

論文

틸팅열차의 샌드위치 복합재 차체 구조물에 대한
충돌안전도 평가 및 향상방안 연구

장형진*, 신광복**, 한성호***

A Study on the Crashworthiness Evaluation and Performance Improvement of
Tilting Train Carbody Structure made of Sandwich Composites

Hyung-Jin Jang*, Kwang-Bok Shin**, Sung-Ho Han***

ABSTRACT

This paper describes the crashworthiness evaluation and performance improvement of tilting train made of sandwich composites. The applied sandwich composite of carbody structure was composed of aluminum honeycomb core and glass/epoxy & carbon/epoxy laminate composite facesheet. Crashworthiness analysis of tilting train was carried out using explicit finite element analysis code LS-DYNA 3D. The 3D finite element model and 1D equivalent model were applied to save the finite element modeling and calculation time for crash analysis. The crash conditions of tilting train were conducted according to four crash scenarios of the Korean railway safety law. It found that the crashworthiness analysis results were satisfied with the performance requirements except the crash scenario-2. In order to meet the crashworthiness requirements for crash scenario-2, the stiffness reinforcement for the laminate composite cover and metal frames of cabmask structure was proposed. Consequentially, it has satisfied the requirement for crash scenario-2.

초 록

본 논문은 샌드위치 복합재 틸팅열차의 충돌안전도 평가 및 성능 향상방안에 대해 서술하고 있다. 차체 구조물에 적용된 샌드위치 복합재는 알루미늄 하니컴 심재와 유리섬유 및 카본/에폭시 적층 복합재 면재로 이루어져있다. 충돌해석은 외연유한 요소 해석 프로그램인 LS-DYNA3D를 이용하였다. 이때, 유한요소모델링과 충돌해석 계산시간의 절약을 위하여 3차원 유한요소모델과 1차원 등가 모델을 적용하였다. 틸팅열차의 충돌 조건은 철도안전법에 명시하고 있는 4가지 충돌사고 시나리오를 고려하여 해석을 수행하였다. 충돌해석 결과 시나리오-2를 제외한 나머지 충돌 시나리오에서 성능 요구조건을 만족하였다. 충돌 시나리오-2의 충돌안전도 요구조건을 충족하기 위하여 전두부의 적층복합재 커버와 금속프레임의 강성 향상방안을 제안하였으며, 결과적으로 충돌 시나리오-2의 요구조건을 만족하였다.

Key Words : 샌드위치 복합재(Sandwich composite), 충돌안전도(Crashworthiness), 철도안전법(Korean railway safety law), 충돌 시나리오(Crash scenario), 틸팅열차(Tilting train)

접수: 2011년 6월 30일, 수정: 2011년 9월 28일, 게재승인: 2011년 9월 29일

* 한밭대학교 기계설계공학전공, 경량구조 및 CAE 실험실

**+ 한밭대학교 기계공학부 교수, 교신저자(E-mail:shin955@hanbat.ac.kr)

*** 한국철도기술연구원 신소재틸팅열차시스템

1. 서론

현재 국내의 철도산업은 차량의 경량화를 통한 환경오염 감소, 운송비 절감, 에너지 효율 극대화 그리고 고속화를 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 2004년에는 KTX가 도입되어 지역 간 이동시간의 단축효과를 누리고 있다. 그러나, 고속철도의 영향을 받지 못하는 비수혜지역의 경우 지역균형발전 저하와 해당지역 주민의 불만이 지속적으로 제기되고 있는 실정이다. 이에, 틸팅열차는 고속철도의 영향을 받지 못하는 비수혜지역의 고속화를 위해 개발되었으며, 기존 선로의 시설물을 최대한 활용하면서 고속서비스를 제공할 수 있어 비용절감에 따른 경제적 효과와 지역 균형발전을 촉진할 수 있다. 또한, 차량의 경량화를 위해 차체의 1차 부재에 샌드위치 복합재를 적용하여, 차체의 무게 감소, 내구성, 내식성의 향상뿐만 아니라 일체성형으로 인한 생산비 절감 및 제조공정 단축 등의 효과도 얻을 수 있다[1,2].

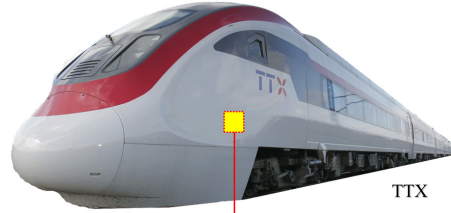
이러한 운행속도의 향상으로 인해 열차충돌 사고에 대비한 구조 설계의 중요성이 커지고 있으며, 유럽의 경우 2000년 이후로 충돌안전도에 대한 규정 적용을 법제화하여 관련 연구가 활발히 진행 중에 있다[3]. 이에, 국내에서도 2007년부터 철도 안전법에 충돌안전기준을 명시하여 개발되는 차량에 대해서는 충돌시뮬레이션을 수행하고 각 기준에 대한 평가를 통해 충돌 안전도를 만족하는 설계가 수행되도록 규정하고 있다.

