

## 한국형 틸팅열차용 복합재 차체의 하중적재에 따른 구조적 특성고찰

### Structural Characteristics of a Hybrid Composite Carbody of Korean Tilting Train by Weight Load

김정석<sup>†</sup> · 정종철\* · 한정우\*\* · 이상진\* · 김승철\*\*\* · 서승일\*\*\*

Jung-Seok Kim · Jong Cheol Jeong · Jeong-Woo Han · Sang-Jin Lee · Seung-Cheol Kim · Sung-Il Seo

#### Abstract

This paper explains manufacturing process, analysis and experimental studies on a hybrid composite carbody of Korean tilting train. The composite carbody with length of 23m was manufactured as a sandwich structure composed of a aluminium honeycomb core and woven fabric carbon/epoxy faces. In order to evaluate deformational behavior of the composite carbody, the static load test under vertical load has been conducted. From the test, the vertical deflection and cross sectional deformation of the carbody were analysed and measured. The maximum deflection along the side sill was 9.25mm in the experiment and 8.28mm in the analysis. The maximum cross sectional deformation was measured 5.42mm at carbody center in lateral direction and 4.06mm at roof center in vertical direction.

**Keywords :** Hybrid(하이브리드), Composite Material(복합재), Tilting Train(틸팅열차), Carbody(차체), Deformation(변형)

#### 1. 서론

철도차량과 같은 대형구조물의 무게절감은 차체의 주요 구성품의 무게절감을 유도하는 시너지 효과(synergy effect)를 가지고 있다. 예를 들어 차체무게의 절감은 견인전동기, 현가장치, 제동장치등과 같은 장치의 용량 및 경량화를 유도하게 된다. 또한 이러한 경량화는 레일의 마모감소와 베어링 수명향상에도 기여하게 된다. 따라서 철도차량분야에서 경량차체의 도입은 제작 및 궤도 유지보수 비용절감의 효과를 가져올 수 있다. 이러한 측면에서 철도차량 차체는 강재에서 알루미늄 압출재 등으로 경량화를 추구해 왔다.

철도차량 차체에 대한 연구는 스테인레스 또는 알루미늄 적용 차체에 대한 연구(1-5)가 있으며, 복합재를 적용한 경우는 Lee(6), Belingardi(7)와 Harte(8)의 연구와 같이 전두부나 저속 경량전철에 대한 연구가 있다.

복합재료는 기존 금속재에 비해 비강도, 비강성, 내구성

과 내식성이 우수하여 항공분야에 많이 적용되고 있다. 또한, 일체성형에 의한 생산비 절감 및 제조 공정 단축, 공기역학적 형상 제작의 용이성 등의 많은 장점이 있다. 이러한 장점을 바탕으로 현재 유럽과 일본 등에서 경량전철과 모노레일 등의 차체에 적용되고 있다. 국내에서는 현재 철도차량 전두부와 내장재등 주 하중을 감당하지 않는 2차 구조물(secondary structure)로 적용되고 있는 실정이다. 현재 한국철도기술연구원에서 개발중인 한국형 틸팅열차(TTX)의 차체는 탄소/에폭시 복합재와 알루미늄 허니콤 샌드위치 구조로 제작되고 있다.

샌드위치 구조에서 복합재 면재는 굽힘하중을 감당하고, 알루미늄 허니콤 코어는 전단하중을 감당하게 된다. 한국형 틸팅열차에서 복합재는 2차 구조물이 아닌 하중을 감당하는 1차 구조물(primary structure)로 적용되고 있다. 일반적으로 구조물의 경량화는 강도(strength)보다는 강성(stiffness)의 저하를 가져오게 된다. 따라서, 차체 주요부위에 대한 변형양상 및 변형의 크기 등에 대한 고찰이 필요하다. 본 연구에서는 복합재 적용 철도차량 차체에 대한 구조해석모델 구축 및 차체의 강성평가를 위한 목적으로 유한요소해석 및 시험을 통해 복합재 차체의 수직변형과 단면변형의 특성을 고찰하였다. 본 연구에서 개발중인 차체는 이미 정하중 시험

† 책임저자: 회원, 한국철도기술연구원, 기존철도기술개발사업단  
E-mail: jskim@krti.re.kr

TEL: (031)460-5663 FAX: (031)460-5699

\* (주) 한국화이버 차량사업부

\*\* 한국기계연구원 구조시스템 연구부

\*\*\* 한국철도기술연구원 기존철도기술개발사업단

[9-11]을 통해 구조적 안전성을 확인한 바 있으나 차체 단면의 변형특성 등은 고찰되지 못했다.

