

철도차량의 속도향상시 진동 승차감에 대한 실험적 연구

Experimental Study on Vibration Ride Comfort of a Railway train to increase the Service Speed

°김 남 포*, 구 병 춘**

Kim, Nam-Po, Goo, Byeong-Choon

Key words : Railway(철도), Ride comfort(승차감), Saemaul Express(새마을호 열차)

ABSTRACT

To provide faster service and to relief the road traffic jam, the increase of service speed of conventional railway has been intensively considered. In this study, we measured and analyzed the vibration ride comfort of Saemaul Train to evaluate the feasibility of 5km/h speed-up in curves and 10km/h speed-up on straight tracks. Four main lines, such as Honam, Kyungboo, Janghang, Kyungjeon were chosen as representative lines for speed-up feasibility study. The increase of mean ride comfort index in case of speed-up is 0.5~2dB. The mean ride comfort index of vertical direction in case of speed-up is 107~110 dB for Honam line, 104~112 dB for Kyungboo line, 108~112 dB for Janghang line and 105~108 dB for Kyungjeon line. Through this study, we found that the Saemaul Express has slight margin to increase the service speed from the view point of vibration ride comfort.

1. 서론

국내 기존철도는 경부선을 중심으로 1968년 95km/h, 1969년 110 km/h, 1983년 120km/h, 1985년 135km/h(표준선 구간 140km/h)로 점진적으로 속도향상이 이루어져왔다. 그러나 1985년의 속도향상 이후 경부축의 수송량 증가에 따른 열차 혼잡도의 증가 등으로 속도 향상은 답보상태를 유지하고 있었다. 반면 경쟁이 되는 도로교통은 비약적 확장과 고속화가 꾸준히 이루어져 왔으며, 2004년 개통되는 경부고속철도의 300km/h 서비스와 기존선과의 속도차이가 심해 지역간 불균형 및 전반적 철도교통의 효율 저하 문제가 예상되었다. 이와 같은 문제를 해소하고, 철도의 경쟁력과 수익성을 향상하기 위해 기존철도의 속도향상이 시급히 요구되어졌다. 이의 일환으로 국내 주요 선로에서 기존 운행 열차의 속도향상 가능성과 보완 방안을 파악

하기 위해 호남선, 경부선, 장항선, 경전선에서 전후동력형 새마을호 열차를 대상으로 증속조건, 즉 현 열차 운전제한속도를 직선부 10km/h, 곡선부 5km/h 향상조건으로 실험적 연구가 2000년도에 추진되었다. 탈선계수, 소음, 터널에서의 압력변화, 곡선부의 횡가속도, 평균승차감 등에 관한 종합적인 실험결과 중 평균승차감에 대한 측정 및 분석 결과를 정리한 것이다. 그리고 측정된 승차감 지수는 독일의 열차 중 새마을호와 유사한 최고속도 160km/h급 열차의 승차감과 비교하여 보았다.

이하에서는 새마을호 열차의 한 단계 속도향상을 위한 탈선안전도, 궤도 부담력, 소음, 터널 이명감, 진동 승차감, 구조물 피로안전도 등의 포괄적 실험연구 중에서 진동 승차감 부분에 대해 기술한다.

* 한국철도기술연구원 차량연구본부 선임연구원

** 한국철도기술연구원 차량연구본부 선임연구원

2. 철도차량 진동 승차감 정의 및 기준

2.1 평균 승차감

가장 일반적인 승차감으로 열차의 출발부터 정지까지의 전체가간에서 열차 주행 중의 흔들리는 정도를 진동가속도로 나타내어 평가를 행한다. 기존 ISO 규격에서 규정한 “피로능률감퇴한계(노출시간 8시간 기준, 기준가속도 10^{-6} ㄱ)

$$L_{eq}(dB) = 20 \text{ Log} \frac{A_w}{A_{ref}}$$

여기서 A_{ref} : 진동의 기준치, 10^{-6} ㄱ

A_w : 각각 보정한 진동가속도의 실효치, ㄱ

국내 철도에서는 상하(Z), 전후(X), 좌우(Y) 방향의 진동 승차감 수준을 평가하는 기준으로 표 1을 잠정적으로 사용하고 있다.

