

서울시 지하철 인버터 전기차

정수영*, 김양모**
 (*서울시지하철공사 차량부
 **충남대 공대 전기공학과 교수)

1. 머릿말

서울시 지하철에서는 서울의 북단 당고개역으로부터 도심을 지나 과천, 안산을 잇는 총연장 64.4km의 지하철 4호선을 완공 개통하였다. 일명 과천선이라고도 알려진 4호선은 드림랜드와 젊은이의 광장 대학로, 서울시민의 휴식공간인 한강, 관악산, 서울 대공원, 반월공단등을 연결하고 있으며 철도청의 과천선과 상호 같은 선로를 이용하고 있다. 서울시의 지하철은 1호선의 직류전동기 구동 저항제어차를 시작으로 2호선 이후에는 초퍼제어차가 주종을 이루어 왔으나 금번 개통된 4호선에서는 VVVF인버터 제어에 위한 유도전동기 구동 전기차를 투입하였다.

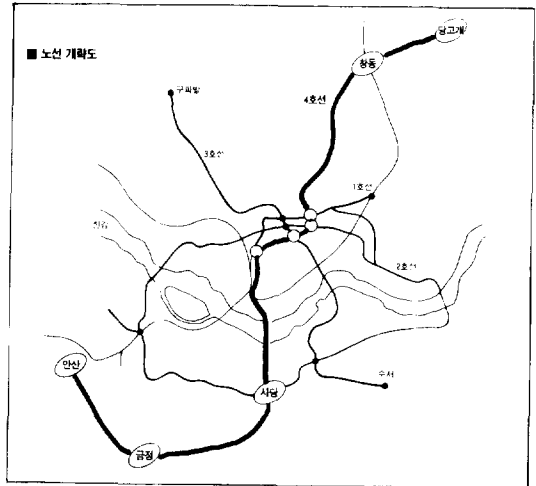


그림 2. 과천선 노선도

정류자를 갖지 않은 전동기로 구동되는 전기차는 일찌기 19세기 말부터 특수용도로 실용화 되었지만 일반 전기차로서의 본격적인 개발은 power electronics 기술발달에 힘입어 1976년에 독일에서 탄광운반용으로 등장되었고 더욱 활발한 실용화는 1980년 초반 일본에서 비롯되었다[1-2].

본 해설에서는 최근 개통된 서울 지하철 4호선에 투입된 우리나라 초유의 인버터 전기차를 소개하기로 한다.

2. 인버터 전기차의 일반적 특성

2.1 직류전동기의 제한점

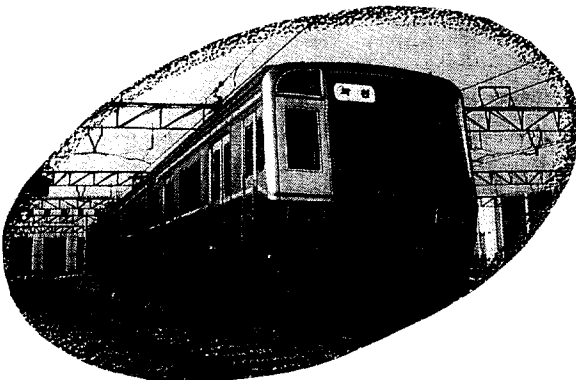


그림 1. 서울시 인버터 전기차 모습

교류전동기 전기차가 등장하기 이전에는 주로 직류전동기가 사용되었는데, 직류전동기는 회전속도에 관계없이 고효율을 얻을 수 있고 광범위한 속도에 걸쳐 제어가 용이하다는 점, 기동토크가 크고 병렬운전시 부하분담특성이 우수하다고 하는 특징을 갖고 있다. 반면 복잡한 구조의 정류자와 브러쉬가 필요하고 보수 및 정류상태의 보정이 어려우며 정류능력에 한계가 있다고 알려져 있으며 기계적 강도가 부족하고 粘着능력의 한계가 있다는 것들이 단점이다.

2.2 유도기 구동 전기차의 특성[3]

유도전동기는 정류자를 갖지않아 고속회전이 용이하고, 소형경량화가 가능하며 보수가 필요하지 않다는 것이 가장 큰 특징이다. 또한 정류자에 의한 회전제한과 계자를 제한이 없기 때문에 기어비를 내리지 않고도 회전수를 기계적 한도까지 늘릴 수 있어 고속 토크를 증대시킬 수 있다.

