

## 전동차용 IGBT형 추진제어장치의 본선시험에 관한연구

김태완 박건태 정만규 고영철 방이석  
 현대중공업(주) 기전연구소 산업전자연구실

### A Study On Field Test of IGBT Type Propulsion System for Electric Locomotive

T.Y.KIM G.T.PARK M.K.JEONG Y.C.GOO L.S.BANG  
 Hyundai Heavy Industrial Co.,LTD Industrial Electronics Research Dept.  
 Mechatronics Research Institute

#### ABSTRACT

This paper describes about the field test of IGBT VVVF inverter for the propulsion system. The 1650kVA class IGBT VVVF inverter has been developed. Therefore, the field test is performed in SMG 6 Line to confirm its the reliability and performance. The train consists of 4M4T and the electrical equipment for field test are as follows : VVVF inverter 4 sets, 16 traction motors and 2 SIVs. The propulsion system is composed with 1C4M. The results of propulsion system which have the excellent acceleration/deceleration and the jerk characteristics as well as starting ability on slope are taken through the field test.

#### 1.서론

90년대, GTO형 PWM 인버터와 유도전동기로 구성된 전동차용 추진 시스템이 국내에 도입되어 운행되었다. 그러나 반도체 소자의 특성한계로 인해 인버터의 성능 향상에 제한을 보여 왔다. 90년대 후반에는 IGBT형 추진장치를 탑재한 전동차가 등장하게 된다. 그런데 현재 우리 나라의 지하철 추진장치는 대부분이 GTO형 PWM 인버터로 구성되어 있고, 추진장치는 외국의 기술에 의존하여 운영되고 있다. 최근 전력소자의 발달로 대용량 IGBT가 등장하고, 새로운 개념의 교류 구동 시스템이 출현하게 되었다. 국내에서도 여러 기관에서 국산화 전동차에 관한 연구가 계속되어 왔다. 본 연구에서는 전동차용 IGBT형 VVVF 인버터 추진 제어장치와 관련 전장품에 대한 현차시험을 수행한 결과를 보인다. 현차시험은 서울시 지하철 6호선 선로에서 진행하였다.

#### 2. 6호선 현차시험 차량구성

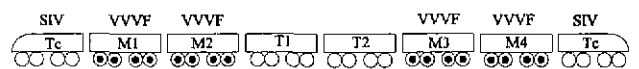


그림1 6호선 전동차의 시스템 구성도

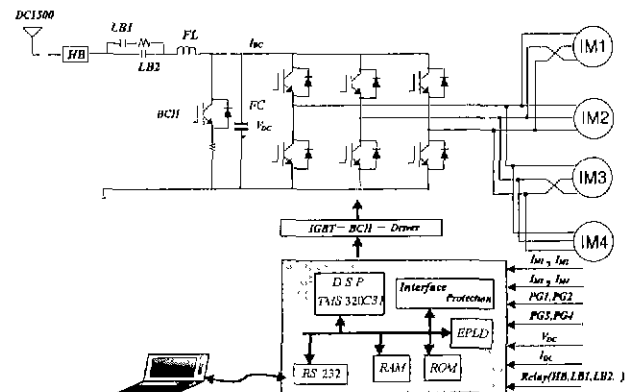


그림2 추진장치의 구성

시험차량은 그림1과 같이 4M4T의 8량 1편성으로 구성하였다. 전장품은 1.65MVA급 IGBT VVVF 인버터 4대, 190kVA급 2대의 보조전원장치 및 210kW 전동기 16대로 구성되었다. 그림2는 추진제어장치의 구성이다. 한 개의 인버터가 4개의 전동기(1C4M)를 병렬로 일괄제어하는 방식이다. 그림3은 시험차량의 모습이다. 그림4는 전동차에 취부한 IGBT형 VVVF인버터의 정면사진이다. 그림5는 Tc 차에 취부한 190kVA급의 IGBT형 SIV이다. 그림6은 M차에 취부된 210kW급의 견인전동기를 보인 것이다.

