

# 차륜지지식 리니어모터카의 개발동향

권병일\*, 임달호\*\*

(\*한양대 공대 전기공학과 조교수,

\*\*동 대학교 전기공학과 교수)

## 1. 서 론

회전형모터를 전개한 리니어모터(Linear Motor)는 자기부상기술과 조합된 시스템으로서, 또는 독자적인 시스템으로서, 대형운송시스템, 소형반송시스템, FA, OA분야에 까지 그 적용분야를 넓혀 가고 있다[1-2].(이하에서는 리니어모터를 이용한 모든 구동시스템을 “리니어모터카”라 부르기로 한다.)

리니어모터와 자기부상기술이 조합된 자기부상차량 및 자기부상반송시스템은 저소음, 무마찰 등의 이점을 살려, 적합한 분야에의 개발연구 뿐만 아니라 실용화 예도 많이 있다[3-6].

또한, 자기부상기술은 마찰이 없는 장점에 의해, 저소음, 무공해, 정밀제어 등을 목적으로하는 자기베어링(Magnetic Bearing) 등에의 응용이 적극적으로 진행되고 있다[7].

리니어모터의 추진력만을 이용하고, 지지 및 안내는 차륜에 의하는 차륜지지식 리니어모터카는 회전형에 비해 모터의 높이가 상대적으로 낮아지는 점 등의 장점에 의해, 지하철 및 신교통시스템에의 적용을 목적으로 개발되어, 외국에서는 이미 실용화 단계에 들어서 있다[8-10]. 이하에서는 차륜지지식 리니어모터카의 특징 및 개발동향 등에 대해 설명한다.

## 2. 차륜지지식 리니어모터카

### 2.1 차륜지지식 리니어모터카의 특징

리니어모터는, 단어의 의미 그대로 直線狀의 모터이며, 전류를 흘리면 자석이 움직이는 것처럼 移動磁界를 발생시키는 1차측과, 그 이동자계와의 전기적인 상호작용에 의해 자계의 이동방향으로 驅動力을 받는 2차측으로 구성된다. 간단히 설명하면 회전형모터를 축과 평행하게 잘라서, 고정자와 회전자를 平板狀으로 전개한 것이다. 리니어모터는 회전형모터와 모양이나 사용방법이 다를 뿐 동작원리는 通常의 회전형모터와 같으며, 대부분의 회전형모터는 리니어모터로 전환될 수 있다. 차륜지지식 리니어모터카에서는 2차측의 구조를 간단히 하기 위해 회전형 유도모터를 선형화한 편축식 리니어유도모터를 사용한다.

리니어모터에서는 1차측이 꼭 고정부분일 필요는 없으며, 1차측부분과 2차측부분중 어느 쪽이 車上에 설치되어 움직이느냐에 따라 車上1次式 또는 地上1次式이라 불리어 진다. 차륜지지식 리니어모터카는, 경제적인 이유로, 구조가 복잡한 부분을 짧게 하는 차상1차식을 채용한다.

그림 1에 차륜지지식 리니어모터카의 리니어모터, 그림 2에 레일쪽의 recation plate의 단면도, 그림 3에 리니어모터를 탑재한 대차(Bogie)를 나타낸다. 일반적으로 recation plate는 철과 알루미늄의 복합도체판이지만, 보다 큰 추력을 필요로 하는 부분에서는 철과 동 등의 복합도체로 하며, 또한, 추력이 필요하지 않는 부분에서는 철만을 도체판으로 하는 등의 구조가 가능하다. 그림 4에 차륜지지식 리니어모터카 시스템의 단면도를 나타낸다.

