2018 년도 한국철도학회 춘계계학술대회 논문집 KSR2018S042

도시철도차량 연결기의 진동 특성 측정을 통한 승차감 분석 및 평가

Analysis and Evaluation of Riding Comfort through Vibration Measurement of Railway Vehicle Coupler

정구인†, 김영규, 김태도, 선의영, 김기남*, 이진호*

Kuin Jung†, Younguy Kim, Taedo Kim, Uiyoung Seon, Kinam Kim*, Jinho Lee*

초 록 일반적으로 승차감이란 차내 환경이 승객에게 주는 심리적 생리적 반응을 말한다. 이 요인에는 진동, 가속도, 소음, 온습도, 통풍, 빛의 량, 압력, 냄새 등 모든 인자가 포함된다. 그 중 차량의 주행에 따라서 발생하는 진동이나 가속도에 따라서 기인하는 승객의 반응을 좁은 의미의 승차감으로서 정의하고 있다. 차량의 주행에 따르는 승차감을 검토할 경우, 보통, 진동 승차감, 곡선 통과시의 승차감, 가감속시의 승차감 및 진자 차량의 승차감의 4종류로 분류하고 있다. 진동 승차감은 가장 일반적인 승차감으로 차량의 주행에 따르는 상하, 좌우, 전후 진동 가속도를 평가 지표로서 사용한다. 본 연구에서는 도시철도차량 구형 전동차의 연결기와 신형 전동차 연결기와의 진동 특성 측정을 통하여 승차감 지수 및 감쇠특성을 도출하여 연결기 모델별 상호 비교분석을 수행하였다.

주요어 : 연결기, 승차감, 진동, 승차감 지수, 감쇠특성

1. 서 론

전 세계적으로 철도차량의 고속화 추세에 따라 대용량에너지 흡수장치의 필요성이 증가되고 있다. 철도차량 연결기는 열차의 출발, 제동, 주행 중 속도 가·감속시에 발생되는 차량사이의 충격을 완화하고 승객에게 쾌적한 승차감을 제공하기 위해 점차 완충 성능이 개선된 재질 및 구조로 발전해 가고 있다. 따라서 도시철도차량 이용승객의 안전성 확보와 도시철도차량 간 추돌 및 충돌로 인하여 발생되는 물질적 피해를 줄일 수 있는 성능이 확보된 대용량 에너지 흡수장치인 변형튜브(Deformation Tube)를 도시철도차량 VVVF전동차의 중간 완충장치(EFG2)와 결합하여 새로운 중간연결장치(EFG2+변형튜브)의 형태로 새롭게 개발하기 위해 구형 전동차와 신형 전동차에 대한 진동 특성 측정을 수행하였다. 세계적으로 통용되고 있는 철도차량의 승차감 측정 기준 KS R 9160에 따라 수행하였으며, 승차감 분석 및 평가는 UIC 513R에 의한 통계적 방법에 의한 철도환경에서의 진동 승차감 지수 산출에 의거하여 진동 측정 데이터를 바탕으로 승차감 지수를 산출 및 평가하였다. 연결기의 감쇠특성 분석은 실제 차량 운전 및 제동조건에서 연결기 부하 발생 시 측정한 진동 데이터를 바탕으로 주파수분석을 통하여 연결기 감쇠특성을 분석하였다.

2. 본 론

2.1 시험(측정) 범위

구형 전동차의 연결기 및 신형 전동차의 연결기의 측정조건은 1) 시험선로 4회 왕복주행, 2) 순번00_1은 TC-car전방 주행, 00_2는 TC-car 후방 주행으로 측정을 한다.

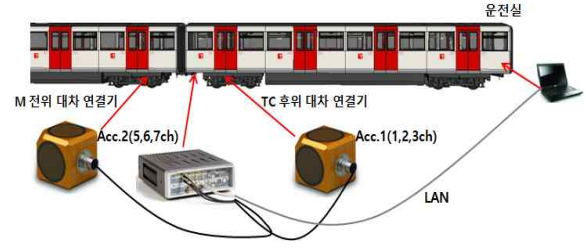

Fig. 1 Sensor Location

† 교신저자: 서울교통공사(jki0497@seoulmetro.co.kr)
* 유진기공산업주식회사

Table 1 Object and Condition

Objects	Car Type	Condition
GEC	Tight Lock Coupler	· 4Round Driving · Front and reat driving
VVVF	Semi-Permanent Coupler	· 4Round Driving · Front and reat driving

2.2 승차감 분석

2.2.1 측정값의 신호처리 과정

승차감 분석을 위한 가속도 신호의 처리과정은 그림 11과 같다. 저장 신호로부터 승차감은 보정된 가속도를 사용하여 승차감 색인 N의 계산에 사용된다.