충돌안전도 평가는 실제차량을 대상으로 하는 실차시험과 유한요소해석을 통한 시뮬레이션으로 구분되며, 실차시험은 실제 상황과 가장 부합되는 결과를 나타낼 수 있으나, 많은 비용과 시간이 소요되므로 경제적이면서 효과적인 결과를 얻을 수 있는 해석적 평가가 주로 수행되고 있다[4]. 특히, 샌드위치 복합재가 적용된 철도차량의 충돌안전도 평가는 국내·외에서 그 연구 사례를 찾아보기 힘들며, 이에 틸팅열차의 샌드위치 복합재 차체 구조물의 구조안전성 검증에 위해 충돌안전도 평가가 반드시 수행되어야 한다.

본 논문은 샌드위치 복합재가 적용된 틸팅열차 차체 구조물의 충돌안전도를 평가하고, 충돌성능 향상방안을 제시하고자 한다. 충돌해석은 상용 외연유한요소 프로그램인 LS-DYNA 3D를 이용하였다. 또한, 충돌해석의 유한요소 모델링과 계산시간 절약을 위해 3차원 모델과 동일한 충돌특성을 나타내는 1차원 등가모델을 개발하였으며, 전체차량 모델에 적용하여 효율성을 향상시켰다. 이때, 충돌조건은 철도안전법에 명시하고 있는 4가지 시나리오에 대해 수행하였으며, 차량의 변형과 복합재 적용부위에 대한 파손 형태를 확인하여 충돌안전기준의 만족여부 평가 및 충돌성능향상 모델을 제시하였다.

2. 틸팅열차의 구성 및 유한요소모델링

2.1 틸팅열차의 구성



Laminate Composite	Sandwich Panels	3/8" Aluminum5052 Honeycomb Core

Fig. 1 Tilting train made of sandwich composites.

틸팅열차는 차량의 경량화를 위해 Fig. 1과 같이 샌드위치 복합재와 적층 복합재를 차체 구성 재료로하여 적용하였으며, 굽힘강성을 향상시키기 위해 샌드위치 복합재 내부에 금속 보강재로 스테인리스 스틸 압출재를 적용하였다. 또한, 언더프레임은 알루미늄 압출재가 적용되어 경량화 효과 및 차량의 강성을 향상시켰다. 틸팅열차의 전체차량은 6량 1편성으로 Mcp-car, M-car, T-car로 각 2량씩 구성되어 있다. Table 1은 차량의 설계중량으로 공차중량, 승객하중 등에 대한 값을 나타낸다.

Table 1 Design weight of tilting train

Items	Weight (kg)	
Standard curb weight	Mcp-car	54,348
	M-car	47,245
	T-car	43,595
Passenger weight	Mcp-car	2,175
	M-car, T-car	4,200
Bogie weight	Mcp-car	9,400
	M-car	9,000
	T-car	7,100
Empty weight	Mcp-car	11,383
	M-car, T-car	9,674

2.2 충돌 유한요소모델링

샌드위치 복합재가 적용된 틸팅열차의 충돌 유한요소모델링을 수행하기 위해 차량에 적용되는 재료 및 충격 흡수장치 등에 대해 선행연구를 수행하였다. 이때, 샌드위치 복합재 패널의 면재는 적층 셀 요소, 심재는 솔리드 요소를 사용하여 실제형상에 가깝게 모사하였다. 하니컴 심재는 형상을 실제로 모델링한다면 가장 이상적인 결과를 도출하지만 해석 시간과 효율성 측면을 고려한 모델링을 하기위해 유효등가손상모델을 적용하였다. 본 샌드위치 복합재 모델링 방법의 적용은 참고문헌(5)와 (6)에서 사전연구를 통해 검증된 모델링 기법이다. 또한, 언더

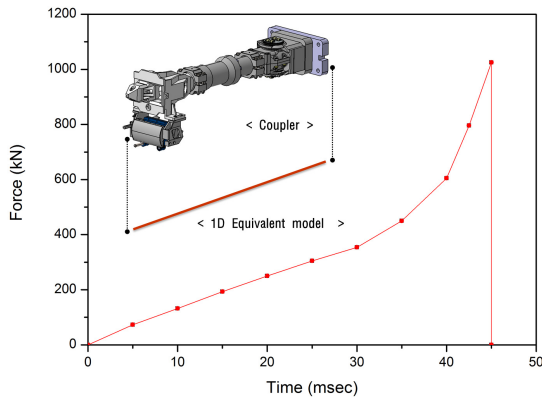


Fig. 2 Dynamic characteristics and 1D equivalent model of coupler.

