

철도차량 대차프레임 취부 브라켓 강성증대를 위한 연구

Analysis on Bracket Attachment Stiffness in Bogie Frame

한성욱* 조우강** 김승섭** 박상구** 송시엽** 박형순**

Han, Sung-Wook Cho, Woo-Kang Sung-Sub, Kim Park, Sang-Koo Song, Si-Yeop Park, Hyung-Soon

ABSTRACT

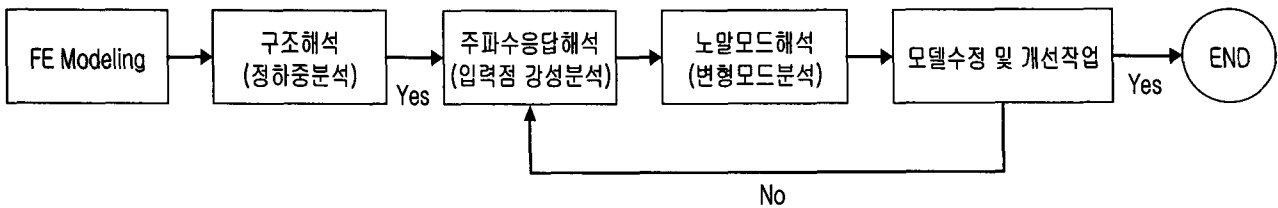
It is known that bogie frame must have sufficient stiffness for car body and passenger weight and transfer traction and braking force, and as of today most studies and verifications are restricted to static and fatigue analysis for force acted on bogie frame. Bogie frame is mounted with equipments to control the signal, traction and so on, this equipment's behavior is subjected to vibration mode occurs on running condition. If the resonance occurs on this equipment, the possibility of crack occurrence on bracket connected with equipment and bogie frame will be increased. In this paper, the method of vibration strength verification for bracket attached on bogie frame will be introduced by using frequency response method.

1. 서 론

최근 자동차, 항공기, 조선 분야에서는 구조물이 견딜 수 있는 정하중에 의한 파손보다는 공진에 의한 문제가 지속적으로 대두되고 있으며 이에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 철도차량도 역시 진동에 의한 공진으로 인하여 발생하는 내구크랙의 문제가 심각하게 대두되고 있으며 승차감 및 소음에도 큰 영향을 미치고 있다. 대차프레임에 취부되는 중량물로는 모터, 안테나, 브레이크시스템등이 있는데 특히 안테나 브라켓은 프레임의 끝단에 위치하기 때문에 대차프레임의 진동변형모드 발생시 가장 큰 변형이 발생한다. 따라서 본 논문에서는 대차프레임의 전두부에 취부되는 ATP안테나의 브라켓의 정/동강성에 대한 연구를 위하여 관련규격에서 제안하고 있는 정하중에 대한 구조해석과 안테나 마운팅부에 대한 입력점 강성증대를 위한 최적설계 방법에 대한 고찰과 실제 적용사례에 대하여 기술하였다.

대차프레임에 취부되는 ATP안테나의 무게중심 위치를 하중입력점으로 하고 주파수응답해석을 통하여 브라켓의 형상개선 전/후에 따른 입력점 강성을 평가하고 이에대한 모드분석을 통하여 브라켓의 형상 최적설계를 위한 방향을 제시하고자 한다. 이는 공진에 의하여 브라켓 취부부위에 발생할 수 있는 내구크랙을 미연에 방지할 수 있을 뿐만 아니라 진동에 의한 응답레벨을 저감시켜 승차감 향상에도 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

아래는 본 논문에서 ATP안테나의 최적설계를 위하여 연구하였던 방향에 대한 간략도이다.



* (주)로템 기술연구소 비회원

E-mail : swan10@rotem.co.kr

TEL : (031)460-1310 FAX : (031)460-1780

** (주)로템 기술연구소

2. 정하중 구조해석

대차프레임에 장착된 구성품에 대한 구조적 성능만족사양에 대한 내용을 살펴보면 GM/RT2100, Structural Requirements for Railway Vehicles October 2000 에서 탈선, 충돌, shunt를 고려하여 표 1과 같은 관성(inertia) 하중을 상하/좌우/전후 방향에 대하여 각각 가하도록 되어있으나, 국부적으로 발생하는 가속도, 공진에 대한 검증방법은 본 규격에서 고려하지 않으니 별도의 검증을 거쳐야 한다고 되어있다.

