

論文

자동무인경전철 복합재 차체 구조물의 구조 시험 및 해석적 검증에 의한 유한요소 모델 도출 연구

고희영*, 신광복**, 김대환***

A Study on Structural Test and Derivation of Standard Finite Element Model for Composite Vehicle Structures of Automated People Mover

Hee-Young Ko*, Kwang-Bok Shin**, and Dae-Hwan Kim***

ABSTRACT

The vehicle structure of Automated People Mover(APM) made of aluminum honeycomb sandwich with WR580/NF4000 glass-fabric epoxy laminate facesheets was evaluated by structural test and finite element analysis. The test of the vehicle structure was conducted according to JIS E 7105. The structural integrity of vehicle structure was evaluated by stress, deflection and natural frequency obtained from dial-gauge and acceleration sensor. And the proposed finite element models were compared with the results of structural test. The results of finite element analysis showed good agreement with those of structural test. Also, in order to improve the stiffness of vehicle structure, the modified underframe model with reinforced side sill was proposed in design stage. The composite vehicle structures with modified underframe model had the improved structural stiffness about 44%.

초 록

WR580/NF4000 유리섬유 에폭시 면재를 갖는 알루미늄 하니콤 샌드위치 복합재가 적용된 자동무인경전철 차체 구조물은 구조 시험과 유한요소 해석에 의해 평가되었다. 구조 시험은 JIS E 7105 규정에 따라 수행되었다. 차체 구조물의 구조 안전성은 다이얼 게이지와 가속도 센서를 통해 얻어진 처짐 및 고유진동수 결과에 의해 평가되었다. 그리고 제안된 유한요소 모델은 구조 시험 결과와 비교 되었으며, 유한요소 해석은 구조 시험과 잘 일치함을 보였다. 또한, 차체 구조물의 강성을 높이기 위해 언더프레임에 보강재가 적용된 모델은 설계단계에서 제안되었다. 보강된 언더프레임 모델을 갖는 복합재 차체 구조물은 구조 강성이 약 44%가 향상되었다.

Key Words: 자동무인경전철(Automated people mover), 샌드위치 복합재(Sandwich composite), 구조 시험(Structural test), 유한요소 해석(Finite element analysis), 구조 안전성(Structural integrity), 파손지수(Failure index)

1. 서론

자동무인경전철(Automated People Mover, APM)은 1970년대에 미국에서 최초로 연구 개발되어 실용화되었으며, 이후 유럽의 영국, 프랑스, 독일 등과 일본에서도 개발되어 운행되었다.

개발 배경으로는 자동차 교통량의 급증으로 인한 교통 체증 및 환경오염의 문제점과 같은 도시교통문제의 해결을 위해 신교통시스템이 제안되어 개발되었다[1-2]. 이에 국내에서도 인구의 도시 집중현상으로 인해 발생하는 문제점들을 해결하기 위해 도심과 부도심 사이에 신개념 대중교통 수단을 도입하는

* 한밭대학교 기계설계공학과 대학원

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

*** 한국화이버(주) 차량사업부

방안으로 자동무인경전철의 개발을 추진 중에 있다[3].

자동무인경전철의 특징으로는 정시성, 안정성, 저공해성, 대량 수송성, 에너지 절감성 등을 갖으며, 기존 철도에 비해 건설비와 건설면적이 적게 든다. 또한 전용 선로에서 자동제어에 의해 완전 무인으로 운행되는 교통시스템으로서 철제 차륜과 고무차륜이 적용되며, 안내방식으로 중앙안내방식과 측면안내방식, 편방안내방식이 사용된다. 이때, 무인운전 시스템은 기존 철도 차량의 운행 시스템에 비해 인력운영비 절감에 있어서 많은 비용의 절감 효과를 얻을 수 있으며, 자동운행 시스템에 의해 기동성 있는 수송수용 대응이 가능하다[4].

현재 국내에서 개발된 자동무인경전철은 고무차륜이 적용되었으며, 경량화를 통한 에너지 효율의 극대화 및 승차 인원의 증대 등을 위해 차체 구조물에 샌드위치 복합재 구조물을 적용하였다. 이때, 샌드위치 복합재는 비강도 및 비강성이 높은 유리섬유/에폭시 적층 복합재 면재에 비중이 낮은 알루미늄 하나킵 심재로 구성되어 있으며, 단일부재로 된 금속재에 비해 굽힘 강성이 높고 피로 수명이 길며, 부식저항성, 불연성, 단열성, 내구성 등이 우수한 특징을 갖는다[5-6].

