論文

하니컴 샌드위치 복합재를 적용한 저상버스의 충돌 및 전복 특성 연구

신광복*+, 고희영**, 조세현***

A Study on Crashworthiness and Rollover Characteristics of Low-Floor Bus made of Honeycomb Sandwich Composites

Kwang-bok Shin*+, Hee-young Ko**, Se-hyun Cho***

ABSTRACT

This paper presents the evaluation of crashworthiness and rollover characteristics of low-floor bus vehicles made of aluminum honeycomb sandwich composites with glass-fabric epoxy laminate facesheets. Crashworthiness and rollover analysis of low-floor bus was carried out using explicit finite element analysis code LS-DYNA3D with the lapse of time. Material testing was conducted to determine the input parameters for the composite laminate facesheet model, and the effective equivalent damage model for the orthotropic honeycomb core material. The crash conditions of low-floor bus were frontal accident with speed of 60km/h. Rollover analysis were conducted according to the safety rules of European standard (ECE-R66). The results showed that the survival space for driver and passengers was secured against frontal crashworthiness and rollover of low-floor bus. Also, The modified Chang-Chang failure criterion is recommended to predict the failure mode of composite structures for crashworthiness and rollover analysis.

초 록

본 논문은 유리섬유 에폭시 면재에 알루미늄 하니컴 샌드위치 복합재가 적용된 저상버스 차체에 대한 정면충돌과 전복에 대한 특성에 대해 연구하였다. 이때 충돌과 전복 해석은 외연유한요소 해석 프로그램인 LS-DYNA3D를 이용하였다. 차체 구조물에 적용되는 적층 복합재 면재에 대해 기계적 특성시험을 통하여 물성을 획득하였고, 직교이방성 특성을 갖는 하니컴 심재의 물성은 유효등가손상 모델을 적용하였다. 저상버스의 충돌 해석은 60km/h의 속도로 정면충돌 사고를 모사하여 해석을 수행하였고, 전복해석은 유럽 안전법규 ECE-R66의 시험 방법을 고려하여 해석하였다. 저상버스의 정면충돌과 전복에 대해 운전자와 승객의 생존 공간 안전성에 관한 결과를 보여준다. 또한, 수정된 Chang-Chang 파손기준식은 충돌과 전복해석에 대한 복합재 구조물의 파손 모드 예측에 추천된다.

Key Words : 하니컴 샌드위치 복합재(Honeycomb sandwich composite), 충돌해석(Crashworthiness analysis), 전복해석(Rollover analysis), 유효손상모델(Effective equivalent damage model)

1. 서 론

현재 국내의 대중교통은 자가 차량의 증가로 인해 교통 체증이 지속적으로 증가되고 있는 실정이다. 이에 교통 체증을 줄이기 위한 방법으로 지하철 및 경전철을 이용하여 도심의 유동인구를 신속하게 이동하게 하는 방법이 추진되고 있으나, 이는 막

*+ 한밭대학교 기계설계공학과 교수, 교신저자(E-mail:shin955@hanbat.ac.kr)
** 한밭대학교 기계설계공학과, 경량구조 및 CAE 실험실
*** 한국화이바(주) 차량사업부

대한 투자비와 오랜 공사기간으로 인해 또 다른 문제점을 가지고 있다. 환경적인 측면에서는 교토의정서의 비준으로 인해 대기오염 및 지구 온난화의 주범인 배기가스를 줄이는데 관심이 집중되고 있다. 따라서 국내에서는 저상버스와 굴절버스 같은 새로운 개념의 버스 도입과 더불어 차량의 경량화를 통해 에너지 효율의 극대화를 얻고자 한다. 유럽이나 미국, 일본 등의 선진국에서는 적층 복합재(laminate composite) 또는 샌드위치 복합재(sandwich composite)를 적용한 차량을 연구 개발하여 운행 중에 있다[1]. 국내에서도 건설교통부의 국가교통핵심기술개발사업의 일환으로 적층 복합재와 샌드위치 복합재가 혼합 적용된 하이브리드 저상버스와 굴절버스 차량(hybrid vehicle carbody)이 개발되고 있다[2].

이러한 버스의 개발에 있어서 운행 중 유발될 수 있는 정면충돌이나 전복 사고에 따른 운전자 및 승객의 안전은 매우 중요하다. 그러나, 복합재 적용 버스 차체 구조물의 정면충돌에 관한 규정은 없는 실정이며, 이에 유럽과 일본에서는 버스 사고의 통계에 근거하여 승용차 충돌 테스트 조건들을 만족하는 버스 충돌 시험법을 제정하기 위한 시행 안이 제시되었다[3]. 전복시험에 관한 규정에는 전복 사고를 예방하기 위한 유럽 법규 ECE-R66이 있고, 미국의 대중교통협회의 버스기준 조달지침에는 상부 구조물과 루프에 대한 전복 시험에 대해 언급하고 있다[4]. 호주는 1992년부터 ADR59에 의해 전복 시 차체 변형량을 통하여 안전유무를 규제하고 있다[5]. 국내에서도 버스 전복 사고 시 승객의 피해를 최소화하기 위한 안전법규가 마련되어 2003년 1월부터 생산되는 승객포함 차량 총중량(G.V.W.)이 4.5톤을 초과하는 모든 버스에 대해 적용하고 있는 실정이다.