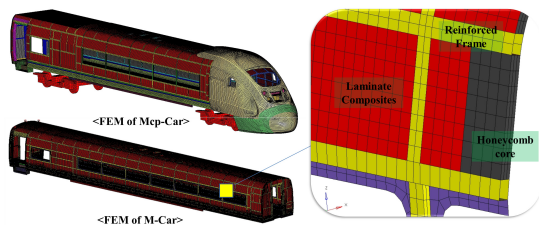


Fig. 3 Finite element models of tilting train.

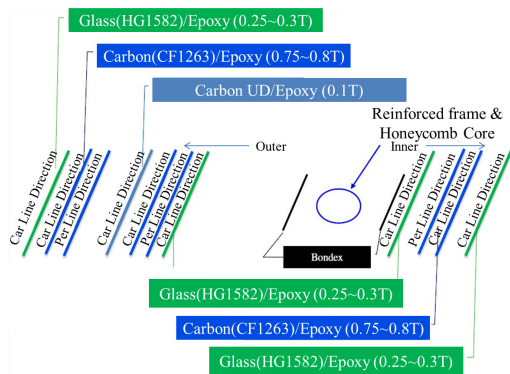


Fig. 4 Composites layered patterns of tilting train.

프레임 및 차체 보강재에 적용된 금속재에 대해서는 쉘 요소를 사용하였다.

차량의 대차부분은 대차의 질량효과를 고려하여 솔리드 요소로 모델링하였으며, 차량과 연결되는 에어스프링은 1차원 스프링-댐퍼 요소를 사용하여 기계적 특성을 모사하였다. 또한, 연결기의 경우 실제형상을 충돌해석에 적용하기에는 형상이 매우 복잡하며, 시험을 통해 얻은 연결기의 충돌 특성을 적용하기 어려운 점이 있다. 이에, 해석시간의 단축 및 충돌 특성의 효과적인 모사가 가능한 단순화된 1차원 등가 모델을 적용하였다.

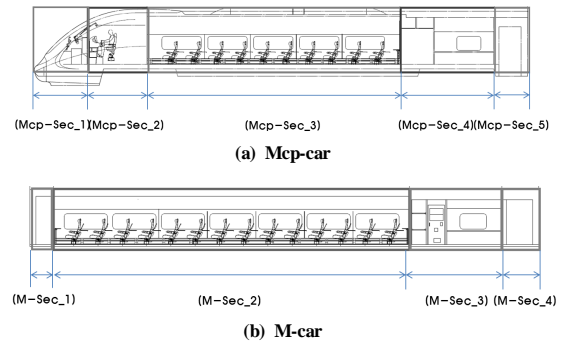


Fig. 5 Definition of cross section plane for tilting train.

Fig. 2는 연결기의 1차원 등가 모델과 압괴 특성그래프를 나타내며, 연결기의 허용하중(1,025kN)을 초과할 경우 자동적으로 끊어짐 현상(Shear-off)이 발생하도록 하였다[7].

Fig. 3은 틸팅열차의 유한요소모델링으로서 Mcp-car와 M-car의 모습을 나타내며, Mcp-car의 총 요소개수는 503,756개, M-car는 402,654개로 구성되었다. Fig. 4는 차체에 적용된 복합재료의 적층정보를 나타내며, 면재로 사용된 적층복합재의 경우 차체의 길이방향을 섬유방향으로 하여 적층을 수행하였다.

2.3 전체차량을 고려한 충돌 유한요소모델링

국내 철도안전법에서는 충돌안전도 평가의 최종 시뮬레이션은 3차원 모델을 사용하도록 명시하고 있다. 하지만 전체차량을 3차원 유한요소모델로 구성하기 위해서는 많은 시간과 노력이 필요할 뿐만 아니라 해석 수행에서도 효율적이지 못하다. 이에, 전체차량에 대한 유한요소모델 평가 시 전방 2~3량(전체 충돌에너지의 90%이상 담당)을 제외한 비교적 충돌영향이 적은 후방차량에 대해서는 1차원 등가 모델링을 적용하고 있는 실정이다. 1차원 등가 모델은 1차원 스프링-질량 모델을 사용함으로써 전체차량의 거동을 신속히 평가할 수 있는 장점이 있다[8].

1차원 등가 모델을 개발하는데 있어 3차원 형상과 동일한 압괴 특성을 갖도록 하기 위해 차체 구조물에 대한 구간별 충돌해석을 수행하여야 한다. 이에, 전방 2량을 고려하여 충돌특성을 구하고자 하는 부분에 단면 옵션(LS-DYNA의 Cross section plane)을 지정하여 하중-변형곡선을 도출해내었다[9]. Fig. 5는 틸팅열차의 압괴특성을 도출할 구간을 나누는 것으로 Mcp-car의 경우 충격흡수구간, 운전자 구간, 승객탑승 구간, 화장실 구간 그리고 출입문 구간으로 총 5개의 구간을 나누었으며, M-car의 경우 차체 후미구간, 승객탑승구간, 화장실 구간 그리고 출입문 구간으로 총 4개의 구간을 나누었다.

