

# 직선형 동기전동기의 구조와 특성

차귀수\* · 정현교\*\*

(\*순천향대 전기공학과 조교수,

(\*강원대 공대 전기공학과 부교수,)

## 1. 서 론

산업화가 진행되고 경제규모가 커짐에 따라서 고속의 운송수단을 필요로 한다. 또한 국민들의 생활 수준 향상에 따라서 쾌적하고 안전한 운송수단을 요구하고 있다. 자기 부상열차는 이와같은 요구에 부응할 수 있으므로 다음세대의 운송수단으로서 주목을 받고 있다.

선형전동기로 추진되고 자기부상방식으로 부상하는 자기부상열차는 비접촉식으로 추진되고 부상되기 때문에 기존의 열차에 비해서 진동 및 소음이 적고, 등판 능력이 뛰어나다.

자기부상열차가 갖은 우수성으로 인해서 영국, 독일 그리고 일본 등의 선진외국에서는 상업운전이 가능할 정도의 실규모 시험용 자기부상열차를 제작해서 주행실험을 마친 상태이다. 국내에서도 경부선 신설계획이 발표됨에 따라 자기 부상열차가 관심을 모아 이에 대한 본격적인 연구를 시작하는 단계이다.

자기부상열차의 추진방식으로는 선형유도전동기(LIM)와 선형동기전동기(LSM)를 들 수 있다. LIM에서는 일반적으로 2차측으로 사용하는 궤도로 알루미늄판을 사용하고 여자를 하지 않는다. 이 평판에 차량에 탑재된 1차측에서 발생시키는 진행파에 의해서 와전류가 유기된다. 따라서 LIM은 구조가 간단하고, 정지시에서부터 동기속도 근처까지 추진력이 발생한다.

LIM의 이와같은 장점에도 불구하고 고속운송수단의 추진장치로서 LSM을 채택하는 경향이 일반적이다. LSM은 궤도전체에 전기자권선을 설치하고 계자는 차량에 설치한다. LSM은 주행시에 외부에서 전원을 공급할 필요가 없다. 그 이유는 LSM으로 추진되는 자기부상열차에서 소비하는 전력은 승객편의용과 계자에서의 저항손실에 해당하는 것으로 이 크기는 미미하기 때문이다.

LSM의 계자로서 초전도자석을 사용할 경우에는 계자에서의 손실이 없다. 또한 초전도자석을 사용하면 강한 자장을 발생시킬 수 있으므로 부상높이가 100mm정도로 높아져 안전성이 증가한다. 그러나 LSM에서는 궤도전체에 코일을 설치해야 하기 때문에 초기건설비가 증가하고, 각 구간으로 나눈 궤도의 스위칭문제가 복잡해지는 단점이 있다.

여기에서는 선형동기전동의 구조와 동작원리를 살펴보고, LSM에서 발생하는 추진력과 부상력 등의 특성을 고찰한다. 그리고 상전도계자형, 영구자석계자형 및 초전도계자형 등 세계 각국에서 발표된 여러가지 형태의 LSM추진 자기부상열차의 개발사례를 언급한다.

## 2. LSM의 구조 및 동작원리

LSM의 추진원리는 같은 극성의 자석은 반발하고 다른 극성의 자석은 잡아 당긴다는 것을 이용한 것이다. 그림 1에서 보는바와 같이 궤도와 차량에 자

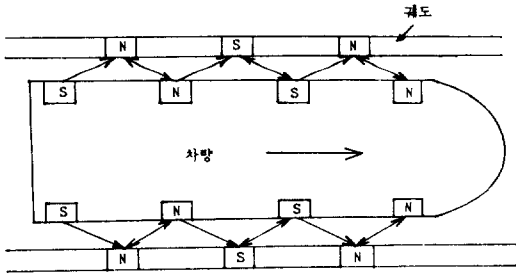


그림 1. LSM의 추진원리

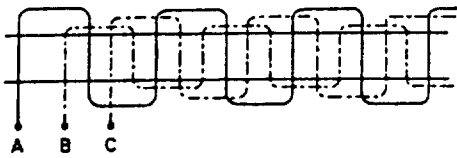


그림 2. 전기자권선

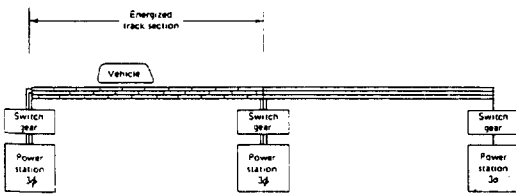


그림 3. 전기자권선 여자방식

석을 설치하면 차량이 이동한다. 궤도에 설치된 자석은 실제로는 전기자권선에 의해 발생하는 진행파의 형태이다.

LSM은 회전형 동기전동기와 마찬가지로 전기자와 계자로 구성된다. 전기자 권선은 인가되는 전원의 주파수에 따라서 속도가 변하는 진행파를 발생시키고 계자권선은 직류자장을 만든다. 1차축을 차량에 설치하고 2차축을 궤도에 설치하는 LIM에 비해서 LSM은 계자를 차량에 설치하고 전기자를 궤도에 설치한다.

