

TTX 경충돌 사고시 안전도 확보 방안에 관한 연구

A Study on Light Collision Safety of Tilting Train Express

조태민*
Cho, Tae-Min

권태수**
Kwon, Tae-Soo

정현승**
Jung, Hyun-Seung

ABSTRACT

Under light collision accidents, the energy absorption strategy for the coupler and expansion tube of the TTX(Tilting Train Express) initial design is established in the paper. Also, 1st shearing bolts are designed. When the absorbed energy of the coupler reaches its maximum, the connecting bolts between the coupler and the car body are sheared off not to transmit the impact force to the car body structure. To absorb more energy after the 1st shearing bolts work, a expansion tube is designed conceptually and installed at the rear part of the coupler. Using Hyper-Mesh and LS-DYNA, pre/post processing and light collision analyses are preformed, respectively.

1. 서 론

열차는 신속, 정확, 안전으로 특징지어지는 장점을 갖고 있어 미래 교통수단으로 더욱 중요한 자리를 차지하게 될 것이다. 이런 추세에 발맞추어 전 세계적으로 고 안전도 철도 서비스를 제공키 위해 철도차량의 충돌 안전도 설계와 성능 평가 및 인증을 제도화하여 강화하고 있는 추세이다. 현재 세계 각국의 철도 운영 사들은 차량 납품 사양에 충돌안전도 기준 항목을 만족시키도록 요구하고 있다. 미국에서는 1999년부터 TIER II급 차량(200kph급 차량)에 대하여 차체의 충돌에너지 흡수 능력, 탑승자의 상해치, 주요 충돌안전부품의 설계사양 등 엄격한 규정(49 CFR 238)을 제정하여 적용하도록 하고 있다. 또, 유럽에서는 각 나라별로 상이하게 적용되고 있는 충돌안전도 설계기준을 표준규정으로 제정하기 위한 연구인 SAFETRAIN 프로젝트를 1997년부터 수행하여 2001년 완료한 바 있다. 이를 토대로 2004년부터 통일된 충돌 안전도 설계기준을 적용할 예정이다. 최근에는 동남아 국가, 중국, 인도 등 후진국에서도 선진국에서 적용하는 충돌안전도 기준을 보편적으로 적용하고 있다. 이와 같이 충돌안전도에 대한 연구와 관련규정의 강화는 시대적 흐름이며 국내에서 제작된 차량의 해외수출 시에도 예외 없이 적용 받게 된다.

한편, 국내 기존선의 운행성능향상을 위해 탈팅열차를 선정하고, 이 열차를 미래지향적 관점에서 설계개발하기 위해 각고의 노력과 투자를 아끼지 않고 있다. 따라서, 이러한 탈팅열차는 이전 열차에는 적용되지 못했던, 첨단 충돌안전설계를 수행하여 운행 중에 예기치 못한 상황으로 인하여 발생하는 사고로부터 운전자와 승객의 피해를 최소화시킬 필요성이 있다[1,2,3].

경충돌 안전도 설계는 경충돌 발생시 열차의 차체에 변형이 일어나지 않으면서, 고완가능한 부품의 손상만으로 충돌에너지를 흡수하도록 하여, 차체의 피해를 최소화하려는 것이다. 이를 위해,

* 한국철도기술연구원 연구원

** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

연결기 및 연결기 후방 에너지 흡수구조를 설계하고 각각에 대한 에너지 흡수전략과 에너지 흡수량을 결정해야 한다. 본 논문에서는 TTX(Tilting Train Express) 차량의 설계조건에 대하여 경충돌 사고에 대한 연결기와 연결기 후방구조의 에너지 흡수전략을 수립하였다. 또한, 연결기에서 충돌에너지가 흡수된 후 차체에 변형을 유발하기 전에 차체에서 탈착되어 연결기 후방구조로 충돌 에너지를 전달하도록 하는 전단볼트를 설계하였다. 연결기 후방구조는 팽창튜브를 사용하여 적은 공간에서 많은 충돌에너지를 흡수할 수 있도록 제안하였다. 전, 후지리에는 Hyper-Mesh를 이용하였으며, 충돌해석에는 상용 유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA를 이용하였다.

2. 경충돌 안전도 개념설계

경충돌은 열차의 차체에 변형을 발생시키지 않으면서, 교환 가능한 부품의 손상만이 발생하는 조건이다. 가벼운 충돌사고 발생 시 에너지는 연결기와 팽창튜브, 전단볼트 등으로 흡수되며 열차 차체에는 손상이 일어나지 않는다. 그림 1은 경충돌 사고 시 단계별로 충돌에너지를 흡수하는 경충돌 에너지흡수 개념도이다. 또한 표 1은 경충돌 에너지 흡수를 개념적으로 설명하는 표이다. Step 4까지는 구조체에는 손상이 없고 교체가 가능한 부품 수준에서 에너지를 흡수하게 된다. 각 단계별 상황개요는 다음과 같다.

