

태백선을 주행하는 화차 엔드빔의 진동특성에 관한 연구

Vibrational Characteristics of an End Beam of a Freight Car on the Taebaek Line

함영삼[†] · 문경호* · 홍재성* · 이동형* · 서정원*

Young-Sam Ham, Kyeong-Ho Moon, Jai-Sung Hong, Dong-Hyong Lee and Jung-Won Seo

(2004년 4월 9일 접수 : 2004년 9월 18일 심사완료)

Key Words : Running Safety(주행안전성), Vibration Characteristic(진동특성)

ABSTRACT

A bogie is the device that connects a car body and wheel sets of a rail vehicle. It is the critical component that determines the running safety. The bogie consists of a frame, suspensions, brakes and wheel sets. Various analyses including a numerical simulation using a finite element method, a static load test, a fatigue test, and a running test should be carried out to design the bogie. However cracks have been found at some end beams of the bogies mounted on the freight cars running with the high speed. The cracks of the end beam results in deterioration of the brake performance and the running safety. A new design has been suggested to solve this problem by ROTEM company and its performance has been tested in this paper. Numerical simulations and dynamic tests are carried out to figure out the causes of cracks in the conventional bogie, and the vibrational characteristics of the improved bogie are compared with those of the conventional one.

1. 서 론

대차는 철도차량에서 윤축과 차체를 연결시키는 장치로서 열차의 안전과 차량의 주행성능에 지대한 영향을 미치는 핵심 부품이다. 대차는 크게 프레임, 현가장치, 제동장치, 윤축으로 구성되어 있고 정적 및 동적 하중이 복잡하게 작용하고 있으므로 실제 설계 시 구조강도 해석 외에도 실제 운용하중 측정, 정하중시험, 피로시험, 실차주행시험 등 다양한 시험 및 성능평가가 요구되고 있다.

현재 운행중인 고속화차용 용접대차중 일부 대차가 Fig. 1과 같은 위치에서 균열이 발생하고 있어 안전

운행에 지장을 초래하고 있다. 화차의 경우 객차에 비하여 영/공차의 하중차가 크고 하중조건 또한 열악하다. 대차의 구조 역시 일반 객차와는 달리 2차 현가장치가 없으며 제동 또한 담면제동을 사용하고 있다. 현재 균열이 발생하고 있는 부위는 엔드빔(end beam)으로 화물의 직접적인 하중인 수직하중보다는 제동시 담면제동장치를 지지하는 역할을 하고 있다. 이러한 엔드빔의 파손은 제동장치의 작동을 못하게 하며 최악의 경우에는 탈선의 원인이 될 수도 있다.⁽¹⁾ 이 논문에서는 경부선과 같이 장대화되어 있지 않은 선로인 태백선을 주행할 때 엔드빔에 작용되는 진동특성만을 다루었으며, 기존에 균열이 발생한 엔드빔과 새로이 개선되어 보강된 엔드빔을 서로 비교하여, 균열의 발생원인을 규명하고 이에 대한 보완대책을 수립하는 과정에서 파악한 용접구조대차의 진동특성에 대하여 서술하고자 한다.

