도시철도 운전방식에 따른 승차감 측정 및 분석

유원식*, 최규형**, 박춘수***, 전태현**** 정회원

Measurement and Analysis of Ride Quality according to Driving Type in Urban Railway

Onesik Ryu*, Kyuhyoung Choi**, Choonsoo Park***, Taehyun Jeon**** *Regular Member*

요 약

철도는 친환경 요소를 두루 갖춘 최첨단 교통수단으로 주목받고 있을 뿐만 아니라 더 나아가 다른 교통수단과의 경쟁에서 우위를 차지하기 위해 여객수송의 품질 향상과 운행에너지 절감을 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 하지만, 도시철도에서는 불특정 다수의 승객에게 서비스하는 업종 특성상 운송효율과 에너지절감을 위한 연구가 대부분이고 여객수송의 품질 향상에 대한 연구는 미비하다. 따라서 본 연구에서는 여객 수송의 품질향상 측면으로 접근하여 도시철도 노선에서 일반열차와 급행열차의 자·수동 운전방식의 3차원 진동 횡가속도를 다양한 환경에서 측정하고, 이 측정된 3차원 진동 횡가속도와 국제철도협회에서 제시한 UIC513R의 통계적인 기법을 기반으로 승차감을 도출하고 비교 분석하였다.

Key Words : Ride quality, Manual operation, Automatic operation, Urban railway, UIC513R

ABSTRACT

The railway system has been recognized as one of the best eco-friendly advanced transportation systems. Furthermore, the improvement of the passenger transportation quality and the energy saving have been studied for being the most competitive transportation system. However, most of the studies have been mainly focused on the improvement of the transportation efficiency and energy saving because of the characteristics of the urban railway which serves the unspecified multiple passengers. In this paper, the 3-dimensional vibratory lateral acceleration has been measured in various environments for the automatic and manual operation modes of the general train and express train in the urban railway lines. In terms of the improvement of the passenger transportation quality, the comparison analysis of the ride quality is carried out based on the measured 3-dimensional vibratory lateral acceleration and the statistical techniques of UIC513R suggested by the International Union of Railways.

I. 서 론

세계 철도산업은 시대적 흐름과 요구에 부응하기 위해 산업혁명부터 지금까지 수송효율성 향상과 운송시간 단축이라는 목표 아래 고속화, 고밀도화, 대량 수송을 위해 발전해 왔고 최근에는 친환경 요소를 두루 갖춘 최첨단 교통수단으로 주목을 받고 있을 뿐만 아니라 더 나아가 다른 교통수단과의 경쟁에서 우위를 차지하기 위해 여객 수송의 품질 향상과 운행 에너지 절감을 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 여객수송의 품질향상에 대한 연구로부터 승객의 삶의 질 향상에 따른 승객의 만족도가 높아졌고, 그 높아진 만족도를 충족하기 위한 기회비용을 지불할 수 있는 의식수준의 변화로 승객이 느끼는 쾌적함의 정도를 나타내는 승차감이 중요한 요구사항으로 인식되어 열차의 초기 개발과정부터 이러한 승차감은 필수적인 요인으로 고려되는 것을 알 수 있다[1-3]. 운행 에너지 절감에 대한 연구에서는 열차 운행 시 주행에 따른 소비전력을 주행패턴, 운전방법, 속도별 등 다양한 방법으로 측정하여 에너지 절감을 위한 최적 주행에 대해 초점을 두었다[4,5]. 그러나 운행 에너지 절감에 대한 연구들은 열차가 주행 시 소비되는 에너지를 최소화하기 위한 최적 주행패턴을 찾아보는 것을 목적으로 하여 승차감에 대해서는 고려되지 않고 있다.

