

경충돌안전장치 설계를 위한 기초연구

The basic study on the design of the Light Collision Safety Device

최 원 목* 정 현 승** 유 원 희*** 구 정 서**** 권 태 수*****
Choi, Won Mog Jung, Hyun Sung Yu, won hui Ku, jung seo Kwon, Tae su

ABSTRACT

The Light Collision Safety Device is used to protect the important part of trains and passengers at the low velocity accidents. The Light Collision Safety Device comprises mainly tension bolts, shear bolts and an energy absorber. The work mechanism of this device is that first, the tension bolts break at designed collapse load and second, the energy absorber absorb rest collision energy. In this paper, the tension bolt characteristics were validated by the simple tension test using the FEM(Finite Element Method) and the characteristic of the two types of energy absorber were compared by using the load-displacement curves and absorbed energy. Last, in order to determine integrated load-displacement curve of tension bolts and the energy absorber, the unified analysis was conducted by using the FEM.

1. 서론

열차충돌사고는 자주 발생하지 않으나, 한 번 발생하면 대형 참사로 이어져 인적·경제적 피해가 매우 심각하기 때문에 미국이나 유럽등 철도선진국에서는 충돌안전도설계를 의무화하고 있다. 충돌안전도 설계는 열차충돌사고의 통계를 분석하여 표준화된 사고시나리오를 정하고 그 시나리오에 따른 승객과 승무원의 안전을 보장하는 방법으로 이루어진다. 열차충돌 사고시나리오는 크게 건널목에서 열차 대 차량 충돌사고와 열차 대 열차충돌사고로 나누어진다. 열차충돌사고 시 발생하는 충돌에너지는 구조물의 변형 에너지로 전환되어 흡수된다. 차량의 압괴강도를 증가시키면 승객과 승무원의 생존공간은 확보되지만 압괴량이 작아져 승객이 받는 가속도가 증가한다. 열차사고 시 승객이 받는 가속도가 크면 열차 내 승객과 내장재사이의 충돌이 발생하여 큰 인명손상을 가져 올 수 있다. 저속 충돌사고 시 대부분의 충돌에너지를 선두연결기와 탈부착이 가능한 에너지흡수부재에서 흡수되며 이 부재는 교체 및 수리가 용이하여야 한다.⁽¹⁾⁽²⁾

본 연구는 열차의 저속 충돌사고 시 충돌에너지를 흡수하는 경충돌안전장치를 개발하기 위한 선행연구로서 주요부품인 인장볼트와 에너지흡수부재를 설계하기 위한 가이드라인을 FEM(Finite Element Method)을 이용한 해석적 접근방법으로 제시하였다. 경충돌안전장치의 메커니즘과 주요부재의 충돌특성을 상용 유한요소프로그램인 ABAQUS/Explicit를 이용하여 해석하였으며, 그 결과 인장볼트와 에너지흡

* 최 원 목, 비회원, 과학기술연합대학원대학교

E-mail : wmchoi@krri.re.kr

TEL : (031)460-5274 FAX : (031)460-5279

* 한국철도기술연구원

* 한국철도기술연구원

* 서울산업대학교

* 한국철도기술연구원

수부재의 주요 충돌특성을 확인하였다. 또한, 시험 장비를 설계하여 볼트와 에너지흡수부재를 시험장비에 부착한 통합해석을 수행하여 경충돌안전장치의 연속적인 충돌거동특성을 확인하였다.

2. 경충돌안전장치의 개념 및 구조

열차의 충돌안전도설계 시 충돌에너지 분배전략을 세우기전에 충돌시나리오가 먼저 선정되어야 한다. 본연구의 충돌사고 시나리오는 유럽의 SAFETRAIN 보고서를 참조하였으며 표 1과 같다.