[†] 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원

E-mail : ysham@krti.re.kr

Tel : (031) 460-5202, Fax : (031) 460-5279

* 한국철도기술연구원

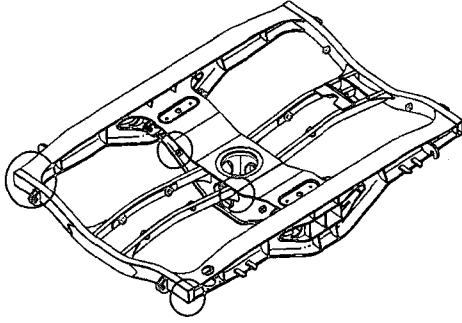


Fig. 1 Crack location at the bogie frame

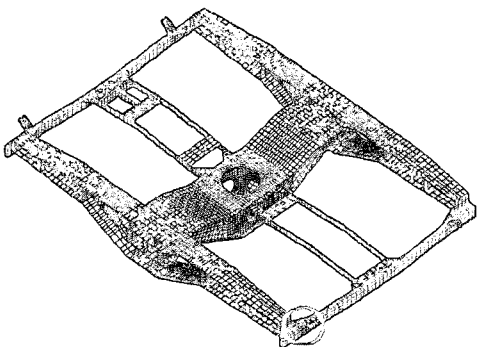
2. 균열현상 및 강도검토

2.1 균열현상

엔드빔의 균열발생 현황을 살펴보면 주로 태백선과 영동선 및 중앙선 등을 운행하는 무개화차에서 발생하였으며, 균열이 발생한 엔드빔에 대하여 보강 작업을 실시하였으나 문제가 완전히 해결되지 못하



Fig. 2 An example of a cracked end beam



Crack location at the end beam

Fig. 3 A FEM model

고 재균열이 발생하였다. Fig. 2는 엔드빔이 균열된 모습이다.

2.2 대차프레임 강도

용접구조대차 엔드빔의 균열문제에 접근하면서 가장 먼저 이론해석을 통한 구조해석을 실시하였다. 해석은 유한요소 상용프로그램인 NISA II Ver. 8.0을 사용하였고, shell 요소를 이용하여 대차프레임 전체를 모델링하였다. Fig. 3은 대차프레임의 유한요소해석 모델이며, 엔드빔의 재질은 SS400으로 인장강도는 41, 항복강도는 25 kg/mm^2 이었다.

해석을 위한 하중조건은 JIS E 4207과 4208을 기준으로 하여 Table 1과 같이 허용최대하중을 적용하였다.^(2,3) 8가지 하중조건 중에서 엔드빔에 비교적 큰 응력을 발생시키는 제동하중의 해석결과는 Fig. 4와 같이 브라켓이 용접되어 있는 판재의 경우 모서리 부분에서 응력집중이 나타났다.⁽⁴⁾ 해석결과를 전체적으로 살펴보면 제작과정에서 발생할 수 있는 용접불량

Table 1 Load conditions

No	Directions of load	Load(kg)	Remark
1	Vertical	49,329	Dynamic force=1.4 g
2	Longitudinal	10,571	0.3 g(max)
3	Lateral	14,094	0.4 g(max)
4	Brake(per shoe)	797.8	$\mu = 0.3$
5	Vibration by brake parts	4,779	(1-10)g(max)
6		5,841	(1+10)g(max)
7	(Weight of parts=531 kg)	1,593	3 g(max)
8		2,124	4 g(max)

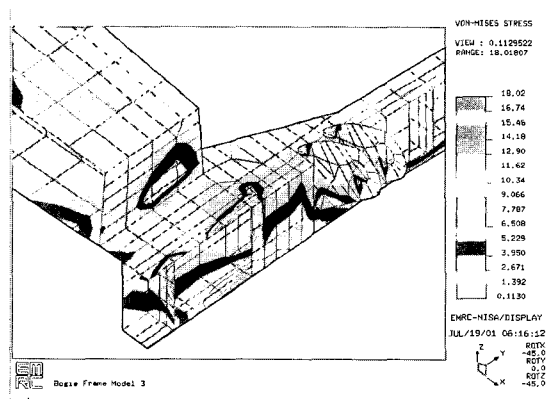


Fig. 4 Stress distribution on the frame subjected to a brake load

등의 문제가 없다면 정적 구조강도가 허용응력에 대해 안전하다고 할 수 있다.

