

차세대 동력분산형 고속열차(HEMU-430X)의 중량변화에 따른 가속능력 분석

최두호*, 조홍식¹
¹한국철도기술연구원

The Analysis of Acceleration Performance Resulted by Weight Variation for HEMU-430X high-speed train the Korea's next-generation electric multiple unit train

Dooho Choi^{*}, Hong-Shik Cho¹

¹Korea Railroad Research Institute

요약 국내 최초로 개발된 동력분산형 고속열차인 HEMU-430X의 최고속도시험 중 실시한 차량 중량과 가속성능간의 상관 관계에 대해 보고한다. 차량의 출력을 일정하게 유지한 채, 차량에 중량물 설치 및 제거를 통해 전체 차량의 중량을 2% 변화 시킬 때의 차량 가속성능을 분석한 결과, 시험 최고속도인 413km/h속도 영역에서는 중량이 가벼울 때 최고속도시험에 유리한 것으로 나타났다. 시험 종료 후, 시험 당시 0.1초 단위로 측정된 속도 데이터를 바탕으로 속도별 차량의 추진에 사용된 소비전력을 측정된 결과 차량의 견인력과 공기저항력이 같아져서 더 이상 추진이 되지 않는 균형속도는 419km/h로 산출이 되었으며, 이는 중량이 가벼울 때 가속이 유리하다는 시험 결과와 일치한다. 이러한 분석 결과를 바탕으로 향후 HEMU-430X의 증속 시험에 활용할 계획이다.

Abstract This study reports the relationship between rollingstock weight and acceleration performance for HEMU-430X, the first electric multiple unit developed in Korea. While maintaining the consumed power, the total train weight was deliberately varied by 2%, by adding and removing weights, and the it was shown that the lighter train was found to have higher acceleration performance and hence better suited for maximum speed tests below the speed of 413km/h. According to the power consumption analysis based on the velocity data collected per 0.1 second, the balanced speed, when the traction force and air resistance become equal, was determined to be 419km/h for HEMU-430X, which is in agreement with tested result. It is expected that the analyses in this study will be utilized for the speed tests in the future.

Key Words : Acceleration, Balanced speed, Electric multiple unit, Power, Train weight

1. 서론

차세대 동력분산형 고속철도차량인 HEMU-430X (High speed Electric Multiple Unit-430km/h eXperiment)은 국내최초로 동력분산형 추진시스템을 채택한 철도차량으로서 2007년부터 국토교통부 R&D 사업인 차세대

고속철도기술개발 사업을 통해 개발이 진행되어 2017년 상용화를 목표로 하고 있다[1,2]. 기존 고속선 가운데 최고속도를 낼 수 있는 경로를 고려하여 최고속도시험 구간은 경부고속철도 2단계(동대구~부산)구간으로 선정하여 시운전을 수행하였다. 동력분산형 추진시스템을 적용한 차량은 구동축이 많아 접착력이 크고 가감속이 용이

본 연구는 국토교통과학기술진흥원에서 지원하는 “430km/h급 고속열차 실용화 기술개발” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Dooho Choi(KRRI)

Tel: +82-10-2851-8592 email: dhchoi@krii.re.kr

Received March 5, 2015

Revised (1st May 26, 2015, 2nd June 2, 2015)

Accepted June 11, 2015

Published June 30, 2015

하여 곡선이나 기울기가 많고 역간거리가 짧은 우리나라 지형에 적합한 시스템이며, 추진장치가 분산됨에 따라 편성의 유연함도 가지고 있다. 또한 HEMU-430X는 알루미늄 압출재를 사용하여 KTX 대비 무게를 5% 줄였으며, 공기역학적 해석을 통한 유선형 전두부 설계로 기존의 KTX차량과 비교할 때 300km/h속도에서 주행저항을 10%정도 저감하는 등 최첨단 기술이 응집된 고속열차라 할 수 있다.