본 논문에서는 자동무인경전철의 경량화를 위해 샌드위치 복합재가 적용된 차체 구조물의 구조 시험과 유한요소 해석을 통하여 구조 안전성을 비교 평가하여 제시된 유한요소 모델을 검증함으로써, 복합재 무인경전철 차체 구조물의 표준 유한요소 모델을 도출하고, 차량 제작 전에 설계 수정과 보안을 통해 성능 향상을 도모하고자 한다[7-8]. 이때, 차체 구조물에 대한 구조시험은 JIS E 7105 기준에 따라 수행되었으며, 유한요소 해석은 Ansys v11.0을 이용하여 구조시험과 동일한 조건으로 수행하여 제시되었다.

2. 자동무인경전철의 구성 및 제작과정

자동무인경전철은 Fig. 1과 같이 차체에 샌드위치 복합재가 적용되었으며, 굴곡이 심한 전두부에는 적층 복합재를 적용하였다. 이때, 샌드위치 복합재 패널 내부에는 금속 보강재 보를 삽입하여 굽힘 강성을 향상시켰다. Table 1은 자동무인경전철에 적용된 구성 재료를 보여준다.

Fig. 2는 자동무인경전철 복합재 차체의 오토클레이브 성형 과정을 보여준다. 먼저 차체의 형상과 동일한 목형 몰드(wood mould)를 제작한 후에 섬유강화 복합재 몰드(FRP mould)를 적용하여 제작한다. 다음으로 완료된 복합재 몰드에 샌드위치 복합재 구조물에 대한 외피 적층 작업을 수행한 후 진공 백(vacuum bag)을 이용하여 복합재 면재의 층간분리를 방지하기 위해 오토클레이브를 이용하여 최대 2.5bar의 압력과 온도 사이클을 설정하여 성형한다. 그리고 알루미늄 하나킵 심재와 금속 보강재를 삽입 한 후에 내피를 적층하여 외피 성형과 동일한 방법으로 진공 백을 이용하여 압력을 가하고 오토클레이브를 이용하여 성형한다[6].

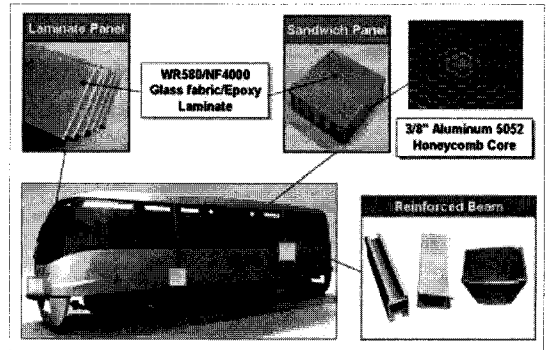


Fig. 1 Manufacturing concept of APM.

Table 1 Materials used to APM vehicle structure

| 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 |

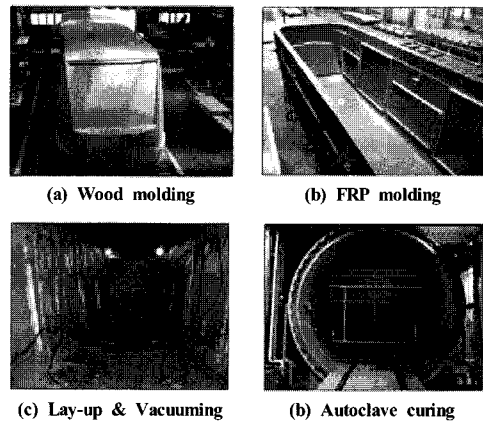


Fig. 2 Manufacturing processes of APM vehicle structure.

3. 자동무인경전철의 구조 시험

자동무인경전철의 구조시험은 JIS E 7105 기준에 의해서 수행하였다[9]. Fig. 3은 복합재 차체 구조물의 구조시험을 위해 설치된 지지대 및 하중 실린더 등의 시험장비의 모습을 보여준다. Table 2는 시험기준에 따른 차체 중량 및 승객 하중을 고려한 각 하중 시험별 적용된 하중 조건을 보여준다.