Table 1. Criteria for mean ride comfort

승차감 레벨(Leq) dB	구분	실효값(ㄱ)	
		수평방향	수직방향
103미만	우수	0.100 미만	0.141 미만
103이상 108미만	양호	0.100~0.178	0.141~0.251
108이상 113미만	보통	0.178~0.316	0.251~0.447
113이상 118미만	불량	0.316~0.562	0.447~0.794
118이상	극히 불량	0.562~	0.794~

2.2 곡선주행시 승차감

가. 정상횡가속도

곡선궤도 주행 시 승객이 느끼는 승차감 인자 중의 하나는 원심력에 의한 정상횡가속도이다. 일본에서는 1963년 ‘열차속도 조사위원회’에서 입석 승객 5%가 만족하지 않는 범위인 $0.8m/s^2(0.08g)$ 를 상한치로 설정하였고, 제안은 아직도 곡선부 주행 열차의 승차감을 판정하는 기준으로 사용되고 있으며, 국내 철도에도 이 기준을 적용하고 있다.

나. 정상 횡가속도 변화율

정상 횡가속도가 미치는 영향은 진폭 뿐만 아니라 그 변화율이 고려되어야 한다. 일정 수준의 정상 횡가속도에 대해서 승객은 점점 증가할 때 그 변화에 대해 대응할 수 있다. 그들은 큰 가속도에 대해 그들의 자세를 고치거나 손잡이를 잡아 준비를 할 수 있다. 그러나 가속도가 빨리 변화하면 승객은 넘어지거나 위험에 처할 수 있다. 따라서 정

상 횡가속도의 변화율을 $0.3m/s^3$ 으로 제한하는 것이 바람직하다.

Table 2. Criteria for steady-state lateral acceleration

국명	정상횡가속도 (g)	변화율 (g/sec)
영국철도	0.074	0.042
미국철도	0.1	0.03
일본철도	0.08	0.03
국내철도	0.08	-
프랑스 철도	0.14	0.085
스웨덴	0.05	0.03

다. 진동지수의 복합적 평가

기존의 기준들은 각각의 진동특성을 독자적으로 취급하여 두 요소의 복합된 효과에 대한 고려가 안되었다. 따라서 곡선부에서 원심력에 의한 정상 횡가속도와 불규칙도에 의한 비정상 횡가속도를 복합적으로 평가할 수 있는 기준이 유럽과 일본에서 제시되었다. 아래의 그림1은 일본에서 잠정적으로 사용하고 있는 입석승객에 대한 곡선주행시 만족도 평가 기준이다.

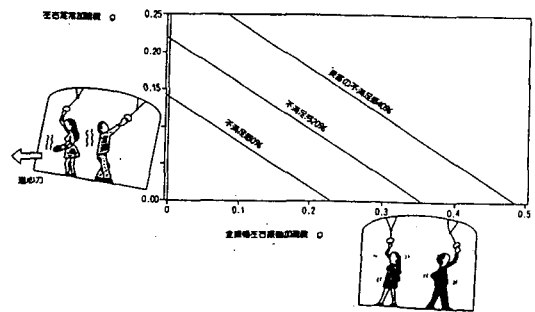


Fig 1. Ride comfort of standing passenger

3. 실험 개요

실험열차는 기존 새마을호 열차중에서 속도향상의 여력이 있는 것으로 평가된 그림 2의 전후 동력형 새마을호 열차를 대상으로 하였다. 시운전속도는 노선별로 제한 속도 범위내에서 2회 왕복하였고 직선부 10km/h, 곡선부 5km/h의 속도를 향상시켜 다시 2회 왕복하였다. 이는 시험 시 얻어지는 각종 기술적 지표로 현 제한속도시와 속도향상시를 비교하여 속도향상 가능성과 보강의 필요성을

을 파악하기 위함이다. 진동 가속도의 측정은 열차 편성중에서 상대적으로 승차감이 나쁜 선두 동력차의 객실부에서 실시되었다. 평균 승차감의 측정 장비는 그림 3과 같이 Triaxial Seat Accelerometer를 지정된 좌석에 놓고 측정자가 편안한 자세로 앉아서 측정하였다.