HEMU-430X는 세계4위에 해당하는 최고속도 430km/h를 목표로 제작이 되었다. [3] 하지만 다양한 공기저항 저감 노력에도 불구하고 300km/h 이상 구간에서의 공기저항력이 당초 예측했던 값보다 훨씬 더 크게 됨에 따라 최고속도 목표달성에 있어 어려움을 겪었다. [4] 이러한 상황에서 이러한 상황에서 최고속도를 갱신하는 방편의 하나로 차량의 중량변화를 고려했으며, 차량에 소비되는 전력을 일정하게 유지한 채 차량 내 중량물 설치 및 제거를 통해 차량의 중량을 약 2% 변화시킬 때 차량의 가속성능 변화에 대해 조사하였다. 또한 실제 주행시 측정된 속도 및 가속도 데이터를 바탕으로 소비전력 분석을 수행하였으며 이를 통해 HEMU-430X의 균형속도를 추출하였다. 이 분석결과를 바탕으로 중량과 차량 가속성능과의 관계에 대해 논의한다.

2. 본론

2.1 차량 구성도

HEMU-430X의 구성은 Fig. 1에서 보듯이 6량 1편성, 즉 제어객차인 TC (Trailer car Controlled), 동력객차인 M1~M4 (Motor car), 제어동력차인 MC (Motor car Controlled)로 구성되어 있다. 각 차량당 2대의 독립대차가 연결되어 총 12대의 대차로 이루어져 있으며 TC를 제외한 5 차량에는 견인전동기(traction motor)가 차량당 4대씩 총 20대가 설치되어 있다. [5] Fig. 2는 HEMU-430X의 주회로 구성도를 보여주고 있다. 가선을 통해서 차량에 공급된 에너지는 주변압기 (MTF: Main Transformer)를 거쳐 주전력변환장치 (MPS: Main Propulsion System) 및 보조전원장치 (APS: Auxiliary Power System)에 공급이 되고, 다시 주전력변환장치에서 견인전동기 (T/M: Traction Motor)를 통해 전력을 공급하여 차량을 견인한다.



Fig. 1. The formation of HEMU-430X

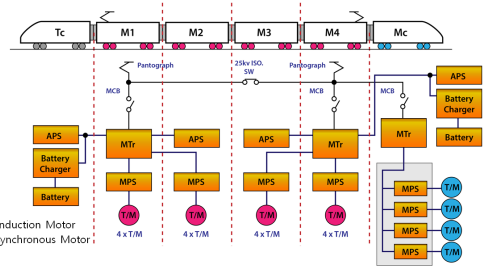


Fig. 2. Block diagram for electric connection in HEMU-430X

2.2 시험 조건 및 중량 변화

Table 1은 HEMU-430X 차량의 차량별 중량 및 총 중량에 대해 정리하였다. 차량의 중량증가는 TC, M2, M3에 중량물을 설치함으로써 이루어 졌으며, 총 중량의 변화량은 약 2%에 해당하는 5 ton이다. Fig. 3은 차량 내 설치된 중량물을 보여준다. 중량 변화에 의한 효과만을 검증하기 위하여, M1-M4에 공급된 전력은 530kW, MC에 공급된 전력은 508kW로 일정하게 유지되었다.

Table 1. Train weights for each train and the total weights are given in the unit of ton. The difference for the two tests was 5 ton, which is approximately 2% of the total weight.

No.	TC	M1	M2	M3	M4	MC	Total Weight
#1	49.3	55.9	48.9	48.4	55.8	59.1	317.4
#2	50.7	55.9	50.5	50.4	55.8	59.1	322.4



Fig. 3. Placement of weight in the train

2.3 시험 결과

구배가 존재할 때, 외부에서 견인력을 제공받은 차량

의 가속도는 Equation (1)로 설명할 수 있다.

