

디젤기관차를 이용한 경부선의 하중이력 측정

Measurement of load history of Kyoung-Bu line by using the diesel locomotive

함영삼* 서정원** 오택열***
Y. S. Haam J. W. Seo T. Y. Oh

ABSTRACT

The machine structure or parts has been arrive at a fracture, depend on crack by repeated load. Machine designer is estimate of fatigue strength in early stages the design for prevent fatigue fracture, then necessary its load history. This research study is using diesel locomotive in measurement of load history for fatigue design of rolling stock. The relation between velocity and amplitude of load history was found. We confirmed that the increase of velocity make to increase the magnitude of amplitude.

Keywords : fatigue analysis, load history, rolling stock, wheel & axle

1. 서론

기계 구조물 또는 부품들은 대부분 반복하중을 받고 있으며, 이러한 기계 구조물 또는 부품 파손의 대부분은 반복하중에 의해 균열이 발생, 진전, 파단에 이르는 피로현상에 의한 것으로 알려져 있다. 설계자들은 이러한 피로파괴현상을 방지하기 위해서 설계단계에서 피로강도평가를 수행하고 있다. 피로강도평가를 수행하기 위해서 반드시 필요한 것 중의 하나가 부품이 받고 있는 하중이다. 특히 초기 설계단계나 형상이 결정되지 않은 단계, 즉 형상 결정을 위한 피로강도평가에서는 국부 변형율 이력보다는 부품의 경계에서의 하중이력이 필요하다. 또한 피로시험 사양서 개발에 있어서도 하중이력이 변형율이력보다 유리하며, 내구 시뮬레이션 시험에서도 마찬가지로이다. 따라서 여러 연구자들이 이러한 하중이력을 보다 정확히 측정하기 위한 기법을 확립하기 위해서 많은 노력을 기울이고 있다.^{(1),(2)}

이에 본 연구에서는 기존철도로 운용중인 차량에 대한 운용하중이력을 측정, 분석하여 철도차량의 피로설계 및 내구성 평가의 기초자료를 확보하고자 한다.

2. 하중이력 측정방법

2.1 측정차륜

일반적으로 사용되는 측정차륜으로는 스포크차륜과 일체차륜이 있다. Fig. 2.1은 스포크 차륜에서 수직력과 수평력(횡력)을 측정하기 위한 스트레인 게이지 부착 위치를 보여 주고 있다. 수직력을 측정하기 위해서는 스포크 길이중심에 스트레인 게이지를 부착하여 수직력에 의한 굽힘 변형율을 측정하고, 수평력을 측정하기 위해서는 스포크의 곡선 시작점에 스트레인 게이지를 부착

* 한국철도기술연구원 차량연구본부 선임연구원, 정희원
** 한국철도기술연구원 차량연구본부 주임연구원, 정희원
*** 경희대학교 기계공학과 교수

하여 수평력에 의한 전단 변형율을 측정하도록 하였다.

스포크차륜이 차량에 사용되었을 경우에는 상호간섭이 작기 때문에 측정차륜으로 많이 사용되었으나, 현재에는 국내에 운용되지 않기 때문에 사용할 수 없다.

일체차륜의 경우에는 Fig. 2.2와 같이 A, B, C형의 단면형상을 갖는 차륜이 있으며 판부가 곡면인 A, B형차륜에서는 윤중과 횡압의 상호간섭이 있기 때문에 측정결과에 대한 보정이 필요하다. 따라서 판부가 수직인 C형 차륜을 측정차륜으로 사용하는 것이 바람직하다.⁽³⁾ 그러나 국내에서는 C형차륜을 실제운용차량에 사용하지 않기 때문에 측정을 위해서는 차륜을 별도로 제작하여야 한다. 따라서 금번 측정은 국내에서 사용하고 있는 B형차륜을 이용하여 하중이력을 측정하였다.

