초고속 자기부상열차 핵심기술개발

성호경 | 한국기계연구원

1. 개 요

초고속 자기부상열차 기술은 독일에서 태생되어, 기술 분야의 선두 주자로서 주도적으로 개발하여 왔다. 독일은 현재 세계에서 제일 규모가 큰 자기부상열차 시험소를 운영하고 있으며, 해외로 수출되어 유일하게 상업화에 성공한 노선을 가지고 있다. 그러나 일본 또한 후발주자이나 독일과 차별되는 초전도 자기부상열차 연구와 함께 열차로서 세계 최고속도를 보유하고 있다.

독일의 자기부상열차 이름은 트랜스래피드(Transrapid)라고 하는데, 이는 자기부상열차 개발을 위해 Siemens와 ThyssenKrupp가 합작하여 공동으로 설립(1998년)한 회사인 Transrapid-International(TRI)社 이름이기도 하며, 동시에 독일의 자기부상열차 시스템 이름이기도 하다. Siemens Transportation Systems (TS) 그룹은 세계적인 철도차량 공급업체로서, 철도 차량에 대한 자동화 및 전력, 신호 통신 및 제어시스템, 추진전력 공급시스템 및 통합운영시스템 뿐만 아니라 승객 운송, 운영 및 프로젝트 운영 등을 공급하는 회사이며, Transrapid 제작에 있어서 추진시스템, 전원 공급, 운영제어시스템, 통신 기술 등을 담당하였다. ThyssenKrupp은 기관차와 철도차량, 건설 분야에서의 경험과 ICE의 개발에 참여한 회사로서, 선형동기전동기식 전자석 부상 시스템의 가능성을 제공하고 수 년 동안 시스템 개발을 선도하여 현재 운행되고 있는 Transrapid 시스템에 대한 토대를 마련하였으며, 차량과 추진시스템 장치 및 선로(guideway) 장치 등을 담당하였다.

또한 자기부상열차를 위해서 독일 연방정부는 독일에서 Transrapid의 활용을 지원하며, 막대한 출자를 통하여 자기부상열차의 기술이 더 개발될 수 있도록 하고 혁신 교통기술에 대한 노하우를 보호하는 역할을 담당하고 있으며, 독일 철도청은 전문지식을 가지고 독일에서 자기부상열차 기술과 자기부상열차 운영 기술의 개발을 수행하였다.

독일은 자기부상열차의 기술개발을 시작하면서 기술의 가능성을 타진하는 한편, 여러 차례의 시제열차 제작 및 시험을 실시하였고, 1977년 연방정부는 자기부상열차를 선형동기전동기(LSM, long stator) 추진방식의 흡인식 부상 시스템(EMS)으로 결정하고, 반발식 부상시스템의 개발을 중단하였다.

이후 독일은 초고속형의 흡인식 선형동기전동기 방식의 자기부상열차 개발에만 주력하게 되어 오늘에 이르렀으며, 독일 서북부 국경지역인 Emsland 지역에 31.5㎞의 세계 최장의 시험선을 건설(1987년 완공)하여, 현재 시제차량인 Transrapid 08을 시험운행하고 있다.

일본의 경우 일본국영철도는 오랜 시간동안 여러 가지 고속열차 시스템을 속력, 안전, 유지보수, 추력 및 미래적

전망에 대하여 연구하여 초전도 자기부상열차 개발을 결정하였다. 신간선과 세계 각각 다른 부분에 있는 다른 비슷한 고속열차는 다른 어느 때보다 빠른 철도여행을 제공하고 있지만 현재의 기술로 가능한 최고의 속도에 도달해 있는 실정이다.

초전도 기술을 적용한 자기부상열차의 연구개발은 1970년부터 JNR의 RTRI에서 수행해오고 있다. 500 km/h의 고속주행의 가능성을 검증하기 위한 연구실의 기본적 시험을 거친 후에 1975년 미야자키현에 7 km 선로의 건설이 시작되었다. 1987년 유인 2차량 열차인 MLU001은 400.8 km/h를 기록하였다. 1993년 선보인 MLU002N 가지 미야자키 자기부상열차 시험선로에서 운행되었다. RTRI의 주요한 목표 중 하나는 초전도 마그네트의 신뢰성과 내구성을 향상시키는 것이다. 초전도 마그네트는 지상 코일에 의한 자장 교란과 차량 동력학에 의한 진동으로 해를 입는다. 이러한 교란은 퀀치를 발생시키거나 갑작스런 초전도 마그네트의 기자력 소멸을 야기시킨다. 여러 시험과 연구를 통하여 이런 문제들을 연구하여 그 대응책을 마련하였다. 다른 개발 목적들은 다음과 같다.