Fig. 6은 3차원 모델을 통해 얻은 Mcp-car 승객구간의 압괴특성과 1차원 등가 모델의 압괴특성을 비교한 것으로 일치함을 확인하였다. Fig. 7은 개발된 1차원 등가 모델을 적용한 전체차량의 유한요소모델링으로서 전방 3량에 대해서는

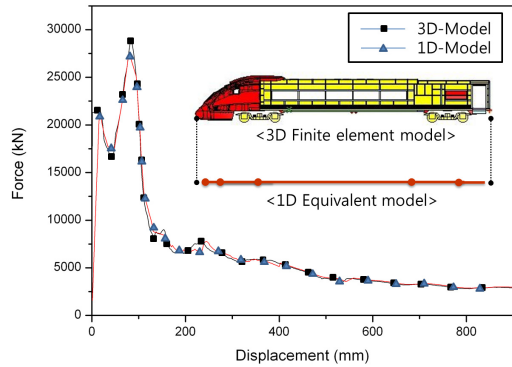


Fig. 6 Force-displacement curves of Mcp-car passenger section.

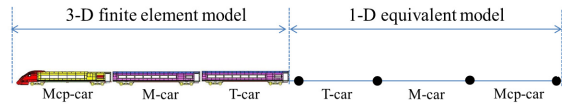


Fig. 7 Full railway vehicle model of tilting train.

3차원 유한요소모델을 적용하였으며, 후방 3량은 1차원 등가 모델을 적용하여 철도안전법의 충돌시나리오에 따라 충돌해석을 수행하였다.

2.4 차체 적용 물성

Table 2는 틸팅열차 차체 구조물에 적용된 적층 복합재 및 하니컴의 물성을 나타낸 것으로, 각 적층 복합재와 알루미늄 하니컴 심재인 코어의 물성은 시험을 통해 얻었다.

Table 2 Material properties of laminate composites and aluminum honeycomb

Properties	HG 1581	CF 1263	CU 125	Aluminum honeycomb	
Density (kg/m ³)	2000	1520	1600	59	
Elastic Modulus (GPa)	E _x	24.60	58.36	130.00	0.693×10 ⁻³
	E _y	24.60	48.42	10.00	0.293×10 ⁻³
	E _z	10.66	10.66	10.00	0.105
Shear modulus (GPa)	G _{xy}	5.84	5.84	4.85	0.618×10 ⁻³
	G _{yz}	3.65	3.65	4.85	0.032
Poisson's ratio	v _{xy}	0.12	0.12	0.31	0.33
	v _{yz}	0.45	0.45	0.34	0.0001
	v _{xz}	0.45	0.45	0.31	0.0001

이때, 적층복합재는 (주)한국화이버에서 생산된 제품이며, 차체의 면재로 사용되었다. HG1581 유리섬유/에폭시는 평직으로 위사와 경사 물성이 동일하며, CF1263 카본/에폭시는 8매 주자직으로 위사와 경사의 물성이 비슷한 경향을 나타낸다. 또한, CU125 카본/에폭시는 일방향(UD) 구조로 일방향 물성이 높게 나타남을 확인하였다.

차량의 차체 보강재로 사용된 스테인리스 스틸과 언더프레임의 알루미늄 압출재는 등방성 재료로서 물성은 Table 3과 같다.

Table 3 Material properties of Aluminum 6063 T6 and STS304

Properties	Aluminum 6063 T6	STS304
Density (kg/m ³)	2,700	7,850
Elastic modulus (GPa)	68.9	200
Poisson's ratio	0.33	0.30
Yield strength (MPa)	215	375

3. 충돌해석

3.1 충돌 시나리오 조건

충돌해석은 철도안전법에 명시하고 있는 충돌안전기준에 따라 해석을 수행하였으며, 틸팅열차는 일반철도 및 고속노선에서 여객 등이 탑승하여 운행하는 제 1종 열차로 총 4가지 시나리오를 고려하였다[10].

Table 4는 각 충돌 시나리오에 대한 시뮬레이션 조건 및 평가기준을 나타낸다.