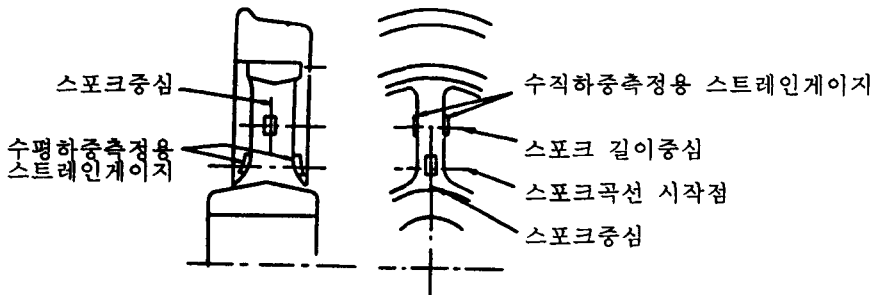


Fig. 2.1 스트레인 게이지 부착위치

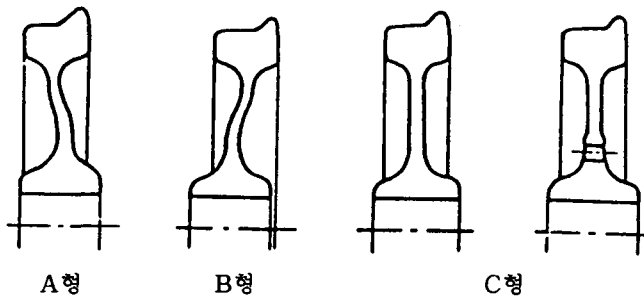


Fig. 2.2 압연차륜의 종류

2.2 스트레인 게이지 결선방법

일본에서 사용되고 있는 윤중과 횡압의 측정방법에는 간헐법과 연속법 2가지가 있다. 간헐법은 차륜 1회전에 2회의 출력을 얻는 방법이고, 연속법은 연속적으로 출력이 얻어지는 방법이다. 본 연구에서는 한쪽 차륜에는 간헐법을 이용하였으며 다른 차륜에는 연속법을 이용하였다.

2.2.1 간헐법

Fig. 2.3(a)는 간헐법을 위한 게이지 부착위치와 결선도로서 4개의 구멍을 이용하여 수평, 수직 하중을 측정한다. 윤중을 측정하기 위해서는 그림과 같이 대각선 2개의 구멍을 이용, 4개의 게이지로 결선하여 출력을 얻도록 하였으며 P1, P2 2개의 신호가 90°의 위상차를 가지고 발생한다.

횡압을 측정하기 위한 결선은 2개의 구멍위치에 부착된 게이지 8개를 결선하여 출력이 발생하도록 하였고, Q1, Q2 2개의 신호가 90°의 위상차를 가지고 발생한다. 간헐법에 부착된 게이지는 3mm-350Ω 고온용게이지를 점용접하여 부착하였다.

2.2.2 연속법

Fig. 2.3(b)는 연속법을 위한 게이지 부착위치와 결선도로서 8개의 구멍을 이용하여 수평, 수직 하중을 측정한다. 연속법을 이용한 윤중, 횡압 측정시에는 그림과 같이 윤중, 횡압게이지 16개를 1개의 브릿지로 결선하여 신호가 각각 P, Q 1개씩 발생하도록 하였다. 연속법에 부착된 게이지

는 5mm-120Ω 게이지로 접착제를 이용하여 부착하였다.

간헐법은 출력신호가 크기 때문에 온도변화 및 노이즈 등의 영향을 거의 받지 않는 장점은 있지만, 충격적인 횡압이나 고주파의 윤중변동이 발생할 경우 차륜과 레일의 접촉점 위치에 따라서 윤중과 횡압의 순간적인 값을 기록할 수 없는 경우가 있다. 그러나 연속법은 특정부분을 제외하면 이러한 결점은 없지만 출력이 간헐법의 1/4정도로 작기 때문에 온도변화 및 노이즈의 영향을 받기 쉬우므로 특히 주의하여야 한다⁽³⁾.

