



# 자기부상열차 추진시스템에의 리니어모우터응용 추이

장 석 명\*

(\*충남대 공대 전기공학과 교수)

## 1. 서 론

자기부상열차의 세계적인 개발상황과 추진시스템의 應用推移를 보면, 편축식 유도형 리니어모우터(SLIM)가 매우 적합한 추진시스템으로 인정을 받아 널리 응용되고는 있으나, 近年에는 동기형인 리니어모우터인 LSM을 추진시스템에 채용하는 경향이다. 더 나아가 최근에는 LSHM이나 LSUM과 같이 推進/浮上을 單一장치에서 동시에 시행하는 하이브리드시스템을 개발하고자 하는 것이 주류를 이루어 가고 있다. 이것은 부상시스템과 추진시스템을 각각의 장치에 의하여 실시하는 종래의 방식에서 더욱 발전된 시스템이다. 이방식은 시스템의 경량화 및 부속장치등의 단순화등에서 매우 효과적인데, 오늘날 가공과 제어등 제반 기반기술이 발전함에 따라 이러한 모델의 설계와 제작및 제어가 가능해졌기 때문이다.

우리나라에서는 독일, 일본등에 비하여 늦게 개발이 시작된 만큼, 구조와 기술의 정도 등이 간단하고, 비교적 우리에게 익숙한 기술에 속하는 등, 여러 특징이 있는 SLIM을 추진시스템으로 선택하여 기술의 습득 및 know-how를 익히며 개발하고 있는 중이다. 이제 자기부상열차의 개발 및 응용에 관한 구체적인 세부계획을 본격적으로 세우는 등, 현재 단계에서 우리자체의 효과적인 추진 및 부상시스템의 개발을 검토확립을 해야 할 것이다. 이에 본 稿에서는 자기부상열차 추진시스템의 핵심인 리

니어모우터의 종류별 응용추이, 성능의 비교검토등을 통하여 효과적인 시스템의 선정 및 개발방향 설정에 참고자료를 제공하도록 한다.

## 2. 자기부상열차의 추진구동모우터의 종류별 응용과 성능비교

### 2.1 추진시스템과 리니어모우터

자기부상열차의 핵심기술은 추진, 부상, 제어가술로 요약이 된다. 그런데 推進시스템으로는 기어나 크레인 등의 機械的 變換裝置가 없어도 直接 直線推進이 가능한 리니어모우터가 필수적이다. 자기부상열차의 推進용 리니어모우터는 일반적으로 誘導型, 同期型 등이 응용되고 있다. 이제 초고속성, 쾌속성, 고신뢰성, 환경성등이 요구되는 次世代 교통수단으로 평가되고 있는 자기부상열차에서 가장 핵심요소인 추진드라이브인 리니어모우터의 연구개발은 필수課題가 되었다.

#### 2.1.1 리니어모우터의 구동원리 및 개요

리니어모우터는 19세기 중반에 발명되어 초기에는 섬유공업에서 방직기의 복으로 개발되어 사용되다가 1946년 미국 웨스팅하우스에서 리니어모우터를 이용하여 electropult라 하는 항공모함등에서의 비행기의 離. 着陸보조장치를 개발한 이후부터 여러분야에 리니어모우터의 응용이 시작되었다. 그러나 이론을 통한 체계적이며 합리적인 연구는, 1950

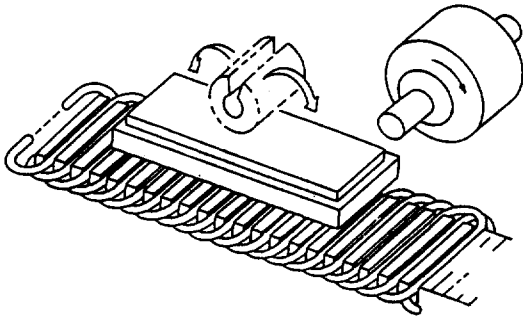


그림 1. 리니어 모터의 개념과 구동원리

년대에 들어서면서 영국의 Laithwaite 교수로부터 시작되어 현재까지 괄목할 만한 성과를 거두며 발전해 왔다. 지금은 각종 연구결과들을 기본으로 하여 각종 自動化 시스템분야에서 핵심구동장치로의 응용개발이 날로 확대되고 있다. 리니어모터는 그림 1과 같이 일반 회전형 모터를 축방향(그림의 화살표방향)으로 잘라서 펼쳐 놓은 형태이므로, 기존의 일반 모터가 회전형의 운동력을 발생시키는 것에 비해 리니어 모터는 직선방향으로 미는 힘인 推力을 발생시키는 점이 다르나 그 구동원리는 근본적으로 같다고 볼 수 있다. 그러나 회전형 모터는 회전방향으로 無限連續운동을 하지만 리니어 모터는 구조적으로 길이가 유한하여 端部가 존재하므로 end effect가 있게 되며, 또한 공극이 커서 공극의 자속분포, 추력특성등에 있어서 영향을 크게 받아 斷機로는 효율이 좋지 못하다.

