

## 철도차량 소비전력량 평가에 따른 틸팅기술 효과분석

### A Study on the Effect Analysis of the Tilting Technology According to the Evaluation of Electric Power Consumption Energy of Rolling Stock

김대식\* · 이기준

Dae-Sik Kim · Ki-Jun Lee

**Abstract** In this paper, By the time that the tilting technology is adopted in railway rolling stock, we analyzed quantitatively energy saving by reducing the power consumption with the reduction of the operation time through the speed improvement and suggested the necessity to introduce tilting technology in the domestic rail vehicles. To achieve this purpose, the effect of energy saving by comparing and analyzing the power consumption during the operation by TTX HANVIT 200 and 8200 electric locomotives to pull the trains on the same line was suggested and the efficiency of the main devices was compared and analyzed by measuring the power consumption by a single unit. As the energy saving is the world topic, the studies on reducing energy usage goes on constantly in many areas. In addition, as of the time to improve the conventional tracks to speed up and change the signals, Tilting technology will be contributed to the management environment by enlarging the passengers' demand through the reduction of the operation time and saving energy using the existing infrastructure.

**Keywords** : Tilting, Energy, TTX, HANVIT 200, The Korea Tilting Express

**초 록** 본 논문에서는 철도차량에 틸팅 기술 도입시 효과로 연구되고 있는 속도향상에 따른 운전시간 단축과 더불어 전력 소비량 감소로 에너지가 절감되는 것을 정량적으로 분석하여, 국내 철도차량에도 틸팅 기술 도입 필요성을 제시하고자 한다. 이를 위해 동일 노선을 한국형 틸팅 열차인 한빛 200과 8200호대 전기기관차가 견인하는 여객열차로 운행시의 소비전력을 동일 조건으로 환산 후 비교 분석하여 틸팅 기술 접목이 에너지 저감에 미치는 효과에 대하여 분석하였다. 에너지 절약은 세계적인 추세로서, 이의 해결을 위한 대책들을 여러 분야에서 끊임없이 연구하고 있다. 또한 기존선 속도 향상을 위한 선로 개량 및 신호체계 변경 등이 이루어 지고 있는 시점에서, 틸팅 기술을 통해 기존 인프라를 최대한 활용하여 열차 속도를 향상시킬 수 있다면 운전시간 단축을 통한 여객 수요 증대와 에너지 절감으로 경영개선에 크게 기여 할 수 있으리라 판단된다.

**주요어** : 틸팅, 한빛 200, 한국형 틸팅열차

## 1. 서 론

철도차량 분야에서 틸팅(Tilting)기술에 관한 연구는 유럽 국가들을 중심으로 수십년동안 진행되어 왔으며, 이탈리아의 ETR, 스페인의 Talgo, 스위스의 ICN, 스웨덴의 SJ 등 여러 철도 운영사는 틸팅시스템이 접목된 철도차량을 운영 중에 있다.

현재, 틸팅차량은 유럽국가들을 중심으로 최소의 비용으로 도시간 또는 지역간 철도 여행시간 단축을 위한 효과적인 해결방법으로 사용되고 있고, 일반적인 틸팅차량 운영결과 시간단축 효과는 곡선부의 다소(多少)와 형상에 따라 다르지만 약 8~15% 정도인 것으로 나타나고 있으며, 곡선부에서의 제동감소에 따른 에너지 소비 감소 효과도 있어, 독

일(DB AG)의 경우 약 8%의 에너지 저감이 있는 것으로 나타났다[1].

우리나라에서도 국가 R&D를 통해 한국형 틸팅 열차인 한빛 200을 개발하여 현재 시운전 중에 있으며, 틸팅열차 운행을 위한 인터페이스 사항과 안전운행을 위한 제반 기술연구, 유지보수 향상기술, 최적운행을 위한 조건분석, TPS 및 시험운행을 시간단축효과 등에 관한 연구를 시행하고 있다. 본 논문에서는 에너지 관점에서 국내 운영중인 철도차량을 대상으로 틸팅기술이 접목된 차량과 비틸팅 차량의 전력사용량 비교를 통하여 틸팅기술 접목을 통한 에너지 저감 효과를 분석하였으며, 이 결과를 바탕으로 국내 철도차량에 틸팅 기술의 도입필요성을 제시하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 틸팅(Tilting)

