

철도차량의 승차감 평가법에 의한 시험결과 고찰

Review of Comparative Test Results of Ride Evaluation for Railway Vehicle

이창환*, 이원상**, 김진태***, 유완석****
Chang-Hwan Lee, Won-Sang Lee, Jin-Tae Kim, Wan-Suk Yoo

Abstract

In this paper, the ride comfort of a passenger coach installed with a KT23 type bogie was measured and evaluated through field test in operation routes. The ride comfort level was evaluated and analysed by ISO method and UIC method that were applied generally at railway fields. Particularly three evaluation methods, i.e., a simple method, a full standing method, and a full seating method of UIC513R standard, were fully applied to evaluate the ride quality. Also the vertical and lateral vibration levels on the floor were evaluated by peak-to-peak analysis method.

1. 서론

철도차량은 선로 위를 대량으로 여객과 화물을 수송하는 교통수단으로써, 점차로 주행안정성 확보와 함께 다양한 수요자의 요구사항들을 충족시켜야 하는 실정이다. 특히, 승객이 이용하는 객차의 경우에는 여행시에 느끼는 안락함의 정도를 나타내는 승차감 요소가 중요한 요구사항으로 인식되어진다. 특히, 열차를 이용하는 승객이 여행 중 느낄 수 있는 피로도와 쾌적도를 평가한다는 사실을 감안할 때, 열차의 승차감 수준을 일정수준 이상으로 향상시켜야 함은 필수사항이다.

철도차량의 승차감은 여행 중 승객이 느낄 수 있는 진동, 소음, 환기, 조명, 실내 디자인 등 다양한 요소들이 복합적으로 고려될 수 있다. 하지만, 이를 모두 고려하여 정량적으로 승차감 수준을 나타내는 것은 난해하기 때문에, 일반적으로 객차의 경우에는 객실 내 좌석에서 승객으로 전달되는 진동 가속도를 측정된 후 주파수 대역별로 가중치를 부여한 진동 측면에서의 승차감 수준을 평가하는 방법이 주로 사용되고 있다. KS 규격에서는 철도차량 승차감 평가와 관련하여 국제표준협회(ISO)에서 제정한 ISO 2631 규격을 바탕으로 한 평가법(이하 ISO 평가법)과 국제철도협회(UIC)에서 제정한 UIC 513R 규격을 바탕으로 한 평가법(이하 UIC 평가법)을 함께 제시하고 있다.

본 연구에서는 KT23 대차를 설치한 장거리 객차를 대상으로 실제 운행노선에 대해서 실차 시험을 실시하여 ISO 승차감 평가법과 함께 UIC 승차감 평가법에서 제시하는 입석과 좌석에 대한 3가지 방법을 모두 적용하여 산출된 승차감 지수를 주행속도와 측정구간에 대해서 각각 비교 검토하였으며, 또한 전진폭 분석법을 통하여 진동 수준을 평가한 결과를 제시하였다.

* (주)로템 중앙연구소 주행장치개발팀 대리, 정회원
** (주)로템 중앙연구소 주행장치개발팀 과장, 비회원
*** (주)로템 중앙연구소 주행장치개발팀 부장, 정회원
**** 부산대학교 기계공학부 교수, 정회원

2. 승차감 평가 방법

국내에서 철도차량에 대한 승차감을 평가하는 방법으로 주로 ISO 평가법과 UIC 평가법을 사용하고 있다. 각각의 평가 방법은 측정된 가속도 신호에 주파수별 감각 보정곡선을 적용하고, 규정된 계산법에 의거하여 평가 수준을 수치로 산출한다. ISO와 UIC 평가법에 따른 감각 보정곡선에 대한 비교는 그림 1과 같으며, 상하 방향에 적용하는 W_b 곡선은 서로 약간의 차이를 보이며, 전후 및 좌우방향에 적용하는 W_c, W_d 곡선은 거의 일치함을 알 수 있다.