그 이유는 LIM에서는 1차축에서 발생시켜야 하는 자장의 세기가 강해야 하므로 철심에 넣은 권선이 너무 굵어지게 되어 1차축을 차량에 설치해야 하나, LSM에서는 계자권선에서 발생하는 자장의 세기가 강하므로 전기자권선을 가늘게 하는 것이 가능하게 되어 전궤도에 설치한다. 그림 2는 궤도에 설치된

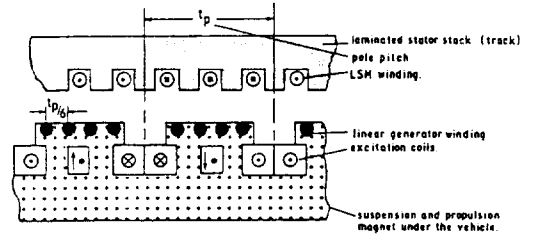


그림 4. 상전도자석과 전기자권선

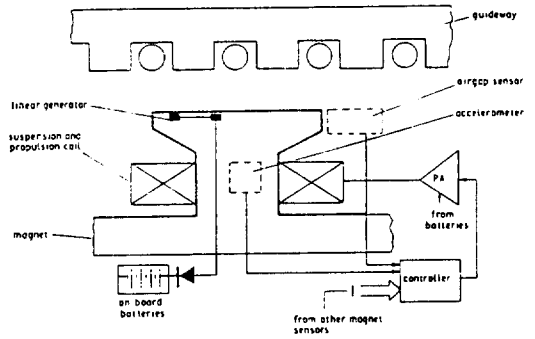


그림 5. 부상력 제어장치

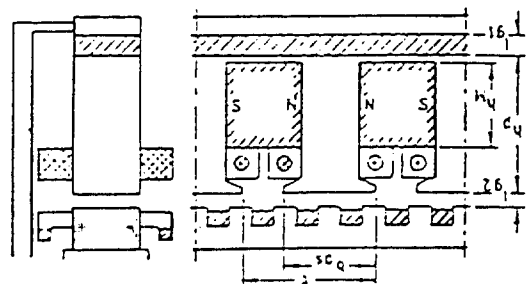


그림 6. 영구자석

전기자권선이다.

전기자권선에 인가되는 3상 교류전원의 주파수를 변화시키므로서 차량의 속도를 정시시로부터 최고 속도까지 연속적으로 조절할 수 있다. 뿐만아니라 전기자전류의 상회전방향을 반대로 해서 진행파의 방향을 거꾸로 하면, 추진력은 제동력으로 작용한다.

전 궤도에 걸쳐서 설치되어 있는 전기자권선은, 임의의 순간에 차량이 위치해 있는 부분만 전력이 공급된다. 이렇게 하면 권선저항에 의한 전력손실을

최소로 할 수 있다. 이와같은 전기자권선의 스위칭은 일정거리마다 설치되어 있는 변전소에서 행하고, 변전소의 용량은 구간의 특성에 따라서, 즉 정속주행구간이 가속구간인가, 혹은 경사구간인가에 따라서 서로 달라진다. 그림 3은 전기자권선여자의 개념도이다.

계자에는 상전도자석, 초전도자석 또는 영구자석을 사용한다. 상전도자석을 사용할 때에는 추진력을 증가시키기 위해서 전기자와 계자회로 모두에 철심을 사용하고 영구자석을 사용할 때에도 필요에 따라 철심을 사용하나 초전도자석을 사용할 때에는 공심으로 한다.

그림 4는 상전도자석과 전기자권선이 설치된 궤도이다. 이 구조에서는 계자권선이 만드는 자장과 전기자권선이 만드는 진행파와의 상호작용에 의해서 추진력과 부상력을 동시에 얻을 수 있다. 전자석은 N-S극을 교대로 설치해야 하고 공극이 변화하면 부상력이 신속히 변화하도록 해야 한다. 그림 4에서는 돌극형이고 종축형 계자로서 차량의 진행방향으로 자로가 구성된다.

계자용 자극의 표면에는 선형발전기(linear generator)가 설치되어 있어서 차량이 시속 150km까지 다다를 때와 시속 150km에서 정지할 때까지 소요되는 전력을 감당할 수 있으므로 주행중에 전력을 공급받는 집전 장치가 불필요하다.

상전도자석에 의해서 발생하는 부상력은 흡인력이다. 흡인력은 계자와 전기자의 거리가 가까워지면 증가하므로 불안정하므로 제어장치가 필요하다. 부상력을 피드 백제어하기 위해서 공극측정장치와 가속도측정장치를 사용한 제어장치가 그림 5이다.