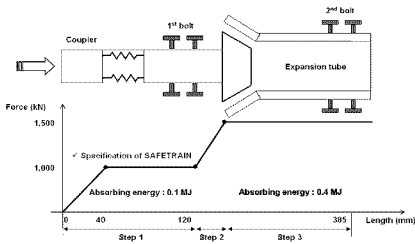


그림 1. 경충돌 안전도 설계 개념도

표 1. 전두부 충돌에너지 흡수 시나리오

충돌단계	설명	흡수에너지	전체에너지	충돌속도	
Non-structural devices	Step 1	연결기에서 에너지 흡수	0.1MJ	<13.5km/h	
	Step 2	1차 전단볼트 붕괴	0.1MJ	<15.0km/h	
	Step 3	팽창튜브 에너지 흡수	0.4MJ	<30.0km/h	
	Step 4	연결기/부트 탈락 (2차 전단볼트 붕괴)		0.5MJ	
Structural device	Step 5	전두부 에너지 흡수부재 압괴	3.5MJ	4.0MJ	>36.0km/h

- Step 1 : 연결기는 가벼운 충돌사고 발생 시 1차적으로 충돌에너지를 흡수하는 장치이며 1,000kN 범위의 충격력 발생 시 차체의 유·공압 실린더에 의해 충격에너지를 흡수한다. 본 연구에서 검토한 연결기는 SAFETRAIN의 사양을 채택한 것으로서, 압괴길이는 120mm이며 0.1MJ의

충격에너지를 흡수하며 충돌상대속도는 13.5km/h 이하이다.

- Step 2 : 연결기의 최대 변위로 인해 충돌에너지를 더 이상 흡수하지 못하는 상태에 이르렀을 때, 1,500kN의 압력하중에서 1차 볼트가 전단된다. 이때의 속도는 13.5km/h~15km/h 이다.

- Step 3 : 차체에 변형을 발생시키지 않도록 차량 전두부의 에너지 흡수구조에서 압괴변형을 일으키면서 충격에너지를 흡수하게 된다. 이 과정에 이용되는 것이 팽창류브인데, 팽창류브는 변형하면서 0.4MJ의 충격에너지를 흡수하게 된다. 충돌상대속도는 30km/h 이하이다.

- Step 4 : 팽창류브의 변형이 끝나면 2차 볼트가 30km/h~36km/h 사이에서 전단되어 연결기가 차체 구조에서 떨어져 나가게 된다.

- Step 5 : 충돌속도가 36km/h 이상일 경우 전두부가 압괴되어 차체의 손상이 발생하면서 충돌에너지를 흡수되게 된다.

3. 연결기 1차 전단볼트 설계

연결기가 최대 변위에 도달하였을 때, 연결기는 더 이상의 에너지를 흡수하지 못하고 충격 하중은 1차 볼트에 전달된다. 그리고 볼트에 작용하는 힘이 일정 범위를 넘어서면 볼트는 전단된다. 그림 2는 상용으로 사용되고 있는 전단볼트의 예인데, 흠이 가공되어 있는 부위에서 전단된다.

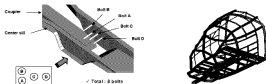


그림 2. 상용 전단볼트의 예

볼트해석의 경우 그동안 정적상태에서의 응력 해석은 많이 이루어졌으나[4,5,6], 열차와 같은 충돌 상태의 해석에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 열차 충돌 시 연결기와 센터 실(center sill) 사이에 위치한 1차 볼트에 작용하는 힘을 구하기 위한 해석기법을 확립하여 유용한 볼트 설계의 방법으로 활용하고자 하였다. 이와 같은 볼트 설계기법은 2차 볼트의 전단설계에도 그대로 적용될 수 있다. 볼트와 연결기의 경우 볼트는 1차원 빔(beam) 요소로 모델링되어 개별 질점들이 3개의 병진자유도(Tx, Ty, Tz)와 3개의 회전자유도(Rx, Ry, Rz)를 가지지만, 연결기는 솔리드(solid)로 모델링 되어 3개의 병진자유도만을 가지게 된다. 따라서 볼트와 연결기의 자유도 수가 서로 다르므로 적절한 조건을 부여하여야 정확한 해석을 수행할 수 있다. LS-DYNA[7,8]에서 제공하는 빔과 솔리드의 다양한 연결방법을 볼트 해석에 적용하여 결과를 분석하였다. 특히 에너지 관점에서 전체에너지가 보존되는 방법만이 해석의 신뢰도를 보장하므로, 에너지가 보존되는 방법 중에서 적절한 변형 형상이 발생하는 조건을 구하였다. 그 결과, 빔과 솔리드의 자유도 불일치로 인한 문제점은 볼트와 연결되는 연결기 영역에 강제연결 조건을 부여하면, 힘의 전달이 정확하며 전체에너지 보존이 되는 것을 확인하였다. 볼트와 센터 실과의 연결은 절점에 작용하는 힘이 일정 값 이상이 되기 전에는 절점과 면이 붙어 있다가, 일정 값 이상을 넘을 경우 절점과 면이 서로 떨어져지도록 하여 볼트의 전단효과를 나타낼 수 있도록 하였다.

