

초고속 자기부상철도의 추진시스템 기술

| 이형우 · 이영훈 · 이창영 · 권혁빈 · 강부병 · 한영재 |
한국철도기술연구원 초고속열차연구실

1. 서론

인구의 증가와 생활영역의 확대, 고유가 등에 따라 대중교통의 혁신적인 수단에 대한 요구가 증가되어왔다. 차세대 교통시스템은 고속, 내구성, 안정성등과 같은 여러 요구사항을 만족하여야 한다. 또한, 편리하고 환경 친화적이며 유지보수가 간단하고, 경량화되어야 대량 운송수단으로서 적합하다. 자기부상철도는 이러한 요구조건을 만족하는 가장 적합한 후보 중 하나로 부각되고 있다. 기존 철도시스템에서 널리 사용되고 있는 차륜에 의한 점착구동방식(Wheel-on-rail)은 급가속 및 고속주행을 위한 추진력을 얻기 위해 바퀴와 선로사이의 커다란 마찰력이 필요하며, 마찰력의 증대를 위하여 차량의 무게를 증가시켜야 한다. 이에 반해, 자기부상철도는 전자석을 이용하여 바퀴를 대체하고 안내 선로에 부상하여 어떠한 접촉도 없이 전자기적으로 추진력을 발생한다.

자기부상철도의 역사는 독일의 Hermann Kemper가 1934년 특허를 출원한 이래, 60년대의 도약기, 70~80년대의 성숙기, 90년대의 시험기를 거쳐 마침내 2003년 중국 상하이에서 상용화가 이루어졌다[1-4]. 자기부상철도는 가까운 미래운송수단에 대한 가장 확실한 대안으로, 많은 연구자들이 선형전동기, 초전도체, 영구자석 등의 개발에 박차를 가하여 왔다. 이러한 자기부상철도는 시스템 원리상 기존의 바퀴식 철도에 비하여 많은 장점들을 가지고 있다. (1) 바퀴와 선로에서 발생하는 마모의 제거로 인한 유지보수 비용의 감소 (2) 열차 무게의 분산으로 선로의 공사비용 절감 (3) 선로의 구조적

표 1. 자기부상식과 바퀴접촉식 열차시스템의 비교

	자기부상열차	철제차륜열차
진동과 소음	기계적 무접촉 60~65[dB]	바퀴와 선로의 접촉 75~80[dB]
안정성	탈선의 위험 없음	작은 결함에 의해서도 탈선가능
선로	경량차량과 분산 하중→경량화가가능	중량차량과 집중 하중 → 강화구조
유지보수	아주 약간	바퀴, 기어, 선로등 주기적인 보수요
경사주행	약 80~100/1000	약 30~50/1000
곡선주행	곡선반경 30[m]	곡선반경 150[m]

표 2. 대량교통수단의 특성비교 (93' 일본 교통성)

	속도	환경친화성	경사의 곡선
철제차륜	○		○
선형전동차 (철제차륜)		○	●
자기부상	●	●	●
고무차륜			●
모노레일		●	●

() 평균 (○) 좋음 (●) 아주 좋음

특성상, 탈선의 위험 제거 (4) 바퀴의 부재로 인하여 접촉에서 발생하는 소음 및 진동 감소 (5) 비접촉 운행으로 미끄러짐 방지 (6) 급경사 급곡선 주행성능 개선 (7) 급가속감속 가능 (8) 기어, 커플링, 축, 베어링 등과 같은 기계적 구조물의 불필요 (9) 날씨의 영향 감소. 그러나 자기부상철도에는 바퀴와 선로사

이에 접촉이 존재하지 않으므로, 선로와의 전자기적 상호 작용을 통하여 반드시 추진력뿐만 아니라, 제동력도 제공하여야 한다.

