자기부상열차는 미래 궤도교통 시스템으로 여전히 유용한가?

한형석
한국기계연구원 자기부상연구실

1. 서 론

바퀴 대신에 자력을 이용하는 자기부상열차 개념이 등장한지 100년이 넘었고 실용화된지도 13년이 지났다. 13년간 중국과 일본에서 안전하게 승객들을 수송함으로써 자기부상기술의 신뢰성, 경제성에 대한 실증이 이루어졌다. 한국에서는 2016년에 인천공항에서 도시형이 실용화돼 현재 안전하게 운행되고 있다. 하지만 자기부상열차가 가진 고유한 잠재력에 비하여 확산 속도는 더딘 것이 사실이다. 바퀴식에 비하여 자기부상열차가 신뢰성과 경제성에 있어서 여전히 비교우위인지에 대하여도 의구심이 남아있는 것이 사실이다. 본고에서는 자기부상열차의 실용화 동향을 살펴보고 향후 확산 전망을 소개하고자 한다. 특히, 앞으로 우리가 살아야할 세계는 초연결사회이고 스마트 교통수단을 필요로 한다. 이러한 시대가 요구하는 교통수단 특히 궤도교통수단으로 자기부상열차가 적합한지 검토하고자 한다.

2. 원리와 특징

바퀴식 열차에서 바퀴는 차량의 지지, 탈선방지 및 견인을 담당한다. 이 세 가지의 기능은 바퀴와 레일 사이의 접촉에 의한 마찰력에 의존한다. 이러한 접촉과 그에 따른 마찰력은 가장 기본적인 기계요소로 널리 이용되고 있다. 그런데 열차가 고속화될수록 이러한 방식은 충격소음, 진동, 분진과 같은 환경문제가 커진다. 또한 마찰력의 크기는 수직력에 비례하는 한계 값을 갖기 때문에 견인력도 한계가 있다. 즉, 열차의 고속화에 한계가 있다. 더불어 회전 구동계의 마찰로 인한 기계적 저항이 생기고 부품들의 잦은 교체가 요구된다. 이러한 바퀴식의 단점들을 해결하기 위한 것이 바퀴 대신에 자력을 이용하는 것이다. 즉, 물체와 물체 사이의 접촉 없이도 힘을 전달할 수 있는 자력으로 바퀴의 3가지 기능을 대신하는 원리이다. 그림 1에서와 같이 두 자기장이 만날 때 두 자기장의 상호작용에 의하여 잡아당기는 힘인 인력이나 밀어내는 척력이 생기는데 이 자력을 이용하여 차량이 레일로부터 떠서 주행하는 것이 자기부상열차이다. 즉, 자기장에 의한 인력과 척력을 조합하여 차량의 지지, 탈선 방지 및 견인이 이루어지는 것이다. 기계적 접촉 없이 자력만으로 주행하기 때문에 자기부상열차는 바퀴식 열차의 단점들을 극복할 수 있는 것이다.

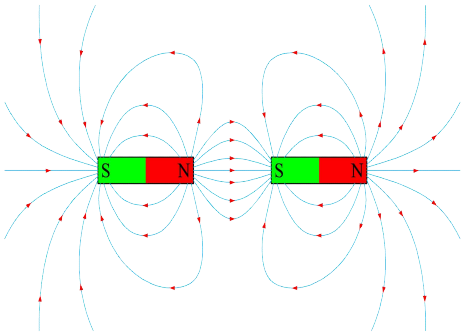

그림 1.(a) 자기장 상호작용에 의한 힘(인력)

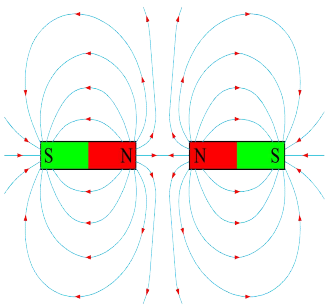

그림 1.(b) 자기장 상호작용에 의한 힘(척력)