#### 3. 견인력 제어기법

현대고유 모델 추진시스템에 대한 견인력 제어기법으

로는 기존의 슬립주파수제어, SPWM 변조기법에서 발생 되는 여러 가지 문제점을 제거하기 위하여, 저주파 동기 과변조 방법 및 병렬운전 벡터제어기법을 적용하였다.



그림3 시험 전동차의 사진

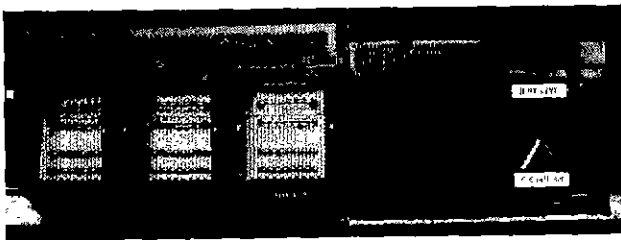


그림 4 IGBT VVVF 인버터(1650kVA)



그림 5 IGBT SIV(190kVA)

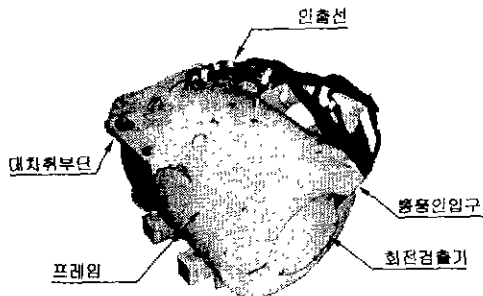


그림 6 견인전동기(210kW)

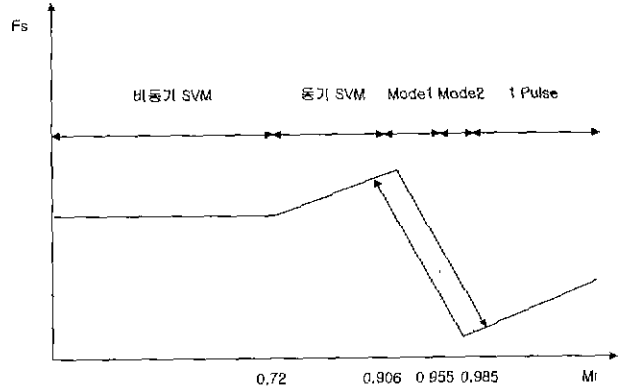


그림 7 제안된 저주파 동기 과변조 PWM 방법

### 3.1 저주파 동기 과변조 PWM 방법

스위칭 주파수가 수 kHz로 높은 과변조기법은 지금까지 많은 연구가 되어왔다.<sup>[1][2]</sup> 그러나 스위칭 주파수가 수 백 Hz로 제한되어 응용되는 전동차용 추진제어장치에 대해서는 음색 전압과 위상 오차 분이 발생되지 않는 새로운 저주파 동기 과변조 PWM 방법이 필요하게 된다. 본 논문에서는 전구간에서 공간전압벡터에 의한 단일화된 과변조 알고리즘을 사용하고 저주파 스위칭으로 가장 간략하게 구현할 수 있는 저주파 동기 PWM 방법을 그림7과 같이 사용하였다.<sup>[3][4]</sup>

### 3.2 병렬운전 벡터제어

최근 차량의 경량화 및 견인부의 단위 체적당 출력의 증대로 견인력 제어가 점차 한계에 부딪히는 경우가 빈번하다. 또한 구배 기동을 위한 역상 운전, 입력전압의 변화에 대한 출력제어성 향상과 가선측의 회생전력 수전 한계에 대한 회생량의 제한 제어특성 등 추진장치에 대한 요구도 많아졌다. 따라서 새로운 고성능의 견인력 제어기법이 필요하게 되었다. 본 논문에서는 이러한 요구조건을 충족하기 위해 견인력 제어기법으로 벡터 제어 기법을 적용하였다.<sup>[4][5]</sup>

