

철도차량 충돌 안전성 분석

Crashworthiness Analysis of Railway Rolling Stock

이강욱*
Lee, Kang-Wook

백운천*
Baik, Woon-Cheon

박상규*
Park, Sang-Gyu

ABSTRACT

In this study, the crash situations and general crash analysis methods of railway rolling stocks were explained. To calculate the applied load and the maximum stress in the carbody when two aluminum railway vehicles were shunted, the finite element models for the carbody and the coupling system were made. The characteristic curve of draft gear which had a function to reduce impact force was modeled by nonlinear bar elements and the carbody was modeled by shell elements. Two shunting speeds, 5 km/h and 8 km/h, were considered and the results were analyzed and compared with static analysis case. Also, the aluminum railway vehicle with 60 km/h was crashed against rigid wall to examine the global behavior of the carbody.

1. 서론

최근 들어 국내에서도 승용차의 충돌 안전성에 대한 관심이 높아지면서, 이것이 하나의 중요한 구매기준으로 부각되고 있다. 그러나 철도차량에서의 충돌은 승용차의 경우와는 달리 사고의 빈도가 낮고 또한 차체 설계시에 이에 대한 규정 및 법규가 없으므로 충돌 안전도 개념은 거의 무시되어 왔으나, 고속전철 사업이 본격화 되면서 철도차량의 충돌 안전성에 대한 연구의 필요성이 부각되기 시작하였으며, 해외의 추세로 볼 때 선진 철도차량사에서는 자체적으로 충돌안전도에 대한 기준을 정하여 차체 설계에 반영하기에 이르렀다. 따라서, 이러한 국외의 추세에 발맞추며 향후 철도차량의 해외 수주에 대응하기 위해 국내에서도 철도차량의 충돌 안전도에 대한 연구가 진행 중에 있다. 본 연구에서는 철도차량의 충돌 유형과 국내외 연구동향, 그리고 당사에서 수행한 차량간 연결(조차)시, 고속충돌시의 해석을 기술한다.

2. 국내외 연구동향

2.1 충돌 유형 분석

철도차량은 지정된 궤도를 따라 운행하며 중앙제어가 가능하므로 충돌 가능성이 매우 희박하다. 따라서 이전까지는 사고 방지가 주된 연구목적이었다. 그러나 열차의 고속화와 해석장비의 발달에 따라 만일의 사태에 대비한 충돌사고에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

철도차량에서 발생할 수 있는 사고유형은 표 1과 같이 구분할 수 있다. 본 연구에서는 이 중 차량 연결(조차)시에 대한 해석과 주행 차량간의 충돌에 대한 해석을 수행하였다.

* 현대정공(주) 기술연구소

표 1. 철도차량의 충돌사고 유형

구분	충돌대상	내용	비고
열차간 충돌	차량 연결(조차)	충돌에너지는 차량 연결기에서 흡수, 구조적 이상 없을 것.	
	주행 차량간 충돌/추돌	구조물의 소성변형으로 에너지 흡수, 타오름 방지장치 필요.	
상용차와 충돌	중(重) 상용차	트럭, 중장비등과 충돌시 차문과 언더프레임 사이에 충격, 고속에서는 전두부의 피해가 있음.	
기타 장애물	전두부에 작은 물체	열차 교행시 상대 차량에서 튀어나온 물체와 충돌	
	횡방향 충격하중	정차중 사고로 인한 하중. 보수적 측면이 우선.	

2.2 철도차량 충돌의 특징

철도차량의 충돌이 승용차와 크게 다른 것은 먼저 중량과 운행속도로서, 특히 고속철도의 경우에는 운동에너지가 승용차의 수천 배에 달한다. 기존의 UIC (International Union of Railway)나 AAR (Association of American Railroads)등의 철도차량에 관한 규격에서는 충돌에 대한 설계조건으로 "최소 압축하중(150 톤 또는 200 톤) 이상에서 차체에 영구변형이 없을 것"을 적용함에 따라 구조물의 강도 및 강성을 증가시키는 방향으로 유도하고 있었다. 그러나 점차 실제 충돌사고 자료를 바탕으로 하여 차체의 강성뿐 아니라 에너지 흡수 개념이 도입되고 있는 실정이다. 즉, 충돌시 차체가 변형하여, 운동에너지를 흡수하되 주된 변형이 제한된 구간에서만 발생하도록 하여 승객이 탑승한 구간에는 손상이 발생하지 않도록 하는 것이다.