*서울9호선운영(주), **서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도전기신호공학과, ***한국철도기술연구원
****서울과학기술대학교 전기정보공학과 (교신저자, thjeon@seoultech.ac.kr)
접수일자 : 2015년 7월 28일, 수정완료일자 : 2015년 8월 20일, 최종게재확정일자 : 2015년 9월 10일

본 논문에서는 기 발표된 여러 논문들을 통해 증명된 수동 및 자동운전에 따른 운행 에너지 절감에 대한 연구의 보완으로서 도시철도 노선에서 일반열차와 급행열차의 운전모드에 따라 3차원 진동 횡가속도를 다양한 환경에서 측정하였다[6,7]. 이 측정된 3차원 진동 횡가속도와 국제철도협회(International Union of Railways, UIC)에서 제시한 UIC513R의 통계적인 기법을 기반으로 승차감을 도출하고 비교 분석하였다[8].

Ⅱ. 승차감 평가방법 및 평가기준

1. 승차감 평가방법

승차감은 사람이 열차에 탑승했을 때 느껴지는 불편함의 정도로 정의되며, 그 측정방법이 매우 다양하고 진동과 같은 동적 변수뿐만 아니라 환경적, 공간적 변수 등에 영향을 받는다. 철도 시스템에서의 승차감은 다양한 방법으로 평가되고 있으며, 대표적으로 가속도를 이용한 실효값 평가방법, 통계적 평가방법, Sperling이 제안한 승차감 지수로 평가하는 Wz 방법 등이 사용되고 있다[9,10]. 진동 승차감 평가에 많이 이용되고 있는 규격은 ISO2631과 UIC513R이 있다. ISO2631 규격은 교통기관에서의 전신진동(Whole-body vibration) 측정 및 평가에 대한 일반적인 사항을 규정하고 있고, UIC513R은 철도환경에서의 진동 승차감에 대하여 규정하고 있다[8,11]. 따라서 본 논문에서는 국제철도협회에서 제안한 UIC513R의 통계적인 승차감 평가 기법으로 승차감 지수를 측정할 수 있는 측정 계측기를 도시철도 차량에 설치해서 3차원 진동 횡가속도를 측정하여 이를 통해 승차감을 도출하였다.

3차원 진동 횡가속도의 측정 과정은 다음과 같다. 먼저 차체 바닥에 설치된 3축 가속도 센서로 측정된 가속도 신호를 저주파 밴드필터로 통과시키고 샘플링 동안에 발생할 수 있는 신호왜곡에 따른 오차를 제거한다. 그리고 디지털 신호로 변환 후 디지털 신호로 변환된 1개 블록(5초 동안 측정 데이터)의 신호에 대해 푸리에 변환을 하여 주파수 영역으로 변환시킨 후 필요한 주파수 범위(0.4~80Hz)에서 각 주파수에 대한 진동 가속도 파워를 구한다. 동일한 방법으로 연속적인 60개 블록의 진동가속도의 파워를 계산하고, 계산된 60개 블록의 진동가속도 파워에 대해 주파수 보정곡선을 통한 주파수 보정을 수행한다. 주파수 보정은 인간이 느끼는 진동의 감응이 진동주파수에 따라 다르게 나타나기 때문에 이를 함수화시킨다. 주파수 보정곡선은 수직방향과 수평방향에 대해 수직방향은 4~16.5Hz에서, 수평방향은 0.6~2Hz(주파수 보정치 0.9 이상)에서 가장 민감하게 나타난다. 이렇게 주파수 보정을 수행한 후 X, Y, Z축의 각 방향에 대한 진동 가속도 실효값을 구한다. 이 측정된 진동가속도 실효값을 통해 승차감 지수를 도출하는 식은 다음과 같다.

$$N = 6\sqrt{(A_{wx95})^2 + (A_{wy95})^2 + (A_{wz95})^2} \quad (1)$$

여기서 A_{wx95}, A_{wy95}, A_{wz95}는 각각 60개의 진동가속도 중 누적빈도 95%의 실효값이다.