$$a = \frac{F - R}{M} \pm g \times \tan \theta \quad (1)$$

여기서 a는 가속도, F_t는 견인력, R은 주행저항, M은 차량 중량, g는 중력가속도, θ는 경사각을 나타낸다. 본 연구에서 정의하는 가속도는 Equation (1)과 같이 경사도를 보정하여 평지에서 가속도로 환산한 값이다. 차량의 추진에 사용된 힘과 공기저항력이 같아지는 속도는 균형속도라고 하며, Equation (1)에 따르면, 견인력이 주행저항보다 큰 (F>R) 균형속도 아래에서는 중량이 가벼운 것이 가속에 유리하고, 공기저항이 견인력보다 큰 (R>F) 균형속도 이상에서 관성의 영향으로 중량이 무거운 것이 가속에 유리하다.[6] 하지만 HEMU-430X의 최고속도 시운전 시, 기존 KTX 시험시 측정된 최고속도인 352.4km/h 보다 더 빠른 속도영역에서의 시험이었기 때문에 주행저항에 대한 실측치가 없었고 [7], 따라서 HEMU-430X의 균형속도 예측이 불가능하였다. 이러한 상황에서 최고 속도 갱신을 위한 방편의 일환으로 철도 차량의 중량을 변화시켜 시험을 실시하였다.

Fig. 4는 HEMU-430X의 최고속도 시험 시운전 전 구간에 대해 차량속도를 보여준다. x축은 KP(kilometer post)는 서울역의 0km를 기준으로 한다. 중량변화에 의한 가속도 변화 분석 구간은 약 KP330 ~ KP300으로 빨간색 점선 박스로 구분하였다. 차량별 출력 및 최고속도에 대해 Table 2에 정리하였다.

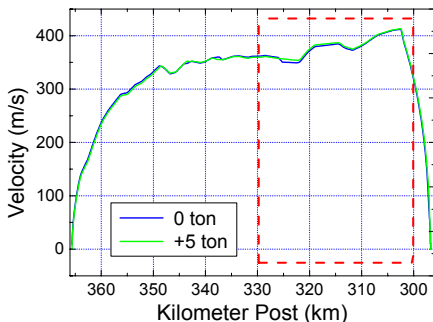


Fig. 4. Velocity of HEMU-430X as a function of KP (Kilometer Post) for two different train weights (“0 ton” and “+5 ton”)

Table 2. Motor power of each train and maximum measured speeds are given.

No.	M1-M4 Power (kW)	MC Power (kW)	Maximum Speed (km/h)
#1	530	508	412.3
#2			413.3

Fig. 5은 Fig. 4에서 빨간색 박스 구간을 확대하여 KP별 MTF 입력 전류, 속도, 그리고 두 중량에 대한 속도차이를 나타낸다. Fig. 5에서 보듯이, 중량증가가 없었던 경우(“0 ton”) 약 KP 326지점에서 MPS 재기동이 발생하였고 이에 의해 속도가 일시적으로 감소하였으나, 중량증가가 있었던 경우(“+ 5 ton”)의 경우 재기동이 발생하지 않았다. 재기동이 발생한 구간을 제외하고는 MTF 입력 전류가 전 구간에 걸쳐 동일하므로 두 중량에 대한 차량 출력 또한 MPS 재기동 지점을 제외하고는 동일하다고 결론 내릴 수 있다. 그래프 상에서 재기동 직후 “0 ton”의 경우 “+ 5 ton”과 비교하여 약 6.4 km/h 정도 속도가 느렸으나 KP가 감소할수록 점점 속도차이가 줄어들어 최고속도시점인 KP 302.5 지점에서는 속도 차이가 0.9 km/h에 불과했다. KP 325 ~ KP 302 구간에서 0 ton과 + 5 ton에 대해 가속도로 환산하면 0.290 km/h/s와 0.269 km/h/s이며, 중량이 가벼울 때 가속도가 더 증가하였으므로 Equation (1)에서 논의된 바처럼 Table 2에 정리된 최고속도는 현 시험구간에서 아직 균형속도에 도달하지 않았음을 의미한다.

