

모듈형 복합재 전두부가 적용된 전동차의 구조해석 연구

A Study on Structural Analysis of an Aluminum Electric Motor Car with a Modular Front End made of composite materials

노규석*, 구정서*, 이현순*
K. S. Rho, J. S. Koo, H. S. Lee

ABSTRACT

In this study, an aluminum electric motor car with a modular front end made of composite materials is numerically evaluated applying the standard specifications for the urban EMU(Electric Multiple Unit) train. Structural analyses under compressive load, torsional load and free vibration satisfy the standard specifications, but analysis under normal load doesn't. By the way, the aluminum bodyshell of the car except the modular front end is almost same to that of the Korean standard EMU, which satisfy the standard specifications. It is presumed that the stiffness of the modular front end made of composite materials has some influence on the strength of the aluminum bodyshell.

1.서론

대중의 대량 수송 수단인 철도차량은 고 신뢰성과 20년 이상의 장기적 사용에 대한 내구성이 필요하고, 제품 원가와 유지보수 비용이 저렴해야 한다. 이러한 이유로 재료비가 고가이고 제작이 어려운 신소재의 활용이 소극적[1]이었으나, 최근 들어 복합재료에 대한 많은 연구가 진행되면서 철도차량에의 도입이 시도되고 있다.

철도차량에 복합재료를 사용하는 이유는 낮은 비중량에 따른 경량화의 효과가 크고[2,3], 금속으로 성형하기 어려운 객실 끝단(cab ends), 앞단부(nose section)와 같은 복잡한 부분을 용이하게 제작할 수 있다는 점이다. 그러나, 저렴한 제조비용, 유지보수의 용이성, 작업의 편리성 그리고, 안전성을 종합적으로 고려하여 재료를 선정하여야 한다. 외국에서는 이미 복합재료를 이용한 차체 경량화에 관한 연구가 많이 진행되고 있는데, Suzuki[4]는 벌집(Honeycomb)구조로 된 열차와 복합재료로 된 열차를 제작하여 굽힘실험, 압력실험을 수행하여 그 타당성과 문제점을 제시하였다. Matsuoka와 Nakamura[5]는 열차의 경량화를 위한 재료를 선정하였고 선정된 알루미늄과 복합재료의 시편실험을 통해 접합방법을 제안하였으며, 실제 열차의 구조에 적용했을 때 얻을 수 있는 효과를 비교해 보았다. Lewis[6]는 GRP 튜브로 보강된 열차 차체의 파괴거동을 파악하기 위해 여러가지 사고유형에 따른 정적시험과 동적시험을 하였다. 또한, 최근에는 국내에서 유리섬유 복합재를 사용하여 2층 객차의 차체 구조설계를 시도한 연구 사례[2,3]도 있다.

본 연구는 한국화이버에서 개발한 모듈타입의 복합재 전두부를 국내 지하철의 표준 전동차 차체에 적용하여 도시철도 표준화 규정에 따라서 수평, 수직 및 비틀림 하중에 대한 정적 구조강도 해석과 차체의 고유 진동수 해석을 수행하고 복합재 전두부가 전체 구조의 강도 설계에 미치는 영향을 분석하였다.

* 한국기계연구원 신교통기술연구부, 정회원

2. 하중 및 구속조건

2.1 수직 하중조건

차량이 운행하는 도중에 받을 수 있는 최대의 수직 하중조건은 최대 승객하중에 동하중 계수를 적용하여 구하며, 이 때의 최대값이 허용응력 이내이어야 한다[8]. 이때 경계조건은 차체 볼스터 하부에 단순지지되는 구속조건을 설정한다. Table 1은 지하철 표준전동차의 수직하중 조건을 나타낸 것이다.

Table 1 Normal load conditions of the urban train standard specifications

차량종류	수직하중	계산식
표준전동차	53,020 kgf	(공차하중 + 최대승객하중 - 대차하중) × (1 + 동하중계수) - 차체하중

2.2 고유진동수 해석

차량 주행시 대차와의 공진 현상 회피, 차체의 과도한 처짐 방지, 승객의 승차감 향상 등을 위하여 도시철도 표준 사양에서는 차체의 고유진동수를 10 Hz 이상으로 제한하게 된다[8]. 실차 시험에서는 차체에 자유 진동을 유발하기 위하여 차체의 중앙부 하단에 부하를 가하고 있다가 순간적으로 제거하는 방법을 사용하며, 수치해석에서는 수직하중 조건의 경우와 유사하게 볼스터 부분에 단순지지 구속조건을 사용한다.