Table 4 The four scenarios of crashworthiness

Crash Scenario	Crash condition	Velocity & Load	Requirements
Scenario-1	Frontal crash	36 km/h	1. Anti-climbing 2. Safety region
Scenario-2	Huge obstacle crash	110 km/h	3. Crash absorbed energy 4. Crash deceleration
Scenario-3	Small obstacle crash	a-type : 300 kN b-type : 250 kN	Non-plastic deformation of carbody and coupler
Scenario-4	Coupler crash	10 km/h	

3.2 충돌 시나리오-1

충돌 시나리오-1은 동일한 편성의 두 열차가 상대속도 36km/h로 정면충돌하는 조건이다. 이때, 충돌해석의 효율성 향상 및 에너지등가성을 고려하여 강체벽에 18km/h의 속도로 충돌하는 조건으로 수행하였다[11]. 충돌안전기준인 차량 간 타고오름을 평가하기 위해 전체차량 중 전방연결기를 제외한 중간 연결기의 충격력을 확인하여 연결기의 끊어짐 현상의 발생여부를 확인하였다. 해석 결과 첫 번째 차량(Mcp-car)과 두 번째 차량(M-car)사이의 중간연결기에서 최대 1,007kN의 하중이 발생하여 허용하중인 1,025kN보다 적은 값을 나타냈다. 이때, 차량 간 타고오름 현상은 발생하지 않았으나, 허용하중에 가까운 값을 나타냄으로 추후 차량의 견고한 설계를 위해서는 중간연결기의 보강이 필요한 것으로 사료된다.

충돌안전기준에서 제시하는 생존공간은 운전자의 경우 원래길이(길이·높이)의 80% 이상 유지하여야하며, 승객탑승구간은 전체길이의 1% 미만의 변형이 발생해야 한다. Fig. 8은 전두부구간의 시간별 변형 형상을 나타내며, 에너지 흡수구간에서 약 240mm의 변형이 발생하였다.

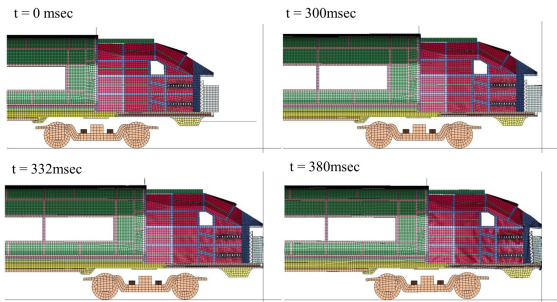


Fig. 8 The deformed shapes of front section for the scenario-1.

그러나, 운전자 구간에서는 변형이 발생하지 않아 생존공간 유지기준을 만족하였으며, 승객탑승구간의 경우 기존길이 12,680mm 중 0.08mm의 변형이 발생하여 전체길이의 1% 미만의 변형기준을 만족하였다.

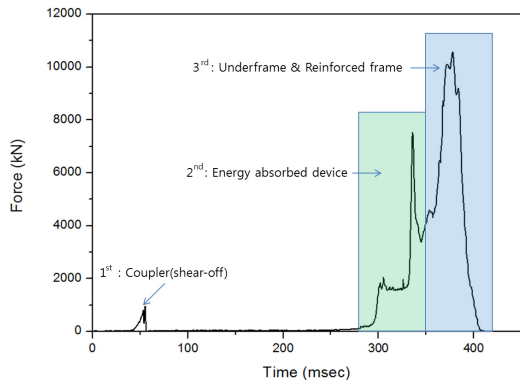


Fig. 9 The force-time curves for the scenario-1.

Fig. 9는 충돌하는 동안의 충격력-시간 그래프로써, 처음 전방연결기에서 충돌하중 발생 후 두 번째로 충돌에너지흡수장치에서 충격력이 발생함을 확인하였다. 이후 언더프레임과 상부 프레임에 충격이 가해져 충돌하중이 점차 증가함을 확인할 수 있었다. 따라서, 틸팅열차의 충격에너지 흡수 구조는 설계의도대로 순차적인 충격에너지가 흡수되었으며, 안전기준에 만족함을 확인하였다.

충돌 감속도는 승객이 내부구조물과 2차로 충돌하는 상해치에 관련된 문제로써 철도안전법에서는 승객탑승공간의 평균 충돌 감속도는 5g 이하, 최대 감속도는 7.5g 이하로 규정

하고 있다. 따라서 틸팅열차의 충돌 감속도를 평가하기 위해 EU의 Furier 40Hz low pass 필터링 방법을 적용하여 충돌 감속도를 평가하였다. 승객구간의 충돌 감속도를 평가한 결과 첫 번째 차량인 Mcp-car에서 최대 감속도는 7.5g이하인 7.27g, 평균 감속도는 5g이하인 3.84g로 철도차량 안전기준에 만족함을 확인하였다.

3.3 충돌 시나리오-2

충돌 시나리오-2는 대형장애품 충돌로 철도 건널목에서 발생할 수 있는 열차와 대형차량의 충돌이다. 대형장애품 충돌은 충돌속도가 높아 전두부에 심각한 손상을 가져오며, 최악에는 탈선사고로 이어질 수 있는 문제가 있다.

국내 철도안전법에서는 자동차를 대표하는 표준 대형장애품을 정의하고 있으며, 이에 따라 대형장애품의 수치모델을 개발하여 충돌 시뮬레이션에 적용하였다.