- 차량 지붕의 판넬을 이용한 공기역학 제동장치와 고속주행을 위한 디스크 제동장치
- 측면 부상코일로 이루어진 지상 코일
- 싸이리스터를 이용한 pulse width modulation (PWM) 인버터를 위한 대용량 전원 시스템
- 고속 및 저속 주행을 위한 분기기

1990년 국가지원 사업으로 채택되면서 자기부상열차의 개발은 획기적인 전환점을 맞았다. 운수성(The Minister of Transport)이 실용을 위한 자기부상열차의 최종 검증을 위하여 야마나시 시험선로의 건설을 승인하였다. 야마나시 자기부상열차 시험선로(Yamanashi Maglev Test Line)로 불리는 이 새 시험선로는 1997년 4월 3일 완성되었고 현재 야마나시현에서 시험 운전의 수행을 위해 사용되고 있다. 같은 해 3량 편성인 자기부상열차 MLX01가 유인운전으로 12월 12일 최고속도 530 km/h의 세계 기록을 수립하였으며 12월 24일 무인운전으로 550 km/h의 세계최고 속력을 갱신하였다. 1999년 3월 18일 5량 편성의 MLX01이 548 km/h의 속력을 달성하였다. 1999년 4월 14일, 이 5량 편성 차량이 3량편성 MLX01의 최고 기록을 갱신하여 유인운행으로 552 km/h의 속력을 기록하였다.

2000년 3월 일본 운수성의 자기부상열차 실용 기술 평가회(Maglev Practical Technology Evaluation Committee)는 "JR-Maglev는 초고속 운송시스템을 위한 실용성을 가지고 있다."라고 결론내렸다. 이 위원회는 또한 아래의 목적에 부합하는 향후 운행시험의 필요성을 지적하였다.

- 장시간 내구성 및 신뢰성 확립
- 건설 및 운행비용 축소
- 환경적 효과를 고려한 차량의 공기역학 특성 향상

이러한 요구에 의해 이러한 기술적 발전을 위하여 또 다른 5년의 시험이 계획되었다. 자기부상열차의 기술적 발전은 회계 연도 2000년 이후에 2단계에 있다. 2003년 12월 2일 3량편성 MLX01은 유인운전으로 최고속도 581 km/h를 달성하였다.

한국의 경우 2000년대의 새로운 교통수단으로 등장한 고속열차(KTX)의 등장으로 전국이 반나절 생활권으로 좁혀졌다. 수 십년에 걸친 독일 및 일본의 자기부상열차 기술개발 끝에 중국은 2004년 1월 중국 상하이에서 30km 노선의 430km/h급 고속자기부상열차를 상용화시키는 데에 성공하였고 일본은 2005년 3월 나고야에서 8.9km의 선로에 100km/h급 도시형 자기부상열차를 개발하는 데에 성공하였다. 우리나라는 UTM(Urban

Transit Maglec)이라는 모델명으로 2량 편성의 도시부상열차를 국책사업을 통해 개발한 후 그 개선작업을 거쳐 대전의 약 1km 구간의 상용화 작업을 위한 시제 차량 제작 및 노선설치의 작업이 이루어지고 있다.

자기부상열차는 레일과 바퀴의 마찰 없이 열차가 전자기력으로 떠서 추진되는 시스템으로 기존 철도시스템의 기술을 획기적으로 발전시킨 차세대 수송기술이다.

특히 고속형 자기부상열차 시스템의 건설은 철도 교통시스템의 현대화를 이룩할 수 있는 효과 뿐 아니라 차량, 기계부품, 전기 및 전자 기술, 제어, 정보통신, 재료, 토목 등의 기술이 종합적으로 집약된 거대 복합기술의 특성을 가지며 시스템설계 및 엔지리어링이 요구되어 관련산업에의 기술적 파급효과가 지대하여 기술 개발이 이루어질 경우 국내 관련산업의 기술을 획기적으로 향상시킬 수 있는 장점이 있는 사업이다.

표 1. 자기부상열차 개발현황

미래 통일 한국의 일일생활권과 유라시아 노선 진출 및 차륜식 고속철도망에 이어 향후 항공기 속도의 유라시아 제 2고속철도망 구축을 한국이 선도하여 서울-북경 사이를 2시간대 주파, 서울-모스크바 사이를 8시간대 주파하기 위한 초고속 자기부상열차의 부상 및 추진 핵심 기술이 선행적으로 개발되어야 한다.

2. 부상 및 추진 핵심기술

독일: Transrapid의 부상 및 안내 시스템은 마그네트를 취부하는 것이 체인모양으로 배열되어 있고 부상 프레임과 객차가 2차 현가장치를 통해 연결된다는 것에 그 특성이 있다.

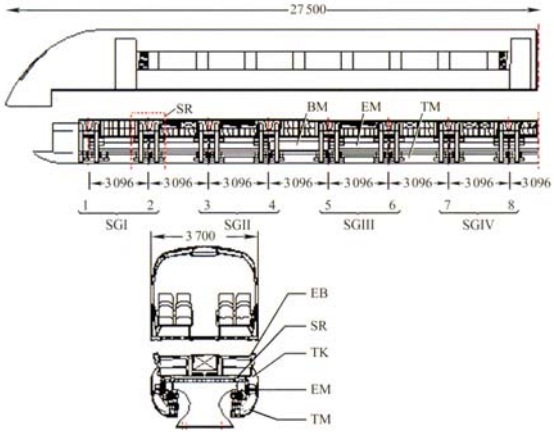

그림 1. 부상 및 안내 시스템의 구조

탄성없는 중량물을 최소화하기 위하여 1.5Hz의 낮은 주파수를 가지는 선형 가이드와 고무스프링을 사용하여 부상마그네트는 수평으로 매달려있고 안내마그네트는 수직으로 매달려있다. 객차 몸체의 수직 현가장치는 16단계로 제어되는 공압 스프링이 장착된 2차 현가장치로 구성된다. 안내 시스템에도 객차 몸체와 수평 스프링으로 연결되어 있어 부상 시스템과 독자적으로 곡선 주행 시 차량의 수평방향 안내를 담당한다.