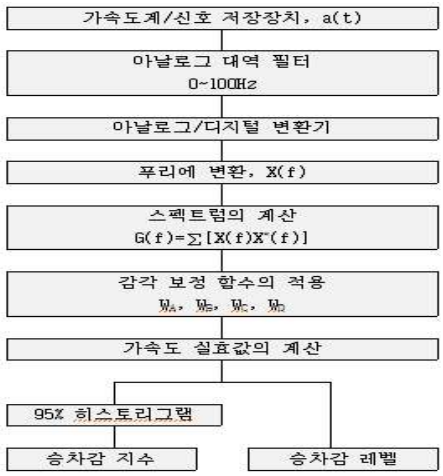

Fig. 2 Ride Assessment Flowchart

2.2.2 감각 보정 곡선

승차감 지수 계산을 위해 진동에 대한 인체 감각에 따라 민감도 보정을 실시한다. 본 진동 측정의 경우 입석에 측정 방식과 동일한 경우로 간주하여 보정함수 곡선을 적용하였다.

Table 2 Ride Correction Curve

NO.	Sting(Abbreviated/formal)	
	Location	Direction
W_A	Band Filter	
W_B	Room Floor	upper and lower
W_C	-	-
W_D	Room Floor	Horizontal Direction

2.2.3 승차감 지수 계산

1) 좌석 또는 입석에서의 약식법에 의한 계산식

객실 마루에서 측정된 x, y, z방향의 평균 진동 가속도 α_{xp}, α_{yp}, α_{zp}를 변수로 사용한다. 약식법의 계산은 다음과 같다.

$$N_{mv} = 6\sqrt{(\alpha_{xp95}^{W_d})^2 + (\alpha_{yp95}^{W_d})^2 + (\alpha_{zp95}^{W_b})^2}$$

$\alpha_{xp95}^{W_d}$: 가중값(W_d)을 준 x방향 누적 빈도 분포 95%에 해당 가속도

$\alpha_{yp95}^{W_d}$: 가중값(W_d)을 준 y방향 누적 빈도 분포 95%에 해당 가속도

$\alpha_{zp95}^{W_b}$: 가중값(W_d)을 준 z방향 누적 빈도 분포 95%에 해당 가속도

p : 바닥면에서 측정

2) 입석에서 정식법에 의한 계산식

객실 마루에서 측정된 x, y, z방향의 평균 진동 가속도 α_{xp}, α_{yp}, α_{zp}를 변수로 사용한다. 정식법의 계산은 다음과 같다.

$$N_{md} = 3\sqrt{16(\alpha_{xp50}^{W_d})^2 + 4(\alpha_{yp50}^{W_d})^2 + (\alpha_{zp50}^{W_b})^2} + \alpha_{yp95}^{W_d}$$

$\alpha_{xp50}^{W_d}$: 가중값(W_d)을 준 x방향 누적 빈도 분포 95%에 해당 가속도

$\alpha_{yp50}^{W_d}$: 가중값(W_d)을 준 y방향 누적 빈도 분포 95%에 해당 가속도

$\alpha_{zp50}^{W_b}$: 가중값(W_d)을 준 z방향 누적 빈도 분포 95%에 해당 가속도

$\alpha_{yp95}^{W_d}$: 가중값(W_d)을 준 y방향 누적 빈도 분포 95%에 해당 가속도

p : 바닥면에서 측정

2.2.4 승차감 평가

UIC 513R은 철도환경에서 사용할 수 있는 진동 승차감에 대하여 규정하고 있다. 위 규격은 통계적인 방법을 도입하여 계산되는 새로운 지표로서 승차감 지수(Ride Index)를 제시하고, 있으며 승차감의 측정 진동 가속도 값을 계산하는 과정 중에 사용되는 가중함수 규격을 포함하여 전 세계적으로 UIC 513R 규격의 가중함수를 그대로 적용하여 평가한다.