그러나 리니어 모터는 회전운동을 하는 일반 회전형 모터에 비해 직선 구동력을 직접 발생시키는 특유의 利點이 있으므로, 직선구동력이 필요한 시스템에서 회전형에 비해 절대적으로 우세하다. 즉 직선형의 구동시스템에서, 회전형 모터에 의해 직선구동력을 발생시키고자 하는 경우에는 그림 2와 같이 스크류, 체인, 기어시스템등의 기계적인 에너지 변환장치가 반드시 필요하게 되는데, 이때 마찰에 의한 에너지의 손실과 소음발생이 필연적으로 수반되므로 매우 불리하게 된다.

그러나 리니어모터를 응용하는 경우는 직접 직선형의 구동력을 발생시키므로 기계적인 변환장치가 전혀 필요치 않아 복잡하지 않으면서도 에너지 손실이나 소음을 발생하지 않고 운전속에서도 제한

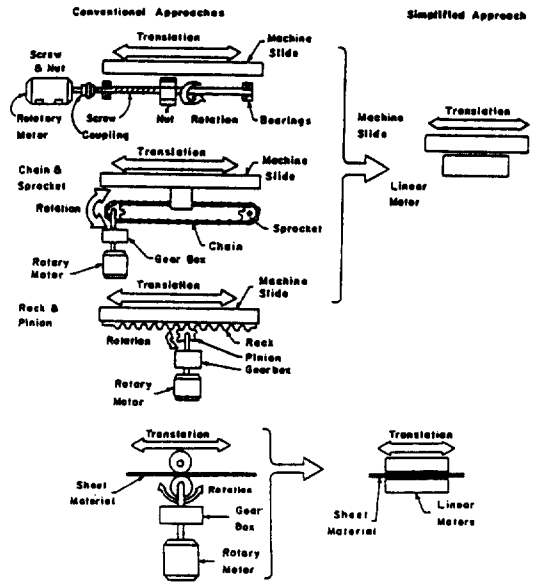


그림 2. 회전형과 리니어 모터에 의한 직선구동력 발생비교

을 받지 않는 등의 특유의 잇점이 있다. 따라서 회전형에 비해 계통의 효율적인 운전과 기능에 있어서 절대적으로 유리하다. 그러므로 오늘날에는 육상운송계통에서의 자기부상열차나, 대규모의 고장이나 산업시설에서의 컨베이어시스템, 승강기, 크레인, 자동문등 광범한 분야에서의 산업시스템에 필수적인 직선형 구동장치로 응용개발되고 있다. 한편으로 오늘날 인간생활의 편리함의 추구로 인하여 HA, OA, FA등 각 분야에서 자동화가 활발하게 진행되고 있는 바, 이 경우의 각종 서보시스템에서 직선형 구동장치로 리니어모터의 응용이 필수적으로 되고 있으며, 장차 그 필요성은 더욱 커질 것이다. 참고로 리니어모터가 구동시스템에서 응용되는 경우 회전형 모터에 비해 매우 유리한 利點을 갖는데, 결점과 함께 이를 요약하면 아래와 같다. 즉

- 1) 공극을 사이로 하여 가동부와 고정부가 비접촉식 구동을 하므로 마찰이 없으며, 소음도 없다.
- 2) 기어, 벨트등 기계적인 변환장치가 필요없다.
- 3) 구조가 간단하며, 신뢰성이 높다.
- 4) 보수점점이 용이하다.
- 5) 큰 가속도로의 운전이 가능하다.

6) 원심력에 의한 가속제한이 없고 초고속운전이 가능하다.

7) 가동부와 고정부사이의 공극을 일정하게 유지하기 위한 지지기구가 필요한데, 구조적으로는 비교적 까다로우면서도 매우 중요하다.

8) 單機로서는 회전형에 비해 역률, 효율이 낮다.

### 2.1.2 종류에 따른 구조와 특징

#### (1) 리니어모우터의 종류

리니어모우터는 그림 1에서와 같이 일반 회전형 모우터를 펼쳐 놓은 형태이다. 따라서 그 원리에 따른 종류의 분류는 회전형의 경우와 거의 유사하게 되는데 이를 요약하면 아래와 같다.

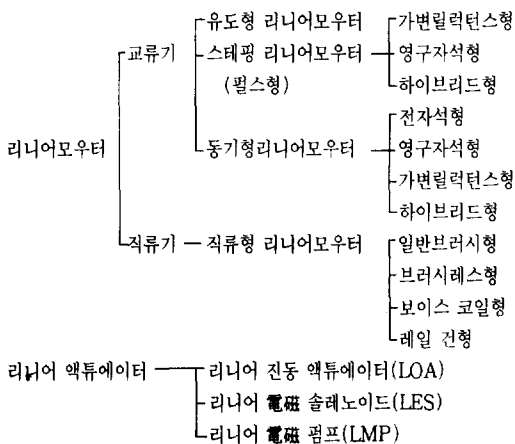


그림 3. 리니어모우터의 종류

(2) 리니어모우터 지지기구의 종류와 응용 예  
 각종 리니어모우터를 구동시스템에 응용하는 경우 가동자를 일정크기의 공극으로 지지하기위한 시

표 1. 리니어모우터의 지지기구의 종류와 응용 예

지지기구	방 식	기 종	응용 예
기계식	롤 러 롤 러 리니어 슬라이드	LPM LIM LOA	전자프린터(일)등 팔렛반소(일,독)등
공기식	靜壓슬라이더	LPM LIM	자동제대기(미) 클린룸 반송(일) 공작물운반(독)
자 기 부상식	흡인제어 초전도반발	LSM	자기부상열차, 자기베어링 등