## 2. 복합재 차체

### 2.1 복합재 차체의 구조

본 연구에서 개발중인 한국형 텀팅열차의 차체 형상은 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 알 수 있듯이 차체의 폭은 2970mm, 높이는 레일에서 약 3690mm, 길이는 23030mm 그리고 대차 중심간 거리는 15900mm 이다.

차체의 지붕상부에는 HVAC(heating, ventilating, and air conditioning) 설비가 설치되어 있고 전망창(observation window)은 측출입문(side entrance door) 한쪽편에만 있어 차량은 좌우 대칭구조는 아니다. 따라서 추후 유한요소해석시에는 차량 전체에 대해 모델링을 하였다.

본 연구에서 개발중인 철도차량 차체상부는 Fig. 2와 같이 직조된 CF1263 탄소/에폭시 면재(woven fabric Carbon/Epoxy face)와 알루미늄 허니콤 심재(aluminum honeycomb core)로 구성된 샌드위치 구조로 되어있다. 그리고 차체 언더프레임은 하부에 설치되는 전기장치의 설치가 용이하도록 스테인레스 재질을 적용하였다. 이러한 복합재 상부구조와 스테인레스 언더프레임간의 연결은 Fig. 2와 같이 접착(bonding)

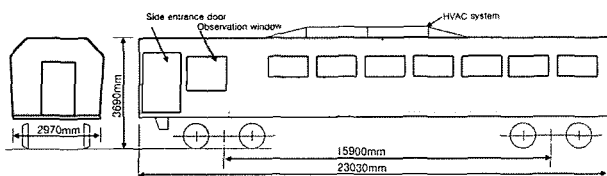


Fig. 1. Dimensions of the composite carbody

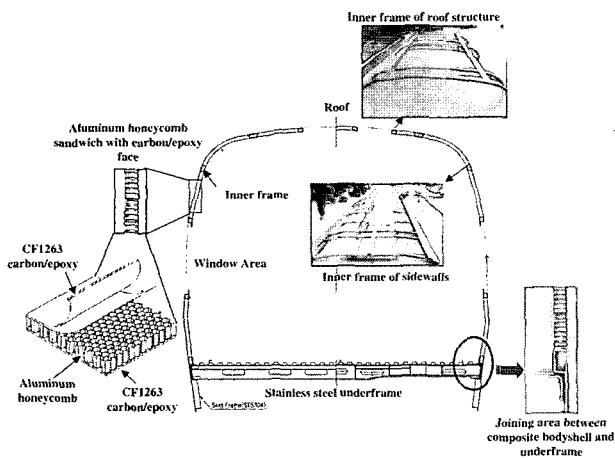


Fig. 2. Sandwich structure with aluminum honeycomb core and woven fabric carbon/epoxy face

과 리벳팅(riveting)을 동시에 적용하였다. 차체의 샌드위치 구조내부에는 제작후 내장재의 설치를 위해 연강(mild steel)으로 제작된 내부골조(inner frame)가 삽입되어 복합재 차체 부분과 동시성형(co-cured)된다. Table 1은 직조된 CF1263 탄소/에폭시 면재의 기계적 물성치를 나타낸 것이다.

### 2.2 복합재 차체의 제작

길이 23m의 복합재 차체를 제작하기 위해서는 먼저 목형(wood mold)을 제작하고, 제작된 목형을 이용해서 FRP몰드를 제작하였다. 차량의 길이가 23m이기 때문에 약 8m, 8.4m와 6.6m길이로 3등분하여 FRP몰드를 Fig. 3과 같이 제작하였다.

이렇게 제작된 몰드내부에 직조된 CF1263 탄소/에폭시(woven fabric CF1263 carbon/epoxy) 프리프레그(prepreg)를 적층하여 차체 외피에 대한 1차 성형(curing)을 하였다. 1차 성형 공정은 (a) 탄소/에폭시 프리프레그의 적층(prepreg layup) => (b) 진공처리(vacuum bagging) => (c) 오토클레

Table 1. Material properties of the CF1263 Carbon/Epoxy.