Table 3 UIC 513 Evaluation Scale

Ride index(Nm)	Ride comfort
~ 1	Very Comfortable
1 ~ 2	Comfortable
2 ~ 4	Medium
4 ~ 5	Uncomfortable
5 ~	Very uncomfortable

2.2.5 감쇠특성 분석

철도차량 연결기는 두 차량(TC, M)간 운행 중 가속 감속 구간에서 인장· 압축을 하여 승차감에 영향을 준다. 이러한 차량 간 가· 감속 시 주행방향으로 발생하는 운동을 감쇠가 있는 강제진동(Fored damping vibration)으로 볼수 있으며 감쇠진동 파형으로부터 대수감쇠률과 감쇠비율 통해 그 진동계에 작용하는 감쇠 특성을 정략적으로 가늠할 수 있다.

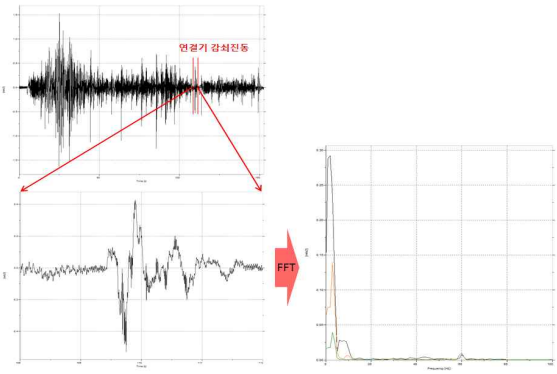

Fig. 3 Damping Frequency

fig3은 두 차량(TC, M)간 운행 중 감속 구간에서 발생하는 감쇠 진동 신호의 주파수 스펙트럼을 도출하는 과정을 나타낸 것이고, 이를 통해 연결기 감쇠진동에 발생하는 구간에서 주요주파수의 특성을 알 수 있다. 주요 주파수는 차량 간 연결기의 감쇠성능이 차량 간 가속에 따른 관성력에 의해 발생한 부족감쇠(Under damping)진동으로 나타난 것으로 볼 수 있으며 실제 신호의 구간 푸리에 변환을 통해 지배 주파수의 대수감쇠율과 감쇠비 산출이 가능하다. 실제로 디지털 신호의 분해능과 데이터의 샘플링의 한계로 감쇠 주파수를 정확히 산정하는 것은 어려우나 운동계에 작용하는 감쇠 진동의 지배주파수의 대역을 통해 근접한 감쇠특성은 알 수 있다.

2.3 시험(측정)결과

2.3.1 승차감 지수 산출(연결기 진동측정 결과)

승차감 지수를 산정하기 위해 시험 선로를 왕복운행 하는 동안 축적된 진동 데이터가 총 8Set가 사용되었다. 승차감 지수 산출 방법은 측정된 신로를 인체 감각에 따른 민감도를 보정하여 통계적 해석 방법에 따른다. 수집된 데이터는 신호처리 흐름에 따라 Table3과 같이 설정하였고 fig2와 같이 승차감 평가흐름절차에 따라 가속도 실효값을 계산하였다.

Table 4 Data Signal Setting Condition

Fmax	Sampling frequency	Record size	FET			Weight Function	Sample period
			Filter Type	Window	Block size		
1024 ㎐	2048 ㎐	1024	Bandpass 0.4 ㎐~100 ㎐	Hanning	2048	UIC 513R	5sec

위의 측정값 신호 처리 절차에 따라 각 방향에서 5초간의 유효한 진동값을 도출하여 데이터 분석 총 150sec 간 5초의 유효한 진동값(R.M.S)을 계산하여 아래와 같이 정리하여 승차감 지수 산정에 사용하였다.

Table 5 RMS_{5SEC} Cumulative frequency distribution 95% Acceleration Value(1St and 2nd)

Direc-tion	Channel	Para-meter	TC front1	TC front2	TC front3	TC front4	TC rear1	TC rear2	TC rear3	TC rear4
upper and lower	1ch	α^{wb}_{zp95}	0.10/0.23	0.19/0.27	0.18/0.27	0.17/0.22	0.17/0.26	0.19/0.21	0.18/0.21	0.19/0.20
	5ch	α^{wb}_{zp95}	0.11/0.20	0.14/0.26	0.15/0.23	0.15/0.25	0.20/0.26	0.19/0.22	0.20/0.24	0.20/0.22
left and right	2ch	α^{wd}_{zp95}	0.33/0.15	0.24/0.18	0.24/0.18	0.23/0.23	0.29/0.12	0.26/0.14	0.24/0.12	0.23/0.11
	6ch	α^{wd}_{zp95}	0.06/0.24	0.10/0.23	0.11/0.26	0.11/0.20	0.08/0.21	0.07/0.22	0.07/0.25	0.08/0.28
forward and backward	3ch	α^{wd}_{zp95}	0.05/0.11	0.06/0.16	0.06/0.11	0.06/0.11	0.05/0.13	0.05/0.14	0.05/0.12	0.06/0.11
	7ch	α^{wd}_{zp95}	0.05/0.11	0.06/0.15	0.06/0.12	0.06/0.12	0.07/0.12	0.06/0.14	0.05/0.12	0.07/0.20