또 하나의 특징으로는 승용차에서는 운전석 및 조수석에 안전벨트나 에어백 등의 안전장치가 가능하지만 철도차량에서는 실내 공간이 넓고 승객의 이동에 제한이 없으므로 승객의 안전을 고려한 내부 공간의 설계에도 주의를 필요로 한다.

이와 같이, 차체 설계시 에너지 흡수개념을 도입한 충돌 안전도 설계는 점점 그 중요도가 부각되고 있으나, 국내 철도차량의 경우엔 이러한 개념에 대한 인지가 부족하며 실제 차체 설계에 응용하는 것은 전무한 실정이다. 다만, 국내 철도차량의 설계에서는 차량 운행시 급제동 및 차량간의 조차시에 발생하는 압축하중에 대하여 연결장치의 선정 및 평가의 기초자료로 활용하는 저속 충돌해석 즉, 조차하중에 대한 해석을 고려하는 정도이다.

2.3 에너지 흡수구조 설계

철도차량의 고속 충돌 시에 가장 위험한 상황은 열차간의 타오름 현상(over-riding 또는 telescoping)과 탈선이다. 열차간에 타오름 현상이 발생하면 상대적으로 강성이 높은 언더프레임이 상대차량을 파고들게 되고 탈선을 유발하며 탈선 후에는 전복 가능성이 높아지므로 승객의 피해가 커지게 된다. 따라서 타오름 방지장치(anti-climber)가 우선적으로 고려되어야 하며 동시에 충돌에 의한 운동에너지가 각 차량에 효과적으로 흡수되어야 한다.

열차간의 충돌시에 에너지를 흡수하는 방법은 두 가지로 구분할 수 있다[1]. 먼저 영국 철도차량의 경우로, 각각의 차량이 1m의 변형시 1MJ의 에너지 흡수를 하도록 하는 것이다. 이 개념은 자신의 운동에너지를 스스로 흡수하는 것으로서, 선행차량의 충돌변형 시간이 뒷차량의 접근시간보다 작게 되어 한 차량씩 순차적인 충돌이 발생하는 경우이다.

또 한가지 방법은 프랑스 철도차량의 경우로 전두부와 첫 번째 연결부위에서 약 6MJ의 에너지를 집중적으로 흡수하도록 하는 방법이다. 이는 TGV와 같이 연결형 구조를 채택하고 있는 열차에서 차량간 연결부위가 매우 근접하여 순차적인 충돌이 발생하기가 곤란한 경우에 해당된다.

표 1 중 국내 철도차량 설계의 경우 차량 연결(조차)시에 대한 구조강도만을 고려하므로 충돌시 에너지 흡수를 위해 차체에 적용하는 별도의 구조는 없고 다만, 연결장치에서 그 기능을 하도록 하고 있다. 일반적으로 연결장치는 커플러, 드래프트 기어, 에너지 흡수장치 등으로 구성되어 있으며 이중 드래프트 기어는 견인, 압축시에 하중을 센터실을 통해 차체에 전달한다. 드래프트 기어는 스틸 스프링 또는 고무 스프링으로 되어있고, 에너지 흡수장치는 기계적 장치, 유압장치 또는 고점성재료 장치 등으로 되어있다.

3. 차량간 연결시의 조차하중 해석

차량간 연결시에 발생하는 조차하중에 대한 시험 및 평가 규정은 일반적인 차체 제작 사양서에는 명확히 정의되어 있지 않고 다만, 정적인 압축하중에 대해 규정되어 있는 것이 보통이다. 그러나 유럽의 철도차량 설계 및 시험에 대해 규정하고 있는 UIC 와 ERRI (European Rail Research Institute)에서는 객차와 화차에 대해 정하중, 피로하중, 고유진동수 시험과 함께 차체의 완충시험 (buffing impact test)에 대한 규정으로 제동이 부가되지 않은 운행 준비상태의 정지 차량 1대에 대해 다른 차량 1대가 저속으로 충돌할 때 차체에 미치는 영향을 조사하도록 하고 있다.