표 1은 자기부상식과 차륜식 열차시스템의 비교를 나타낸 것으로, 대략적으로 진동, 소음, 유지보수, 주행특성 등에서 자기부상열차가 일반열차보다 우수함을 알 수 있다. 표 2는 일본 교통성 자료 중 대량교통수단의 특성을 비교한 것이다. 자기부상열차의 경우, 속도, 친환경성, 등에서 다른 시스템보다 우수함을 알 수 있다.

이상의 표를 통하여, 미래 교통수단으로서 자기부상철도가 부각되고 있음을 짐작할 수 있다.

2. 추진시스템 기술

그림 1은 기존의 차륜접촉에 의한 점착 구동방식 열차와 자기부상철도와의 차이점을 묘사하였다. 기존의 열차가 추진력을 회전전동기로부터 얻고, 안내와 지지를 선로에 의지하는 반면, 자기부상철도는 선형전동기로부터 추진력을 얻고 전자석을 이용하여 안내와 지지를 이룬다.

선형전동기란 회전형 모터의 한 면을 수직하게 절단해 평평하게 펼쳐 놓은 형태의 전동기로서, 회전형 모터 단독으로는 만들어 낼 수 없는 선형운동을 가능하게 해주는 전동기이다. 그러나 선형기기는 계자부분 또는 전기자 부분이 유한한 길이를 가지고 있으므로 단부효과를 일으키며, 커다란 공극으로 인하여 효율이 낮다.

그럼에도 불구하고, 스크류, 체인, 기어박스과 같은 부품들의 기계적인 접촉으로부터 직접 영향을 받는 진동과 소음의 양이 훨씬 덜하기 때문에 선형전동기는 왕복 선형운동의 경우, 회전형 기기에 비하여 우수한 성능을 나타낸다. 회전형 전동기와 선형전동기의 간단한 개념이 그림 2에 나타나 있다.

선형전동기는 다양한 종류들이 존재하며 각각의 타입들은 각자만의 장단점을 가지고 있다. 이런 장단점에 의거해 급속, 고속용 철도차량 추진 시스템

에서 후보 고려되었던 것들로 LIM(선형유도전동기, Linear Induction Motor)과 LSM(선형동기전동기, Linear Synchronous Motor)의 두 가지가 있다.

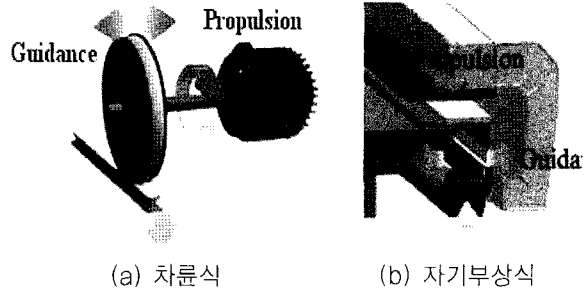


그림 1. 지지, 안내, 추진 방식 비교

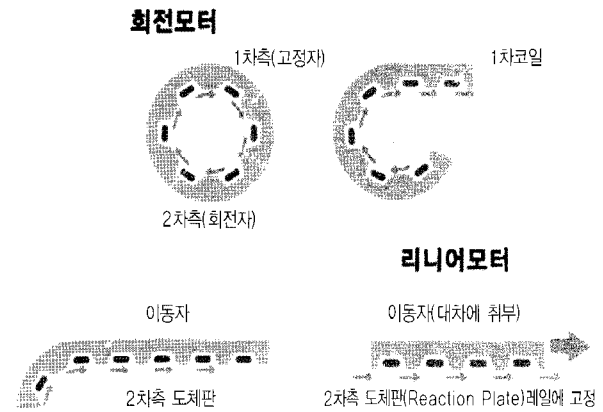


그림 2. 회전기로부터의 선형기의 개념도

2.1. 선형유도전동기(LIM)

선형유도전동기의 동작원리는 기존의 회전유도전동기와 동일하다. 계자부에 의해 발생된 시변 자계는 공극을 가로질러 2차축의 도전체에 유기기전력을 유도한다. 이 유기기전력은 와전류를 발생시키고, 공극자속과의 상호작용에 의하여 추진력을 발생시킨다. 선형유도전동기는 계자부분의 위치에 따라 (1) 고정자 권선이 차량에 탑재되어있고, 도전체가 선로에 놓여있는 단계자형(Short primary type, SP) (2) 고정자 권선이 선로에 놓여있고, 도전체가 차량에 탑재되어있는 장계자형(Long primary type, LP)으로 나누어진다.