교류기에는 동기속도가 있고 속도를 제어하기 위하여는 새로운 power electronics 기술을 구사한 가변 주파수(Variable Frequency) 전원이 필요하다. 여기에 가변전압(Variable Voltage) 또는 가변전류의 교류를 만드는 인버터와 차량구동용 교류전동기의 구성요소에 따라 전압형 인버터와 전류형 인버터로 구분되는데 부하에서 볼 때 인버터가 전압원적인가 또는 전류원적인가에 따라 분류되는 것으로, 전압형인버터에서는 일반적으로 정현파교류에 근사시키기 위하여 일정 진폭의 다수 구형파로 근사시키는 것이 보통이고 전류형인버터는 제어가 간단하고 스위칭 횟수도 적으며 전류가 늘 일정하기 때문에 스위칭(轉流) 실패로 단락된다고 하더라도 전류의 변화가 없어 소자 파괴의 염려가 적은 것이 특징이다.

전기차에서의 전압형 인버터와 전류형 인버터를 단적으로 비교하기는 어려우나 전압형 인버터에는 거의 PWM제어가 사용되어 전압은 구형파, 전류는 정현파 모양으로 되어 주전동기의 토크 리플이 적고 공전시에도 재점착이 쉽고 제어응답이 빠르다고 할 수 있다. 한편 전류형인버터는 전술한 바와 같이 회로내에 리액터가 있어 보호기능이 간단하나 효율이 약간 떨어지고 제어응답 및 재점착성능도 약간 떨어진다고 알려져 있다.

3. 편성, 성능 및 주요제원 [4, 5]

3.1 편성

열차 편성은 2M2T, 3M3T, 4M4T, 5M5T로 구성되었고 이중 최소편성인 2M2T는 영업운전에 투입되지 않으며 기본 편성은 5M5T 고정편성으로서 그림3에 나타내었다.



- Tc 운전실있는 부수차
- T 부수차
- M 구동차
- 주변압기
- 모터부착
- 인버터/인버터
- △ 배터리

그림 3. 기본 5M5T 편성도

3.2 성능

4호선의 주행조건으로서는 직류구간인 지하철 4호선 당고개 - 사당 - 금정간 45.0km와 교류구간인 철도청의 금정 - 안산간 19.4km를 상호 주행하도록 되어 있다. 차량의 공급전압은 구동할때 AC 25kV와 DC 1500V, 회생제동할때 AC 25kV와 DC 1650V의 교류, 직류겸용으로 되어 있다. 열차의 최고운전속도는 100km/h이고 기어비는 6.31로 하여 정격속도를 높였으며 가속도는 3.0km/h/s, 제

표 1. 기동 특성

편 성	하중조건	편성중량 (t)	기동전력 (kg/motor)	가속전류 (A)	편성점착계수 (%)
5M5T (3M3T)	20t / car	565.0 (341.12)	2,681	182.5	17.2
	8t / car	445.0 (269.12)	2,146	149	17.1
	공 차	365.0 (221.12)	1,790	130	17.0

표 2. 주행 성능

편 성	하중조건	편성중량 (t)	구 배 (%)	균형속도(km/h)	
				터 널	개방지
5M5T (3M3T)	20t / car	565.0 (341.12)	평탄선	100km/h 이상	100km/h 이상
	20t / car	565.0 (341.12)	35	71	76