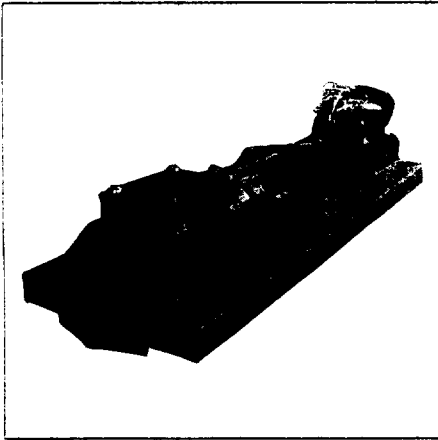


그림 1. 리니어모터

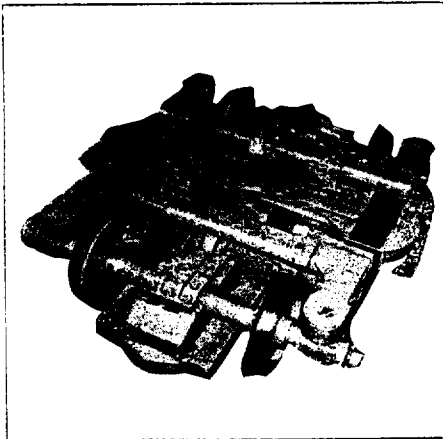
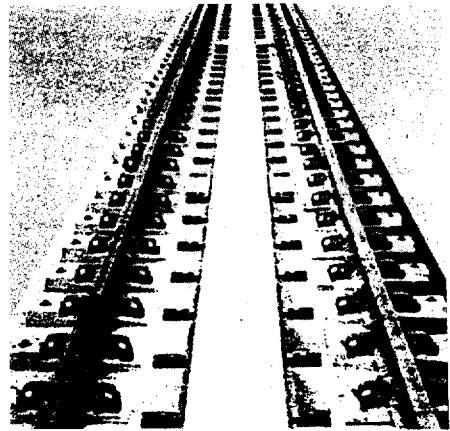
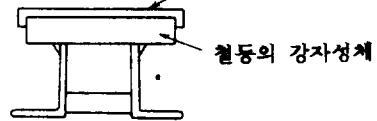


그림 3. 리니어모터 대차



알루미늄등의 양도체



철도의 강자성체

그림 2. 리액션프레이트

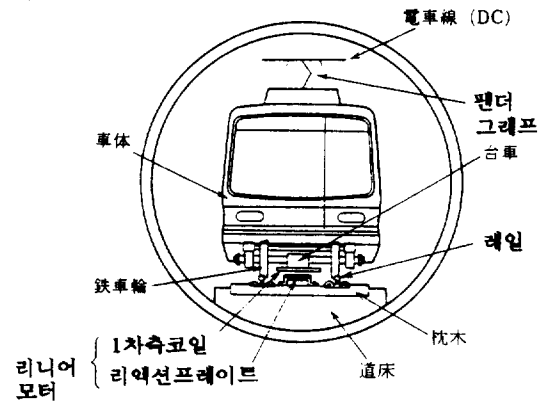


그림 4. 리니어모터 지하철의 단면도

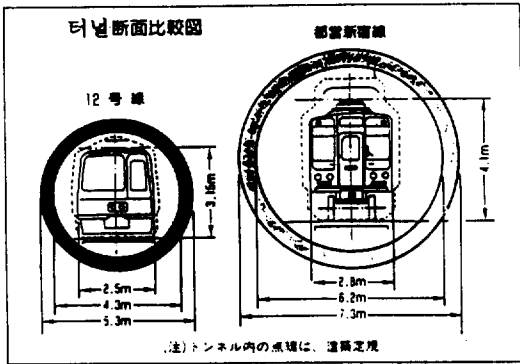
차륜지지식 리니어모터카는, 추진력은 리니어모터에 의해 비접촉으로 얻어지고, 지지, 안내는 재래철도 처럼 차륜의 접촉에 의해 행해지므로, 재래의 철도기술을 그대로 활용하면서, 리니어모터의 장점을 이용하려는 시스템이다.

차륜지지식 리니어모터카를 지하철용으로 이용할 경우의 특징을 정리하면 다음과 같다.

(1) 종래방식의 철도차량의 台車에 搭載되어 있는 회전형모터를 직선형인 리니어모터로 대체 하므로, 車輛전체의 높이를 낮게하여 소형화 할 수 있다. 따라서, 터널단면의 축소에 의한 건설비의 저감 등의 효과를 얻을수 있다. 실제적인 터널단면의 크기의 비교를 위해, 일본에서 개발된 시스템(12號

線)과 재래지하철(都營新宿線)의 터널단면도를 그림 5에 나타낸다.