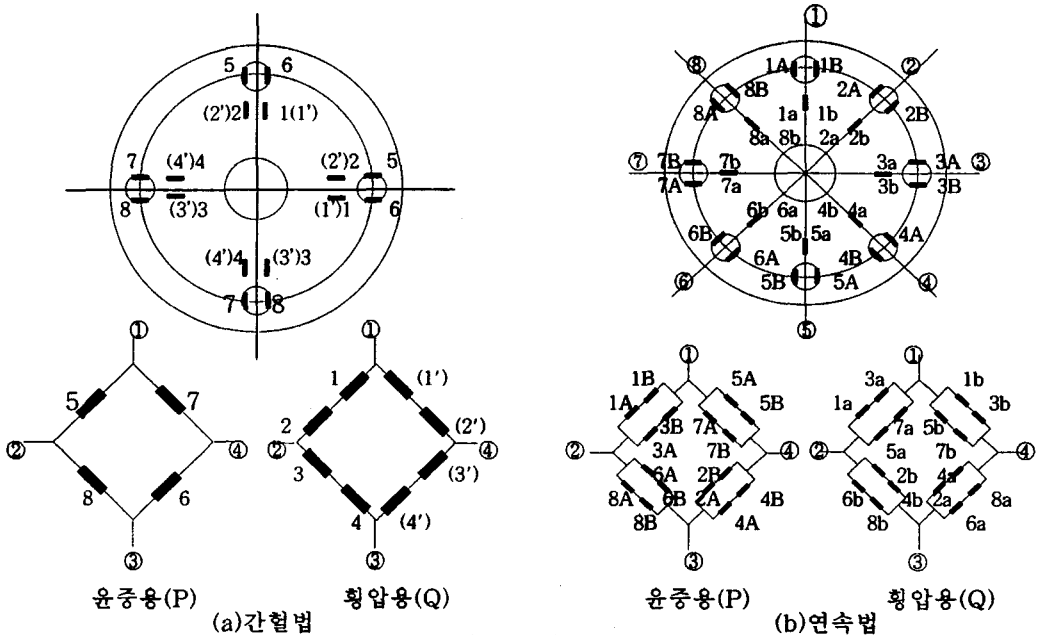


Fig. 2.3 게이지 부착위치와 결선도

2.3 윤중/횡압의 상호간섭 보정⁽⁴⁾

디젤기관차 윤측을 측정차륜으로 사용할 경우에는 수평하중과 수직하중사이에 상호간섭이 발생하므로 이에 대한 보정이 필요하다.

구하고자 하는 윤중 P와 횡압 Q, 그리고 Calibration시 얻은 교정치 ϵ_{pp} , ϵ_{qq} , ϵ_{pq} , ϵ_{qp} , 주행 중 발생하는 출력량 E_q , E_p 사이의 관계는 식(1)과 식(2)와 같이 표현된다.

$$\epsilon_{qq} \cdot Q + \epsilon_{qp} \cdot P = E_q \dots\dots\dots (1)$$

$$\epsilon_{pq} \cdot Q + \epsilon_{pp} \cdot P = E_p \dots\dots\dots (2)$$

식(1)과 (2)를 연립해서 풀면 상호간섭이 보정된 P, Q값을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P = \left(\frac{\epsilon_{qq} \cdot E_p}{\Delta} \right) - \left(\frac{\epsilon_{pq} \cdot E_q}{\Delta} \right) \dots\dots\dots (3)$$

$$Q = \left(\frac{\epsilon_{pp} \cdot E_q}{\Delta} \right) - \left(\frac{\epsilon_{qp} \cdot E_p}{\Delta} \right) \dots\dots\dots (4)$$

여기서

$$\Delta = \epsilon_{qq} \cdot \epsilon_{pp} - \epsilon_{pq} \cdot \epsilon_{qp}$$

ϵ_{pp} = 수직하중에 의한 P bridge 출력(P 교정치, $\mu \epsilon / \text{ton}$)