부상과 안내 시스템의 구조는 각 요소의 적절한 배치와 설계로 리던던시(redundancy) 역할을 한다. 즉, 공극 제어를 위한 각각 요소가 고장이 나거나 망가지더라고 운행 상태에 즉각적인 영향을 미치지 않는다.

전원장치를 위한 차량의 전기설비와 실패안전(fail/safe) 역할을 하는 제어요소 등의 다른 요소들도 적절히 배치되어 있다.

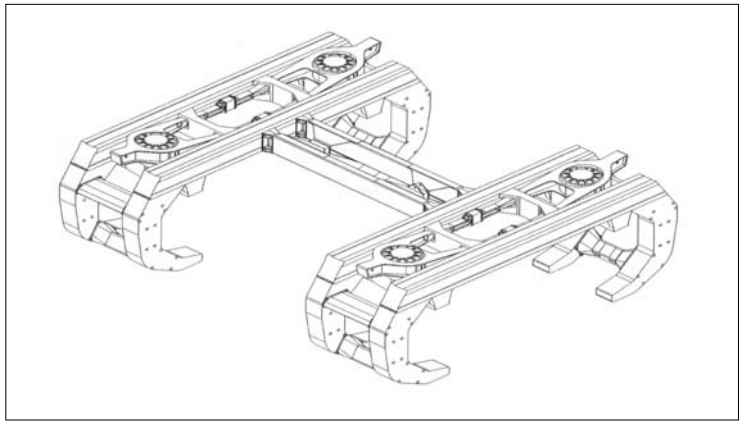

그림 2. Transrapid(SMT)의 보기

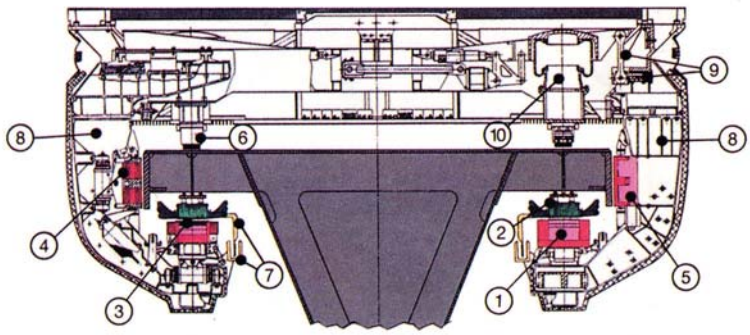

그림 3. 부상 및 안내 시스템의 단면도

부상 및 안내시스템은 마그네트 공극 제어기의 전류명령에 의해 다양한 전류를 공급받는다. 공극제어기는 부상 및 안내 시스템에 독립된 초퍼를 가지고 있다. 힌지 포인트를 연결하는 두 코일의 그룹이 언제나 분리된 초퍼에 의해 전류를 공급받도록 마그네트의 전기회로는 힌지(hinge) 점에 인접하고 있다. 이러한 배열은 힌지 점에서의 부상 및 안내 역할이 병렬도 연결된 제어 루프에 고장이 발생하더라도 그 동작이 확실히 이루어지도록 하기 위함이다. 초퍼는 높은 동적 특성을 가진 최대 출력 48kW의 2상한(two-quadrant) 트랜지스터 초퍼를 가지고 있고 샘플링 주파수는 100kHz이다. 매우 높은 샘플링 주파수 때문에 차량의 안정화를 위해 요구되는 마그네트 전류의 순간적인 값들에 거의지연이 없도록 할 수 있다.

초퍼는 "제어할 수 없는 마그네트 전류" 상태를 막는 적절한 안전 특성을 가지고 있고 모든 동작상태에서 안전하기 스위칭할 수 있다.