스템이 필요하다. 설령 리니어모우터가 우수한 특성을 가진다 하더라도 지지특성이 나쁘면 제어의 곤란, 신뢰성, 가격면에서 결정적으로 불리하게 되므로 지지방법은 매우 중요하다. 현재 일반적으로 행해지고 있는 방법은 롤러등을 쓰는 기계식, 공기식, 자기부상방식등이 있다. 이를 표로 나타내면 표 2.1과 같다.

### 2.2 세계적으로 개발되고 있는 자기부상열차의 추진시스템

세계 각국에서 개발된 리니어모우터를 추진장치로 응용한 신교통시스템을 정리하여 소개한 참고문헌(10)에 따르면, 상전도 흡인형 LSM의 특징은 대부분 1970년대 중반이후 시작하는 경우에 선호경향을 보이는데 모우터 자체에서 추진력은 물론 부상력도 동시에 발생하는 것이 특징인 시스템이다. 이 경우 독일의 트랜스래피드는 물론이고, 미국의 보잉항공사가 개발한 LSUM(linear synchronous unipolar motor) 시스템이 대표적인 경우이다. 최근에는 독일과 일본은 실용화선로의 건설을 구체화하여 추진중이고, 미국, 이탈리아 등에서는 초전도와 상전도등에 의한 하이브리드 자석에 의한 추진/부상시스템을, 정부의 대규모 지원을 바탕으로 하여 경쟁적으로 개발을 하고 있다.

#### 2.2.1 시스템의 구성분류

세계적으로 개발되고 있는 자기부상열차의 종류는 추진 및 부상방식에 따라 아래와 같이 9가지 정도로 종류를 분류할 수 있다. 즉,

##### 1) 추진 : LIM

지지 : 바퀴

응용예 : 캐나다 100[km/h]정도의 도시형열차(ALRT), 밴쿠버, 토론토, 미국의 디트로이트 People Mover(DPM), Pueblo시험센터의 LIMRV, TLRV, 듀크대학병원, 델레스공항, 시애틀, ROMAG시스템  
 일본의 Linear Metro, 오사카12호선, 동경 7호선,

##### 2) 추진 : LIM

부상 : 상전도 전자식

응용예 : 영국 버밍햄공항, Landspeed, Imperial대

학, Sussex대학등

일본의 HSST 01-05, CHSST, EML시스템  
한국의 국책사업단, 현대정공, 대우중공업,  
한양대학교

- 3) 추진/부상 겸용 상전도흡인식 LIM
- 4) 추진/부상 겸용 상전도흡인식 LSM
- 5) 추진 : LSM  
지지 : 바퀴  
응용예 : 독일의 M-Bahn
- 6) 추진 : LSM  
부상 : 초전도 전자식(반발식)
- 7) 추진/부상 겸용 초전도반발식 LSM  
응용예 : 일본의 MLU  
캐나다의 Toronto-Detroit軸,  
미국의 벡텔, Foster-Miller, Magne Plane시스템
- 8) 추진/부상 겸용 상전도흡인식 LSM, Homopolar

/Hetero polar형 LSM .

- 응용예 : 독일 Transrapid, Braunschweig 대학  
루마니아 Magnibus  
미국, 영국, 캐나다, 독일  
대부분 상전도 흡인형 LSM의 특징은 1970년대 중반이후 시작하는 경우에 선호 경향을 보이는데 모우터 자체에서, 추진력은 물론 부상력도 발생하는 시스템이다. 이경우 Transrapid는 물론이고 미국의 Boeing항공사, Rohr사등이 개발한 LSU-M(linear synchronous unipolar motor)등이 대표적인 경우이다.
- 9) 추진/부상 겸용, 상전도/초전도 병용 전자석형 LSM  
응용예 : 미국의 Grumman항공사시스템, 이탈리아 PFT2