표 1 ATP 정하중 조건(GM/RT2100)

No.	하중방향	가속도	비고
1	상하방향	20g	1g = 9.8m/s ²
2	전후방향	5g	
3	좌우방향	3g	

표 2 재료의 기계적 성질

No.	재질	항복강도	인장강도
1	SWS490A	≥325 MPa	490~610 MPa
2	SS400	≥250 MPa	≥410 MPa

구조해석에 사용될 모델은 그림 1과 같다. 이 모델에서, X-축은 전후방향, Y-축은 좌우방향 그리고 Z-축은 상하방향을 나타낸다. 유한요소모델에 사용된 절점 및 요소 수는 각각 32,042개와 30,583개 이며 대차프레임에 취부되는 엔드빔과 대차프레임 마운팅브라켓과 안테나 브라켓은 모두 4절점 혹은 일부 3절점 노드를 가지는 shell 요소(Quad4 & Tria3)를 사용하였고 관개 및 단조부품의 경우 solid 요소(Hexa8)를 사용하여 모델링 하였고, 안테나는 무차원 요소를 사용하여 해당 질량 만큼의 물성치를 입력하여 구현하였다. 경계조건은 대차 사이드프레임 끝단에 용접되는 브라켓 끝단을 6방향 자유도를 구속하였으며 각 방향에 표 1에 따라 각 방향에 대한 관성가속도를 모든 유한요소모델에 작용시켜 관성력을 가하였다.

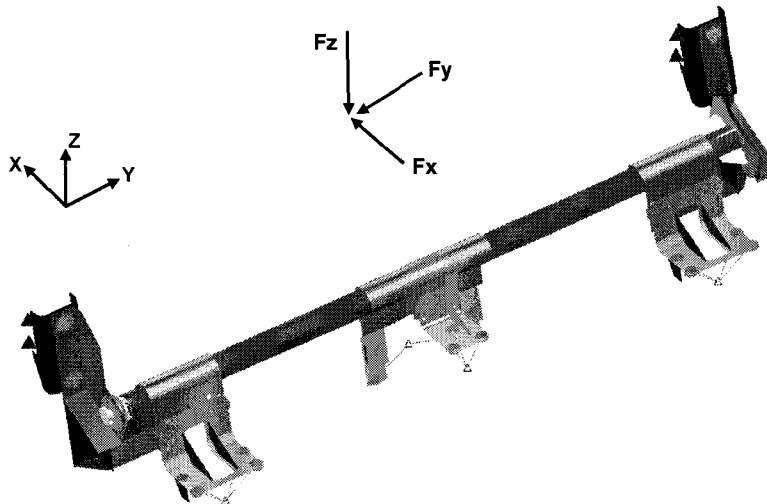


그림 1 해석모델

그림 3은 수직 정하중(20g) 해석결과이다. 최대응력 224Mpa은 엔드빔과 대차프레임을 연결하는 취부 브라켓의 조립부에서 발생하였다. 이는 모재부이고 해당 모델의 항복강도 수준으로 문제없을 것으로 판단된다. 운행시 크랙이 발생한 곳에 대한 응력을 확인한 결과 엔드빔파이프와의 용접부에서 56Mpa 이고 ATP 안테나 브라켓의 볼트 조립부에서는 112Mpa 의 응력해석 결과를 나타내었다. 그림 4는 전후 정하중(5g)에 대한 해석결과이며 이 역시 크랙 발생부에 대하여는 엔드빔파이프 용접부에서 36Mpa 이고, 안테나 브라켓의 볼트 조립부에서는 48Mpa 으로 역시 낮은 응력을 나타내고 있다.

