

## 論文

샌드위치 복합재 적용 자동무인경전철 차체 구조물의  
구조 안전성 및 충돌 특성 평가 연구고희영\*, 신광복<sup>\*\*+</sup>, 조세현<sup>\*\*\*</sup>, 김대환<sup>\*\*\*</sup>An Evaluation of Structural Integrity and Crashworthiness of  
Automatic Guideway Transit(AGT) Vehicle made of Sandwich CompositesHee-Young Ko\*, Kwang-Bok Shin<sup>\*\*+</sup>, Se-Hyun Cho<sup>\*\*\*</sup>, Dea-Hwan Kim<sup>\*\*\*</sup>

## ABSTRACT

This paper describes the results of structural integrity and crashworthiness of Automatic Guideway Transit(AGT) vehicle made of sandwich composites. The applied sandwich composite of vehicle structure was composed of aluminum honeycomb core and WR580/NF4000 glass fabric/epoxy laminate composite facesheet. Material testing was conducted to determine the input parameters for the composite facesheet model, and the effective equivalent damage model for the orthotropic honeycomb core material. The finite element analysis using ANSYS v11.0 was done to evaluate structural integrity of AGT vehicle according to JIS E 7105 and ASCE 21-98. Crashworthiness analysis was carried out using explicit finite element code LS-DYNA3D with the lapse of time. The crash condition was frontal accident with speed of 10km/h at rigid wall. The results showed that the structural integrity and crashworthiness of AGT vehicle were proven under the specified loading and crash conditions. Also, the modified Chang-Chang failure criterion was recommended to evaluate the failure modes of composite structures after crashworthiness event.

## 초 록

본 논문은 샌드위치 복합재가 적용된 자동무인경전철 차체 구조물의 구조 안전성 및 충돌 안전성 결과에 대해 서술하고 있다. 차체 구조물에 적용된 샌드위치 복합재는 알루미늄 하니컴 심재와 WR580/NF4000 유리섬유/에폭시 적층 복합재 면재로 이루어져 있다. 차체 구조물에 적용되는 적층 복합재 면재에 대해 기계적 시험을 통하여 물성을 획득하였고, 직교 이방성 특성을 갖는 하니컴 심재의 물성은 유효등가손상모델을 적용하였다. ANSYS v11.0을 이용한 유한요소 해석은 JIS E 7105 기준과 ASCE 21-98 기준에 따라서 자동무인경전철 차체의 구조 안전성을 평가하였다. 충돌해석은 외연유한요소 해석 프로그램인 LS-DYNA3D를 이용하였다. 충돌 조건은 강체벽에 10km/h의 속도로 정면충돌 사고를 모사하였다. 또한, 수정된 Chang-Chang 파손기준식은 충돌 후 복합재 구조물의 파손 모드를 평가하는데 추천된다.

**Key Words** : 샌드위치 복합재(sandwich composite), 구조 안전성(structure integrity), 충돌해석(crashworthiness analysis), 유효 등가손상모델(effective equivalent damage model)

\* 한밭대학교 기계설계공학과, 경량구조 및 CAE 실험실

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

\*\*\* 한국화이버(주) 차량사업부

## 1. 서론

최근 세계 각국의 주요 도시에서는 빠른 도시화로 인해 도시 교통의 편리성이 긴급하게 요구되고 있으며, 또한 교통체증과 환경오염 등과 같은 환경부하의 축소에 관해서 국제적인 논점으로 부각되고 있다. 따라서 이러한 국가들은 현재 교통수단이 가지는 단점들을 보완하기 위해 새로운 운송 시스템인 자동무인교통 시스템을 지하철과 같은 철도 산업에의 적용을 고안하고 있다[1]. 선진국에서 많이 운행되고 있는 자동무인경전철 시스템은 다른 교통수단에 비하여 정시성, 신속성 및 환경친화성 등의 우수한 장점이 있고, 완전 무인으로 운행이 가능하므로 기존의 철도차량에 비하여 운영비가 저렴하다. 또한 기존의 지하철에 비하여 건설비가 저렴하기 때문에 수송수요가 중간 규모인 대도시의 외곽지역에 적용하기가 적합한 교통수단이다[2].