이러한 규정들은 버스의 정면충돌 및 전복사고 시 운전자 및 승객의 안전 공간(survival space) 확보의 중요성을 언급함과 동시에 평가의 기준을 제시하고 있다.

본 연구에서는 적층 복합재와 샌드위치 복합재가 적용된 저상버스의 안전성을 평가하고자 정면충돌(frontal collision)과 전복(rollover) 해석을 수행하였다. 정면충돌은 버스의 운행 속도인 60km/h의 속도로 벽에 충돌하는 것으로 모사하였고, 전복해석은 승객 하중을 고려하여 해석을 수행하였다. 정면충돌과 전복 해석에는 상용 외연유한요소 프로그램인 LS-DYNA3D를 이용하여 충돌 및 전복 시 차체 구조물의 변형과 샌드위치 복합재 구조물의 파손 형태를 확인하였다. 샌드위치 복합재의 구조물의 파손은 수정된 Chang-Chang 파손 기준식(modified Chang-Chang criterion)을 적용하였고, 알루미늄 하니컴 심재는 물성 시험을 통해 유효손상 모델(effective equivalent damage model)을 얻어 물성 값으로 사용하였다. 사고 후 차체의 변형에 따른 운전자 및 승객 안전 공간의 확보 여부 또한 판단하였다.

2. 저상버스의 구성 및 유한요소 모델

2.1 저상버스의 구성

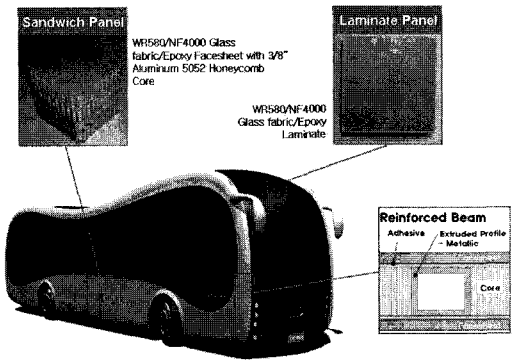

Fig. 1 Manufacturing concept of the low-floor bus.

Table 1 The construction of sandwich panels of the low floor bus

Name	Facesheet Material	Core Material	Thickness (t_O/t_C/t_I)
GE/AH	Glass fabric/Eposy (WR580/NF4000)	Aluminum 5052 Honeycomb (3/8"-0.0025")	3.0/25.4/1.5

t_O : outer facesheet, t_C : core, t_I : inner facesheet

저상버스의 차체 구조물은 Fig. 1에 나타나 있듯이 차체 구조물과 바닥재 구조물에는 유리섬유 적층 복합재 면재에 알루미늄 하니컴 코어로 구성된 샌드위치 구조이며, 굴곡이 심한 부위는 샌드위치 복합재의 적용이 불가능하여 적층 복합재가 사용되었다. 초기 설계 시 바닥재 구조물에는 알루미늄 면재를 적용하고자 하였으나, 제작공정의 효율성과 비용 등을 고려하여 유리섬유 적층 면재로 적용하였다. 보강재에는 차체와 바닥재에 알루미늄 또는 스테인레스 압출재가 고려되었으나 제작 및 가격적 측면에서 스테인레스 보강재를 적용하였다[2].

Table 1은 저상버스의 차체 구조물과 바닥재에 적용되는 샌드위치 패널의 구성 재료와 치수를 나타낸 것이다. 이때 면재는 WR580/NF4000 유리섬유/에폭시로서 외부 면재의 두께는 3mm가 적용되었고 내부 면재의 두께는 1.5mm가 적용되었다. 또한 심재로는 알루미늄 5052 3/8" 하니컴 코어로서 25.4mm의 두께가 적용되었다.