Mechanical properties	Values
Tensile elastic modulus in direction of warp, $E_{wt}$ (GPa)	55.5
Tensile elastic modulus in direction of fill, $E_{ft}$ (GPa)	48.3
Compressive elastic modulus in direction of warp, $E_{wc}$ (GPa)	52.6
Compressive elastic modulus in direction of fill, $E_{fc}$ (GPa)	52.1
Shear modulus, $G_{12}$ (GPa)	3.81
Tensile strength in direction of warp, $W_t$ (MPa)	936
Tensile strength in direction of fill, $F_t$ (MPa)	885
Compressive strength in direction of warp, $W_c$ (MPa)	542
Compressive strength in direction of fill, $F_c$ (MPa)	513
Possion's ratio of warp, $\nu$	0.099
Possion's ratio of fill, $\nu$	0.07

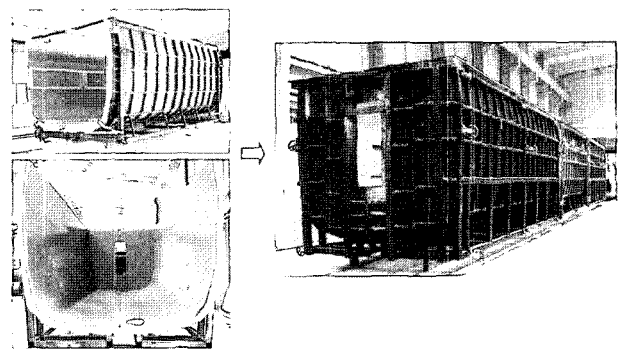


Fig. 3. FRP mould and assembly

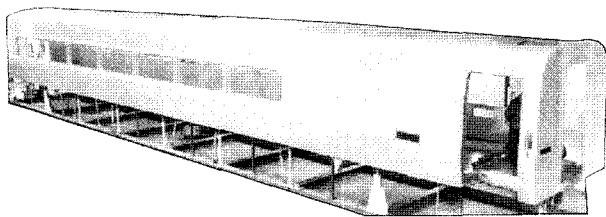
이브 성형 => (d) 1차 성형 원료의 순서로 이루어진다. 본 연구에서 오토클레이브 성형 기법(autoclave curing method)을 적용한 이유는 국내에서 철도차량분야에 복합재가 적용된 사례가 전무하고 복합재의 성형공법 중 가장 품질이 우수하기 때문이다. 본 연구에서 개발 중인 차체가 샌드위치 구조이고 내부에 금속재 골조가 삽입되기 때문에 제작성과 제품의 품질향상을 위해 2번의 성형과정을 거쳤다. 1차 성형 원료 후 금속재 내부골조의 설치, 알루미늄 허니콤 및 내부 탄소/에폭시 프리프레그를 적층하였다. 이렇게 내부스킨 적층이 완료된 후 동일한 오토클레이브에서 2차 성형을 하였다. 2차 성형 원료 후 복합재 차체는 스테인레스로 제작된 언더프레임과 접착제와 리벳 체결을 동시에 적용하여 조립하였다.

### 3. 유한요소 모델링 및 시험설치

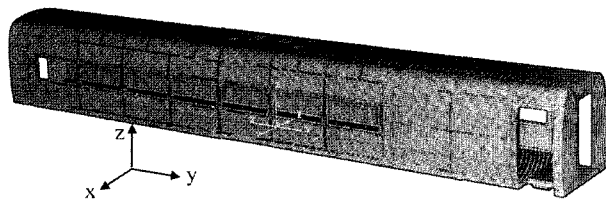
#### 3.1 유한요소 모델링

유한요소 해석을 위한 모델링은 실제 차체와 가능한 유사하게 모델링하기 위해 지붕구조(roof) 및 측벽(side wall)을 포함하는 복합재 샌드위치 구조인 차체, 금속재 내부골조(inner frame)를 모델링하였다. 또한 키스톤 플레이트(keystone plate), 사이드 실(side sill), 센터 실(center sill), 바디볼스터(body bolster), 크로스 빔(cross beam)등 금속재 언더프레임의 구성요소를 실제와 동일하게 모델링하였다.