본 연구에서 사용되는 1차 볼트는 그림 3의 (a)와 같이 센터 실의 좌, 우에 총 8개가 설치된다. 그림 3의 (b)는 1차 전단볼트 해석을 위한 TTX 차량 전두부의 유한요소모델이다. 연결기의 카트리지가 길이가 늘어날수록 흡수에너지와 한계상대조속도는 증가하게 되는데 본 연구과정에서는

120mm)로 선정하였으며, 흡수에너지는 0.1MJ, 한계상대조차속도는 13.5km/h로 정하였다. 연결기의 에너지 흡수성능은 그림 3과 같은 좌중-변위 선도를 입력하였다. 8개의 볼트가 견디는 힘은 합력은 1,500kN으로 정하였으며, 1개의 볼트가 견디는 최대 전단력은 270kN으로 정하였고, 이것을 넘을 경우 볼트가 전단되는 조건을 입력하였다. 열차의 선두차 질량은 57ton으로 선정하였다.

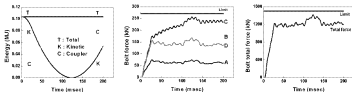


(a) 1차 전단볼트의 위치 (b) TTX 전두부의 유한요소모델

그림 3. 1차 볼트의 전단선계

3.1 13.5km/h의 한계상대조차속도로 충돌 시 1차 볼트의 전단 해석

열차의 한계조차속도인 13.5km/h의 상대조차속도로 충돌 시 해석결과를 그림 4와 표 2에 정리하였다. 그림 4의 (a)에서 전체에너지는 안정하게 유지되고 있어 해석의 신뢰도를 확보할 수 있으며, 대부분의 충돌에너지는 연결기가 흡수하게 된다. 그림 4의 (b)와 (c)는 개별적 볼트에 작용하는 힘과 전체 볼트의 합력을 나타낸 것이다. 표 2에서 개별적 볼트에 작용하는 힘이 서로 다른 것은 각각의 볼트 위치가 다르기 때문이다. 그러나 볼트에 걸리는 힘과 전체 볼트의 합력은 설계의 상한 값을 넘지 않으므로써, 한계상대조차속도인 13.5km/h로 조차시 연결기의 1차 볼트가 파손되지 않는다는 것을 확인하였다. 따라서 개별적 볼트가 견디는 최대 힘을 고려한 볼트 지경과 지경을 역설의 선정할 수 있다.



(a) 에너지 (b) 볼트에 작용하는 힘 (c) 8개 볼트의 합력

그림 4. 상대조차속도 13.5km/h일 경우의 1차 볼트의 전단 해석

표 2. 상대조차속도 13.5km/h일 경우의 1차 볼트의 전단 해석

항목	선계 상한치	해석결과	선계 상한치 도달비율
연결기의 변위 (mm)	120	120	100%
개별 볼트에 작용하는 최대 전단력 (kN)	볼트 A	75.2	27.9%
	볼트 B	211.6	78.4%
	볼트 C	256.3	94.9%
	볼트 D	167.4	62.0%
8개 볼트의 순간 최대 집합력 (kN)	1500	1418.2	94.5%

3.2 15km/h의 상대조차속도로 충돌 시 해석결과

한계상대조차속도인 13.5km/h를 초과한 15km/h의 속도로 충돌할 때의 해석결과를 그림 5와 표 3에 정리하였다. 그림 5의 (a)에서 충돌에너지가 연결기의 흡수에너지를 초과함으로써, 볼트에 하중이 크게 작용하게 된다. 따라서 연결기가 자신의 흡수에너지를 모두 사용한 이후에 볼트에 작용하는 하중이 크게 증가하여 그림 5의 (b)와 같이 하나의 볼트가 전단이 되고 동시에 나머지 볼트가 연쇄적으로 전단됨을 알 수 있다.