2.2 유한요소 모델링

정면충돌 및 전복해석에 사용된 차체 구조물에 대한 유한요소 모델링은 쉘 요소를 사용하여 샌드위치 복합재의 면재와 적층 복합재, 그리고 압출된 보강재 및 프레임을 모델링 하였다. 그리고 솔리드 요소를 사용하여 직교 이방성 성질을 갖는 하니컴 심재의 유효손상 모델을 모사하였다. 심재는 실제 하니컴 형상으로 그대로 모델링한다면 가장 이상적인 결과를 도출

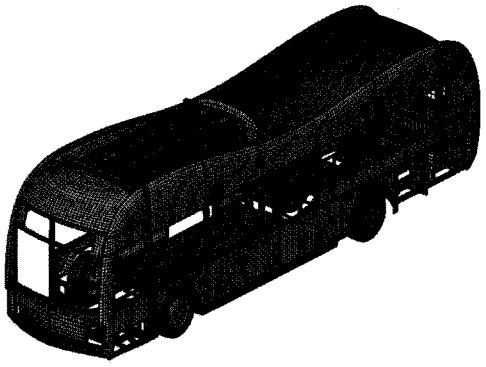

Fig. 2 Finite element model.

Table 2 Material properties of SUS400

Properties	Value
Density (kg/m^3)	7,900
Elastic modulus (GPa)	200
Poisson's ratio	0.3
Yield stress (MPa)	250

하지만 선행연구를 통해 유효등가모델링을 통해 오차 범위가 작은 것을 확인하여 해석시간의 단축과 효율성 측면을 고려한 모델링을 선택하였다[6-7]. Fig. 2는 해석에 사용된 저상버스의 유한요소 모델링이 완성된 모습을 보여 주고 있으며, 이때 사용된 요소 수는 쉘 요소 10만개와 솔리드 요소 5만개로 약 15만개를 갖는다.

차체의 무게에 큰 영향을 미치는 CNG탱크와 엔진, 에어컨은 솔리드로 모델링하여 각 부분에 대한 무게를 적용해 모사하였다. 이때 서로 다른 부분의 요소들은 용접(spotweld)요소를 사용하여 고정시켜 주었고, 각 요소들 간에 접촉 조건(single surface contact)을 부여 하여 서로 침투하는 것을 방지하였다. 또한 지면으로 부터의 충격을 흡수해주는 공기 스프링(air spring)과 댐퍼(shock absorber)를 모사하기 위해 특성곡선을 적용한 스프링과 댐퍼 요소를 사용하였다.

2.3 재료 물성의 선정

차체에 적용된 각각의 재질에 대한 물성은 LS-DYNA v971에서 제공하는 물성카드를 적용하였다.

먼저 차체 프레임에 적용된 스테인레스 스틸(SUS400)에 대한 물성은 *MAT_24 Piecewise linear plasticity 물성카드를 적용하였다. Table 2는 해석에 적용한 차체 스테인레스 스틸 프레임 물성을 나타낸다.

차체 구조물에 적용된 샌드위치 패널의 면재와 복합재 적층판에 사용된 WR580/NF4000 유리섬유/에폭시는 각 방향별 응력

Table 3 Material properties of WR580/NF4000 glass fabric laminate

Properties	Value
Density (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

Table 4 The modified Chang-Chang failure criterion in LS-DYNA 3D

Failure mode	Following conditions
Fiber breakage	• Tensile, $\sigma_x > 0$ $e_{ft}^2 = \left(\frac{\sigma_x}{X_t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy}}{S}\right) - 1$ where, $e_{ft}^2 \geq 0$: failed & $e_{ft}^2 < 0$: elastic
	• Compressive, $\sigma_x < 0$ $e_{fc}^2 = \left(\frac{\sigma_x}{X_c}\right)^2 - 1$ where, $e_{fc}^2 \geq 0$: failed & $e_{fc}^2 < 0$: elastic
Matrix cracking	• Tensile, $\sigma_y > 0$ $e_{mt}^2 = \left(\frac{\sigma_y}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy}}{S}\right)^2 - 1$ where, $e_{mt}^2 \geq 0$: failed & $e_{mt}^2 < 0$: elastic
	• Compressive, $\sigma_y < 0$ $e_{mc}^2 = \left(\frac{\sigma_y}{2S_c}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_c}{2S_c}\right)^2 - 1\right]\frac{\sigma_y}{Y_c} + \left(\frac{\tau_{xy}}{S}\right)^2 - 1$ where, $e_{mc}^2 \geq 0$: failed & $e_{mc}^2 < 0$: elastic
Fiber and Matrix shearing	• Tensile and Compressive $e_{md}^2 = \frac{\sigma_y^2}{Y_c Y_t} + \left(\frac{\tau_{xy}}{S}\right)^2 + \frac{(Y_c - Y_t)\sigma_y}{Y_c Y_t} - 1$ where, $e_{md}^2 \geq 0$: failed & $e_{md}^2 < 0$: elastic

σ_x, σ_y, τ_{xy} : 주재료방향(principal material direction)내에서의 응력성분, X_t, Y_t : 섬유방향과 섬유직각방향의 인장강도, Y_c, Y_c : 섬유방향과 섬유직각방향의 압축강도, S : xy평면 내의 전단강도, e : 파손지수(failue index); ft : fiber tensile; fc : fiber compressive; mt : matrix tensile; mc : matrix compressive; md : shearing mode of fiber & matrix

성분을 기초로 하는 Chang-Chang 파손 기준식을 고려하여 섬유와 기지재료에 인장, 압축 그리고 면내전단 하중에 의한 파손모드를 확인하였다. Table 3은 해석에 적용한 WR580/NF4000 유리섬유/에폭시 물성을 나타낸다.