- ϵ_{qq} = 수평하중에 의한 Q bridge 출력(Q 고정치, $\mu \epsilon / \text{ton}$)
- ϵ_{pq} = 수평하중에 의한 P bridge 출력($\mu \epsilon / \text{ton}$)
- ϵ_{qp} = 수직하중에 의한 Q bridge 출력($\mu \epsilon / \text{ton}$)
- E_p = 주행시에 발생하는 P bridge 출력 스트레인($\mu \epsilon$)
- E_q = 주행시에 발생하는 Q bridge 출력 스트레인($\mu \epsilon$)

2.4 측정 시스템 및 방법

윤중 및 횡압 측정을 위한 측정대상차는 7300호대 디젤기관차를 선정하였으며 시험차를 연결하여 Dynamic Strain Amplifier, Tape Recorder, Signal Processor 등의 장비를 탑재하였다. Fig. 2.4 와 2.5는 시험에 사용된 Telemeter와 Signal Processor를 보여주고 있다.

하중이력 측정구간은 가야역에서 출발하여 삼랑진-순천간의 경전선과 광주-서대전간의 호남선, 조치원-제천간의 충북선, 제천-영주간의 중앙선, 동대구-가야간의 경부선 등에서 선로허용 최고속도로 주행하면서 시험을 실시하였다.

Fig. 2.6은 윤중/횡압 측정계통도를 나타내고 있으며 P, Q에 대한 신호는 Telemeter를 통하여 송·수신하도록 하였으며 측정데이터는 테이프 레코더에 저장되도록 하였다.



Fig. 2.4 기관차에 취부된 Telemeter



Fig. 2.5 Signal Processor

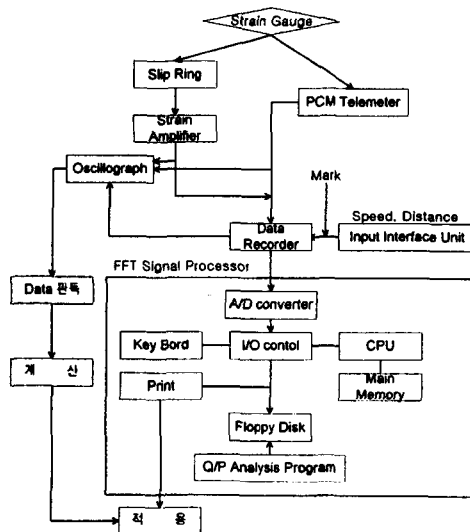


Fig. 2.6 윤중/횡압 측정 Block Diagram

3. 측정결과

3.1 데이터 분석구간

측정구간은 선로별로 등급이 다르고 제한최고속도 등이 다르므로 각각의 선로에 대하여 일정 구간을 분석하여 경전선의 경우에는 함안역에서 남문산역까지 40km 구간, 충북선은 오성에서 충주까지 80km 구간, 중앙선은 제천에서 영주까지 60km 구간, 경부선은 동대구에서 사상까지 100km 구간을 분석하였다.

3.2 속도에 대한 윤중 · 횡압의 변화

3.2.1 윤중

Fig. 3.1~4는 각각의 선로에 대한 측정결과를 나타낸 것으로 속도에 대한 윤중값을 나타내고 있으며, Table 3.1은 각각의 선로별로 최고운행속도, 윤중의 최대치, 최소치를 나타내고 있다. Fig. 3.1은 경전선의 측정결과로써 최고속도는 85 km/h 까지 시험을 실시하였다. 그림과 같이 저속에서는 정하중인 10.3ton 부근을 중심으로 진폭이 작은 것을 알 수 있으며 속도가 증가함에 따라 진폭이 증가함을 알 수 있다. 이 때 최대치는 14.1 ton이고 최소치는 5.1 ton이 발생하였다.