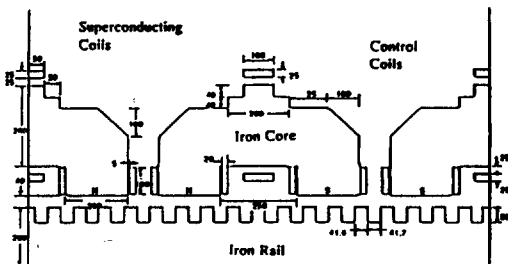
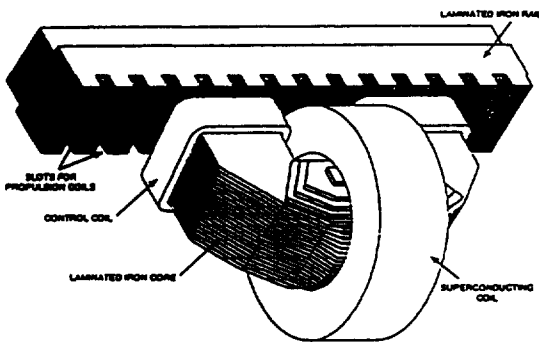


그림 4. 최근 미국의 Grumman 항공이 개발하는 초전도와 상전도자석을 병용하여 추진과 부상을 單一장치에서 동시에 발생시키는 시스템의 개념도

다음의 그림 4은 최근 1992년도부터 개발되고 있는 미국 고유의 자기부상열차 중의 한 종류로 Grumman항공사의 시스템이다. 이 모델은 초전도자석과 상전도자석을 병용하는 것이 특징으로 그림 4와 같이 차량에 직렬로 배열하여 추진력과 부상력을 동시에 발생시키는 시스템의 한 예이다.

## 2.3 리니어모터의 추진시스템으로서의 성능 비교

### 2.3.1 종류별 성능비교

앞절에서 언급한 바와 같이 리니어모터는 그 종류 및 형식에 따라 성능이 매우 다르다. 종류별로의 제반조건과 일반적인 응용예등을 아래의 표 2와 같이 정리한다.

한편 유도형, 동기형, 직류형에 따른 특성의 장단점 및 응용예를 정리하면 아래의 표와 같다.

따라서 자기부상열차나 리니어메트로, People Mover, 경전철등의 추진장치로 리니어모터를 응용하고자 할 때는 유도형, 동기형, 직류형등의 종류에 따른 특성을 고려하여야 하는 데 이를 위하여 아래와 같이 요약하여 표 6으로 정리하기로 한다. 즉 모우터의 종류에 따라 발생추력밀도, 제어성, 효율, 힘/중량, 신뢰성을 高, 中, 低급의 세등급으로 판정하여 정리한 것이다. 표에서 Transrapid 에서 채택하고 있는 방법과 매우 유사한 LSHM이 제어

표 2. 리니어모우터의 종류별 응용특성

	連續直線運轉	間歇直線運轉	小變位往復運轉	大變位往復運轉	位置決定性能	大推力化	低速運轉	高速運轉	開루프制御性	垂直運轉	可動子構造의簡易化	電源制御回路의簡易化	價格	支持機構의負擔	停電對策	摘要
LIM	◎	△	△	◎	△	◎	○	◎	○	△	◎	◎	◎	◎	×	大出力連續 高速搬送, 輸送用
LDM	△	◎	◎	△	◎	○	○	○	×	△	△	○	△	○	△	小變位高速 位置決定制御用
LPM	○	◎	◎	○	◎	○	◎	△	◎	○	△	○	△	△	○	低速大出力, 間歇運轉, 位置決定制御用
LOA	×	×	◎	×	×	△	×	×	○	-	○	○	○	△	×	小變位往復運動 (送出機構)
LES	×	×	○	×	△	×	×	×	○	-	○	◎	◎	◎	×	送出保持機構
LEP	◎	△	×	○	×	×	○	×	○	○	×	◎	△	△	×	液體金屬搬送
LSM	◎	○	△	◎	△	◎	△	◎	×	△	△	△	△	○	○	高速輸送用

◎ : 最通 ○ : 適 △ : 약간不適 × : 不適

표 3. 리니어모우터의 종류별 특성비교표

比較항목	誘導형 리니어 모우터(LIM)			直流형 리니어모우터	同期형 리니어모우터	스텝(펄스) 리니어모우터	솔레노이드	회전모우터 + 나사
	양측식	편측식	원통형					
운전용전원	일정전압, 주파수 또는 가변교류			DC서보전원	일정 전압 가변주파수	펄스	일정전압의 교류	일정전압의 교류
스트로크	cm-∞	cm-∞	cm-m	μm-∞	mm-cm	μm-2m	15mm	3m
기동추력 N	50-800	100-450	5-320	2140		20-600	0.2-50	
추력 kgf	0.1-수천			-20	-1	-50	-20	수 ton
속도 m/s	0.1-10			0.3-2	-0.5	0.3-2	1	-0.5
停止精度	± 3mm			± 3μm		± 30μm		± 1mm
부하증량	- 수 ton			-50kg	-10kg	-50kg		-수ton
추력/입력 N/kw	0-130	0-50	0-80	80-700		500-3000	20-1000	
추력/중량 N/kg	10-20	9-18	2-30	2-30		20-30	10-70	
추력/체적 N/m³	35-90	30-70	20-40	10-30		400	70-350	
제어방식	폐루프			폐루프		開루프 폐루프		