국내 철도차량의 경우에는 연결기 완충기능 평가에 대한 특별한 규정은 없으므로 앞서 언급한 내용들을 참조로 하여 현재 개발 중인 경량 알루미늄 전동차 차체를 대상으로 차량간 조차시에 발생하는 동적 압축하중과 구조강도 해석을 수행하였다. 해석 대상인 경량 알루미늄 전동차의 중량은 표 2, 차체 재질인 알루미늄 합금 A6005A의 기계적 특성은 표 3과 같다.

표 2. 경량 알루미늄 전동차 차체의 중량

번호	항 목	중 량	비 고
①	공차중량	37.5 톤	대차 포함
②	차체중량	6.6 톤	계획중량
③	대차중량	15.0 톤	2 sets
④	최대 승객하중	25.0 톤	강도기준

표 3. 알루미늄 합금 A6005A의 기계적 성질

재질	인장강도 (kg/mm ²)	항복강도 (kg/mm ²)	탄성계수 (kg/mm ²)	포아송비	밀도 (kg·sec ² /mm ⁴)
A6005A	26.5	21.9	7,300	0.33	2.857×10 ⁻¹⁰

차량간 조차조건으로 공차상태인 1대의 정지 차량에 동일한 차량이 ① 조차속도 5 km/h로 조차하는 경우, ② 과도한 조차속도인 8 km/h의 속도로 조차하는 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 해석을 위해 그림 1과 같이 차량 사이를 연결하는 커플러와 드래프트 기어로 이루어져 있는 연결 장치에 대해 그 특성들을 해석 모델에 입력하였다.

조차시에 발생하는 충격하중은 그림 2의 고무와 철판의 조합으로 이루어져 있는 드래프트 기어에서 흡수되므로 그림 3과 같은 드래프트 기어의 하중-변위 특성곡선을 비선형 빔요소를 이용하여 차체 연결장치로 모델링하였고 차체는 구조상 길이방향에 대해 거의 대칭이므로 차량 1대의 1/2 부분만을 48,094개의 쉘요소로 모델링하였다. 또한, 차체에 취부되는 대차 및 주요 기기들은 집중질량으로 모델링하였다.

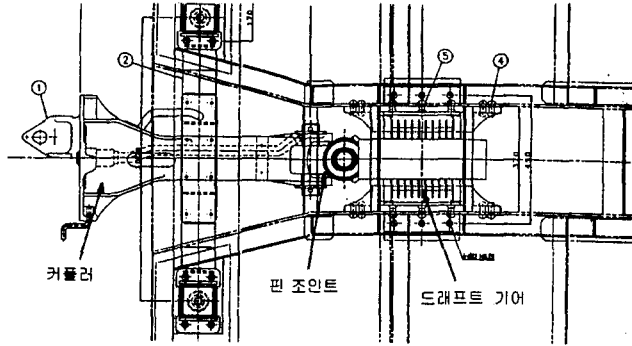


그림 1. 차량간 연결장치

참고로 드래프트 기어는 그림 3에서 알 수 있듯이 압축하중 100톤, 최대압축 행정 43 mm 까지만 완충작용을 하며 그 이상의 하중에 대해서는 완충기능을 상실한다.