표 1 Collision scenario

Collision scenarios	Title	Description	Energy absorption structures	Absorbing energy	Crush length
Scenario 1	Head-on collision	55km/h (relative velocity)	HE+LE	1.6MJ(vehicle)	1,457mm
Scenario 2	Level crossing collision	20ton(obstacle) 100km/h	HE	5.5MJ on front-end structure	3,000mm

* HE : High Energy, LE : Low Energy

경충돌은 열차의 자체에 변형을 발생시키지 않으면서, 교환가능한 부품의 손상만이 발생하는 조건이다. 가벼운 충돌사고 발생 시 에너지는 연결기와 팽창튜브, 인장볼트 등으로 흡수되며 열차 차체에는 손상이 일어나지 않는다. 본 연구에서는 경충돌 사고 발생 시 각각의 부품에 대한 에너지 흡수전략과 흡수 에너지량을 결정하며, 적절한 형태를 설계한다.

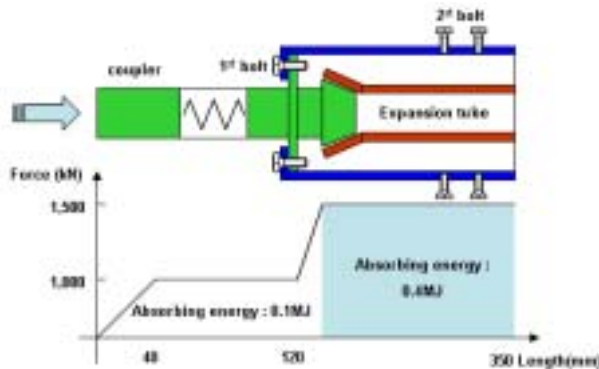


그림 1. Force-displacement curve

연결기는 가벼운 충돌사고 발생 시 1차적으로 충돌에너지를 흡수하는 장치이며 1,000kN 범위의 충격력 발생 시 자체의 유압 실린더에 의해 충격에너지를 흡수한다. 본 연구에서 검토한 연결기는 그림 1과 같다. 연결기의 압괴길이는 120mm이며 0.1MJ의 충격에너지를 흡수한다. 연결기의 최대 변위로 인해 충돌에너지를 더 이상 흡수하지 못하는 상태에 이르렀을 때 1,500kN의 압괴하중에서 1차 인장볼트가 끊어진다. 그리고 차체에 변형을 발생시키지 않도록 에너지 흡수구조에서 압괴변형을 일으키면서 충격에너지를 흡수하게 된다. 이 과정에서 이용되는 것이 expansion tube와 inversion tube인데 이 두 가지 형태의 tube는 변형하면서 0.4MJ의 충격에너지를 흡수하게 된다. tube의 변형이 끝나면 2차 볼트가 전단되어 연결기가 차체 구조에서 떨어져 나가게 된다.⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁶⁾

3. 인장볼트

경충돌 시 연결기에서 충분한 충격에너지를 흡수한 다음 인장볼트가 끊어지고 에너지흡수구조에서 나머지 에너지를 흡수한다. 현재 개발 중인 경충돌안전장치는 1,500kN에서 인장볼트가 끊어지도록 설계 되었으며 4개의 인장볼트가 연결기와 에너지흡수구조를 연결하고 있으므로 한 개의 볼트는 375kN에서 파단 되어야 한다.

볼트에 작용하는 하중이 점진적으로 증가하여 인장강도에 도달할 때 설계자가 의도한 위치에서 파단이 발생하기 위해서는 다른 부분보다 응력이 집중되어야 한다. 볼트설계를 용이하게 하기위해서 파단 될 부위에는 균일한 인장응력이 작용해야한다. 또한, 열차운행 중에 볼트체결부에는 피로하중이 집중되기 쉬우므로 피로에도 잘 견딜 수 있는 형상으로 설계하여야 한다. 이상의 조건을 만족시키기 위해 본 연구에서는 볼트의 형상을 KS규격에 명시되어 있는 인장시험시편을 참조하여 설계를 하였으며, 그 모양은 그림2와 같다. Tension area는 인장파단 될 부분이다. 볼트가 경충돌안전장치에 체결될 경우 항복응력의 70%에 해당하는 체결력이 볼트에 발생하므로 이를 감안하여 볼트형상을 설계해야 한다. 볼트의 재료는 고강도강인 SCM4이며 그림 3과 4는 SCM4의 응력-변형률선도와 볼트의 하중-변위선도이다.