대형장애품을 적용한 충돌해석결과 타고오름 현상은 첫 번째 차량과 두 번째 차량의 중간연결기에서 허용하중인 1,025kN에 못 미치는 859kN이 발생하여 열차 간 타고오름 현상이 발생하지 않음을 확인하였다.

Fig. 10은 시간에 따른 전두부 구간의 압괴 형상으로 운전자 생존공간 3,000mm중 약 748mm의 변형이 발생함을 확인하였다. 이때, 운전자 생존 공간의 80%이상유지 조건을 만족하지 못하는 75%가 유지되었으며, 전두부 구간에 대한 보강이 필요한 것으로 사료된다.

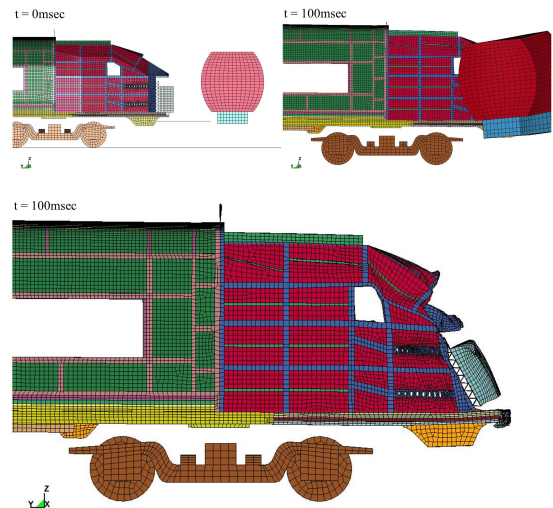


Fig. 10 The deformed shapes of front section for the scenario-2.

대형장애품 충돌에 의해 발생한 충돌에너지흡수는 시나리오-1과 마찬가지로 연결기, 충격흡수장치, 언더프레임과 상부 프레임 순으로 충돌이 발생함을 확인하였다.

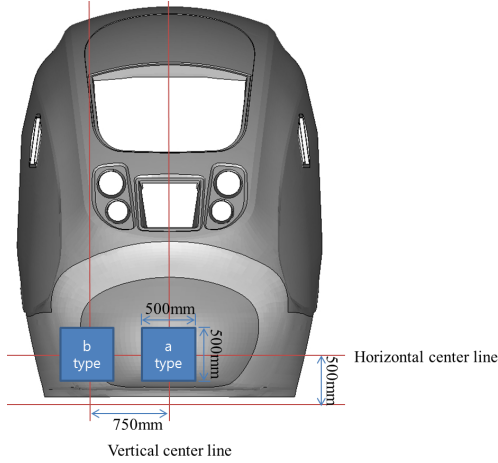


Fig. 11 Load condition for the scenario-3.

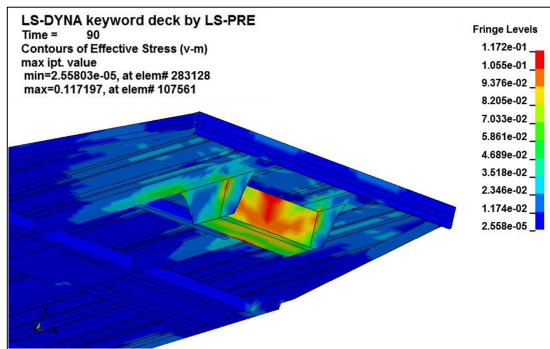


Fig. 12 Von-Mises stress of coupler part for the scenario-4.

충돌 감속도의 평가결과 정면충돌과 다르게 충돌 후에도 차량이 지속적인 진행이 이루어져 비교적 Mcp-car를 제외한 후방 차량은 충돌 감속도 영향이 매우 작게 나타났다. 하지만 대부분의 충돌 에너지가 전달된 Mcp-car의 경우 최대 감속도 기준인 7.5g 이상인 7.88g가 발생함을 확인하였다.

현재 톨팅열차의 충격흡수장치로는 샌드위치 하니컴 장치가 있지만 고속으로 충돌하는 시나리오-2에서는 충격 흡수 역할이 미비하며, 대형장애물의 특성상 언더프레임 보다 상부에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서, 전두부 구간의 상부 프레임에 대한 보강을 수행해야 하며, 충격에너지를 흡수하기 위한 팽창튜브의 설치나 연결기에 대한 보강이 추가적으로 이루어져야 한다.

