

등가강성과 Shell 요소를 이용한 분산형 고속전철의 차체 진동 해석

Vibration Analysis of High-Speed EMU Car Body Using Equivalent Stiffness and Shell Element

백승국* 신범식** 최진환*** 이상원**** 최연선**** 구자춘†
Baek, Seung-Guk Shin, Bum-Sik Choi, Jin Hwan Lee, Sang-Won Choi, Yeon-Sun Koo, Ja-Choon

ABSTRACT

High-speed EMU under development vibrates more than a articulated high-speed train since power units are attached on each vehicle and railway vehicle. In this study, anisotropic equivalent stiffness of a aluminum extrusion plate were calculated to know and predict vibration characteristic of High-speed EMU under development. Eigen frequencies and modal shape of high speed train vehicle were calculated. And vibration generated was predicted at each position of vehicle when vehicle was operating.

1. 서 론

현재 개발되고 있는 고속전철은 동력분산형이다. 동력분산형은 동력원이 각 차량에 부착되어 있기 때문에 진동 문제가 존재한다. 따라서 설계 단계에서 분산형 고속전철의 진동 특성이 고려되어야 한다. 그러나 고속전철의 차체는 경량화를 위하여 알루미늄 압출재 차체를 사용하고, 차체의 길이에 비해 얇은 박판이 복잡한 형상을 이루고 있어 해석상의 어려움이 있다. 이를 해결하기 위하여 기존의 연구는 차체의 일부를 해석하거나 대칭형 모델을 사용하였다.

이상윤[1]등은 정하중 해석법과 모드해석법을 통하여 알루미늄 압출재의 등가강성을 도출하였고, 해석법에 따른 등가강성에 대한 고유진동수를 비교함으로써 상호 평가하였다. 또한 장창두[2]등은 알루미늄 압출재의 등가물성 유한요소 모델에 필요한 물성을 등가강성법을 통하여 산정하였다. 허현무[3]등은 알루미늄 압출재를 적용한 2층 열차 차체를 1/2로 모델링하였다. 황원주[4]등은 알루미늄 차체구조강도를 평가하기 위하여 통근형 직류전동차 차체 전체에 대한 쉘요소(Shell element) 유한요소모델을 생성하여 취약부위에 대한 응력값을 검토하여 평가하였다.

본 연구에서는 개발 중인 분산형 고속전철 차체의 진동특성을 파악하고, 이를 통한 차량의 진동량을 예측하기 위하여 알루미늄 압출구조물에 대한 이방성 등가강성을 계산하였다. 등가강성을 갖는 고속전철 차량의 고유진동수와 모드형상을 계산하였다. 또한 차체의 주요 진동전달 위치에 주행 중 발생하는 힘으로 가진하고, 진동량을 측정하였다. 검증을 위하여 한국형 고속열차의 모델에 모드해석을 수행 하였으며, 분산형 고속전철에 적용하여 진동량을 예측하였다.

† 책임저자 : 정희원, 성균관대학교, 기계공학, 교수

E-mail : jckoo@skku.edu

TEL : (031)290-7910 FAX : (031)290-5889

**** 정희원, 성균관대학교, 기계공학, 교수

*** 정희원, 경희대학교, 기계공학, 교수

** 정희원, 성균관대학교, 기계공학, 박사과정

* 비희원, 성균관대학교, 기계공학, 석사과정

2. 등가강성 평판

2.1 등가물성치 산출

이상윤과 이우식 [1]은 실험적으로 골판지의 등가 물성치를 산출한 Luo와 Shuling [5]의 정하중 해석법을 전산해석을 통하여 알루미늄 압출재의 등가 물성치를 산출하였다. 본 연구에서는 이와 동일하게 이방성을 갖는 알루미늄 압출재의 등가물성치를 굽힘시험과 비틀림시험을 이용하여 도출하였다. 알루미늄 압출재의 형상을 그림 1과 같다. x, y좌표축은 기준좌표계를 나타내며, 1, 2 좌표축은 코어(core)의 방향을 나타낸다. 등가물성치를 산출하기 위하여 4가지의 시험을 전산해석을 통하여 시행하였다.