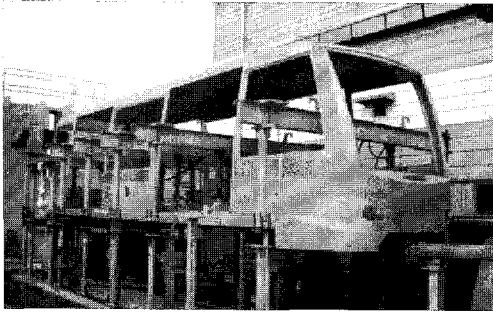


Fig. 3 Test setup for structural test.

Table 2 Load conditions for structural test

| Type | Load condition | Remark |
|----------------------------|---------------------|-----------|
| Vertical load (1) | 220.7 kN | - |
| Compressive load (2) | 63.4 kN+ 490.5kN | (1) + (2) |
| 3-Point supported load (3) | 166.4 kN | - |
| Natural frequency (4) | Bending mode | (1) |

3.1 수직하중 시험

수직하중 시험은 Fig. 4와 같이 언더프레임의 대차가 연결되는 부분에 대해 전방의 2곳은 평평한 블록에 원형롤러를 사용하여 길이방향 변위를 허용하였고, 후방의 2곳은 V홈 블록에 원형롤러를 사용하여 길이방향 변위는 구속하고 회전을 허용하였다. 이때 분포하중은 하중 실린더를 이용하여 차체의 바닥면에 설치된 로딩바에 적용하였다. 수직하중 시험 결과 언더프레임 중앙(center)에서 최대 29.8mm가 발생하였고, 측면(side sill)에서는 최대 20.6mm의 처짐이 발생함을 확인하였다.

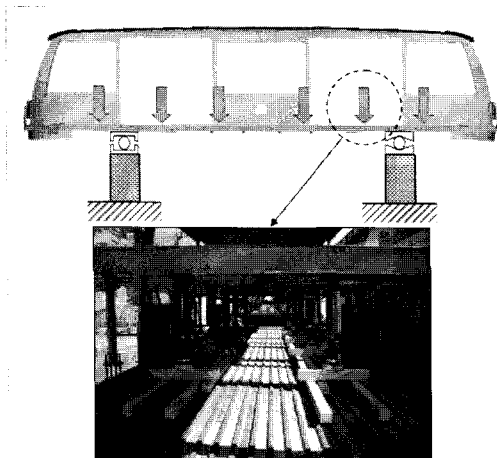


Fig. 4 Test setup of vertical load.

3.2 압축하중 시험

압축하중 시험은 Fig. 5와 같이 언더프레임의 대차가 연결되는 전·후방의 4곳을 평평한 블록에 원형롤러를 사용하여 길이방향 및 회전을 허용하였고, 후방의 연결기가 위치되는 곳은 반력벽에 설치된 지그를 이용하여 길이방향에 대해 구속하였다. 그리고 수직하중이 가해진 상태에서 전방의 연결기가 위치되는 곳에 하중 실린더를 이용하여 압축하중을 가하였다. 압축하중 시험 결과 언더 프레임 중앙에서 최대 7.1mm의 처짐이 발생함을 확인하였다. 이때, 압축하중이 가해지는 연결기 부위의 프레임에 소성변형이 발생함을 확인하였다. 이는 압축하중이 가해지는 하중점에 발생되지 않아야 할 편심이 발생하여 압축하중을 받는 프레임의 소성변형과 국부적 좌굴이 발생된 것으로 판단되었다.

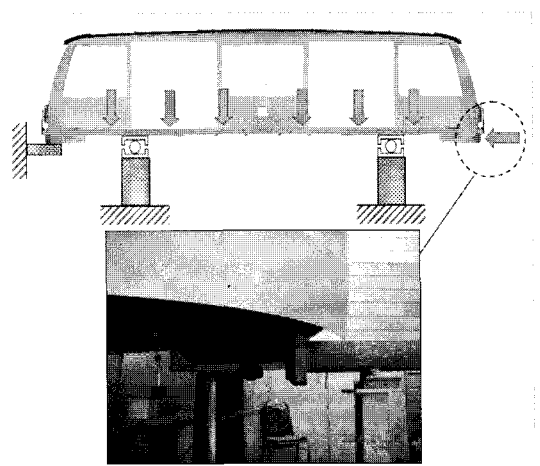


Fig. 5 Test setup of compressive load.