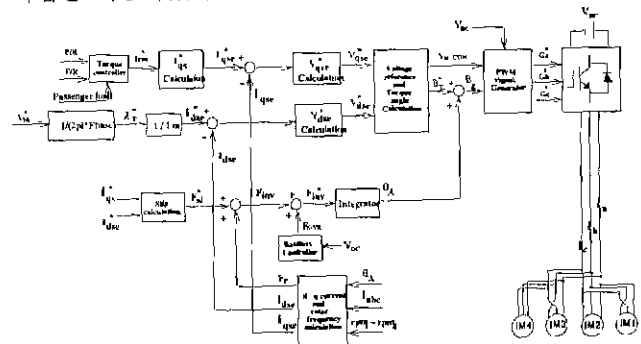


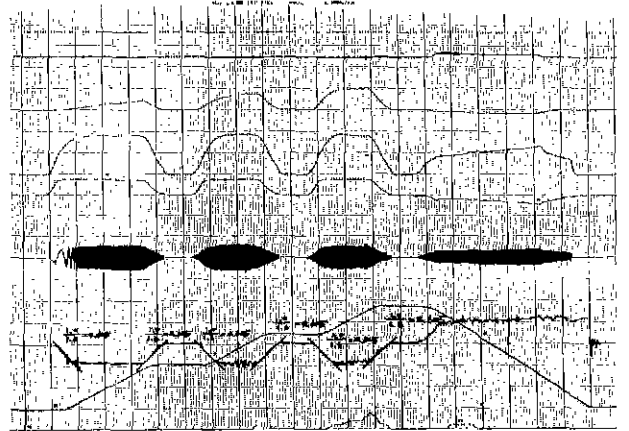
그림 8 추진장치의 견인력제어 블록다이어그램

비록 4병렬 운전으로 인해 완벽한 벡터 제어를 구현하기는 어렵지만 상기의 사항들은 주로 저속에서 나타나는 현상이며, 저속에서는 병렬 접속된 전동기의 동작점의

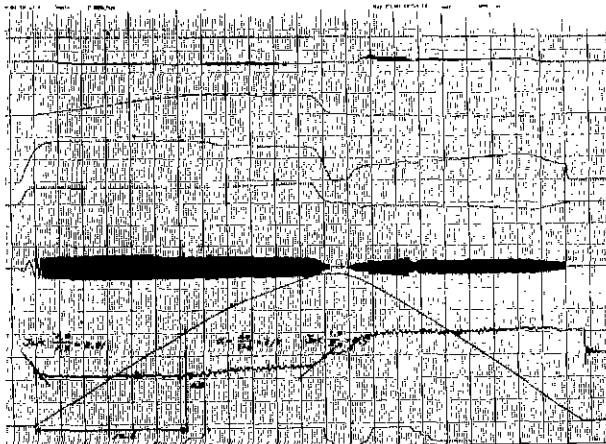
차이가 적으므로 벡터제어 특성을 충분히 얻을 수 있기 때문이다. 그림 8은 견인력 제어 블록도를 보인 것이다.

#### 4. 주행시험결과

앞에서 설명한 저주파 동기 과변조 PWM제어를 포함한 병렬운전 벡터제어기법을 6호선 전동차에 적용하여 4개 편성차량이 동시에 운행되는 조건에서 주행시험을 하였다. 인버터의 성능은 가속능력, 감속능력, 승차감(Jerk) 및 구배 동판능력으로 판단된다. 그리고 회생시 가선전압 변동에 대하여 빠르게 응답하여 가선전압 상승 제한치를 초과하지 않도록 출력전류를 제한하는 제어가 중요시된다. 시험은 정상상태에서 PWM제어과 병렬 운전 벡터제어의 우수성 및 가감속 능력을 확인하기 위한 정격 가감속 운전, 회생 경부하와 회생부하 변동시 제동특성 및 구배기동 등에 대해 시험을 수행하였다.