이때 적용 물성 카드는 *MAT_54 Enhanced composite damage

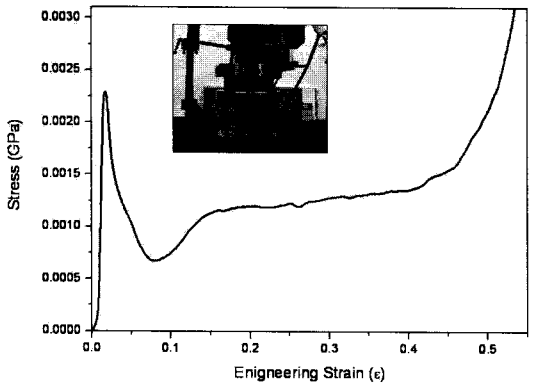

Fig. 3 The stress-strain curve for aluminum honeycomb core

물성 카드를 적용하였으며, 이 물성카드는 Matzenmiller가 Chang-Chang 파손 기준식과 Tsai-Wu 파손기준식을 수정하여 Table 4와 같이 제안한 수정된 Chang-Chang 파손 기준식 모델로서 평판 이론을 기초로 면내/외 응력성분에 의한 섬유의 파손 및 기지재료의 파손모드를 제공한다. 따라서 이 물성카드를 적용하여 차체 충돌 및 전복 시 복합재 적층판에 발생할 수 있는 섬유의 파손과 기지재료의 파손을 확인할 수 있도록 하였다[8-11].

샌드위치 패널의 심재인 알루미늄 하니컴 코어는 *MAT_126 Modified honeycomb 물성카드로 비선형 탄소성 거동을 적용하였다. 이때, 각 방향에 따른 압축 특성과 전단 특성에 대한 응력-변형률 곡선을 적용하여야 한다. Fig. 3은 알루미늄 하니컴 코어의 두께 방향에 대한 응력 변형률 곡선이며, 길이 및 폭 방향 물성과 전단 방향 물성은 그 영향이 재료 특성에 미치는 영향이 작다는 가정 하에 해석에 적용하였다[12]. 이때, 하니컴 코어의 변형률 속도에 의한 영향(strain rate effect)은 고려하지 않았으며, 추후 고려할 예정이다.

3. 차체의 정면충돌 특성 평가

3.1 충돌 시나리오

정면충돌 해석을 위한 경계 조건은 Fig. 4에 보듯이 차체가 강체 벽에 매우 근접하게 위치시킨 후 초기속도인 60km/h (16.67m/s)를 부여하고 해석을 수행하였다. 이때, 강체벽으로부터 운전석까지의 거리는 465mm이고 운전석 안전공간은 1100mm이다. 차체와 강체 벽 사이에는 면 대 면 접촉(surface to surface contact) 조건을 부여하였고 마찰계수를 적용하여 차체가 강체 벽으로부터 미끄러지는 현상을 구속해 주었다. 차체의 타이어 부분과 지면 부분 또한 면 대 면 접촉 조건(surface to surface contact)을 부여하여 높이 방향에 대해 구속하였다.

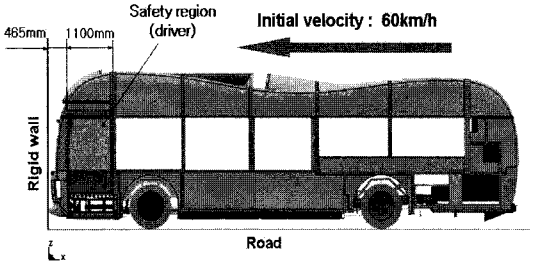

Fig. 4 The initial condition of crashworthiness analysis.

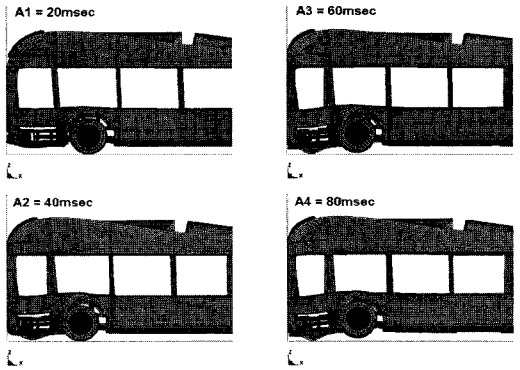

Fig. 5 The results of frontal collision simulation

3.2 충돌 해석 결과

저상버스의 정면충돌 해석을 통하여 충돌 후 차체의 변형과 적층 복합재의 파손을 확인하였다. 이때, 충돌시간은 100msec로 하여 차체가 강체 벽과 충돌 후 초기에 부여된 속도가 0이 될 때 까지 확인하였다.