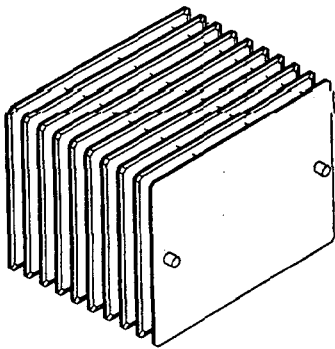


그림 2. 드래프트 기어

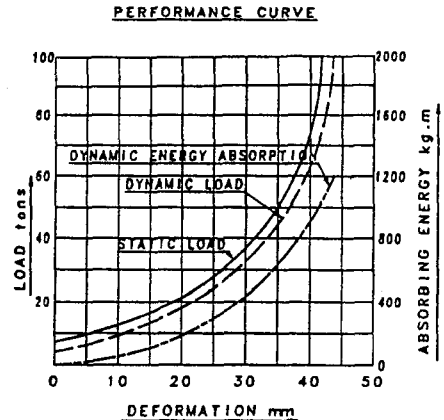


그림 3. 드래프트 기어의 하중-변위 특성곡선

조차시에 발생하는 2차량간의 거동을 파악하기 위해선 정지차량 1대와 운동차량 1대를 모두 모델링해야 하지만, 해석 시간 및 컴퓨터 용량을 고려하여 1대의 차량만을 가지고 에너지 등가를 이용하여 해석을 수행하였다. 즉, 정지차량과 운동차량간의 조차시에 두 차량에서 발생하는 에너지 흡수량과 변형량이 동일하며, 조차후 연결장치에 의해 연결되어 같은 속도로 움직인다고 하면 운동량 보존과 운동에너지의 흡수를 고려할 때, 이는 1대의 차량이 1/2의 속도를 가지고 강체벽에 부딪힐 때와 흡수에너지의 등가를 이루게 된다[2]. 따라서, 본 해석에서는 두 차량간의 5 km/h, 8 km/h 조차 속도에 대해서, 1대의 차량이 각각 2.5 km/h, 4 km/h의 속도로 강체벽에 충돌할 경우로 해석을 수행하였다.

5 km/h 조차시에 대한 해석결과 드래프트 기어에 전달되는 압축하중의 시간에 따른 변화는 그림 4와 같고 이 때 최대 압축하중은 1/2 모델에서 33.2 톤 (325.7 kN) 이다. 따라서 차체에는 66.4 톤 (33.2 톤×2)의 압축하중이 작용됨을 알 수 있다. 드래프트 기어의 압축 변형량은 그림 5와 같이 최대 40.1 mm 이며, 이때 차체에는 그림 6과 같이 볼스타와 커플러 포켓사이의 센타실에서 최대응력 7.1 kg/mm² 이 발생한다.

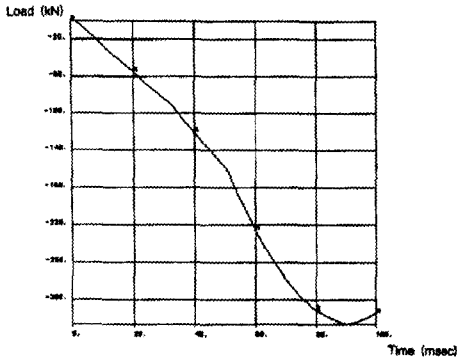


그림 4. 5 km/h 조차시 작용하는 압축하중

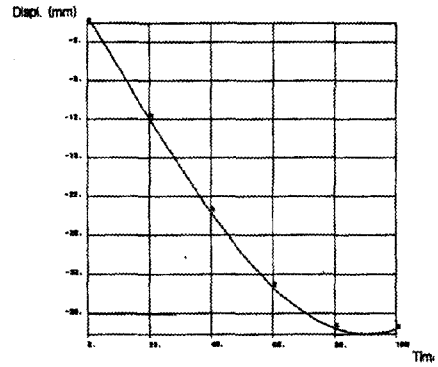


그림 5. 5 km/h 조차시 드래프트 기어의 변형량

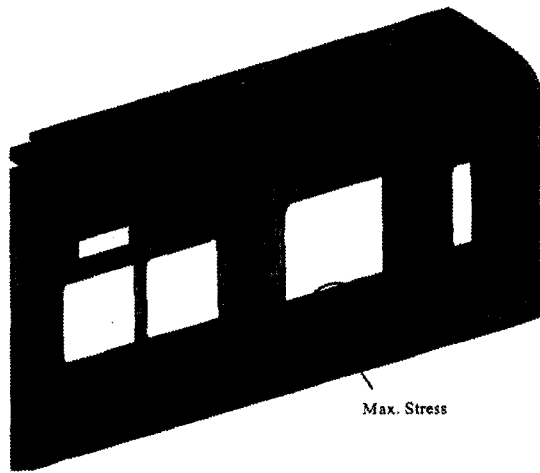


그림 6. 5 km/h 조차시 차체에 발생하는 응력 분포

8 km/h 조차시에 드래프트 기어에 전달되는 압축하중은 그림 7과 같이 1/2 모델에서 118.7 톤 (1163.3 kN)이므로 차체에 237.4 톤 (118.7 톤×2)의 압축하중이 작용되며, 드래프트 기어의 최대 압축변형은 그림 8과 같이 43.7 mm 이다. 차체에 발생하는 최대응력은 5 km/h 조차시와 동일한 부위에서 20.1 kg/mm² 이다.