현재 (주)한국화이바와 일본의 모기업에서 공동으로 연구개발 중인 자동무인경전철은 향후 미국에서 운행 될 예정이며, 경량화 및 에너지 효율의 극대화를 얻기 위해 차체 구조물에 복합재 샌드위치 패널을 적용하였다. 일반적으로 샌드위치 복합재는 단일 부재로 된 금속재에 비해 굽힘 강성이 높고 피로 수명이 길며 부식 저항성, 단열성, 음향 차폐성이 우수하여 항공기와 선박 등에 널리 적용되어 왔다. 여기에 심재는 비중이 낮아 구조물의 경량화에 기여하며 외부에서 작용하는 하중에 의한 변형 에너지를 흡수한다. 또한, 면재는 비강성과 비강도가 높은 복합재 등을 사용하여 하중지지능력을 향상시키고 좌굴의 발생을 억제 시켜주는 역할을 한다[3]. 차륜은 기존 바닥의 철궤도면에 의한 방식이 아니라 양면의 유도 레일을 따라 운행되는 고무차륜을 사용하였다.

본 논문에서는 JIS E 7105 기준과 ASCE 21-98 기준에 따라 ANSYS를 이용한 구조해석을 통해 자동무인경전철 차체 구조물의 구조 안전성 평가를 수행하였으며, 또한 차량이 운행하는 도중 시스템 오류로 인하여 차량과 차량이 서로 충돌하게 되는 시나리오에 대하여 외연유한요소 프로그램인 LS-DYNA3D를 사용하여 충돌로 인한 차량의 변형과 복합재 적용 부위에 대한 파손 형태를 확인하였다. 이때 차량의 충돌 속도는 제작사의 요구에 따라 10km/h를 적용하였다.

## 2. 자동무인경전철 차체 구조물의 구성 및 유한요소 모델링

### 2.1 자동무인경전철의 구성

자동무인경전철은 속도 및 에너지 효율, 유지보수 비용 절감 등을 위해 Fig. 1과 같이 샌드위치 복합재와 적층 복합재를 차체 구성 재료로 선정하여 적용시켰다. 또한, 샌드위치 복합재 패널 내부에는 금속 보강재 보(reinforced beam)를 삽입하여 굽힘 강성을 향상시켰다. Table 1은 차체에 적용된 샌드

위치 패널과 적층 복합재, 보강 프레임에 대한 구성 재료를 나타낸 것이다. 이때, 샌드위치 패널의 면재는 유리섬유/에폭시 적층판으로 외부 면재 두께는 3mm, 내부 면재 두께는 2.5mm로 선정되었다. 또한 심재로는 알루미늄 5052 3/8" 재질의 하니컴 코어로서 두께 35mm가 적용되었다. 곡률이 심해 샌드위치 패널로 제작이 어려운 부위는 유리섬유/에폭시 적층 복합재를 적용하였으며, 두께는 5mm로 하였다. 차체의 프레임은 스테인레스 스틸이 적용되었다.

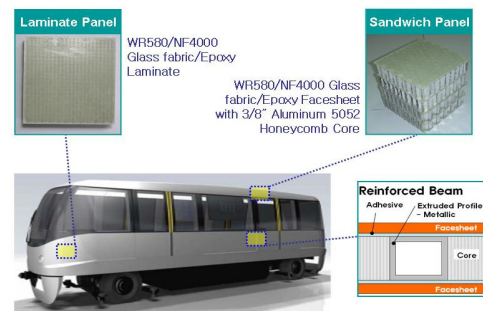


Fig. 1 Manufacturing concept of AGT.

Table 1 The materials used to AGT vehicle structures

Part		Material
Sandwich Panel	Facesheet	WR580/NF4000 Glass fabric/epoxy
	Core	Aluminum 5052 honeycomb (3/8"-5052-0.0025")
Laminate		WR580/NF4000 Glass fabric/epoxy
Reinforced Beam	Carbody frame	Stainless steel SS400 Extrusion profile
	Under frame	Stainless steel SMA490B Extrusion profile

Table 2는 자동무인경전철의 주요 설계 사양을 나타낸 것으로 차량의 길이 및 공차 중량, 승객 하중에 대한 값을 보여준다.

Table 2 The materials used to AGT vehicle structures

Items	Value
Length on centerline without couplers (mm)	12,000
Width (mm)	2,850
Height (mm)	3,680
Bogie distance (mm)	7,200
Wheel gauge (mm)	2,000
Empty weight (ton)	14.8
Passenger weight (ton)	7.3 (73kg×100passengers)

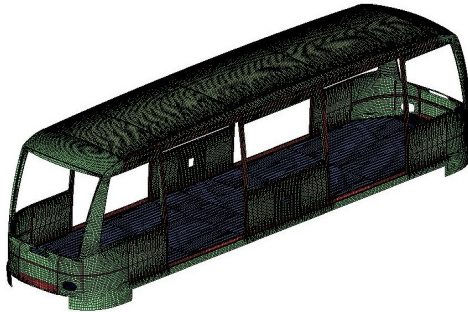


Fig. 2 Implicit finite element model of structure analysis.