이론해석과 더불어 실시한 정하중시험에서는 Fig. 5에서와 같이 합성응력의 최대값이 볼스터 내부 스티프너에서 발생하였고, 이는 재료의 허용응력 범위와 피로내구한도를 만족하는 것으로 나타났다.⁽⁵⁾ 따라서

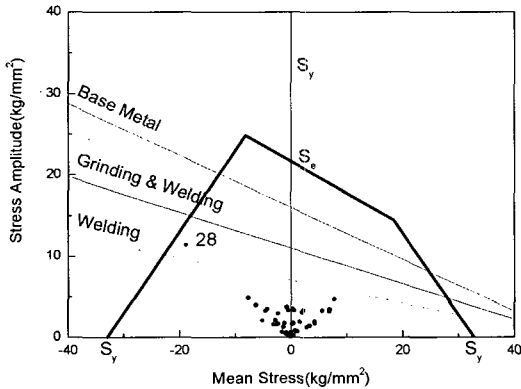


Fig. 5 A goodman diagram of the static load test result

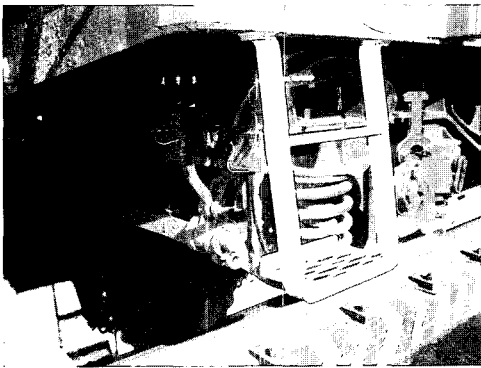


Fig. 6 A photo of the existing end beam

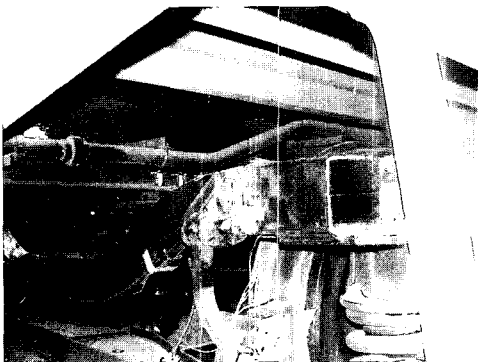


Fig. 7 A photo of the improved end beam

본 엔드빔의 균열문제는 구조강도 외에 또 다른 원인이 존재할 것으로 예측되어 선로상태와 주행중의 진동이 차량에 미치는 영향을 검토하기에 이르렀다.

3. 실차시험

3.1 실차시험의 개요

용접구조대차 엔드빔의 균열발생 원인을 규명하고 이에 따라 수립된 개선방안을 검증하여 차량의 안전운행을 확보하고 주행안전성을 향상시키고자 2가지 종류의 대차 엔드빔(기존품, 개선 엔드빔)에 대하여 태백선 주행중 진동가속도를 측정하였다.