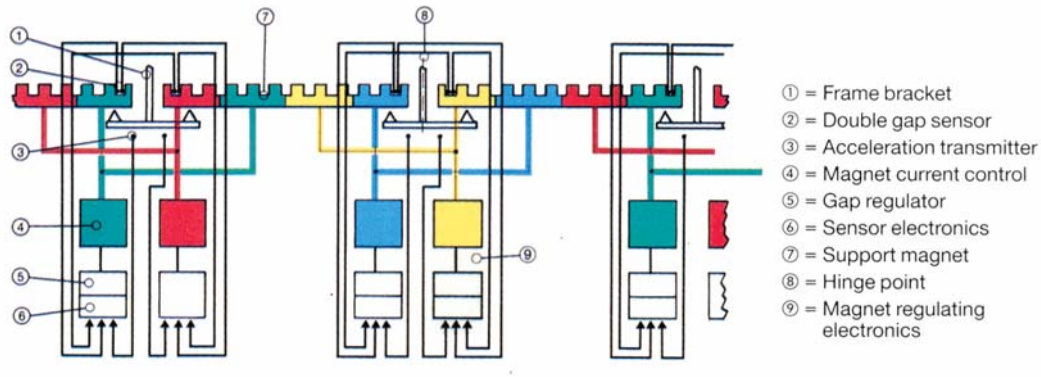

그림 4. 자기 회로

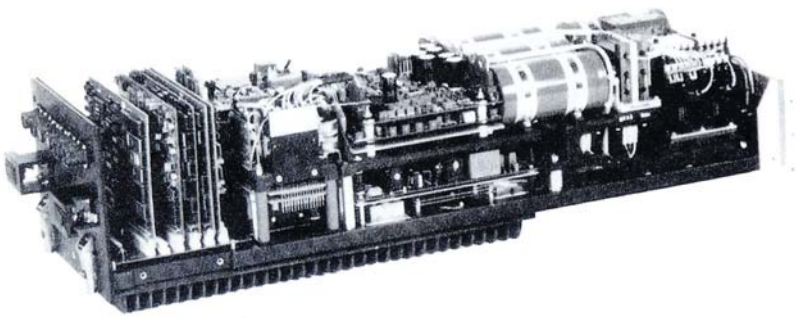

그림 5. 페일세이프 초퍼

마그네트 제어루프의 임무는 그림 6과 같이 마그네트에서 발생하는 전자기력을 변화시켜 마그네트와 가이드웨이 사이의 부상 공극을 설정한 값으로 유지시키는 것이다.

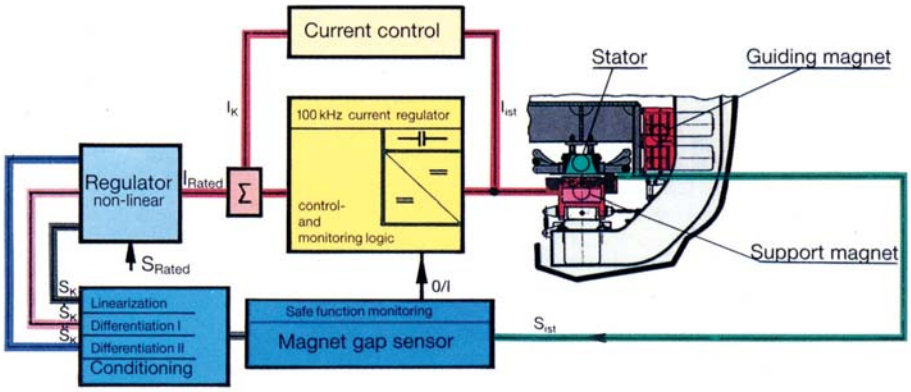

그림 6. 자기적 공극 제어 루프

마그네트 전류, 마그네트 가속도 및 공극을 측정하여 이 값들에 의한 제어기의 출력으로 초퍼를 통해 적절한 마그네트 전류값을 내보낸다.

제어기의 구조는 시뮬레이션 프로그램으로 연구되었고 실질적인 시험은 그림 7과 같은 마그네트 시험장치에서 이루어진다. 센서, 마그네트, 초퍼, 제어기 장치는 모두 보완을 위하여 2배로 설치되어 있다. 제어기 고장 등의 원인에 의해 마그네트와 가이드웨이가 붙는 것을 방지하기 위하여 마그네트 전류는 마그네트 공극 여유에 대하여 2채널의 고장안전 기술의 모니터링 회로에서 정하는 순간적인 최대값으로 제한된다.

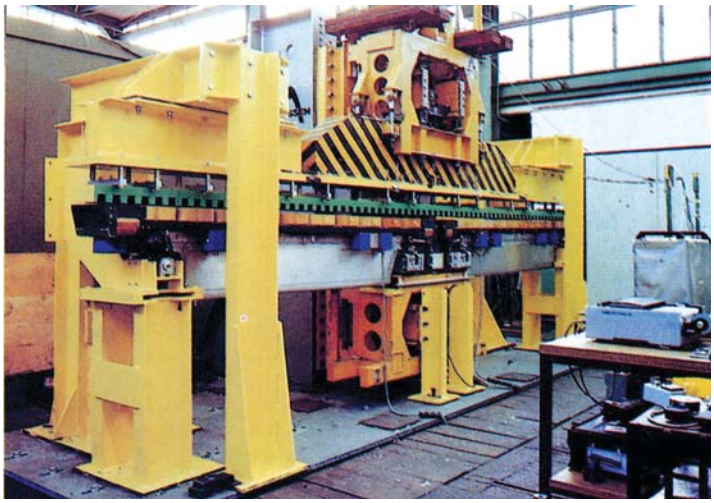

그림 7. 마그네트 시험장치

Transrapid의 개발에서 높은 마그네트 하중 대비 자기부상력을 가지는 마그네트를 개발하는 것이 목표였다. 누설자속을 최소한으로 줄이는 것이 동적특성을 향상시키는 데에 기여한다. 마그네트의 온도특성, 환경에 대한 영향 및 높은 신뢰성을 가지는 것도 중요하다.

마그네트 폴의 높이를 줄이면 마그네트의 질량이 감소한다. 부상 마그네트에서 돌출된 폴을 제거한 것 이외에

폴의 높이를 줄인 것은 열전달 특성을 향상시킨다.

낮은 높이를 가지는 부상 및 안내 마그네트의 필요 강인성은 그림 8과 같이 박스 프로파일로 개발된 중량을 감소시키는 뒤쪽의 강인구조로 얻어진다.

이러한 결과로 힘:하중의 비율 10:1이 얻어졌다(TR07). 기존 시스템에 비해 누설자속은 30%에서 10%로 줄어들었다.

