

철도차량의 차체고유진동수가 인체에 미치는 영향에 대한 고찰

The study for an effect on the human body due to the natural frequency of carbody of rolling stock

박광복*†

Kwang Bok Park*†

Abstract: The rolling stock in 21st Century is used to a core traffic means of the middle – long distance travel and urban transportation. Specially as a output of CO2 each country to effect of the global warming was limited, the each country in world is established railway network to preparing transportation policy to main transportation for the rolling stock as echo-friendly traffic means.

The carbody of rolling stock which the natural frequency of carbody by elastic vibration with steel structure is generated is known to hinder the comfort of long distance travel.

This study will be look for the elastic vibration theory of carbody and the criteria of natural frequency of rolling stock, in addition will check to survey the natural frequency of carbody and bogie of rolling stock in commercial operating in each country railway of domestic and oversea.

To reference the natural frequency of carbody surveyed, the natural frequency of carbody of rolling stock was studied an effect on bogie and the human body and it was suggested reasonable the natural frequency of carbody .

Keywords :

초 록 : 21 세기에 있어서 철도차량은 중장거리 여행과 도시교통의 핵심교통수단으로 이용되고 있다. 특히 지구온난화의 영향으로 각국마다 CO2 배출량이 제한되자, 전세계 각국에서는 친환경교통수단인 철도차량을 주교통기관으로 정책을 수립하여 철도네트워크를 구축하고 있다.

철도차량의 차체는 강재구조로써 탄성진동에 의한 차체고유진동수가 발생되며, 장거리여행객의 승차감을 저해하는 것으로 알려져 있다.

본 고찰에서는 철도차량의 차체 탄성진동 이론과 고유진동수에 대하여 살펴보고, 아울러서 국내외 각국 철도에서 상업운용중인 철도차량의 차체 및 대차의 고유진동수 사례를 조사하여 검토하고자 한다.

조사된 차체고유진동수를 참조하여, 철도차량의 차체고유진동수가 대차와 인체에 미치는 영향에 대해 고찰하여, 적절한 차체고유진동수를 도출하여 제시하였다.

주요어 : 차체고유진동수, 차체탄성진동, 인체고유진동수, 대차고유진동수, 승차감

1. 서 론

21 세기에 있어서 철도차량은 중장거리 여행과 도시교통의 핵심교통수단으로 이용되고 있다. 특히 지구온난화의 영향으로 각국마다 CO2 배출량이 제한되자, 전세계 각국에서는 친환경교통수단인 철도차량을 주교통기관으로 정책을 수립하여 철도네트워크를 구축하고 있다.

고속으로 주행하는 철도차량에 있어서 차체는 승객이 안락하고, 편안하게 여행하기 위한 거주성, 안락성, 편의성 등을 갖춰야 하며, 차량에 승객이 탑승한 상태로 최고운행속도에서 정상적인 주행과 제동이 가능하고, 안전한 주행을 위한 충분한 강도를 확보해야 한다. 아울러 차체는 적절한 강성(rigidity)을 갖도록 설계하여, 차체의 탄성진동(Elastic Vibration)에 의한 승차감(Ride Comfort)의 저하, 주행장치 등과 공진(共振)이 일어나지 않도록 하여야 한다.

철도차량의 차체는 일반적으로 강재, 스테인리스 강, 알루미늄 합금, 복합소재 등으로 제작되며, 차체의 탄성진동으로 인해 차체고유진동수가 발생되며, 특히 이 진동수는 장거리여행객의 승차감을 저해하는 것으로 알려져 있다.