3.4 충돌 시나리오-3

충돌 시나리오-3은 소형장애물충돌로서 장애물제거기에 정적 하중을 가해 차체와 연결 장치에서 소성변형의 발생여부를 판단해야 한다. 이때, 정적하중해석은 ANSYS V13.0을 이용하여 해

석을 수행하였으며, 차체의 연결 장치 부분의 응력결과를 확인하여 소성변형의 발생여부를 확인하였다. 시나리오-3의 하중조건은 a-type(300kN)과 b-type(250kN)으로 구분되며, 해석의 효율성을 위해 Mcp-car의 전두부 구간만을 고려하여 해석을 수행하였다. Fig. 11은 충돌 시나리오-3의 하중조건을 나타낸다.

a-type의 해석결과 소형장애물제거기의 지지프레임에서 최대 변형이 3.51mm가 발생하였으며, 최대 Von-Mises 응력은 182MPa이 발생하였다. b-type의 경우 최대 변형이 4.50mm가 발생하였으며, 최대 Von-Mises 응력은 194MPa이 발생하였다. 이때, a-type에 비해 b-type의 결과가 더 높게 나타났는데, 이는 하중적용 위치에 따라 b-type의 하중이 한쪽의 연결장치에 대부분 전달되었기 때문이다. 하지만, a-type과 b-type 모두 차체의 재료인 알루미늄 항복강도(215MPa) 보다 낮은 응력이 발생하여 충돌 시나리오-3의 안전기준에 만족함을 확인하였다.

3.5 충돌 시나리오-4

충돌 시나리오-4는 차량과 차량이 연결할 때 발생하는 연결기 충돌로서 동일한 편성의 두열차가 상대속도 10km/h로 충돌하는 조건이다. 이때, 에너지의 증가성을 고려하여 강제 벽에 5km/h의 속도로 충돌해석을 수행하였다. 전방연결기의 최대 충격력 결과 허용하중(1,025kN)을 초과하지 않는 829kN이 발생하여 연결기의 끊어짐이 발생하지 않음을 확인하였다.

Fig. 12는 연결기가 장착되는 센터실 부분의 응력 결과로서 알루미늄의 항복강도(215MPa)보다 작은 117MPa이 발생하여 충돌 시나리오-4의 안전기준을 만족하였다.

4. 톨팅열차의 충돌특성 향상방안 제시

4.1 전두부 상부 프레임 보강

충돌 시나리오-2의 결과 운전자의 생존공간 유지와 충돌 감속도 기준에 만족하지 못하였으며, 이에 첫 번째로 전두부 상부 프레임의 보강방안을 제시하여 시나리오-2 기준의 만족 여부를 확인하였다. 상부 프레임의 보강은 Fig. 13과 같이 기존 3mm에서 5mm로 프레임의 두께를 변경하였다.

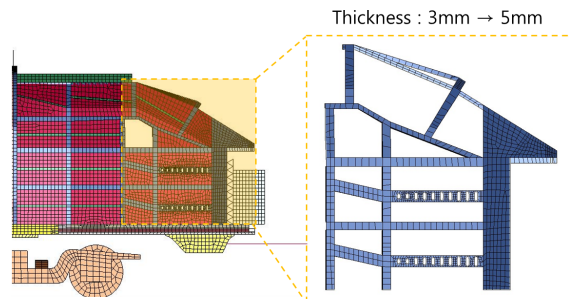


Fig. 13 The cabmask with reinforced frames.

충돌해석결과 Fig. 14와 같이 운전자 생존공간의 안전기준인 80%이상 유지조건에 만족하는 92%가 유지되었다. 또한, 승객탑승구간의 최대 감속도는 7.33g, 평균 감속도는 3.98g가 발생하여 충돌안전기준에 만족함을 확인하였다. 하지만, 스틸프레임의 두께 변경으로 인해 차량의 무게는 약 283kg이 증가함을 확인하였다. 이는 추후 프레임 두께 최적화 설계 등을 수행하여 무게 절감방안을 고려해야 한다.

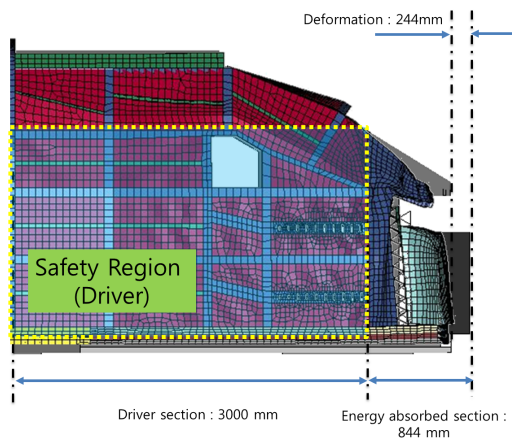


Fig. 14 The deformation of front section for the scenario-2.

4.2 전두부 적층복합재 커버 보강

두 번째 충돌특성 향상방안은 전두부에 적용된 적층복합재의 두께를 증가시켜 강성을 보강하는 방안이다. 이때, 커버에 적용된 적층복합재는 CF1263 카본/에폭시를 차체의 길이 방향을 섬유방향으로 하여 적층을 수행하였으며, 기존 5mm에서 7mm의 두께증가를 제시하여 시나리오-2에 대한 해석을 수행하였다. 해석결과 운전자 생존공간의 안전기준인 80%이상 유지조건을 만족하지 못하는 77%가 유지되었으며, 무게는 약 139kg이 증가하였다.