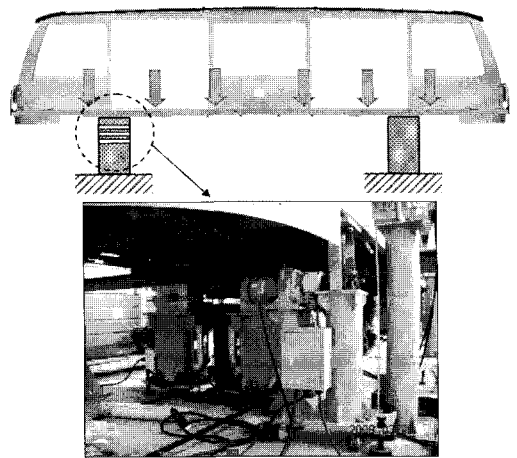


Fig. 6 Test setup of 3-point support load.

3.3 3점지지 하중 시험

3점지지 하중 시험은 Fig. 6과 같이 차체를 이동시킬 때 지지되는 4곳의 잭킹 패드를 지지한 상태에서 하중 실린더를 이용하여 수직하중을 가한다. 이때, 지지점 1곳을 아래로 하강시켜 차체가 3점지지 되도록 하였다. 3점지지 하중 시험 결과 지지점이 내려가는 곳에서 최대 92.5mm의 처짐이 발생함을 확인하였다.

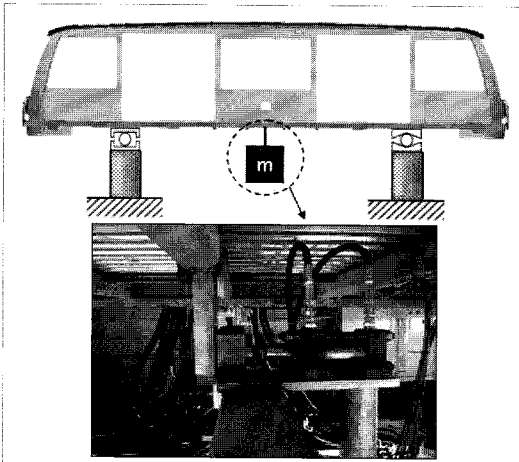


Fig. 7 Test setup of natural frequency.

3.4 고유진동수 시험

고유진동수 시험은 Fig. 7과 같이 수직하중과 동일한 지지조건을 적용한 상태에서 수직하중을 이용하여 차체에 굽힘 변형을 가해준다. 그리고 차체 고정용 지그를 이용하여 차체를 고정시킨 후 순간적으로 지그를 제거하여 굽힘 진동을 발생시켰다[10]. 이때, 가속도 센서를 통해 얻은 1차 굽힘 고유진동수가 8.70Hz가 측정되었으며, 일반적인 철도차량에서 요구되는 10Hz를 만족하지 못하였다.

4. 자동무인경전철의 구조 해석

4.1 유한요소 모델링 및 적용 물성

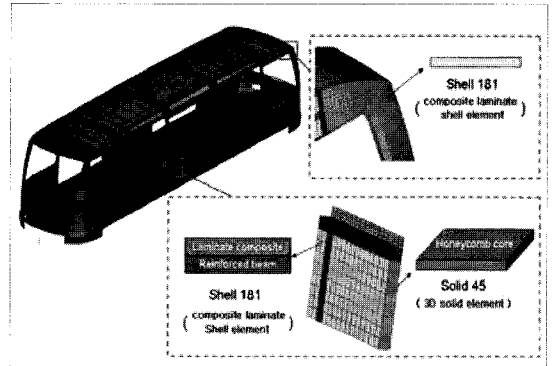


Fig. 8 Finite element model of APM.