Fig. 5는 시간에 따른 차체의 전두부의 변형을 확인한 것으로 정면충돌 시 프레임의 소성변형으로 인한 압괴 파괴 거동이 일어나는 것을 확인하였다. 이때, 강체벽으로 부터 운전석 안전공간까지의 최대 변형은 316mm 발생하였다. Fig. 6은 충돌하는 동안 발생한 운동에너지와 내부에너지를 나타낸 것으로, 단계별 시간에 따른 에너지의 변화(A1, A2, A3, A4)를 비교하여 나타내었다. 충돌 전 차체의 운동에너지는 1.29MJ임을 확인하였고, 충돌 후 차체의 변형에 의해 생기는 내부에너지는 0.81MJ까지 증가함을 확인하였다.

Fig. 7은 수정된 chang-chang 파손 기준식에 의해 차체와 바닥재에 적용된 복합재 구조물의 파손 지수를 나타낸 것으로 복합재 적층판의 모재 파손(matrix failure)을 보여준다. 충격하중을 가장 많이 받는 차체의 전두부 주위에서 파손지수가 한계치인 1을 넘기며 모재 파손이 일어나는 것을 확인하였다. 그러나 정면충돌에 인한 최대 변형이 운전석 및 승객의 안전영역까지는 침범하지 않은 것으로 평가되었다.

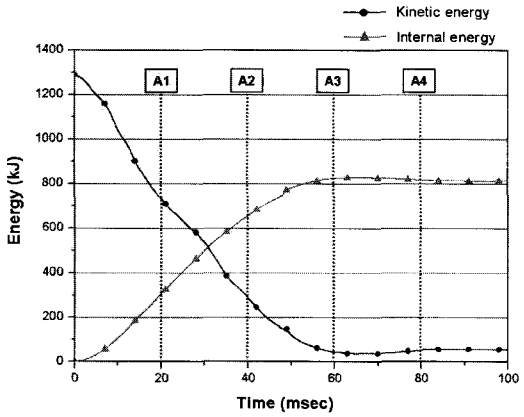

Fig. 6 Energy history curves of frontal crashworthiness simulation.

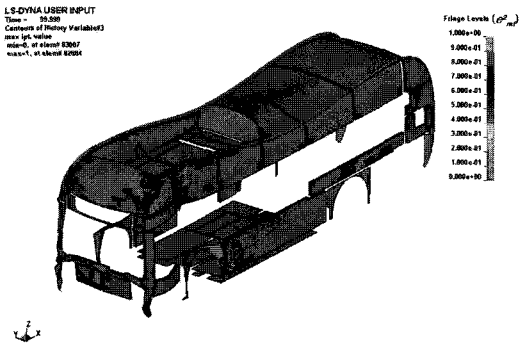

Fig. 7 Failure index(e^2_{mt}) contours of composite carbody structure using modified Chang-Chang failure criteria.

4. 차체의 전복 특성 평가

4.1 버스 전복 관련 법규

유럽 경제 위원회 법규 66번(ECE Regulation No.66)에서는 버스와 같은 대형 차량의 전복 시험 시 차체 구조가 갖춰야 하는 요구 강도는 다음과 같은 4가지 방법 중 선택적으로 한 방법을 만족을 해야 한다고 규정하고 있다.

1) 완성차(Complete Vehicle)에 대한 전복 시험
2) 차체 단품(Body Section)에 대한 전복 시험
3) 차체 단품에 대한 진자(Pendulum) 시험
4) 계산에 의한 상부구조(Superstructure) 강도의 입증

위 4가지의 시험 절차와 요구조건은 완성차나 차체 단품의 경우에 똑같이 적용된다[13].

Fig. 8은 차체의 전복 시 승객 생존 공간(survival space)으로 바닥과 프레임으로부터 일정 거리만큼 떨어진 위치에 높이가 최소 750mm의 사다리꼴로 정의된다.

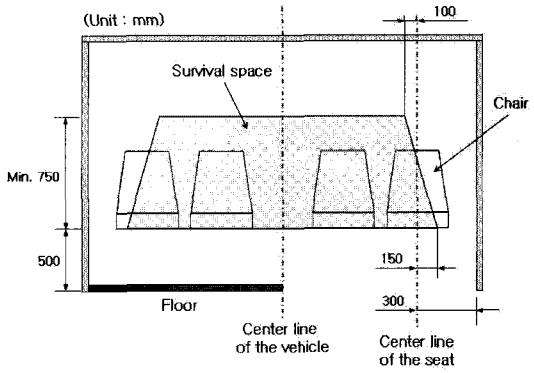

Fig. 8 Definition of survival space.