장계자형의 경우, 건설비가 단계자형에 비해 비싸지만, 주행 중 전력을 공급받을 집전장치가 필요하지 않다. 따라서 초고속 자기부상철도의 경우 전력공급이 어렵지 않은 장계자형이 일반적으로 사용되어진다. 단계자형은 선로에 알루미늄관을 설치하기가 쉬우므로 공사비를 줄일 수 있다. 하지만, 단계자형은 단부효과에 의한 누설 인덕턴스와 인력으로 인하여 에

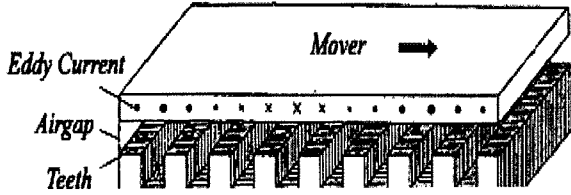


그림 3. 선형유도전동기(장계자형)

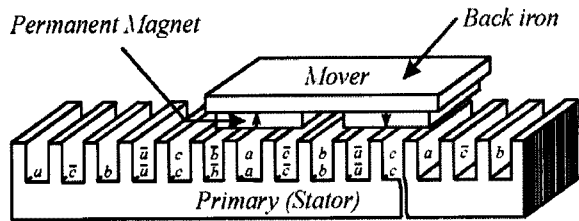


그림 4. 선형동기전동기(장계자형)

너지 효율이 낮다. 또한, 단계자형은 집전장치의 어려움 및 단부효과 등으로 인하여 약 300[km/h] 이상에서는 사용이 어렵다. 단계자형 선형유도전동기는 현재 일본의 HSST나 한국의 UTM 등 주로 중저속 자기부상철도에 사용되고 있다.

2.2. 선형동기전동기(LSM)

선형유도전동기와는 달리 선형동기전동기는 그 자체에 자기원(Magnetic source)을 가지고 있어서 이 자기장과 전기자 전류의 상호작용에 의하여 추진력을 발생한다. 추진 속도는 제어기의 주파수에 의하여 제어된다. 계자의 위치에 따라, 선형동기전동기도 선형유도전동기와 같이 단계자형과 장계자형으로 나누어진다. 또한, 선형동기전동기는 자기원의 종류에 따라 두 가지 형태로 나누어진다. 독일의 Transrapid와 같이 전자석과 철심을 사용하는 경우와 일본의 MLX와 같이 초전도 자석과 공심을 사용하는 경우이다.

초고속 자기부상철도의 경우, 전력소비의 경제적 효율성은 무시할 수 없는 중요한 요인이므로 선형유도전동기보다 고효율, 고출력의 특성을 가지는 선형동기전동기가 더 적합하다. 따라서 LSM에 대한 독자적인 기술을 확보하여야 향후 초고속 자기부상철도 시스템에 대한 기술적 우위를 점하고, 구형 가능성을 대폭 향상시킬 수 있을 것이다.

2.3. 선형동기전동기(LSM)의 이론 및 설계

앞서 언급한 바와 같이 500km/h 이상의 초고속 자기부상열차에는 LSM이 주로 사용되고 있다.