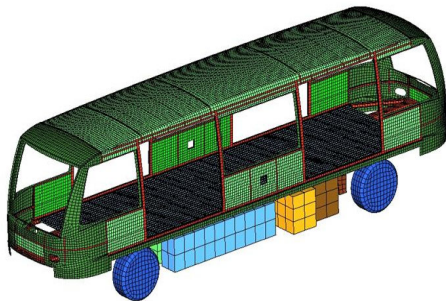


Fig. 3 Explicit finite element model of crashworthiness analysis.

## 2.2 유한요소 모델링

구조해석 및 충돌해석에 사용된 유한요소 모델링은 쉘 요소(shell element)를 사용하여 샌드위치 패널의 면재와 적층 복합재, 그리고 프레임 압출재를 모델링하였다. 또한 솔리드 요소(solid element)를 사용하여 샌드위치 패널의 심재와 대차 프레임, 차륜, 그리고 바닥재 프레임에 연결되는 각 부품들을 모사하여 모델링하였다. 이때, 샌드위치 패널의 하니컴 심재는 직교 이방성 성질을 갖는 유효등가손상모델(effective equivalent damage model)을 모사하여 적용하였다. 심재인 하니컴 형상을 실제로 모델링한다면 가장 이상적인 결과를 도출하지만 해석 시간과 효율성 측면을 고려한 모델링을 하기위해 유효등가손상모델을 적용하였고, 이는 선행 연구를 통하여 오차 범위가 작은 것을 확인하였다[4-5].

Fig. 2는 구조해석에 사용된 자동무인경전철의 유한요소 모델링을 보여준다. 이때 사용된 요소는 2차원 쉘 요소가 236,120개, 3차원 솔리드 요소가 102,408개였다. 4-노드 쉘 63 요소는 금속 프레임 압출재를 모사하기 위해 사용되었으며, 4-노드 적층 쉘 181 요소는 샌드위치 패널의 면재와 적층 복합재를 모사하기 위해 적용되었다. 또한 솔리드 45 요소를 사용하여 샌드위치 패널의 하니컴 심재의 유효등가손상모델에 적용하였다.

Table 3 Material properties of WR580/NF4000 glass fabric laminate

Properties	Value
Density ( $\text{kg/m}^3$ )	1,830
Young's modulus - Fill direction (GPa)	22.64
Young's modulus - Warp direction (GPa)	22.33
Poisson's ratio between fill and warp	0.148
Shear modulus, $G_{xy}$ (GPa)	5.85
Shear modulus, $G_{yz}$ (GPa)	1.40
Shear modulus, $G_{xz}$ (GPa)	1.40
Compressive strength - Fill direction (MPa)	337.19
Compressive strength - Warp direction (MPa)	321.85
Tensile strength - Fill direction (MPa)	371.15
Tensile strength - Warp direction (MPa)	383.10
Shear strength (MPa)	75.01

Fig. 3은 충돌해석에 사용된 유한요소 모델링을 보여준다. 이때 사용된 요소는 1차원 선 요소(line element)가 589개, 2차원 쉘 요소가 69,830개, 3차원 솔리드 요소가 26,732개를 갖는다. 충돌 해석 모델은 해석시간을 고려하여 구조해석보다 적은 요소 수를 갖게 하였으며, 하부 프레임에 고정되는 모터 및 에어킨 등의 부품들을 모델링하여 각 부분에 대한 무게가 충돌 시 주는 영향을 고려하였다. 또한 서로 다른 프레임 사이에 용접되는 부분은 용접요소(spotweld)를 사용하여 고정시켜 주었고, 각 요소들 간에 접촉 조건(single surface contact)을 부여하여 충돌 시 서로 침투하는 것을 방지하였다. 또한 지면으로 부터의 충격을 흡수해주는 공기 스프링(air spring)은 특성 곡선을 적용한 스프링 요소를 사용하여 모사하였다.

## 2.3 차체 적용 물성

Table 3은 차체 구조물의 샌드위치 패널 면재와 적층 복합재에 적용된 WR580/NF4000 유리섬유/에폭시에 대한 물성을 보여준다.

Fig. 4는 압축 시험을 통해 얻은 알루미늄 하니컴 코어의 두께 방향(z-direction)에 대한 응력-변형률 곡선을 보여주며, Fig. 5는 전단 시험을 통해 얻은 알루미늄 하니컴 코어의 리본 및 두께 방향(xz-plane)에 대한 응력-변형률 곡선을 보여준다. 이때, 충돌 해석 간 하니컴 코어의 변형률 속도(strain rate effect)에 의한 영향은 고려하지 않았으며, 향후 이에 대한 연구를 수행할 예정이다.