비교항목	誘導형 리니어 모터(LIM)			直流형 리니어모터	同期형 리니어모터	스텝(필스) 리니어모터	솔레노이드	회전모터 + 나사
	양측식	편측식	원통형					
제 환 요소	변위신호			변위신호 (속도, 가속도, 전류)		개루프시는 불필요, 변위신호		
제 어 요소	전압, 주파수			전압(전류)		주파수 pps		
위 치 결 정 방 식	역상제어이용, 별도의 전기적, 기계적장치 이용			可動子の 위치신호를  변환하여 목표치에서 벗어나면, 변위에 따라 전압의 극성을 바꾸지 않고 제어		목표거리에 대응된 필스 수만 공급		

표 4. 유도형 리니어모터(LIM)의 성능과 응용 예

리니어 모터 종류	장 점	단 점	주요응용분야
유도형 리니어 모터 (LIM)	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 평판구조가 가능</li> <li>* 일정공극의 유지가 쉽다</li> <li>* 被구도체의 일부를 2차측으로 하여 응용가능</li> <li>* 구조물, 레일등을 2차도체로 하여 응용가능</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 편측식은 양측식에 비해 추력이 작다</li> <li>* 2차측이 자성체로 구성되면 추력의 10배이상 흡인력 발생</li> <li>* 양측식은 편측식에 비해 구조가 복잡하다</li> <li>* 공극을 일정크기로 유지해야 함</li> <li>* 서보성이 양호하지 못함</li> <li>* 위치결정 精度가 낮다</li> <li>* 위치결정시 發熱이 된다</li> <li>* 변위의  변환이 필요하다</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>각종 반송장치, 자동문, 권선감는 장치, 압출기, 스크류프레스, 고속열차</li> </ul>
* 편판형 { 편측식 { 양측식			
* 원통형 (tubular, cylindrical)	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 편측식에 비해 추력이 크다</li> <li>* 2차측이 A1만으로도 가능하여 간단</li> <li>* 관성이 작게할 수도 있음</li> <li>* 交流機와 같은 제어가 가능함</li> <li>* 대출력, 大起動力 발생</li> <li>* 보수유지가 용이</li> <li>* 고속운전이 가능함</li> </ul>		

표 5. 동기형 리니어모터(LSM)의 성능과 응용 예

리니어 모터 종류	장 점	단 점	주요응용분야
동기형 리니어 모터 (LSM)	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 定速으로의 주행이 가능함</li> <li>* LIM에 비해 효율과 역율이 매우 좋음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 속도변화를 위해서는 주파수변환기가 필요</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>소고속열차, 레코드 플레이어, 회전광고탑</li> </ul>

표 6. 추진용 모우터의 종류별 성능비교표

Motor 종류	발생추력밀도	제 어 성	효 율	힘/ 중량	신뢰 성
DC homopolar	低	양호	低	高	低
DC brushless	低	不良	高	低	高
LSM	高	양호	中	中	中
LSHM	中	양호	高	高	中
LSRM	中	양호	中	中	高
DSLIM	高	양호	中	中	高
SLIM	中	양호	中	中	高

참고 : LSM : linear synchronous motor(동기형)  
 LSHM : linear synchronous homopolar/heteropolar motor(동기형)  
 LSRM : linear synchronous reluctance motor(동기릴럭턴스형)  
 DLIM : Double sided induction motor(유도형양측식)  
 SLIM : Single sided induction motor(유도형편측식)

표 7. 저속형 LSHM, LSRM, LIM의 성능, 제작비등의 비교분석

설 계 그 림	Bath대학	Manchester대학	Nottingham대학	Sussex대학	Bath대학
Motor 종류	횡자속형, Homopolar LSM	Zig-zag 형, Homopolar LSM	횡자속형, Homopolar LSM	Segmented rotor형 LRM	가변주파수형 LIM
차량배치	코너에 1대씩	코너에 2대씩	코너에 1대씩	코너에 1대씩	1대
1 Motor의 정격:					
속도, m/s	12	12	12	12	12
추력, kN	1.1	1.1	1.1	1.1	4.4
공극, mm	10	10	10	10	10
역율	0.95	0.6	0.746	0.232	0.7
효율	0.83	0.83	0.85	0.8	0.6
최대공극자속밀도, T	0.65	0.64	0.25	0.50	0.6
운전중 온도상승, °C	100	45	95	80	-
운전중					
1차측전류밀도, A/mm <sup>2</sup>	6.2	5.5	5.9	4.1	5.5
운전중 계자권선					
전류밀도, A/mm <sup>2</sup>	6.2	5.9	5.0	-	-
차량당의 공급전원:					
최대파수, Hz	133	53	50	50	62.5
전기자전력, kVA	66	111	89	284	175
계자전력, kW	8.8	9.6	30	-	-
차량당의 중량:					
機械, kg	620	630	988	540	450
트레 질, ton/km	32.6	76	51.6	29	31.5
트레 알미늄, ton/km	-	-	-	-	3.6
차량당의 코스트:					
機 械	300만원 /km	390만원 /km	625만원 /km	312만원 /km	480만원 /km
트 레	2,200만원 /km	9,900만원 /km	3,400만원 /km	1,900만원 /km	2,640만원 /km

성, 효율, 힘/중량면에서 매우 우수함을 볼 수 있으며, HSST와 자기부상열차사업단과 '93EXPO에서 채택하고 있는 SLIM은 발생추력밀도, 제어성과 신뢰성에서 우수함을 볼 수 있다.