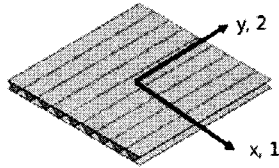
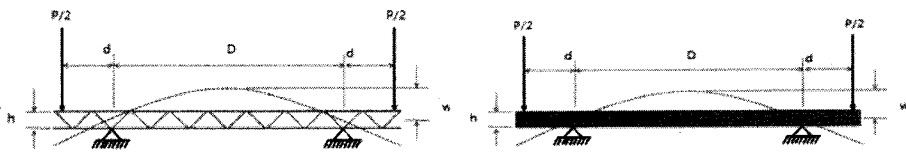


그림 1. 알루미늄 압출재 형상

그림 2(a)와 같이 굽힘시험을 시행하고 식(1)을 이용하여 굽힘강성(E_{11})을 구하였다. 평판 시편의 양쪽 끝에 동일한 수직 방향의 힘을 가하고 끝으로부터 안쪽으로 일정거리를 단순지지 하였다. 코어의 수직방향에 대한 굽힘강성(E_{22})도 그림 2(b)와 같이 방향만을 바꾸어 식(1)을 이용하여 동일 방법으로 구하였다.

$$E_{11} = \frac{3dPD^2}{4bh^3w} \quad E_{22} = \frac{3dPD^2}{4bh^3w} \quad (1)$$

여기서, d 는 가해지는 힘과 지지점의 거리이고, $P/2$ 는 가해지는 힘, D 는 지지점 사이의 거리, b 는 알루미늄 압출재의 폭, h 는 알루미늄 압출재의 두께, w 는 알루미늄 압출재 중앙의 처짐이다.



(a) 코어 수직 방향

(b) 코어 방향

그림 2. 굽힘시험

비틀림강성(G_{12})을 측정하기 위하여 비틀림시험을 시행하였다. 비틀림시험은 그림 3(a)와 같이 세 지점을 단순지지하고 나머지 한 지점에 수직 방향의 힘을 가하였다. 비틀림강성은 시험값을 식(2)에 적용함으로써 도출하였다.

$$G_{12} = \frac{4h^3w}{3Pa^2} \quad (2)$$

여기서, h 는 알루미늄 압출재의 두께이고, w 는 알루미늄 압출재 중앙의 처짐, P 는 지지되지 않은 한 지점에 가하는 수직 방향의 힘, a 는 정사각 알루미늄 압출재의 폭이다.

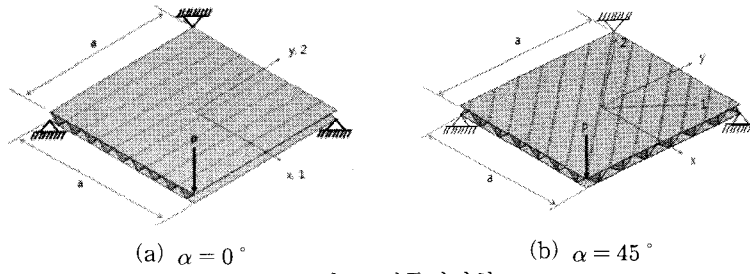


그림 3. 비틀림시험

두 번째 비틀림시험은 포아송비(v_{12})를 구하기 위하여 시행한다. 그림 3(b)와 같이 기준좌표계의 x축과 코어 방향이 이루는 각(α)이 45° 를 이루도록 시편을 구성하고 첫 번째 비틀림시험과 동일한 방법으로 시행되었다. 앞의 굽힘시험을 통하여 얻은 굽힘강성(E_{11})과 식(4)를 이용하여 포아송비를 도출하였다.

$$v_{12} = -1 + E_{11} \frac{2h^2w}{3Pa^2} \quad (4)$$

여기서, h 는 알루미늄 압출재의 두께이고, w 는 알루미늄 압출재 중앙의 처짐, P 는 지지되지 않은 한 지점에 가하는 수직 방향의 힘, a 는 정사각 알루미늄 압출재의 폭이다. 굽힘시험 및 비틀림시험을 통하여 도출한 등가강성을 도표 1과 같다.