2. 승차감 측정 계측 시스템

본 논문에서는 승차감평가에 대표적인 UIC, ISO, Spering 방식이 적용 가능한 측정시스템을 이용하였으며, 진동분석을 기반한 UIC513R을 고려하여 승차감측정 및 평가를 진행하였다. 이를 위한 가속도측정에 이용되는 가속도계는 ICP(Integrated Circuit Piezoelectric)형을 사용한다. 가속도계는 기관실 차량의 차체상면 중앙에 정확한 계측을 위해 시간영역의 신호를 주파수 영역 스펙트럼으로 변환연산을 수행하는 FFT(Fast Fourier Transform) 보드와 함께 유동이 없도록 고정부착하여 운행 중에 연속적으로 x, y, z축 방향의 3차원 가속도 값을 획득한다[8]. 이 가속도계는 FFT 보드로부터 20V, 2.4mA 전원을 공급받으며, 측정시스템은 400Hz의 샘플링 주파수와 2048개의 데이터를 사용하여 푸리에 변환을 수행하기 때문에 1개 블록은 5.12초, 1분은 12개 블록(61.44초), 5분은 60개 블록(5.12분)이다[12].

3. 승차감 측정 환경

승차감 측정을 위하여 도시철도의 동일 구간을 기준으로 수동운전과 자동운전의 운전패턴에 따른 진동 횡가속도를 측정하였다. 실험에 사용된 차량은 알루미늄으로 제작된 4량 1개 편성(2M2T)으로 이에 대한 제원은 표 1와 같다.

표 1. 운전 열차 제원

Category		Note
Speed	Maximum train speed	100km/h
	Maximum operation speed	80km/h
	Scheduled speed	32km/h
Acceleration		Over 3.0km/h/s
Deceleration	Service brake	Over 3.5km/h/s
	Emergency brake	Over 4.5km/h/s
Jerk		Over 0.8m/s^3
Train tare weight		138,401kg
Train tare weight + Fully laden weight		218,401kg

표 2. 열차 운전 조건

Time	Operation Mode
05:00 ~ 18:00	ATO(Auto) / MCS(Manual)

열차의 최고 속도 100km/h 및 최고운영 속도 80km/h 이며, 차량 신호제어 시스템으로는 ATP(Automatic Train Protection) 시스템과 ATO(Automatic Train Operation) 시스템을 사용한다. 측정 결과의 높은 신뢰도 확보를 위해서 수동운전의 경우는 그림 1의 서로 다른 제한 속도로 운영되는 5구간 선로의 특성을 숙지하고 있는 경력 4년 이상의 경력직 기관사들의 도움으로 진행하였다. 또한, 기관사는 수동운전 시 최적화된 운전선도를 기준으로 선로환경에 따른 제한속도 내에서 열차의 출발, 정지, 가속, 분기기 통과, 곡선통과 등 선로환경 및 차량특성에 맞게 운행하였으며, ATP 시스템의 열차신호 감시 및 제어와 운행제한 속도 등의 열차방호를 받으며 수동으로 차량을 운행했다. 승차감은 차량의 가감속 특성, 승객의 하중, 운행시간대별로 다르기 때문에 표 2와 같은 조건을 기반으로 자동운전과 수동운전의 3차원 진동 횡가속도를 측정하였다.