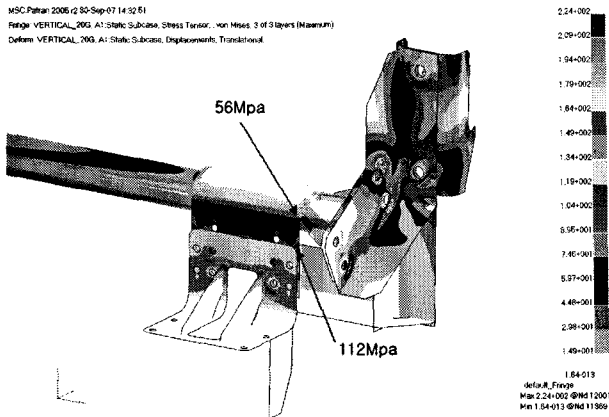


그림 3 상하 정하중 20g 해석결과

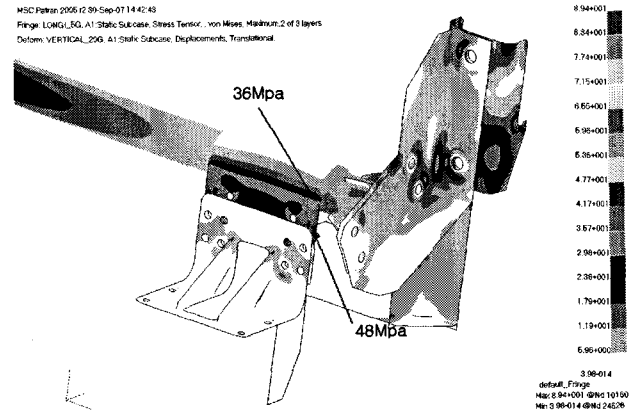


그림 4 전후 정하중 5g 해석결과

이와 같이 ATP 안테나브라켓은 GM/RT2100에서 규정하는 대차부착물에 대한 정하중에 대하여는 구조 강성을 만족하는 구조이다. 따라서 표1에 나타난 정하중조건은 대차프레임에 취부된 구조물을 강제로 가정하여도 무방한 것에 국한하여야 한다는 것을 의미한다. 하지만 안테나와 같은 전장품 구성품은 저 주파수 영역에서 공진특성을 가지지 않는 강체 구조물로 이루어져 있으나 이를 장착하기 위한 브라켓류 등은 대부분 스틸 판재로 된 용접구조물이기 때문에 낮은 주파수 영역에서 고유진동수를 가지는 Flexible body라고 할 수 있다. 따라서 정하중에 대한 검토뿐만 아니라 진동에 대한 동강성의 평가가 이루어져야 한다.

3. 동강성 해석

3.1 해석모델 구성 및 조건

ATP 브라켓의 동강성에 대한 보다 정량적인 비교평가를 위하여 주파수응답해석을 수행하였다. 브라켓에 대한 정확한 진동특성평가를 위하여 대차프레임과 브라켓류에 대한 상세하게 모델링 하였다. 직육면체 형태의 구조물로 되어 저주파수 영역에서 강체로 볼 수 있는 ATP안테나는 무게중심 위치에 무차원 요소로 구현하였고 이에 해당하는 질량을 입력하였다. 브라켓의 측면에서 안테나중량은 진동 발생시 가진원으로 작용할 수 있는 부분임에 따라 안테나 무게중심위치에 전후, 좌우, 상하(X,Y,Z) 방향에 대하여 가진력을 입력하고 그 곳에서의 응답특성을 주파수 영역에 대하여 파악하였다.

입력점에 대한 강성 표현은 대개 Mobility형태로 나타내거나, Inertance 형태로 표현하는데 여기서는 입력점의 강성을 Inertance 형태로 표현하였으며 0~100Hz 를 1Hz씩 증대시켜가며 가진하였다.

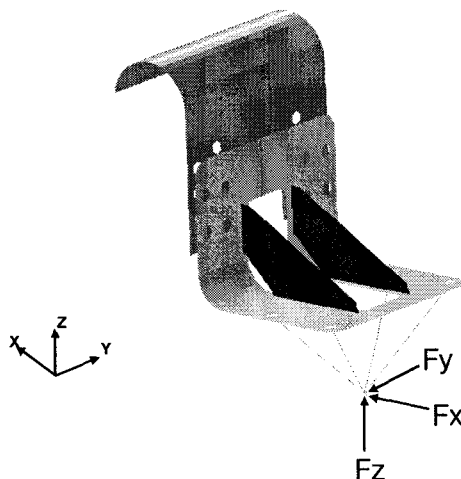
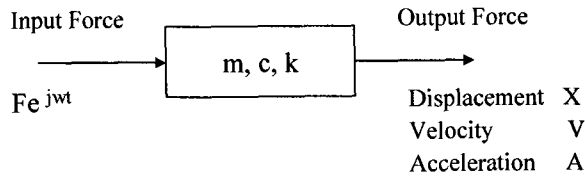


그림 5 입력점강성 평가를 위한 가진방법

주파수 응답함수는 단위 가진력에 대한 변위와 속도, 가속도의 비로 나타낼 수가 있다.



변위는 $\frac{X}{F} = \frac{1}{k - \omega^2 m + i\omega c}$, 속도는 $\frac{V}{F} = \frac{i\omega}{k - \omega^2 m + i\omega c}$, 가속도는 $\frac{A}{F} = \frac{-\omega^2}{k - \omega^2 m + i\omega c}$ 로

나타낼 수 있으며 각각에 대하여 Receptance, Mobility, Inertance 라고 일컬어진다.

3.2 기존 제품에 대한 해석결과

그림 6에 기존 제품에 대한 입력점 강성에 대한 가속도 결과를 나타내었다. 해석결과에서 알 수 있듯이 0~60Hz 영역에서 X와 Z방향 가진 시 응답특성을 보면 5개의 공진 peak치가 나타나는 것을 알 수 있으며, 특히 X방향의 응답레벨이 가장 큰 것을 알 수 있다. 이는 X방향에 대한 강성이 매우 취약하다는 것이고 이에 대한 강성의 보강이 필요하다는 것을 보여준다.