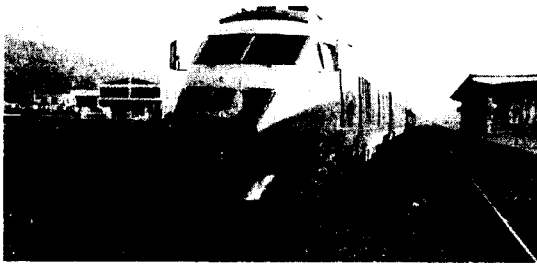


Fig 2. Overview of test train

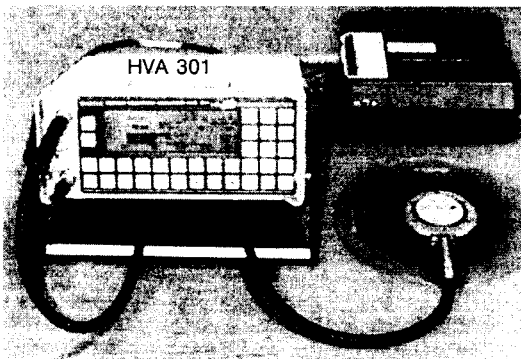


Fig 3. Measuring equipments

4. 호남선 평균 승차감 측정

- 전후(X) 방향 평균승차감

X 방향의 평균 승차감 지수는 98~105dB 범위에 위치한다. 기존속도에서는 '우수'에 들어가고 향상속도에서는 '양호'와 '우수' 사이에 위치한다. 1회 시험에서는 속도향상에 의한 뚜렷한 경향이 없으나 2회 시험에서는 어느 정도 경향이 보인다. 2회 시험 결과에 의하면 향상속도에서의 승차감 지수가 전반적으로 2~4dB 정도 높다. 상행과 하행의 결과에서는 뚜렷한 차이가 관찰되지 않는다.

- 좌우(Y) 방향 평균승차감

Y 방향의 평균 승차감 지수는 102~106dB 범위에 위치한다. 일부구간에서 속도향상에 의해 1~2dB 정도 증가하나 전구간에서 규칙적인 경향을

보이지는 않는다. 전체적으로 '우수'와 '양호'의 경계에 위치하며 상행과 하행의 결과에서는 뚜렷한 차이가 관찰되지 않는다.

- 상하(Z) 방향 평균승차감

Z 방향의 평균 승차감 지수는 107~110dB 범위에 위치한다. 기존속도와 향상속도 시험 모두에서 서대전-익산 구간에서의 평균승차감이 익산-장성 구간에 비해 1dB 정도 높다. 서대전-익산 구간은 '보통' 등급이고 익산-장성 구간은 '보통'과 '양호'의 경계에 위치한다. Z 방향의 평균승차감은 속도향상 전후나 상,하행 모두에서 뚜렷한 차이가 관찰되지 않는다.