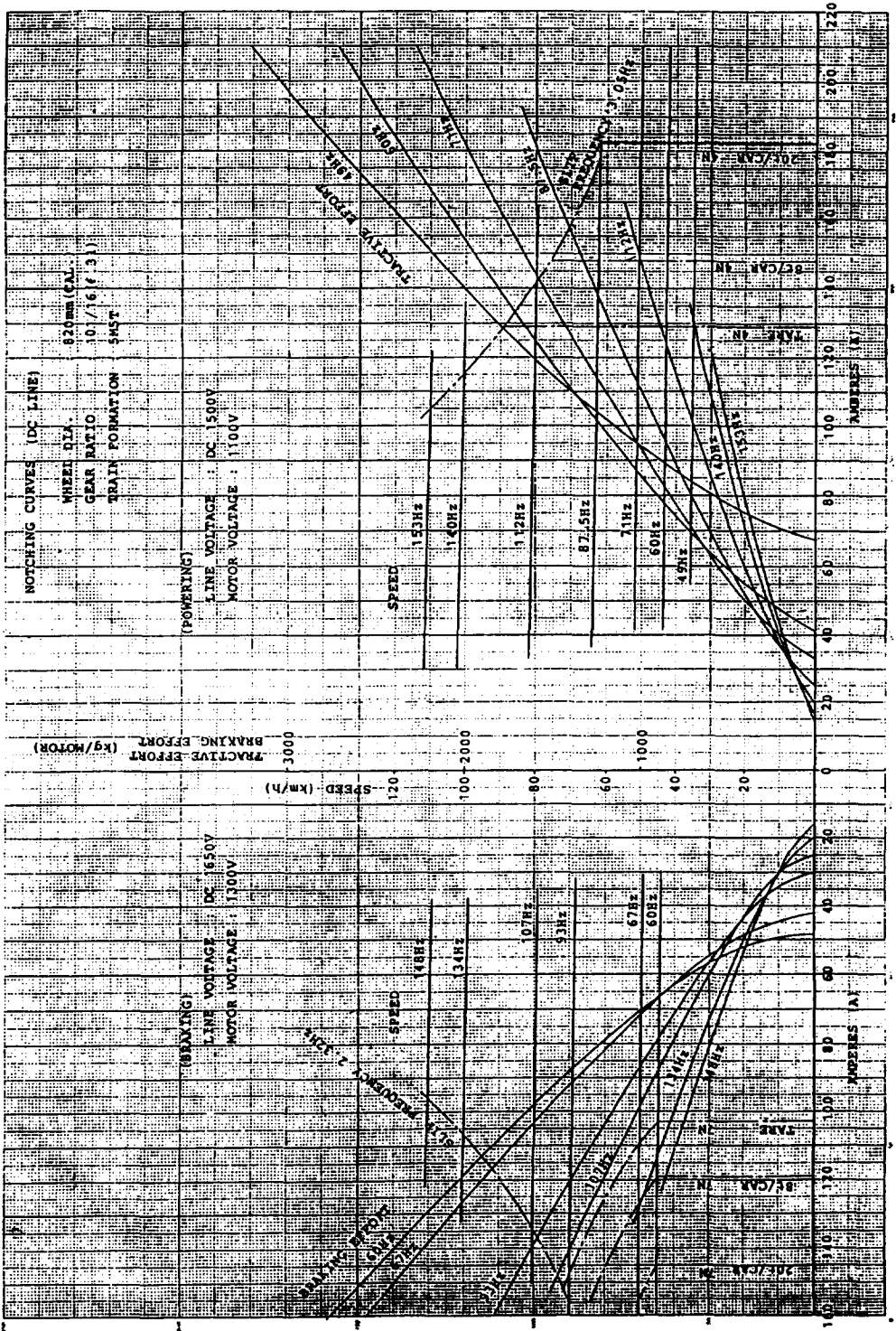


그림 4. 직류구간에서의 notch 곡선

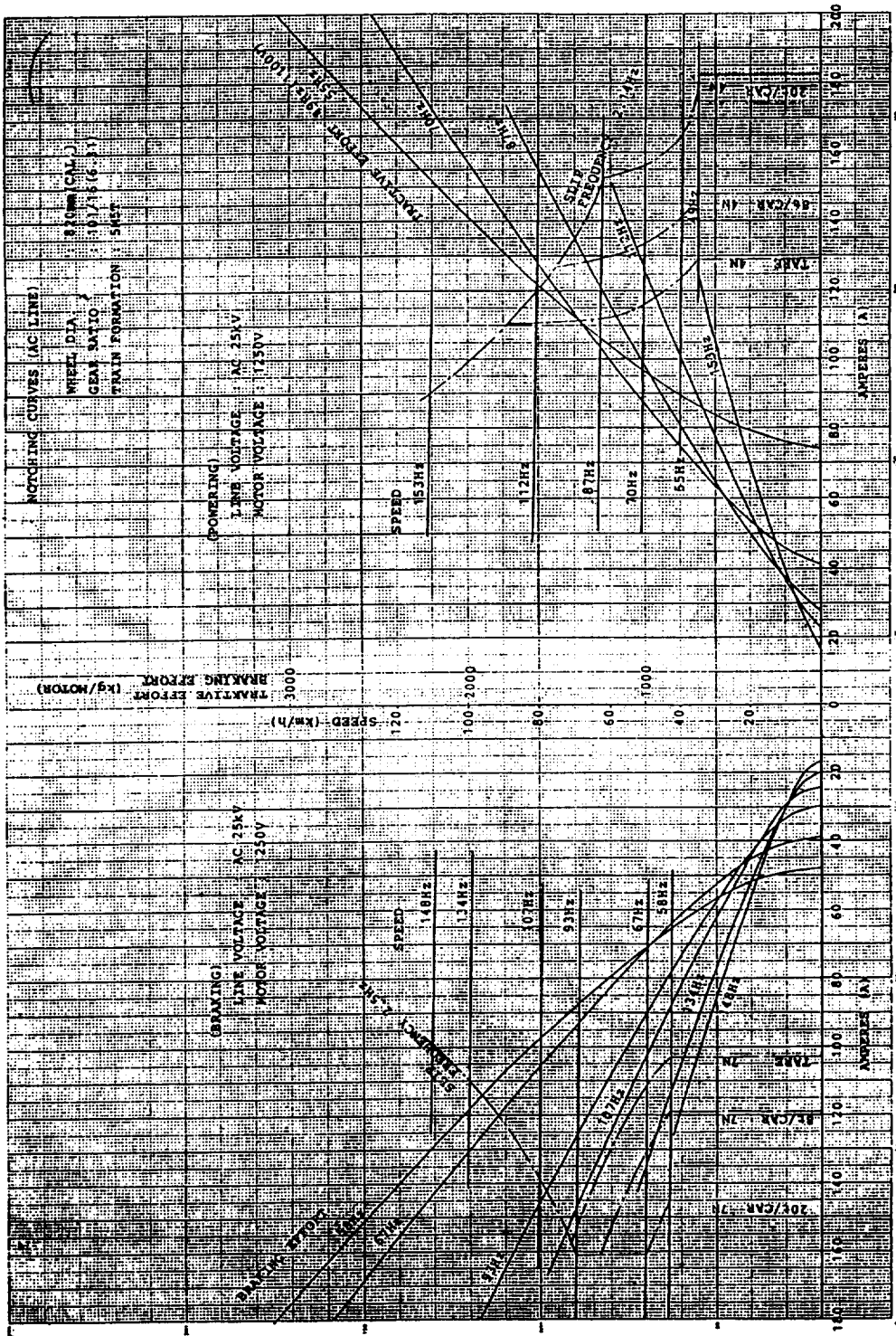


그림 5. 교류구간에서의 notch 곡선

표 3. 회생제동 성능

편 성	하중조건	편성중량 (t)	제 동 력 (kg / motor)	제동전류 (A)	평균점착 계수(%)	전기제동시의 감속도(km/h/s)
5M5T (3M3T)	20t / car	565.0 (341.12)	2,490	145	16.0	16.0
	8t / car	445.0 (269.12)	2,010	119	16.0	2.93
	공 차	365.0 (221.12)	1,690	103	16.0	2.95

동은 상용시 3.5km/h/s, 비상제동시 4.5km/h/s로 감속하도록 하였다.

표1은 평탄선을 기준으로 했을 때의 기동시 견인력, 가속전류, 평균점착계수를 나타내며, 표2는 주행성능을, 표3은 각 하중조건에서의 제동력, 제동전류 및 평균점착계수를 나타낸다.

그림4는 직류구간에서의 notch곡선을, 그림5는 교류구간에서의 전기제동 notch곡선을 나타낸다.

실제의 차량주행시 운전곡선에 관한 제어모드는 정토크 제어 정출력제어 정전압제어의 단계를 밟아 진행되고 회생모드는 정전압제어 정토크제어의 단계로 이루어지는데 이를 나타낸 것이 그림6이다.