계자에 상전도자석을 대신해서 영구자석을 사용해서 흡인력을 발생시키는 것이 가능하다. 영구자석만을 사용하는 것보다는 제어용 코일을 설치하는 것이 효과적이다. 제어용코일은 외란이 발생해서 정상 위치를 벗어난 이후에, 다시 정상위치로 돌아오는 데에 필요한 자속만을 발생시킨다. 제어용 코일의 기자력은 영구자석이나 상전도자석에 비해서 훨씬 작아도 되고 손실도 0.5[Kw/Ton]이하이다. 영구자석으로는 무게를 줄이기 위해서 강한 자장을 발생시키는 희토류계의 코발트등을 사용한다.

영구자석형에서도 선형발전기를 사용할 수 있다. 선형발전기는 위에서와 마찬가지로 슬로트구조파에

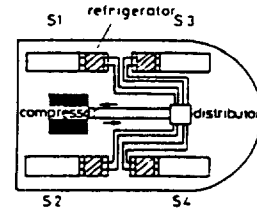


그림 7. 초전도자석

의해서 차량이 주행중에 전력이 발생할 수 있도록 다상권선의 형태로 해서 자극의 표면에 설치한다. 그림 6은 영구자석과 제어용코일을 사용한 구조이다.

위에서는 상전도자석과 영구자석을 이용해서 흡인력을 발생시키는 구조를 보였으나, 계자용으로 초전도자석을 사용하면 반발력을 이용해서 차량을 부상시킬 수 있다. 반발식 자기부상시스템에서는 지상에 전기자권선 이외의 별도의 단락코일 혹은 도체판을 설치한다. 차량이 주행하면 이 단락코일 혹은 도체판에 차량에 탑재된 자석에 의해서 와전류가 발생하게 되므로, 이 와전류와 열차에 탑재된 전자석과의 사이에 작용하는 반발력을 이용해서 부상한다.

이 방식은 제어가 필요없는 안정된 시스템이라는 것과 부상높이가 흡인식의 10mm 정도에 비해서 10배가 큰 100mm로서 안정성이 높다는 것이 장점이다. 그러나 저속운행시나 정지시에는 반발력이 충분치 않거나 발생하지 않으므로 보조차륜을 설치해야 한다는 단점이 있고 별도의 부상용 코일을 설치해야 한다. 부상높이가 높기 때문에 충분한 반발력을 얻기 위해서는 차량에 설치된 자석의 기자력이 커야 하므로 반발식에서는 초전도자석을 사용하고 있다. 그림 7은 계자로서 4개의 초전도자석 S1-S4를 사용한 구조를 보이고 있다.

### 3. LSM의 특성

LSM인 동기속도로 운전되기 때문에 슬립은 0이지만 그림 8. a)에서 볼 수 있는 바와같이 차량과 진행파 사이의 위치 차이에 해당하는 슬립각  $\theta$ 는 존재한다. 일반적으로 LSM에서 발생하는 추진력과 부상력은  $\theta$ 에 따라서 달라진다. 그림 8. b)에서와 같이  $\theta = 90^\circ$  일 때에는 부상력이 0이고 추진력이 최대가 된

다. 전기자권선을 여자하는 전류와 주파수를 바꾸므로서, 추진력이 최대가 된다. 전기자권선을 여자하는 전류와 주파수를 바꾸므로서, 추진력과 부상력을 폭넓게 조절할 수 있기 때문에, 가속, 감속 및 공극의 조절이 가능하다.

$\theta > 90^\circ$ 일 때에는 주파수를 고정시키고 운전하는 경우에는 동기상태를 벗어나서 탈조하게 된다. 즉  $\theta > 90^\circ$ 인 상태에서 운전하고 있는 중에 외란에 의해서 속도가 감소하게 되면 추진력이 따라서 감소하게 되고 이는 다소 속도를 감소시키게 된다.

그러나 LSM에서 주파수와 전압을 조절할 수 있으므로 피드백 제어를 통해서  $\theta > 90^\circ$ 로 운전하는 것이 가능하다. 실제로는 LSM은 역율을 증가시키기 위해서  $\theta > 90^\circ$ 인 범위에서 운전하는 것이 좋다.  $\theta > 90^\circ$ 가 되면 전기자 권선에 전류보다 위상이 앞선 전압이 유기되어 역율이 개선된다.

페이서도로서 LSM의 운전특성을 나타내면 그림 9와 같다. 그림 9는 독일의 Emsland에서 운행했던 RT-05의 경우로서, 무게가 170ton, 승차인원이 300명이고 시속 400km로 정속운행하고 있을 때이다. 전류  $I_a$ 가 작기 때문에 전기자전류에 의해서 발생하는 전압성분이  $X_a I_a$ 는 작고 이에 따라 유기전압  $E_{af}$ 는 공극전압  $E_{ag}$ 와 거의 같다.