도표 1. 등가물성치

등가물성치	적용물성
E_{11} (GPa)	18
E_{22} (GPa)	21
G_{12} (GPa)	6
v_{12}	0.34

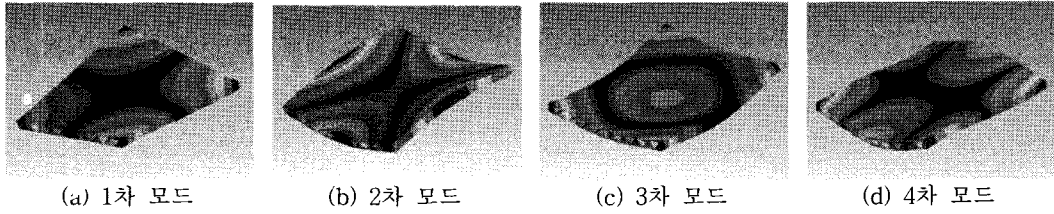
2.2 모드해석

등가평판은 알루미늄 압출재 형상을 갖는 모델보다 전산해석의 이점을 가지나, 솔리드(solid) 모델로서 3차원 요소망(mesh)을 갖는다. 이를 중간면(mid-surface)을 이용하여 셸(shell) 모델을 구성함으로써 해석 시간을 단축시켰다. 알루미늄 압출재와 동일한 크기와 질량을 갖는 등가평판 시편에 등가물성치를 적용하였으며, 등가평판 시편의 중간면을 이용하여 셸 평판을 구성하여 등가물성치를 적용하였다. 알루미늄 압출재 모델과 셸 평판 모델의 모드해석을 수행하여 서로 비교하였다. 도표 2는 알루미늄 압출재, 셸 평판의 고유진동수를 나타내며, 그림 4는 알루미늄 압출재의 모드형상을, 그림 5는 셸 평판의 모드형상을 나타낸다. 고유진동수와 모드형상이 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다.

도표 2. 알루미늄 압출재와 등가평판의 고유진동수

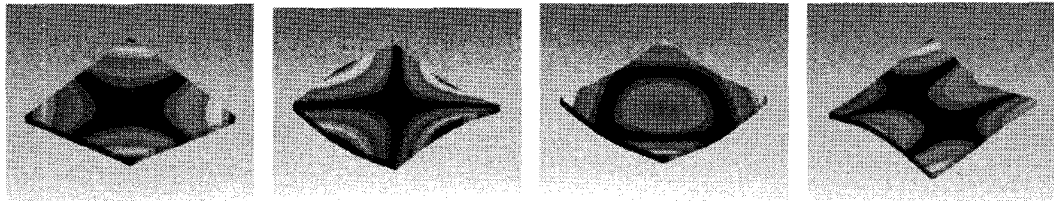
(단위 : Hz)

