

## 도시철도차량 추진제어장치 전력변환 소자 혼용 운용에 관한 연구 Study on the power conversion element mixed operation of the propulsion control system of urban rail vehicle

이상오\*<sup>†</sup>, 구정서\*, 한성호\*\*, 김태도\*\*\*, 김주태\*\*\*, 고윤권\*\*\*, 임동원\*\*\*\*

Sang Oh Lee\*<sup>†</sup>, Jeong Seo Koo\*, Seong Ho Han\*\*, Tae Do Kim\*\*\*, Joo Tae Kim\*\*\*, Yun Gwon Go\*\*\*,

Dong Won Lim\*\*\*\*

**Abstract** In Seoul Metro. Researching VVVF train of Line 4 by HYUNDAI what Changing and Applying State power conversion device IGBT of propulsion control device C/I from GTO. At initial we got a result when installed IGBT mixed GTO that was lack of traction from to imbalance of Output current between applied Type of IGBT(1-car) to applied Type of GTO(4-car). This phenomenon. two kinds of response performance of the IGBT Inverter vehicle to the controller Switching signal for driving the existing GTO Inverter differences in the operating characteristics of the power element is grasped that there is cause to appear unlike GTO car It was. To make balance with two power device when installed IGBT mixed GTO at one train. we installed interface board between the controller because matching the response performance to be generated between the vehicle when the mixed use one train. As a result. to ensure the GTO Type and IGBT Type vehicle between the uniform Switching response performance to verify its compatibility for mixed use. when the train service. was to maintain the normal operating performance and comfortable ride.

**Keywords** : Propulsion control system, Inverter, VVVF, GTO, IGBT

**초 록** 서울메트로에서는 4 호선 현대 VVVF 전동차 추진제어장치인 C/I 장치의 주 전력 변환소자를 GTO 에서 IGBT 로 변경하여 현차에 적용하는 연구가 진행 중으로 연구 초기 전동차에 혼용 설치하여 시험한 결과 IGBT Type 을 적용한 해당 차호(1 량)에서 GTO Type 이 적용되어 있는 타 차호(4 량)와 출력 전류 불균형으로 견인력 부족 현상이 발생하였다. 이러한 현상은 2 종류 전력소자의 동작 특성 차이로 기존 GTO Inverter 를 구동시키는 제어기 Switching 신호에 대해 IGBT Inverter 차량의 응답성능이 GTO 차량과 다르게 나타나는데 원인이 있는 것으로 파악되었다. 2 가지 전력소자를 1 편성 전동차에 혼용 사용하였을 때 차량간 발생 되는 응답성능을 맞추기 위해 IGBT 적용 차량에 제어기와 GDU 간 인터페이스 보드를 제작 설치하여 시험하였으며, 그 결과 GTO Type 과 IGBT Type 차량간 동등한 Switching 응답성능을 확보하며 혼용사용에 대한 호환성을 확인하였고 전동차 운행 시 정상적인 운행 성능과 편안한 승차감을 유지하도록 하였다.

**주요어** : 추진제어장치, 인버터, VVVF, GTO, IGBT

### 1. 서 론

1990년대 초 서울메트로 4호선 전동차에 처음 도입되어 타 도시철도 운영기관에서도 상당수 보유, 운행되고 있는 GTO(Gate Turn-off Thyristor) Type의 VVVF(Variable Voltage

Variable Frequency) 추진제어장치는 약 20년 이상의 장기사용에 따른 장치 노후화로 고장이 증가하고 있는 추세이다. 이에 도시철도 운영기관에서는 IGBT(Insulated gate bipolar mode transistor) 소자가 적용된 추진제어장치로 시스템 개량을 순차적으로 진행하고 있으나 시스템 교체 비용이 높아 예산반영에 어려움을 겪고있다. 현재 서울메트로에서는 4호선 현대VVVF 전동차 GTO Type의 추진제어장치를 IGBT Type으로 반도체유니트를 제작하여 실용화 하는 연구가 진행 중이다. 본 연구는 IGBT C/I STACK을 기존 GTO Type과 구조적/회로적으로 호환이 가능하도록 제작하여 기존 GTO Type 제어기를 그대로 활용하며 IGBT STACK 개발품을 전동차에 량단위로 교체하였을 때 GTO Type과 IGBT Type의 Inverter 추진제어장치를 한 편성에서 혼용사용이 가능하도록 실용화 하는 연구이다.