일정전류에서 추진력이 최대가 되기 위해서는  $I_a$

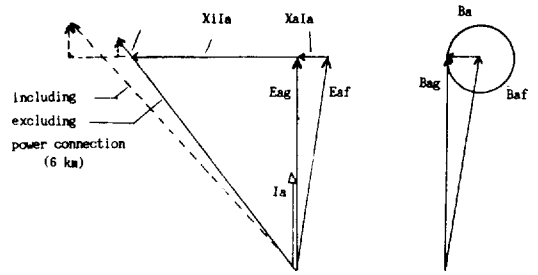


그림 9. LSM의 페이서도

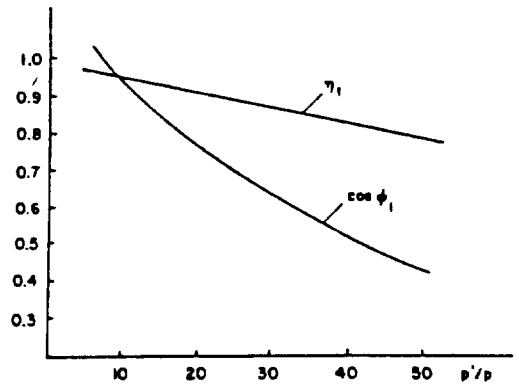


그림 10. 여자구간의 변화에 따른 효율과 역율

와  $E_{af}$ 의 위상이 같아야 한다. 전기자전류  $I_a$ 에 의해서 만들어지는 자장과  $B_a$ 는 계자에 의해 만들어지는  $B_{af}$ 와 합해져서 공극자속  $B_{ag}$ 를 발생시킨다. 그림 9에서는  $I_a$ 와  $E_{af}$ 가 거의 같은 방향이기 때문에 전기자전류가 합성자속에 미치는 영향이 적다.  $I_a$ 와  $E_{af}$ 의 각도가  $90^\circ$ 일 때에 전기자반작용의 영향이 최대가 되고 이 때에는 고장상태이다. 그러나 고장시에도 자속감소는 비교적 작다.

전압과 전류의 기본과성분만을 고려했을 때에 추진력  $F_x$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$F_x = 3 \frac{\pi}{\gamma} [M_{ff} I_q - (L_d - L_q) I_d I_q]$$

여기에서  $\gamma$ 는 극간격이고 나머지 기호는 회전형 동기전동기에서와 같은 의미를 갖는다.

$\theta = 90^\circ$ 로 해서 최대추진력을 발생시키는 경우에 전기자 여자구간(section)  $P'$ 과 차량 길이의 비율을

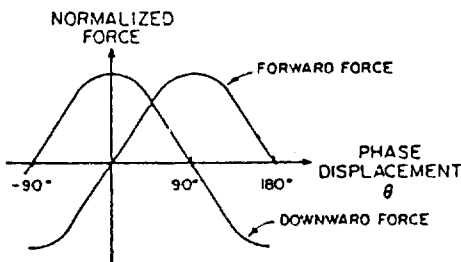
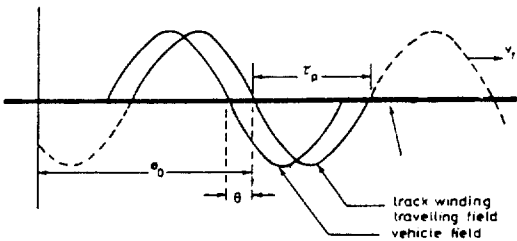


그림 8.  $\theta$ 의 변화에 따른 부상력 및 추진력

변화시켰을 때의 효율과 역율이 그림 10이다.

그림에서 보는 바와 같이 특성이 너무 나빠지지 않도록 하기 위해서는 여자구간을 차량길이의 30배 이내로 하는 것이 좋다. 따라서 길이가 42m이고 무게가 100ton인 차량의 경우에 여자구간은 1km~1.2km가 적당하다.

또한 LSM에서 발생하는 부상력  $F_n$ 은

$$F_n = \frac{B_f^2 \cdot 2p(1/3) \cdot y_{le}}{2\mu_0}$$

로서  $l_e$ 는 전동기의 횡방향의 폭이고 공극에서의 평균자속밀도인  $B_f$ 는 다음과 같다.

$$B_f = \frac{\mu_0 W_f I_f}{g K_c K_s}$$

#### 4. 각국의 응용사례

독일에서는 1971년에 Messerschmitt Bolkow Blohm(MBB)에 의해서 시속 90km로 주행할 수 있는 무게 6.5ton의 자기부상열차가 제작되었다. 이후에 Thyssen Henschel, Krauss-Mattei등이 협력하여

여러가지 형태의 자기부상열차를 시험 제작했다. 추진방식으로는 LSM, DLIM과 LSM을 연구했고 부상방식으로는 공기부양방식, 영구자석을 이용한 반발식, 초전도자석을 이용한 반발식 및 흡인식 등에 대해서 폭 넓게 연구했다. 현재에는 이중에서 Long stator방식의 LSM에 의해 추진되고 흡인식으로 부상하는 Transrapid계열에 초점을 맞추고 있다.