본 고찰에서는 철도차량의 차체 탄성진동 이론과 고유진동수에 대하여 살펴보고, 아울러서 국내외 각국 철도에서 상업운용중인 철도차량의 차체 및 대차의 고유진동수 사례를 조사하여 검토하고자 한다. 아울러 조사된 차체고유진동수를 참조하여 철도차량의 차체고유진동수가 대차와 인체에 미치는 영향에 대해 고찰하여, 적절한 차체고유진동수를 도출해 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 차체의 탄성진동 발생

차체구조는 강체로 된 탄성체이기 때문에 상하, 좌우방향 등으로 여러 가지 고유진동을 한다. 이 진동은 차륜담면의 경사 및 레일이음매의 충돌 그리고 대차스프링 하질량(Unsprung Mass)의 진동, 견인전동기와 구동장치의 불균형, 공기압축기나 전동발전기의 불균형 등의 가진력에 의해 발생된다. 차체의 탄성진동은 일반적으로 진동수가 높기 때문에 가속도가 적어도 승차감에 큰 영향을 미치므로 중요하다.

철도차량이 주행 중에 나타나는 차체탄성진동은 그림 1 에 나타나 있다. 진동수 및 진동형은 속도에 관계가 없으며, 양볼스터센터(Bolster Center)를 절점으로 굽힘진동을 일으키고 있는 것을 알 수 있다.

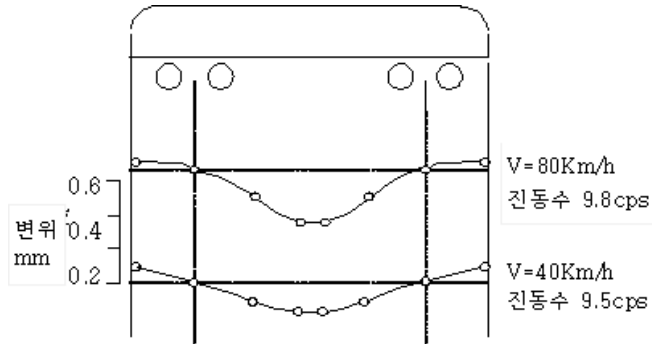


그림 1 차량이 주행 중일 때 차체굽힘진동형

이론적으로 다절점인 굽힘진동이 존재하지만 실제 차량은 거의 나타나지 않으며, 센터 플레이트(Center Plate) 부근의 상면에 진동수가 30~70Hz 로 나타나고 있지만, 이것은 차체

볼스터스프링 등의 국부적인 탄성진동으로 센터플레이트 부근부터 낮아져 감쇄되며, 이와 같은 고주파진동수의 진동은 의자의 쿠션 의해 감쇄되어 문제가 되지 않는다.

2.2 차체굽힘진동의 진동수 및 진동형

차체굽힘진동의 진동수 및 진동형은 외부에서 차체에 주기적인 강제력을 가하여 진폭과 진동수의 관계, 즉 공진곡선을 그리거나 공진 시 차체 각부의 변위를 측정함에 따라 구해진다.

그림 2 는 차체의 센터플레이트 위치를 기준으로 하고, 차체 중앙부근에 가진기를 설치하여 회전시킬 경우 공진곡선의 예시이며, 제 1 차 공진점에 진동형은 센터플레이트 위치에 절점이 있는 제 1 차 굽힘진동으로 주행 중에 나타나는 차체의 굽힘진동과 유사하다.

제 2 차 공진점에는 센터플레이트 위치와 차체 중앙에 절점이 있는 곳에서 제 2 차 굽힘진동이 일어나고 있으며, 가진기의 회전수를 높이면 절점의 수가 점점 늘어나 제 3 차 굽힘진동이 나타나지만, 실제로 차량은 차체가 대차의 센터플레이트 위치에서 탄성적으로 지지하고 있기 때문에 차체의 굽힘진동특성을 실험적 또는 이론적으로 구할 경우, 차체는 센터플레이트 위치에서 핀(Pin) 지지하고 있다고 할 수 있다.