Fig. 3.2는 충북선에 대한 결과로써 최고운행속도는 120 km/h 까지 시험을 실시하였고, 그림과 같이 속도가 증가함에 따라 진폭이 증가하는 경향을 나타내고 있으며 최대치는 14.2 ton, 최소치 4.1 ton이 발생하였다. 충북선의 경우에는 저속인 20 km/h에서 윤중값이 14 ton 정도로 높게 발생하고 정하중인 10.3 ton 이하의 윤중은 거의 발생하지 않고 있다. 이는 분석시 구내, 분기기 등을 제외하지 않았으므로 이러한 부분을 통과할 때 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 3.3은 중앙선의 경우로써 최고 시험속도는 100 km/h이고 최대치는 14.5 ton 최소치는 5.0 ton이 발생하였다. 이 결과 역시 분기기 등의 통과시에 큰 윤중이 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 3.4는 경부선의 경우로써 최고 운행속도는 110 km/h 이고 최대치는 14.5 ton 이 발생하였으며 최소치는 5.5 ton이 발생하였다.

윤중의 경우는 전반적으로 속도가 증가할수록 정하중을 중심으로 진폭이 증가함을 알 수 있다.

3.2.2 횡압

Fig. 3.5는 경전선의 속도에 대한 횡압의 변화를 나타낸 것으로써 속도가 증가함에 따라 횡압의 크기가 증가하고 있으며 최대치는 7.6 ton이 발생하였다. Fig. 3.6은 충북선의 경우를 나타낸 것으로써 속도 29km/h에서 9.1ton의 최대횡압이 발생하였고, 속도가 증가함에 따라 횡압 역시 증가하고 있으나 속도가 100 km/h 이상에서는 횡압이 작게 발생하고 있다. 이러한 결과는 속도가 100 km/h 이상인 경우에는 곡선이 아니라 직선구간이기 때문에 횡압이 작게 발생하였고, 큰 횡압의 80km/h대역 속도구간은 곡선 주행시 발생한 결과라고 판단된다. 따라서 횡압의 경우에는 곡선구간에 주로 발생하고 있으므로 속도의 영향만을 고려하는 것보다는 곡선과 속도를 동시에 고려하여 판단하여야 한다.

Fig. 3.7~8은 중앙선과 경부선에 대한 결과로써 중앙선의 경우에는 최대치가 6.5 ton이 발생하였고, 경부선의 경우에는 4.4 ton이 발생하였다.

Table 3.1 선로종류에 따른 윤중과 횡압의 최대치

선로종류	윤 중			횡 압
	최고운행속도 (km/h)	최대치 (ton)	최소치 (ton)	최대치 (ton)
경전선(3급선)	85	14.1	5.1	7.6
충북선(3급선)	120	14.2	4.1	9.1
중앙선(3급선)	100	14.5	5.0	6.5
경부선(2급선)	110	14.5	5.5	4.4