다음 표 7, 표 8은 영국의 Bath, Manchester,

Nottingham, Sussex대학에서 속도 12[m/s], 추력 1.1[kN], 공극 10[mm]의 같은 조건의 시험장치를, LSHM과 LSRM, LIM등 여러가지로 제작하여 성능 및 제작비등을 비교한 자료이다. 效率면에서는 LSHM이나 LSRM이 0.8이상이어서 0.6정

표 8. 고속형 LSHM, LIM, LRM의 성능, 제작비 비교표

설 계 그 룹	Bath대학	Bath대학	영국 철도 연구소
Motor 종류	평자속형, Homopolar LSM	가변주파수형 LIM	Segment Rotor형 LRM
Motor의 수	8	2	4
1 Motor의 정격:			
속도, m/s	112	112	112
추력, kN	4.1	17.5	4.6
공극, mm	10	10	15
역율	0.95	0.52	0.18
효율	0.93	0.82	0.94
1차측전류밀도, A/mm <sup>2</sup>	7	5.5	2.5
계자 전류밀도, A/mm <sup>2</sup>	7	-	-
차량당의 공급전원:			
최대주파수, Hz	200	200	140
전기자전력, kVA	4.4	9.1	14.8
계자전력, kW	100	-	-
차량당의			
중량(ton)	32	40	45
機械, kg	6,750	4,550	5,600
트랙 철, ton/km	178	51.4	39
트랙 알미늄, ton/km	-	-	-
차량당의 코스트:			
機 械	1,000만원/km	1,130만원/km	960만원/km
트랙	11,600만원/km	4,030만원/km	4,160만원/km

표 9. LSHM과 LIM의 특성비

	LSHM	LIM
Motor갯수, m	2.35*0.65*0.18	1.9*0.52*0.1
중량, kg	1410	422
가이드웨이 깊이, mm	80	30
최대수직력, kN	90	25
역율*효율	0.92-0.94	0.4-0.42
인버터용량, kVA	200	325
첨두전력수요, kWh/km	5.4	9.6
내대의 차량으로 구성된 열차에 필요한에너지, MW	1.26	1.58

도인 LIM에 비해 매우 좋으므로, 추진시스템이 소형화되고 에너지소모도 적고 인버터등의 電力供給 시스템도 대폭 작아도 되어 경제적이 된다. 한편 리니어모우터의 제작비와 트랙의 제작비면에서는 LSRM이, 리니어모우터의 중량이나 트랙에 필요한 철의 중량만으로는 LIM이 매우 유리하다.

또한 표 9와 표 10에서도 LSHM(linear syn-

표 10. 리니어모우터의 종류별 성능비교

	유도형 (LIM)	인덕터형 (LHSM)	CLAW POL- E형 LSM
출력(KW)	1,365	3,287	3,137
선간전압(L-N)	599	600	600
상전류(A)	2,000	2,075	2,075
입력 KVA	3,591	3,735	3,735
역률	0.58	1.0	1.0
효율	0.67	0.88	0.84
효율*역율	0.39	0.88	0.84
주파수(HZ)	173	394	183
속도(km/h)	400	400	400
추력(N)	12,300	29,538	28,190
모터 중량(kg)*	1,665*	1,145*	6,475
편측식 모우터 길이(M)	7.6	4.5	4.9
적층폭(M)	0.25	0.31	0.14
공극면적(M <sup>2</sup> )	1.9	1.4	0.7
공극(cm)	1.1	1.5	1.5
트랙중량(kg/m)	-	86	262
전류밀도 Ka(A/m)	1.69×10 <sup>5</sup>	0.83×10 <sup>5</sup>	0.76×10 <sup>5</sup>
전류밀도 Ji[A/cm <sup>2</sup> ]	1,800	1,832	1,832
공극 자속밀도[T]	-	0.81	0.75
출력/중량(kw/kg)*	0.80*	2.9*	0.48
추력/중량(N/kg)*	8.1*	25.8*	4.4
최대 수직력(N)	-	1.1×10 <sup>5</sup>	5.7×10 <sup>5</sup>

\* : 2차측 레일의 중량을 포함하지 않은 경우임

chronus homopolar motor)과 LIM의 특성을 비교한 자료이다. 두 표에서 LSHM은 수직력이 매우 크게 발생하므로 추진과 부상을 동시에 할 수 있는 시스템임을 볼 수 있으며, 역율과 효율은 0.9이상 이어서 0.6이하인 LIM에 비해 매우 좋은 것을 볼 수 있다. 따라서 인터버등의 전력공급시스템의 중량이 매우 감소되는 등의 좋은 효과가 있다.