그림 5는 설계된 인장볼트에 임의의 하중이 작용할 때 볼트에 발생한 응력분포를 보여준다. Tension area의 응력상태를 보면 길이방향(Y방향)으로 균일한 인장응력이 발생함을 알 수 있다. (a), (b), (c)는 각각 σ_{xx} , σ_{yy} , τ_{xy} 를 나타낸다. (d)는 Max principal stress(σ_1)로 볼트중심에서 가장 크게 발생하여 파단이 중심에서 발생됨을 예측 할 수 있다.

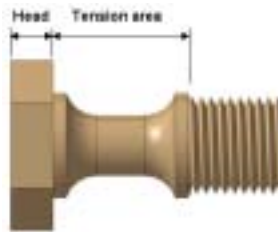


그림 2. Tension bolt

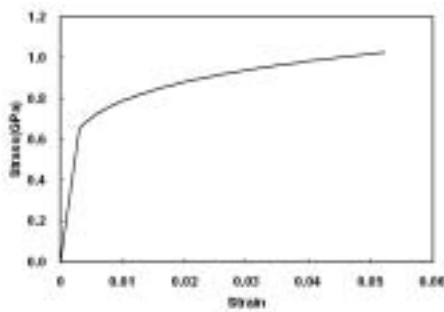


그림 3. Stress-strain curve

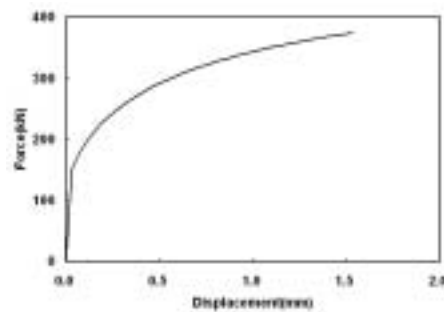


그림 4. Force-displacement curve

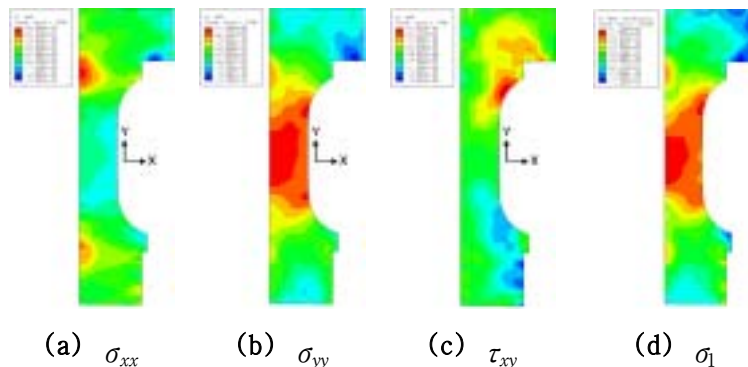


그림 4. Stress distribution in the tension bolt (axisymmetric condition)

4. 에너지흡수부재

경충돌 시 충격에 의해 인장볼트가 파단 된 다음 에너지흡수구조에서 충격에너지를 흡수한다. 에너지 흡수구조는 승객이 받는 가속도를 감안하여 균일한 붕괴하중을 가지는 Expansion tube type과 Inversion tube type으로 선정되었다. 그림 5와 6은 Expansion tube와 Inversion tube의 외관형상을 보여주며, 그림 7과 8은 Expansion tube와 Inversion tube의 하중-변위선도이다. 표 2는 Expansion tube와 Inversion tube의 해석결과를 나타낸다. Expansion tube의 경우 전체 tube길이가 에너지흡수에 사용될 수 있으나 Inversion tube의 경우 tube길이의 50%만 에너지흡수에 사용될 수 있지만 흡수되는 에너지양은 비슷하다.