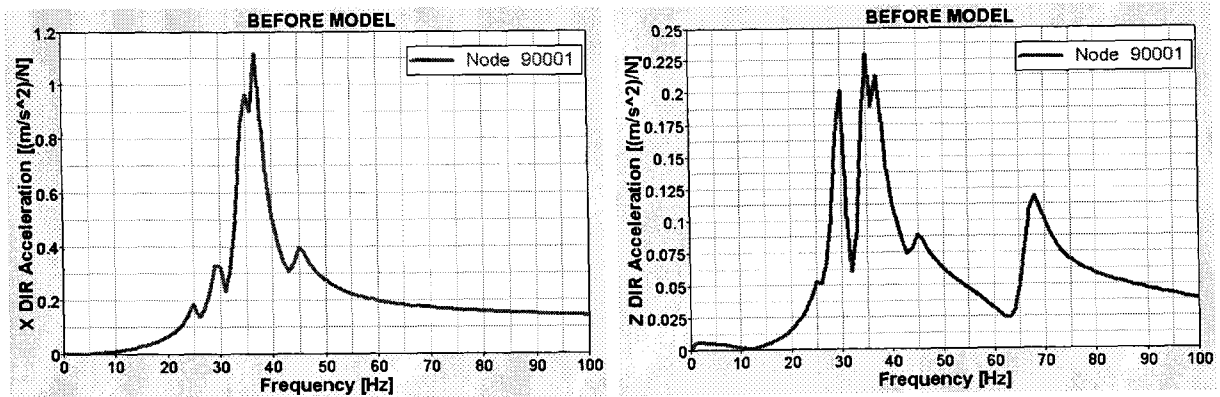


그림 6 기존제품에 대한 주파수응답해석 결과

각 공진 주파수에 해당하는 영역에서의 변형양상을 파악하기 위하여 노말모드해석을 수행하였다. 주파수응답해석과 동일한 주파수 영역대를 얻기 위하여 같은 해석모델을 사용하였고, 그림 7은 노말모드 해석시의 모드변형 형상을 나타내며 60HZ이하의 주파수 영역대에 대하여 주파수응답해석 결과 peak치에 해당하는 주파수에서 변형모드의 형상을 알 수 있다.

그림 7의 1차모드는 엔드빔의 전후방향으로의 벤딩모드가 나타나고 있다. 이는 엔드빔의 전체적인 벤딩모드로 브라켓의 국부적인 변형을 일으키는 값이라고 보기가 어려우며 안테나 브라켓에 대한 그림 6의 입력점강성 해석결과에서도 2, 3, 4차 Peak치에 비하여 응답레벨이 매우 낮게 나타남을 알 수 있었다.

주파수응답해석결과에서 얻은 결과에서 입력점 강성이 매우 취약한 2, 3, 4차 peak치에 해당하는 29.8, 34.7, 36.7Hz에서 안테나브라켓의 전후 방향에 대한 벤딩모드가 엔드빔파이프에 용접된 브라켓 끝단을 중심으로하여 국부적으로 심하게 변형이 발생하는 것을 알 수 있었다.