복합재 차체부분, 내부골조 및 언더프레임 등 모든 부분은 3차원 셸 요소(shell element)로 모델링 하였다. 해석은 유한요소전용 해석프로그램인 ABAQUS를 이용하였고, 해



(a) Hybrid composite carbody



(b) Finite element model of the composite carbody

Fig. 4. Composite carbody and FE model

석에 적용된 요소(element)는 S4R과 S4 셸 요소이다. 해석에 적용된 요소수는 143800개이고 절점수는 147438개이다. Fig. 4는 복합재 차체 실제 형상과 유한요소 해석모델을 나타낸 것이다.

#### 3.2 하중 및 경계조건

해석시 적용된 하중조건은 만차시의 적재하중인 252.5kN을 차체의 키스톤 플레이트 상부에 균일분포하중으로 부과하였다. Table 2는 틸팅열차의 중량데이터를 나타낸 것이다.

해석에 적용된 경계조건은 축출입문부에 위치한 바디볼스터의 공기스프링 설치위치에서는  $u_x = u_y = u_z = 0$ 와 같은 변위가 구속되고 반대편에 위치한 바디볼스터에서는  $u_x = u_z = 0$ 의 변위를 구속하였다.

#### 3.3 시험설치

시험설치는 복합재 차체를 시험대 위에 고정하기 위하여 먼저 차체의 자중과 차체에 적재되는 중량의 크기를 고려하여 차체의 전후방 공기스프링 장착 위치에 Fig. 5와 같이 4조의 지지 빔을 제작하였다. 각 지지빔 상부에는 5개의 코일스프링을 장착하여 시험 중 차체의 중량을 지지하도록 하였다. 차체의 수직처짐을 측정하기 위해 Fig. 6과 같이 차체의 양쪽 사이드 실을 따라 차단(car end), 바디볼스터 및 차체의 중앙 10개소(1번~10번)에 변위계를 설치하였다.

또한, 차체의 단면(cross section)에서의 변형을 측정하기

Table 2. Weight of Korean tilting train

항 목	하중(kN)
공차하중( $W_o$ )	460
대차하중( $W_b$ )	182
최대승객하중( $W_{mp}$ )	63

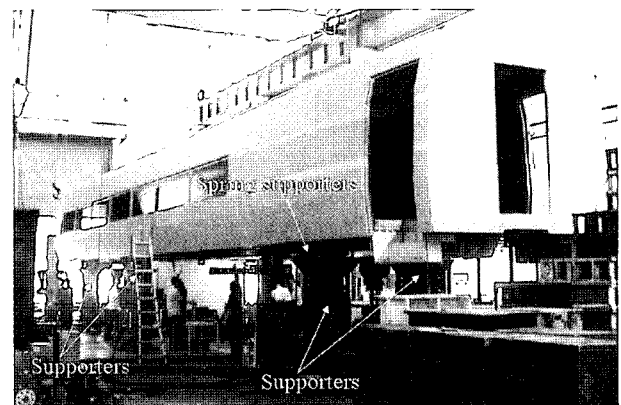


Fig. 5. Installation of composite carbody

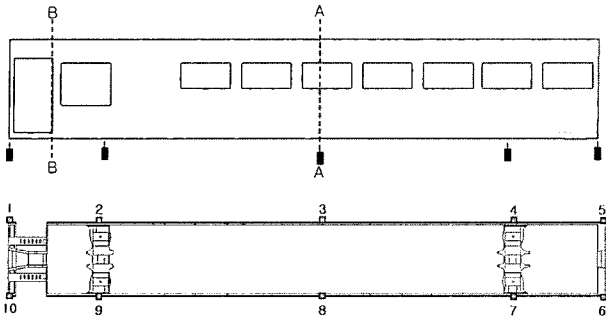


Fig. 6. Locations of displacement gauges under the underframe

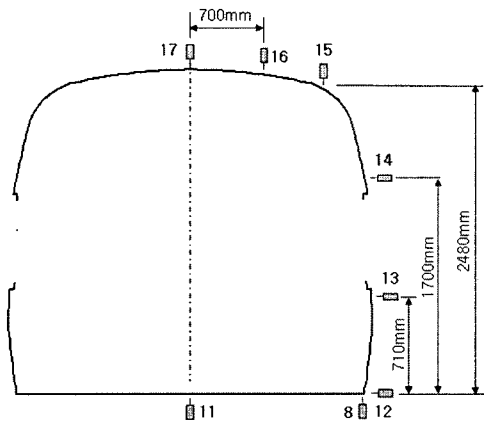


Fig. 7. Locations of displacement gauges on the side wall and roof (A-A section)