2.3 비틀림 하중조건

차량이 곡선부나 선로가 불균일한 구간을 주행하는 경우 차체에 비틀림 변형이 발생하는데, 이것을 평가하기 위해서 4 ton.m의 비틀림 하중을 작용한다[8]. 차체의 지지는 차체 한쪽의 볼스터 중심선 상에 2곳을 지지대로 지지한 후 고정 프레임으로 고정시키고, 반대편 차체의 볼스터 중심 위치에 비틀림 프레임을 넣고 양 측면에 짝힘을 가한다.

2.4 압축 하중조건

연결(coupling)이나 조차(shunting)와 같이 연결기를 통하여 전달되는 압축하중에 대하여 차체의 설계강도를 평가하여야 하는데, 이를 위해서 연결기 브라켓 부위에 50 ton의 하중을 가한다[8]. 이때 경계조건은 한쪽의 연결기 브라켓을 50 ton으로 압축하고 반대편의 연결기 브라켓 체결부를 구속한다.

3. 차체구조의 정적강도 해석

3.1 수직 하중조건 해석

3차원 구조강도 해석을 수행하기 위하여 Fig. 1과 같은 유한요소 모델을 생성하였는데, 전두부에는 불연성 복합재인 Glass/Phenol(cloth 0°[10 ply] : 0.57 mm/ply)을 사용하였고, 차체에는 알루미늄 합금인 A6005A를 사용하였다[9,10]. 본 유한요소 해석 모델은 요소의 평균 크기가 60~70 mm 정도인 57,997개의 셀과 44,612개의 절점으로 구성되었다.

Fig. 2는 수직 하중조건에 대한 구조해석 결과와 복합재 전두부와 Al 차체 연결부의 응력 분포를 확대하여 나타낸 것이다. 최대응력은 14.0 kgf/mm²으로 전방 출입문의 기둥 하부와 두번째 출입문 상부에서 발생한다. 이것은 부재에 사용된 재료 A6005A의 강도기준(모재부 허용응력 : 12.4 kgf/mm²)을 초과하므로, 두께를 증가시키거나 부재로 보강하여야 강도기준을 만족시킬 수 있다. 그러나 전체 알루미늄 차체를 사용한 한국형 표준전동차의 경우에는 최대 응력이 8.6 kgf/mm²가 발생하였으므로[11] 복합재 전두부의 채용이 차체의 국부 응력 증가에 큰 영향을 미

침을 알 수 있다. Fig. 3은 차체 연결부를 확대한 그림인데, 점선으로 표시한 부분이 최대 응력 부위이고, 크기가 7.61 kgf/mm^2 이므로 부재에 이용된 재료(A6005A : 8.7 kgf/mm^2 , #650/Phenol : 12.7 kgf/mm^2)의 강도기준 이하이다. 그러나, 이 부위는 전두부와 차체의 연결부로서 매우 중요한 부분인데, 본 해석에서는 완전결합(perfect bonding) 조건을 사용하여 해석하였으므로 볼트 등을 사용하여 체결하는 설계할 때는 보강 부재를 첨가시키거나 두께를 증가시켜서 국부적으로 발생하는 응력을 저감시키는 설계 기법이 필요하다.

Fig. 4는 복합재 전두부와 Al 차체 연결부의 최대 응력발생 부위에 대하여 각 유한요소 절점에서의 F- δ 및 M- δ 를 표현하기 위해서 나타낸 것이다. 이 부위에서 절점력의 최대 크기는 F_x 가 210.01 kgf 로 나타났고, 최대 Moment는 X방향으로 $-232.19 \text{ kgf} \cdot \text{mm}$ 이다. 이 결과는 전두부와 차체의 접합부 설계에 필요한 기초자료로 사용될 것이다.