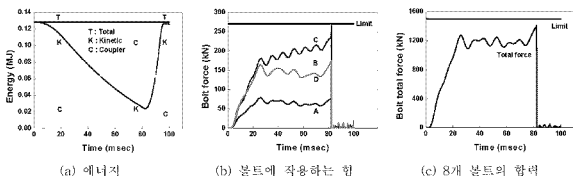


그림 5. 상대조차속도 15km/h일 경우의 1차 볼트의 전단 해석

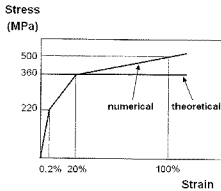
표 3. 상대조차속도 15km/h일 경우의 1차 볼트의 전단 해석

항 목	실계 상한치	해석결과	실계 상한치 도달비율
연결기의 변위 (mm)	120	120	100%
개별 볼트에 작용하는 최대 전단력 (kN)	볼트 A	270	100%
	볼트 B	270	100%
	볼트 C	270	100%
	볼트 D	270	100%
8개 볼트의 순간 최대 전단력 (kN)	1500	1417.8	94.5%

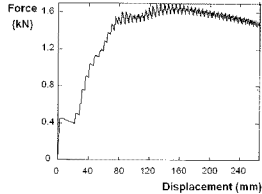
해석결과를 검토해보면, 1차 볼트에 작용되는 힘은 한계상대조차속도인 13.5km/h로 충돌할 경우에는 실계 한계치를 넘어서지 않고 안전한 상태를 유지한다. 그러나 한계상대조차속도를 넘어서는 15km/h로 충돌할 경우, 1차 볼트가 전단됨을 확인하였다. 1차 볼트가 전단된 이후에는 팽창튜브가 변형되면서 충돌에너지를 흡수하게 된다.

4. 팽창튜브의 개념적 설계

경충중에 의해서 연결기가 0.1MJ의 충돌에너지를 흡수한 후 1차 볼트가 전단되면, 팽창튜브의 변형을 통하여 충돌에너지를 흡수하게 된다. 팽창튜브는 그림 6과 같이 G7 열차의 에너지 흡수 부재를 기준으로 설계하였다. 이 부재는 양호한 압피특성을 지니고 있으며, 공간 효율이 이론적으로 100%를 가질 수 있다. 팽창튜브는 0.4MJ의 에너지를 흡수하게 된다. 팽창튜브의 상세한 설계를 위해서는 연결기의 정확한 사양 및 1차 전단볼트의 전단력이 결정되어야 한다. 이에 대한 연구는 향후 보강될 예정이며, 팽창튜브의 탈착에 사용되는 2차 전단볼트도 1차 전단볼트의 해석기법을 활용하여 설계할 수 있다.



(a) 팽창튜브의 수치적, 이론적 재료모델



(b) 팽창튜브의 압괴시 수치해석 결과

그림 6. 팽창튜브의 재료모델과 압괴시 수치해석 결과

5. 결 론

본 연구에서는 TTX 차량의 경충돌 안전도의 개념적 설계를 수행하였다. 먼저 경충돌 사고 발생시 각 단계별로 에너지 흡수전략과 흡수에너지량을 결정하였다. 그리고 연결기를 센터 실에 고정하는 1차 전단볼트의 해석을 상용 유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA를 이용해서 수행하였다. 해석결과 1차 전단볼트는 한계조차상대속도인 13.5km/h로 충돌시 볼트가 파손되지 않으나, 한계조차상대속도를 초과하는 15km/h로 충돌시 설계 한계치를 넘어서 전단됨을 확인하였다. 이러한 1차 전단볼트의 설계기법은 2차 전단볼트에도 그대로 적용될 수 있다. 향후 연결기의 정확한 에너지 흡수량과 사양이 결정될 경우 1, 2차 전단볼트 및 팽창튜브의 정확한 설계가 수행될 수 있다.

후 기

본 연구는 철도청 철도기술연구개발사업의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Smith, R. A(1995), "Crashworthiness moves from art to science," Railway Gazette International, Vol. 151, No. 4, pp. 227-230.
2. 구정서 외(1999), "도시철도차량 충돌안전기준 제정에 관한 연구보고서," 한국철도기술연구원.
3. 송달호 외(1998), "고속전철 충돌안전도 해석기술 개발 연구보고서," 한국철도기술연구원.
4. 이병재, 김병곤(1989), "유한 요소 접촉 해석법에 의한 나사 체결부 설계 개선에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제13권 제3호, pp. 353-361.
5. 김진곤, 박성수, 김윤영, 최석환, 김병권(1996), "볼트결합부가 있는 구조물의 유한요소 모델링 및 실험적 검증," 대한기계학회논문집 A권, 제20권, 제6호, pp. 1854-1861.
6. 권영두, 구남서, 김성윤, 조민호(2002), "볼트결합부를 포함한 구조물의 정적 및 동적 해석을 위한 유한요소모델링," 대한기계학회논문집 A권, 제26권, 제4호, pp. 267-276.
7. Livermore Software Technology Corporation(2003), "LS-DYNA Keyword User's Manual"
8. Livermore Software Technology Corporation(2003), "LS-DYNA THEORETICAL MANUAL"