모드	알루미늄 압출재	셸 평판	오 차
1	163	166	1.8
2	249	265	6.4
3	312	341	9.2
4	405	457	12.8



(a) 1차 모드 (b) 2차 모드 (c) 3차 모드 (d) 4차 모드

그림 4. 알루미늄 압출재의 모드형상

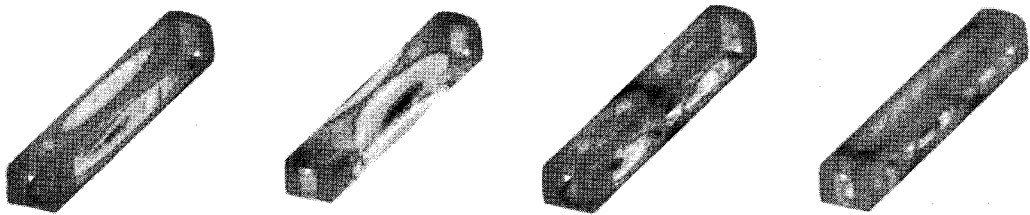


(a) 1차 모드 (b) 2차 모드 (c) 3차 모드 (d) 4차 모드

그림 5. 셸 평판의 모드형상

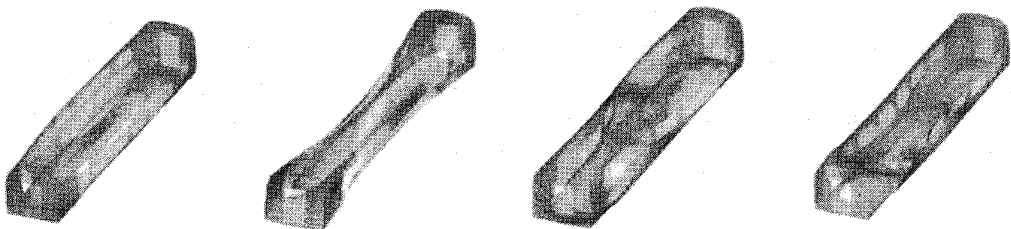
3. 셸 차체 모드해석

등가평판과 셸 평판을 이용하여 그림 6, 7과 같이 등가평판 차체와 셸 차체를 각각 구성하였다. 차체는 한국형 고속열차의 제원을 사용하였다. 등가평판 차체와 셸 차체의 모드해석을 진행하였으며, 고유진동수와 모드형상은 각각 그림 6, 7과 같다. 고유진동수와 모드형상이 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다.



(a) 1차 모드 (11.2Hz) (b) 2차 모드 (13.5Hz) (c) 3차 모드 (15.1Hz) (d) 4차 모드 (18.7Hz)

그림 6. 등가 평판 차체의 모드형상



(a) 1차 모드 (10.9Hz) (b) 2차 모드 (12.8Hz) (c) 3차 모드 (14.4Hz) (d) 4차 모드 (17.8Hz)

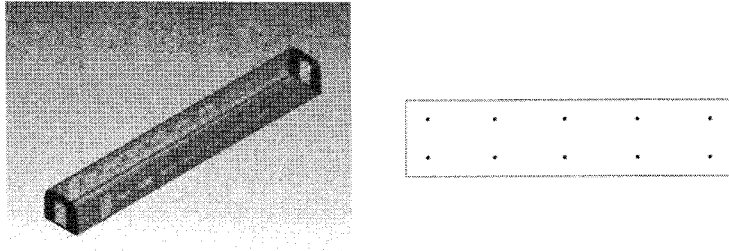
그림 7. 셸 차체의 모드형상

3. 진동 예측

3.1 분산형 고속전철 모델링

현재 개발 중인 분산형 고속전철의 진동을 예측하기 위하여 앞에서와 동일하게 셸 평판을 이용하여

그림 8와 같이 분산형 고속전철 차체 모델을 구성하였다. 도표 3은 차체 모델에 사용된 분산형 고속전철의 제원이다. 가진 해석을 위하여 분산형 고속전철 셀 차체의 2차 현가장치의 위치를 3축 스프링으로 구속하였다. 스프링의 물성은 현재 분산형 고속전철의 물성이 존재하지 않기 때문에 한국형 고속전철의 값을 사용하였으며, 동일한 위치에 3자유도 이론해석 모델[6]의 2차 현가장치의 힘을 입력 데이터로 사용하여 가진 하였다. 그림 8.(b)과 같이 차체 바닥의 10개의 지점의 상하방향 가속도를 측정하였다.



(a) 셀 차체 (b) 데이터 측정 위치(바닥면)

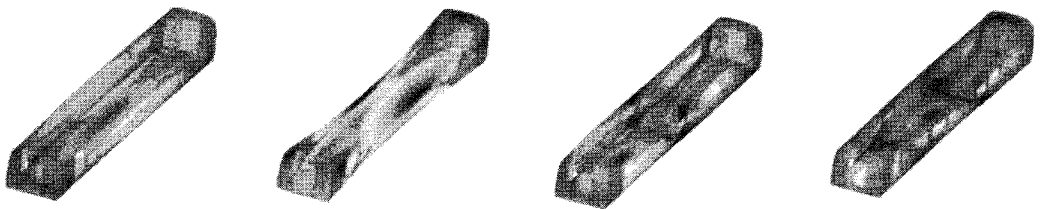
그림 8. 분산형 고속전철의 셀 차체

도표 3. 분산형 고속전철의 제원

	차체 무게 (kg)	차체 폭 (mm)	차체 길이 (mm)	전방대차 위치 (mm)	후방대차 위치 (mm)
분산형 고속전철	450000	3100	23500	3500	20000