○ 시험일자

- 1차 시험 : 2003. 10. 13 10. 23

- 2차 시험 : 2003. 12. 11 12. 24

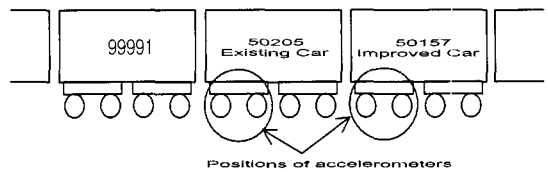


Fig. 8 Measuring positions of the test car

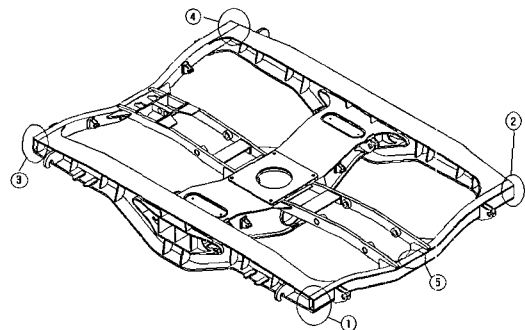


Fig. 9 Locations of the accelerometers

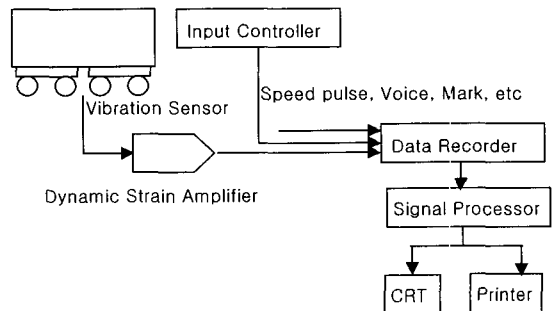


Fig. 10 A block diagram of the measuring system

○ 시험구간

- 공차 : 제천 → 철암
- 영차 : 철암 → 제천 → 도담

Fig. 6은 기존화차의 엔드빔 형상이며 Fig. 7은 개선된 엔드빔의 형상을 보여주고 있다.

3.2 시험차량 편성 및 측정위치

시험차량에서 진동가속도센서를 부착한 위치는 Fig. 8 및 9와 같다. 진동가속도센서는 ②번 위치에서 상하 및 좌우방향 진동을 측정하였고 나머지 ①, ③, ④, ⑤번 위치에서는 상하방향 진동만 측정하였다.

3.3 측정시스템 구성

시험대상차량의 대차 프레임에 각종 센서를 설치하여 얻어진 신호는 측정장비가 탑재된 시험차량에서 제어할 수 있도록 시스템을 구성하였다. 차량이 주행할 때 발생하는 진동가속도는 dynamic strain amplifier를 통하여 증폭한 후 data recorder에 저장하였으며, 현장의 데이터를 실험실에서 재생하면서

signal processor로 분석할 수 있도록 Fig. 10과 같이 측정시스템을 구성하였다.

4. 모드해석결과와 시험결과

4.1 모드해석결과

실차시험과의 비교검토를 위하여 상용 프로그램으로 모드해석을 실시한 결과, 강제운동을 하는 1~6차 모드에서는 엔드빔이 변형되지 않았으며 7~10차 모드에서 엔드빔의 변형을 발견할 수 있었다. Fig. 11과 같이 7차 모드는 약 5 Hz 대역에서 진동측정 결과와 유사하게 양쪽 사이드 프레임의 변형이 반대로 작용하는 모드를 나타냈다. 8~10차 모드는 5.8~6.4 Hz에서 센터빔과 엔드빔의 변형이 나타났다.

4.2 실차시험결과

제동을 취급하였을 때 홀더 행거에 작용하는 하중을 측정한 결과 Fig. 12와 같이 수직하중은 최대 1.2톤까지 발생하였고 수평하중은 0.1톤 미만으로 작용하였다. 또한 제동시 홀더행거 브라켓 주변의 엔드빔 응력은 Fig. 13에서와 같이, 기존차의 경우는 제동을

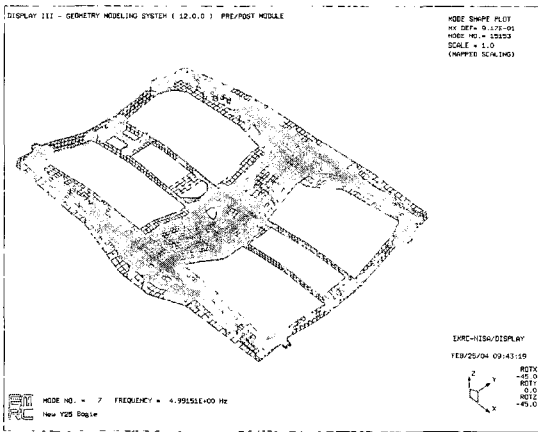


Fig. 11 A result of the modal analysis(mode no=7)