따라서, 전두부 적층복합재의 두께증가보다는 다소 무게의 증가가 있더라도 전두부 프레임의 보강방안이 충돌특성 향상에 더욱 더 효과적임을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 틸팅열차 샌드위치 복합재 차체 구조물의 충돌안전도 평가 및 향상방안을 제시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 샌드위치 복합재가 적용된 틸팅열차의 충돌안전도 평가를 위해 전체차량에 대한 충돌해석 모델을 개발하였으며, 철도안전법을 적용한 충돌안전도 평가를 수행하였다.

이때, 3차원 모델과 동등한 충돌특성을 나타내는 1차원 등가 모델을 개발하여 계산시간의 절약 및 효율적인 해석수행을 하였다.

- 2) 충돌 시나리오-1의 해석결과 평가기준인 타고오름방지, 운전자 및 승객의 생존공간유지, 에너지 분산 흡수, 충돌 감속도를 만족하였으며, 충돌 시나리오-3, 4의 경우 차체에 어떠한 소성변형도 발생하지 않아 평가기준을 만족하였다.
- 3) 충돌 시나리오-2의 해석결과 타고오름방지와 에너지 분산 흡수는 평가기준을 만족하였지만, 운전자 생존공간과 충돌 감속도는 평가기준을 만족하지 못하였다. 이에, 충돌특성 향상방안으로 전두부 상부프레임의 두께 변경을 통해 충돌안전기준을 만족하는 모델을 제시하였다. 다만, 두께증가로 인해 차체 무게가 증가하였지만, 프레임의 두께 최적화 설계 등을 수행하여 무게절감 방안을 고려할 필요가 있다.
- 4) 본 연구를 통해 복합재가 적용된 철도차량에 대한 충돌해석 기법을 확립하였으며, 추후 복합재가 적용된 구조물을 개발하는데 있어 기초 데이터로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 논문은 한국철도기술연구원의 한국형 틸팅열차 신뢰성 평가 및 운용기술 개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) Shin, K.B., Koo, D.H., hahn, S.H., and Park, K.J., "A Study on Material Selection of the Carbody Structure of Korean Tilting Train express(TTX) through the Verification of Design Requirements," *The Korean Society for Railway*, Vol. 7, No. 2, 2004 pp. 77-84.
- 2) Seo, S.I., Mun, H.S., and Eum, K.Y., "A Study on the Construction of Reliability Centered Maintenance System for Korean Tilting Train," *The Korean Society for Railway*, Vol. 10, No. 5, 2007, pp. 520-526.
- 3) David, T., "Passenger Rail Train-to-Train Impact Test Volume I : Overview and Selected Results," Final Report, DOT/FRA/ORD, 2003.
- 4) Shin, K.B., Ko, H.Y., and Cho, S.H., "A Study on Crashworthiness and Rollover Characteristics of Low-Floor Bus made of Honeycomb Sandwich Composites," *Journal of The Korean Society for Composite Materials*, Vol. 21, No. 1, 2008, pp. 22-29.

- 5) Lee, J.Y., Shin, K.B., and Jeong, J.C., "Simulation of Low Velocity Impact of Honeycomb Sandwich Composite Panels for The Bimodal Tram Application," *Journal of The Korean Society for Composite Materials*, Vol. 20, No. 4, 2007, pp. 42-50.
- 6) Jang, H.J., Shin, K.B., Ko, H.Y., and Ko, T.H., "A Study on the Standardized Finite Element Models for Carbody Structures of Railway Vehicle Made of Sandwich Composites," *The Korean Society for Railway*, Vol. 13, No. 4, 2010 pp. 357-469.
- 7) Lee, H.C., and Koo, J.S., "Crashworthiness Analysis of the Urban Maglev Vehicle according to Korean Railway Safety Law and Urban Transit Safety Law," *The Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 17, No. 5, 2009, pp. 1-139.
- 8) Ujita, Y., Funatsu, K., and Suzudi, Y., "Crashworthiness Investigation of Railway Carriage," *Q. R. of RTRI*, Vol. 44, No. 1, 2003, pp. 28-33.
- 9) Park, M.Y., Park, Y.I., and Jeong, J.S., "Equivalent Modeling Technique for 1-D Collision Dynamics Using 3-D Finite Element Analysis of Rollingstock," *The Korean Society for Railway*, Vol. 13, No. 2, 2010, pp. 131-250.
- 10) MOCT Ordinance 455 (2007) : Regulations on the Railway Safety Criterion of Rolling Stock.
- 11) Kim, G.Y., Cho, H.J., and Koo, J.S., "A Study on Conceptual Design for Crashworthiness of the Next Generation High-speed EMU," *The Korean Society for Railway*, Vol. 11, No. 3, 2008 pp. 211-353.