틸팅은 곡선부 주행시 차체를 Fig. 1에서와 같이 곡선의

\*Corresponding author  
Tel.: +82-42-615-4720, E-mail : dskim12@korail.com  
©The Korean Society for Railway 2012  
<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2012.15.4.329>

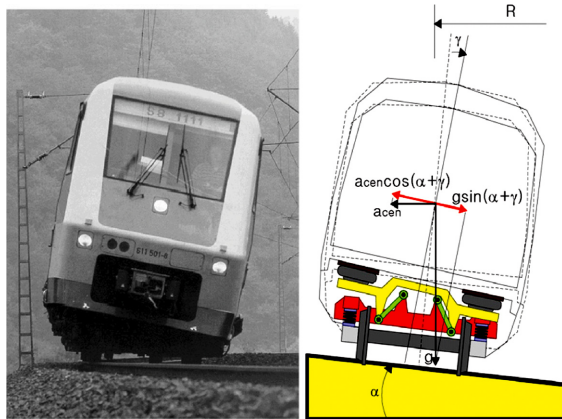


Fig. 1 Principle of lateral acceleration reduction of tilting train[1]

안쪽으로 기울이게 하여 곡선부를 주행함으로써 발생하는 원심가속도( $a_{cen}=V^2/R$ )의 횡방향 성분 ( $a_{cen}\cos(\alpha+\gamma)$ )을 중력가속도( $g$ )의 횡방향 성분( $g\sin(\alpha+\gamma)$ )으로 감쇄시켜 승객이 느끼는 횡가속도를 저감시키고 인프라 개선비용 절감 등의 효과가 있는 기술이다[1,2]. 차량에 이와 같은 틸팅 기술을 적용하면 승차감의 향상 뿐만 아니라 곡선부 통과속도를 증가(약 30%정도의 속도향상)시킬 수 있게 되므로 운행시간이 단축되며, 곡선부 통과시의 가·감속 빈도도 줄어들어 그 만큼의 에너지 소비도 줄일 수 있게 된다[2,3].

일반적으로 곡선부의 속도제한은 궤도여건이나 차량의 성능에 따른 제한보다는 승차감의 저하를 방지하기 위해 규정지어진 것이다. 즉, 곡선부 주행시 승객이 느끼는 횡가속도가 일정값(국내의 경우는 0.08g)을 초과하지 않도록 제한되어진 것이다.

위와 같은 틸팅의 원리에 따라, 틸팅차량은 노선에 곡선부가 많을수록 그 위력을 많이 발휘하는 반면, 고속신선과 같이 곡선부가 거의 없는 노선에서는 그 유용성이 많이 저감된다.

## 2.2 연구 모델 선정

틸팅은 차중에 관계없이 적용이 가능한 기술이나 주로 편성단위로 운행되는 열차에 적용되고 있으며, 국내에서는 국가 R&D사업으로 개발된 한빛 200에 최초 적용하였다. 한빛 200은 전기를 동력원으로 하는 전기차량으로 주요사양은 Table 1과 같다.

틸팅기술 접목 여부에 따른 소비전력량 비교 분석을 위하

여 KTX, 전기기관차, 누리로 등의 전기차량을 대상으로 검토한 결과 EUM타입인 누리로가 한빛200과 가장 유사하나 수도권을 중심으로 운행하고 있어 틸팅열차와 동일 노선에 대한 비교가 불가하여, 적산전력계 기능을 갖추고 있고 철도공사 자체적으로 전력사용량에 대한 측정을 시행하여 데이터 확보가 용이한 신형전기기관차(8200호대)를 비교차량으로 선정하였다.