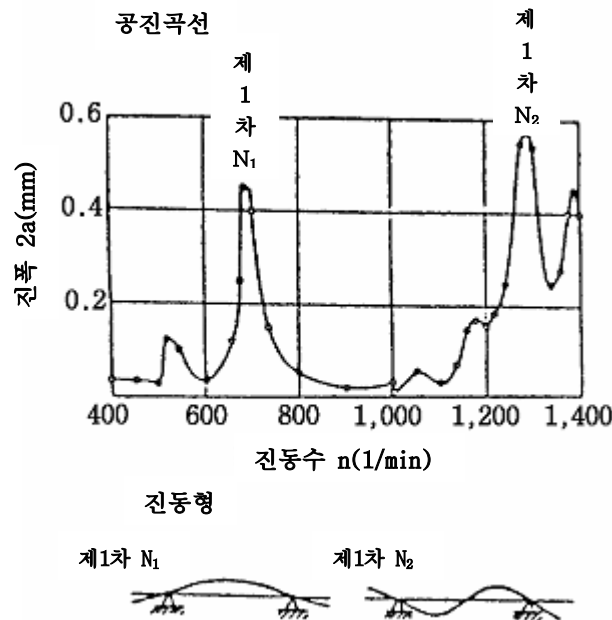


그림 2 차량이 정지하고 있을 때 차체굽힘진동형

2.3 차체 고유진동수 계산 방법

단순보에서 강성 및 중량의 분포가 일정한 균일한 빔의 굽힘진동 및 진동형은 이론적으로 구할 수 있지만, 보의 구조가 복잡한 탄성차체는 굽힘진동특성을 계산하는 것은 쉽지 않다.

철도차량에서 차체의 길이 축(x 축)에 따라 중량분포 $w(x)$, 강성분포 $EI(x)$ 를 알 수 있는 경우, 굽힘진동수 계산은 차체를 전후 대칭으로 보고, 그림 3 과 같이 차체 중앙을 원점으로 놓고, 차체의 반 정도를 생각할 수 있다.

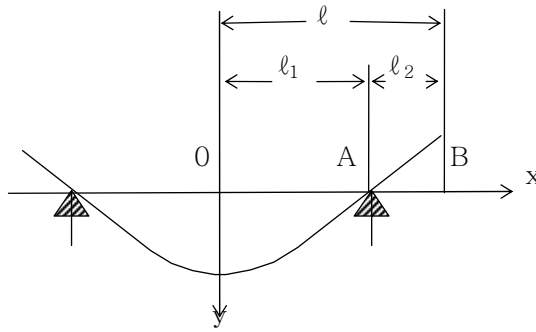


그림 3 균일빔의 굽힘진동형

x 점의 차체진폭을 $f(x)$ 로 하면, 탄성체진동이론에 의해 빔굽힘진동수는 식 1 과 같이 된다.

$$v^2 = \frac{\int EI(x) \{f''(x)\}^2 dx}{\int \frac{w(x)}{g} \{f(x)\}^2 dx} \quad \text{식 1}$$

2.3.1 차체의 상당굽힘강성 및 진동수

1) 상당굽힘강성(Equivalent Bending Rigidity)

철도차량의 차체는 각 부재에 발생하는 응력이 허용범위에 있으면, 강도로서 충분하여도 어느 정도 이상의 강성이 없으면, 주행 중에 진동이 유발되기 쉽고, 또한 승차안락(Riding Comfort)을 나쁘게 하든가, 공진을 일으킬 때 반복피로에 따른 파손의 원인이 되기도 한다.

차체에서 가장 큰 문제가 되는 것은 수직방향의 굽힘에 따른 굽힘강성이다. 그 값은 정적하중시험에서, 차체강성은 볼스터 상부에서 지지된 빔이 단순빔형상으로 균일분포하중을 받는 경우로 가정하여, 차체 중앙부의 변위에 대한 처짐으로부터 상당굽힘강성을 구하는 식이 식 2 에 정의되어 있다.

$$EI_{eq} = \frac{w\ell_1^2}{384\delta} \times (5\ell_1^2 - 24\ell_2^2) \quad \text{식 2}$$

여기서 EI_{eq} : 상당굽힘강성(kg/mm²)

w : 단위 길이 당의 하중(kg/mm)

ℓ_1 : 볼스터 중심간의 거리(mm)

ℓ_2 : 볼스터 중심에서 차체 단부간 거리(mm)

δ : 차체 중앙부의 변위(mm)