부상마그네트의 폴 끝쪽 부분에 설치된 갭센서는 비접촉으로 마그네트와 가이드웨이 사이의 거리를 측정한다. 전기적 갭 신호는 갭 제어의 기본이 되기 때문에 갭 신호는 이중으로 결정된다. 이러한 목적을 위하여 전기적, 자기적으로 독립적인 두 개의 코일 시스템이 각 센서 취부에 관계된다. 두 개의 갭 신호는 공간적으로 떨어진 두 개의 독립된 신호로부터 결정된다. 두 개의 독립적인 갭 신호는 측정 오류를 방지하기 위하여 확장된 가이드웨이와의 갭 신호는 무시한다. 부상마그네트와 가이드웨이 사이의 접촉을 막기 위하여 센서는 고장안전 제어의 기능을 가진다.

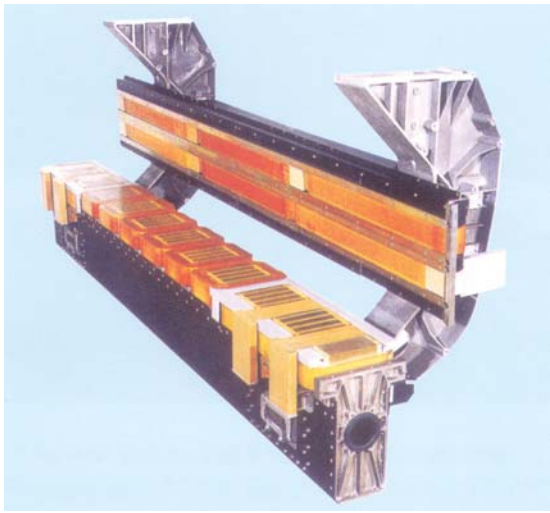

그림 8. 부상 및 안내 마그네트

일본: 1972년 일본 철도의 100주년 창립일을 기념하기 위한 시연 시험 차량으로 제작되었다. 본 차량은 수직 벽처럼 보이는 역-T 형 가이드웨이에 걸터앉은 것과 같이 운행된다. "ML"은 Magnetic의 M과 Levitation의 L을 의미하여 100은 일본 철도의 100주년 기념을 의미한다.

초전도자기부상열차는 차량에 탑재된 초전도마그네트와 가이드웨이에 설치된 전기자코일로 구성되는 선형전동기에 의해 추진된다. 열차는 초전도코일과 지상의 부상코일의 상호작용으로 형성되는 전자기력에 의해 부상된

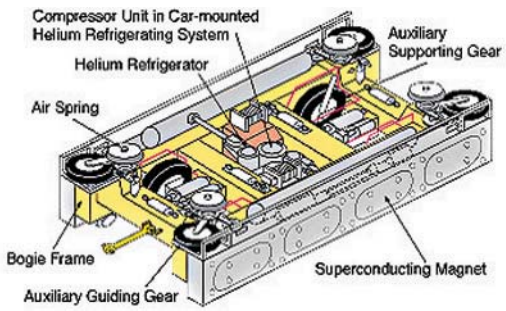

그림 9. MLX01의 보기

다(Powell and Danby 1966).

부상시스템은 차량에 탑재된 초전도마그네트와 가이드웨이에 설치된 단락된 부상코일로 구성된다. 지상에 단락코일을 설치하는 방법 이외에 가이드웨이에 금속 막을 설치하는 방법도 있다. 두가지 모두 같은 원리이다. 차량이 움직일 때 가이드웨이의 부상코일에 전류가 유기된다. 이 회로에 인덕턴스가 있으면 전류가 유기된 전압에 뒤지게 되고 평균 부상력이 발생된다. 수평방향으로 설치된 부상코일의 예가 그림 10에 나타나 있다. 회로에 저항만 있는 경우 평균부상력은 0이 되고 자기저항력(주행저항)이 발생된다. 반면에 인덕턴스만 있는 경우, 자기저항은 0이 된다. 일반적인 부상코일은 부상력과 자기저항력을 같이 발생한다. 그림 11은 속도에 따른 부상력 및 자기저항을 나타낸다. 본 특성은 초전도마그네트와 부상코일 사이가 일정하게 유지되는 조건으로 얻어졌다. 기본원칙은 가이드웨이 코일에 유기된 전류이기 때문에 속도가 0일 때에는 부상력이 발생하지 않는다. 부상력은 차량속도와 비례하여 증가하지만 일정속도 이상에서는 조금씩 증가한다. 차량은 이륙속도라고 부르는 일정한 속도 이상에서 부상하므로 이 속도 이하에서 차량을 추진하기위한 바퀴가 필요하다. 자기저항은 특정한 저속에서 최대치를 나타내나 속도의 증가에 반비례한다. 이는 속도와 무관하게 부상코일의 손실이 일정하다는 것을 의미한다. 이외에 부상시스템은 측면의 힘을 발생시키는데 이 힘 또한 고려되어야 한다.