## 2.3 선행 연구

국내에서 틸팅분야에 관한 연구는 틸팅열차 운행에 따른 시간단축 효과에 대해 주로 연구가 진행되어 왔으며, TPS (Train Performance Simulation) 를 활용하여 차종별(새마을, EMU, TTX)로 예상 투입 노선에 대한 분석 결과 틸팅열차 투입시 기존 새마을 운행시 보다 약 18%~20%의 시간 단축 효과가 있는 것으로 분석된 바 있다[3,4]. 또한 현차시험을 통해 경부선 대전→동대구 운행시 14분의 시간 단축 효과를 검증하였다[5]. 이렇듯 시간적인 관점에서의 효과는 논문들과 연구를 통해 검증되어 왔으나, 에너지 측면에서의 연구는 국내에서 실제적으로 진행되지 않고 단축시간을 에너지로 환산하거나 해외 사례를 인용하는 수준에 머물고 있다.

## 2.4 계측 회로 구성

### 2.4.1 여객열차

열차 운행시 소비되는 전력량 분석을 위해서는 측정용 계측기를 설치하거나 차량에 설치되어 있는 전력량계를 이용해야 한다. 현재 KTX-산천과 신형전기기관차에는 적산전력량을 확인할 수 있도록 회로가 구성되어 있다. 전기기관차에는 전력사용량을 측정 및 기록할 수 있도록 전력변환장치(C/I; Converter/Inverter)와 보조전원장치(SIV)에서 자체적으로 소비하는 전력량을 계산하여 통신을 통해 전송할 수 있도록 회로가 구성되어 있으며, 이 값을 TCMS(Train Control and Monitoring System)에서 각각 수신 후 소비 전력량을 계산하여 화면표시기(DU; Display Unit)에 표시하고 있다[6]. 이 값은 적산전력량만을 나타내므로 측정자의 확인과 기록을 통해서만 데이터를 수집할 수 있어, 운행시 소비되는 소비전력의 분석을 위하여 열차의 출발 및 도착시 현시된 값을 수기로 기록하는 방식으로 데이터를 취득하였다.

### 2.4.2 틸팅열차

한빛 200도 전기기관차와 동일한 방안으로 측정이 가능하나, 위 2.4.1에 제시된 수기 방식의 문제점인 수기관리의 어

Table 1 Technical details of Korean type of tilting train(HANVIT 200)[3]

열차형식	EMU	차량성능	최대운행속도 : 180 km/h
편성당 량수	6 Coach(1편성)	가선조건	전압: AC25KV 60HZ
총 출력	4,000kW	모터 수	16 (250kW per Motor)
열차중량	344ton	편성당 판도 수	2
틸팅장치	전기기계식방식 최대틸팅각도 : 8°이하	기타	가속도: 2.0km/h/ 감속도 : 상용 3.0km/h/s, 비상 4.0km/h/s

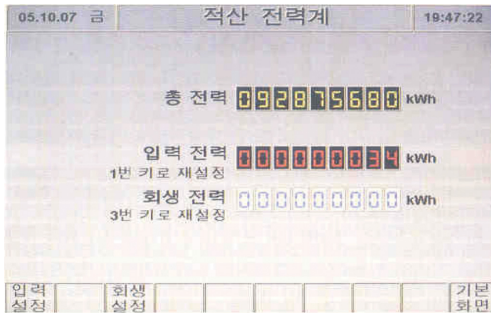


Fig. 2 DU screen of 8200 series[6]

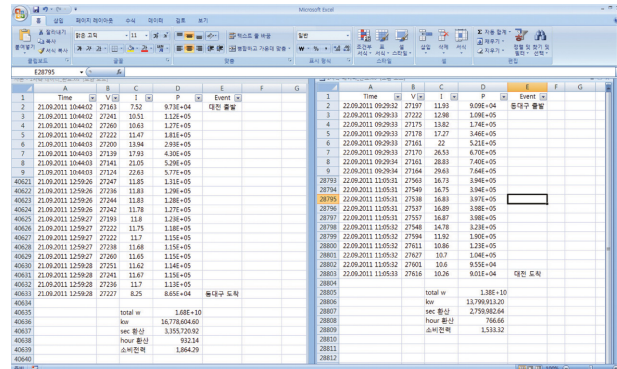


Fig. 4 Measured data(part)

려움과 변압기의 손실량을 반영할 수 없다는 단점을 보완하기 위하여 가선전압 계측 시스템을 활용하였다. 국가 R&D를 통해 개발 및 시운전 중인 한빛200은 운행 중 가선전압 품질 측정과 구성품별 소비전력 분석을 위하여 별도의 계측 시스템을 구성하여 시험 중에 있다.