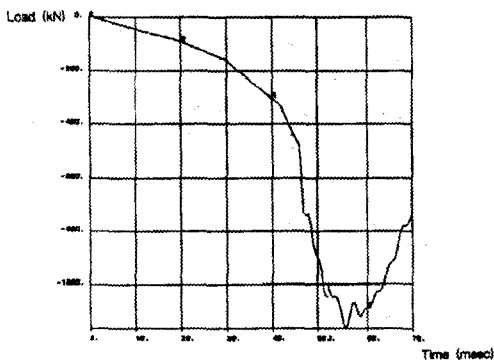


그림 7. 8 km/h 조차시 작용하는 압축하중

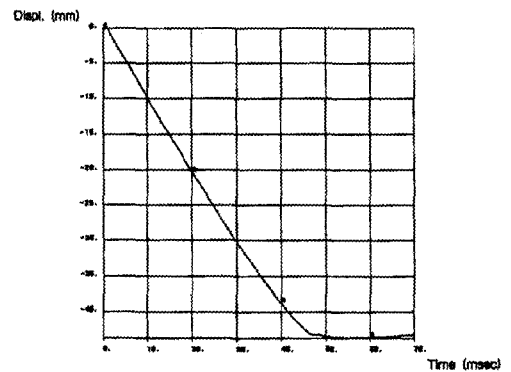


그림 8. 8 km/h 조차시 드래프트 기어의 변형량

표 4. 조차 속도에 따른 해석 결과 요약

조차 속도	5 km/h	8 km/h
최대 압축하중	66.4 톤	237.4 톤
최대 압축변위	40.1 mm	43.7 mm
최대응력 값	7.0 kg/mm ²	20.1 kg/mm ²
최대응력 발생부위	커플러 포켓 후미 곡률부	커플러 포켓 후미 곡률부

<주> Draft gear의 최대 허용 완충하중 = 100 톤
Draft gear의 최대 허용 압축변위 = 43 mm

본 알루미늄 전동차는 12.4 kg/mm²을 차체 재질에 대한 허용응력으로 규정하고 있으므로 위의 해석 결과에 따르면 5 km/h의 조차시에는 허용 범위안에 있으나, 8 km/h 조차시에는 허용 범위를 벗어나게 된다.

알루미늄 전동차 차체에 대한 정적 선형 해석 결과에 의하면 차체에 압축하중 50 톤 작용시 최대응력은 5.6 kg/mm²이므로 이 값을 선형 비례식을 이용하여 66.4 톤과 237.4 톤 일 때의 응력으로 환산하면 각각 7.04 kg/mm², 25.2 kg/mm²으로 표3의 5 km/h일 경우 상당히 근사하지만, 8 km/h의 조차 속도시에 그 값에 있어서 차이를 보이고 있다. 이러한 차이는 정적인 압축하중의 경우 차체의 양 끝단에서 동일하게 50 톤의 압축하중이 작용하여 차체를 통해 힘의 균형이 이루어 지지만, 동적인 하중의 경우엔 차체의 질량에 의한 관성력 50 톤을 한쪽 드래프트 기어에서만 지지하여 힘의 평형을 이루게 되므로 정적인 압축하중 조건과는 동일하지 않다. 또한, 차체의 조차 속도가 클수록 관성력 효과가 크므로 이러한 차이가 더 크게 되는 것으로 판단된다.

4. 두 차량간의 고속 정면 충돌해석

열차 충돌시 충돌에너지는 일차적으로 차간 연결장치에 의해 흡수되지만 고속 충돌의 경우에는 연결장치에 의해 흡수되는 에너지는 극히 일부이고 대부분의 차체 운동에너지는 차체에서 발생하는 대변형 및 소성변형에 의해 흡수된다. 이 때 승객에게 미치는 피해를 최소화하기 위해서는 변형이 주로 차체의 끝단에서 발생해야 하며, 충돌에 의해 발생하는 가속도 역시 승객에게 미치는 효과를 고려하여야만 한다.