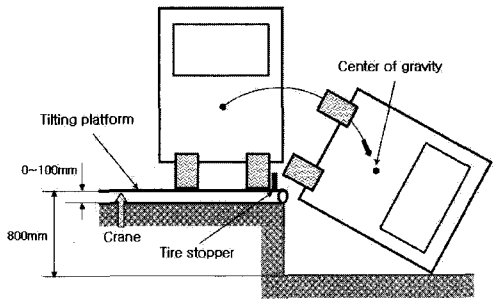

Fig. 9 Specification of rollover test.

4.2 전복 시나리오

전복 해석을 위한 경계조건은 법규에 규정한 실차 전복시험과 동일하게 적용하여 Fig. 9와 같이 800mm 높이의 틸팅 플랫폼 모델 위에 버스 모델을 위치시키고, 기울기로 인한 타이어의 미끄럼을 방지하기 위하여 타이어 지지대를 적용한다. 이때, 틸팅 플랫폼 한쪽 끝을 법규에서 제시한 초당 1도(degree)의 기울기로 서서히 들어 올려 차체의 자중에 의해 전복을 모사한다. 또한 지면과 접촉하게 되는 차체의 측면부와 지면은 면 대 면 접촉(surface to surface contact) 조건을 부여하고 마찰계수를 적용하여 미끄러짐 현상을 구속하였다. 이때 승객 하중은 2800kg (70kg×40명)으로 승객의자가 위치되는 곳에 적용하였다.

본 해석에 있어 시간의 단축을 위하여 차체가 바닥에 접촉하기 직전의 속도를 동역학 해석 프로그램을 통해 구하여 적용하였다. 이때 차체의 무게 중심을 정의하기 위하여 상용유한요소 해석 프로그램인 ANSYS v11.0을 이용하여 차체의 무게 중심 위치를 구하였다.

$$\Delta E_{pot} = mg\Delta h = \frac{1}{2} I_{xx}\omega^2 \quad (1)$$

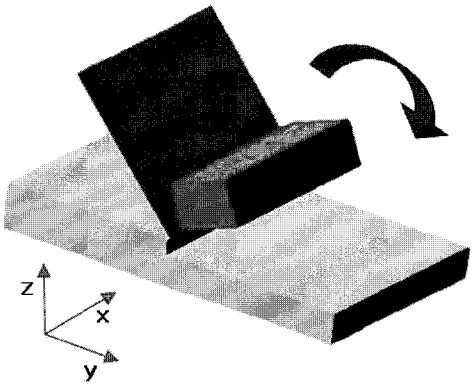

Fig. 10 Dynamic simulation of rollover test.

Table 5 Angular & Translation velocity

Dynamic analysis simulation	Magnitude
Angular velocity in X-axis	0.398 rad/sec
Angular velocity in Y-axis	0.297×10^{-3} rad/sec
Angular velocity in Z-axis	0.157×10^{-3} rad/sec
Translation velocity in X-axis	2.407 mm/sec
Translation velocity in Y-axis	689.420 mm/sec
Translation velocity in Z-axis	-2081.110 mm/sec

여기서, ΔE_{pot}은 위치에너지의 변화량, m은 차체의 무게, g는 중력가속도, Δh는 위치의 변화량, I_{xx}는 관성모멘트, ω는 각속도이다.

식 (1)은 차체가 지면에 충돌되는 순간의 각속도를 구하는 관계식으로 버스 차체가 갖고 있는 위치에너지는 전복에 인한 회전운동으로 생긴 각속도에 의해 발생하는 에너지와 같게 된다.

Fig. 10은 전복 시 발생하는 각속도와 평행이동속도를 구하기 위해 동역학 해석 프로그램을 통하여 차체의 무게 중심과 차체 중량이 적용된 단순 모델에 대해 모사한 것이다. 이때, 차체의 한쪽을 들어주는 틸팅 플렛폼에 최대 1°/sec의 각속도로 회전을 주어 차체 무게 중심의 변화에 의한 자유낙하가 이루어지도록 해석을 수행하였다. 차체와 바닥부가 접촉하기 직전에 갖는 각 방향의 속도와 각속도를 측정하여 전복해석에 적용하였다.

Table 5는 동역학 해석 프로그램을 통해 얻은 전복 직전(지면과 차체의 접촉 이전 시점)의 각속도와 각 방향별 속도로서 전복 해석 시 차체에 초기 속도로 부여하였다. 이때, Y축과 Z축에 생기는 각속도는 매우 작아 해석 시에는 고려하지 않았다.