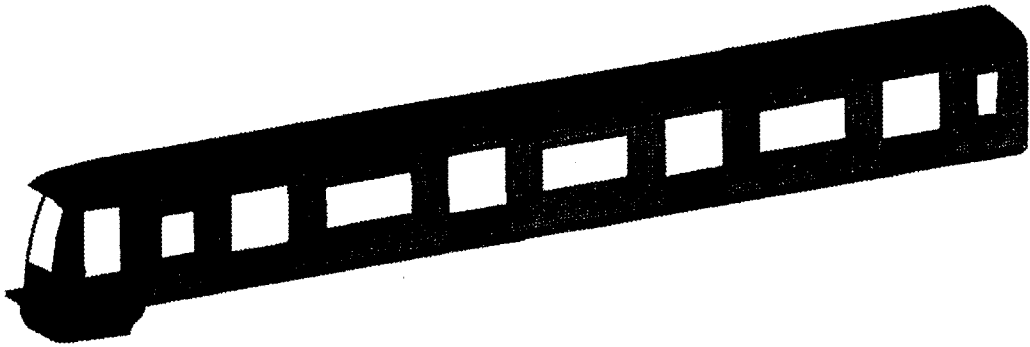


Fig. 1 F. E. Model used in strength analysis

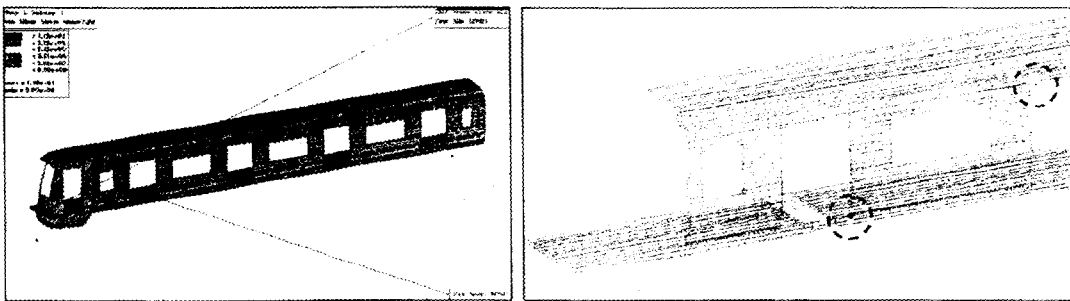


Fig. 2 Stress distribution for the normal load condition

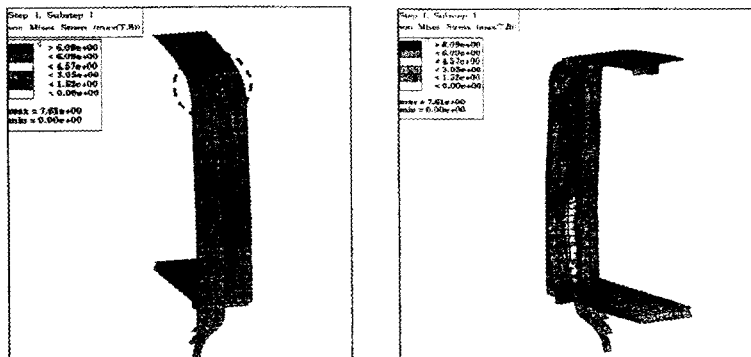


Fig. 3 Stress distribution for bonding parts of the composite front end and the AL car body

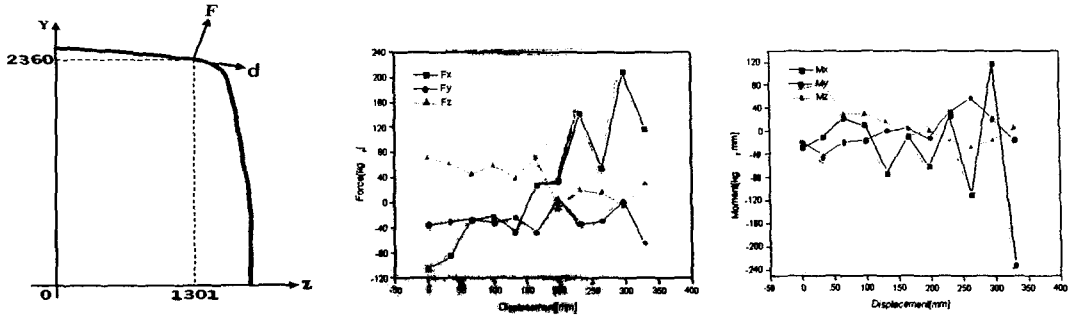


Fig. 4 Distribution of Force & Moment for the compressive load condition

3.2 고유진동수 해석

Fig. 5는 전체 차량의 굽힘 고유진동 모션형상을 나타낸 것인데, 굽힘 고유 진동수는 14.686 Hz(표준전동차의 경우 11.3 Hz)이다. 이는 설계 기준인 10 Hz 이상이므로 설계조건을 만족한다.