2) 차체의 굽힘고유진동수(Bending Natural Frequency)

차체를 단수보로 가정하면 차체 굽힘고유진동수의 계산은 식 3 에 의하여 구할 수 있다.

$$f = \frac{\pi}{2\ell_1^2} \sqrt{\frac{EI_{eq} \times g}{w \left\{ 1 + \frac{\pi^2}{6} \left(\frac{2\ell_2}{\ell_1} \right)^3 \right\}}} \quad \text{식 3}$$

여기서 : g 는 중력가속도(mm/s²)

일반적으로 완성차량의 굽힘고유진동수는 승차감에 관계가 있으므로, 그림 4 에 나타나 있는 바와 같이 인체가 상하진동에 가장 민감한 주파수범위인 4-8 Hz 를 고려 8 Hz 이상이

되어야 한다. 철도차량에 차체의 굽힘고유진동수는 일반적으로 10 Hz 이상으로 한다.

표 8 에 국내외 철도차량 차체의 굽힘고유진동수를 측정한 값이 나타나 있으나, 차체설계 기술과 측정방법에 따라 차이가 난다. 국내외 철도차량에 사용되고 있는 차체 고유진동수를 살펴보면, 객차는 12~13Hz, 전동차는 10~12 Hz, 동력차는 9~10Hz 를 사용하고 있다.

표 1 의 차체 사용 재료별로 굽힘고유진동수를 구분할 수 없으나, 저탄소고장력 스테인리스 강 차체, 알루미늄 합금 차체, 강재 차체의 순위로 높게 나타나는 경향을 보이고 있다.

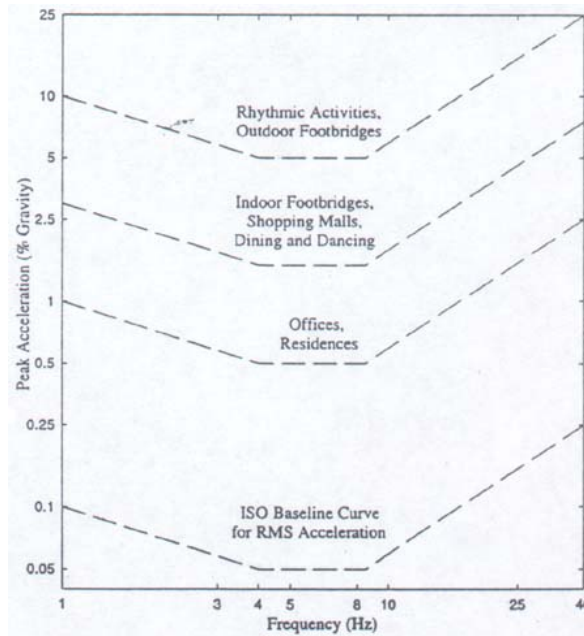


그림 4 인간의 활동에 의한 진동 시 인간의 안정을 위한 최대가속도의 제안치(Allen and Murray, 1993 ; ISO 2631-2 ; 1989)

표 1 각국의 철도차량 차체 굽힘고유진동수 사례

국가별	차종	재료	굽힘고유진동수(Hz)	제작년도
한국	새마을 객차	STS 304	10.7	1988
	KTX 고속전철	강재: E24, E26, E36.3	사양: 동력차: 8, 객차: 13 동력객차: 10	1994
	한국형 고속전철	A6005A-6, A5083-0	사양: 동력차: 8, 객차: 13 동력객차: 10	1996
	서울메트로 전동차	강재: SS400	1호선: T: 12.5, M: 11.15 2호선: M: 11.18	1975, 1976 1980
	과천선 전동차	STS 201L-HT, STS301L	12.5	1994
태국	침대객차	STS 201L-HT, STS301L	11.4	1992
일본	도쿄지하철 No 6000	STS 201L-HT, STS301L	11.4	-
	도쿄지하철 No 10	STS 201L-HT, STS301L	9.3	

2.3.2 차체의 비틀림 강성 및 진동수

진동의 형 즉 빔의 비틀림곡선을 가정하면, 그것도 주어진 중량분포와 진동의 관성력에 의한 하중을 얻을 수 있다. 이 하중이 정적으로 작용함으로써 각 단면의 전단력 및 굽힘모멘트를 순차적으로 구할 수 있고, 굽힘모멘트를 알면 빔의 이론에 따라 비틀림곡선의 경사 및 비틀림을 알 수 있다.