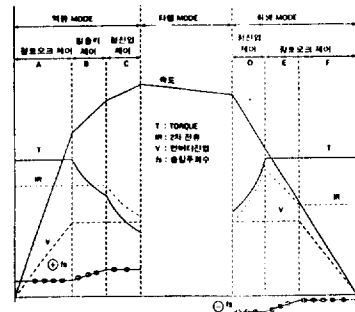


그림 6. 차량주행시 제어모드

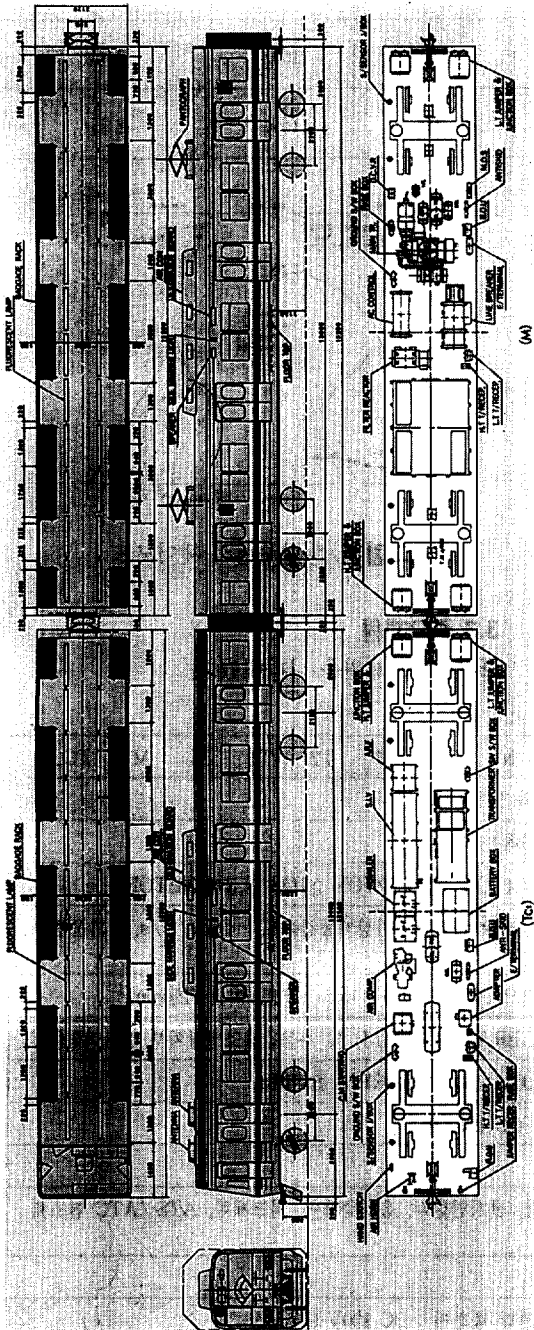
3.3 주요제원

표4에 주요제원을 나타내었다.