연구초기 IGBT STACK 제작품을 전동차에 혼용 적용하여 시험한 결과 IGBT Type을 적용한 해당 차호(1량)에서 GTO Type이 적용되어 있는 타 차호(4량)와 출력 전류 불균형으로 IGBT를 적용한 해당차량에서 견인력 부족에 의한 차량 떨림 현상이 발생하며 추진을 하지 못하는 현상이 발생하였다. 이러한 현상은 전동차 1개편성에 취부한 2종류 전력소자의 동작 특성 차이로 기존 GTO Inverter를 구동시키는 제어기 Switching Pulse에 대해 IGBT 차량의 응답성능이 GTO차량과 다르게 나타나는데 원인이 있는 것으로 파악되었다. 이것은 단순히 전력소자를 GTO에서 IGBT로 변경하는 것이 아니라 각 전력소자의 특성을 파악하여 동일한 응답성능이 발휘되도록 하는 것이 이 연구과제의 핵심 사항이다.

서로 다른 전력소자의 응답특성을 동등하게 맞추기 위해 IGBT 차량에 기존 제어기에서 출력되는 Switching Pulse를 변환하여 IGBT소자를 GTO소자와 동등한 응답성능이 되도록 제어기와-GDU(Gate Drive Unit)간에 인터페이스 보드를 제작하여 설치하였다. 인터페이스 보드는 CPLD(CMOS Programmer Logic Device)를 사용하여 프로그램 작업으로 제어기 Switching 입력 신호에 대해 출력신호의 시간을 변환하여 GTO방식 차량과 동등한 응답특성을 갖도록 하였다. 입력신호 및 출력신호는 광으로 송수신 될 수 있도록 하여 전기적으로 절연되어 있으며 IGBT의 구동 드라이브 판넬인 GDU(Gate Drive Unit)로부터 장치의 상태를 수신하여 불량이 발생할 경우 제어기 Switching 전체 신호를 인터페이스보드에서 차단하여 IGBT 소자를 보호 할 수 있는 기능을 적용하였다.

이 연구개발로 추진제어장치를 량단위로 교체가 가능하여 예비품 활용 등 운용적 측면에서 효과적이며 1개편성에 적용 시 추진제어장치 시스템 전체를 교체하는 비용대비 약1/3정도의 비용으로 개량이 가능하여 전동차 내구연한 40년 연장에 따라 안정적인 유지보수를 고려하는 도시철도 운영기관 측면에서 효율적인 대안 방안이 될 것이다.

---

† 교신저자: 서울과학기술대학교([joeun5@seoulmetro.co.kr](mailto:joeun5@seoulmetro.co.kr))

\* 서울과학기술대학교

\*\* 한국철도기술연구원

\*\*\* 서울메트로

\*\*\*\* (주)이건산전 기술연구소

## 2. 본 론

### 2.1 전력소자의 특성 비교

#### 2.1.1 GTO(Gate Turn Off Thyristor)의 특성

GTO는 게이트에 역방향의 전류를 흐르게 하여 Turn off 할 수 있는 기능을 가진 사이리스터로서 주로 유도 전동기 구동용 PWM 제어 VVVF Inverter, SIV(보조전원장치) 등에 사용된다. GTO는 turn off 했을 때 Anode와 Cathode간에 일시적으로 발생하는 스파이크 전압을 완화하기 위한 다이오드, 저항기, 콘덴서를 이용한 부가회로(스너버 회로)가 반드시 필요하고, 그 때문에 주변회로가 복잡해진다.