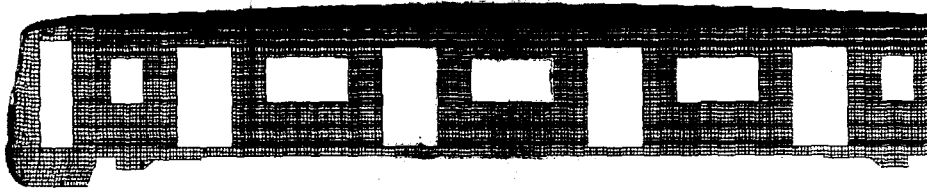


Fig. 5 1st bending mode shape of the car body in the free vibration analysis

3.3 비틀림 하중조건 해석

Fig. 6은 비틀림 하중조건에 대한 구조해석의 응력 분포를 나타내었는데, 복합재 전두부와 AI 차체의 연결부는 확대하여 나타냈다. 이때, 최대응력은 6.58 kgf/mm^2 (표준전동차의 경우 1.40 kgf/mm^2) 으로 차체 연결부에서 발생하였는데, 부재에 이용된 재료의 강도기준(A6005A : 8.7 kgf/mm^2 , #650/Phenol : 12.7 kgf/mm^2) 이하임을 알 수 있다. 그러나, 이 결과는 전두부와 차체가 완전히 결합되었다는 가정하에서 구조해석 되었으므로 추후 조인트 설계를 완료한 후에 이 부분을 상세하게 모델링하여 재평가하여야 한다.

Fig. 7은 최대 응력 발생부위에 대하여 F- δ 및 M- δ 로 나타낸 것이다. 이 부위에서의 최대 Force는 Z방향으로 65.66 kgf 이고, 최대 Moment는 Z방향으로 128.53 kgf·mm 이다.