Table 4와 5는 차체 구조물의 상부 프레임과 언더 프레임에 적용된 스테인레스 스틸의 물성을 각각 나타낸다.

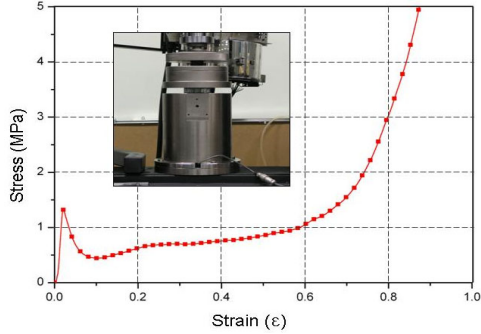


Fig. 4 The stress-strain curve for compression of honeycomb core (z-direction).

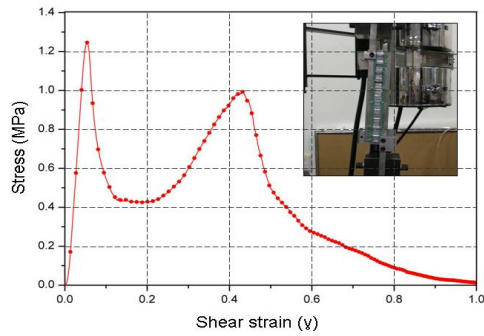


Fig. 5 The stress-strain curve for shear of honeycomb core (xz-plane).

Table 4 Material properties of SUS400

Properties	Value
Density (kg/m <sup>3</sup> )	7,900
Elastic modulus (GPa)	210
Poisson's ratio	0.3
Yield stress (MPa)	250

Table 5 Material properties of SMA490B

Properties	Value
Density (kg/m <sup>3</sup> )	7,900
Elastic modulus (GPa)	210
Poisson's ratio	0.3
Yield stress (MPa)	365

구조해석에서의 복합재 구조물의 파손유무는 ANSYS v11.0에서 제공하는 층간 접근방법 파손 기준식 중 하나인 Tsai-Wu 파손 기준식을 사용하여 평가하였다[6].

충돌 해석에서는 LS-DYNA3D v971에서 제공하는 \*MAT\_54 Enhanced composite damage 물성카드를 적용하여 복합재의 파손 모드를 확인하였다. 이 물성카드를 Matzenmiller가 Chang-Chang

파손 기준식과 Tsai-Wu 파손 기준식을 수정하여 제안한 수정된 Chang-Chang 파손 기준식 모델로서 평판 이론을 기초로 면내/외 응력성분에 의한 섬유와 기지재료의 파손 모드를 제공한다. 식 (1)~(5)는 수정된 Chang-Chang 파손 기준식 모델로서 차체 충돌 시 복합재 적층판에 발생할 수 있는 섬유와 기지재료의 파손을 확인할 수 있도록 하였다[7-9].

이때, 사용된 파손 기준식은 다음과 같으며 섬유 및 모재에 대한 인장과 압축, 그리고 전단에 의한 파손 모드를 갖는다.

$x$ 방향 인장파손모드( $\sigma_x > 0$ ) 일때,

$$e_{ft}^2 = \left( \frac{\sigma_x}{X_t} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{xy}}{S} \right)^2 - 1 \quad (1)$$

$x$ 방향 압축파손모드( $\sigma_x < 0$ ) 일때,

$$e_{fc}^2 = \left( \frac{\sigma_x}{X_c} \right)^2 - 1 \quad (2)$$

$y$ 방향 인장파손모드( $\sigma_y > 0$ ) 일때,

$$e_{mt}^2 = \left( \frac{\sigma_y}{Y_t} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{xy}}{S} \right)^2 - 1 \quad (3)$$

$y$ 방향 압축파손모드( $\sigma_y < 0$ ) 일때,

$$e_{mc}^2 = \left( \frac{\sigma_y}{Y_c} \right)^2 + \left[ \left( \frac{Y_c}{2S_c} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_y}{Y_c} + \left( \frac{\tau_{xy}}{S} \right)^2 - 1 \quad (4)$$

전단파손모드( $xy$ 평면) 일때,

$$e_{md}^2 = \frac{\sigma_y^2}{Y_c Y_t} + \left( \frac{\tau_{xy}}{S} \right)^2 + \frac{(Y_c - Y_t)\sigma_y}{Y_c Y_t} - 1 \quad (5)$$

여기서,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ 는 주재료 방향 내에서의 응력성분을 나타내며,  $X_t$ ,  $Y_t$ 는 섬유방향과 섬유직각방향의 인장강도,  $X_c$ ,  $Y_c$ 는 섬유방향과 섬유직각방향의 압축강도,  $S$ 는  $xy$ 평면내의 전단강도,  $e$ 는 파손지수(failure index)를 나타낸다.