이 비틀림곡선은 최초로 가정함에 따라 정도가 높게 된다. 이 비틀림 곡선을 사용하여 같은 것을 수회 반복하면 정확한 비틀림곡선을 구할 수 있다.

최초로 가정한 비틀림곡선을 $f_0(x)$ 라고 하면 제 1, 제 2, ..., 제 n 부근의 비틀림 곡선은 식 3으로 구할 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} f_1(x) &= \iint \frac{\iint \frac{w(x)}{g} f_0(x) dx dx}{EI(x)} dx dx \\ f_2(x) &= \iint \frac{\iint \frac{w(x)}{g} f_1(x) dx dx}{EI(x)} dx dx \\ &\vdots \\ f_n(x) &= \iint \frac{\iint \frac{w(x)}{g} f_{n-1}(x) dx dx}{EI(x)} dx dx \end{aligned} \right\} \text{식 4}$$

그리고 각 단면에 있어서 $f_{n-1}(x) / f_n(x)$ 를 일정 값으로 받으면 $f_{n-1}(x)$ 는 바른 비틀림곡선을 나타나게 되며 진동수는 식 5와 같이 정의된다

$$v^2 = \frac{f_{n-1}(x)}{f_n(x)} \quad \text{식 5}$$

지하철은 승객을 대량수송하기 위해 실내에 의자배치를 양 측벽 쪽으로 하고, 출입구를 각 측에 4 개씩 설치함으로써 많은 승객이 일시에 승·하차를 할 수 있도록 되어있다. 갑자기 승객이 한쪽으로 쏠림이 예상되므로 지하철은 차체 비틀림에 대해 강성을 유지해야 한다.

1) 차체 상당비틀림강성(Equivalent Torsional Rigidity)

차체의 전체 길이에 대한 상당비틀림강성은 식 6으로 구한다.

$$GJ_{eq} = \frac{T \cdot \ell}{\theta} = \frac{aT\ell}{\delta} \quad \text{식 6}$$

여기서 T : 비틀림모멘트(kg · mm)

ℓ : 차체의 길이(mm)

θ : 비틀림 각도

δ : 변형량(mm)

2) 차체의 비틀림진동수

일반적으로 차체의 비틀림진동수는 밴딩진동수 보다 낮은 값을 나타낸다. 표 2 는 차체의 비틀림진동수를 측정 한 값의 사례이다.

표 2 차체의 비틀림진동수 사례

국가별	차종명	비틀림진동수(Hz)	제작년도	비고
한국	서울메트로 전동차	1호선: M : 7.7	1976	
		2호선: 10.5	1980	
	과천선 전동차	11.5	1994	
일본	도쿄지하철 No 10	5.0	-	
	도쿄지하철 No 5000	9.4	-	

2.4 대차의 고유진동수

2.4.1 대차의 고유진동수

철도차량의 대차는 차량이 선로 위를 주행 시 차량의 주행안정성을 확보하면서 최고운행속도로 주행할 수 있는 주행장치이다. 대차는 차량의 최대하중을 지지할 수 있는 충분한 강도를 확보해야 하며, 주행 시 발생하는 진동을 감쇄시켜 차량이 안정적으로 주행할 수 있도록 하여야 한다. 대차의 주요 구성품은 대차골조, 차축 및 차륜, 스프링 및 댐퍼, 제동장치, 견인전동기, 감속기 등이 설비되어 있다.

대차는 차량의 최대하중을 견디는 구조물과 주행 중 발생하는 진동을 완화시키는 설비가 갖추어져 있다. 이들의 중량물은 각각 고유진동수를 발생시키고 있으며, 표 3 에 대차 주요부의 진고유동수가 나타나 있다. 표 3 에 따르면, 대차의 상하고유진동수는 8.0Hz 로 나타나 있다.