해외의 경우 충돌 사고시에 철도차량의 차체 거동을 예측하기 위해서 자동차의 충돌 안전도 설계에 많이 사용되는 상용프로그램인 PAM-CRASH를 이용한 충돌 해석이 많이 진행되어 왔으며 [3,4], 시험을 통한 검증 및 차체 설계에도 이를 반영하고 있다. 그림 9는 충돌 안전도 개념을 적용시킨 해외 알루미늄 전동차의 전두부 구조이다.

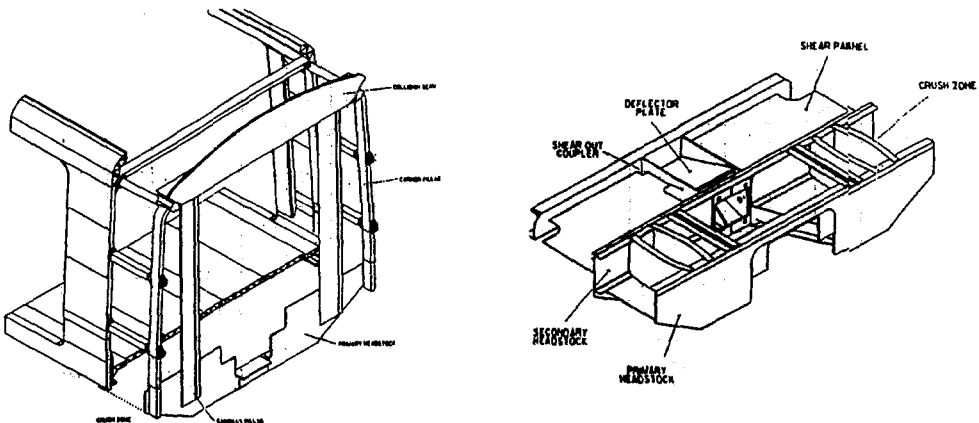


그림 9. 충돌 안전도 개념이 적용된 알루미늄 차체의 구조 (해외 철도차량의 경우)

본 절에서는 당사에서 개발중인 경량 알루미늄 전동차 차체의 충돌 안전도 거동을 파악하기 위해 앞 절의 조차하중 해석 모델을 대상으로 시속 60 km/h의 속도로 2대의 차량이 정면 충돌하는 경우에 대해 해석을 수행하였다. 다만, 이 경우 에너지 흡수량이 상대적으로 적은 연결기는 해석 모델에서 제외하였다.

차량간 정면 충돌하는 경우에는 각 차량이 가지고 있는 운동에너지가 똑같이 각 차량의 변형 에너지로 변환되므로 대칭성을 띄게 된다. 따라서, 한 쪽 차량만을 모델링하여 에너지 흡수를 하지 않는 강체벽에 충돌시키는 해석을 수행하였다. 그림 10은 차체가 충돌한 후 시간에 따른 변형 모습을 나타낸다.