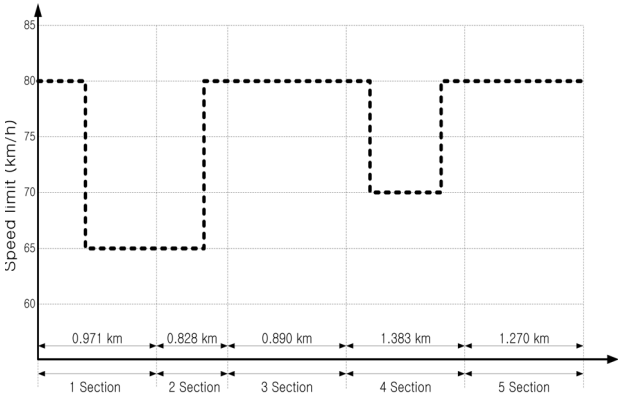

그림 1. 승차감 측정을 위한 선로 특성

Ⅲ. 승차감 분석

1. 일반열차 수·자동운전 진동 가속도 분석

일반열차는 급행열차와 달리 동일 구간 내에서 매 구간마다 정차하며 운행하기 때문에 UIC513R에서 요구하는 승차감 측정을 위한 최소 조건을 만족하지 못한다. 따라서 열차의 운전모드에 따라 그림 1의 1구간에서 5구간까지의 3차원 진동 횡가속도를 측정하고 이를 평균 및 표준편차로 비교하였다. 그림 2과 그림 3은 일반열차의 자동운전과 수동운전의 운전모드에 따른 X, Y, Z축에 해당하는 진동가속도의 평균과 표준편차를 각각 나타내는데, 두 그래프를 통해서 측정된 진동가속도의 Y축과 Z축은 약 0.02m/s^2, X축은 그 차이가 미미하지만 전반적으로 자동운전보다 수동운전이 측정된 진동가속도의 평균이 조금 낮은 것을 확인할 수 있다. 표준편차의 경우에도 측정된 진동가속도의 X, Y, Z축 모두 수동운전이 낮은 것으로 보여 일반열차의 운행 중 진동에 의한 영향이 자동운전보다 수동운전이 작은 것을 알 수 있다.

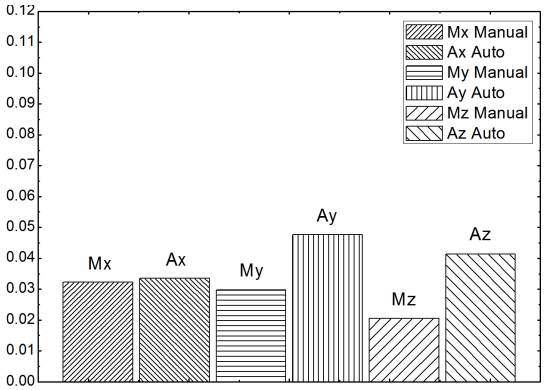

그림 2. 일반열차의 진동가속도 평균

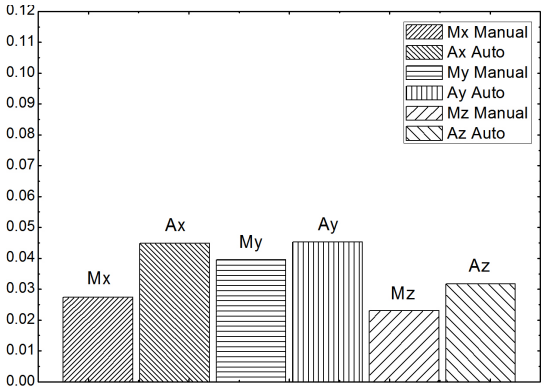

그림 3. 일반열차의 진동가속도 표준편차

2. 급행열차 수·자동운전 진동 가속도 분석

급행열차는 일반열차와 달리 동일 구간에서 정차 없이 운행하기 때문에 그림 1의 1~5구간을 한 구간으로 가정하여 3차원 진동 횡가속도를 측정하고 이를 역시 평균 및 표준편차로 비교하였다. 그림 4와 그림 5는 급행열차의 자동운전과 수동운전의 운전모드에 따라 X, Y, Z축에 해당하는 진동가속도의 평균과 표준편차를 각각 나타냈다. 일반열차의 결과와 비교하였을 때, 전반적으로 일반열차에 비해 급행열차의 진동가속도가 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 먼저 측정된 진동가속도의 평균의 경우, X축과 Y축에서는 진동가속도가 수동운전이 자동운전보다 낮게 나타나며 Z축은 미세하게 자동운전이 더 높게 나타난 것을 확인할 수 있다. 표준편차는 진동가속도의 X, Y, Z축에서 모두 수동운전이 자동운전보다 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

급행열차의 자동운전에서 진동가속도의 X, Y축이 수동운전보다 높게 측정되는데, 이는 자동운전의 경우 수동운전보다 급가감속이 더 심하고, 곡선구간에서의 감속이 덜 하기 때문이다. UIC513R의 최소 조건에 만족하는 급행열차에서 측정된 진동가속도의 X, Y, Z축 각각의 누적빈도 95%의 실효값들을 식 (1)에 대입하여 도출된 급행열차의 수동운전과 자동운전의 평균 승차감 지수 N은 수동운전이 1.0211, 자동운전이 1.3119으로 두 운전방식의 승차감 지수가 모두 UIC513R 규격에 부합하는 값임을 확인하였다.