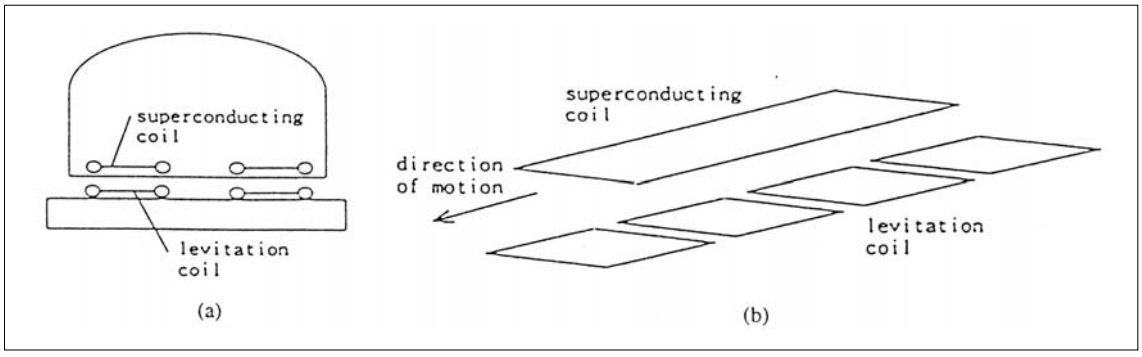

그림 10. 부상을 위한 기본적인 코일 배열 : (a) 단면, (b) 상대적 위치

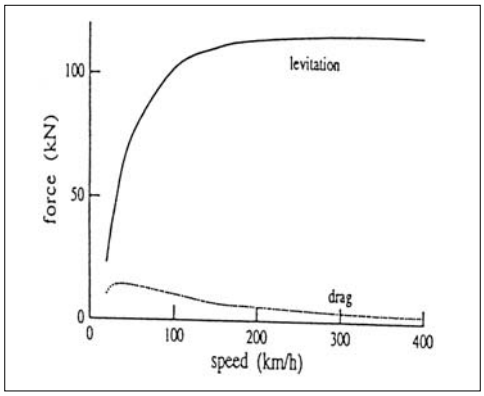

그림 11. 부상력과 제동력 특성의 예

안내시스템은 부상시스템과 같은 원리로 동작한다. 부상시스템은 차량의 무게를 지지하기 위한 부상력을 언제나 발생시켜야 하는 반면 안내시스템은 차량에 측면 변위가 발생하였을 경우에 안내력을 발생시켜야 한다. 따라서 안내를 위한 회로는 통상적으로 그림 12와 같이 가이드웨이 양쪽벽에 설치된 코일이 연결된 형태가 된다. 차량이 가이드웨이의 중심부로 운행되고 있을 때에는 안내를 위한 자속은 쇄교되지 않고 따라서 이 코일에 유기되는 전류도 없다.

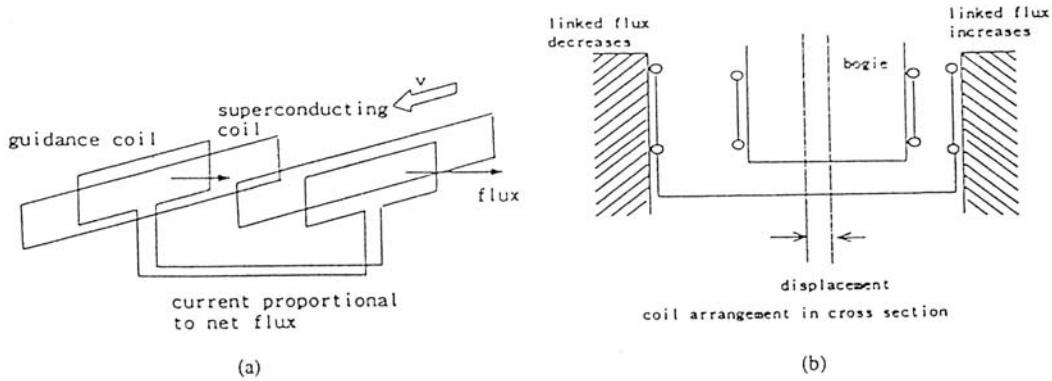

그림 12. 안내의 원리 : (a) 안내의 원리, (b) 단면적으로 본 코일 배치

저항 비율은 부상시스템의 지침이 된다(Powell and Danby 1966). 저항비율을 크게하기 위해서는 가이드웨이 코일의 손실이 작아져야만 한다. 따라서 가이드웨이 코일의 기자력이 작아야만 한다. 가이드웨이 코일의 인덕턴스 L, 저항 R, 초전도코일과 가이드웨이 코일의 상호 인덕턴스 M을 가정하면 저항비(drag ratio)는 아래와 같이 표현된다.

$$\text{drag ratio} = \frac{v\,L}{R}\,\frac{\partial M}{\partial z}\,\frac{1}{M}$$

이 식으로부터 상호인덕턴스는 작은 것이 바람직하고 이것의 수직방향으로의 미분성분은 큰 것이 바람직하다. 무효자속(null-flux)으로 불리는 방법이 이 조건을 만족하며 이것을 그림 13에 나타내었다(Fujiwara and Fujimoto 1989). 만약 본 시스템 초전도마그네트의 위치가 중심이면 부상의 중심에 있는 것으로 상호 인덕턴스는 0이다. 상호인덕턴스는 마그네트의 수직방향의 변위에 비례한다. 이 시스템을 적용시키면 저항비는 그림 1에서 나타낸 수직 자속시스템의 두 배가 될 수 있다.

차량의 추진시스템은 차량에 탑재된 초전도마그네트가 여자의 역할을 하고 여자코일과 마주보도록 지상에 설치된 3상 코일이 전기자가 되는 선형동기전동기이다. 이 3상코일은 직렬로 특정한 길이만큼 구성되어 있어 전력공급시스템에서 전원을 공급한다. 각 부분은 스위치를 사용하여 전력공급원과 연결되어 있다. 여자코일 및 전기자코을 모두 공심(air core) 코일이며 여자코일은 차량 보기 양쪽에 설치되어 있고 전기자는 U형의 가이드웨이 양쪽에 설치되어 있다.