자동무인경전철 복합재 차체의 구조해석은 Ansys v11.0을 사용하여 해석을 수행하였다. Fig. 8은 차체 구조물의 유한요소 모델 모습을 보여주며, 이때 4개의 절점과 6개의 자유도를 갖는 복합재 적층 셸 요소(shell 181)를 사용하여 샌드위치 패널의 면재와 적층 복합재 및 보강재와 복합재 면재가 적층된 부분을 모사하였고, 4개의 절점과 6개의 자유도를 갖는 탄성 셸 요소(shell 63)를 사용하여 프레임 압출재를 모사하였다. 그리고 8개의 절점과 3개의 자유도를 갖는 3차원 솔리드 요소(solid 45)를 사용하여 샌드위치 패널의 하니컴 심재를 유효등가손상모델링 하였다. 이때, 사용된 요소는 2차원 셸 요소가 236,120개, 3차원 솔리드 요소가 102,408개이다.

Table 3은 차체 구조물에 적용된 이방성 재질인 유리섬유/에폭시 적층 복합재와 하니컴 심재, 그리고 등방성 재질인 상부 프레임과 언더 프레임에 적용된 금속 보강재에 대한 물성을 나타낸 것이다. 이때, 적층 복합재와 하니컴 심재의 각 방향별 물성은 Fig. 9에 나타나 있듯이 기본 물성 시험을 통해 얻었다.

Table 3 Mechanical properties for the applied materials

| Properties | Orthotropic Materials | | Isotropic Materials | |
|------------------------------|-----------------------|--------------------|---------------------|----------|
| | WR580/NF4000 | Aluminum honeycomb | SUS 400 | SMA 490B |
| Density (kg/m ³) | 1,830 | 59 | 7,850 | 7,850 |
| Elastic modulus (GPa) | E _x | 22.64 | 210 | 210 |
| | E _y | 22.33 | | |
| | E _z | 3.48 | | |
| Shear modulus (GPa) | G _{xy} | 5.85 | - | - |
| | G _{yz} | 1.40 | | |
| | G _{xz} | 1.40 | | |
| Poisson's ratio | ν _{xy} | 0.15 | 0.3 | 0.3 |
| | ν _{yz} | 0.45 | | |
| | ν _{xz} | 0.45 | | |

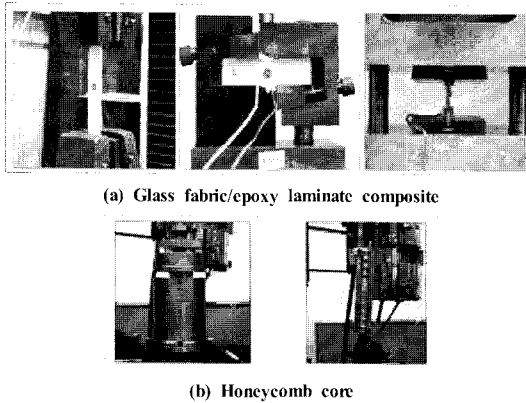


Fig. 9 Mechanical property tests of laminate composite and honeycomb core.

Fig. 10은 유한요소 해석에 적용된 구속 및 하중조건을 보여준다. 이때, 수직하중은 분포하중으로 적용하였으며, 압축하중은 연결기에 적용하였다. 그리고 공기스프링 부분은 높이 방향을 구속하였으며, 길이 방향을 압축하중 반대편의 연결기 부분을 구속하였다. 그리고 3점지지 하중조건을 부여하기 위해 3곳의 잭킹 패드를 구속하고 해석을 수행하였다.

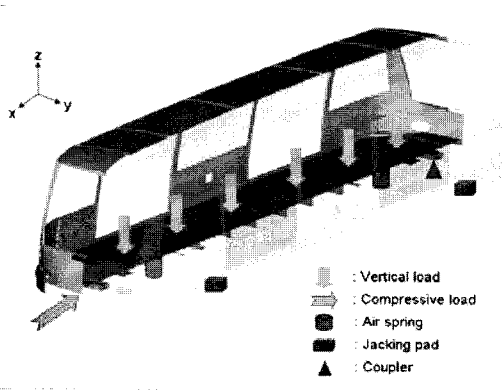


Fig. 10 Boundary and load conditions according to JIS E 7105.