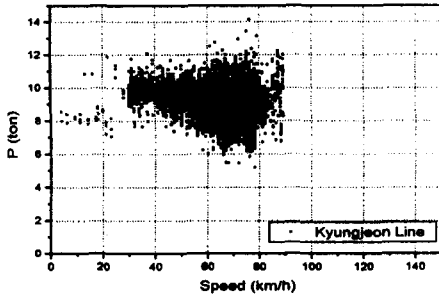


Fig. 3.1 경전선의 속도와 윤중

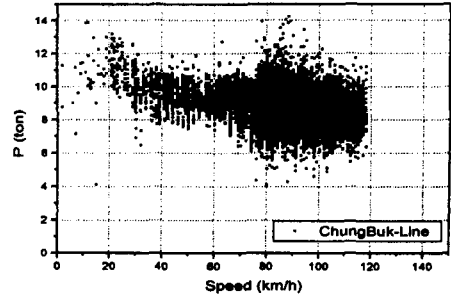


Fig. 3.2 충북선의 속도와 윤중

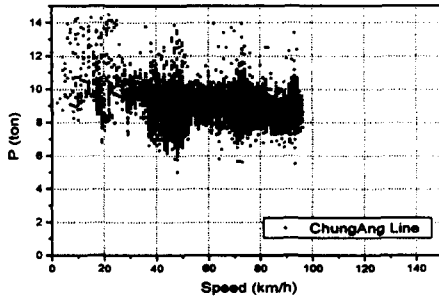


Fig. 3.3 중앙선의 속도와 윤중

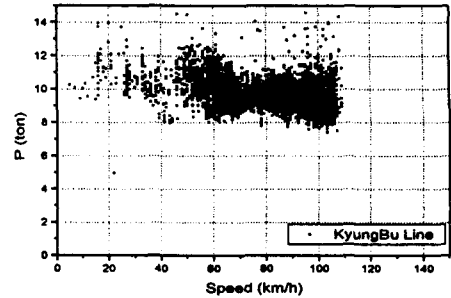


Fig. 3.4 경부선의 속도와 윤중

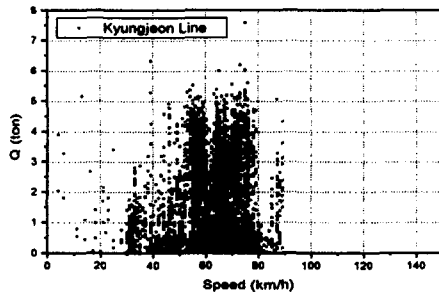


Fig. 3.5 경전선의 속도와 횡압

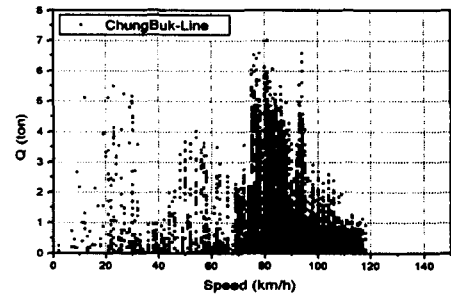


Fig. 3.6 충북선의 속도와 횡압

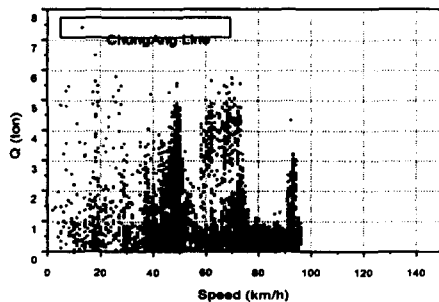


Fig. 3.7 중앙선의 속도와 횡압

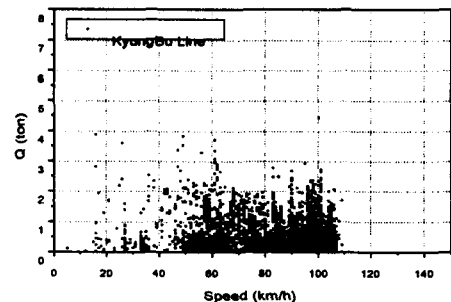


Fig. 3.8 경부선의 속도와 횡압

3.3 속도 및 선로에 따른 운중변동

3.3.1 속도와 진폭과의 관계

휠에 작용하는 하중이력에 대한 평가를 위하여는 cycle counting을 하여 진폭을 평가하여야 하나, 측정된 데이터는 연속적인 신호가 아닌 휠 1회전당 1개씩 발생된 신호이므로 이에 대한 cycle counting이 불가능하다. 따라서 하중이력 전체에 대한 평가보다는 발생된 최대 진폭을 평가하고자 한다.

각각의 선로에 대한 속도와 진폭의 관계를 파악하기 위하여 각 선로에 대한 속도와 진폭에 대하여 1차식으로 곡선적합(curve fitting)하여 나타내면 Table 3.2와 같다.