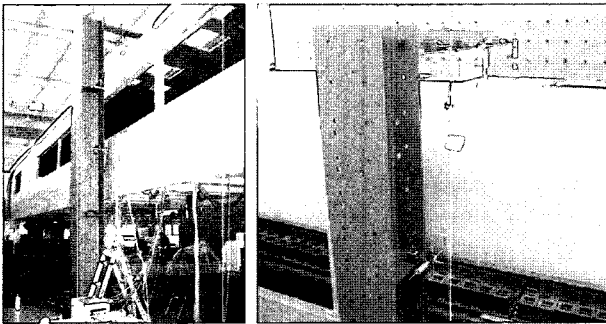
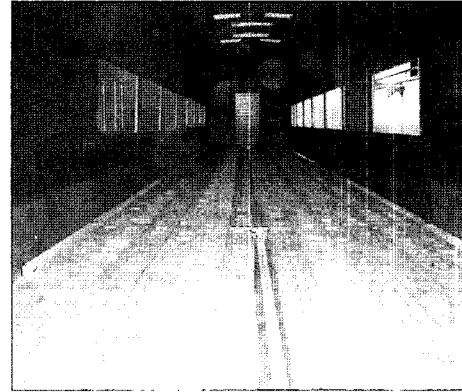


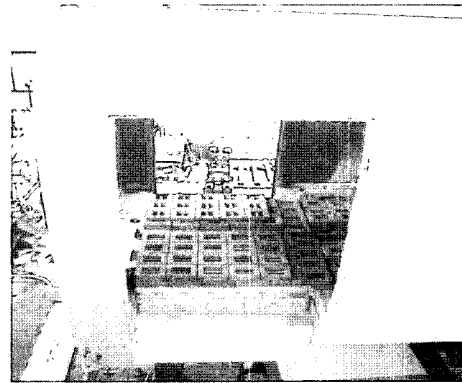
Fig. 8. Displacement sensors installed on the carbody

위해 Fig. 7과 같이 Fig. 6의 A-A 단면을 따라 차체의 측면과 지붕 등 7개소(11번~17번)에 설치하였다. 설치된 변위계는 Tokyo sokki사의 SPD와 Kyowa사의 DTH 모델을 이용하였다. Fig. 8은 차체에 설치된 변위계의 모습을 나타낸 것이다.

차체와 변위계이지의 설치가 완료된 후 만차하중에 해당하는 252.5kN을 부과하기 위해 10~20kg의 강재블록(steel block)을 차체바닥의 키스톤 플레이트 상에 적재하였다. 하중적재는 8단계로 나누어 적재하였고 적재단계별로 변형량을 측정하였다. Fig. 9는 차체 키스톤 플레이트에 강재블럭



(a) Steel blocks laid on the keystone plate



(b) Steel blocks around the side entrance door

Fig. 9. Steel blocks laid on the keystone plate

들이 적재된 모습을 나타낸 것이다. 하중적재는 차체의 측면에서 중앙방향으로 점진적으로 적재하였다.

#### 4. 결과 및 검토

Fig. 10은 구조해석을 통해 얻어진 차체의 변형형상을 100배 확대한 것이다. 수직하중조건하에서 차체의 중앙 창문 부위는 차체 안쪽으로 변형되고 차체 지붕과 바닥부는 차체 바깥방향으로 팽창하는 거동을 보였다. 그리고 차체의 바디볼스터 상부는 차체 중앙부와 반대로 차체 측면부를 팽창하고 차체 지붕과 바닥부는 차체 안쪽으로 변형하였다.

차체의 변형을 보다 상세히 고찰하기 위해 차체 사이드실의 길이방향에 따른 수직처짐(vertical deflection), 차체의 중앙(A-A section)과 측출입문부(B-B section)에서의 단면 변형(cross sectional deformation)을 고찰하였다. 수직처짐의 경우 차체의 강성을 평가하는 척도로 사용되며 대차의 진동과 관련하여 승차감에도 영향을 주게 된다.