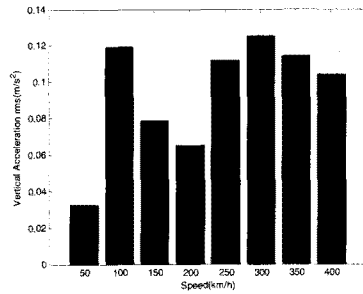
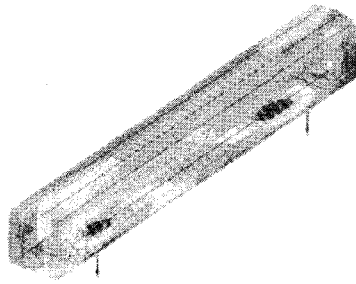
3.2 분산형 고속전철 진동

그림 9, 10은 분산형 고속전철의 가진 해석 결과이다. 그림 9는 분산형 고속전철의 고유진동수와 모드형상이다. 그림 10.(a)는 분산형 고속전철의 진동변위이다. 그림 10.(b)는 속도별 분산형 고속전철 셀 차체의 상하방향 가속도 실효치(RMS, root mean square)와 3자유도 이론해석 모델의 상하방향 가속도 실효치를 나타낸다. 그림 10.(b)에서 분산형 고속전철의 운행속력인 350km/h에서 상하방향의 가속도 실효치가 $0.11 m/s^2$ 을 알 수 있다. 그러나 이는 정확한 2차 현가장치의 값과 가진 입력을 사용한 값이 아님으로 추후 정확한 값으로 해석한다면 더욱 정확한 상하방향 가속도 값을 도출할 수 있다. 또한 이는 차체의 상하방향 가속도 실효치이므로 내장재를 고려한 진동측정값과는 차이가 있다.



(a) 1차 모드 (9.7Hz) (b) 2차 모드 (9.8Hz) (c) 3차 모드 (11.4Hz) (d) 4차 모드 (13.9Hz)

그림 9. 분산형 고속전철 셀 차체의 모드형상



(a) 철도차량 진동변위

(b) 속도별 차량 가속도 응답

그림 10. 분산형 고속전철 차체 가진해석

4. 결 론

본 연구에서는 분산형 고속전철의 진동을 파악하고 예측하였다. 정해석을 통하여 등가물성치를 산출하였다. 한국형 고속열차의 제원을 가지고 쉘 차체 모델을 구성하였으며, 모드해석을 통하여 모델을 검증하였다. 동일한 방법으로 분산형 고속전철 모델을 구성하여 고유진동수와 모드형상을 계산하였고, 차체의 각각의 위치에 대하여 주행 중 발생 진동을 예측하였다. 해석결과 분산형 고속전철의 운행속력인 350km/h의 가속도 실효치는 $0.11 m/s^2$ 으로 예측되었다. 본 연구는 알루미늄 압출재 차체의 등가강성을 이용한 간소화 모델을 제시하였고, 고속전철의 동특성을 파악하고 해석하는데 효율적 해석이 가능함을 확인 할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(과제번호 07차세대고속철도A01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 이상윤, 이우식 (2000), "평판형 주름판넬에 대한 등가 연속체 모델링기법", 한국철도학회논문집, 제3권 제2호, pp.43-50.
- 장창두, 하윤석, 조영천, 신광복 (2003), "알루미늄 압출재를 사용한 철도차량차체의 단위 압출재 최적설계", 한국철도학회논문집, 제 6권 제3호, pp.194-202
- 황원주, 김형진, 강부병, 허현무 (2002), "알루미늄 압출재를 적용한 2층 열차 차체의 기초설계 및 구조강도해석", 한국철도학회 춘계학술대회논문집, pp.364-369
- 황원주, 구병춘, 김형진, 정종덕 (2004), "유한요소해석 및 실험에 의한 알루미늄 차체구조강도평가", 한국철도학회 춘계학술대회논문집, pp.76-82
- S. Luo, J. C. Suhling, T. L. Laufenberg (1995), "BENDING AND TWISTING TESTS FOR MEASUREMENT OF THE STIFFNESSES OF CORRUGATED BOARD", Mechanics of Cellulosic Materials, AMD-VOL. 209, pp.91-109
- 백승국, 이래민, 신범식, 이상원, 구자춘, 최연선 (2008), "승차감 향상을 위한 동력분산형 고속전철의 진동저감", 한국철도학회 추계학술대회논문집, pp.1435-1440