Turn off 후 Anode와 Cathode간의 전압이 완전히 안정될 때 까지의 시간(테일 시간)이 IGBT에 비해 길기 때문에 스위칭 주파수를 높이기 어렵다. 즉 스위칭에 의한 소음이 IGBT에 비해 상대적으로 크게 들린다.

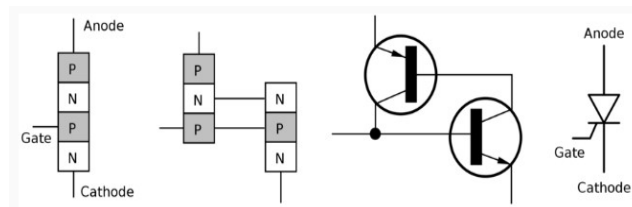


Fig.1 GTO Thyristor Inner circuit

사이리스터는 Gate가 존재하는 P형 반도체에 전류를 흘려주게 되면 NPN 트랜지스터가 작동을 하며, NPN 트랜지스터에 의해 PNP 트랜지스터가 작동을 한다. 이 후 PNP 트랜지스터에 의해 NPN 반도체 베이스에 전원이 계속 공급 되므로 베이스에 전원을 꺼도 계속 자기 유지를 하여 모든 트랜지스터가 작동을 한다. 다만, 직류 전원에서 스위칭이 필요한 경우 베이스에 전원을 차단할 수 있게 한 사이리스터가 GTO이다.

Turn off하기 위한 게이트 전류가 수분의 1정도로 크고, 게이트 전류가 전부 열 손실이 되기 때문에 소비전력이나 발열이 커지는 단점이 있다.

또한 스위칭에 의한 Turn on/off time이 IGBT에 비해 길기 때문에 열 손실이 크다.

아래 표는 현재 4호선 현대VVVF 전동차에 사용되고 있는 GTO 소자의 데이터시트이다.

Table 1 GTO(FG3000DV-90DA) Electrical Characteristics

ELECTRICAL CHARACTERISTICS						
Symbol	Parameter	Test conditions	Limits			Unit
			Min	Typ	Max	
V <sub>TM</sub>	On-state voltage	T <sub>j</sub> = 125°C, I <sub>TM</sub> = 3000A, Instantaneous measurement	—	—	4.0	V
I <sub>IRM</sub>	Repetitive peak reverse current	T <sub>j</sub> = 125°C, V <sub>IRM</sub> Applied	—	—	300	mA
I <sub>ORM</sub>	Repetitive peak off-state current	T <sub>j</sub> = 125°C, V <sub>ORM</sub> Applied, V <sub>GK</sub> = -2V	—	—	150	mA
I <sub>RG</sub>	Reverse gate current	T <sub>j</sub> = 125°C, V <sub>RG</sub> = 17V	—	—	300	mA
dv/dt	Critical rate of rise of off-state voltage	T <sub>j</sub> = 125°C, V <sub>D</sub> = 2250V, V <sub>GK</sub> = -2V	1000	—	—	V/μs
t <sub>gt</sub>	Turn-on time	T <sub>j</sub> = 125°C, I <sub>TM</sub> = 3000A, I <sub>GM</sub> = 40A, V <sub>D</sub> = 2250V	—	—	10	μs
t <sub>gt</sub>	Turn-off time	T <sub>j</sub> = 125°C, I <sub>TM</sub> = 3000A, V <sub>GM</sub> = 3375V, dI <sub>G</sub> /dt = -40A/μs V <sub>RG</sub> = 17V, C <sub>S</sub> = 6.0μF, L <sub>S</sub> = 0.3μH	—	—	30	μs
I <sub>GOM</sub>	Peak gate turn-off current	—	—	670	—	A
V <sub>GT</sub>	Gate trigger voltage	DC METHOD : V <sub>D</sub> = 24V, R <sub>t</sub> = 0.1Ω, T <sub>j</sub> = 25°C	—	—	1.5	V
I <sub>GT</sub>	Gate trigger current	—	—	—	4000	mA
R <sub>th(j-c)</sub>	Thermal resistance	Junction to fin	—	—	0.015	°C/W

GTO의 turn on time은 최대 10μs이고 turn off time은 최대 30μs이다.