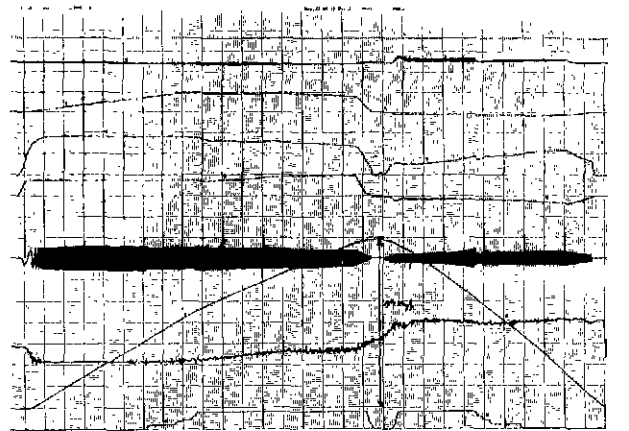


①가선전압 [1000V/div] ②필터전압 [1000V/div] ③가선입력전류[600A/div]  
 ④실효전류 [300A/div] ⑤슬립주파수 [1.25Hz/div] ⑥순시전류 [3000A/div]  
 ⑦가/감속도 [1m/s<sup>2</sup>/div] ⑧차량속도 [10km/h/div] ⑨PWM Mode  
 그림 11 역행노치 온·오프 시험(4N→off→4N)



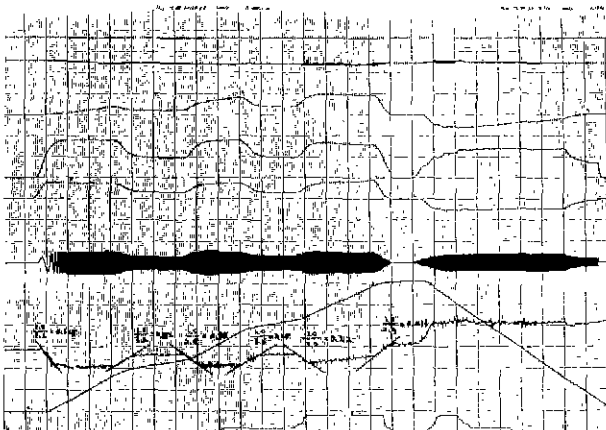
①가선전압 [1000V/div] ②필터전압 [1000V/div] ③가선입력전류[600A/div]  
 ④실효전류 [300A/div] ⑤슬립주파수 [1.25Hz/div] ⑥순시전류 [3000A/div]  
 ⑦가/감속도 [1m/s<sup>2</sup>/div] ⑧차량속도 [10km/h/div] ⑨PWM Mode

그림 9 가속도 시험



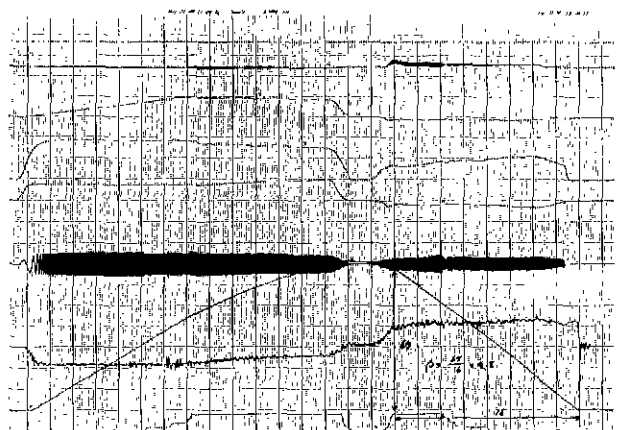
①가선전압 [1000V/div] ②필터전압 [1000V/div] ③가선입력전류[600A/div]  
 ④실효전류 [300A/div] ⑤슬립주파수 [1.25Hz/div] ⑥순시전류 [3000A/div]  
 ⑦가/감속도 [1m/s<sup>2</sup>/div] ⑧차량속도 [10km/h/div] ⑨PWM Mode