Fig. 11은 사이드실의 수직처짐을 나타낸 것이다. Fig. 11

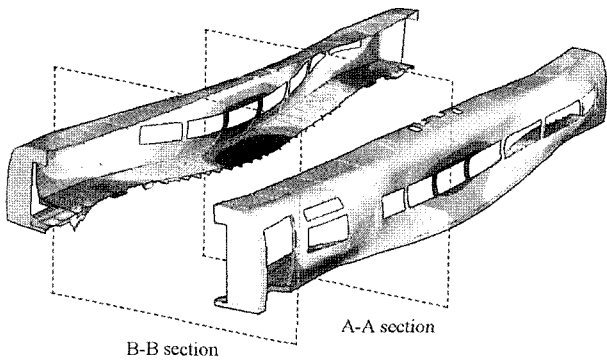


Fig. 10. Displacement sensors installed on the carbody

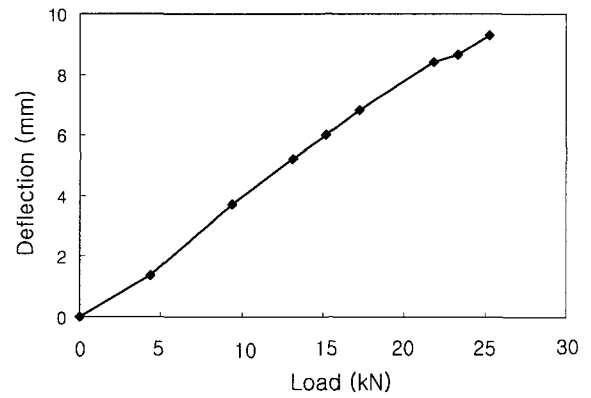


Fig. 12. Vertical deflection at the side sill center according to load

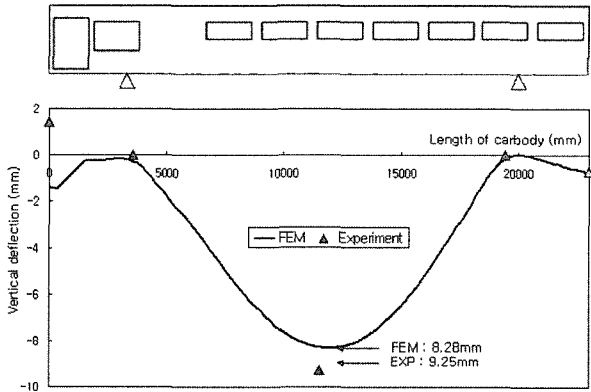
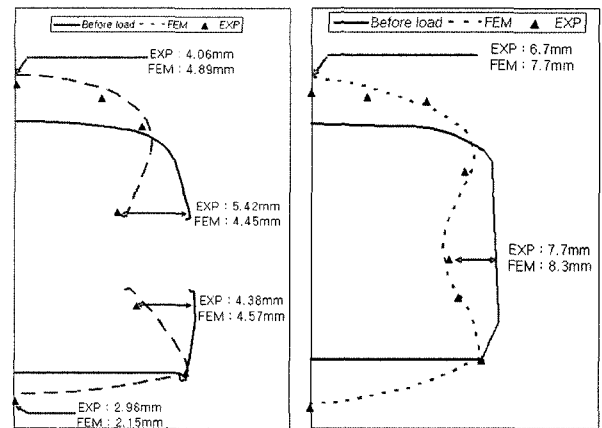


Fig. 11. Vertical deflection of the carbody



(a) Korean tilting train (b) E635 express train of JR[12]

Fig. 13. Sectional deflection of the carbody (A-A section)