영구자석형 또는 전기계자형 선형동기전동기는 기존의 회전형 동기 전동기와 동일한 구동 원리를 가지며, 회전형 모터에서의 토크가 선형전동기에서는 추력이 된다. 그러나 기존의 회전형 동기 전동기와는 달리 상대적으로 큰 공극을 가지며, 직선형으로 펼쳐진 유한한 길이의 구조로 인해 회전기와는 다른 특성들이 존재한다. 따라서 LSM 설계 시에는 회전형 동기 전동기의 설계 시 고려해야 할 사항들 외에도 선형으로 변환되면서 생긴 비대칭으로 나타나게 된 수직력과, 입구단과 출구단으로 야기되는 단부효과, 및 이동자의 지지구조 등에 대하여 추가적으로 고려해야 한다.

그림 5는 LSM의 공극자속밀도를 나타낸다. 그림에서와 같이, 계자부에 의한 자속과 전기자에 의한 자속이 존재하며, 공극자속밀도를 통해 추력식을 유도할 수 있다. 일반적으로 공극에서의 자속밀도 분포가 가능한 한 정현적일 때 좋은 특성을 나타내므로 설계시 이를 고려하여야 한다.

LSM의 공극자속밀도는 B_g 식 (1)과 같이 고정자의 전기자 전류에 의한 공극자속밀도와 이동자 측에 붙어 있는 계자부에 의한 공극자속밀도의 합으로 나타 낼 수 있다.

$$B_p = B_{pm} \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x\right)$$

$$B_c = B_{cm} \sin\left(\frac{\pi}{\tau} (x - x_d)\right) \quad (1)$$

$$B_g = B_p + B_c$$

여기서, B_{pm} , B_{cm} 은 각각 자속밀도의 최대치를 나타내며, 는 극간격을 나타낸다. 이때 미소체적에 축적되는 자기 에너지는

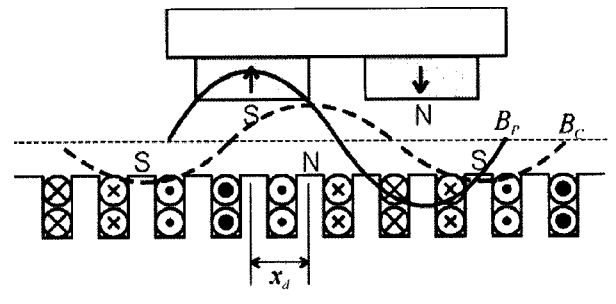


그림 5. LSM의 공극자속 밀도(장계자형)

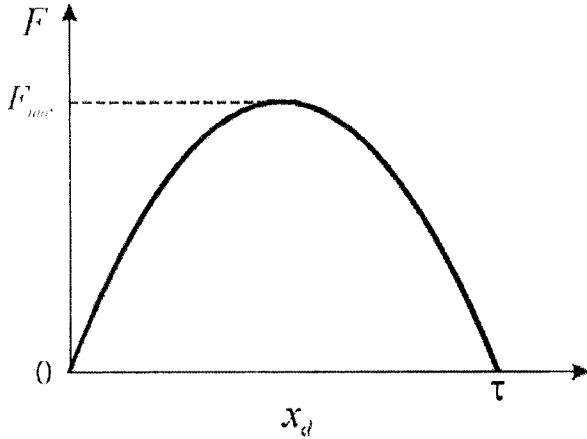


그림 6. LSM의 발생추력

$$dW_g = \frac{B_g^2}{2\mu_0} dv = \frac{1}{2\mu_0} (B_b + B_c)^2 dv$$

이과, 공극에 축적되는 전체 자기 에너지는 식 (2)와 같이 dW_g 를 공극전체에 대하여 적분함으로써 구해진다.

$$W_g = \int_v dW_g \quad dv = \frac{phl_g}{2\mu_0} \int_0^\pi (B_b + B_c)^2 ax$$

$$= \frac{V_g}{4\mu_0} (B_{bm}^2 + B_{cm}^2 + 2B_{bm}B_{cm} \cos(-\frac{\pi}{\tau} x_d))$$

여기서, p, h, l_g, V_g 는 각각 극수, 적층폭, 자기적 공극의 길이, 자기적 공극의 체적을 나타낸다.