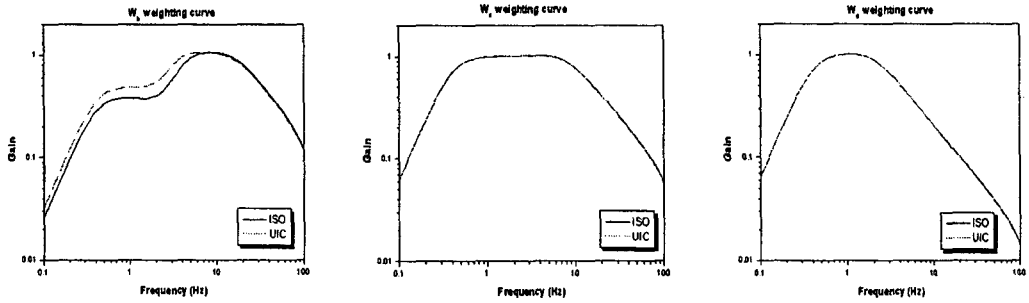


그림 1. 감각 보정곡선 비교

2.1 ISO 평가법

ISO 평가법은 좌석에서 측정된 진동가속도에 대하여 인체의 감각에 따른 민감도를 보정하기 위하여, 방향별로 표 1과 같이 감각보정곡선을 적용한다.

표1. ISO 감각 보정곡선 적용

보정곡선	적 용		
	측정 위치	측정 방향	기 호
W_b	좌 석	상하 방향	a_{zq}^{Wb}
W_c	등받이	전후 방향	a_{xd}^{Wc}
W_d	좌 석	전후 방향	a_{xq}^{Wd}
		좌우 방향	a_{yq}^{Wd}

승차감 레벨은 상기와 같이 감각 보정한 진동 가속도의 실효값(RMS) 을 사용하여 다음 식(1)에 의해 산출된다.

$$L_{eq} = 20 \log \frac{a_w}{a_{ref}} \quad (1)$$

여기서, L_{eq} : 승차감 레벨 (dB), a_w : 감각 보정한 진동 가속도 실효값 (m/s^2),
 a_{ref} : 진동의 기준값 ($= 10^{-6} m/s^2$)

2.2 UIC 평가법

UIC513R 에 의거한 승차감 평가법은 좌석 및 바닥면에서 측정된 진동가속도에 대하여 인체의 감각에 따른 민감도를 보정하기 위하여, 표2 와 같이 3가지 평가법에 따라 감각 보정 곡선을 별도로 적용한다. 보정된 데이터에 대하여 매 5초당의 실효값(RMS)의 누적 빈도분포값을 사용한다. 평가법에 대한 내용은 다음과 같다.

표2. UIC 감각 보정곡선 적용

보정 곡선	입석			좌석			입석		
	(약식계산법)			(정식계산법)			(정식계산법)		
	측정위치	측정방향	기호	측정위치	측정방향	기호	측정위치	측정방향	기호
W_b	객실마루	상하방향	a_{zp}^{Wb}	객실마루	상하방향	a_{zp}^{Wb}	객실마루	상하방향	a_{zp}^{Wb}
				좌석	상하방향	a_{za}^{Wb}			
W_c	-	-	-	등받이	전후방향	a_{xd}^{Wc}	-	-	-
W_d	객실마루	전후방향	a_{xp}^{Wd}	좌석	좌우방향	a_{yp}^{Wd}	객실마루	전후방향	a_{xp}^{Wd}
		좌우방향	a_{yp}^{Wd}					좌우방향	a_{yp}^{Wd}

1) 약식 평가법

객실마루에서 측정된 진동가속도에 대하여 해당 방향별로 보정곡선(W_b , W_d) 을 적용한 누적 빈도 분포값(95%) 을 사용하여, 식 (2)에 의거하여 승차감 지수(N_{mv})를 산출한다.

$$N_{mv} = 6\sqrt{(a_{xp95}^{Wd})^2 + (a_{yp95}^{Wd})^2 + (a_{zp95}^{Wb})^2} \quad (2)$$

2) 좌석 정식 평가법

객실마루와 좌석에서 측정된 진동가속도에 대하여 해당 방향별로 보정곡선(W_b , W_c , W_d) 을 적용한 누적 빈도 분포값(95%) 을 사용하여, 식(3)에 의거하여 승차감 지수(N_{va})를 산출한다.

$$N_{va} = 4 \cdot (a_{zp95}^{Wb}) + 2 \cdot \sqrt{(a_{yp95}^{Wd})^2 + (a_{za95}^{Wb})^2} + 4 \cdot (a_{xd95}^{Wc}) \quad (3)$$

3) 입석 정식 평가법

객실마루에서 측정된 진동가속도에 대하여 해당 방향별로 보정곡선(W_b , W_d)을 적용한 누적 빈도 분포값(50%, 95%)을 사용하여, 식(4) 에 의거하여 승차감 지수(N_{vd})를 산출한다.

$$N_{vd} = 3 \cdot \sqrt{16 \cdot (a_{xp50}^{Wd})^2 + 4 \cdot (a_{yp50}^{Wd})^2 + (a_{zp50}^{Wb})^2} + 5 \cdot (a_{yp95}^{Wd}) \quad (4)$$

2.3 승차감 평가 기준

ISO평가법과 UIC평가법에 의거하여 산출된 승차감 평가 기준은 다음의 표 3, 4 와 같다.