Table 6 RMS_{5SEC} Cumulative frequency distribution 50% Acceleration value summary(1St and 2nd)

Direc-tion	Channel	Para-meter	TC front1	TC front2	TC front3	TC front4	TC rear1	TC rear2	TC rear3	TC rear4
upper and lower	1ch	α^{wb}_{zp50}	0.06/0.10	0.06/0.09	0.06/0.10	0.05/0.10	0.07/0.09	0.06/0.08	0.06/0.08	0.05/0.08
	5ch	α^{wb}_{zp50}	0.07/0.10	0.09/0.10	0.09/0.11	0.07/0.11	0.08/0.10	0.06/0.09	0.08/0.09	0.05/0.10
left and right	2ch	α^{wd}_{zp50}	0.06/0.06	0.10/0.06	0.09/0.07	0.09/0.06	0.11/0.06	0.10/0.06	0.09/0.06	0.10/0.05
	6ch	α^{wd}_{zp50}	0.04/0.11	0.05/0.11	0.04/0.11	0.03/0.07	0.05/0.10	0.04/0.10	0.04/0.10	0.03/0.07
forward and backward	3ch	α^{wd}_{zp50}	0.02/0.05	0.03/0.05	0.03/0.06	0.02/0.06	0.03/0.04	0.03/0.03	0.03/0.04	0.03/0.04
	7ch	α^{wd}_{zp50}	0.03/0.05	0.05/0.05	0.04/0.06	0.03/0.06	0.04/0.05	0.03/0.04	0.04/0.04	0.03/0.04

Table 7 Vibration test comfort index(abbreviated method/(1St and 2nd))

location	comfort Index	TC front1	TC front2	TC front3	TC front4	TC rear1	TC rear2	TC rear3	TC rear4
TC	Nmv	2.09/1.79	1.84/2.18	2.02/2.05	1.83/2.03	1.87/1.89	1.76/1.74	1.94/1.63	1.82/1.55
M	Nmv	0.83/1.96	1.16/2.30	1.36/2.21	1.32/2.07	1.13/2.12	1.16/2.05	1.28/2.22	1.35/2.43

Table 8 Vibration test comfort index(formal method/(1St and 2nd))

location	comfort Index	TC front1	TC front2	TC front3	TC front4	TC rear1	TC rear2	TC rear3	TC rear4
TC	NvD	2.14/1.13	1.84/1.19	2.20/1.33	1.87/1.40	1.95/0.97	1.80/0.92	2.01/0.93	1.86/0.86
M	NvD	0.83/1.53	1.13/1.55	1.01/1.73	0.97/1.41	1.21/1.42	1.04/1.36	0.86/1.79	0.87/1.39

2.3.2 연결기 감쇠특성

도시철도차량 연결기 감쇠특성을 산출하기위해 측정된 선로주행 구간 진동 데이터를 바탕으로 운행 및 제동구간에서의 감쇠특성을 분석하였다. 1차 시험 데이터의 가속 혹은 감속이 발생한 총 8개 구간의 데이터에서 스펙트럼 분석을 해본 결과 모두 1Hz~2Hz의 진동진폭이 크게 나타나며 감쇠진동신호를 확대해 진동의 주기를 계산해보면 1Hz~2Hz로 감쇠가 발생하였다. 따라서 1차 시험 데이터의 총 8개의 가·감속 구간에서 지배주파수의 진동 신호를 도출하여 감쇠특성을 정량적으로 나타낼수 있는 감쇠비, 대수감쇠률과 같은 지표로 값을 도출하여 아래와 같이 정리하였다.