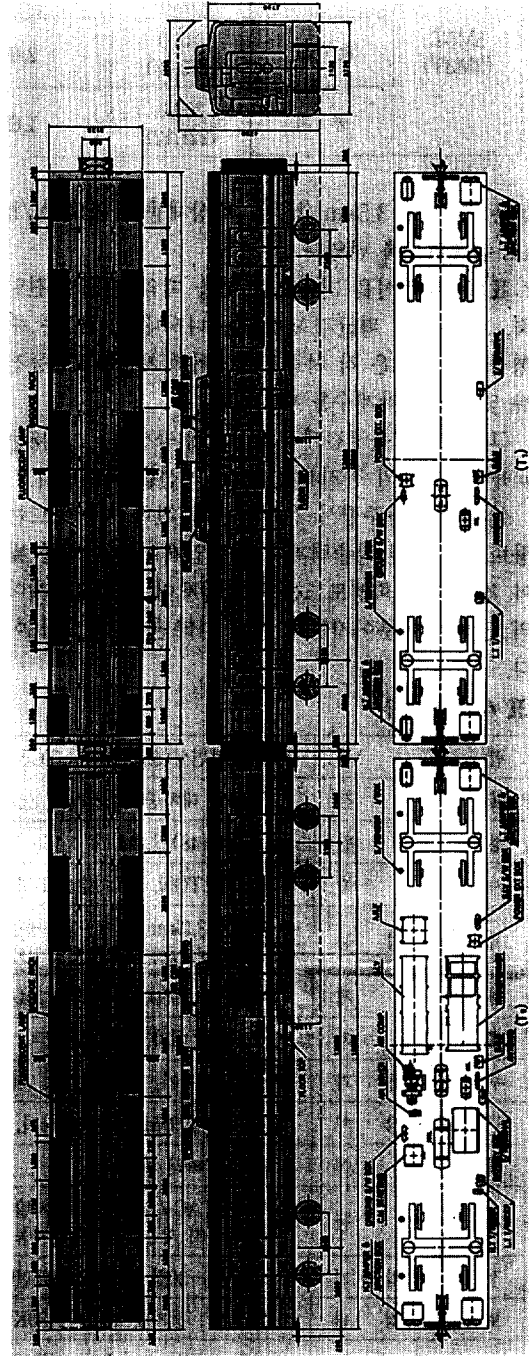
표 4. 주요제원

편 성	성	10량 고정편성(5M5T)	TCE	M	M	T1	M	T2	T1	M	M	TC2
레 간	간	1,435mm, 대차중심간거리 : 13.8M, 고정축거 : 2.1M										
정 원	원	TC : 148(48)인, M, T : 160(54)인, ()內는 좌석정원										
자 중	중	TC : 33.5TON, M : 42.24TON, T1 : 27.4TON, T2 : 32TON : 10량 편성계 365TON										
차 량 성 능	능	가속도 : 3.0km/h/s, 상용제동감속도 : 3.5km/h/s, 비상제동감속도 : 4.5m/h/s, 최고운행속도 : 80m/h/s, 최고속도 : 100m/h/s,										
차 체	체	최대제원 : 19500(길이)×3120(폭)×4480(PANTO 접은높이)mm, 상면높이 : 1150mm										
대 차	차	볼스타레스 대차, 기초제동장치 : BLOCK BRAKE UNIT(M) 및 자동간격조정장치부 실린더형(T)										
주 전 동 기	기	3상 유도전동기, 1시간정격 : 230KW, 1100V, 150A, 1940RPM, 66.5Hz										
구 동 장 치	치	대차부 평형 카르단식 구동장치, 치차비 : 6.3(101/16)										
제 어	어	VVVF 인버터 제어										
제 동	동	회생제동(AC/DC)병용 디지털 전기지령, 전기연산식, 응하중제어, 저크제한, ATS/ATC 협조제어 활주방지 기능부 및 보안제동										
정 동 공 기 압 축 기	기	SL 20-4-30형 나사식, 교류전동기 구동										
보 조 정 원	원	전원장치 : 정지형 인버터(180KVA), 알카리 축전지 : DC 100V 60Ah										
승 객 출 입 문	문	단기통 복동식 도어엔진, BELT TYPE 연동기구 (출입구 폭 1300mm)										
냉 방 장 치	치	42,000Kcal/h/량, 집중형 가변제어 (완전자동)										

<p>객실 전자 자동안내표시기</p>	<p>LED에 의한 문자자동표시 (승무원실에서의 지령에 따른 역명안내를 포함한 각종 정보 표시 시스템)</p>
<p>열차제어종합정보 관리장치</p>	<p>여행, 제동지령의 직렬전송, 고장 MONITOR 및 차상검사장치를 통합한 제어정보 관리장치</p>



(a) Tc와 M차



(b) T1, T2차

그림 7. 차량의 형식도와 기기배치도

4. 차 체

차체길이는 19. 5m, 연결면간의 길이는 20m로 차량의 형식도 및 기기배치도를 함께 그림7에 나타냈는데 (a)는 Tc와 M차를, (b)는 부수차 T1,T2를 표시하고 있다.

5. 주회로 및 주회로 기기

5.1 주회로

주회로의 개략도를 그림8에 나타내었다. 사당 - 금정간 4호선 연장구간에는 급경사가 많아 소형 고출력 200 kw 급 유도전동기를 VVVF 인버터로 제어하는 방식으로 하였으며 주회로는 GTO에 의한 PWM인버터로 4대의 유도전동기를 일괄제어하는 방법을 택했고 제어장치를 동일 차량에 탑재하여