### 3. 구조해석

#### 3.1 경계 및 하중조건

Fig. 6는 JIS E 7105 기준과 ASCE 21-98 기준에 따른 하중 및 경계 조건을 나타낸다. 이 두 가지 기준은 국내/외 철도차량 제작에 있어 차체의 구조 안전성 평가를 위해 사용되고 있으며, 이를 구조 해석에 적용하여 설계 단계에서 구조 안전성을 평가하게 된다. 먼저 JIS E 7105 기준에 의한 수직 하중의 경우 공기 스프링 위치에 대해  $x$ ,  $z$ 방향을 구속시키고

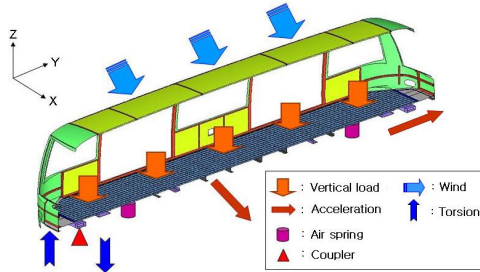


Fig. 6 The boundary and load conditions according to JIS E 7105 and ASCE 21-98.

y방향에 대해서는 연결기가 위치하는 곳을 구속하였다. 하중의 크기는 승객 하중을 고려한 등분포 하중을 언더 프레임 상면에 부가하였다. 비틀림 하중의 경우 차체의 한쪽 공기스프링 위치를 완전고정하고 반대쪽은 차체 언더프레임 중심과 차체 볼스터 중심선이 만나는 점에 대해 x, z방향만 구속하였다. 하중의 크기는 40 kN-m의 비틀림 토크를 부여하였다[10]. 또한 ASCE 21-98 기준에 의해 곡선부 주행 시 받는 가속도와, 바람의 영향을 고려한 곡선부 주행 시 받는 가속도, 경사각 그리고 차량 진행 방향으로 받는 가속도를 고려한 구조해석 또한 수행하였다. 이때, 각 해석의 구속조건은 공기스프링 위치에 대해 x, z 방향을 구속 시키고 y방향에 대해서는 연결기가 위치하는 곳을 구속하였다. 하중조건에서 가속도는 차체 구조물에 대해 각 방향에 따라 적용하였으며, 바람에 의한 하중은 차체 측면에 분포하중으로 적용하였다[11].

Table 6은 차체 구조물의 구조 안전성 평가에 대한 설계 요구 조건을 나타낸다. 이때, 금속재 프레임의 경우 Von-Mises 응력과 항복응력을 비교하여 평가하고, 복합재 적용 부분은 Tsai-Wu 파손 지수 값이 1을 기준으로 선정하여 평가하였다.

Table 6 Design requirements of AGT structures

Type		Requirements	
Metal structure	Von-Mises stress (MPa)	Carbody frame	< 250 MPa
		Under frame	< 365 MPa
Composite Structure	Tsai-Wu failure index	Failure index < 1	

### 3.2 구조해석 결과

자동무인경전철 차체 구조물에 대한 구조 해석 결과는 Table 7에 정리하였으며, 모든 하중 조건에 대해 금속재 구조물의 최대 응력 값은 언더프레임에서 발생하였다. 먼저 JIS E 7105 기준에 의한 수직하중에 대한 해석 결과는 Von-Mises 응력이 언더프레임에서 항복점 이하로 나타났고, Tsai-Wu 파손 지수는 1을 넘지 않았다. 비틀림 하중에 대한 해석 결과 역시 Von-Mises 응력이 언더프레임에서 항복점 이하로 나타났고, Tsai-Wu 파손 지수 역시 1을 넘지 않았다.

ASCE 기준에 의한 해석 결과 중 곡선부 주행 시 받는 가속도와 바람의 영향을 함께 고려한 해석 결과는 Von-Mises 응력이 언더프레임에서 항복점 이하로 발생하였고, Tsai-Wu 파손지수는 1을 넘지 않았다. 차량의 진행방향에 받는 가속도에 의한 해석 결과 역시 Von-Mises 응력이 언더프레임에서 항복점 이하로 나타났고, Tsai-Wu 파손지수 역시 1을 넘지 않았다.

논문에는 결과를 명시하지 않았지만, 주어진 하중조건에서 구조물의 최대 처짐과 고유진동수(1st 모드 > 10Hz)에 대한 결과 역시 기준을 만족하였다.