1979년 제작된 TR-05는 길이가 26m이고 무게가 36ton으로 75명의 승객을 싣고 시속 96km로 주행했다. TR-05의 성공에 힘입어서 32km의 시험궤도를 Emsland에 설치하고 TR-06을 1984년부터 운행하고 있다. TR-06의 전반적인 구조는 TR-05와 유사하고 길이가 27.4m 무게가 60ton으로 100명의 승객을 싣고 1988년에 시속 412.6km를 달성했다. 이는 유인으로 운전한 자기부상열차의 최고속도이다.

1989년부터는 Europa라고 이름 지어진 Tr-07을 제작해서 유료운행을 목표로 해서 시운전하고 있다. TR-07은 TR-06에 비해서 20ton 가벼워진 대신 최고속도를 시속 500km로 설계되어 있다.

Transrapid는 독일내에서는 물론이고 미국내의 로스엔젤레스-라스베가스 및 올란드 공항-디즈니랜드를 연결하는 선로를 건설하는 것을 추진 중이다.

그림 11은 TR-06의 단면도이다. TR-06에서는 전기자권선을 궤도의 아래쪽에 설치해서 외부적인 영

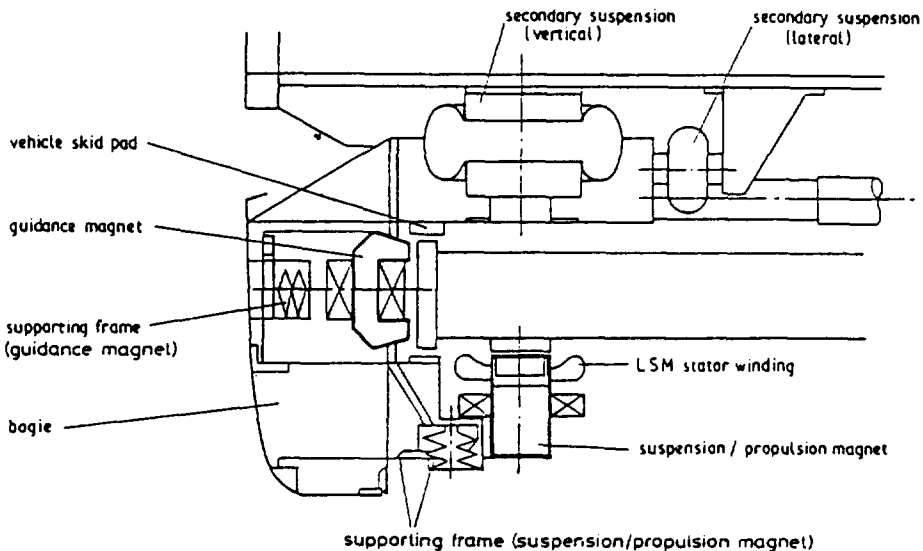


그림 11. TR-06의 단면도

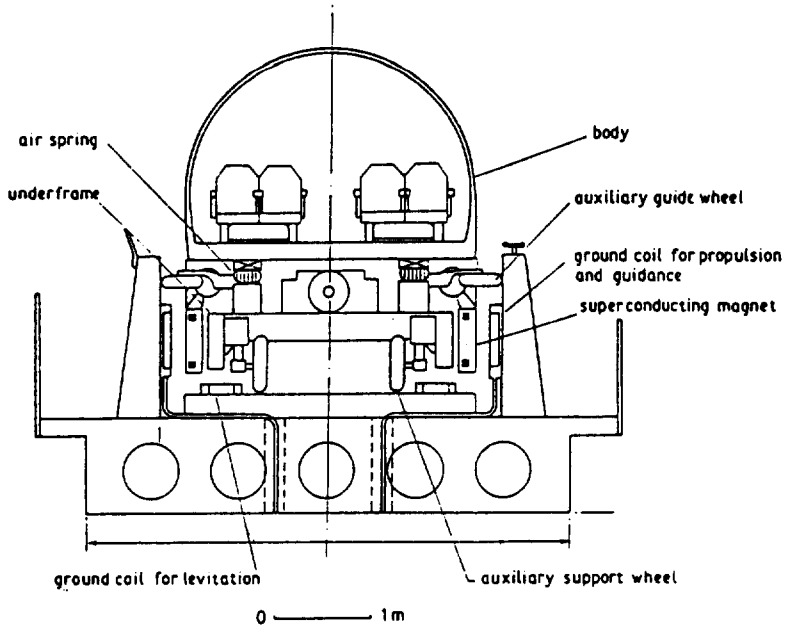


그림 12. MLU-002의 단면도

향을 적게 했고 제자권선과 전기자권선을 이용해서 추진력과 부상을 동시에 해결하고 있다. 좌우방향의 안내를 위해서 차량의 양쪽에 안내용자석을 따로 설치했다. 전기자권선의 여자를 제어하는 변전소는 32km마다 설치되어 있고, 차량의 위치에 따라 실제로 전력이 공급되는 부분은 1.6km마다 나뉘어져 있다.

일본에서의 자기부상열차연구는 크게 두 그룹으로 나누어서 행하고 있다. HSST Consortium에서는 LIM에 의한 추진과 상전도자석에 의한 EMS방식을 연구해 오고 있고, Japan Railway에서는 LSM에 의한 추진과 초전도자석에 의한 EDS방식을 개발하고 있다.