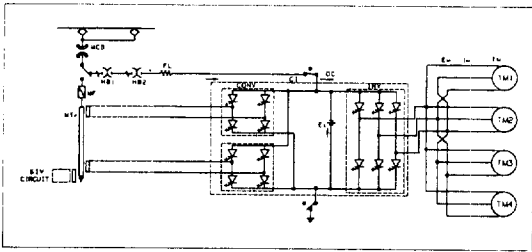


그림 8. 주회로

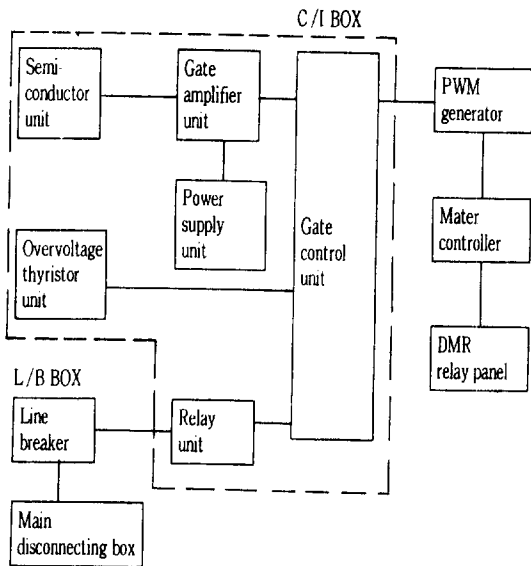


그림 9. 제어회로의 블럭도

집약시켰다. 제어는 마이크로 컴퓨터에 의해 전류 및 주파수 패턴연산, 정전류제어, 공전 및 활주제어, 회생제동력 제어등을 처리하고 있다.

5.2 제어회로

주변환장치의 제어부에는 계전기반, 게이트 제어장치, 전기 광 변환장치 및 제동제어장치를 내장하고 있으며 각 유니트의 관계를 블럭도로 표시하면 그림9와 같다.

6. 기타 보조기기

6.1 ATC,ATS 장치

열차자동제어장치(ATC:Automatic Train Control) 및 자동정지장치(ATS:Automatic Train Stop)는 지상자와 차상자, 즉 루프 코일과 안테나를 통해 열차 운동을 조절하는 기능으로서 지상구간에 설치된 지상자에 사령실 명령을 전달하여 신호기 및 릴레이를 동작시키고 ATS 점제어식 지상자에 미리 설정된 신호를 통해 승무원에게 열차속도를 조절하게 하고 열차가 사령실의 명령속도보다 높은 속도로 과속행할시 이 속도를 승무원에게 알려 속도를 낮추도록 하고 속도를 일정시간안에 변화시키지 않으면 ATS에 의해 비상제동을 걸어 강제로 정지시키게 된다.

4호선 구간의 ATC및 과전선구간의 ATS의 전환시키는 ATC /ATS에서 검지하여 운전실의 경보음을 울림으로써 승무원가 절환스위치를 조작하게 하고 스위치를 강제로 절환할 수 없도록 안전성이 고려되어 있으며 사구간(Dead Section) 자동검지를 수행하여 경보음으로 승무원에게 알림으로써 승무원이 사구간에서 주의 운전을 할 수 있도록 하였다 (그림10 참조).

6.2 열차무선장치

기존의 유도무선방식에서 누설동축케이블을 가설한 공간과무선방식으로 교체하여 품질향상을 꾀하였고 지하철구간 사령실과 기관사간, 철도청구간 사령실 및 기지국과 기관사간에 원활한 통화가 이루어지도록 하였다. 지하철구간용 35W 송수신기, 철도청구간 2W 송수신기와 각각의 안테나, 제어장치, 전원장치, 철도청구간용 감청수신기로 구성되