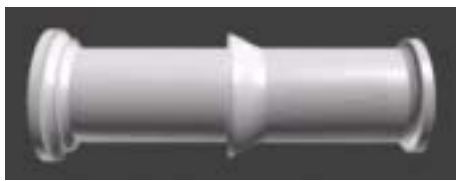


그림 5. Expansion tube



그림 6. Inversion tube

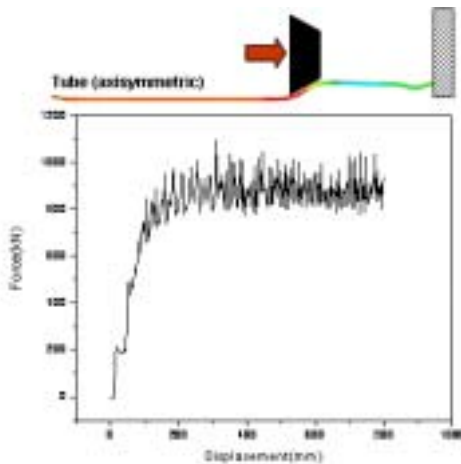


그림 7. Force-displacement(expansion)

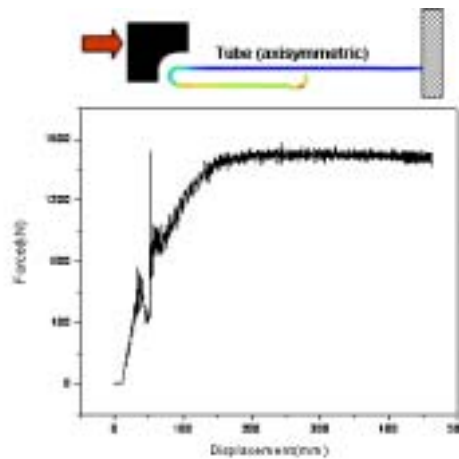


그림 8. Force-displacement(inversion)

표 2. Results of energy absorber analysis

Type	Expansion tube	Inversion tube
Initial length(mm)	1000	1000
Collapse length(mm)	800	500
Collapse force(kN)	880	1500
Absorbed energy(MJ)	0.62	0.65

5. 통합해석

경충돌안전장치의 주요부품인 인장볼트와 에너지흡수구조(expansion or inversion type)의 연속적인 충돌거동특성을 확인하기 위한 시험 장비를 설계하였고, 인장볼트와 에너지흡수구조를 부착하여 통합충돌해석을 수행하였다. 그림 9는 경충돌안전장치의 시험 장비이다. 모델링과 해석시간을 줄이기 위해

ABAQUS/Explicit에서 제공하는 connector element를 사용하여 인장볼트와 에너지흡수구조를 묘사하였다. 인장볼트는 그림 4의 하중-변위 특성을 적용하였고 에너지흡수구조는 그림 7, 8의 하중변위특성을 각각 적용하여 해석하였다. 또한, Expansion tube와 Inversion tube를 시험 장비 부착한 경우에 대해 각각 충돌해석을 수행하였다. 볼트를 표현한 connector element에는 damage initiation condition과 damage evolution condition을 적용하여 설계 충격하중인 375kN에서 볼트가 파단 되도록 하였다.⁽⁵⁾

해석결과 약 1500kN에서 4개의 인장볼트가 파단 된 다음 연결기가 tube를 변형시키면서 에너지흡수를 하였다. 그림 10은 고정벽에 작용한 반력과 시험 장비의 이동변위 선도이다. 그림 10을 보면 연결기가 고정벽에 부딪치면서 반력이 급격히 증가하였다가 볼트가 파단 된 후 반력이 약간 감소하였다. 그리고 tube에 의한 2차 충돌로 인해 다시 반력이 크게 증가하였다.(A지점) 그 후, 볼트가 파단 되면서 볼트의 변형에너지가 연결기의 운동에너지로 전환되었고, 고정벽에 부딪치면서 발생한 반력과 연결기의 탄성으로 인해 초기운동방향의 반대방향으로 충격에너지가 작용하여 연결기와 고정벽이 상대운동을 하게 떨어지게 되었다.(B지점) 연결기의 운동에너지가 튜브에 의해 흡수된 수 장비의 운동에너지가 tube를 통해 연결기에 전달되어 연결기가 다시 고정벽에 부딪치는 3차 충돌이 발생하였다.(C지점) 그림 12, 13을 보면 D는 인장볼트가 파단 되는 시점이고 E는 연결기와 고정벽간의 3차 충돌이 발생하는 시점이다. 그림 14의 F는 tube에 전달된 장비의 운동에너지와 반대방향으로 작용하는 연결기의 운동에너지가 같아져 순간적으로 튜브에 작용하는 반력이 급격히 감소하는 지점이다.