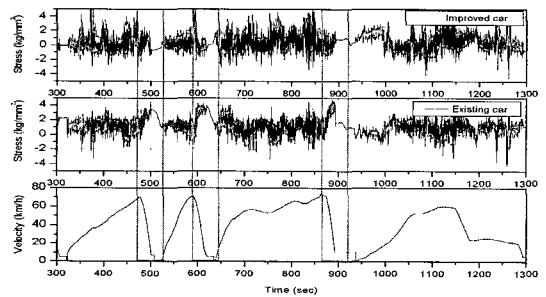


Fig. 13 Stress at the end beam with the application of the brake load

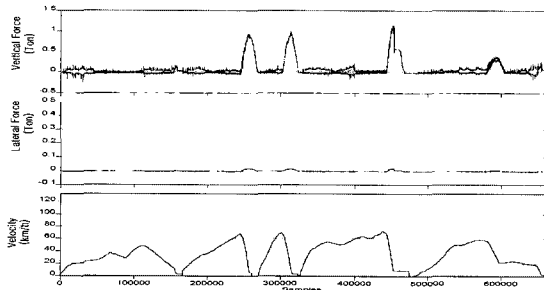


Fig. 12 Force at the holder hanger with the application of the brake load

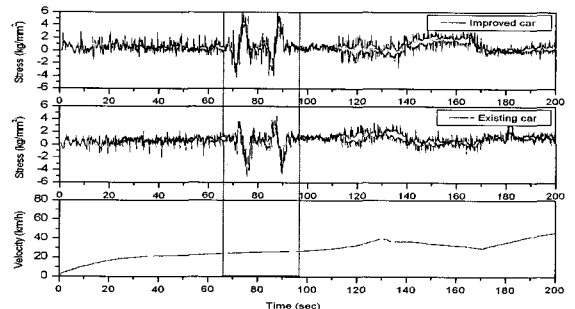


Fig. 14 Stress at the end beam when the car passes the rail joint

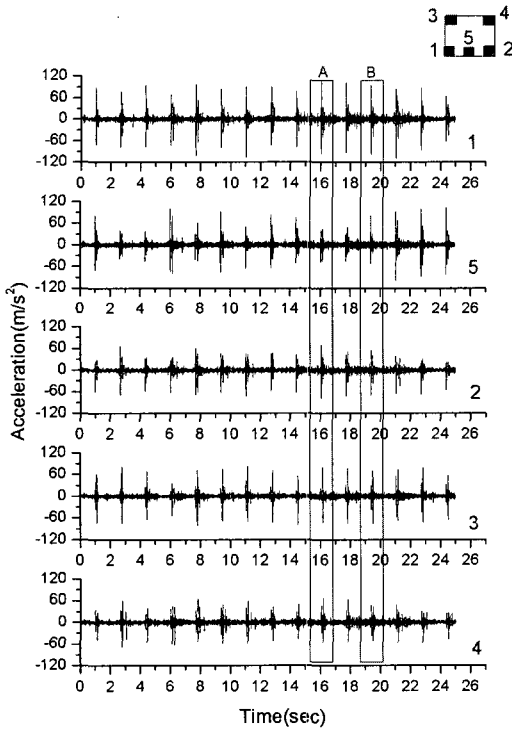


Fig. 15 Acceleration response of the existing car

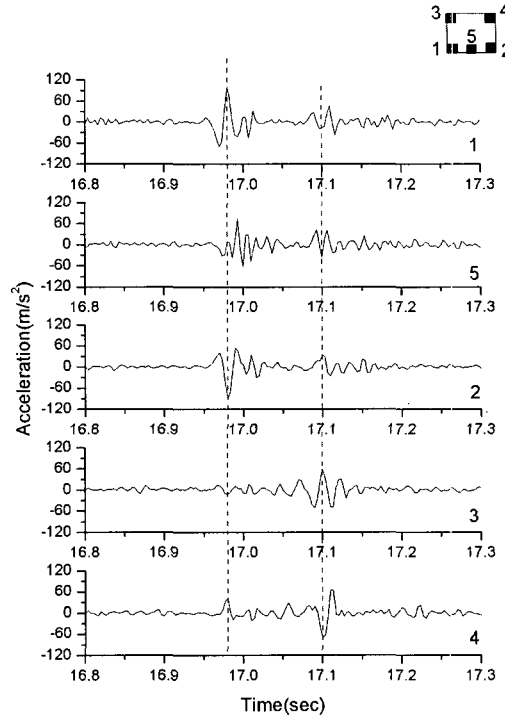


Fig. 17 Acceleration response of the improved car passing the joint of the rails

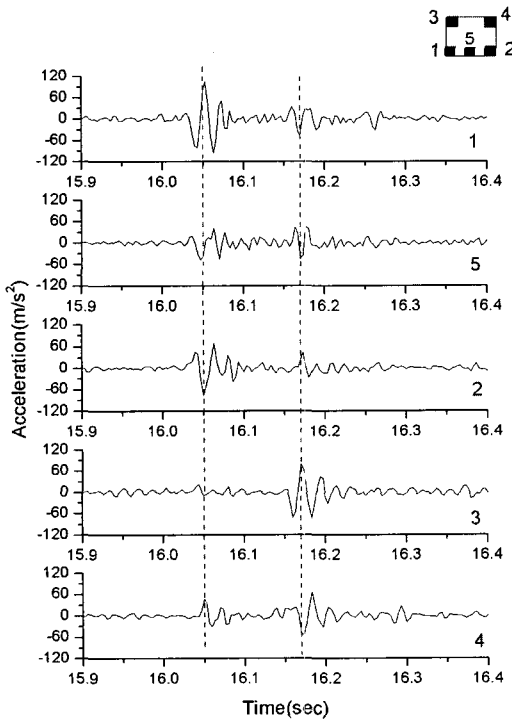