### 2.1.2 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)의 특성

IGBT는 Power-MOSFET의 고속 스위칭 특성을 가진 양극성 트랜지스터이며 고내압, 높은 도통 특성을 가진 전력 반도체소자로 Power transistor와는 달리 열적 부정 현상을 갖고 있지 않아 2차 항복이라는 안전 동작 영역상의 문제가 발생하지 않는 특징이 있다. 또한 소수 carrier의 축적 효과가 없기 때문에 스위칭 특성이 우수하며 허용 접합 온도가 높다. 더욱이 Gate가 절연되어 있어 입력 임피던스가 높아 전압 제어형 Drive가 가능하므로 회로가 간단화 된다. IGBT의 turn on은 gate에 정(+)의 Pulse전압을 부여하는 것에 의해 channel을 형성시켜 PNP Transistor의 Base에 전류가 공급되어 도통상태로 되고 turn off는 gate에 신호전압이 제거되면 channel이 소멸되어 차단상태의 동작이 된다. IGBT의 Turn on/off시간이 GTO에 비해 훨씬 짧아서 고속 스위칭이 가능하며 GTO에 비해 스위칭에 의한 열 손실이 적다.

Table 2 IGBT(MBN1500E33E2) Electrical Characteristics

ELECTRICAL CHARACTERISTICS						
Item	Symbol	Unit	Min.	Typ.	Max.	Test Conditions
Collector Emitter Cut-Off Current	$I_{CES}$	mA	-	-	12	$V_{CE}=3.300V, V_{GE}=0V, T_J=25^{\circ}C$
Gate Emitter Leakage Current	$I_{GEL}$	nA	-500	-	60	$V_{CE}=3.300V, V_{GE}=0V, T_J=25^{\circ}C$
Collector Emitter Saturation Voltage	$V_{CE(sat)}$	V	2.5	2.95	3.5	$I_C=1.500A, V_{GE}=15V, T_J=25^{\circ}C$
Gate Emitter Threshold Voltage	$V_{GE(th)}$	V	5.5	6.3	7.5	$V_{CE}=10V, I_C=1.500mA, T_J=25^{\circ}C$
Input Capacitance	$C_{ies}$	nF	-	195	-	$V_{CE}=10V, V_{GE}=0V, f=100kHz, T_J=25^{\circ}C$
Internal Gate Resistance	$R_{ge}$	$\Omega$	-	1.3	-	$V_{CE}=10V, V_{GE}=0V, f=100kHz, T_J=25^{\circ}C$
Switching Times	Rise Time	$t_r$	1.6	2.0	2.6	$V_{CC}=1.650V, I_C=1.500A, L_S=100nH, R_G=2.7\Omega, CGE=330nF, V_{GE}=\pm 15V, T_J=125^{\circ}C$
	Turn On Time	$t_{on}$	2.0	3.0	3.5	
	Fall Time	$t_f$	0.9	1.7	2.6	
	Turn Off Time	$t_{off}$	2.7	4.4	5.5	
Peak Forward Voltage Drop	$V_{FM}$	V	2.2	2.6	3.0	$I_F=1.500A, V_{GE}=0V, T_J=125^{\circ}C$
Reverse Recovery Time	$t_{rr}$	$\mu s$	0.2	0.8	1.2	$V_{CC}=1.650V, I_F=1.500A, L_S=100nH, T_J=125^{\circ}C$
Turn On Loss	$E_{on(10\%)}$	J/P	-	2.9	3.6	$V_{CC}=1.650V, I_C=1.500A, L_S=100nH, R_G=2.7\Omega, CGE=330nF, V_{GE}=\pm 15V, T_J=125^{\circ}C$
	$E_{on(full)}$	J/P	-	3.2	-	
Turn Off Loss	$E_{off(10\%)}$	J/P	-	2.2	2.6	$V_{CC}=1.650V, I_C=1.500A, L_S=100nH, R_G=2.7\Omega, CGE=330nF, V_{GE}=\pm 15V, T_J=150^{\circ}C$
	$E_{off(full)}$	J/P	-	2.4	-	
Reverse Recovery Loss	$E_{rr(10\%)}$	J/P	-	1.4	1.9	$V_{CC}=1.650V, I_F=1.500A, L_S=100nH, T_J=125^{\circ}C$
	$E_{rr(full)}$	J/P	-	1.7	-	

IGBT의 turn on time은 최대  $3.5\mu s$ , turn off time은 최대  $5.5\mu s$ 이다.