전압 측정시 차량 자체에 설치되어 있는 PT(Potential Transformer)를 활용하여 MCB(Main Circuit Breaker)의 윗부분과 주변압기 1차측의 접지부분 사이를 값을 계측하였다. 즉, 차량 옥상에 설치된 PT를 거쳐 차량 내부 6101 line에 설치되어 있는 PT에서 최종적으로 전압을 계측하였다. 차량 옥상에 설치된 PT는 25kV : 150V이며 차량 내부에 설치된 PT는 150V : 5V이므로 최종적으로 계측되는 전압의 비는 25kV : 5V인 5000 : 1의 비로 계측하였다[3,7].

전류는 Rogowski coil을 사용하여 MCB(Main Circuit Breaker) 아래부분에서 계측을 하였으며, CT(Current Transformer)는 Fluke사의 PQM(Power Quality Measurement) 1,760 전용 전류 probe를 사용하였다. 이 전류 probe의 최대 허용 전류는 1,000A이며 내부 증폭기를 통해 1:1의 비로 계측된다[3].

계측한 주변압기 전류와 전압은 PQM장비(Fluke 1760 Power Quality Measurement)를 이용하여 0.2s 간격으로 저장하고, 전용 분석프로그램인 PQ Analyze를 통해 excel 데이터로 변환 후 분석을 시행하였다. 틸팅열차는 1개의 pantograph를 이용하여 가선전압을 공급받은 후 2대의 변압기로 공급하도록 되어 있으나, 2대의 변압기에 공급되는 전력량이 동일하다는 가정하에 1개의 변압기에만 계측회로를 설치하였다. Fig. 4는 '11.9.21일과 '11.9.22일 양일간 대전~

동대구 운행시 0.2s간격으로 실측한 계측값을 엑셀로 변환하여 소비전력을 분석한 자료이다.

## 2.5 소비전력량 분석

### 2.5.1 기준 설정

틸팅기술 적용 여부가 시간적 측면과 더불어 에너지 측면에서의 효과 분석을 위해서는 분석 대상간 동일 운행 조건으로 환산 후 비교를 시행하여야 한다. 견인량은 열차운전 시행세칙에 규정되어 있는 차증률에 따라 계산하였고, 평균 정차횟수는 실제 운행 데이터를 가지고 평균을 산출하였다. 따라서 본 연구에서는 Table 2와 같이 조건을 통일한 후 분석하였다.

Table 2 Standard value

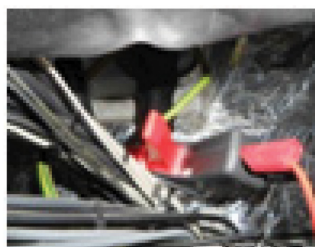
	틸팅열차	여객열차	기준값
분석구간	동대구~대전 (160km)	동대구~대전 (160km)	동대구~대전 (160km)
견인 환산량	8.4량	10.25량	8.4량
평균정차횟수	3.5회	7.3회	7.3회

### 2.5.2 여객열차 소비전력량

비틸팅 열차의 소비전력량 측정은 2011년 상반기(1월 ~ 6월)동안 경부선 동대구역~대전역 구간(160km)을 운행하는 전기기관차가 견인하는 여객열차를 대상으로 소비전력을 계측하였다.



(a) Voltage Measure



(b) Current Measure



(c) PQM Equipment Connection

Fig. 3 Measuring circuit of power consumption

동 구간을 6개월 동안 운행하면서 측정한 결과 평균 소비 전력 사용량은 2,171.9kwh였으며, 견인 환산 량수는 10.2량과 10.3량이었고, 평균 정차횟수가 7.3회로 조사되었다[8]. 이 값을 기초로 톨팅 열차인 한빛200(8.4량)과 비교하기 위하여 8.4량 기준으로 환산된 전력사용량과 1km 당 전력사용량을 산출하였다.