(2) 차량은 차륜과 레일사이의 마찰에 관계없이 직접 구동되므로, 종래방식의 차량이 空轉해서 구동력이나 제동력이 얻어지지 않던 급구배의 구간에서도 안정하게 주행할 수 있다. 급구배의 채용으로, 지하철에 있어서는 역의 위치를 地面 가까이 설치할 수 있으므로, 건설비의 저감 및 승객의 편의성



諸元比較表

項目 \ 規模		12号線	都營新宿線
建築定規面積(㎡)		9.1(65)	13.9(100)
車両定規面積(㎡)		7.1(66)	10.3(100)
터널	内徑(m)	4.3(69)	6.2(100)
	内空断面積(㎡)	14.5(48)	30.2(100)
	掘削断面積(㎡)	23.3(53)	43.6(100)

그림 5. 터널단면의 비교(12號線과 都營新宿線)

을 향상시킬 수 있다.

(3) 직접 차륜을 구동하지 않아서, 비교적 쉽게 자동操舵(steering)台車を 구성할 수 있으므로, 고속주행의 안정화와 반경이 작은 급곡선의 통과가 용이하게 된다. 또한, 차륜과 레일사이의 마찰이 감소되므로, 보수의 부담이 적게 된다. 급곡선의 채용은, 민간소유지의 통과거리를 짧게 할 수 있으므로, 用地費의 부담이 경감되며, 또한 급구배의 채용과 함께 선로계획의 자유도를 높게하며, 건설비의 절약이 기대된다.

(4) 리니어모터차량은 모터의 회전음 등의 소음이 없고, 또한 곡선통과시 등의 소음의 저감에 의해 저소음화가 기대된다.

## 2.2 차륜지지식 리니어모터카의 운전

차륜지지식 리니어모터카의 추진은, 차상1차식 편축식리니어유도모터를 VVVF인버터로 제어하지만, 원통형 유도모터와는 달리 수직력이 발생한다. (원통형 유도모터에서의 이러한 힘은 구조적인 대칭성에 의해 상쇄된다) 이때의 수직력은 흡인력으로 작용하므로 차륜에는 차량의 무게와 이 수직력이 함께 작용하지만, 차륜으로 이 힘을 충분히 지지

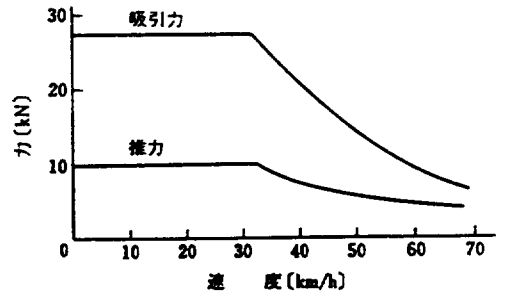
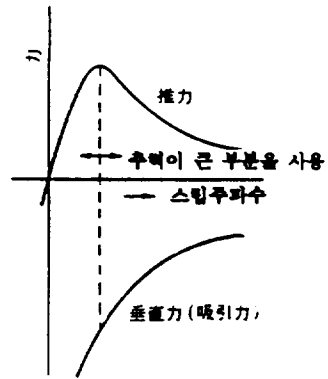


그림 6. 리니어유도모터의 추력과 수직력의 관계

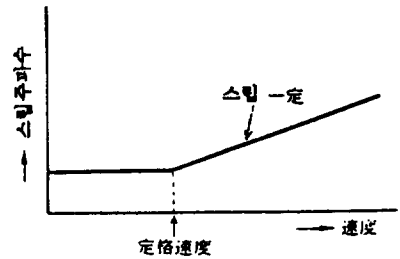


그림 7. 속도제어

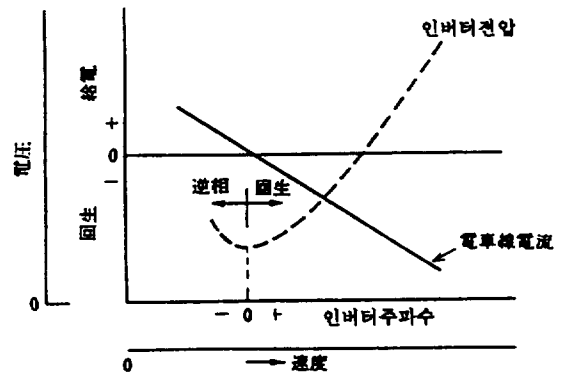


그림 8. 전기브레이크의 개념(회생, 역상)

하게 되므로 어느정도 추진력이 큰 영역에 스텝주

과수를 설정한다.(그림 6)

이러한 슬립주파수의 설정에도 불구하고, 효율면에 있어서는 空極長이 큰 이유 등으로, 재래의 회전형유도모터를 VVVF인버터로 구동하는 인버터차에 비해 6할정도이다. 이와 같은 효율면에서의 결점은 새로운 시스템으로서의 매력을 반감한다. 따라서, 효율이 좋은 곳에서의 운전, 단효과(고속영역에서 리니어유도모터의 1차측 양단부 자계의 불연속에 의해 자속밀도분포가 불균일하게 되어 전기적 특성이 나쁘게 되는 현상)를 보상하는 방식 등의 검토가 필요하다.