4.3 전복 해석 결과

전복해석을 통하여 차체의 변형에 의한 승객 생존 공간(sruvival space)과 적층 복합재의 파손을 확인하였다. 이때, 전복 시간은 300msec로 하여 차체의 모든 측면이 지면과 접촉할 때까지 수행하였다.

Fig. 11은 시간에 따른 차체의 변형을 보여주는 것으로 승객하중이 포함된 상태에서의 승객 생존 공간의 확보 여부를 확인하였다. 이때, 최대변형은 측면 프레임에서 110mm가 발생하였다. Fig. 12는 전복 해석 시 운동에너지와 내부에너지의 변화량을 나타낸 것으로 시간에 따른 에너지의 변화(B1, B2, B3, B4)를 비교하여 나타내었다. 전복 해석은 정면충돌과 달리 전복에 의한 지붕 모서리 부위의 1차 충돌 후 차체의 자유낙하로 인해 운동에너지가 다시 증가하는 것을 확인하였다. 100msec 이후로 증가한 운동에너지는 250msec 이후로 다시 감소하고 내부에너지가 증가하는 것을 확인하였다. 이때, B6은 차체의 전복이 완료된 상태가 아니라 차체 측면부가 완전히 접촉된 상태까지의 결과를 나타낸 것이다. 전복해석 시간을 길게 하여 해석해 본 결과 차체가 바닥에 충돌한 이후 다시 튀어 오르는 현상이 발생하였다. 이로 인해 운동에너지가 다시 증가하였지만, 차체의 변형은 초기의 접촉에 비해 작음을 확인하였다. 또한 해석시간은 30일 이상이 소요되었고, 데이터 파일의 크기는 150GB이상을 넘었다. 따라서 해석결과는 시간과 데이터 크기를 고려하여 차체의 변형에 가장 큰 영향을 주는 구간까지 나타내었다.

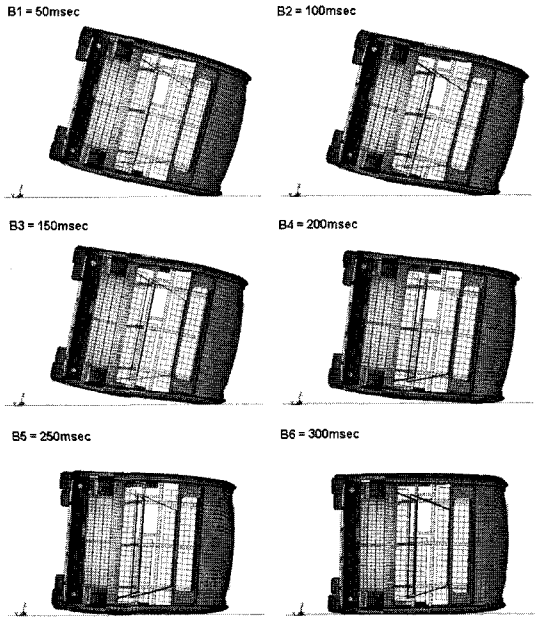

Fig. 11 The results of deformation for rollover simulation.

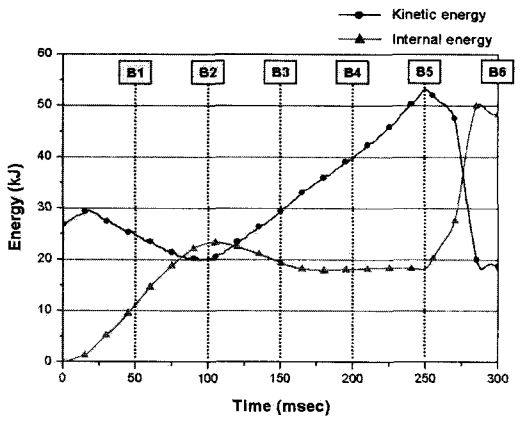

Fig. 12 Energy history curves of rollover simulation.

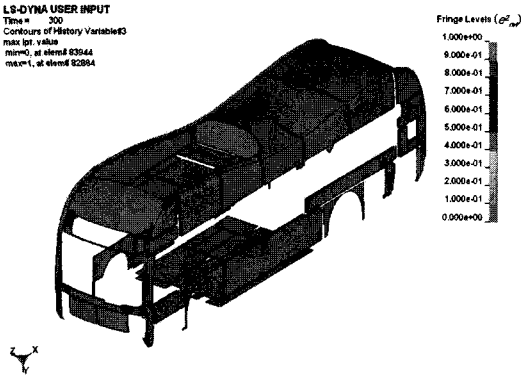

Fig. 13 Failure index(e^2_{mt}) contours of composite carbody structure using modified Chang-Chang failure criteria.