$$P_{(8.4량)} = \frac{P_{ml}}{10.25} \times 8.4 \quad (1)$$

$$P_{lp} = \frac{P_{(8.4량)}}{160} \quad (2)$$

여기서,

- $P_{(8.4량)}$  : 계측 값을 8.4량으로 환산한 전력사용량(kwh)
- $P_{ml}$  : 여객열차가 대전~동대구 운행시 사용된 평균전력 사용량(kwh)
- $P_{lp}$  : 1km 운행을 위해 사용된 환산 전력사용량(kwh/km)

이를 정리해보면 전기기관차로 견인한 여객열차의 평균 전력사용량은 1,779.9kwh로, 1km 운행을 위해 11.124kwh의 전력량이 사용된 것을 알 수 있다.

**2.5.3 톨팅열차 소비전력량**

전기차량은 역행 운행시 많은 전력을 사용하고, 제동시 회생을 통해 역으로 전력을 생산하는 시스템으로 되어있다. 한빛 200과 여객열차의 정차 횟수 차이는 전력사용량 분석에 중요한 요소로서 톨팅 열차에 설치한 계측장비로부터 측정된 전력사용량을 여객열차와 동일하게 보정하기 위하여 식 (3)과 식 (4)의 방법으로 계산하였다.

$$P_{(tilting)} = (P_{m2} + (P_r + P_p - P_i) \times (N_{ls} - N_{ts})) \times 0.97 \quad (3)$$

$$P_{lp} = \frac{P_{(tilting)}}{160} \quad (4)$$

여기서,

- $P_{(tilting)}$  : 정차횟수를 반영한 톨팅 열차의 전력 사용량(kwh)
- $P_{m2}$  : 한빛 200이 대전~동대구 운행시 측정한 평균 전력 사용량(kwh)
- $P_r$  : 정차제동을 위해 사용 또는 생성된 전력량(kwh)
- $P_p$  : 정상속도 도달을 위해 소비된 전력량(kwh)
- $P_i$  : 타행운행시 평균 소비 전력량(kwh)
- $N_{ls}$  : 여객열차의 동대구~대전 운행시 평균 정차횟수(회)
- $N_{ts}$  : 한빛 200의 동대구~대전 운행시 평균 정차횟수(회)
- $N_{lp}$  : 정차횟수를 반영한 1km 운행에 사용된 전력사용량 (kwh/km)

위 식 (3)에 적용된 변압기 손실량(효율)은 실제 운행결과를 분석한 결과 평균 약 90%의 효율이 나오는 것으로 분석

**Table 3** Amount of electricity used under the run from DaeJeon to Dongdaegu(EL)

	$P_{ml}$ 전력사용량 (kwh)	$P_{(8.4량)}$ 전력사용량 (kwh)	$P_{lp}$ (kwh/Km)
평균	2,171.9	1,779.9	11.124
1월	2,223.7	1,822.3	11.390
2월	2,238.5	1,834.5	11.465
3월	2,189.6	1,794.4	11.215
4월	2,117.7	1,735.5	10.847
5월	2,107.4	1,727.0	10.794
6월	2,154.2	1,765.4	11.034

**Table 4** Amount of electricity used under the Run from Daejeon to Dongdaegu(HANVIT200)

	$P_{m2}$ 전력사용량 (kwh)	$P_{(tilting)}$ 전력사용량 (kwh)	$P_{lp}$ (kwh/Km)
평균	1,627.30	1,668.64	10.43
1회	1,635.08	1,676.19	10.48
2회	1,603.58	1,645.63	10.29
3회	1,864.29	1,898.52	11.87
4회	1,533.32	1,577.48	9.86
5회	1,548.19	1,591.91	9.95
6회	1,579.35	1,622.13	10.14

되었으나, 결과값을 보수적으로 산출하기 위하여 단품 효율인 97%를 적용하였다.

정차제동 및 출발시 사용된 전력량을 나타내는  $P_r$ 와  $P_p$  값은 한빛 200이 공통적으로 정차한 김천역의 정차 및 출발시 사용한 전력량을 분석 후 평균값을 적용하였다.