Fig. 7은 JIS E 7105 기준에 의한 수직 하중에 의한 Von-Mises 응력 분포를 나타낸 것이고, Fig. 8은 ASCE 21-98 기준에 의한 곡선부 주행 시 받는 가속도와 바람에 의한 Von-Mises 응력 분포를 나타낸 것이다.

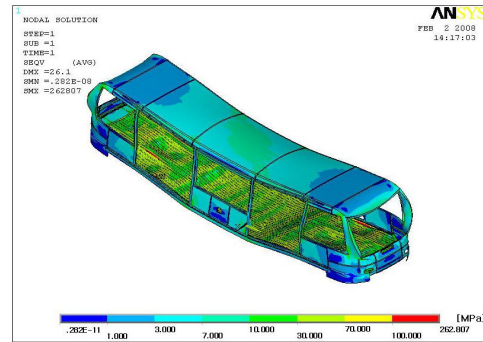


Fig. 7 The contours of Von-Mises stress(MPa) of vertical load.

Table 7 Results of structural analysis using JIS E 7105 and ASCE 21-98

Type		Metal structure (Von-Mises stress, MPa)	Composite structure (Tsai-Wu failure index)	State
JIS E 7105	Vertical load	262.81	0.10	Safe
	Twisting load	106.81	0.65	Safe
ASCE 21-98	Lateral load	95.88	0.01	Safe
	Lateral load with wind	239.88	0.05	Safe
	Lateral load with wind and slope	198.91	0.03	Safe
	Longitudinal load	105.02	0.01	Safe



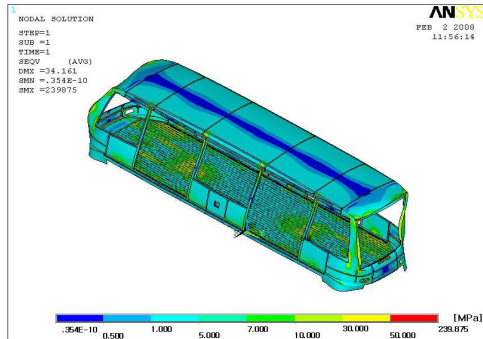


Fig. 8 The contours of Von-Mises stress(MPa) of lateral load with wind.

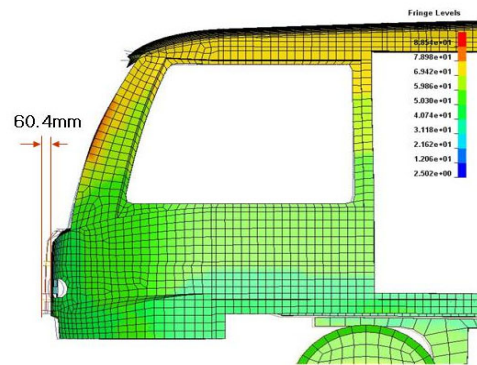


Fig. 10 Maximum deformation for crashworthiness event.

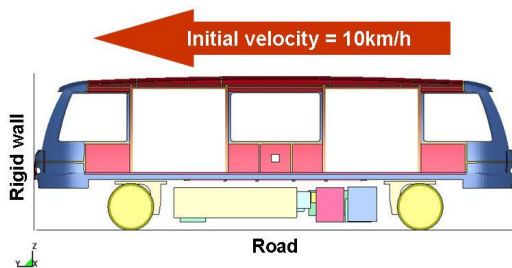


Fig. 9 The initial condition of crashworthiness analysis.

#### 4. 충돌해석

##### 4.1 충돌 시나리오

정면충돌 해석을 위한 경계 조건은 Fig. 9에 보듯이 차체가 강체 벽과 매우 근접하게 위치된 상태에서 초기 속도인 10km/h (2.778m/s)를 부여하고 해석을 수행하였다.

이때 충돌 속도는 제작사에서 요구하는 조건으로서 차량 운행 시 시스템 오류로 인해 10km/h의 속도로 충돌하는 조건을 고려하였다. 차체와 강체벽 사이는 면 대 면 접촉(surface to surface contact)조건을 부여하였고, 마찰계수를 적용하여 접촉 후 강체 벽으로 부터 차체가 미끄러지는 현상을 구속해 주었다. 차체의 타이어 부분과 지면 부분 또한 면 대 면 접촉(surface to surface contact)조건을 부여하여 높이 방향에 대해 구속하였다.

##### 4.2 충돌해석 결과

정면충돌 해석을 통하여 충돌 후 프레임의 변형과 적층 복합재의 파손을 확인하였다. 이때 충돌 시간은 100msec로 하여 차체가 강체 벽과 충돌 후 다시 떨어질 때까지 확인하였다.