표3. ISO 승차감 평가 기준

승차감 레벨	평가
< 100dB	매우 우수
100dB ~ 105dB	양호
105dB ~ 110dB	보통
110dB ~ 115dB	조금 불편함
115dB ~ 120dB	불편함
120dB ~ 125dB	매우 불편함
> 125dB	극히 불편함

표4. UIC 승차감 평가 기준

승차감 지수	평가
$N < 1$	매우 우수
$1 < N < 2$	양호
$2 < N < 4$	보통
$4 < N < 5$	조금 불편함
$N > 5$	불편함

3. 승차감 측정 및 평가 분석

3.1 진동 승차감 측정

객차 승차감 측정은 KT23 대차를 적용한 객차를 대상으로 실시하였으며, 측정은 공차 조건에서 상대적으로 승차감 수준이 나쁜 열차 편성의 최후부에 연결된 객차를 대상으로 하였다. 측정에 사용된 가속도계의 측정 위치와 설치도는 표5, 그림 2와 같다.

표5. 측정 가속도계의 측정 위치

번호	측정 가속도	측정 위치
CH1	전후방향 (X)	대차상부 복도측 좌석 시트
CH2	좌우방향 (Y)	대차상부 복도측 좌석 시트
CH3	상하방향 (Z)	대차상부 복도측 좌석 시트
CH4	전후방향 (X)	대차상부 차체 바닥 중심
CH5	좌우방향 (Y)	대차상부 차체 바닥 중심
CH6	상하방향 (Z)	대차상부 차체 바닥 중심
CH7	전후방향 (X)	대차상부 복도측 좌석 등받이

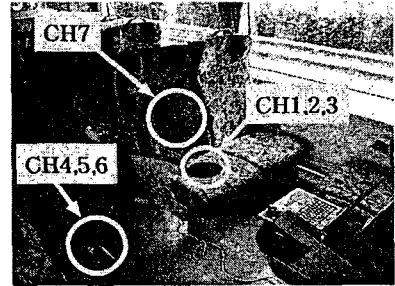


그림 2 측정 가속도계 설치

3.2 승차감 평가

1) ISO 평가법

전체 측정구간에서 측정된 데이터에 방향별 ISO 감각보정곡선을 적용한 데이터는 그림 3과 같으며, 이를 이용한 승차감 평가 결과는 다음의 표6 과 같다.

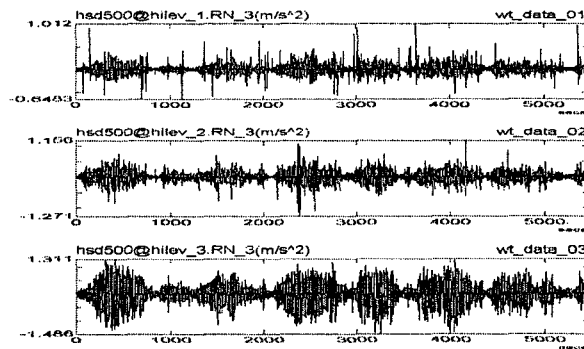


그림 3. ISO 감각 보정 데이터

표6. ISO 승차감 평가 결과

측정가속도	가중치	RMS 가속도(m/s ²)	승차감 레벨
a_{xq}	W_d	0.049	93.81 dB
a_{yq}	W_d	0.095	99.6 dB
a_{zq}	W_b	0.165	104.4 dB

2) UIC 평가법

전체 측정구간에 대하여 각각의 UIC 평가법으로 분석한 결과는 다음과 같다. 입석법에 사용되는 가속도 신호에 대하여 감각보정을 적용한 데이터와 RMS 데이터는 그림 4, 5 와 같으며, 좌석법에 사용되는 가속도 신호에 대하여 감각보정을 적용한 데이터와 RMS 데이터는 그림 6, 7 과 같다.