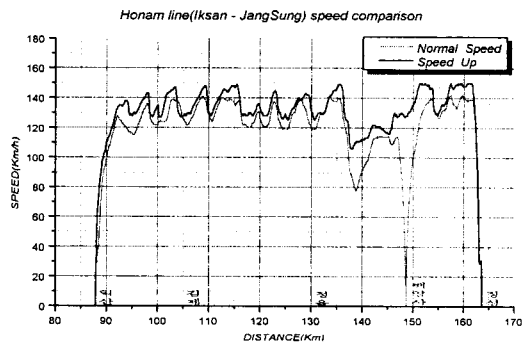


Fig 4. running speed profile at Honam Line

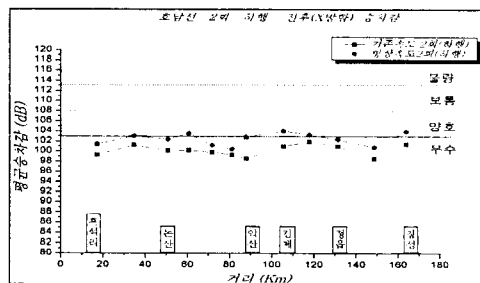


Fig 5. Mean Longitudinal(X) Ride Comfort

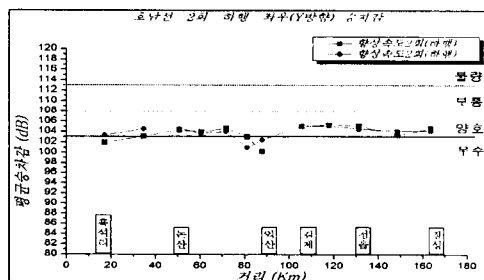


Fig 6. Mean Lateral(Y) Ride Comfort

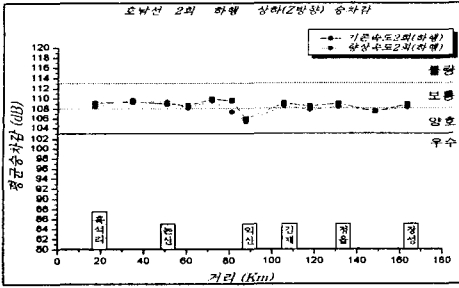


Fig 7. Mean Vertical(Z) Ride Comfort

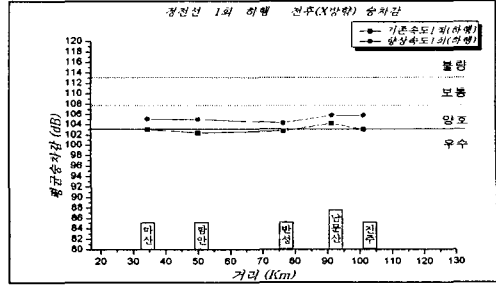


Fig 9. Mean Longitudinal(X) Ride Comfort

5. 경전선 평균 승차감 측정

- 상하(Z)방향 평균 승차감

동력차의 Z방향 평균 승차감 지수의 경우 105dB 부터 108dB범위에 위치하며 객차의 경우 102부터 106dB의 사이에 위치하여 상,하행 모두 양호와 우수 이내에 위치한다.

- 전후(X)방향 평균 승차감

동력차의 X방향 평균 승차감 지수의 경우 102dB부터 106dB 사이에 위치하며 객차의 경우는 98-103dB 사이에 위치하여 평균 승차감 지수는 상, 하행 모두 양호와 우수 이내에 위치한다.

- 좌우(Y)방향 평균 승차감

동력차의 Y방향 평균 승차감 지수의 경우 101dB부터 105dB 사이에 위치하며 객차의 경우는 99-102dB 사이에 위치하여 평균 승차감 지수는 상,하행 모두 양호, 우수 이내에 위치한다.

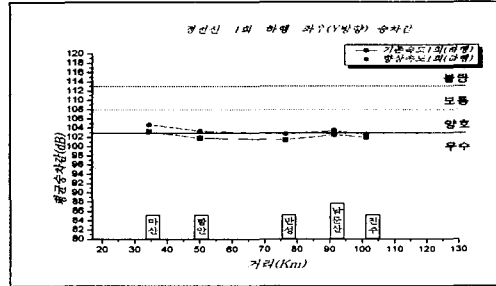


Fig 10. Mean Lateral(Y) Ride Comfort

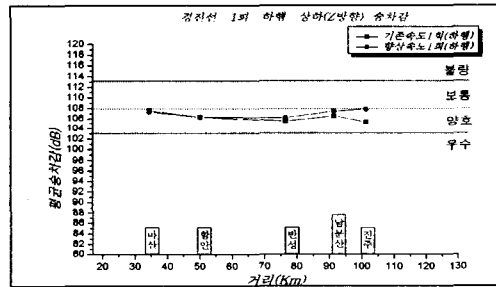


Fig 11. Mean Vertical(Z) Ride Comfort

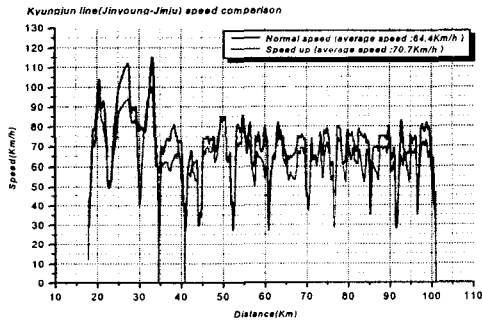


Fig 8. running speed profile at Kyungeon Line

6. 곡선부 승차감 평가

곡선부에서는 원심력과 캔트의 부족 또는 초과에 의한 정상 횡가속도와 완화곡선 진출입시 횡가속도의 변화율 및 궤도 틀림에 의한 횡진동 가속도가 복합적으로 작용하여 승차감에 영향을 주게된다. 또한 곡선 통과속도는 탈선안전도보다는 승차감 측면에서 먼저 제한을 받기 때문에, 5 km/h의 곡선제한속도 향상을 검토하기 위해서는 정상 횡가속도-비정상 횡가속도에 따른 승차감을 면밀하게 평가해 보아야 한다. 승차감은 그 특성상 객관적인 판단 기준을 설정하는 것이 어렵고, 이를 위해서는 많은 인체공학적 실험이 뒷받침되어야

한다. 따라서 본 분석 및 평가에서는 우리와 체형이 유사한 일본의 RTRI(철도종합연구소)에서 잠정적으로 적용되고 있는 쾌적/불쾌의 경계선을 기준으로 곡선부 승차감을 판단해 보았다.