에서 삼각형 점은 시험을 통해서 측정치이고 실선은 유한요소해석을 통해 얻어진 것이다. 최대 수직처짐은 사이드실의 중앙에서 발생하였고 해석의 경우 약 8.28mm이고 시험에서 측정된 값은 약 9.25mm로 약 10.5%의 오차를 보였다. 그리고 Fig. 11의 측출입문부위에서의 수직처짐이 해석치와 시험치가 다른 경향을 보이는데 이것은 차체 바닥에 금속재 블록을 적재할 때 Fig. 9(b)와 같이 측출입문부에는 승객의 출입을 위한 계단(step)이 존재하는데 이 때문에 하중적재공간이 협소하여 충분한 블록을 적재하지 못했기 때문으로 판단된다. 이 부분을 제외한 나머지 부분은 시험치와 해석치가 10%이내에서 일치하고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 12는 적재하중에 따른 차체 사이드실의 중앙에서의 수직처짐을 나타낸 것이다. Fig. 12로부터 하중적재에 따라 수직처짐이 거의 선형적인 변형을 하고 있음을 알 수 있었다.

차체 단면변형의 경우 수직 및 횡방향 변형이 최대로 발생하는 차체 중앙부와 차체의 기밀유지에 영향을 줄 수 있는 측출입문부에 대한 변형을 고찰하였다. Fig. 13은 중앙부(A-A section)에서의 단면변형을 확대하여 표현한 것이다.

Fig. 13(a)는 본 연구에서 해석과 시험을 통해 얻어진 단면변형 형상(Fig. 6의 A-A단면)으로 이전에 언급한바와 같

이 차체 측면은 안쪽으로 변형되고 지붕과 바닥은 바깥방향으로 변형함을 알 수 있다. 지붕부위 최대변형은 지붕중앙부에서 해석치의 경우 약 4.89mm이고 시험치는 4.06mm였다. 또한 측면의 경우 창문상단부에서 해석치의 경우 약 4.45mm이고 시험치는 5.42mm, 하단부의 경우 해석치의 경우 약 4.57mm이고 시험치는 4.38mm였다.

본 연구에서 얻어진 결과에 대한 정성적인 검증을 위해 동일본의 E653계 특급전차의 결과[12]와 비교하였다. 정성적인 비교를 한 이유는 차체의 길이, 차체의 구조, 재질 및 중량조건이 다르기 때문이다. E653계의 경우 차체길이가 20m이고 알루미늄 중공 압출재로 제작된 반면 본 연구에서 적용된 차체는 23m로 복합재와 금속재의 혼합구조이다. Fig 13(b)는 E653계의 차체 중앙에서의 단면변형으로 변형의 패턴이 본 연구에서 얻어진 경향과 유사함을 알 수 있다. 그러나 변형량은 지붕중앙부에서 약 6.7mm이고 차체 측면에서 약 7.7mm로 본 연구에서 적용된 차체에 비해 큰 변형을 보이나 이것은 적용하중이 크기 때문으로 판단된다.

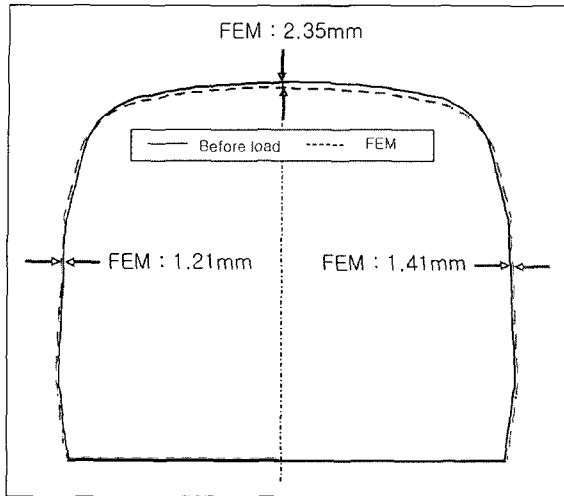


Fig. 14. Sectional deflection of the carbody (B-B section)

차체의 중앙부에서 단면변형에 대한 고찰에 이어서 차체의 측출입문부(Fig. 6의 B-B단면)에 대한 단면 변형을 Fig. 14와 같이 해석결과에 근거하여 고찰하였다. 측출입문부의 경우 큰 변형이 발생할 경우 기밀유지에 어려움이 있으므로 중요하다. 해석결과 전망창이 위치한 측출입문부에서 최대 변형은 약 1.41mm로 중앙부의 변형에 비해 약 26%수준 이었고 반대편의 경우 약 1.21mm 였다. 측출입문부에서 변형이 약간 큰 이유는 전망창설치를 위한 사각형 절단부(cutout)가 존재하므로 강성이 상대적으로 낮기 때문이다. 이상의 변형량은 측출입문부 기밀유지에는 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