Fig. 3.9은 경전선과 중앙선에 대한 속도와 진폭의 관계를 곡선적합한 결과이며 그림과 같이 속도가 증가함에 따라 진폭이 증가함을 알 수 있다. Fig. 3.10은 경부선과 충북선에 대한 결과로써 역시 속도가 증가함에 따라 진폭이 증가하였다. 그림에서 경부선의 그래프가 가장 낮은 위치에 있으며 경전선이 가장 높은 위치에 있다. 선로상태가 불량할수록 높은 진폭이 발생하므로 이러한 결과로부터 경부선이 선로상태가 가장 양호하고 경전선이 가장 불량하다는 것을 알 수 있다.

기울기는 경전선의 경우가 가장 크며 중앙선이 가장 작게 나타났으며 이는 속도에 따라 진폭의 크기의 변화가 큼을 알 수 있다.

Table 3.2 진폭과 속도의 관계

구분	A(기울기)	B(Y절편)	비고
경전선	0.05	-0.61333	· $P_{amp} = A * V + B$
중앙선	0.00121	2.19286	
경부선	0.02033	-0.06833	
충북선	0.00808	1.91038	

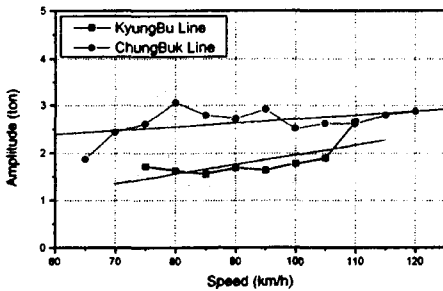


Fig. 3.9 경전선과 중앙선의 속도와 진폭

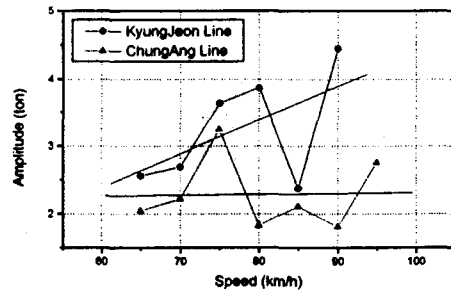


Fig. 3.10 경부선과 충북선의 속도와 진폭

3.3.2 속도와 하중비의 관계

차량 및 차축 등의 설계시에는 선로 전체에 하중이력을 이용하는 것보다는 전체하중이력에 대한 동하중계수를 설정하여 이를 이용하고 있다.⁽⁵⁾ JIS 4501의 철도차량-차축 강도설계 방법에서는 속도에 따라 차축에 상하 부가계수를 설정하고 있다. 이를 살펴보면 Table 3.3과 같이 고속철도시스템과 재래철도시스템 등 차량종류에 따라 분류하고 있으며 궤도조건에 따라 다시 분류하고 있다. 우리나라 경부선 철도와 가장 유사한 철도시스템은 재래철도시스템 A조건으로서 0.0027V를 제시하고 있다.

상하부가계수에 대하여 본 실험에서 측정된 데이터와 JIS의 조건을 비교하기 위하여 하중비(진폭/정하중)와 속도에 대하여 평가하면 Table 3.4와 같다. 속도에 대한 영향을 평가할 때 중앙선의 경우는 데이터의 변동이 심하여 속도에 대한 외삽(Extrapolation)시 제외하였고 나머지 선로에 대하여 평가하였다. 곡선적합 결과로부터 2급선인 경부선의 기울기가 가장 작게 평가되었으며 3급선인 경전선이 가장 높게 평가되었다.

JIS의 조건과 비교하기 위하여 속도에 따른 하중비를 나타내면 Fig. 3.11 및 Table 3.5와 같다. 동일조건에서 검토를 위하여 경부선의 경우 2급선이므로 JIS A와 비교하였고, 충북선과 경전선의 경우에는 3급선이므로 JIS B와 비교하였다. Table에서와 같이 150 km/h시에는 하중비가 경부선의 경우 0.3정도이고 경전선의 경우 0.67이었고, 200 km/h일 경우에 선로별로 0.39에서 0.90까지 나타나 JIS 기준에 대입해 보면 경부선 및 경전선 모두 JIS 기준을 충족하는 것으로 평가되었다.