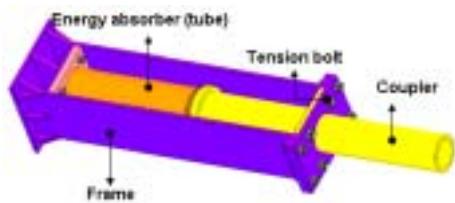


그림 9. Name of main part

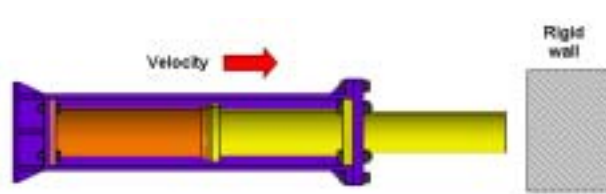


그림 10. Boundary conditions

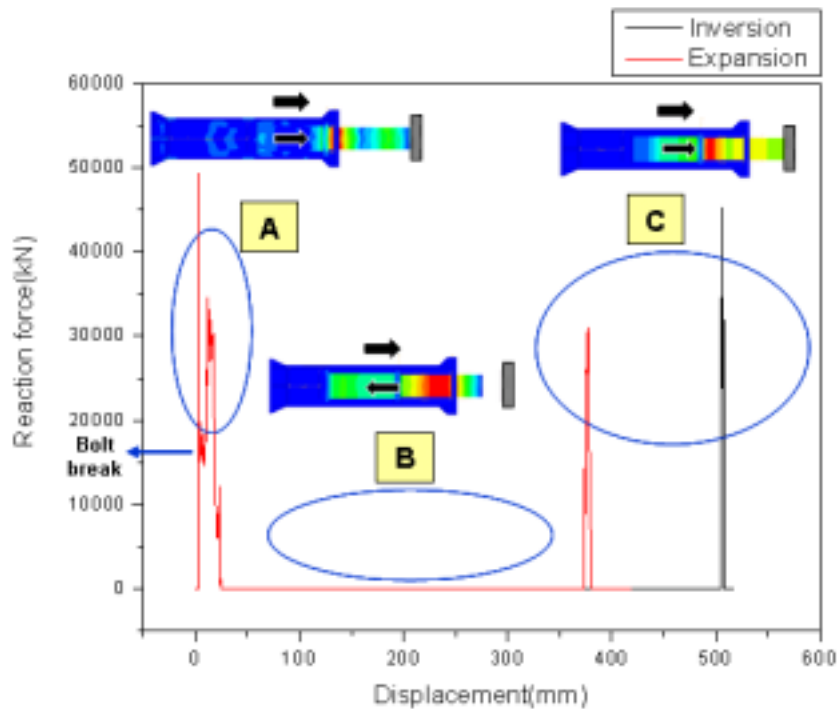


그림 11. Reaction force on the rigid wall

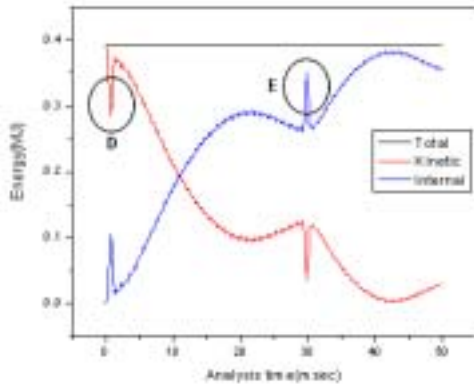


그림 12. Energy(Expansion tube)