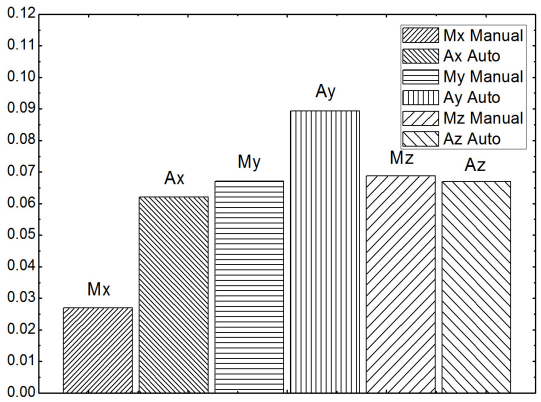

그림 4. 급행열차의 진동가속도 평균

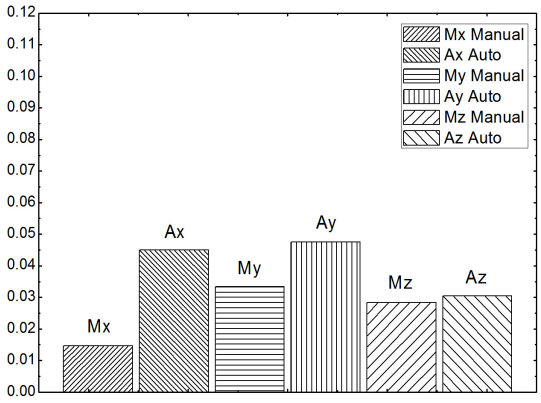

그림 5. 급행열차의 진동가속도 표준편차

Ⅳ. 결 론

현대에는 철도산업이 고부가가치 산업 중심으로 산업구조가 개편되고 승객은 다양한 서비스의 선택에 있어 만족도라는 기회비용을 지불하는 의식 수준을 갖추게 되면서, 본 논문에서는 운전방식에 따른 운행 에너지 절감 측면이 아닌 여객수송의 품질 향상 측면으로 접근하여 연구를 수행하였다. 그 결과 도시철도의 급행열차에서 수동운전과 자동운전의 승차감 지수는 국제철도협회의 승차감 평가기준인 UIC513R 규격에 부합되는 것을 확인하였다. 따라서 운행에너지 절감 측면에서 수동운전이 자동운전보다 소비전력이 작다는 기존의 연구결과와 본 연구 결과를 토대로 향후 안정화된 도시철도 노선의 자동운전 내 속도프로파일에 수동운전의 최적화된 운전선도를 활용한다면 운영비 절감 및 승객 만족도 향상이라는 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 향후 열차의 진동가속도 뿐만 아니라 승차감에 영향을 줄 수 있는 다른 요인들을 고려하여 좀 더 신뢰도 높은 승차감 측정 및 평가를 기반한 여객수송의 품질 향상에 대한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

[1] Y. Ann, J. Ann, J. Lee, S. Kim, “Comparison of Interior Noise Characteristics of ITX and Gyeongchun Train,” Proceedings of the Korean Society of Railways Conference, Korea, pp. 493-497, 2013.

[2] Y. Song, S. Oh, J. Lee, Y. Kim, “Study of Ride Comfort on Train through Physiological Parameter, Journal of the Ergonomics Society of Korea,” vol. 30, no.1, pp. 237-250, 2011.

[3] H. Shin, C. Won,“A Study on ATO Control Pattern for Improving the Passenger's Comfort, Journal of the Korean Institute Illuminating and Electrical Installation Engineers,”vol.1, no.2, pp. 49-56, 2001.