4.2 유한요소해석 결과

유한요소해석 결과는 구조시험에서 측정된 다이얼게이지와 동일한 위치에서 각각 비교하였다. Table 4는 각 시험에서 측정된 최대 처짐과 해석결과를 비교하여 나타낸 것이다. 이때, 수직하중과 3점지지 하중에 대한 결과는 3.1%와 2.7%로 잘 일치함을 확인하였다. 반면, 압축하중에 대한 결과 오차가 47.8%로 나타났으며, 이는 압축시험과정 중에 하중점에서 편심이 발생하여 압축하중을 받는 프레임의 소성변형과 국부적 좌굴이 발생하여 해석 결과와의 오차를 보이는 것으

로 확인하였다. 이는 추후 시험 차량에 대해 시험을 다시 수행하여 결과를 비교할 예정이다. Fig. 11은 수직하중에 의한 언더프레임 측면(side sill)의 처짐을 그래프로 나타낸 것이며, Fig. 12는 3점지지 하중에 의한 언더프레임의 측면(side sill)의 처짐을 그래프로 나타낸 것으로서 시험과 해석에 의한 거동이 잘 일치함을 보인다.

Table 4 Results of deflection for structural test and analysis

| Type | Displacement (mm) | | Error (%) |
|------------------------|-------------------|------|-----------|
| | Test | FEA | |
| Vertical load | 29.8 | 30.7 | 3.1 |
| Compressive load | 7.1 | 3.7 | 47.8 |
| 3-Point supported load | 92.5 | 90.0 | 2.7 |

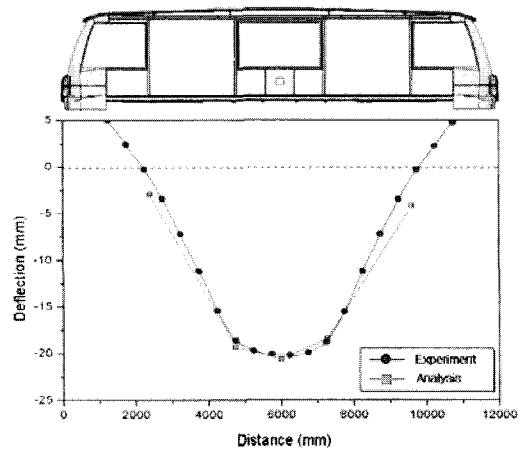


Fig. 11 Deflection graph of vertical load(side sill).

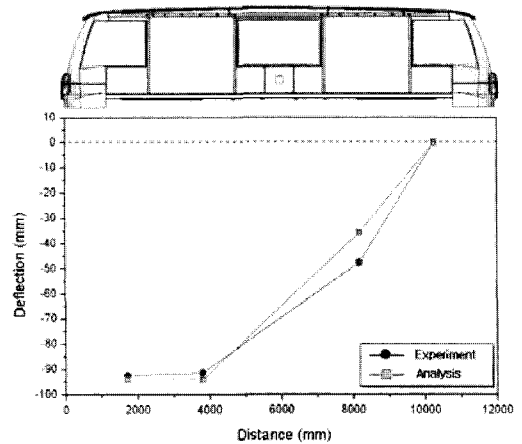


Fig. 12 Deflection graph of 3-point support load(side sill).

고유진동수 해석 결과는 Table 5에 나타나 있듯이 1차 굽힘 고유진동수 결과가 8.78Hz로 시험에서 측정된 8.70Hz와 오차가 0.9%로 잘 일치함을 확인할 수 있다.

Table 5 Natural frequency for 1st bending mode

| Type | Natural frequency (Hz) | | Error (%) |
|------------------------------|------------------------|------|-----------|
| | Test | FEA | |
| 1 st Bending mode | 8.70 | 8.78 | 0.9 |

Table 6은 차체 구조물에 적용된 적층 복합재의 파손을 평가하기 위해 층간접근방법 파손기준식 중 하나인 Tsai-Wu 파손기준식을 이용하여 나타낸 것이다. 이때, 각 시험 조건에서 Tsai-Wu 파손 지수는 1을 넘지 않음을 확인하였다. Fig. 13은 수직하중 해석에서의 Tasi-Wu 파손 지수 분포를 보여준다.