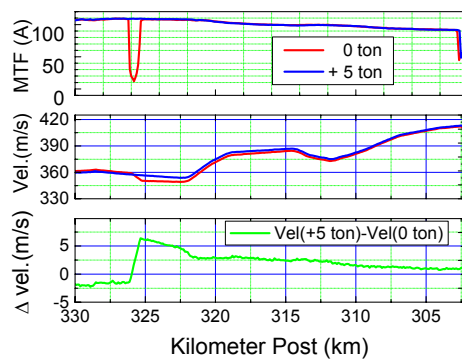


Fig. 5. MTF current-in, velocity and the difference of velocity for “0 ton” and “+5 ton” as a function of KP

2.4 소비전력 분석을 통한 균형속도 산출

최고속도 갱신 방안의 일환으로 중량변화를 고려하기 위해서는 차량의 정확한 균형속도 파악이 필요하다. 본

연구에서는 최고속도시험 시 차량에 부착된 센서를 통해 측정된 소비전력 데이터를 활용하여 차량의 균형속도를 계산하는 방법 및 그 결과 값에 대해 논의하겠다.

Fig. 2에 설명된 것과 같이 가선을 통해서 차량에 공급된 에너지는 차량을 추진하는 데 필요한 운동에너지와 구배극복과 관련된 위치에너지의 형태로 소비가 된다. 아래 식은 실제 차량의 추진에 사용된 에너지, 속도, 견인력에 관한 관계식이다.

$$E_t = P_t \times t = F_t \times v \times t \quad (2)$$

여기서 E_t 는 차량견인에 소비된 에너지, P_t 는 소비전력 t 는 시간, v 는 속도를 나타낸다.

0.1초 단위로 측정된 속도 데이터를 바탕으로 측정시간별 가속도를 계산하고 알려진 차량중량을 이용하여 견인력($F_t=M \times a$)를 구한 후 Equation (2)를 이용하여 속도별로 차량 추진에 사용된 에너지값을 산출하여[9] 개활지(open area)에서의 결과 값을 차량에 공급된 에너지와 함께 Fig. 6에 나타내었다. 이 그래프 상에서 차량의 속도가 약 200km/h에 도달하면 차량에 공급되는 에너지량은 거의 일정하게 되지만 차량의 속도가 증가할수록 실제 차량의 추진에 사용되는 힘은 급격하게 줄어드는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 주행저항이 아래의 식에서와 같이 속도의 제곱에 비례하여 급격하게 커지는 현상 때문에 발생한다. [10]

$$R = a + bv + cv^2 \quad (3)$$

여기서 a , b , c 는 실주행 결과 결정되는 계수로써 편성차량에 대해 특정한 고유값을 가지는 데, 일반적으로 a 와 b 는 기계적 저항, 그리고 c 는 공기저항에 따라 결정된다.

Fig. 6에서 보는 것처럼 차량의 견인력과 공기저항력이 같아져서 차량추진에 사용된 에너지가 0이 되는 균형속도는 419km/h로 밝혀졌다. 이 결과에 따르면 Table 2에 정리된 바와 같이 중량이 다른 두 차량의 최고속도는 모두 균형속도 아래이기 때문에 Equation (1)에서와 같이 중량이 가벼운 것이 가속에 유리하다고 예측할 수 있으며 이는 시험결과와 일치한다. 본 연구에서 도출된 균형속도를 바탕으로 향후 최고속도 시험 시 중량변화를 통한 최고속도 기록갱신 방안에 대한 시험을 수행할 계획이다.

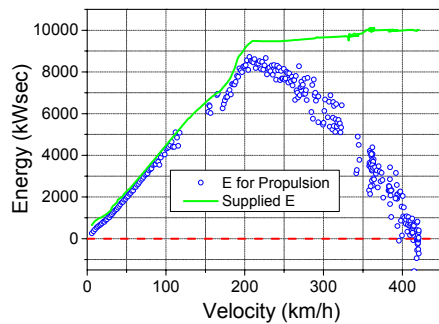


Fig. 6. The supplied energy and the energy used for propulsion as a function of speed