Fig. 10은 충돌시간에 대한 차체의 전두부 변형을 보여주는 것으로 37msec에서 충돌 방향의 속도가 0이 되며 최대변형이

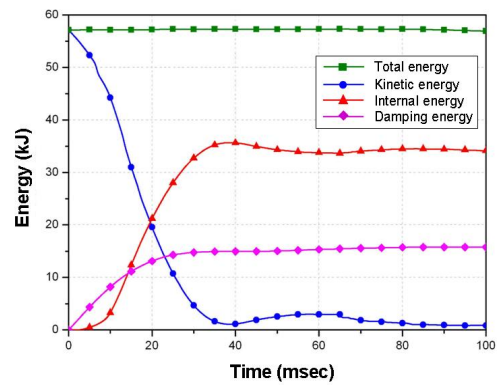


Fig. 11 Energy history curves of crashworthiness simulation.

60.4mm 일어났다. 이때, 최대변형은 제작사에서 요구하는 65mm보다 작아 설계 요구조건을 만족하였다.

Fig. 11은 정면충돌 시 운동에너지와 내부에너지 변화를 나타내었다. 충돌이 발생한 이후 운동에너지는 감소하고 내부에너지는 증가하여 40msec까지 에너지의 교환이 이루어지고 있음을 확인할 수 있다. 또한 충돌 전 차체의 운동에너지는 57.12kJ임을 확인하였고, 충돌 후 차체의 변형에 의해 생기는 내부에너지는 35.69kJ까지 증가함을 확인하였다. 그리고 차체 구조물의 진동을 감쇠시키기 위해 댐핑 상수를 적용하였다. 이때, 해석 시간을 길게 하여 확인 해본 결과 강체벽과의 접촉이 완전히 떨어진 이후에는 차체의 변형이 매우 작았다. 따라서 해석 결과는 시간과 데이터의 크기를 고려하여 차체의 소성 변형에 영향을 미치는 구간까지 나타내었다.

Fig. 12는 정면충돌 이후 차체에서 변형이 가장 크게 발생하는 언더프레임의 영구 소성 변형을 나타낸 것이다. 차체 전두부와 강체벽이 충돌로 인해 최대 변형이 일어난 이후 차체와 강체벽이 떨어지며 발생하는 탄성 구간 이후의 소성 변형을 확인하였다. 이때, 소성 변형은 56.0mm로 언더프레임의 전두부 중앙에서 가장 크게 측정되었다.

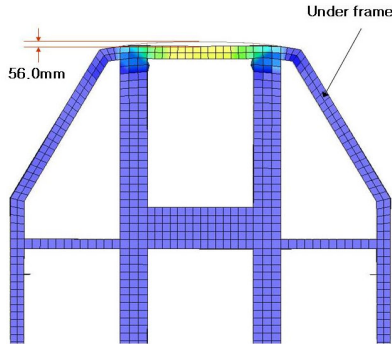


Fig. 12 Permanent plastic deformation after crashworthiness event.

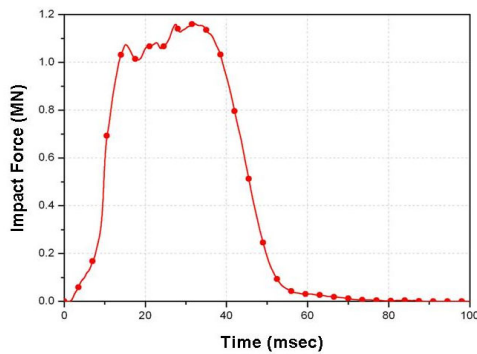


Fig. 13 Impact force for crashworthiness.

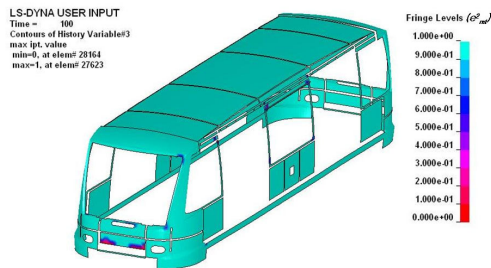


Fig. 14 Failure index( $\sigma^2_{ma}$ ) contours of composite carbody structure using modified Chang-Chang failure criteria.

Fig. 13은 정면충돌 시 발생하는 시간에 대한 충격하중 그래프를 나타낸 것으로 차체와 강체벽이 충돌하게 되는 부분에서 측정된 것이다. 충격하중 값은 10msec 이후로 급격히 증가하여 32msec일 때 최대값인 1.16MN이 측정되었고, 차체와 강체벽의 접촉이 떨어지며 약 90msec 이후로는 충격하중이 0이 되었다.

