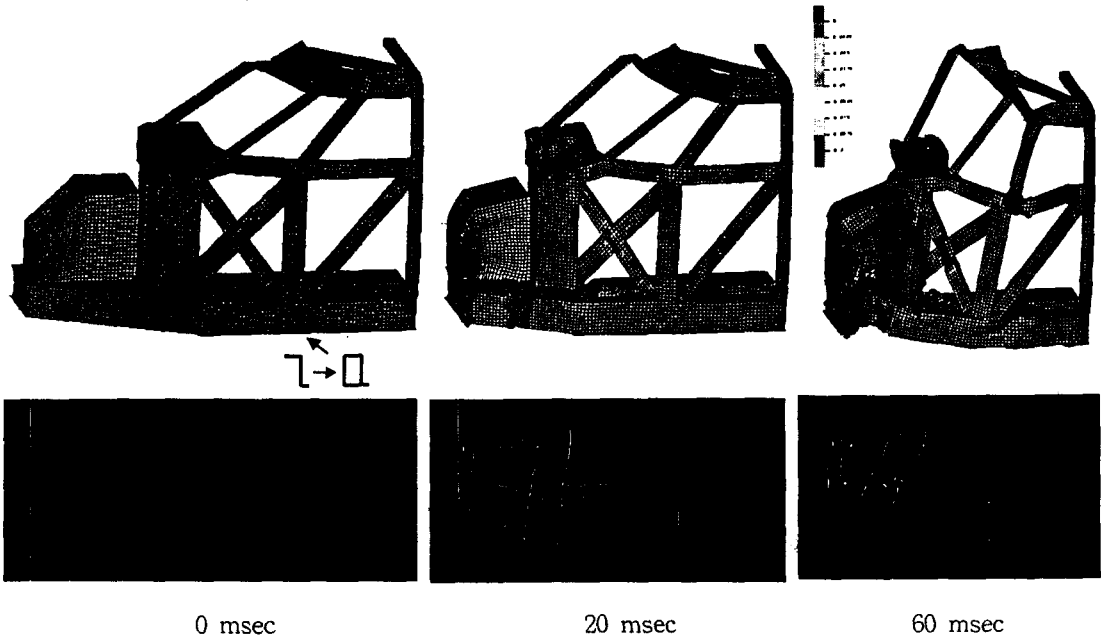


그림 8. KHST 전두부의 충돌변형거동(모델 5 : 반쪽 모델)

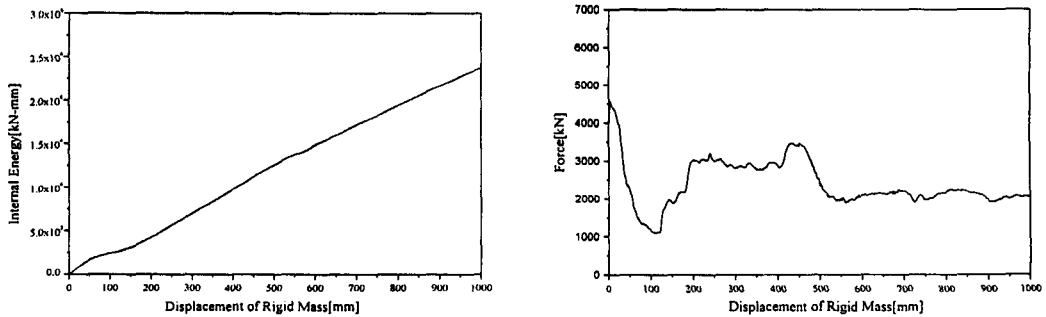


그림 9. KHST 전두부의 내부에너지 및 강체벽 반력(모델 5 : 반쪽 모델)

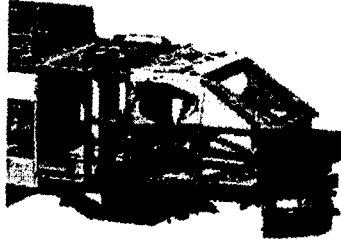


그림 10. TGV-Duplex의 동력차 전두부 구조

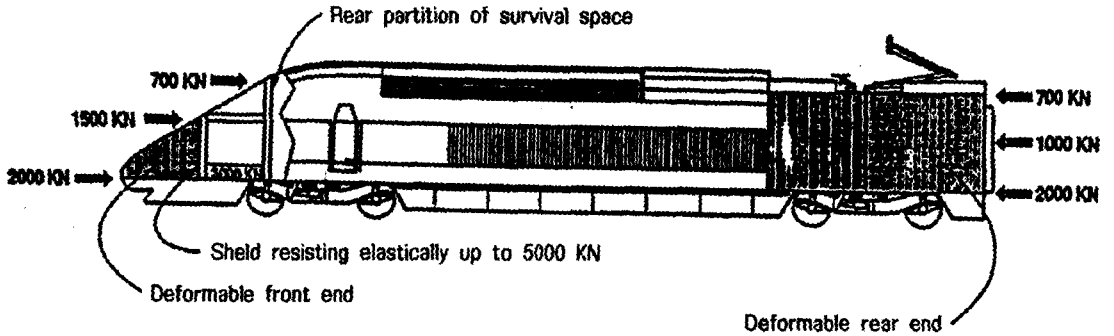


그림 11. TGV-Duplex의 동력차 강도설계 하중조건

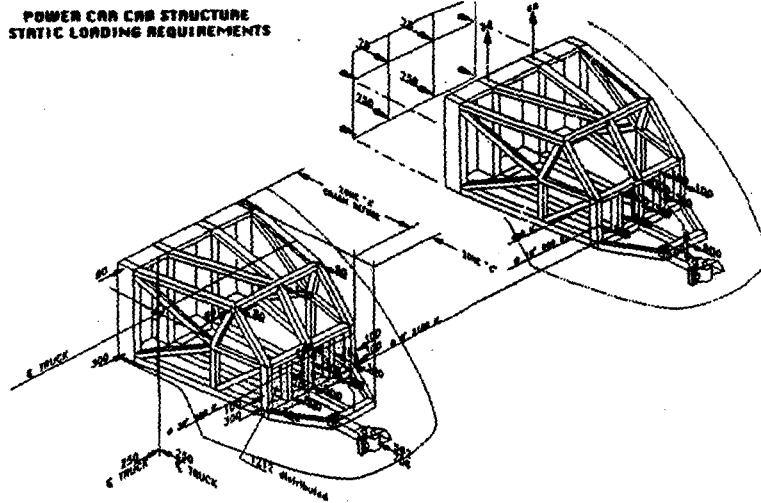


그림 12. NEC의 동력차 전두부 구조

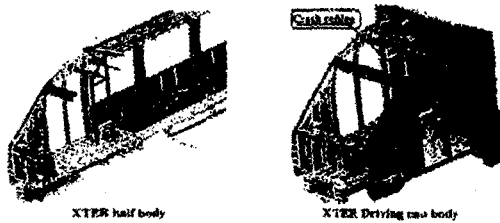


그림 13. Refuge 구조의 개요