Table 9 TC-car frontal coupler damping characteristics(1St and 2nd)

channel	Attenuation characteristic index and frequency	1st_1 (Acceleration)	1nd_2 (Decelerating)	3rd_1 (Decelerating)	4th_1 (Decelerating)
3CH	Damping ratio	0.21/0.10	0.34/0.16	0.21/0.14	0.28/0.11
	Logarithmic decay rate	1.4/0.63	2.3/1.02	1.4/0.90	1.8/0.69
	Attenuation natural frequency	29.92/29.37	19.47/19.29	20.50/20.13	21.38/21.07
	Non-Attenuation natural frequency	30.63/29.51	19.91/19.54	20.91/20.52	21.83/21.20
7CH	Damping ratio	0.16/0.15	0.40/0.12	0.23/0.14	0.38/0.03
	Logarithmic decay rate	1.0/0.93	2.7/0.78	1.5/0.87	2.5/0.18
	Attenuation natural frequency	33.50/33.43	28.66/28.49	26.45/26.43	35.23/34.92
	Non-Attenuation natural frequency	33.93/33.79	29.05/28.70	26.72/26.68	35.56/34.94

Table 10 TC-car lumbar coupler damping characteristics(1St and 2nd)

channel	Attenuation characteristic index and frequency	1st_1 (Decelerating)	1nd_2 (Decelerating)	3rd_1 (Decelerating)	4th_1 (Decelerating)
3CH	Damping ratio	0.21/0.09	0.28/0.12	0.21/0.16	0.21/0.18
	Logarithmic decay rate	1.4/0.55	1.8/0.75	1.3/1.03	1.4/1.14
	Attenuation natural frequency	16.07/15.77	15.97/15.82	16.98/16.75	15.70/15.58
	Non-Attenuation natural frequency	16.44/15.83	16.24/15.82	17.43/16.98	16.08/15.83
7CH	Damping ratio	0.23/0.10	0.19/0.13	0.23/0.15	0.22/0.02
	Logarithmic decay rate	1.5/0.62	1.2/0.83	1.5/0.93	1.4/0.15
	Attenuation natural frequency	26.91/26.31	26.54/26.30	32.24/31.76	22.20/21.67
	Non-Attenuation natural frequency	27.66/26.43	27.02/26.53	33.09/32.10	22.75/21.68

3. 결 론

본 연구에서는 도시철도차량에 설치된 구형 연결기 모델의 성능을 평가하고자 UIC 513R 규격을적용한 승차감과 연결기 모델의 감쇠특성을 평가하기 위해 진행된 시험이다. 시험에 사용된 연결기 제원의 위치는 TC-car와 M-car를 연결하는 각각의 전대차와 후대차에 가속도 센서를 설치하여 진동 데이터를 수집한 결과를 분석한 결과로 비교 분석되었고, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 승차감지수 평가 결과

주행에 따른 승차감은 연결기 모델과는 무관한 것으로 판단되며 모델별 승차감은 UIC 513 R 기준으로 약식법에 의한 경우 신형 연결기 모델이 승차감이 좋은 것으로 나타났고, 정식법에 의한 결과는 신형과 구형 연결기 모델별 차이는 크게 나지 않았다. 전반적으로 구형과 신형 모델의 승차감은 평균적으로 Comfortable이고 약식법에 의한 승차감에서 신형연결기 모델이 구형보다 다소 안정적이고 정식법에 따르면 구형이 다소 안정적이다.

2) 감쇠특성 평가 결과

신형연결기 모델이 구형연결기보다 대수감쇠률과 감쇠비가 다소 높아 차량이 가감속시 승차감에 영향을 주는 성능은 신형 모델이 우세한

것으로 사료된다. 차량의 가감속시 작용하는 초기 하중을 동일하다고 가정 시 도시철도차량의 주행방향에서 신형과 구형의 감쇠특성은 모두 유사한 감쇠특성을 가지고 있는 것으로 판단된다. 본 논문의 결과를 통해서 도시철도차량의 추돌 및 충돌시 대용량 에너지 흡수장치인 변형튜브(Deformation Tube)를 VVVF전동차의 중간완충장치(EFG2)와 결합하여 새로운 중간연결장치(EFG2+변형튜브)의 형태로 새롭게 개발 연구가 수행되었으며, 현차 적용 성능평가를 위해 추가적인 연구를 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원 철도기술연구사업의 “대용량에너지 흡수장치가 적용된 TSI 표준형 연결기 실증 연구(도시철도차량의 충격피해저감을 위한 연결기시스템 개선방안 연구/과제번호 : 17RTRP-B137729-04)로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] 4th year performance plan, yujin.co.kr 2018
[2] Line 3 Maintenance Guide, Seoul Metro, 2010
[3] SeoulMetro Line 3 Type of Coupler Vibration measurement Report, yujin.co.kr 2015
[4] 도서출판 골든벨, 백남욱외1명, 2007