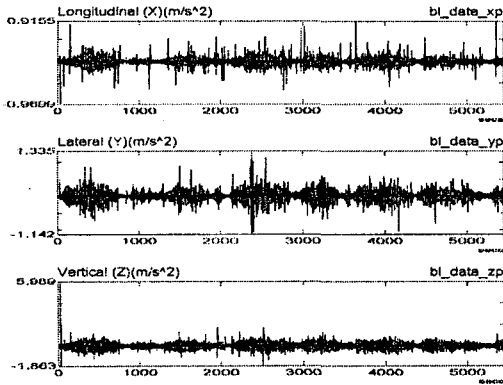


그림 4. 감각보정 데이터 (입석법)

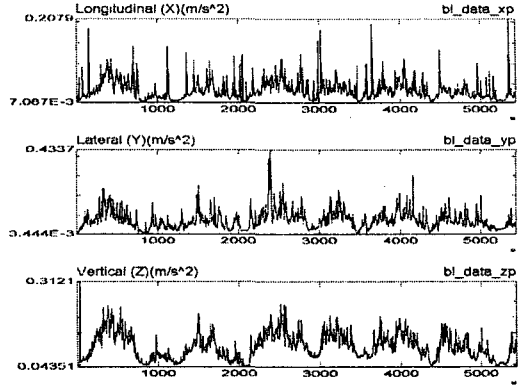


그림 5. RMS 데이터 (입석법)

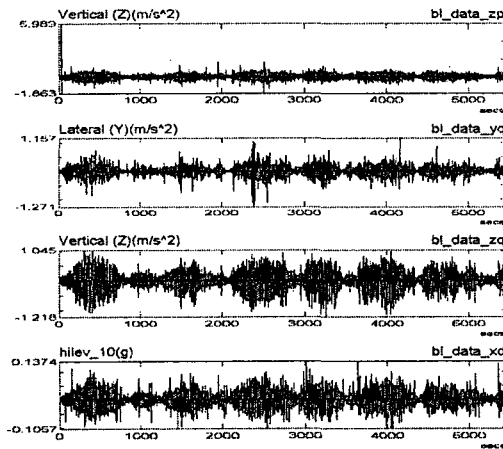


그림 6. 감각보정 데이터 (좌석법)

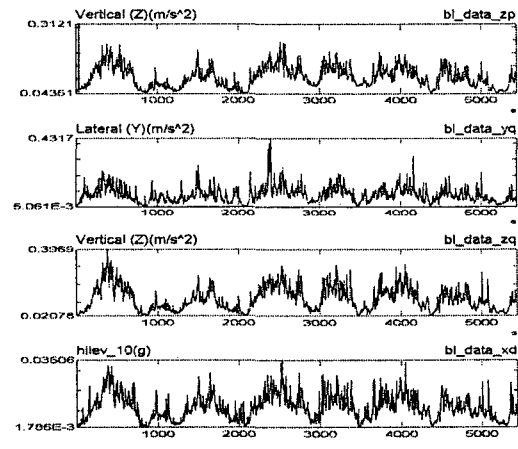


그림 7. RMS 데이터 (좌석법)

상기의 데이터로부터 계산된 3가지 방법에 의해 산출된 승차감 지수는 다음 표 7, 8, 9 와 같다.

표7. UIC 승차감 평가 결과 (입석 약석법)

측정가속도	가중치	RMS 가속도(m/s ²)	승차감 지수
a_{xp}	W_d	0.07796 (95%)	$N_{mv} \approx 1.528$
a_{yp}	W_d	0.16395 (95%)	
a_{zp}	W_b	0.17859 (95%)	

표8. UIC 승차감 평가 결과 (입석 정식법)

측정가속도	가중치	RMS 가속도(m/s ²)	승차감 지수
a_{xp}	W_d	0.03259 (50%)	$N_{vd} = 1.466$
a_{yp}	W_d	0.06842 (50%)	
a_{zp}	W_b	0.10340 (50%)	
a_{yp}	W_d	0.16395 (95%)	

표9. UIC 승차감 평가 결과 (좌석 정식법)

측정가속도	가중치	RMS 가속도(m/s ²)	승차감 지수
a_{zp}	W_b	0.17859 (95%)	$N_{va} = 1.395$
a_{yq}	W_d	0.17274 (95%)	
a_{zq}	W_b	0.23858 (95%)	
a_{xd}	W_c	0.02305 (95%)	