그림 12 최고속도 시험



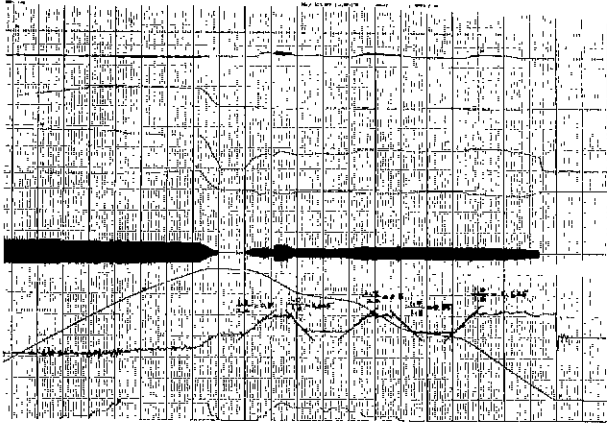
①가선전압 [1000V/div] ②필터전압 [1000V/div] ③가선입력전류[600A/div]  
 ④실효전류 [300A/div] ⑤슬립주파수 [1.25Hz/div] ⑥순시전류 [3000A/div]  
 ⑦가/감속도 [1m/s<sup>2</sup>/div] ⑧차량속도 [10km/h/div] ⑨PWM Mode

그림 10 역행노치 변경 시험(4N→1N→4N)



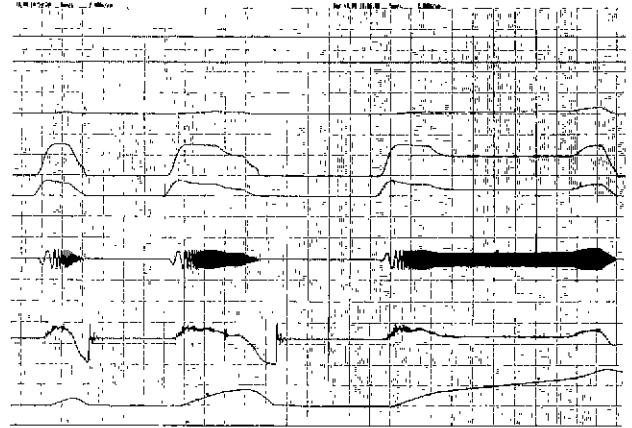
①가선전압 [1000V/div] ②필터전압 [1000V/div] ③가선입력전류[600A/div]  
 ④실효전류 [300A/div] ⑤슬립주파수 [1.25Hz/div] ⑥순시전류 [3000A/div]  
 ⑦가/감속도 [1m/s<sup>2</sup>/div] ⑧차량속도 [10km/h/div] ⑨PWM Mode

그림 13 감속도 시험



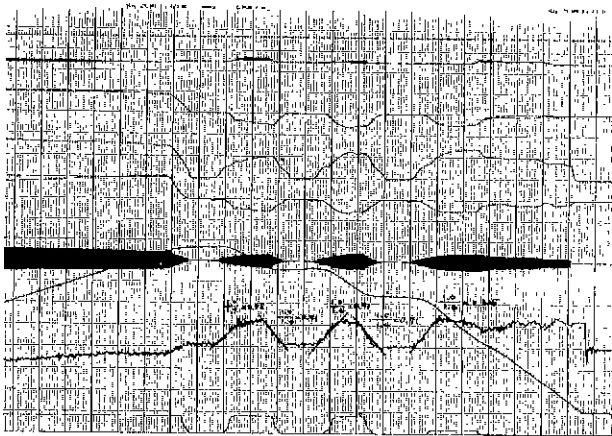
①가선전압 [1000V/div] ②필터전압 [1000V/div] ③가선입력전류[600A/div]  
 ④실효전류 [300A/div] ⑤슬립주파수 [1 25Hz/div] ⑥순시전류 [3000A/div]  
 ⑦가/감속도 [1m/s<sup>2</sup>/div] ⑧차량속도 [10km/h/div] ⑨PWM Mode

그림 14 제동 스텝 변경시험(7S→1S→7S)