### 2.3.2 종류별 응용특성

#### (1) 에너지소모

그림 5는 미국의 Rohr사와 보잉항공사에서, 경전철을 포함한 바퀴/레일식 열차, LIM추진 자기부상열차, 그들이 개발한 unipolar형 LSM인 LSUM에 의한 추진/부상을 하는 자기부상열차의 에너지 소모에 대해 각 최대속도별로 비교검토한 자료이다. 전 속도범위에서 LSUM추진식이 LIM추진식, 고무바퀴/레일식 등에 비해 효율이 매우 우수하여 에너지소모량이 매우 적은 것을 볼 수 있다. 2.0kw/ton 과 1.5kw/ton곡선은 같은 LIM을 공극이 각각 11mm, 8mm에서 운전할 때의 에너지 소모에 대해 조사한 것이고, 1.5kw/ton 곡선은 공



표 11. 독일의 자기부상열차기술개발과 시스템의 변천

년도	명칭	지지 방식	추진 방식	속도 (km/h)	총중량 (ton)	선로길 이 km	편성 (대)
1970	TR 01	EMS	LIM	시 험 용 모 델			
1971	MBB	EMS	LIM	90	5.8	0.66	1
1972	TR 02	EMS	LIM	164	11.3		1
1972	TR 03	Air Spring	LIM	140	10.0		1
1974	TR 04	EMS	LIM	253.2	20.0	2.4	1
1974	MBB 2	EMS	LSM	36.0	2.5	0.1	1
1974	EET 01	EDS	LIM	140	17.0		1
1975	LSV301	EMS	LSM	20.0	2.2		1
1976	KOMET	EMS	로켓	401.3	8.8	1.3	1
1977	EET 02	로부플	LSM	230.0	14.0		1
1977	TR 04	EMS	LIM	253.2	20.0	2.3	1
1979	TR 05	EMS	LSM	90.0	36.0	0.9	2
1982	TR 06	EMS	LSM	400.0	122.0	31.5	2
1988	TR 06	EMS	LSM	412.6	122.0	31.5	2
1988	TR 07	EMS	LSM	400	80.0	31.5	2

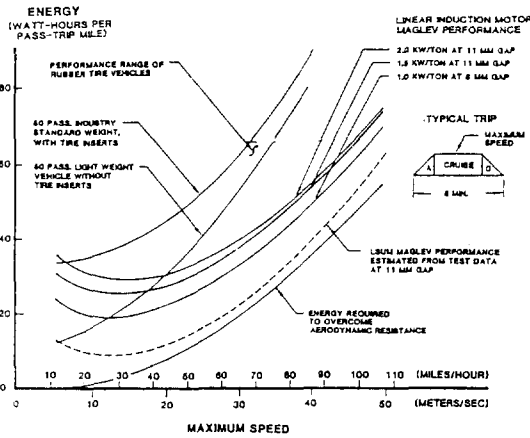


그림 5. 고무타이어식, LIM/LSUM식 자기부상 열차의 에너지 소비비교

극이 Hover에서 저속 dynamic 시험에 사용된 LIM을 공극 11mm에서 운전한 경우이다.

(2) 전력공급시스템

LSM의 경우는 역율이 거의 1정도로 매우 좋기 때문에 역율이 0.5-0.6 정도인 LIM에 비해 같은 추력을 발생시키는 경우에 전력공급시스템은 소형으로 축소되어 경량화된다.

(3) 제작비

LSM의 1차축은 3상교류를 인가하여 이동자계를 발생시키고, 직류권선을 시행하거나 영구자석을 설치하므로 제작비는 LIM식보다 더 비싸진다. 그러나 LSM식은 2차축 레일이 Notch형, Segment형 등으로 되기 때문에, 매우 간단하고 자재도 훨씬 적게 소요되므로 LIM의 경우보다 작다. 또한 전력반도체 스위칭장치의 계속적인 가격인하에 의하여 경제적으로도 유리해지고 있다.

(4) 중량 및 단면

LSM의 경우는 1차축의 철심이나 권선이 많고 복잡하기 때문에 LIM보다 더 무겁고 단면적도 크다. 그러나 LIM의 경우는 부상/안내용 전자석이 별도로 있어야 하기 때문에 전자석의 무게를 추가해야 하므로, 시스템 전체로서는 LSM이 중량이나 단면적에서 불리하지 않다.

2.4 추진시스템에서의 리니어모우터 응용推移 분석

독일과 일본의 자기부상열차의 개발과 시스템의 변천연혁은 아래와 같다.