일본에서 제작된 LSM에 의해 추진되는 최초의 차량인 ML-500은 1979년에 시속 517km를 달성했고 이는 무인운전 최고속도로 기록되고 있다. ML-500이 무인운전이었던 데에 비해서 1982년에 유인운전용 MLU-001을 제작해서 시속 400km를 달성했다. MLU-001은 길이가 22m이고 무게가 17ton으로 3량이 연결되어 있다. ML-500까지는 역 T자형의 궤도를 사용했으나 MIU-001부터는 U자형의 궤도를 사용한다. U자형 궤도의 바닥에는 알루미늄으로된 부상용 단락코일이 2줄로 설치되어 있고 측면에는 추

진과 안내를 겸할 수 있는 코일이 매립되어 있다.

EDS방식에는 저속일 때에는 부상력이 충분치 않

표 1. TR-06과 MLU-002의 비교

구 분		TR-06	MLU-002
공극	부상	8mm	110mm
	안내	10	150
힘	추진	85KV	79.4KN
	부상	18.7	196
	안내	9	84
자석	전류	6000A	700KAT
	전압	400V	—
전기자	전류	1200A	900A
	전압	4.25KV	5.8KV
극 간 격		0.258m	2.1m
주 파 수		215Hz	28Hz
최대시속		400km	420km
승 객		192명	44명
크 기		54.2×3.7×4.2[m]	22×3×3.7[m]
무 게		102ton	17ton

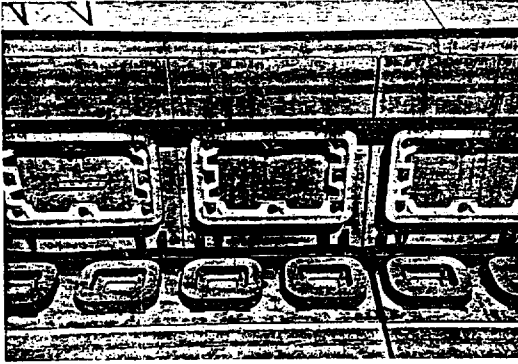


그림 13. MLU-002의 지상코일

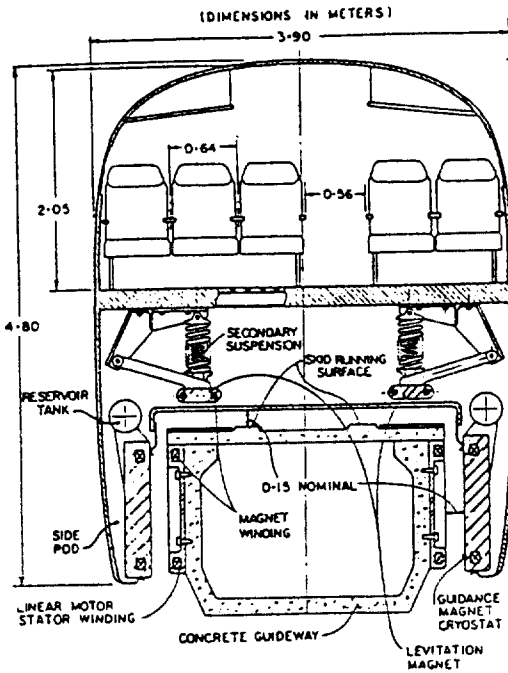


그림 14. 캐나다형 자기부상열차의 단면도

으므로 보조바퀴를 설치해야 한다. 차체의 4곳에는 고무로 된 보조타이어가 설치되어 있어서 저속운행시와 정지시에 사용하다가 시속 160km을 넘으면 차체속으로 넣는다. 차체의 옆에는 안내용 보조바퀴가 설치되어 있다.

추진용 지상코일에 공급되는 전력은 궤도의 중앙에 설치된 변전소에서 사이클로컨버터를 이용해서 코일 그룹별로 공급한다.

1987년에는 2량으로 편성된 MLU-002를 운행하고 있다. MLU-002는 무게가 10ton이고 길이가 26.5m로서 대체적인 구조는 MLU-001과 동일하나 초전도자석의 갯수를 8개에서 6개로 줄이는 등 성능을 향상시켰다.

LSM의 계자역할을 하는 초전도자석은 알루미늄으로 된 외벽, SUS로 된 내벽, FRP구조재, 초전도코일 및 영구스위치(persistent switch)로 구성되어 있다. 초전도선은 NbTi로 제작된 극세사심형으로서 필라멘트의 두께가  $23\mu\text{m}$ 이고 초전도자석의 중심자장은 6[T]이다. 초전도선의 동비를 1로해서 초전도선의 무게를 최소화했다. 차량에는 초전도자석을 초전도상태를 유지하기 위해서 헬륨액화기를 설치했다.

MLU에서는 반발식 부상방식을 채택하고 있으며, 안전한 시스템이고 따라서 부상을 위한 제어설비는 불필요하다.