### 2.1.3 GTO와 IGBT 특징 비교

Table 3 GTO & IGBT characteristics comparison

구분	GTO	IGBT	
명칭	Gate Turn-off Thyristor	Insulated Gate Bipolar Transistor	
형상			
정격	4500V/3000A	3300V/1500A	
소자구성	자기소호형 Thyristor	FET + Transistor	
스위칭주파수	Max. 500Hz	Max. 2kHz	
특징	보호기능	없음	없음(별도보호회로 필요)
	취부성	복잡	나사를 이용한 간단취부
	구조 및 용량	복잡/중량	단순/경량
	유지보수성	불편(Stack조립장치 필요)	간편(현장조치 가능)
	취부시 절연	별도 절연소재 필요	자체 절연
	병렬접속	복잡	간단

## 2.2 인터페이스 보드의 기능

### 2.2.1 인터페이스 보드의 구성

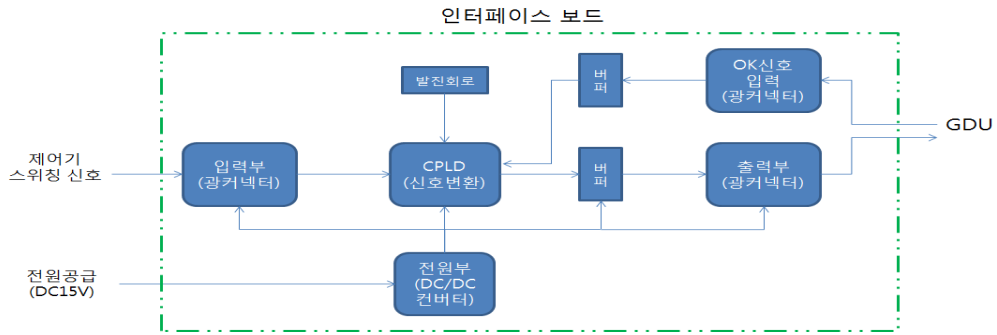


Fig.2 Interface Board Block Diagram

### 2.2.2 인터페이스 보드의 동작

인터페이스 보드는 제어기의 Switching Pulse를 입력으로 지연시간을 주어 Switching Pulse의 주기를 변형하여 출력, IGBT Drive Panel인 GDU에 송신하도록 한다.

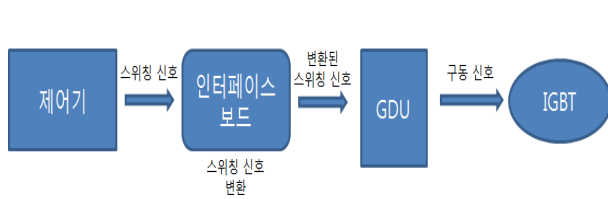


Fig.3 Interface Board movement Diagram

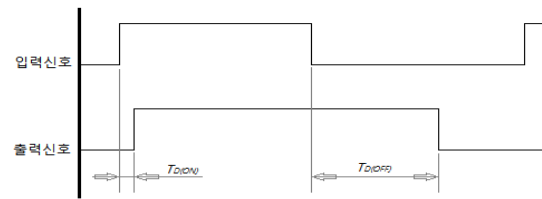


Fig.4 Interface Board Input signal delay Output

제어기의 입력신호가 ON상태가  $T_{D(ON)}$  지연시간 후 출력 신호가 ON 상태가 되며 입력신호가 Off상태가 되면  $T_{D(OFF)}$  지연시간 후 출력 신호가 Off되도록 한다.