VVVF인버터에 의한 제어는, 정격속도까지는 슬립주파수일정으로 정토크특성을 얻는 동시에 효율이 최대가 되도록 하며, 정격속도 이상에서는 슬립일정제어로서 효율이 최대가 되도록 한다.(그림7)

제동시에는, 인버터차처럼 전기브레이크를 사용하지만, 리니어모터구동의 비점착성을 이용하기 위해, 인버터의 주과수를 낮추어 영에서 부터 마이너스로 하여, 電車線으로 부터 전류를 공급받아서 제동력을 얻는 역상브레이크도 사용한다.(그림 8) 실제로는 확실한 제동력을 얻기 위해 최후의 단계에서는 공기브레이크를 사용하는 것이 바람직하며, 역상브레이크로 부터 공기브레이크에의 전환할 때의 시간지연 등을 고려하여, 역상제동이 제거되기 전부터 공기제동을 작동시켜, 그만큼 역상브레이크를 낮추는 방식이 필요하다.

이상과 같은 방법에 의하여, 리니어모터의 비점착구동을 이용한 제동제어방식이 가능하지만, 역상브레이크 역시 전차선으로 부터 전류를 공급받아서 브레이크력을 얻으므로, 소비전력은 증가하게 된다. 따라서, 전력소비량의 증가를 억제하기 위해 종래의 인버터차와 같이 회생제동과 공기제동만으로 브레이크력을 얻는 방식도 생각될 수 있다.

그 밖의 전력설비, 신호보안시스템 등은 재래철도와 거의 같은 방식이 사용된다. 리니어모터를 사용하므로 발생하는 잡음의 영향 등에 대해서는, 각종 시험의 결과, 실용화에 있어서 별문제가 없는 것으로 판단되었다.

### 3. 일본, 캐나다 등의 개발동향

차륜지식식 리니어모터카는, 1985년 3월, 캐나다

표 1. 실용화된 차륜지식식 리니어모터카

시스템명	스카보로 (SLRT)	스카이트 레인 (ALRT)	디트로이트	오오사까시 교통국 7호선	동경시 교통국 12호선
개업년	1985.3	1986.1	1987.7	1990.3	1991.12
국명	캐나다	캐나다	미국	일본	일본
도시명	토론토	밴쿠버	디트로이트	오오사까	동경
노선길이	6.6km	21.4km	4.7km	5.2km	3.8km
노선형태	복선	복선	단선루프	복선	복선
역수	6	15	13	5	4
차량길이	12.7m	12.7m	12.7m	15m	16.5m
정원	85 (좌석36)	75 (좌석40)	76 (좌석34)	100 (좌석40)	100 (좌석44)
편성	2M	2M,4M,6M	1M,2M	4M	6M
운전방식	무인자동 수동	무인자동	무인자동	수동	수동
최고속도	80km/h	80km/h	48km/h	70km/h	70km/h

표 2. 차륜지식식 리니어모터카의 주전동기제원 (日本 都營 12號線)

방식	차상1차편축식
출력	120KW
전압	1100V
전류	170A
주파수	21Hz
동기속도	42.5km/h

의 토론토에서 스카보르線이 개업한 이래, 미국, 일본등지에서 실용화의 예가 잇따르고 있다. 표1에 실용화된 차륜지식식 리니어모터카의 일람표를 나타낸다.

日本地下鐵協會는, 1985년부터 運輸省의 主導下에 建設省, 自治省의 협력을 얻어, 學界, 지하철사업자, 관련기업 22個社의 産. 官. 學이 공동으로 리니어모터구동 소형지하철의 실용화 연구를 시작하였다. 그 결과를 토대로 하여 건설한 大坂南港의 실험선에서 2량편성의 차상 1차식 편축식 리니어유도모터 電車의 주행시험을 실시하였다. 실험선의 전장은 1. 85km이며, 반경50m의 급곡선, 60/1000의 급구배, 분기, 模擬터널등을 설치하여, 시험차량의 주행성능을 확인하였다. 이 시험결과에 의하여 大坂交通局은 1990년 3월 大阪市營지하철7호선에 이 시스템을 도입하여 운행중이다.