### 5. 결론

본 연구에서는 복합재 적용 하이브리드 한국형 텀팅열차용 차체의 변형특성을 고찰하였다. 이상의 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 복합재 적용 차체의 최대 수직처짐은 사이드실의 중앙에서 발생하였고 해석의 경우 약 8.28mm이고 시험에서 측정된 값은 약 9.25mm로 약 10.5%이내의 정도로 일치하였다.
- (2) 차체 단면변형의 경우 차체 중앙부에서 약 4~5mm정도 범위에 있었으며 변형형상이 동일본의 E653계 특급 전차와 유사하였다. 또한 측출입문부위에서는 최대변형은 약 1.41mm로 중앙부의 변형에 비해 약 26%수준 이었다. 이 값은 차량의 기밀유지에는 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.
- (3) 이상의 연구를 통해 복합재를 적용한 하이브리드 철도

차량 차체의 구조적 특성을 고찰할 수 있는 모델을 구축하였으며 시험을 통해서 모델을 검증하였다.

### 참고문헌

1. H. Y. Jeon and R. W. Sung, 1998, "A Study on the Structural Analysis and Test of an Electric Carbody", Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol.15, No.12, pp.28-36.
2. Y. S. Kim, S. H. Park, N. U. Beak and D. S. Kim, 2003, "Development on the Aluminum Carbody for Rubber-Tired AGT Vehicle", Proceedings of the 2003 Spring Conference & Annual Meeting of Korean Society of Mechanical Engineering, pp.1118-1123.
3. S. C. Yoon, K. S. Baik, S. T. Kwon and M. Y. Kim, 2004, "Structure Analysis of Body Structure for Electric Multiple Unit", Proceedings of the 2004 Autumn Conference & Annual Meeting of Korean Society of Precision Engineering, pp.1335-1338.
4. J. D. Chung, J. K. Kim, S. C. Yoon and J. S. Pyun, 2004, "A Safety Evaluation on the Loading Test of EMU's Carbody Having Stainless and Aluminum", Proceedings of the 2004 Autumn Conference & Annual Meeting of Korean Society of Precision Engineering, pp.1525-1528.
5. J. D. Chung, J. K. Kim, J. S. Pyun, W. K. Kim and Y. K. Hong, 2004, "On Study the Safety Assessment of Accident Electric Multiple Unit", Proceedings of the 2004 Autumn Conference & Annual Meeting of Korean Society of Precision Engineering, pp.1105-1108.
6. Y. S. Lee, J. H. Kim, H. C. Lee, K. N. Kil and B. J. Park, 2000, "A Study the Application of 3D Sandwich Composite Structures to the Double-deck Light Train Carbody", Journal of the Korean Society for Railway, Vol.3, No.2, pp.92-99.
7. G. Belingardi, M. P. Cavtorta and R. Duella, 2003, "Material Characterization of a Composite-Foam Sandwich for the Front Structure of a High Speed Train", Composite Structures, Vol.61, pp.13-25.
8. A. M. Harte, J. F. McNamara and I. D. Roddy, 2004, "A Multilevel Approach to the Optimization of a Composite Light rail Vehicle Bodyshell", Composite Structures, Vol.63, pp.447-453.
9. Kim J. S. and Lee S. J., 2005, "Structural Safety Evaluation of An Autoclave Cured Train Carbody with Length of 23m", KSME, Vol.29, No.11, pp.1551-1559.
10. Kim J. S., Lee S. J. and Shin K. B., 2006, "Manufacturing and Structural Safety Evaluation of a Composite Train Carbody", Composite Structures, Accepted for Publication.
11. Kim J. S. and Cheong J. C., 2006, "Natural Frequency Evaluation of a composite Train Carbody with Length of 23m", Composite Science and Technology, Accepted for Publication.
12. Takeshi K., Sumio O., Kentarou M., Kazufumi Y., Tomomichi O., Ryouji I. and Shinichi H., 1999, "Structural Analysis of Railway Car Body Made of Aluminium Hollow Extrusions", JSME, Vol.65, No.636, pp.1770-1838.