그림 12는 MLU-002의 단면도이고 그림 13은 MLU-002 지상코일로서 차량의 아래쪽에 지상용 부상코일과 측면에 추진코일을 볼 수 있다.

TR-06과 MLU-002의 주요사양을 비교하면 표1과 같다.

캐나다에서도 일본과 마찬가지로 공심선형전동기에 의해서 추진되고 초전도자석에 의한 반발식 자기부상시스템을 채택하고 있다. 지금까지 발표된 캐나다형이 일본형과 다른 것은 일본에서는 부상용 지상코일로서 단락코일을 사용하는 데에 비해서 캐나다형에서는 지상에 알루미늄도체판을 설치하는 것이다.

캐나다에서 초기에 발표한 모델은 LSM코일을 중앙에만 설치한 것이 특징이다. 1982년부터는 그림 14와 같은 상자형 궤도의 양옆에 LSM용 전기자 권선을 설치한 모델을 연구하고 있다. 초전도자석은 추진과 안내를 겸하고 있다. 특히 전기자권선은 반대편에 설치된 전기자선권과 작용하여 null flux loop를 형성해서 제동력을 줄이도록 했다. 부상력을 발생시키기 위해서는 그림 14에서 볼 수 있는 대로 별도의 초전도자석을 알루미늄판을 향하는 차량의 아래쪽에 설치했다. 설계속도는 400~500km이고 차체의 길이, 폭, 높이는 각각 56.0m, 3.9m 및 4.8m이다.

저속용 자기부상열차로서는 독일의 M-Bahn이 대

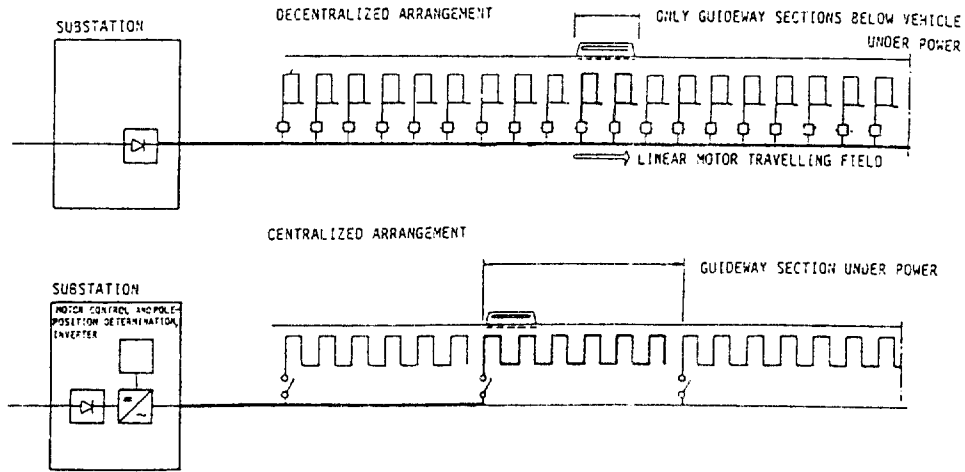
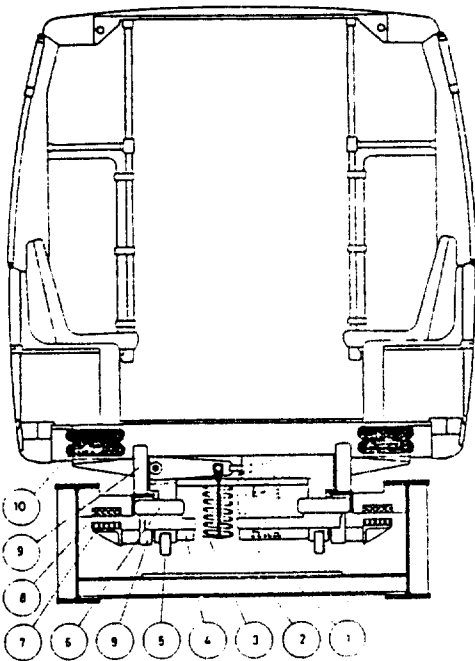


그림 15. 분산식 제어



- 1 guideway cross section
- 2 emergency escape path
- 3 primary suspension/airgap control
- 4 bogie
- 5 switch guidance wheels
- 6 horizontal guide wheels
- 7 permanent magnets
- 8 travelling field stator
- 9 vertical guide wheels
- 10 secondary suspension/air spring

그림 16. M-Bahn의 단면도

표적이다. M-Bahn의 철심형 장차 동기전동기를 이용해서 추진하고 있고 자석으로는 영구자석을 사용해서 차량의 무게를 최소로 했다. 차량은 연구자석에 의해 부상되고, 상하 및 좌우의 지지는 차량의 좌우 및 끝에 설치되어 있는 바퀴에 의한다. 공극의 제어는 기계적인 방법으로 행하는 부하시는 15mm 무부하시는 25mm이다.