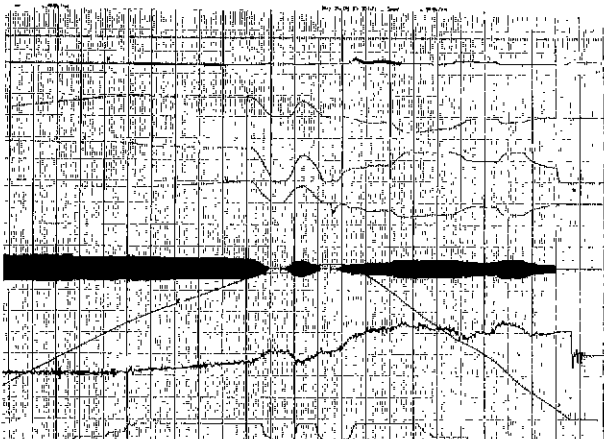
①가선전압 [1000V/div] ②필터전압 [1000V/div] ③가선입력전류[600A/div]  
 ④실효전류 [300A/div] ⑤슬립주파수 [1 25Hz/div] ⑥순시전류 [3000A/div]  
 ⑦가/감속도 [1m/s<sup>2</sup>/div] ⑧차량속도 [10km/h/div] ⑨PWM Mode

그림 17 구배 기동시험(33% 상구배)



①가선전압 [1000V/div] ②필터전압 [1000V/div] ③가선입력전류[600A/div]  
 ④실효전류 [300A/div] ⑤슬립주파수 [1.25Hz/div] ⑥순시전류 [3000A/div]  
 ⑦가/감속도 [1m/s<sup>2</sup>/div] ⑧차량속도 [10km/h/div] ⑨PWM Mode

그림 15 제동 스텝 온·오프 시험(7S→off→7S)



①가선전압 [1000V/div] ②필터전압 [1000V/div] ③가선입력전류[600A/div]  
 ④실효전류 [300A/div] ⑤슬립주파수 [1 25Hz/div] ⑥순시전류 [3000A/div]  
 ⑦가/감속도 [1m/s<sup>2</sup>/div] ⑧차량속도 [10km/h/div] ⑨PWM Mode

그림 16 회생시 회생부하변동시험

그림 9는 정상 가속 운전 특성을 보이고 있다. 시속 65km/h 까지 가속후 타행으로 운전 64km/h에서 최대 감속 하였다. 가속도가 속도 0~40km/h 까지 3.17km/h/s 이고, 출발시 찌크는 0.71m/s<sup>3</sup>, 노치 오프시 찌크는 0.5m/s<sup>3</sup>로 가속도 3.0km/h/s이상과 찌크(jerk) 0.8m/s<sup>3</sup> 이하의 차량 성능 사양을 모두 만족하면서 PWM모드 절체도 부드럽게 됨을 확인 할 수 있다.

그림 10은 역행 노치변화시(4N→1N→4N→1N→4N→1N) 승객이 느끼는 승차감에 대한 찌크 시험으로 그림에서 보듯이 모두 찌크가 기준치인 0.8m/s<sup>3</sup>이하 안에 있음을 확인 할 수 있다.

그림 11은 역행 노치 온·오프시(4N→off→4N→off→4N→off) 승객이 느끼는 승차감에 대한 찌크 시험으로 그림에서 보듯이 모두 찌크가 기준치인 0.8m/s<sup>3</sup>이하 안에 있음을 확인 할 수 있다.

그림 12는 최고속도 시험이다. 지하철 상업운전 최고 속도인 80km/h 선로구간에서 79km/h까지 시험하였다. 80km/h이상내면 ATC FSB가 걸리기 때문에 79km/h까지만 시험하였다.

그림 13은 회생 경부하시 감속도를 측정된 결과이다. 감속도가 4.18km/h/s로 기준치인 3.5km/h/s이상을 만족하고 있다. 시험시 4개의 편성차량이 시험선로에 있었지만 회생부하를 소비하는 차가 적었기 때문에 출력전류를 콘덴서전압이 1750V를 넘지 않도록 제한했다.

그림 14는 회생 스텝 변화시 (7S→1S→7S→1S→7S) 승객이 느끼는 승차감에 대한 찌크 시험으로 그림에서 보듯이 모두 찌크가 기준치인 0.8m/s<sup>3</sup>이하 안에 있음을 확인 할 수 있다. 또한 그림14는 회생 경부하에 대한 찌크 변화시험이 되었다.