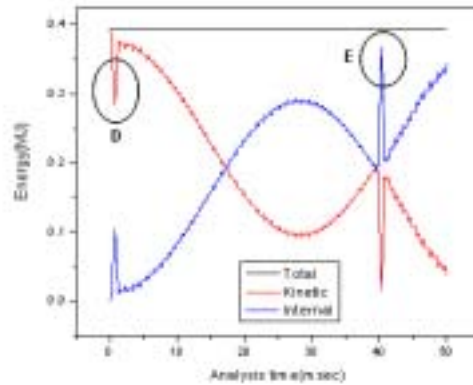


그림 13. Energy (Inversion tube)

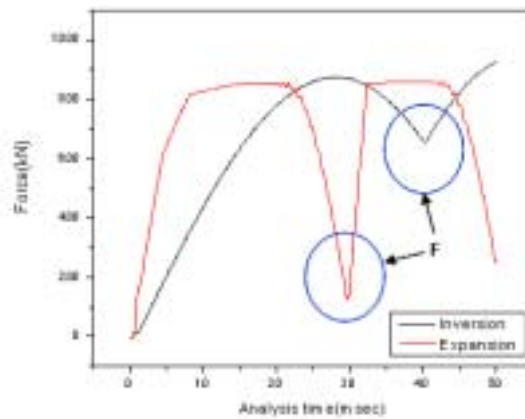


그림 14. Internal force(tube)

6. 결론

본 연구에서 경충돌안전장치를 개발하기 위해 주요부품인 인장볼트와 에너지흡수구조에 대한 충돌해석을 수행하였고, 충돌시험을 하기 위한 시험 장비를 설계 개발하였다. 또한, 시험 장비를 이용한 인장볼트와 에너지흡수구조의 통합해석을 수행하여 경충돌안전장치의 에너지흡수과정과 특이사항을 확인하였다. 주요결과를 정리하면 다음과 같다.

① 충돌에너지흡수전략에 따라 375kN에서 파단 되는 인장볼트를 설계하였고, 구조해석결과 파단이 예측되는 부분에 가장 큰 응력이 발생하였음을 알 수 있었다.

② 에너지흡수구조인 expansion tube와 inversion tube의 충돌해석을 수행한 결과 둘 다 균일한 붕괴하중을 가지는 우수한 붕괴특성을 보여주었다.

③ Expansion tube와 inversion tube의 붕괴특성을 connector element에 적용하여 인장볼트와 에너지흡수구조에 대한 통합해석을 수행하였다. 해석결과, 연결기와 고정벽사이에 지속적인 접촉이 발생하지 않음을 알 수 있었다. 이결과는 연결기의 탄성, 볼트 파단 시 내부에너지의 해방 그리고 고정벽에 대한 충격력에 의해 연결기가 초기 운동방향의 반대방향으로 진행하여 고정벽과 연결기 사이에 상대운동이 발생하였기 때문으로 분석된다.

④ tube에 전달된 시험 장비의 운동에너지와 반대방향으로 작용하는 연결기의 운동에너지가 같아져 그림 14와 같이 순간적으로 tube에 작용하는 반력이 급격히 감소하시점이 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Lombard, E. J., 1995, "Amtrak's high speed trainset program", 1995 IEEE/ASME Joint Railroad Conference,

pp.1~7.

2. Cleon, L. M., Legait, J. and Leveque, D., 1997, "Passive safety concepts applied to TER X7250 Diesel railcar", WCRR, Vol. D, pp.861~867.
3. J. H. Lewis, "Development of Crashworthy Vehicle Structures for Rail ways", WCRR '94, pp.893~900, 1994
4. "REPORT SAFETRAIN", 2001
5. ABAQUS/Explicit THEORETICAL MANUAL
6. 구정서, 조현직, 김동성, 윤영환, "1차원 모델을 이용한 한국형 고속전철의 충돌안전도 평가", 한국철도학회 추계학술대회논문집, pp. 217-222, 2001