Fig. 16 Acceleration response of the existing car passing the joint of the rails

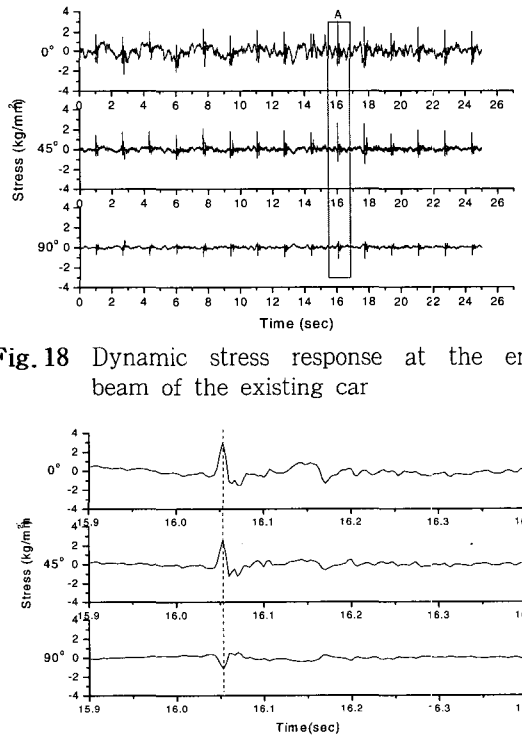


Fig. 18 Dynamic stress response at the end beam of the existing car

Fig. 19 Dynamic stress response of the existing car passing the joint of the rails

취급함에 따라서 4 kg/mm^2 이상까지 응력이 증가하였고 개선차는 엔드빔의 큰 강성으로 인하여 응력의 변화가 두드러지게 나타나지 않았다. Fig. 14는 레일 이음매 통과시의 응력을 나타낸 것으로 충격하중에 의한 응력이 개선차의 경우 최대 6 kg/mm^2 까지 발생하여 제동을 취급하였을 때보다 더 크게 발생하였다.

제동을 취급하는 빈도는 레일 이음매나 분기기를 통과하는 횟수에 비해 월등히 적은 현실에서, 제동하중에 의한 응력보다 레일 이음매 등을 통과할 때 더 큰 응력이 발생하는 것을 볼 때 엔드빔의 균열은 제동하중에 의한 것보다는 분기거나 레일 이음매 통과할 때 발생하는 것으로 판단된다.