선형동기전동기의 기본원리는 기존의 회전형 동기전동기와 같다. 추진력은 열차 운동과 동기가 되어 흐르는 전기자코일에 의해 얻어진다. 선형동기전동기의 추진력은 전류크기에 비례하고 일정한 위상각에서 차량의 속도와

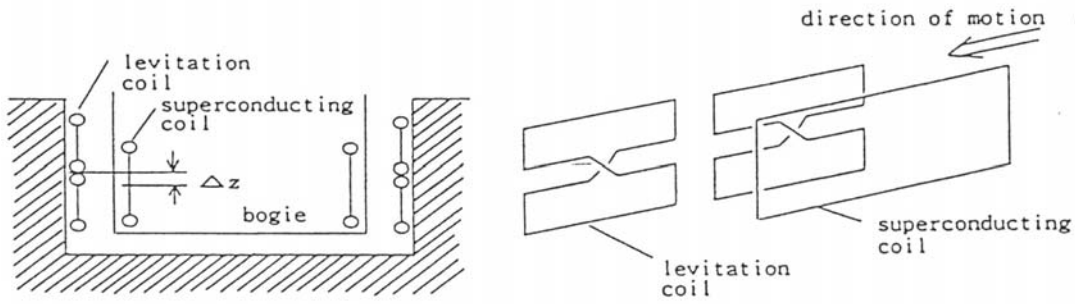

그림 13. 무효자속 부상코일의 배열

는 무관하다. 따라서 이런 형태의 선형동기전동기는 고자장의 초전도마그네트로 운영되는 고속에서 좋은 특성을 가진다.

큰 공극에서는 일반적으로 선형유도전동기보다 선형동기전동기가 보다 나은 특성을 보인다. 초전도선형동기전동기는 고자장마그네트와 긴 폴피치를 가지고 있어 10-20cm 정도의 공극에서 좋은 특성을 보인다. 본 형태의 전동기는 철심을 가지고 있지 않기 때문에 전자기력이 코일에 바로 작용한다. 전동기의 지지 혹은 전동기의 기계적 강도는 이러한 힘을 고려하여 설계되어야 한다.

가이드웨이 코일이 전체 길이에 걸쳐 분포되어 있으므로 코일의 개수를 줄이는 것이 필요하다. 결합된 안내 및 추진 시스템과 결합된 부상 및 안내 시스템이 개발되었다. 더욱이 추진, 부상 및 안내의 모든 기능이 한 회로에 통합되었다(Murai and Fujiwara 1993). 코일의 건설은 가이드웨이의 코일을 부탁시키는 난이도 및 전기적 절연 및 시스템 크기에 따라 결정된다. 부상코일은 코일 도체에 형성되는 힘을 유지하는 것과 오랜 시간 사용할 수 있는 전자기 특성을 가지고 있어야 한다. 코일의 개수가 많기 때문에 건설비용이 저렴해야 한다. 손실을 줄이기 위하여 전기적 저항이 작고 시정수가 큰 것이 바람직하다. 이러한 조건을 만족시키기 위하여 도체 단면적 및 코일 단면적에서 도체 용적율이 커야 한다. 부상코일에서 유기되는 전압이 적으면 전기적 절연 시스템은 간단해진다. 코일을 지지하기 위한 지지물은 반드시 비도전성이어야 한다.

한국: 지난 수십 년 동안 독일과 일본을 중심으로 지속적으로 발전하였으며, 자기부상 방식으로는 상전도 방식과 초전도 방식으로 크게 나눌 수 있다. 상전도 방식은 다시 흡인식과 반발식, 유도식으로 구분될 수 있으며 현재 UTM에서는 상전도 흡인식 자기부상 방식을 채용하고 있다. 상전도 흡인식 자기부상 방식은 기존의 전자석 제작 방식이 그대로 적용된 것으로서 부상력 한계로 인해 부상높이를 10mm 이상 크게 늘릴 경우 과도한 전류를 전자석에 흘리게 되어 부상에너지 효율이 떨어지게 된다. 따라서 영구자석을 이용한 유도식 부상 방식이 연구되어 왔으며, 자기부상열차, 플라이휠 등의 분야에서는 기존 시스템을 보완하는 동시에 자기부상의 장점을 살려 발전해 오고 있다. 따라서 기계연구원에서는 Halbach 배열 영구자석을 가진 자기 부상 시스템을 이용한 안정적이고 경제적인 자기부상시스템과 보다 향상된 추진력을 제공해주는 LSRM(Linear Switched Reluctance Motor)을 이용한 새로운 초고속형 자기부상열차 핵심기술개발을 진척시키고 있다.

새로이 연구한 부상 장치(그림 14)는 일정 속도 이상에서 요구 부상력이 발생하며, 항시 제동력이 작용하는 단점을 가지고 있으나, 전력 소비가 없고 제어 장치가 불필요한 장점을 가지고 있다. 따라서 이를 위한 연구에서는 공간고조파법과 유한요소법을 이용하여 부상 장치의 설계 변수에 따른 부상력과 제동력의 비를 확인하고, 부상력

그림 14. 제작 완료된 시험설비

그림 15. 부상 및 추진장치

과 제동력의 비가 최대가 되는 설계 변수를 도출하고자 한다. 또한 1차측 영구자석의 배열에 따른 힘특성과 2차측 도체의 형상에 따른 힘특성을 확인하고, 부상력과 제동력의 비가 최대가 되는 영구자석 배열 및 형상(그림 15)을 제시하였다.