또한, 東京都교통국은, 마고메檢車場에 300m의 시험선을 설치하여, 지하철협회가 실시한 시험결과를 기초로 都交通局 특유의 시험항목에 대해서 주행시험을 행하였다. 이러한 시험결과를 참고하여,

都營地下 12號線에 본 시스템을 채용하여 4.8km 區間에서 영업운전을 개시하였다. 이 선로는 이후 全長 41km로 延長 運轉될 계획이다. 표2에 都營地下 12號線의 LIM의 사양을, 표3에 차량의 주요계원을 나타낸다.

캐나다의 밴쿠버, 토론토 兩市에서는, UTDC社가 차상 1차식 편축식 리니어유도모터로 구동하는 신교통시스템이 運轉되고 있다. 또한, UTDC社는 유사한 시스템을 미국의 디트로이트에 개설하였다.

차륜과 레일사이의 마찰을 이용한 차륜구동방식의 철도는, 積雪이나 凍結에 의해 차륜과 레일사이의 마찰계수가 감소하면 차륜이 공전하거나 滑走하기 때문에, 안전한 고속주행과 확실한 브레이크력을 얻기 어렵다. 이러한 문제에 고심하던 캐나다는, 차체에 직접 구동력이나 제동력을 줄수 있는 리니어 모터는 이러한 환경에서의 차륜구동시스템으로서 적합하다는 것에 착안하여, 이의 실용화에 앞장서게 되었다.

밴쿠버의 “스카이트레인“은, 市北部주택가의 페리 發着場인 워터후르터驛과 市남동부의 주택지 뉴 웨스트민스트驛間 22km를 약 27분에 연결하는 것으로, 다운타운의 일부가 지하로 되어 있는 外에는 대부분 고가궤도로 되어 있다. 일반적으로 高架軌道는 건설비가 싸므로 널리 채용되고 있지만, 寒冷地에서는 선로면이 凍結하기 쉬우므로, 종래의 차륜구동방식의 철도에서는 그다지 채용되고 있지 않다. 하지만, 차륜과 레일의 마찰에 의존하지 않는 리니어모터 구동시스템을 채용하므로써, 코스트면에서 유리한 高架軌道를 채용할 수 있게 되었다.

車上の 전기자코일을 여자하는 전력은, 궤도측면의 제3궤조로부터 750V의 직류를 집전하는 방식이다. 또한, 차륜의 직경을 작게 하므로써 차량의 높이를 낮게 하고, 제3궤조에 의해 집전하므로써 천정의 팬더그래프로 집전하는 종래방식의 철도차량에 비해서 차체의 전체 높이를 더욱 낮게 하였다. 특히, 다운타운의 밀집지에서는, 廢線이 된 웨스턴 철도의 單線用 地下터널의 底部를 조금 파서 2층의 구조로 하여, 下行線과 上行線을 통과시키므로써 공사비용을 대폭 절감하고 있다.