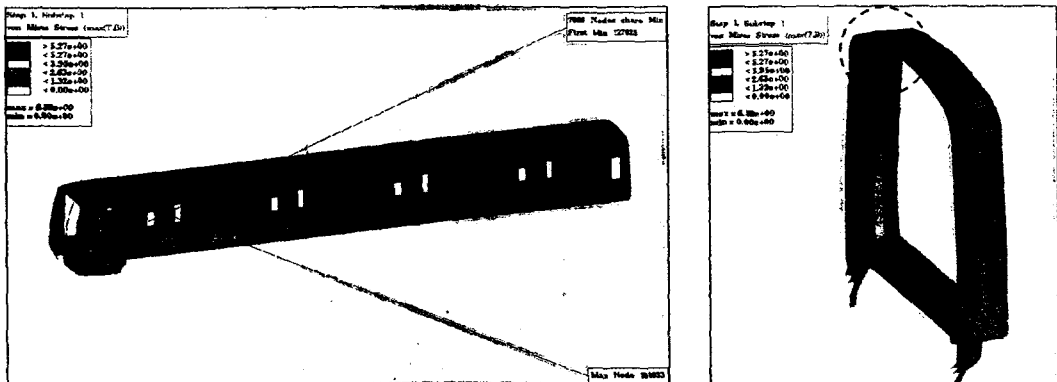


Fig. 6 Stress distribution for the torsional load condition

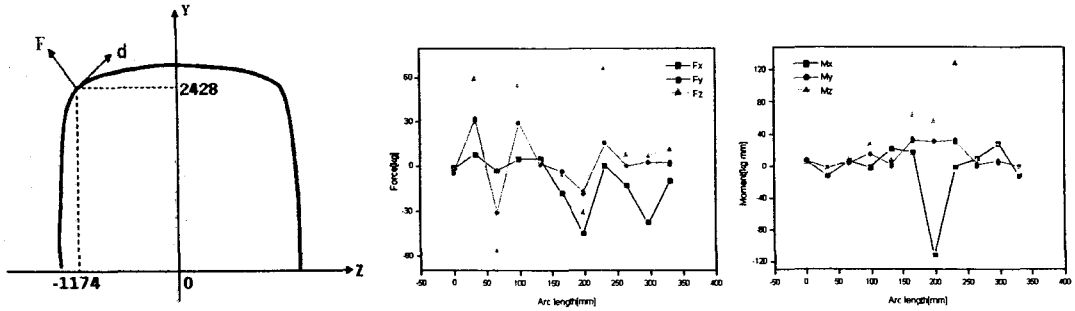


Fig. 7 Distribution of Force & Moment for the torsional load condition

3.4 압축 하중조건 해석

압축 하중조건 해석은 50 ton의 하중을 연결기 취부에 작용시켜서 해석하는데, 그때의 최대응력 분포는 Fig. 8에서 보여주는 것과 같이 coupler 취부임을 알 수 있다. 발생된 최대응력은 12.0 kgf/mm²으로, 부재에 이용된 재료의 강도기준(A6005A : 모재부 12.4 kgf/mm²)에 근접하는 수준이다. 또한, 복합재 전두부와 Al 차체 연결부의 응력분포를 볼 때, 최대응력의 크기는 5.84 kgf/mm²(표준전동차의 경우 5.61kgf/mm²)으로 부재에 이용된 재료의 강도기준(A6005A : 8.7 kgf/mm², #650/Phenol : 12.7 kgf/mm²)보다 낮은 수준이다. 그러나, 전두부와 차체가 완전 결합이라고 가정하여 해석한 것이므로, 추후 상세 설계한 후 재평가를 하여야 한다.

Fig. 9는 복합재 전두부와 Al 차체 연결부의 압축 하중조건에 대한 최대 응력 발생 부위를 나타낸 것이다. 최대 응력 부위에서 F_Y는 -256.55 kgf 이고, M_X는 19.83 kgf · mm 이다.