추진력 향상을 위해 개발한 LSRM(Linear Switched Reluctance Motor)은 스위칭 제어 장치가 결합된 특수형태의 모터인데 특히, 본 연구에서 제안한 추진장치는 고정자 부분에만 권선이 감겨져 있고 회전자 부분에는 권선이나 영구 자석이 존재하지 않는 간단한 구조를 가진다. 이 장치의 구동원리는 고정자의 각 상을 순차적으로 여자시킬 때 고정자와 쇄교자속이 최대가 되려는 방향으로 회전자가 회전하려는 특성을 이용한 것으로 회전자의 위치에 따라 고정자의 해당 권선을 여자 시킴으로서 토오크를 얻게 된다. 즉, 스위칭 소자를 ON, OFF시켜 해당권선에 전압을 인가하는 방법으로 전류의 크기를 조절하고, 그때의 전류 크기와 비례하는 쇄교자속 수에 의해 가변속 운전이 가능하도록 하는 것이다. LSRM은 이러한 간단한 구조이기 때문에 제작 생산적인 측면에서 상당한 이점을 지니고 있으며 또한, 직류모터와 같이 좋은 기동특성을 가지면서도 정기적으로 브러쉬를 교환하는 등 유지, 보수의 필요성이 적으며 유도전동기와 비교할 때에는 구동장치의 구조가 간단하며 단위 체적당 토오크, 효율 및 컨버어터의 정격 등 많은 부분에서 우수한 특성을 지니고 있다. LSRM은 자속 경로에 따라 두 가지로 분류할 수 있다. 원운동으로 회전하는 가동자로 구성된 SRM(Switched Reluctance Motor)을 잘라 펼쳐 놓았을 경우와 같은 형태로 LSRM이 제작된 경우 자속 경로는 가동자의 이동 방향과 동일하게 되고 이런 종류를 종축 자속(Longitudinal Flux) 기기라 한다. 그리고 가동자의 진행 방향을 가로지르는 자속 경로를 갖는 기기를 횡축 자속(Transverse Flux) 기기라고 한다. 본 연구는 종축 자속을 이용한 LSRM의 설계에 관한 것으로 SRM의 기본 구조인 6/4극의 형태를 갖는다. 권선은 6극 고정자에 3상으로 설치되며, 가동자는 4극의 형태를 갖는다. LSRM의 설계 방법은 장하분배에 의한 SRM의 설계 방법과 유한 요소법을 이용한 설계법을 모두 사용하여 특성해석을 다루었다.

초고속형 자기부상열차를 개발하기 위한 선행적 연구의 성격을 가진 새로운 자기부상 및 추진시스템의 연구와 더불어 본 연구에서는 이미 개발한 자기부상열차의 실용화 추진을 위한 연구도 병행하였다. 1989년 12월에 착수한 우리나라의 자기부상열차 개발사업의 성과로 1997년에 시속 110km 급 도시형자기부상열차 시제품 차량 UTM(Urban Transit Maglev)-01이 제작된 이래 지속적인 주행시험과 개선이 진행됨으로써 이후 국내 자기부상열차 개발사업은 중저속 자기부상열차의 성능 개선과 시범적 실용화 검토로 이어져 왔다.

3. 결 론

현재 500km/h의 속력을 달성한 자기부상열차 시스템은 상전도흡인식의 독일 Transrapid와 초전도반발식의 일본 MLX이다. 독일의 Transrapid는 2004년 중국 상하이에서 430km/h 급으로 상용화된 바 있다. 일본의 MLX는 현재 상용화를 위한 시험운행을 수행하고 있다. Transrapid의 부상높이는 10mm이며 공차는 ±2mm이다. MLX01의 부상높이는 100mm이며 공차는 ±6mm이다. 한국이 개발할 550km/h 초고속 자기부상열차의 부상에 대한 기준은 현재 마련되지 않고 있으나 경제성, 주행안전성을 고려한 부상 및 추진 방식을 고려하여야 한다.

초고속 자기부상열차의 부상시스템은 부상 뿐 아니라 측면 안내력도 동시에 구현되어야 한다. 도시형 자기부상열차의 경우 별도의 측면안내를 위한 제어 및 시스템을 가지고 있지 않으나 초고속의 경우 측면안내가 꼭 필요하다.

초고속자기부상열차의 추진방식에서 독일이나 일본에서는 선형동기식(LSM)으로 사용하고 있으나 경제성 측면에서 단점을 가지고 있다. LSM의 경우 비록 가이드웨이에 많은 비용이 필요하지만 고속운전(>>200kph)을 하기위해선 유일한 선택일 수밖에 없다. 따라서 고효율, 저비용구조를 가진 새로운 추진방식을 개발할 필요가 있다.

성 호 경

· 한국기계연구원 기계시스템신뢰성연구센터 책임연구원
· 관심분야 : 자기부상 시스템해석, 모델링 및 제어, 비선형 제어 이론, 강인 및 신뢰제어이론
· E-mail : sung-hk@kimm.re.kr