Table 6 Results of failure index according to loading conditions

| Type | Failure index | Requirement | State |
|------------------------|---------------|-------------------|-------|
| Vertical load | 0.224 | Failure index < 1 | safe |
| Compressive load | 0.005 | | |
| 3-Point supported load | 0.907 | | |

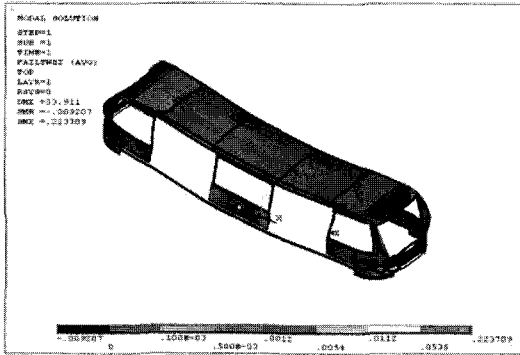


Fig. 13 Contour of Twai-Wu index for vertical loading condition.

4.3 제시된 유한요소 모델을 이용한 설계모델의 보완 제시

자동차무인경전철 차체 구조물의 구조 시험과 해석 결과의 비교를 통하여 유한요소 모델의 검증을 수행하였고 잘 일치함을 확인하였다. 이때, 구조 시험과 해석을 통하여 복합재 차체 구조물의 굽힘 강성이 낮음을 확인하였고, 이를 보완하기 위해 Fig. 14와 같이 굽힘 강성에 큰 영향을 미치는 언더프레임에 보강된 모델을 적용하였다. 그리고 보강재의 두께 및 크기가 무게 대비 가장 효율적인 모델을 선정하여 수직하중 해석과 고유진동수 해석 결과를 비교하였다.

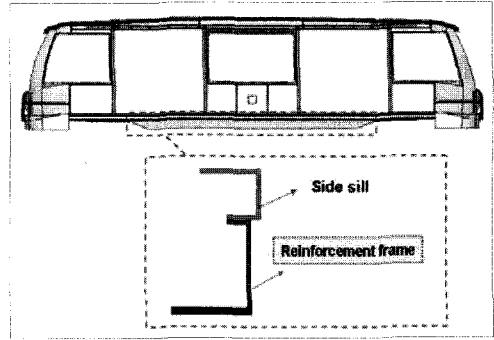


Fig. 14 Modified model with reinforced side sill.

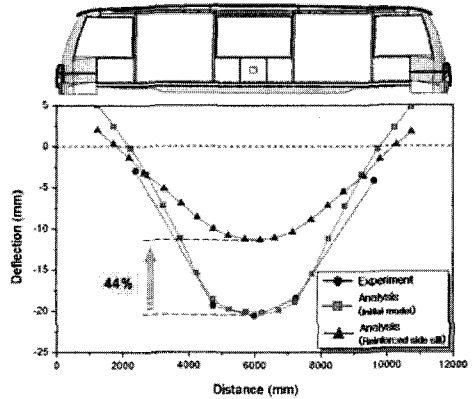


Fig. 15 Deflection graph of vertical load for modified model with reinforced side sill.

Fig. 15는 언더프레임이 보강된 모델에 대한 수직하중 해석 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 이때, 초기 모델의 사이드 실에서의 최대 처짐은 20.2mm 나타난 반면 보강된 모델에서는 11.3mm가 나타나 처짐 결과가 44% 향상됨을 확인하였다. 그리고 고유진동수 해석 결과는 Fig. 15에 나타나 있듯이 1차 굽힘 고유진동수 결과가 10.75Hz가 나타나 철도시험 기준인 10Hz를 만족하였으며, 초기 모델에 비해 22%가 높아짐을 확인하였다

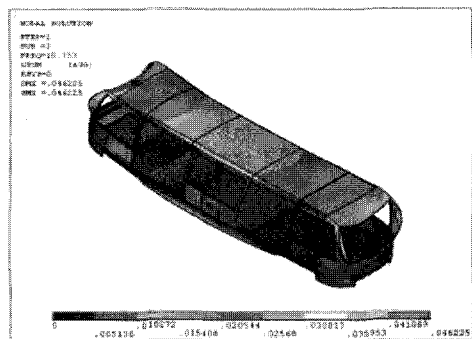


Fig. 16 1st bending mode for modified model with reinforced side sill.