M-Bahn의 특징은 궤도에 설치된 전기자권선을 중앙식이 아니라 분산식으로 여자한다는 것이다. 중앙식의 경우는 1.6km 정도의 구간을 변전소에서 여자하나 분산식의 경우는 한 구간이 2-6m 정도로서 전력손실을 줄일 수 있다.

또한 차량에 설치된 자석의 위치검출을 궤도에 설치된 위치검출기가 행하고 각 구간에 공급되는 전력은 각 구간에 따로 설치된 펄스 인버터를 사용한다. 한번에 여자되는 구간의 길이가 차량의 길이에 비해서 훨씬 적고, 여자구간은 마그네트가 위치하는 부분이다. 이 방식을 사용할 경우는 열차의 운행간격을 줄일 수 있다.

설계속도는 시속 80km, 길이는 12m, 승차인원은 최대 130명 이고 무게는 비었을 때가 9ton에 불과하다. 그림 15는 중앙식제어와 분산식제어의 개념을 보이고 있고 그림 16은 M-Bahn의 단면도이다.

1988년 6월부터 Berlin에 설치된 길이 1.6km의 궤도에서 공개운행을 하고 있고, 4개의 역이 있는 길이 1.8km의 환복선로의 Las Vegas에 건설하는 중이고 Frankfurt공항에도 M-Bahn을 설치하기로 결정했다.



## 5. 결 론

LSM은 다음 세대에 요구되는 초고속운송수단의 조건을 골고루 갖추고 있으므로 이에 대한 관심이 집중되고 있다. 이에 따라 초고속열차를 개발하고 있는 서독, 일본 등이 모두 LSM을 채택하고 있고, 도심에서 운행되는 중속의 운송수단으로까지 그 영역을 확대하고 있다. 특히 독일에서는 유료운행을 목표로 하고 있는 TR-07을 시험하는 중이고, 일본에서도 상업운전이 가능한 길이 45km의 야마나시실험선을 1994년까지 건설할 계획이다.

이와같은 추세는 자성재료의 발달, 효율적인 발달, 효율적인 전력변환방식의 개발, 성능이 우수한 초전도선 및 냉각시스템의 개발에 따라 더욱 가속화 될 것으로 예상되며, 경제활동영역의 증가에 따라서 더욱 빠른 교통수단이 요구되는 국가적인 필요성도 중요한 요인이 될 것이다.

세계적인 추세와 필요성을 감안할 때에 국내에서도 LSM에 대한 기초연구의 필요성이 높다고 생각된다.

## 참 고 문 헌

[1] 한 송엽, 차 귀수, "반발식 자기부상 시스템"대한 전기학회 전기기기연구회 심포지움, 1990년 5월, pp.39-46  
[2] P. Hartmann, "The High Speed Maglev System, TRANSRAPID", 한국고속철도국제심포지움, 서울, 1989년 10월  
[3] R. Friedrich, J.Eikermann and J. Ruppel, "The Synchronous Long-Stator Propulsion System for TRANSRAPID-Present State of Development", 11 th Int'l Conf. on MAGLEV, Yokohama, Japan, 1989,

pp.147-154  
[4] 한국전기연구소, 자기부상시스템의 수도권 교통수단 및 서울-부산 축에의 적용가능성에 대한 검토, 1988년 10월  
[5] K. Dreimann, "The M-Bahn Maglev Rapid Transit System, Status and Technological Development", Tenth Int'l Conf. on MAGLEV, Hamburg, FRG, 1988, pp.471-482  
[6] G.Bohn and H.Alscher, "The magnetic Train Transrapid 06", Int'l Conf. on MAGLEV, Vancouver, Canada, 1986, pp.47-52  
[7] P.K.Sinha, Electromagnetic Suspension Dynamics and Control, Peter peregrinus, London, 1987  
[8] I.Boldea and S.A.Nasar, linear Motion Electromagnetic System, John willey & Sons, 1985  
[9] H.Weih, "Linear Synchronous Motor Development for Urban and Rapid Transit Systems", IEEE Trans Magnetics, Vol. MAG-15, No. 6, 1979, pp. 1422-1427,  
[10] H. Weih and M. Shalaby, "Magnetic Levitation with Controlled Permanent Excitation," IEEE Trans Magnetics, Vol. Mag-13, 1977, pp. 1409-1411,  
[11] D.L.Atherton, "Design, Analysis and Test Results for a Superconducting Linear Synchronous Motor", Proc. IEE, Vol. 124, 1977, pp.363-372  
[12] R.D.Thorton, "Magnetic levitation and Propulsion", IEEE Trans. Magnetics, Vol. MAG-11, No. 4, 1975, pp.981-995  
[13] G.R.Slemon, R.A.Turton and P.E.Burke, "A Linear Synchronous Motor for High-Speed Ground Transport", IEEE Trans. Magnetics, Vol. MAG-10, 1974, pp.435-438  
[14] E.Levi, "Linear Synchronous Motor for High Speed Ground Transportation", ibid, Vol. MAG-9, 1973, pp.242-248