3.3 승차감 분석

1) 주행속도에 따른 승차감 분석

전체 측정구간에 대하여 평균 주행속도에 대하여 ISO 평가법과 UIC 평가법에 의한 승차감 분석 결과는 그림 8, 9 와 같다. 분석 결과로부터, ISO 평가법과 UIC 평가법을 통한 승차감 수준은 주행속도가 상승함에 따라 모두 증가하는 추세를 보임을 알 수 있다. 측정방향별 승차감 레벨에서 특히 수직방향 승차감 레벨이 가장 큰 값을 보임을 알 수 있으며, UIC 평가법 중에서는 약식법에 의해 산출된 승차감 지수가 대체적으로 큰 값을 보이고 있다.

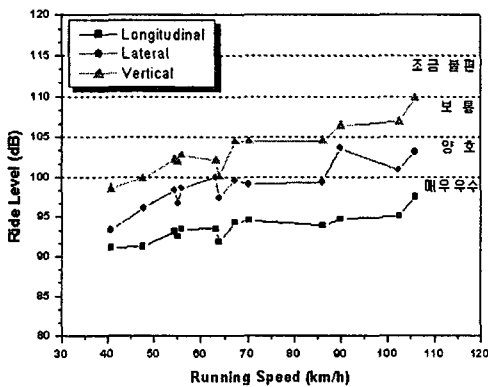


그림 8. 주행속도별 ISO 승차감 분석

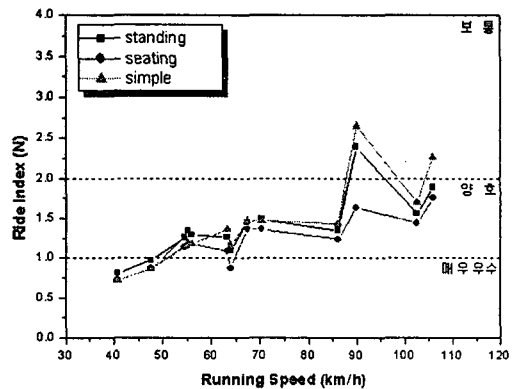


그림 9. 주행속도별 UIC 승차감 분석

2) 측정 구간에 따른 승차감 분석

전체 측정구간에 대하여 각 측정구간별로 ISO평가법과 UIC 평가법에 의한 승차감 수준은 그

림 10, 11 과 같다. 시험 결과로부터, ISO 평가법에 의해서는 전체 측정구간에서 약 20km 지점에서의 승차감 레벨이 가장 높게 나타난 반면에, UIC 평가법에 의해서는 약 50km 지점에서의 승차감 지수가 가장 높게 나타났으며, 특히 좌석 정식법에 의한 것보다 약식법과 입석 정식법에 의한 승차감 지수가 크게 나타났다. 이러한 차이점은 주행시에 발생되는 외란에 대하여 두 평가법에서 평가의 기준이 되는 진동가속도 값의 차이에서 기인한다고 판단된다.