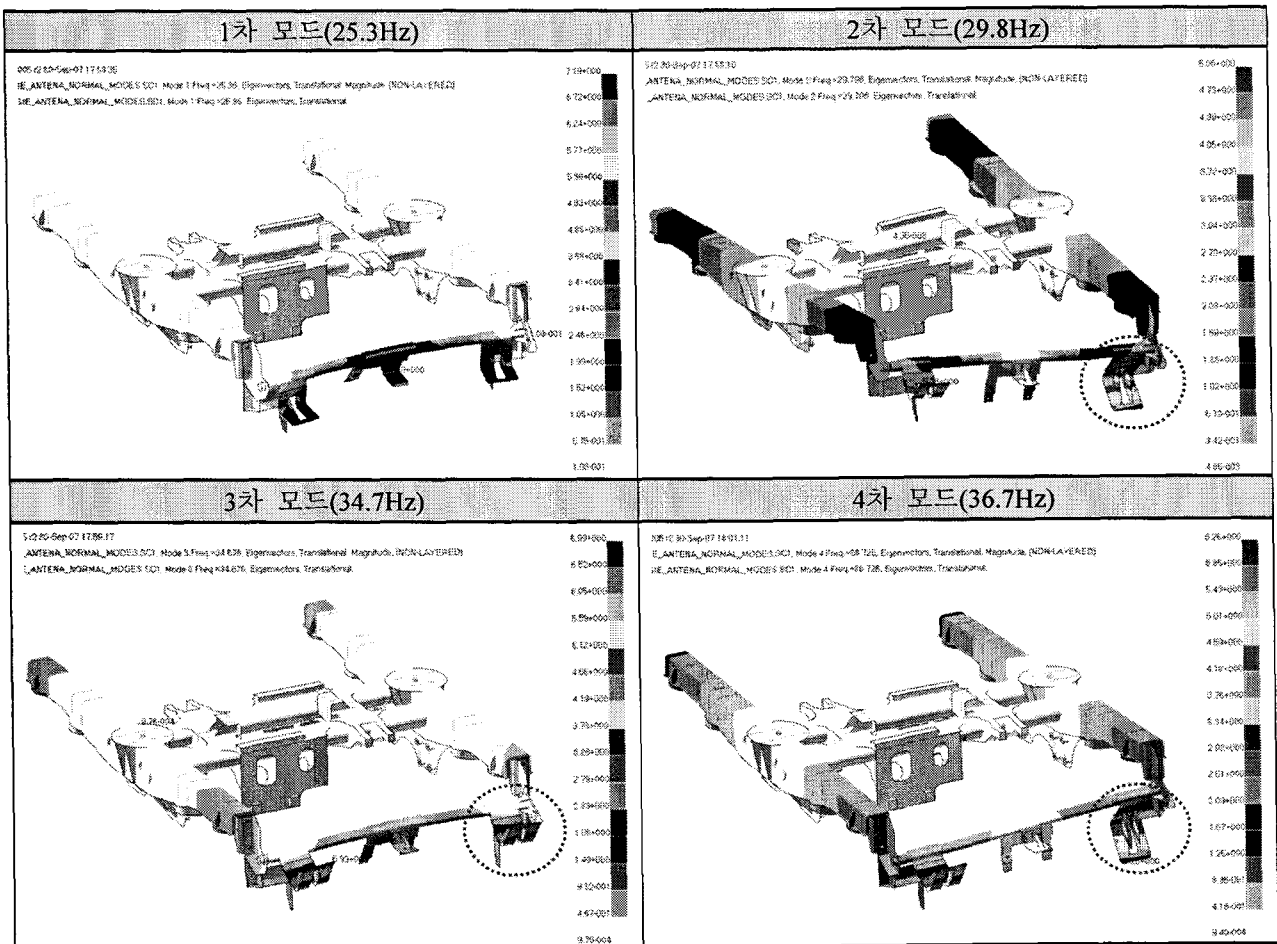


그림7 기존제품에 대한 노말모드 해석결과

추가적으로 변형모드에 대한 변형률에너지를 검토하여 보았다. 이는 각 모드별 고유진동수에서 변형이 이루어질 때 변형이 집중적으로 발생하는 부위를 파악할 수 있는 장점이 있다. 변형률 에너지밀도를 검토한 결과 2, 3, 4차 모드 모두 안테나브라켓의 엔드빔 취부 플레이트에서 변형이 심하게 발생하는 것을 알 수 있었다. 그림 8에 2차 모드에 대한 변형에너지 분포결과를 나타내었다. 변형이 집중되는 부위와 실제 운행중에 파단되었던 부위가 일치하는 것을 알 수 있었으며 대차프레임이 가인을 받아 2-4차 모드에 대한 변형이 발생할 때 브라켓이 상대적으로 취약한 전후벤딩모드에 의하여 파손이 발생한다는 것을 알 수 있었다.