LSM의 발생 추력은 가상변위의 원리를 적용하여 식 (3)과 같으며, 그림 6에서 보는 바와 같이 반주기가 τ 일 때 부하각 90도에서 최대가 된다.

$$F = -\frac{\partial W_g}{\partial x_d} = \frac{\pi V_g}{2\tau\mu_0} B_{bm}B_{cm} \sin(-\frac{\pi}{\tau} x_d)$$

$$= F_{max} \sin(-\frac{\pi}{\tau} x_d)$$

3. Transrapid 와 MLX

1960년대부터 초고속 자기부상철도에 대한 연구개발이 이루어진 이래, 독일과 일본의 경우, 자기부상철도는 실용화

수준에 도달하였으며, 시험선로에서의 대부분의 시험이 이루어졌다. 1990년대 이후 미국의 Inductrack과 스위스의 Swissmetro가 집중적으로 연구개발 되었으며, 몇몇 시험기 또한 제작되었다. 하지만 실용화 단계에 접어들지 못하였다. 독일의 Transrapid는 2003년 12월, 중국 상하이에 상용노선을 건설하여 세계 유일의 상용시스템이 되었으며, 몇몇 프로젝트들(일본, 독일, 미국 등)이 정부승인을 기다리고 있다. 표 3은 초고속 자기부상열차의 현황을 나타낸다.

그림 7과 그림 8은 독일의 Transrapid와 일본의 MLX의 구조를 나타낸다. 간과할 수 없는 부분은 MLX가 Transrapid 보다 더 높은 최고속도를 달성한다는 것이다. Transrapid의 경우, 인버터 정격의 제한에 따라 최고 동기주파수는 300[Hz]이며, 이러한 제한된 주파수는 약 500~550[km/h]의 동기속도를 이룰 수 있다. 하지만, MLX의 경우 초전도 기술이 Transrapid(258[mm]) 보다 더 넓은 극