Table 3.3 JIS의 차축 설계시 상하 부가계수

철도시스템	적용구분	V(km/h)	α	비고
고속철도	SA	200~350	0.0027 V	· SA : 차량 및 궤도가 최고속도 350 km/h 이하로 사용되는 경우 · A* : 차량 및 궤도가 최고속도 280 km/h 이하로 사용되는 경우 · A : 차량 및 궤도가 최고속도 160 km/h 이하로 사용되는 경우 · B : 차량 및 궤도가 최고속도 130 km/h 이하이며, A 이외의 경우 · α : 부가계수
	A*	150~280	0.0027 V	
재래철도	A	60~160	0.0027 V	
		0~60	0.16	
	B	60~130	0.0052 V	
		0~60	0.31	

Table 3.4 하중비와 속도 관계의 곡선적합 결과

구분	A	B	선로등급
경부선	0.00197	-0.00662	2급선
충북선	0.00078189	0.18494	3급선
경전선	0.00484	-0.05937	3급선
비고	· 하중비 = A * V + B		

Table 3.5 속도에 따른 하중비

선로 \ 속도	100 (km/h)	120 (km/h)	150 (km/h)	200 (km/h)
경부선	0.19	0.23	0.29	0.39
JIS (A)	0.27	0.324	0.405	0.54
충북선	0.26	0.28	0.30	0.34
경전선	0.42	0.52	0.67	0.90
JIS (B)	0.52	0.62	0.78	1.04

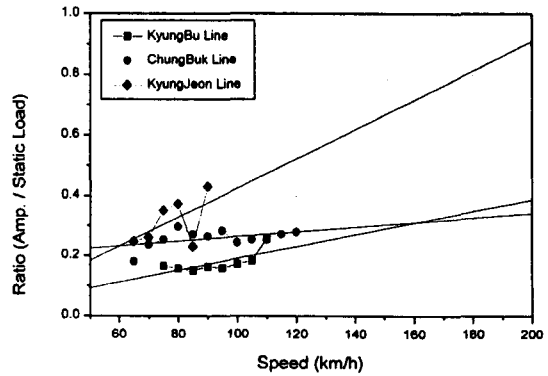


Fig. 3.11 속도와 하중비의 관계

4. 결론

- 1) 속도가 증가함에 따라 진폭의 크기가 증가하였고 선로조건에 따라서 차이가 발생하였다.
- 2) 속도와 진폭의 관계에서 기울기가 가장 큰 부분의 선로는 경전선으로 평가되었다.
- 3) 속도와 하중비(진폭/정하중)는 JIS의 차축강도설계방법과 비교할 때 2급선의 경우 기울기가 0.00197로써 JIS A선로의 0.0027보다 낮게 평가되었으며, 3급선(경전선)의 경우 기울기가 0.00484로서 JIS B선로의 0.0052보다 낮게 평가되었다.

5. 참고문헌

- 1) Hiroaki ISHIDA, Katoshi FUKAZAWA, Kazuhiko TEZUKA, "Continuous Method of measuring Forces between Wheel & Rail and Derailment Quotients", Proceedings of the International Conference on Speedup Tech. for Railway and Maglev vehicles, pp. 350~354, 1993
- 2) H.J. Lowe, "The Measurement of Composite Loads on Rail Vehicle Running Gear", Rail Interanatonal, pp. 33~38, 1987
- 3) "在來鐵道運轉速度向上 試驗 マニュアル.解説", 鐵道總合技術研究所, PP. 67~94, 平成 5年
- 4) "鐵道の ための 試驗法.計測法", 鐵道總合技術研究所, PP. 74~81, 昭和 5年
- 5) "車軸の強度設計における動的附加係數の檢討", 鐵道技術資料, PP. 215~218, 1984. 6