표 3 틸팅차량의 대차 고유진동수(주행속도 130km/h 에서)

명 칭	고유진동수(Hz)	감쇄비(%)
대차(요잉)	2.3	22
대차(전후)	5.8	51
전위대차(상하)	7.9	15
후위대차(상하)	8.0	13
대차골조(피칭)	10.0	4
대차골조(좌우)	12.0	32
대차골조(롤링)	12.0	7

2.5 인체 고유진동수 및 진동수 영향 검토

2.5.1 인체 고유진동수

인간의 신체는 진동현상을 느끼며, 진동수, 진폭, 지속시간에 따라 좋은 영향을 주기도 하고, 오히려 나쁜 영향을 미치기도 한다. 인간이 진동현상을 느끼는 진동영역은 약 0.1~500Hz 영역이며, 이 중에 인체에 악영향을 주는 진동수 범위는 1~90Hz 로 알려져 있다.

신체는 진동현상으로 인해 진동수에 따라 장해를 느낄 수 있다. 60Hz 이상일 때는 인체는 민감하게 진동현상을 감지하며 65~70Hz 에서는 수면에 지장을 주며, 인간이 감내할 수 있는

최대 진동수는 145Hz 내외이다. 진동수 1Hz 이하에서는 멀미를 유발하며, 30~80Hz 에서는 눈동자 떨림에 의한 시야가 흔들림이 발생한다. 신체의 주요기관의 고유진동수는 다음과 같다.

- 머리 : 25Hz 이하 - 뇌 : 18Hz - 안구 : 30~80Hz
- 가슴 : 60Hz 이하 - 위장 : 4~6Hz - 척추 : 10~12Hz
- 팔꿈치 : 16~30Hz - 손목 : 50~200Hz - 무릎 : 2~20Hz
- 어깨 : 4~5Hz

2.5.1 인체의 진동영향

신체는 상하 4~8Hz, 좌우 2Hz 내외, 전후 2Hz 내외의 진동현상에서 민감하게 반응한다. 또한 회전운동에도 영향을 받으며 특히 롤링(Rolling) 및 요잉(Yawing) 운동보다는 피칭(Pitching) 운동방향에 더 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

교통기관에 탑승 시 인체의 진동 영향은 낮은 진동수이며, 좌석에 앉아 있을 경우 50Hz 이하 진동영역이 영향을 미치며, 수면장애는 65~70Hz, 시야 흔들림은 30~80Hz, 멀미는 1Hz 이하, 불쾌감은 상하진동 5Hz 내외, 좌우진동 1~3Hz, 장기 불편함은 8Hz 이하에서 발생한다.

3. 결론

철도차량 차체고유진동수에 대하여 살펴 본 바와 같이 차체의 고유진동수는 객차는 11~13Hz, 지하철의 경우는 9~11Hz로 나타나 있고, 대차의 고유진동수는 8Hz정도 이다.

한편 인체의 장기는 4~6Hz, 신체(어깨, 무릎 등)는 4~8Hz에 불쾌함을 느끼기 때문에 8~10Hz의 진동수는 피해야 한다.

따라서 차체의 고유진동수를 10Hz 이상으로 기준을 설정하여, 대차의 고유진동수 8Hz와 공진을 피해 주행안정성 확보하고, 승차감을 감소하지 시키지 않아야 한다. 또한 인간의 신체의 진동 민감영역인 4~8Hz를 피함으로써 승객에게 불편함이나 승차감을 저하시키지 않도록 해야 한다.

참고자료

1. 철도차량공학, 박광복 저, 삼성출판소, 1999
2. 인터넷 유정훈 카페(<http://cafe.naver.com/datacar>) : 진동의 기초이론
3. 틸팅대차 기본설계 및 동역학 해석, 김남포 선임연구원, 김정석 선임연구원, KRRI, 2006.9