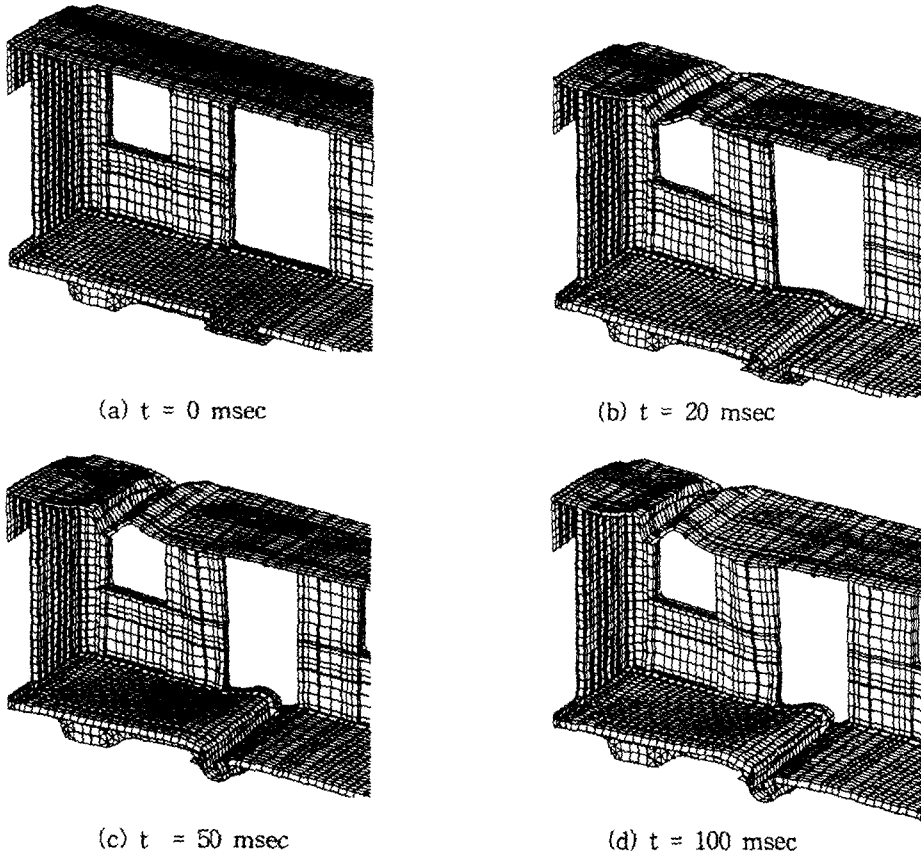


그림 10. 60 km/h로 강체벽과 충돌시 경량 알루미늄 전동차 차체의 변형 모습

그림 10의 결과에서 충돌에 의해 차체 전두부의 천정구조와 볼스터 부위에서 큰 변형이 발생함을 알 수 있다. 경량 알루미늄 차체의 언더프레임은 그림 11과 같은 구조로 되어 있어 차체 길이 방향의 압축하중에 대해선 상당한 강성을 갖고 있다. 따라서, 이러한 언더프레임 구조를 전후로 연결하고 있는 볼스터 부위에서의 강성이 상대적으로 약하게 되어 이 부위에서 주된 변형이 발생된 것으로 보이며, 이는 차체 충돌 안전도 측면에서 보면 그리 바람직하지는 못하다.

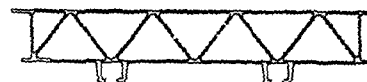


그림 11. 언더프레임 구조

4. 결 론

본 연구에선 철도차량의 충돌유형 및 특징에 대해서 알아 보고 차량간 조차시 발생하는 압축하중 및 차체에 발생하는 응력을 구한 뒤 정적 압축하중시의 응력값과 비교하였다. 또한 두 개의 차량이 고속으로 정면 충돌하는 경우에 대한 해석을 통해 차체의 변형 양상을 살펴 보았다. 본 해석 대상인 경량 알루미늄 전동차 차체는 100 톤의 드래프트 기어 완충능력을 갖도록 되어 있어 조차 속도 5 km/h 에서는 발생하는 최대응력이 재질의 허용범위 안에 있으나 8 km/h 에서는 허용범위를 벗어난다는 것을 알 수 있었다. 두 대의 차량이 시속 60 km/h의 속도로 정면 충돌할 경우엔 운전실의 천정 구조와 볼스터 부위에서 큰 변형이 발생하며 이는 충돌 안전도 측면에서 바람직하지 못하다는 것을 알 수 있다.

이상의 결과는 현재 개발중인 경량 알루미늄 전동차 차체를 대상으로 하였는데 이 차체는 충돌 안전도에 대한 개념을 적용하지 않고 설계한 것이며 또한, 현재까지는 차체의 설계시 조차 및 충돌 사고시를 대비한 고려가 미흡한 실정이다. 그러나, 해외 차종의 경우 점차 차체 제작 사양에 그 내용을 포함시키는 추세이므로 철도차량의 고속화와 해외의 규제조건 등에 대응하기 위해선 차체 설계시에 충돌안전도에 대한 개념이 점차 도입되어야 하며 아울러 그 성능의 평가 및 입증에 대한 연구가 확대되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. R. A. Smith (1995), "Crashworthiness Moves from Art to Science", Railway Gazette International, April
2. J. H. Lewis (1996), "Structural Crashworthiness Overview", Symposium of Rail Vehicle Crashworthiness, Volpe National Transportation Systems Centre, Cambridge, Massachusetts.
3. A. Marissal et al. (1992) "Crash Behavior of Guided Vehicles", GEC Alsthom Technical Review No.9
4. L. T. Kisielewicz, (1992) "French Design Practice and Applications for the Crashworthiness of Rolling Stocks", PAM Users Conference in Asia