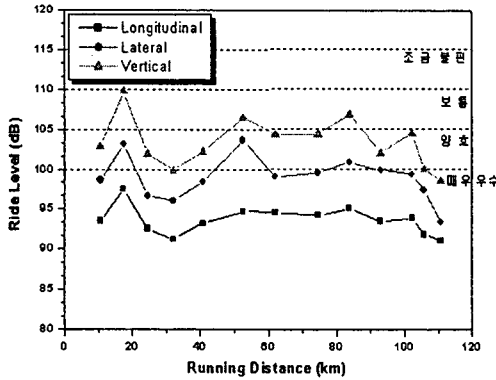


그림 10. 측정구간별 ISO 승차감 분석

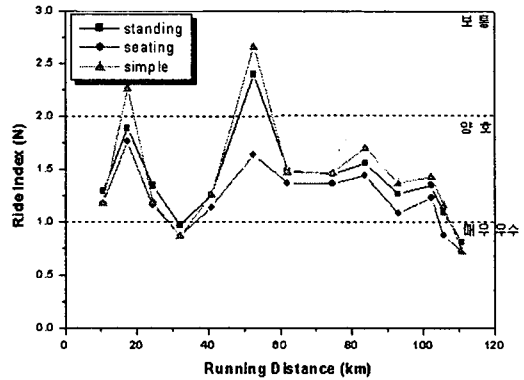


그림 11. 측정구간별 UIC 승차감 분석

3.4 차체 진동수준 평가

차체의 대차 상부에서 측정된 데이터를 100m 단위로 나누어 이 구간 내에서 최대치의 전진폭 (2a, peak-to-peak)을 취하며, 그 때의 주행속도를 같이 읽고, 이를 같은 속도별로 모아서 평균한다. 이와 같이 산출된 진동 가속도에 대하여 주행속도별 진동가속도의 측정 결과와 판정기준은 그림 12, 13 에서와 같으며, 진동 수준은 상하, 좌우 방향 모두 대체적으로 우수한 범위에 들었으며, 운행조건에 따라 일부 주행속도 범위에서는 양호한 수준을 보임을 알 수 있다.

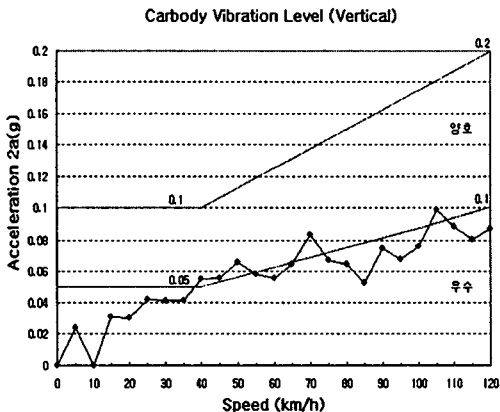


그림 12. 상하방향 차체 진동가속도 수준

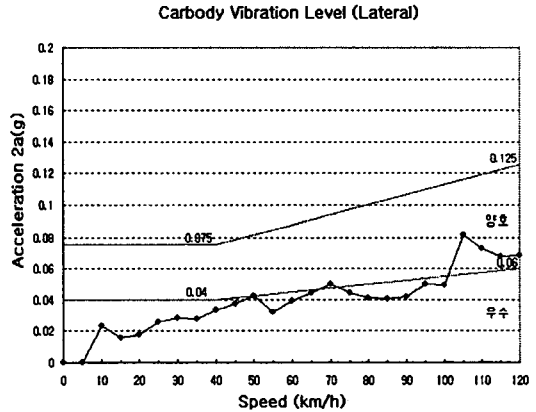


그림 13. 좌우방향 차체 진동가속도 수준

4. 결 론

본 연구에서는 KT23 대차를 적용하고 있는 장거리 객차에 대해서 실차 시험을 통하여 ISO 평가법, UIC 평가법과 전진폭 분석법에 의거하여 승차감과 진동 수준을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) ISO 평가법에 의거하여 진동에 대한 승차감 수준을 평가한 결과, 전후와 좌우 진동은 매우 우수한 수준을 보였으며, 상하 진동은 양호한 수준을 나타내었다. 또한, 열차의 주행속도에 대하여 승차감 수준을 분석한 결과, 전체적으로 속도가 증가함에 따라 승차감도 악화됨을 알 수 있었다.
- 2) UIC 평가법에서 제시하는 3가지 평가법을 적용하여 승차감 수준을 평가한 결과, 전체적으로 양호한 수준을 보였지만, 일부 구간에 대해서 입석의 경우에는 보통의 승차감 수준을 나타내었다. 또한, 열차의 주행속도가 증가할수록 승차감도 악화되었다. 그리고, UIC에서 제시하는 3가지 방법에 대하여 승차감 지수를 산출한 결과, 입석에서의 승차감 지수가 좌석에서보다 높게 나타났으며, 약식법에 의해 산출된 승차감 지수가 다른 2가지 방법에 비하여 높게 나타남을 알 수 있었다.
- 3) 차체에서 측정된 진동가속도에 대하여 전진폭 분석법에 의거하여 주행속도별로 분석한 결과, 전반적으로 우수한 수준에 드는 것을 확인할 수 있었다.
- 4) 본 연구 결과로부터, 향후에는 객차의 승차감을 향상시키기 위해서는 입석 승객과 좌석 승객에 대하여 모두 고려되어야 하는 것이 타당하다고 사료된다.

참고문헌

1. 철도차량-승차감 측정 및 평가방법, 한국산업규격 KS R 9216, 2000
2. 철도차량의 진동방지에 관한 연구, 철도기술연구원, 1996