그림 15는 회생 스텝 온·오프시(7S→off→7S→off→7S) 승객이 느끼는 승차감에 대한 찌크 시험으로 그림에서 보듯이 모두 찌크가 기준치인 0.8m/s<sup>3</sup>이하 안에 있음

을 확인 할 수 있다. 또한 그림15은 회생부하 변동에 대한 찌크 변화시험이 되었다.

그림 16은 회생 제동시 회생부하변동시험이다. 시속 73km/h에서 제동 7스텝 명령을 주었다. 회생전력을 소비 시켜주는 차량이 시속 60km/h지점에서 발생했다가 시속 40km/h지점에서 없다가 다시 시속 28km/h지점에서 다시 발생하여 회생전력을 소비시켜 주었다. 회생부하변동에 대하여 가선전압 제한치를 초과하지 않도록 출력전류를 제한하는 제어가 잘 동작함을 확인 할 수 있었다. 주행 시험시 회생제동은 경부하 또는 회생부하변동이 주를 이루는 과도상태가 계속해서 발생하였다.

그림 17은 구배 등판능력 시험이다. 구배가 33%인 경사면에서 역행 1노치로 차량을 기동하여 시속 3km/h지점에서 노치 오프 후 차량이 뒤로 밀리는지 시험을 한 후 다시 1노치로 기동하여 시속 8km/h지점에서 다시 노치 오프 하여 역시 차량이 밀리는 지를 시험 한 후 다시 1노치로 기동하여 구배 등판능력을 시험하였다. 최소 1노치 에서도 33%인 경사면을 차량이 뒤로 밀리지 않으면서 기동함을 확인 할 수 있었다.

이상과 같이 8량 4개 편성 차량이 동시에 운행되는 6호선 주행선로에서 외국제품의 차량과 같이 주행시험을 실시한 결과 차량이 우수한 성능을 발휘하는 것을 확인 할 수 있었다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 현대고유모델 전동차에 IGBT형 VVVF 인버터를 채택하여, 이미 자사에서 제시한 저주파동기 PWM방법과 병렬운전 벡터제어기법을 적용하여, 4개 편성의 차량이 동시에 운행되는 시험선로에서 상업영업 운전시 발생하는 가선전압의 변동, 선로의 구배 조건, 회생제동시 다른 차량의 회생제동으로 인한 가선전압의 급변 및 완전 상태에 대하여 주행시험을 하였다. 상업 영업 운전에서 발생 될 수 있는 모든 상태에서 안정적인 가속 특성과 승차감이 차량의 성능 사양조건을 만족함을 확인 할 수 있었다. 이로써 국산화된 전동차량을 독자적으로 완성 할 수 있었다. 그러므로 추가로 건설되는 지하철에 국산화된 추진제어장치를 적용 할 수 있고, 현재 운행중인 지하철의 추가 물량에도 국산화된 추진시스템을 납품 할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 주행시험을 통하여 확보된 추진제어장치 견인력 제어 기술은 경전철 및 현재 국책과제로 진행중인 고속전철의 추진시스템 개발에도 적용되어 큰 도움이 될 것으로 본다.

## 참 고 문 헌

[1] J.Holtz, W.Lotzat, and A.M. Hhambadkone, "On Continuous Control of PWM Inverter in the Overmodulation Range Including the Six-step

Mode", *Trans. IEEE. on PE*, Vol. 8, No.4, pp.546-553, 1993.

- [2] 이지명, 이동춘, 최종우, "PWM인버터의 과변조 제어 기법", *Trans. KIEE*. Vol.46, No.5., pp712-719, 1997.5.
- [3] K.J. Lee, M.K. Jeong, L.S. Bang, K.D. Seo, N.H.Kim, "A Study on the High Performance PWM Technique for a Propulsion System of Railway", *Proceedings ICPE'98*, pp425-430, 1998.
- [4] 정만규, 서광덕, "관성부하를 이용한 전동차 추진용 VVVF 인버터의 모의주행 및 과도상태시험". *전력 전자학회 논문지*, 제4권, 제6호, pp491~499, 1999.12.
- [5] D.W.Novotny and T.A.Lipo, *Vector Control of Dynamics of AC Drives*, Oxford University Press Inc., New York, pp257-268.