3. 결론

국내최초로 동력분산형 추진시스템을 적용하여 개발되었고 2017년 상용화를 목표로 시험운행중인 HEMU-430X의 최고속도시험 시 중량변화와 가속성능의 상관관계에 대해서 논의하였다. 차량의 균형속도에 대한 정보가 부족한 상황에서 최고속도를 갱신하기 위한 방법의 일환으로 차량의 중량을 2%(5 톤) 변화시킬 때 차량의 가속성능을 분석하였으며, 차량 중량이 가벼운 것이 가속에 유리한 것으로 나타났다. 차량의 균형속도를 구하기 위해 시운전 후 측정시간대별로 차량의 가속도를 구하고 이를 바탕으로 계산한 소비전력 분석 결과 HEMU-430X의 균형속도는 419km/h로 산출이 되었으며, 이 결과는 중량이 가벼울 때 가속성이 유리하다는 가속 시험 결과와 일치한다. 향후 이 연구에서 밝힌 균형속도 및 중량에 따른 가속성능 분석결과를 바탕으로 경부고속선 및 호남고속선에서 계속될 증속시험에 활용할 계획이다.

References

[1] C. Jeon, Y. Kim, S. Kim, S. Kim, S. Choi and T. Park, "A Study on Tail Vibration Reduction xt Generation high-speed trainfor the Next Generation High Speed EMU", Journal of the Korean Society for Railway, vol. 15, no. 6, pp. 543-549. 2012
DOI: <http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2012.15.6.543>

[2] S. Ryu, S. Kim, J. Hong, D. Song and Y. Guo, "Safety Evaluation of the Dynamic Behavior of HEMU-430X using the Accelerometers of UIC 518 OR, Journal of the

- Korean Society for Railway”, vol. 23, no. 3, pp. 310-317, 2014
- [3] C. S. Park, S. Choi, I. Han, S. Kim, T. Lee and K. Kim, Analysis for Main Properties of basic characteristic of HEMU-400X, Proc. The Korean Society for Railway, 2009
- [4] H. Kwon, S. Kim and H. K. Oh, Assesment of the Running Resistance of a High-speed Train Using a Coasting Test, Journal of the Korean Society for Railway, vol. 17, no. 3, pp. 165-170, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2014.17.3.165>
- [5] T. Lee, C. Park, S. Choi, K. Kim, A study of the train performance simulation for Korean next Generation high-speed train, Proc. World Congress on Railway Research, 2011
- [6] S. Kim, S. Kim, C. Park, H. Oh, and C. Jeon, Development of Korean Next-Generation High-speed Railway, Japan-Korea Joint Symposium on Dynamics & Control, 2013
- [7] D. Choi, C. Jeon, H. Cho, S. Kim, The relationship between train weight and acceleration for the Korea’s next-generation electric multiple unit train, Korea Railway Research Conference, pp. 470-474, 2013
- [8] Y. Ku, J. Rho, S. Yun, M. Kwak, K. Kim, H. Kwon and D. Lee, Optimal cross-sectional area distribution of a high-speed train nose to minimize the tunnel micro-pressure wave, Struct. Multidisc. Optim. vol. 42, no. 6, pp. 965-976, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00158-010-0550-6>
- [9] H. Cho, S. Kim, C. Jeon, T. Lee, S and Kim, Analysis of Power Consumption for Increasing Speed of HEMU-430X, The Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 295-296, 2014
- [10] Mott Rochard and F. Schmid, A Review of Methods to Measure and Calculate Train Resistances, Proc. Instn. Mech. Engrs, vol. 214, pp. 185-199, 2000.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1243/0954409001531306>

최 두 호(Dooho Choi)

[정회원]



- 2003년 2월 : 부산대학교 재료공학과 (재료공학학사)
- 2005년 8월 : 광주과학기술원 신소재공학과 (재료공학석사)
- 2011년 12월 :Carnegie Mellon University 재료공학과 (재료공학박사)
- 2012년 11월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

고속열차, 차세대 물류 시스템 연구, 신소재 연구개발, 에너지 저장장치, 재료 분석 연구

조 흥 식(Hong-Shik Cho)

[정회원]



- 1994년 2월 : 서울대학교 전기공학과 (전기공학학사)
- 1996년 2월 : 서울대학교 전기공학부 (전기공학석사)
- 2002년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (전기공학박사)
- 2002년 5월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

고속열차, 전력시스템, 전기철도