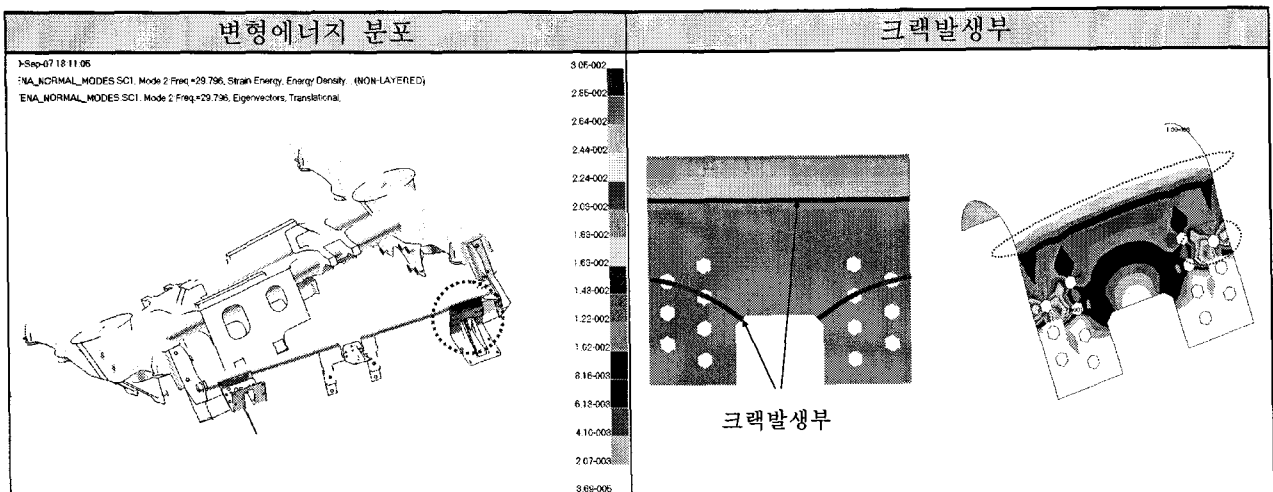


그림 8 취약부위와 크랙발생부 비교

3.3 개선제품에 대한 해석결과

전후 방향에 대한 강성 보강을 위하여 엔드빔과 브라켓 사이에 ‘ㄷ’자 형태의 보강재를 엔드빔 파이프 길이방향으로 추가하고 엔드빔과 불안전 용접의 가능성이 큰 ‘ㄱ’자 모양의 브라켓은 불필요한 부분을 삭제하여 완전 용입이 가능한 구조로 변경하였다. 이는 엔드빔과 ATP 안테나간 연결부에 대한 강성을 강화시킴으로써 기존제품에 발생하는 국부적인 변형모드를 억제하고 전체적인 변형모드로 가져가 전후 방향에 대한 강성을 강화시키고자 하는 것이다.

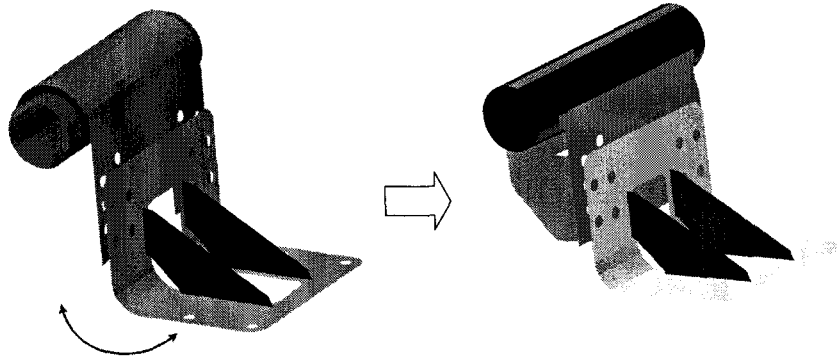


그림9 ATP 안테나브라켓 개선안

개선품에 대하여도 ATP 안테나 무게중심에 X, Y, Z 각 방향에 대한 가진력을 각각 입력하고, 그 곳에서의 응답을 주파수 영역에서 가속도의 값으로 구하였다.

그림 10은 브라켓 개선전과 후에 대한 입력점 강성의 결과를 비교한 것이다. 개선 전 제품에서 문제가 되었던 전후 방향에 대한 강성이 크게 증대된 것을 알 수 있으며, 30Hz 영역대에서 안테나 브라켓에 대하여 집중적으로 변형이 나타나던 높은 가속도 응답곡선의 peak가 모두 사라졌음을 알 수 있다.