이 시스템의 문제점은, 차륜의 직경을 적게 하였기 때문에 차륜의 회전수가 높아져서 차륜의 마찰이 심하다는 점, 또한 독특한 自動操舵台車에 문제

표 3. Principal Features of Subway Car Series 12-000

Item	Principal features
Series	12-000
Traom formation	6 cars (fixed)
Gaige	1,435 mm
Electric system	1,500 Vdc, overhead rigid bar cadtenary
Car weight	25.5 tons (average)
Passenger capacity	Leading car: 90 (seating capacity: 36) Intermediate car: 100 (seating capacity: 44)
Dimensions (maximum)	16,500(L) × 2,500(W) × 3,150(H) mm (when pantograph folded)
Bogie	Linear motor driven air spring suspension
Foundation brake rigging	Disk brake
Traction motor	3-phase linear induction motor (naturally cooled) 120 kW
Main controller	VVVF inverter
Brake system	Electric command electromagnetic straight air brake system
Auxiliary power supply unit	Staitic inverters: for air-conditioning (35 kVA), for air compressors (23 kVA), and for control equipment (25 kVA)
Air conditioning equipment	Semi-contralized units (12,500 kaal/h), 2 units per car (with re-opening /re-closing device)
Heating system	Compartment: Heater with aluminum elements (750W) (10 units on the leading car, and 12 units on the intermediate car) Driver's cab: Electronic fan heater (760W)
Ventilating device	Line flow fan: 3 units /car
Emergency communication equipment	Passenger-operated interphone system with confirmation light: 6 units /can (door side)
Public address equipment	Automatic public address system with automatic volume control function, with outside broadcasting system
Train radio equipment	Space wave radio system (VHF bacd)
On-board passenger information display	LED system (scroll and map)
wayside-to-train image transmission system	Near infra-red ray optical space wave transmission system
ATC / ATO cartorne equipment	ATC: High frequency continuous induction type ATO: On-board calculation fuzzy control system
Train performance	Maximum service speed: 70 km/h Acceleration: 3.0 km/h/s (constant up to 200% load factor) Deceleration: Service(maximum): 3.5 km/h/s (constant up to 200% load factor) Emergency: 4.5 km/h/s (constant up to 200% load factor) Security: 4.5 km/h/s (Empty)

가 있어서 인지 레일이 波狀摩耗한다는 점이다. UTDC社는, 일상의 보수점검을 강화하고, 정기적으로 차륜을 研磨하여, 이들 문제에 대응하고 있다.

#### 4. 결 론

이상으로 차륜지식식 리니어모터카의 특징 및 운전, 개발동향에 대하여 설명하였다. 실용화된 차륜지식식 리니어모터카는 재래식 지하철에 비해 많은 장점을 갖고 있으며, 선진국에서 이미 실용화의 단계에 들어가 있으나, 리니어모터의 효율면에서의 향상 등 아직 개선되어야 할 문제들은 남아 있는 것으로 생각된다.

국내에서는 이제 지하철에 회전형 유도모터를 채용하기 시작한 단계이지만, 경험 및 기술부족 등으로 문제점이 제기되고 있는 실정이다.

이후, 국내에서도 차륜지식식 리니어모터카의 이점을 살려, 국내의 현실과 맞는 기술개발을 통해 지하철에 적용되므로써 실용화 되기를 기대해 본다.

#### 참 고 문 헌

[ 1 ] 山田一 編著, “리ニア모터應用handbook,” 工業調査會, 1986.  
 [ 2 ] 日本電氣學會アクチュエータ調査専門委員會 編, “리ニア모터とその應用(book),” 日本電氣學會, 1984.  
 [ 3 ] 正田英介, 他 共著, “磁氣浮上鐵道の 技術 (book),” 오ーム社, 1992.  
 [ 4 ] 권병일, “자기부상철도의 현상과 전망,” 대한전기학회지, Vol.37, No.4, pp.58-70, 1988.  
 [ 5 ] 권병일, “초고속 자기부상열차의 자동운전 시스템,” Vol.40, No.8, pp. 54-60, 1991.  
 [ 6 ] 권병일, “크린룸용 자기부상반송시스템의 개발동향,” 대한전기학회잡지, Vol.41, No.3, pp.43-50, 1992.

[ 7 ] 권병일, “자기베어링의 개발동향,” 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.656-658, 1992. 7.  
 [ 8 ] 正田英介, 他, “리ニア모터카-實用化의 動向,” 日本電學論D, Vol.110, No.1, pp.2-13, 1990.  
 [ 9 ] 正田英介 編著, “리니아드라이브技術とその應用(book),” 오ーム社, 1991.  
 [10] 小豆澤照男, 他 共著, “스ーパートレイン (book),” 東京電氣大學出版局, 1990



**권병일(權丙一)**

1956년 2월생. 1983년 2월 한양대 대학원 전기공학과 졸업. 1989년 9월 동경대학 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1990년 4월부터 8월까지 기계연구소 자기부상열차개발 국책연구사업단 선임연구원. 1989년 10월부터 현재까지 일본 와세다대학 이공학연구소 객원연구원. 1991년 9월부터 현재까지 한양대학교 전기공학과 조교수. 당학회 및 일본 전기학회 회원.



**임달호(任達鎬)**

1933년 7월 4일생. 1958년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1964년 동 대학원 졸업. 1972년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 한양대 공대 전기공학과 교수. 당학회 평의원.