Fig. 14는 수정된 Chnag-Chang 파손 기준식에 의해 차체에 적용된 복합재의 파손을 나타낸 것으로 적층판의 모재에 대한

인장 파손을 보여준다. 파손 부위는 정면충돌 시 가장 큰 하중을 받게 되는 전두부에서 파손지수가 한계치인 1을 넘기며 모재 파손이 확인되며, 그 외에 창문과 출입문의 모서리 부위에서 응력이 집중되어 모재 파손에 근접함을 보였다. 그러나 정면충돌로 인한 섬유파단은 확인되지 않았다.

## 5. 결 론

본 논문은 하니컴 샌드위치 복합재가 적용된 자동무인경전철의 구조적 안전성을 평가 하였고, 외연유한요소해석으로 충돌에 따른 차체의 변형 및 복합재의 파손 모드를 확인하였다. 이때 구조해석은 JIS E 7105 기준과 ASCE 21-98 기준을 적용하였고, 충돌해석은 10km/h의 속도에 대해 해석하였다.

- (1) 구조해석과 충돌해석에 사용된 하니컴 심재의 유효등가 손상모델은 시편단위 물성시험을 통해 구하였다. 이때, 실제 하니컴 심재가 가지는 기계적 물성 특성을 등가적으로 모사할 수 있었으며, 또한 해석 및 모델링 시간의 단축 효과를 얻을 수 있었다.
- (2) 차체의 구조해석은 승객 하중, 비틀림 하중 및 운행 중 받는 외부 하중을 고려하여 구조적 안전성을 평가하였다. 이때, 금속재 프레임 부분은 Von-Mises 응력이 항복응력 보다 작아 안전하였고, 복합재 적용 부분은 Tsai-Wu 파손 지수가 1을 넘지 않아 안전함을 확인하였다. 또한 차체 구조물의 처짐 및 고유진동수 평가에서도 설계요구 조건을 만족함을 확인하였다.
- (3) 차량 운행 시 시스템 오류로 인해 발생할 수 있는 정면 충돌에 대해 외연적 유한요소해석을 통하여 충돌 과정에서 발생하는 특성과 차체 구조물의 변형을 확인하였다. 이때, 충돌 후 발생하는 최대변형은 제작 요구조건에 만족함을 확인하였다. 또한, 수정된 Chang-Chang 파손기준식을 사용하여 차체에 적용된 적층복합재의 모재에 대한 인장, 압축 파손 형태를 확인하였다.

## 참고문헌

- 1) Hiroyuki, M., Masahisa, M., Yasuyuki, S., Makoto, K., Shinichi, S., Hiroyuki, K. (Jun. 2003), "Automate People Mover System 'Crystal Mover' for Singapore's LTA," Mitsubishi Heavy Industries Ltd. Technical Review, Vol. 40, No. 3.
- 2) Technology Development Project of Light Railway Transit System (2000), "A Carbody Concept and Structural Analysis of Light Railway Transit," Research Reports, Korea Railroad Research Institute.

- 3) J. R. Vinson (1999), "The Behavior of Sandwich Structures of Isotropic and Composite Materials", pp. 11-22.
- 4) Choi, H. Y., Chang, F. K. (1992), "A Model for Predicting Damage in Graphite Epoxy Laminated Composite Resulting from Low Velocity Point Impact," *Journal of Composite Material*, Vol. 26, pp. 2134-2169.
- 5) Lee, J. Y., Shin, K. B., Jeong, J. C., (2007), "Simulation of Low Velocity Impact of Honeycomb Sandwich Composite Panels for the BIMODAL Tram Application," *Korean Society for Composite Materials*, Vol. 20, No. 4, pp.42-50.
- 6) S. W. Tsai and E. M. Wu, (1971), "A General Theory of Strength for Anisotropic Materials," *Journal of Composite Material*, Vol. 5, pp. 58-80.
- 7) Azzi, V. D., Tsai, S. W. (1965), "Anisotropic Strength of Composites," *Experimental Mechanics*, Vol. 5, pp. 283-288.
- 8) Matzenmiller, A., Luvliner, J., Taylor, R. L. (1995), "A Constitutive Model for Anisotropic Damage in Fiber-Composite," *Journal of Mechanical of Materials*, Vol. 21, pp. 125-152.
- 9) LS-DYNA(2006), "Keyword User's Manual, Version 971," Livermore Software Technology Corporation.
- 10) Japanese Industrial Standard (JIS) E 7105 (1994), Test Method for Static Load of Body Structures of Railway Rolling Stock.
- 11) American Society of Civil Engineers (ASCE) Standard No. 21-98 (1999), Automated People Mover Standards-Part 2.