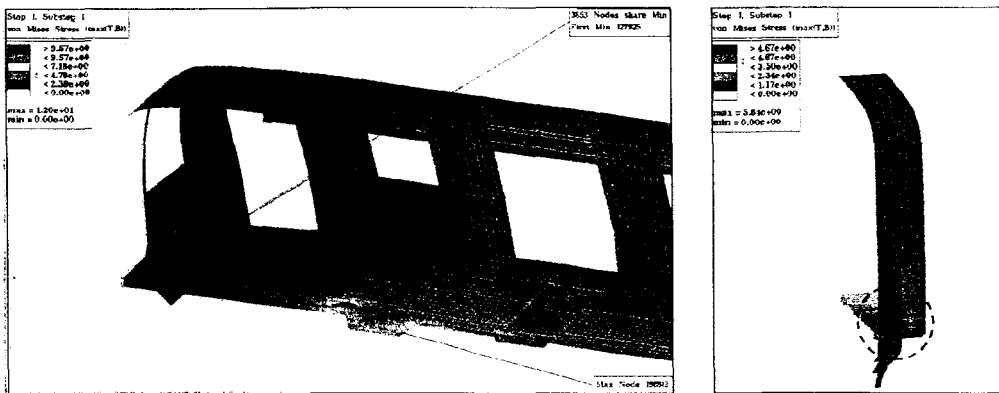


Fig. 8 Bonding parts for the compressive load condition

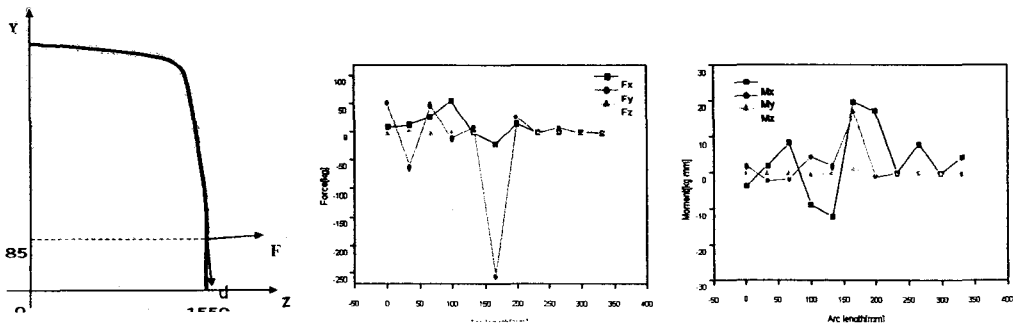


Fig. 9 Distribution of Force & Moment for the compressive load condition

4. 결론

본 연구에서는 한국화이바(주)에서 설계하여 홍콩 지하철에 적용하였던 모듈 타입의 복합재 전두부를 한국형 표준 전동차 차체에 적용하여 도시철도 표준화 규정에 의하여 정적강도 해석을 수행하였다. 이 해석에서는 국내에서도 모듈형 복합재 전두부를 도입할 때, 차체의 강도 설계 측면에서 발생할 수 있는 문제점을 검토하기 위함이었다, 본 해석 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 기존의 일체형 차체에 모듈형 복합재 전두부를 채용하면, 수직하중 조건과 비틀림 하중 조건에서 최대 응력 상승이 심하게 발생한다. 본 해석의 경우, 수직하중에서 62%, 비틀림 하중에서 370% 정도로 최대응력이 상승하였다.
- 압축하중 조건에서는 최대응력 상승 효과가 미미하였고, 굽힘 고유 진동수의 경우, 전두부 부분의 경량화로 인하여 오히려 감소하였다.
- 모듈형 전두부와 알루미늄 압출재 차체를 접합하는 부위에서는 수직 하중조건이나 비틀림 하중 조건에서는 완전접합을 가정하여도 전두부와 차체가 만나는 곳의 응력이 설계 기준치에 근접하므로, 조인트 설계시 국부 응력을 완화시킬 수 있는 대책이 필요하다.

참고문헌

1. 최진민 외, "대형구조시스템 최적화 및 성능 평가 기술 개발-세부과제 VI : 소재 대체를 이용한 차체 경량화 설계 기술 개발", 과기처 시행 특정연구 개발사업 연구보고서, 한국기계연구원, 1995
2. 이영신, 김재훈, 이호철, 길기남, 박병준, "3-D 복합재료 샌드위치 구조물의 2층 경전철 철도차량 구조체 적용성에 관한 연구", 한국철도학회논문집, 제 3권, 2p 2호, pp. 92-99, 2000
3. 이영신, 김재훈, 박병준, 길기남, 주정수, "복합재료 2층 기차의 응력해석", 한국 철도학회 춘계 학술대회 논문집, pp.75-82, 1999
4. T. Suzuki, K. Satoh and K. Akutstu, 1993, "Weight Reduction of a Railway CarBody Shell by Applying New Materials," Proceedings of the International Conference on Speed-up Technology for Railway and Maglev Vehicles, Vol. 1, pp. 459-463
5. S. Matsuoka and T. Nakamura, 1993, "Development of Carbon Fiber Reinforced Plastic Carbody Shell, "Proceedings of the International Conference on Speed-up Technology for Railway and Maglev Vehicles, Vol. 1, pp. 464-468
6. J. H. Lewis, 1994, "Development of Crashworthy Vehicle Structures for Railways, " Proceedings of the World Congress on Railway Research(WCRR'94), Vol. 2, pp. 893-900
7. D. C. Lee, J. H. Byun and Y. R. Lee, 1995, " Current Status and Future Trend of Automobile Outer Panels Using Engineering Plastics, " Advance, March, pp. 2-11
8. JIS E 7105, "철도차량 구체의 하중시험 방법", 일본공업규격협회, 1989
9. 한석운 외, 경량전철시스템 기술개발사업 1차년도 연구결과보고서, 경량전철 차체개념설계 및 구조해석, 한국철도기술연구원, 2000. 5.
10. 구정서, 노규석, 박성하, 도시철도차량 충돌안전기준 제정에 관한 연구, 한국기계연구원 보고서, 1999. 12.
11. 권태수, 이호용, 이관섭, 최성규, "표준전동차 개발을 위한 구조체의 강도 해석," 한국철도학회 추계학술대회, pp. 455-463, 1998.