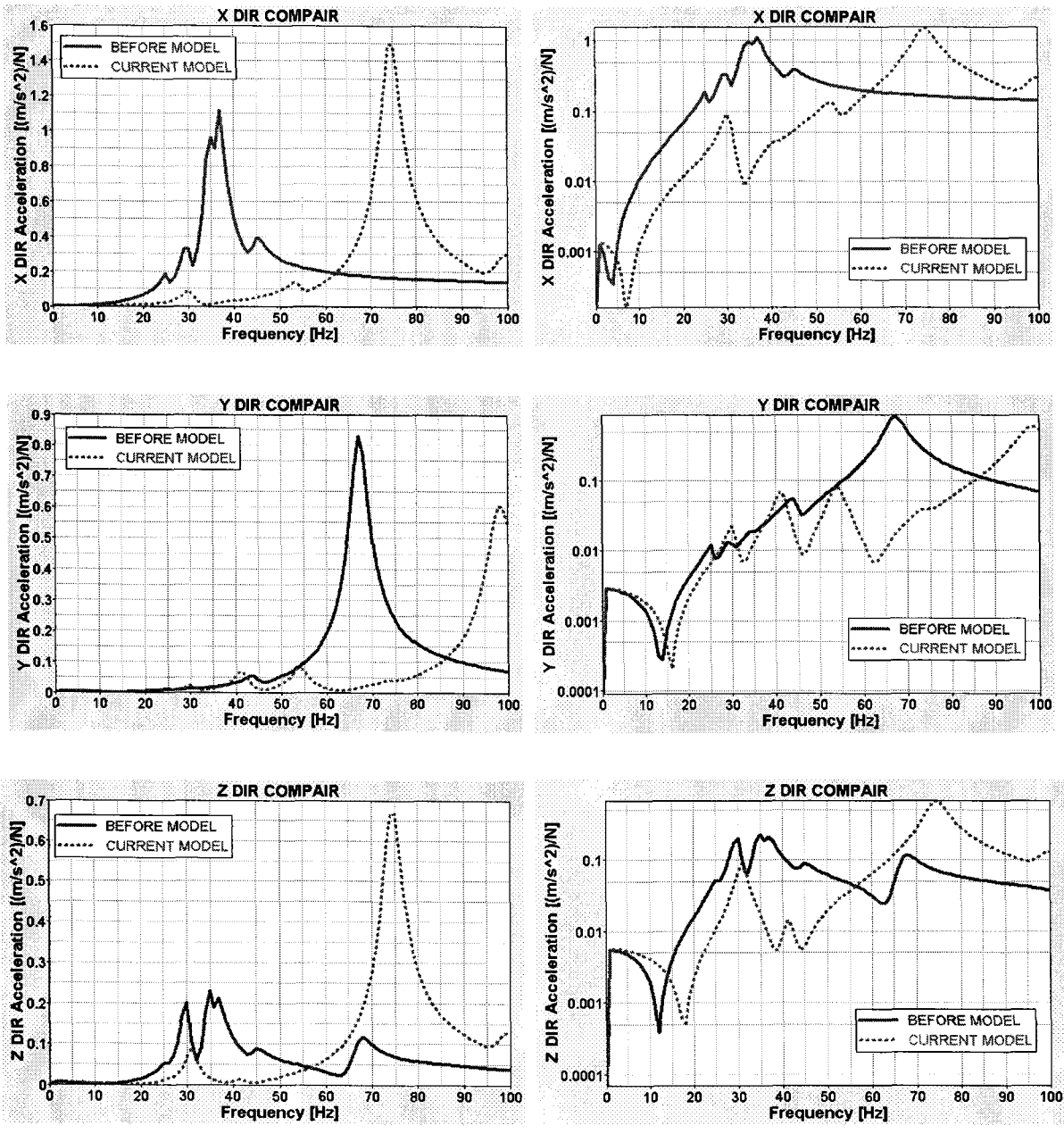


그림10 ATP 안테나브라켓 개선 전/후에 대한 주파수응답 해석결과비교

개선품의 60Hz이하의 주파수 영역대에 대한 변형모드를 살펴보았다. 그림 11은 개선제품에 대한 노말 모드 해석결과를 나타낸 것인데, 30.9, 30.1Hz 에서 각각 두개의 1, 2차 모드가 발생한다. 1차 모드가 엔드빔의 전후벤딩 모드이고 2차 모드가 전체적인 비틀림 모드, 3차 모드는 41.3Hz 에서 엔드빔 상하벤딩 모드가 발생하였다. ATP 안테나브라켓의 전후강성이 증대됨에 따라 안테나 브라켓에서 국부적으로 발생 하던 전후방향 벤딩모드가 사라지고 전체적인 변형모드를 가지는 구조로 바뀐 것을 알 수 있었으며 이는 설계개선이 적절하게 이루어졌음을 말해준다.