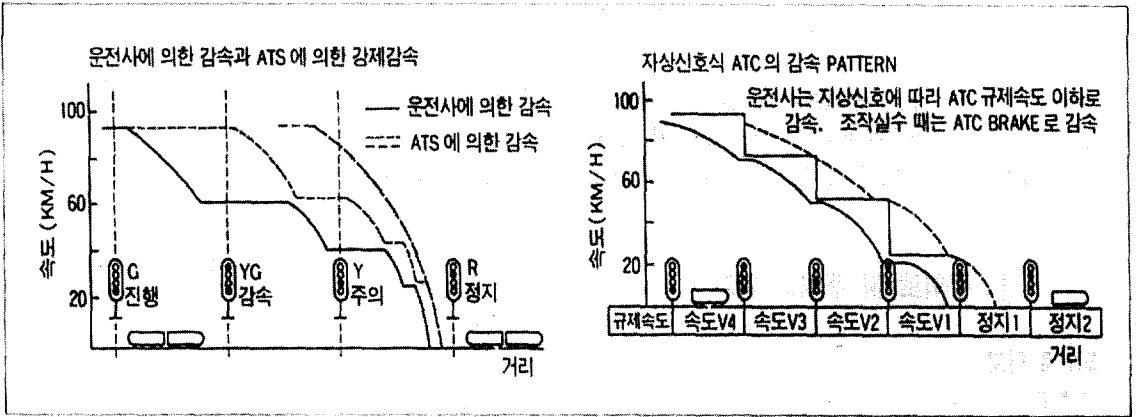


그림 10. ATC / ATS



그림 11. 안내 전광판

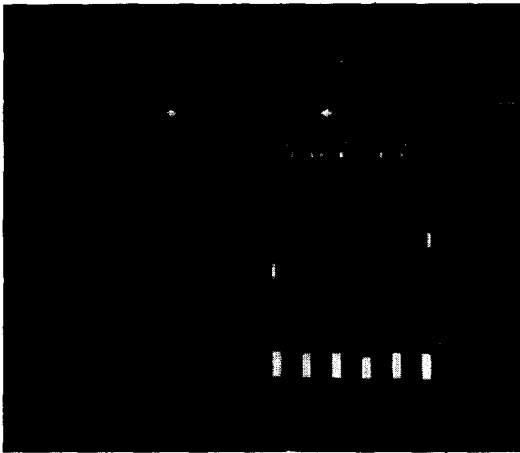


그림 12. 열차정보 관리시스템

어 있다.

6.3 승객용 안내방송 및 안내표시장치

차내 승객을 위한 역안내 및 공지사항등을 ROM 속에 음성을 저장하여 기존테이프 방식의 음질 저하를 방지하였고 승객에게 음성만의 서비스외에 시각적으로 안내하기 위하여 객실 양쪽에 2조 4면씩 전광판을 설치하여 승무원실내에 있는 제어기로부터 음성서비스와 병행하여 청차역안내 및 공지사항등을 전광판에 현시하도록 하였다.

6.4 열차정보관리 시스템

승무원의 운전업무 지원 및 차량검사업무를 지원하기 위하여 정보관리시스템으로써 각 차량에 설치된 정보관리 유니트를 통하여 열차내 주요기기의 동작데이터를 수집하고 승무원실에 설치된 화면에 나타내어 승무원으로 하여금 기기들의 동작상태를 쉽게 감시할 수 있도록 하였다. 이상이 발생하였을 때 자동으로 고장정보를 표시하고 필요한 응급조치사항도 나타내어 신속하고 정확한 처치가 되도록 지원하고 고장기록데이터 및 고장추적데이터를 수집 기록하여 차량검수시 화면에 나타냄과 동시에 IC 메모리 카드를 경유하여 지상장치로 출력함으로써 고장해석을 용이하게 하였다.

7. 맺음 말

우리나라에서는 처음으로 도입된 유도전동기 구동 직류, 교류 겸용 방식의 인버터 전기차로서 서울시의 지하철 4호선에 투입된 차량을 소개하였다. 4호선 차량은 최신의 제어기술과 전력변환장치로서 제작되어 그 활약이 기대되는 만큼 장차의 철도차량의 주종을 이룰 것이 거의 확실시 되므로 관련된 기술자의 지대한 관심을 모으기에 충분하다.

더욱이 인버터 전기차에 대한 연구가 많은 진전이 있어 완전한 우리 기술로서 인버터 전기차의 제작이 가능해질 것을 바라마지 않으며 이 해설이 지하철 4호선을 이해하는데 적으나마 도움이 되기를 기대하여 본다.

참 고 문 헌

- [1] 曾根 悟, "日本における實用インハ"-タ制御電氣車一覽", 電氣車の科學 Vol. 45, No. 1, pp 30-36, 1992. 1
- [2] "インハタ制御技術の展開", 電氣車の科學, Vol. 46, No. 3-4, 1993. 3-4
- [3] 김양모, "세계의 인버터 전기차 개발현황", 전기학회지, 제36권, 제9호, pp. 10-16, 1987. 9
- [4] 서울특별시 지하철 공사, 전동차 정비 지침서 (상, 하), 현대정공, 1993
- [5] 서울특별시 지하철 공사, 서울특별시 과천시 전동차, 1994



정수영

1957년 1월 9일생. 1979년 고려대 공대전기공학과 졸업. 1982년~현재 서울 지하철공사 차량부. 주요업무: 전동차제작 관련업무전동차유지보

수 관련업무



김양모(金良模)

1950년 3월 29일생. 1973년 서울대 공대공업교육학과 졸업. 1975~79년 공군제 2사관학교. 1983~86년 일본 동경대 박사과정(공박). 1990년 미

국 버지니아 테크 방문교수. 1979~현재 충남대 공대 전기공학과 교수. 주관심분야: 전기철도 전력변환회로.