Fig. 13은 수정된 Chang-Chang 파손 기준식에 의해 차체와 바닥재에 적용된 복합재 구조물의 파손을 나타낸 것으로 복합재 적층판의 모재 파손을 보여준다. 전복 시 1차적으로 충격하중을 받는 상단 전두부의 주위와 2차적으로 충격하중을 받는 측면부의 주위에서 파손지수가 한계치인 1을 넘기며 모재 파손이 일어나는 것을 확인하였다. 그러나 섬유파단은 확인되지 않았고, 전복에 의한 변형이 승객 생존 공간 까지는 침범하지 않은 것으로 평가 되었다.

5. 결 론

본 논문은 하니컴 샌드위치 복합재가 적용된 저상버스 차체 구조물의 정면충돌과 전복 해석을 통하여 차체의 변형과 복합재의 파손모드를 외연유한요소해석으로 확인하였다. 이때 정면충돌은 60km/h의 속도에 대해 해석하였고, 전복은 유럽법규 66(ECE-R 66)을 적용하여 해석하였다.

(1) 정면충돌과 전복해석에 사용된 하니컴 심재의 유효손상모델을 시험을 통해 구하였으며, 유효손상모델은 실제 하니컴 심재가 갖는 기계적 물성 특성을 등가적으로 모사할 수 있었으며, 또한 해석 및 모델링 시간의 단축 효과를 얻을 수 있었다.

(2) 수정된 Chang-Chang 파손기준식은 정면충돌 및 전복해석 시 복합재 구조물의 파손 유무와 파손 모드를 제공하여 차체 구조물에 적용된 샌드위치 복합재의 유리섬유/에폭시 면재에 대한 파손을 확인 할 수 있었다.

(3) 하니컴 샌드위치 복합재가 적용된 저상버스의 정면충돌 해석을 통하여 운전석의 안전 공간이 확보되는 것으로 확인하였다. 또한, 전복해석 시에도 승객 하중이 고려된 상태에서의 차체의 변형이 승객 생존 공간까지 침범하지 않은 것으로 평가되었다.

후 기

본 연구는 건설교통부의 국가교통핵심기술개발사업의 지원에 의하여 수행된 것이며, 이에 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

1) Martec Limited Prevost Car, Intercity Bus Weight Reduction Profram Phase I, 2000.
2) Lee, J. Y., Shin, K. B., Lee, S. J., "A Study on Failure Evaluation if Korean Floor Bus Structure made of Hybrid Sandwich Composite," *Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 15, No. 6, 2007.
3) Y. Sukegawa, F. Matsukawa, T. Kuboike, M. Oki, "Heavy Duty Vehicle Crash Test Method in Japan," *JAMA*, 1998, pp. 892-898.
4) Pankaj S. Deshmukh, "Rollover and Roof Crush Analysis of Low-Floor Mass Transit Bus," Ambedkar Marathwada University, 2002.
5) Australian Design Rule 59/00-Omnibus Rollover Strength, "Evaluation of Occupant Protection in Buses," *RONA Kinetics and Associates Ltd./Report RK02-06*, 2002.
6) Choi, H, Y., Chang F. K., "A Model for Predicting Damage in Graphite Epoxy Laminated Composite Resulting from Low Velocity Point Impact," *Journal of Composite Material*, Vol. 26, 1992, pp. 2134-2169.
7) Lee, J. Y., Shin, K. B., Jeong, J. C., "Simulation of Low Velocity Impact of Honeycomb Sandwich Composite Panels for the BIMODAL Tram Application," *Korean Society for*

Composite Materials, Vol. 20, No. 4, 2007, pp. 42-50.

8) Azzi, V. D., Tsai, S. W., "Anisotropic Strength of Composites," *Experimental Mechanics*, Vol. 5, 1965, pp. 283-288.

9) Tsai, S. W., Wu, E. M., "A General Theory of Strength for Anisotropic Materials," *Journal of Composite Materials*, Vol. 5, 1971, pp. 58-80.

10) Matzenmiller, A., Luvliner, J., Taylor, R. L., "A Constitutive Model for Anisotropic Damage in Fiber-composite," *Journal of Mechanical of Materials*, Vol. 21, 1995, pp. 125-152.

11) LS-DYNA, "Keyword User's Manual, Version 971," Livermore Software Technology Corporation, 2006.

12) Lee, J. Y., Shin, K. B., Ryu, B. J., Lee, S. J., "Simulation of Low Velocity Impact of Sandwich Panels Applied to Korean Low Floor Bus Using LS-DYNA," *International Conference on Composite Materials*, 2007, pp. 1348-1349.

13) United Nations, Addendum 65 : Regulation No. 66, Uniform Provisions Concerning the Approval of large Passenger Vehicles with Regard to the Strength of their Superstructure, 1986.