### 2.2.3 인터페이스 보드를 적용한 IGBT 소자의 동작과 GTO의 동작비교

현차에서 추진제어장치 시스템에서의 GTO 소자 동작을 확인한 결과 아래의 파형과 같이 기동신호가 off되어도 GTO의 Turn off 시간과 테일 시간에 의해 Van전압이 바로 off 되지 않고 일정시간의 통전상태를 보인다.

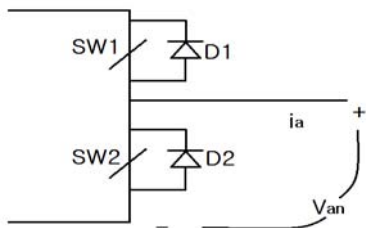


Fig.5 Arm Constant output circuit

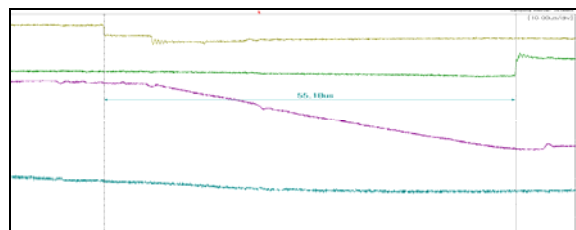


Fig.6 GTO constant output waveform

위의 파형과 동일하게 IGBT의 동작을 확인한 결과를 보면 Van전압 파형이 바로 off되어 통전시간이 GTO에 비해 짧다.

기존 제어기에서 출력되는 Switching 신호에 대해 GTO 차량과 IGBT 적용 차량에서 동등한 출력을 맞추기 위해서 IGBT 차량에 추가 설치한 인터페이스 보드에서 On/Off Delay Time을 조정하며 U상-X상의 상간 동작시간(Dead Time)을 맞춤으로서 GTO 차량 성능과 동일한 결과를 얻어 차량의 견인력을 맞출 수 있게 하였다. 아래의 파형은 인터페이스 보드에 On/Off을 적용한 후 상간 스위칭 신호에 대한 IGBT의 Van전압을 나타내었다.

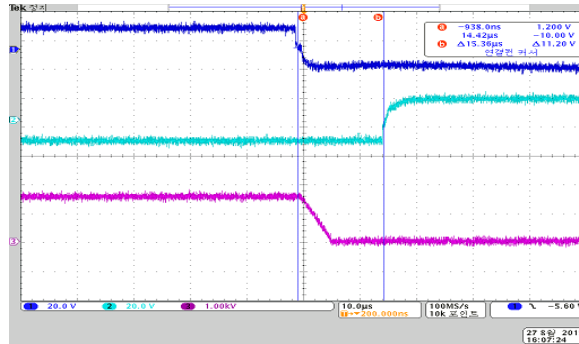


Fig.7 IGBT constant output wave (Dead time 15µs with d delay time of the Interface B/D)

### 2.3 본선시험 운영을 통한 데이터 비교측정

아래 그림과 같이 GTO C/I STACK(4량)과 IGBT C/I STACK(1량)으로 시험전동차를 구성하여 4호선 본선 구간에서의 시운전 시험을 통해 FC전압, U상 출력전류, 진동가속도(JERK)에 대한 비교데이터를 측정하였다.

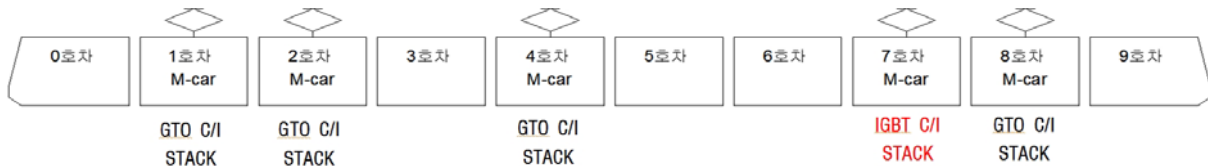


Fig.8 The configuration of the train

본선 시운전 시험에서 dead time은 약10µs를 적용하였다.