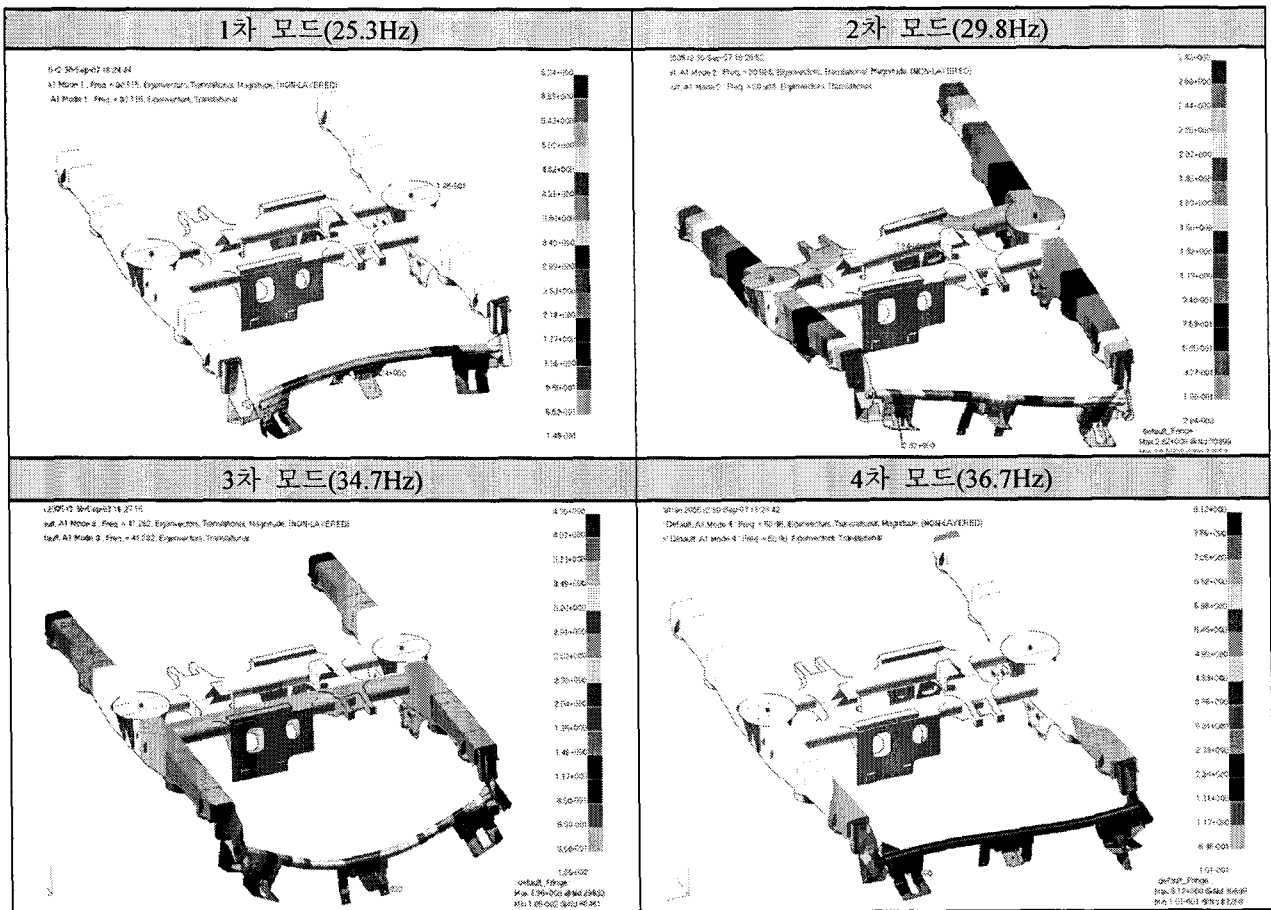


그림11 ATP안테나브라켓 개선품에 대한 노말모드해석결과

4. 결론

대차프레임에 취부되는 중량물에 대한 브라켓 강성을 평가하기 위하여 현재 적용하고 있는 규격에 의한 구조해석을 통하여 정하중에 대한 강성을 평가하였고, 진동에 대한 추가 검증을 위하여 주파수응답 해석을 통한 입력점 강성분석으로 브라켓에 대한 동강성을 평가하고 노말모드해석으로 변형모드에 대한 개선을 거쳐 최적설계로의 과정을 진행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 대차프레임에 장착된 구조물이 Rigid body라고 가정을 할 수 있을 만큼 고유진동모드가 높은 강성을 지니는 경우에는 진동에 의한 강성평가를 배제할 수 있으나 Flexible body인 경우에는 반드시 진동특성에 대한 평가가 이루어져야 한다.
- (2) 대차프레임과 이에 장착되는 구조물이 대차프레임의 진동특성과 구조물의 진동특성에 상호 영향을 미치는 경우에는 두 구조물이 실제 장착되는 것과 같은 조건으로 모델링을 구현하여 평가하여야 한다. 이는 두 구조물에 대하여 각각 고유진동해석을 하고 서로 근접한 영역대에서 고유진동모드가 발생하는 지를 평가함으로써 알 수 있다.
- (3) 주파수응답을 통하여 대차프레임에 취부되는 브라켓에 대한 동강성을 평가 시 브라켓에 중량물이 장착되는 경우에는 중량물의 무게중심점을 가진점으로 설정하고 하중이 유입되는 경우에는 하중 입력점을 가진점으로 하여 이에 대한 응답특성을 평가한다. 이는 철도차량의 성능사양은 다양하나 대차에 장착되는 안테나 중량물의 무게는 차이가 없음에 따름이며 본 연구 결과와 과거 문제가 되었던 차량에 대한 추가적인 연구를 통한 D/B 확보로 향후 개발되는 대차프레임의 중량물 및 취부브라켓의 설계검증에 대한 방향을 제시하였다.

참고문헌

1. GM/RT2100(2000), Structural Requirements for Railway Vehicles October 2000
2. 박희범(2001), 샤시 마운팅부의 동강성 평가에 대한 연구, MSC Conference 2001
3. 이장무, 모달해석의 이론과 응용, 서울대학교 공과대학 기계설계공학과