자동무인경전철의 구조 시험과 유한요소 해석 결과의 비교를 통하여 복합재 차체 구조물의 특성을 평가하고 검증된 유한요소 모델을 도출하였다. 그리고 도출된 유한요소 모델을 이용하여 설계가 보완된 모델에 대해 해석적으로 특성을 평가하였다. 이에 초기 설계된 차체 구조물의 굽힘 강성은 1차 굽힘 고유진동수 결과가 10Hz 이하로 낮은 특성을 보였으나, 언더프레임이 보강된 유한요소 모델을 통하여 굽힘 고유진동수가 10.75Hz로 높아짐을 확인하였고, 이를 시험차에 적용하여 굽힘 강성을 높였다. 그리고 제시된 유한요소 모델을 통해 설계가 보완된 완성차(proto type)를 제작하여 구조 시험과 해석 결과가 잘 일치함을 확인하였으나, 제작사의 보안 요청으로 인해 결과는 나타내지 않았다. 따라서 자동무인경전철과 같이 복합재가 적용된 차체 구조물의 개발 시에 검증된 유한요소 모델을 사용하여 소요되는 제작비용 및 기간을 절감할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 샌드위치 복합재와 적층 복합재가 적용된 자동무인 경전철 차체 구조물에 대해 구조 시험과 유한요소 해석을 통하여 특성 평가 및 검증된 유한요소 모델을 도출하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 구조 시험은 JIS E 7105 규정에 따라 수행되었으며, 복합재 적용 차체 구조물에 대해 수직하중, 압축하중, 3점지지 하중, 고유진동수 시험에 대해 처짐 및 고유진동수를 각각 측정하였다.
- (2) 유한요소 해석은 셸 요소(shell 181 & shell 63)와 솔리드 요소(solid 45)를 사용하여 차체 구조물을 모델링하였으며, 시험과 해석 결과가 압축하중의 경우를 제외하고 잘 일치하는 검증된 유한요소 모델을 도출하였다.
- (3) 복합재 적용 차체 구조물의 강성을 높이기 위해 언더프레임이 보강된 모델에 대해 구조 해석을 수행하였으며, 이를 통해 처짐 및 고유진동수 결과가 향상됨을 확인하였다.
- (4) 자동무인경전철과 같은 복합재 적용 차체 구조물의 개발 시에 검증된 유한요소 모델을 사용하여 제작비용 및 기간의 절감 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) 김경철, 김용일, 고주연, “도시철도망 확충을 위한 무인 자동운전도시철도(AGT) 조사 보고서,” 도시철도자료집4, 1999.
- 2) Hiroyuki, M., Masahisa, M., Yasuyuki, S., Makoto, K.,

- Shinichi, S., Hiroyuki, K. “Automate People Mover System ‘Crystal Mover’ for Singapore’s LTA,” Mitsubishi Heavy Industries Ltd. Technical Review, Vol. 40, 2003, No. 3.
- 3) 구정서, 한형석, 조현직, “고무차륜 경량전철의 충돌안전도 연구,” 한국철도학회지, 제5권, 제4호, 2002, pp. 99-105.
- 4) 이기승, 백진기, 구자성, 정종성, 김현정, “환경친화적 경량전철 설계,” 한국철도학회 추계학술대회 논문집, 2000, pp. 126-130.
- 5) J. R. Vinson, “The Behavior of Sandwich Structures of Isotropic and Composite Materials,” 1993, pp.11-22.
- 6) 신광복, 이상진, 한성호, “오토클레이브 성형기법을 이용한 하이브리드 복합재 차체 제작 기술 연구,” 한국복합재료학회, 제18권, 제2호, 2005, pp. 52-58.
- 7) 김정석, 이상진, “오토클레이브 성형된 길이 23m 복합재 철도차량 차체의 구조적 특성평가,” 대한기계학회, 제29권, 제11호, 2005, pp. 1551-1559.
- 8) 황원주, 구병춘, 김형진, 정종덕, “유한요소해석 및 실험에 의한 알루미늄 차체구조강도 평가,” 한국철도학회, 2004, 춘계학술대회 논문집, pp. 76-82.
- 9) Japanese Industrial Standard (JIS) E 7105, Test Methods for Static Load of Body Structures of Railway Rolling Stock, 1994.
- 10) 김정석, 정종철, 조세현, 서승일, “복합재 철도차량 차체 고유진동수에 대한 해석 및 시험적 연구,” 대한기계학회, 2006, 제30권, 제4호, pp. 473-480.