Fig. 15와 18은 태백선 송학기점 1.3~1.7 km지점에서 25초 동안 기존화차의 진동가속도와 응력을 나타낸 것이며, Fig. 16, 17, 19, 20은 정밀분석을 위하여 레일 이음매 통과시인 A 지점의 진동 및 응력값을 확대한 것이다. Fig. 15, 16, 17의 진동은 대차의 상하진동만을 나타내었고 Fig. 18, 19, 20의 응력은 엔드빔의 행거 브라켓에서 3축 게이지로 측정한 값을 나타내었다. 3축 스트레인 게이지는 수평방향을 0° 로 기준하여 시계방향으로 45° 와 90° 에 부착하였다. 주기적인 간격으로 진동 및 응력값이 증가하고 있는데 이는 화차가 레일

이음매를 통과하면서 발생하는 충격에 인한 것으로 25 m 간격마다 일반 선로의 10배 정도씩 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 개선화차의 경우, 주행시의 응력값이 커서 레일이음매 통과시의 영향이 적었다. Fig. 16, 17의 진동가속도 파형에서 볼 수 있는 것처럼 차량이 레일이음매를 통과할 때 대차 프레임의 ①, ④번과 ②, ③번 위치의 진동이 반대방향으로 나타나고 있어 이로 인하여 비틀림이 발생할 것으로 예측되었다.

4.3 결과고찰

모드해석에서의 7차모드와 실차시험결과를 살펴보면 주행중에 대차 프레임 모서리에서의 상하방향 진동은 Fig. 21과 같이 엔드빔의 양 끝단에서 대각선으로 반대방향 파형이 나타나고 있어 이로 인한 비틀림이 발생할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

용접구조대차 엔드빔의 균열원인은 제동하중보다는 주행중의 진동이 지배적이었으며, 태백선과 같이 장대레일이 부설되지 않은 선로를 주행할 때 레일 이음매를 통과하면서 충격 및 비틀림이 발생하여 25 m마다 진동과 응력이 큰 폭으로 증가하였다.

참 고 문 헌

- (1) 함영삼, 오택열, 2000, "화물수송용 철도차량의 주행안정성 향상에 관한 실험적 연구", 한국소음진동공학회, 학술대회논문집 II, pp. 888~893.
- (2) JIS E 4207, 1992, Truck Frame for Railway Rolling Stock - General Rules for Design, Japanese Industrial Standard, Japanese Industrial Standards Committee
- (3) JIS E 4208, 1988, Test Methods of Static Load for Truck Frames and Truck Bolsters of Railway Rolling Stock, Japanese Industrial Standard, Japanese Industrial Standards Committee.
- (4) 황원주, 함영삼, 권성태, 허현무, 전응식, 2001, "고속화차용 용접대차의 구조강도 해석", 한국철도학회, 춘계학술대회논문집, pp. 217~221.
- (5) 황원주, 함영삼, 강부병, 전응식, 2001, "고속화차용 용접대차 프레임 개선모델의 강도평가", 한국철도학회, 추계학술대회논문집, pp. 235~239.

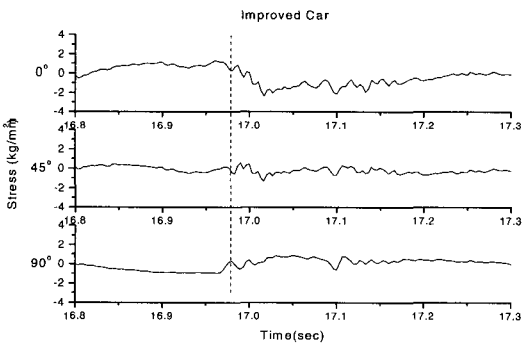


Fig. 20 Dynamic stress response of the improved car passing the joint of the rails

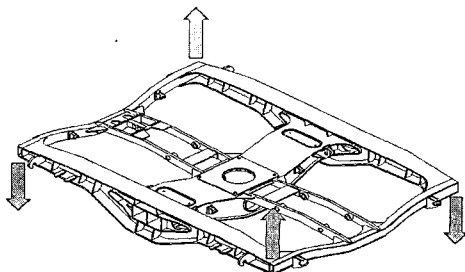


Fig. 21 Vibration mode of running