실험결과에 의하면 호남선의 경우 모든 곡선부에서 일본의 기준 '만족'에 속하는 것으로 나타났으며, 상대적으로 궤도 조건이 나쁜 경전선의 경우는 400R 일부 개소에서 속도 향상 시 '불만족'에 속하는 것으로 나타났다.

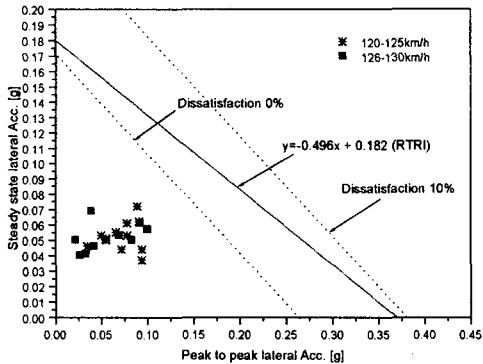


Fig. 12 Ride comfort on 800 R curve at Honam Line

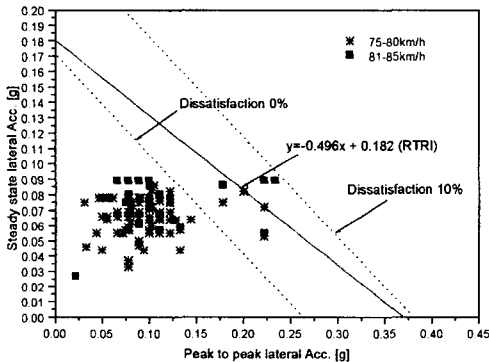


Fig. 13 Ride comfort on 400 R curve at Kyungeon Line

7. 결론

대상 열차의 진동 승차감 수준은 상하방향보다 전후 및 좌우방향이 우수한 것으로 나타났으며, 이는 열차의 차량의 중량배치 및 현가장치의 특성에 기인된 것으로 판단된다. 따라서 본 열차의 속도향상에 있어서 상하방향 승차감의 개선에 초점을 두

어야 할 것으로 판단되며, 이는 차량의 피칭(pitching)운동을 감쇄할 경우 효과가 있을 것으로 생각된다.

평균 승차감은 속도향상에 따라 0~2dB 정도 증가하는 경우도 있으나 전체적으로 일관성 있는 경향을 나타내지 않았다. 상하방향을 기준으로 할 때 운행속도가 낮은 경전선의 경우 '양호'에 들어오고 나머지 노선은 속도 향상 전 후 모두 '보통'의 영역에 위치하는 것으로 나타났다. 따라서 목표로 한 소규모의 속도향상 여지는 있으나 양호한 승차감 제공의 측면에서 진동원이 되는 궤도의 틀림량을 억제하는 보수 및 보강이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

곡선 제한속도의 향상은 호남선과 같이 궤도 품질이 좋은 노선에서는 문제가 없는 것으로 나타났다. 그러나 경전선과 같이 저속노선에 대해서는 불만족에 해당하는 일부 개소는 정상 횡가속도보다 peak-peak 비정상 횡가속도 수준이 높아서 문제가 되었다. 이는 거의 궤도의 품질(궤도 틀림량)에 의해 지배되는 양이므로 궤도의 보수가 필요하다 할 수 있으며, 그 초과하는 크기로 볼 때 궤도의 정기 보수 시에 규정수준으로 보수를 한다면 속도향상에 큰 문제는 없으리라 판단되었다. 그러나 평가에 사용된 승차감 허용기준이 보편타당한 것이 아니었기 때문에, 한국인을 대상으로 한 승차감 영향평가가 선행되어야 한다. 아울러 한국인의 정서와 신체특성에 맞는 승차감 또는 쾌적감 허용기준의 수립이 필요할 것으로 생각된다.

8. 참고문헌

1. 최성규 외 "기존선 고속화를 위한 시스템에 관한 연구," 한국철도기술연구원, 1999.
2. 유원희 외 "곡선부 고속주행용 대차설계기술 개발," 한국철도기술연구원, pp. 63, 1999.