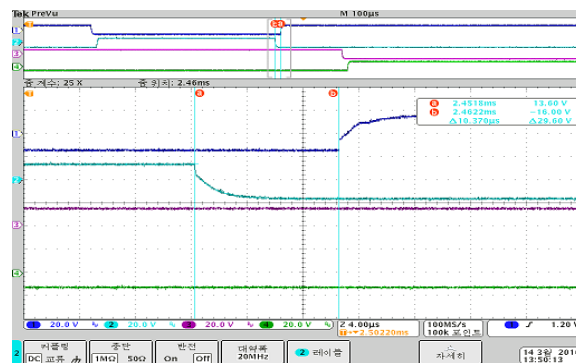


Fig.9 IGBT dead time adjustment via the Interface B/D

아래의 그림은 본선 시운전에서 진동가속도(JERK)를 비교 측정한 결과 GTO 차량과 IGBT 차량의 진동가속도(JERK)가 동일하게 규정치  $8.0m/s^3$  이하에 만족한 결과이며 차량의 승차감 또한 상당히 안정적임을 확인하였다.

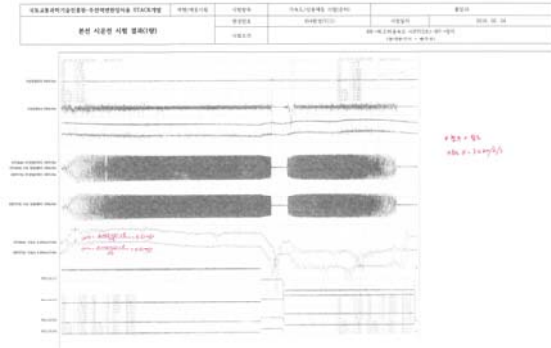


Fig.10 Mains commissioning measured waveform

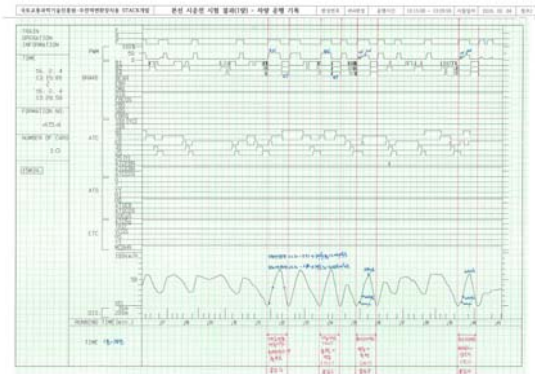


Fig.11 Train service record

### 3. 결론

본 연구를 통해 GTO 방식의 VVVF 전동차 1편성에 기존 GTO Type(4량)과 개발품 IGBT Type(1량)을 혼용으로 설치하여 국내 최초로 본선시험운행을 통해 호환성을 검증하였고 2개월간의 본선 영업운행을 통해 전력변환 소자 혼용사용에 대한 신뢰성을 확보하였다.

또한 IGBT C/I (Converter/Inverter) STACK 및 구성장치 1편성분을 제작하여 기존 GTO 방식 제어기와의 호환성을 편성단위로 검증하기 위해 동력차량 5량에 모두 적용하여 현차검증 및 본선시험운행을 시행하여 양호한 운영성능을 확인하였다.

본 연구결과는 노후화된 GTO 방식의 추진제어장치를 IGBT 전력반도체 소자를 사용한 제작품에 대해 기존 GTO 방식 제어기와의 량단위 호환성 확인 및 편성단위로 적용하여 실용화를 검증 함으로서 도시철도 운영기관에서 노후화된 GTO방식의 추진제어장치 유지보수를 위해 전체 시스템을 막대한 비용으로 교체하는 유지보수 방식에 효율적인 대안이 될 것으로 기대한다.

### 참고문헌

[1] 서울메트로, 4호선 현대 AVD 정비지침서(1993), 서울메트로