[4] I. Seo, K. Choi, “Energy Saving Strategy of Train Operation using Artificial Intelligence Technique,” Proceedings of the Korean Society of Railways Conference, Korea, pp. 2353-2360, 2009.

[5] J. Kim, K. Son, H. Jang, H. Kim, “The Power Consumption Analysis of the Metropolitan Eletric Multiple Unit for a Route,” Proceedings of the Korean Society of Railways Conference, Korea, pp.619-626, 2011.

[6] S. Ma, J. Lim, S. Baek, K. Lee, K. Kim, S. Lee, “A Study on the Analysis of EMU Power Consumption by the Urban Railway Operating System, Proceedings of the Korean Society of Railways Conference,” Korea, pp. 1081-1086, 2012.

[7] S. Ma, S. Jeong, K. Lee, H. Lee, D. Park, “A Study on Analysis of Consumption of Electric Power according to Maglev Train Operation Mode,” Proceedings of the Korean Society of Railways Conference, Korea, pp. 190-195, 2013.

[8] UIC513R, Guidelines for Evaluating Passenger Comfort in relation to Vibration in Railway Vehicles, International Union of Railways, 1995.

[9] Y. Kim, S. Kim, J. Mok, K. Kim, T. Park, “Analysis and Evaluation of Ride Comfort for High Speed Train using Statistical Method according to UIC 513R,” Journal of the Korean Society of Railway, vol.7, no.4, pp. 332-338, 2004.

[10] Y. Kim, S. Kim, J. Mok, S. Kim, K. Kim, “Estimation of Ride Comfort for Korean High Speed Train at High Speed, Journal of the Korean Society of Railway,” vol.10, no.2, pp. 146-152, 2007.

[11] ISO2631-1, Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements, International Organization for Standardization, 1997.

[12] H. Hwang, S. Kim, C. Park, J. Mok, K. Kim, Y. Kim, “Discussion for Ride Evaluation of High Speed Train by Using Inferential Statistics, Journal of the Korean Society of Railway, vol.11, no.6, pp. 543-549, 2008.

저자

유 원 식(Onesik Ryu)

・2010년 : 한밭대학교 전자공학과 졸업 (학사)
・2013년 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도전기신호공학과 졸업 (석사)
・2011년 ~ 현재 : 서울 9호선운영(주) 근무

<관심분야> : 철도 신호통신, 고속철도 이동통신, 전기철도

최 규 형(Kyuhyoung Choi)

・1981년 : 서울대학교 전기공학과 졸업 (학사)
・1989년 : 무로란공대 전기공학과 졸업 (석사)
・1992년 : 홋까이도대학교 전기공학과 졸업 (박사)
・1997년 ~ 2005년 : 한국철도기술연구원 전기연구본부 수석연구원
・2005년 ~ 현재 : 서울과학기술대학교 철도전기신호공학과 교수

<관심분야> : 전기철도, 철도정보통신시스템, 스마트그리드

박 춘 수(Choonsoo Park)

・1982년 : 연세대학교 대학원 기계공학과 졸업 (석사)
・2005년 : 연세대학교 대학원 기계공학과 졸업 (박사)
・1996년 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 수석연구원
・2006년 1월 ~ 12월 : Johns Hopkins University (Visiting Scholar)

<관심분야> : 철도차량, 시스템엔지니어링, 시험평가

전 태 현(Taehyun Jeon) **정회원**

・1989년 : 연세대학교 전기공학과 졸업 (학사)
・1993년 : 미네소타대학교 전기공학과 대학원 졸업(석사)
・1997년 : 미네소타대학교 전기공학과 대학원 졸업(박사)
・1997년 ~ 1998년 : Motorola 연구원
・1998년 ~ 2001년 : Texas Instruments 연구원
・2002년 ~ 2005년 : 한국전자통신연구원(ETRI) 선임연구원
・2005년 ~ 현재 : 서울과학기술대학교 전기정보공학과 교수

<관심분야> : 유무선 통신시스템, 근거리 무선통신, 이동통신