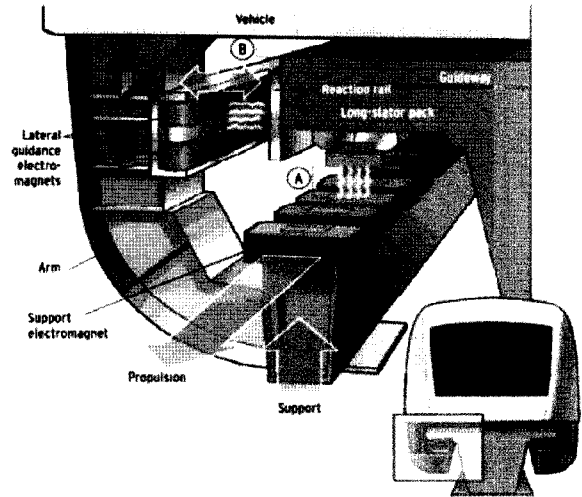


그림 7. Transrapid 시스템

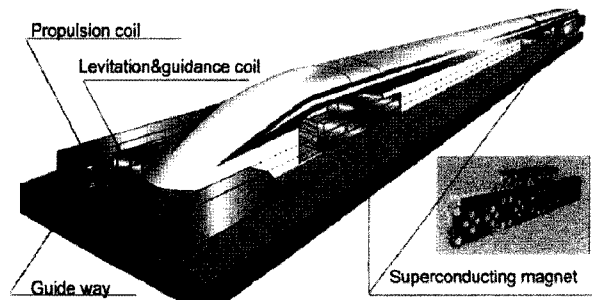
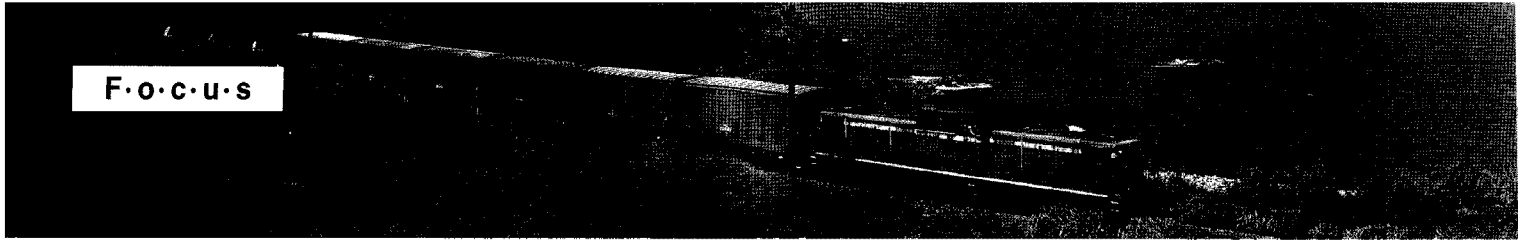


그림 8. MLX 시스템



간격(1350[mm])을 허용하며, 이는 더 낮은 동기 주파수인 72[hz]에서도 일본 자기부상열차의 최종 목표속도를 이룰 수 있게 한다.

4. 결론

새롭고 더 나은 교통시스템의 필요성은 많은 국가들이 자기 부상열차의 개발에 관심을 갖고 접근하도록 하였다. 하지만, 자기부상열차가 거의 반세기동안 연구 개발되어졌을 지라도,

표. 3. 초고속 자기부상열차의 현황

	분 류	
시스템	Transrapid (독일)	MLU, MLX (일본)
부상	EMS	EDS
추진	LP-LSM	LP-LSM
공극	8~12[mm]	80~150[mm]
최고속도	500[km/h]	581[km/h]
운영	상하이, 중국	-
특징	추진/부상 일체형	초전도자석
	부상/안내 분리형	부상/안내 일체형

	분 류	
시스템	Swissmetro (스위스)	Inductrack (미국)
부상	EMS	PM EDS
추진	LP 또는 SP-LSM	LP-LSM
공극	18~22[mm]	80~150[mm]
최고속도	500[km/h](목표)	500[km/h](목표)
운영	-	-
특징	터널내 진공	Halbach Magnet Array

오직 몇몇 국가에서만 그 지식과 기술력을 보유하고 있다. 또한 철도 선진국의 집중적인 투자와 관심으로 좀 더 경제적이고, 강한 자기력을 발생하는 고온초전도체와 새로운 타입의 영구자석의 응용이 이루어 질 것으로 전망된다. 이러한 기술들은 자기부상열차뿐만 아니라 항공기나 미사일, 우주선의 발사 시스템 등에도 적용시키려는 노력이 시도되고 있다.

이러한 원천기술 외에 시스템에 영향을 주는 다양한 요인들에 대한 더 나은 이해와 관심이 필요하다. 예를 들어, 선로의 영향에 따른 열차의 동특성이 기계적 공진현상을 유발하는가; 자기부상열차가 고속으로 터널 입구를 통과할 때 주변 건물에 진동을 얼마나 유발하는가; 또한 승객의 안전성이 충분히 고려되어졌는가; 불균일한 선로공사로 인해 발생한 진동에 대한 열차의 내구성은 충분한가 등 많은 문제들이 남아 있다. ☺

♣ 참고 자료

1. Yamamura S., "Magnetic levitation technology of tracked vehicles present status and prospects," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 12, No. 6, pp. 874-878, Nov. 1976.
2. Sinha P., "Design of a magnetically levitated vehicle," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 20, No. 5, pp. 1672-1674, Sept. 1984.
3. Rogg D., "General survey of the possible applications and development tendencies of magnetic levitation technology," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 20, No. 5, pp. 1696-1701, Sept. 1984.
4. Eastham A.R., Hayes W.F., "Maglev systems development status," IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. 3, No. 1, pp. 21-30, Jan. 1988.