분석결과 Table 4와 같이 평균 전력사용량은 1,668.64kwh로 분석되었으며, 1km 운행을 위해 10.43kwh의 전력량이 사용되었다. 이 결과는 톨팅기술 접목에 따른 곡선부 증속을 통해 비톨팅 열차보다 에너지 측면에서 6%의 효과가 있다는 것을 알 수 있다.

한빛 200은 임시열차인 관계로 정기열차 운행에 지장을 줄 수 있다고 판단되는 경우 대피 후 운행하게 되며, 3회차의 운행시간은 2시간 15분으로 평균 운행시간보다 약 33분이나 더 소요되었다. 따라서 3회차 운행기록을 제외하고 다시 분석해보면 평균 전력사용량은 1,622.67kwh로, 1km당 10.14kwh의 전력량을 사용한 것이다. 이것은 비톨팅 열차보다 9%의 에너지 절감 효과가 있는 것을 알 수 있다. 추가로 변압기 효율을 측정값인 90%를 적용하면 13~15%의 효과가 나오는 것으로 분석된다.

**3. 결 론**

기존 연구가 톨팅기술 접목을 통한 운행시간 단축효과 분석에만 국한되었다면, 향후 톨팅열차 도입을 고려하여 국내

에서도 에너지 측면에서의 연구는 꼭 필요한 것이다. 그러나 국내에서는 이런 연구가 현재까지는 미비한 상태로 흘러왔다. 따라서 본 논문에서는 틸팅기술이 접목된 한빛 200과 비틸팅열차인 여객열차의 대전역~동대구역간 전력사용량을 측정 및 견인 환산량과 정차횟수를 통일한 후 분석하여 자료의 객관성을 높였다. 그 결과 Table 3 및 Table 4와 같이 틸팅기술 접목에 따른 에너지 저감효과는 평균 6~9% 수준으로 분석되었다. 중장기 차원에서 신규 철도차량 차종 검토시 속도 및 좌석수 등 국한적인 요건을 벗어나 운행에 따른 효과측면에서의 연구가 지속적으로 필요할 것이라 생각되며, 본 논문은 틸팅운행에 따른 효과 분석연구의 밑거름이 될 것이라 사료된다.

## 후 기

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(한국형 틸팅열차 신뢰성 평가 및 운용기술개발)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] S.H. Park (2000) A study on the validity of Tilting train operation on the conventional line, KORAIL, Report.
- [2] T.W. Koh, Y.S. Kwak, S.K. Hwang, M. Sagong (2011) Tilting Train-induced Roadbed Response on the Conventional Line, *Journal of the Korean Society for Railway*, 14(5), pp. 433-441.
- [3] KRRI (2008~2011) The operation management plan for running tilting train, MLTM, Annual report of future railroad technical development project.
- [4] K.T. Kim, J.K. Yoo (2003) Analysis of speed-up effect of the tilting train on the conventional railway line, *Autumn Conference & Korean Society for Railway*, Iansan, pp. 297-304.
- [5] S.H. Han, S.G. Lee (2011) Analysis of time-saving on increasing the speed through the trial run test in Gyeongbu line, *Autumn Conference & Korean Society for Railway*, Jeju, pp. 1935-1942.
- [6] D.S. Kim, K.S. Son, H.S. Kim, J.W. Kim, et al. (2011) A study on the energy saving through the tilting technology of rolling stock, *Autumn Conference & Korean Society for Railway*, Jeju, pp. 3027-3031.
- [7] S.G. Lee, C. Kang, J.S. Her, J.C. Kim, et al. (2009) The service voltage measurement and analysis while TTX runs, *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, 23(12), pp. 58-65.
- [8] J.W. Lee (2012) The reduction of power cost for the operation through the improvement of the drive handling method, KORAIL, Knowledge & Suggestion.

접수일(2012년 3월 27일), 수정일(2012년 6월 12일),  
게재확정일(2012년 7월 11일)

**Dae-Sik Kim** : dskim12@korail.com

Korail Research Institute, KORAIL, 99 Jungang-Ro, Dong-Gu, Daejeon, 300-720, Korea

**Ki-Jun Lee** : kijunlee@cnu.ac.kr

Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, 99 Daehak-Ro, Yuseong-Gu, Daejeon, 305-704, Korea