현재 독일과 일본은 세계적으로 가장 앞선 기술 개발국으로, 장거리 시험트랙을 설치하고 실제 운용상태 그로의 주행시험을 실시하고 있어 자기부상 열차개발에서 가장 첨두의 기술적인 know-how와 개발실적을 확보하고 있는 나라들이다. 독일과 일본의 공통점은 초기에는 유도형 LIM으로 시작하였다가 70년대 중반이후 동기형인 LSM 추진시스템으로 바뀐 점이다. 즉 獨逸은 Transrapid-0.5부터는 LSM으로 추진과 부상을 單一體에서 同時에 이루어지게하는 부상 시스템으로, 日本은 초전도 반발식 부상과 LSM추진, 흡인식 부상과 LIM추진식으로 2원화하여 개발하고 있다. 이것은 고속주행시 전력을 차량에 공급하는 集電문제의 어려움과, 전력변환기를 차량에 탑재하지 않음으로써 경량화를 실현하고자 하는 효과를 종합적으로 고려하여 시도한 것이다. 그런데 상전도흡인식 유도형 리니어모우터(LIM)를 추진시스템으로 하는 日本의 HSST시스템은 현재 우리나라가 기본모델로 하여 개발하고 있는 것으로, 本來는 獨逸의 初期자기부상기술을 導入하여 계속 발전시켜 오사카, 벵쿠버 등에서의 EXPO 전시운행을 거쳐서 저속/중속/

고속용으로의 실용화 개발을 위하여 시험트랙을 설치하고 있는 중이다.

### 3. 결 론

자기부상열차의 추진시스템으로 일반적으로 응용되고 있는, LIM과 LSM에 관한 관련자료들을 검토하여 볼 때 아래와 같은 결론들을 얻을 수 있다. 즉

- 1) LSHM은 제어성, 효율, 힘 /중량면에서 매우 우수하고, LIM은 제어성과 신뢰성면, LSHM에 비하여 기술의 단순성에 의한 가공비와 유지보수비가 저렴한 측면에서 유리하다.
- 2) 효율면에서는 LSHM이나 LSRM이 LIM보다 유리하지만 리니어모우터의 제작비와 트랙의 제작면에서 LSRM이 유리하고, 리니어모우터의 자체중량이나, 트랙에 필요한 철의 중량면에서는 LIM이 유리하다.
- 3) LIM에 비해 LSHM이 추진 /부상이 동시에 발생할 수 있도록 수직력이 크게 발생하며, 효율과 역율이 매우 좋다.
- 4) 가장 선두로 개발하고 있는 獨逸과 日本의 기술개발 연혁을 검토해 보면 공통점은 초기에는 유도형 LIM으로 시작하였다가 나중에는 동기형인 LSM으로 추진시스템으로 전환하였다. 즉 독일은 TR-05부터 추진력과 부상력을 單一體에서 同時에 발생하게 되는 LSHM시스템이며, 일본은 초전도 LSM과 LIM으로 2元化되어 있다. 그러나 최근에는 미국, 독일, 일본, 이탈리아를 비롯한 세계각국이 상전도 이든 초전도식이든간에 모우터자체에서 추진 /부상력이 동시에 발생하도록 하는 하이브리드 시스템이 개발되고 있는 추세이다.

이상에서와 같이 자기부상열차 추진시스템의 핵심인 리니어모우터의 종류별 응용 및 개발의推移, 성능의 비교검토등을 통하여 효과적인 시스템의 응용 및 選定과 개발에 참고가 되도록 하였다.

### 참 고 문 헌

[ 1 ] "MAGLEV'93" 13th International Confer.

on MAGLEV systems and Linear drives" (book) U.S., Chicago, May, 1993

- [ 2 ] S.A.Nasar et al "Linear Electric Motors : Theory, Design, and Practical Applications" Prentice-Hall, Inc, 1987
- [ 3 ] S.A.Nasar et al "Linear Motion Electromagnetic Systems" John-Wiley & Sons, 1985
- [ 4 ] S.A.Nasar et al "Linear Motion Electric Machines" John-Wiley & Sons, 1976
- [ 5 ] G.W.McLean "Review of recent progress in linear in linear motors" IEE Proc. vol. 135, pt.B, no.6, pp.38-416, 1988
- [ 6 ] J.F.Eastham et al "Novel synchronous machines : Linear and Disc" IEE Proc., vol.137, pt.B, no.1, pp.49-58, 1990
- [ 7 ] J.F.Eastham et al "Linear-motor topology" Proc.IEE, vol.120, no.3, pp.337-343, 1973
- [ 8 ] J.F.Eastham et al "A comparison of Some propulsion methods for magnetically levitated vehicles" International Confer. on MAGLEV Transport (IMEchE), pp. 111-118, 1984
- [ 9 ] T.R.Haller et al "A comparison of Linear Induction and Linear Synchronous Motors for High speed Ground Transportation" IEEE Trans. vol-MAG-14, no.5, 1978
- [ 10 ] 장석명 "자기부상열차의 각 국가별 최근의 개발동향" 전기학회지, 42권 9호, pp.46-52. 1993년 9월



장석명(張錫明)

1949년 7월 3일생, 1976년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1978년 동 대학원 전기공학과 졸업. 1978년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 충남대 공대 전기공학과 교수. 당학회 평의원.