그림 1의 원리를 이용하여 실용화된 자기부

상열차 방식에는 대표적으로 2가지가 있다. 하나는 그림 2에서와 같이 흡인력을 이용한 부상방식이다. 그림에서와 같이 전자석과 대응하는 강자성체 사이의 인력을 이용하여 차량이 레일로부터 일정한 거리를 두고 달리도록 하는 원리이다. 레일과의 거리 즉 공극(air-gap)을 일정하게 유지하기 위해서는 전자석에 흐르는 전류의 세기를 피드백 제어한다. 추진은 선형전동기를 이용하게 된다. 이 방식의 장점은 공극을 일정하게 유지해 차량의 자세를 제어할 수 있다는 것이다. 반면에 원천적으로 불안정한 시스템으로 정교한 제어가 요구된다. 이 방식은 상전도흡인식(EMS, Electromagnetic Suspension)이라고 불린다. 다른 하나는 자기유도식으로 그림 3에서와 같이 자기장이 도체를 상대로 이동할 때 도체에 유도되는 자기장을 이용하는 것이다. 이 방식은 EDS(Electrodynamic Suspensin)이라고 부른다. 이 방식은 자기장을 갖는 물체와 대응하는 도체 사이의 상대속도가 있어야만 자력이 생겨 부상하는 특징이 있다. 이 방식은 일본 초고속 자기부상열차에서 이용되고 있다. 그림 4에서와 같이 차량 측벽에 8자형 코일이 설치되고 차량에는 자석이 탑재된다. 차량이 움직이면 측벽 코일에 자기장이 유도되고 결과적으로 두 자기장 사이의 상호작용에 의하여 부상력이 만들어지는 것이다. 자기유도식에 있어서 차량에 답재되는 자기장은 다양한 방식으로 만들어질 수 있다. 예를 들어, 영구자석, 초전도체, 전자석 등이 있다. 이상에서 소개한 자기부상 방식들의 특징을 표 1에서와 같이 요약할 수 있다.

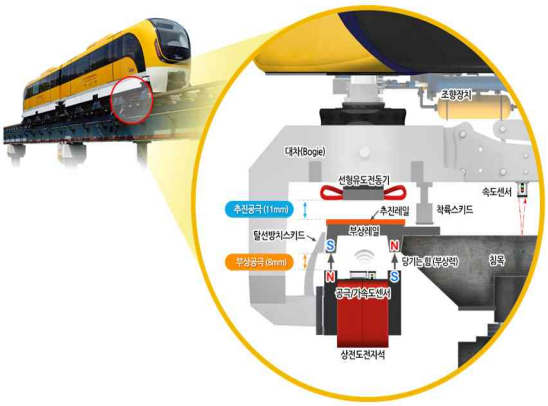

그림 2. 상전도흡인식 자기부상열차 원리

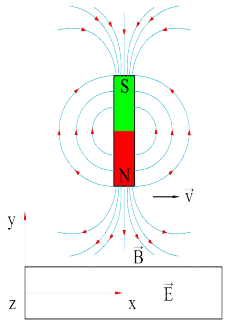

그림 3. 자기유도식 부상원리

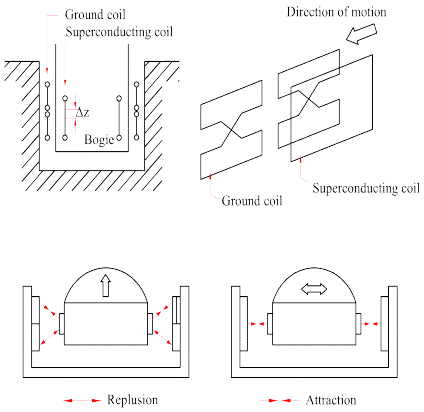

그림 4. 자기유도식을 이용한 자기부상열차

표 1. 자기부상 방식별 특징

방식	장점	한계
EMS (전자석)	-정지 상태 부상 가능 -궤도 구조 단순 -기존 제어기술 이용 가능	-큰 I2R 손실 -비선형, 와전류 효과 -열에 의한 자속밀도 제한
EDS (초전도체)	-I2R 이 작아 큰 자기장 생성 가능 -큰 부상공극	-작은 감쇠 -장지 상태에서 부상이 안됨 -극저온 냉각기 필요
EDS (영구자석)	-전류가 필요 없음 -단순 구조	-열에 취약 -자속강도가 낮음

3. 실용화 현황

독일은 1960년대 후반부터 포화에 이른 항공 승객 수요을 충족시키기 위해서 시속 500km 자기부상열차 Transrapid를 개발했다. 부상 방식은 상전도흡인식이고 추진방식은 선형동기전동기(LSM)이다. Transrapid는 첫 실용화된 자기부상열차로 운행시작 이후 안정적으로 운행되고 있다. 상하이 이후 중국 상하이-항조우, 미국 10여개 노선, 독일 뮌헨, 스페인 등에 적용을 추진했으나 추가건설은 이루어지지 않았다. 현재 Transrapid 기술진은 상하이 노선을 유지하면서 자기부상 엘리베이터 개발에 집중하고 있다. 반면에 중국은 Transrapid 기반으로 시속 600km 자기부상열차 개발을 착수해 현재 진행 중이다. 연구비가 약 3600억원에 이르며 5km의 시험선을 건설하는 계획이다. 중국은 향우 동북 3성을 중심으로 초고속 자기부상열차를 적용하겠다는 의지를 갖고 있다. 2005년에는 일본에서 도시형Linimo가 실용화되었다. 부상방식은 상전도흡인식이고 추진방식은 선형유도전동기이다. 현재 나고야에서 하루 25천명의 승객을 수송하고 있다. 10연간의 운행 결과 유지보수성에서 탁월함이 입증되었다. 즉, 차량과 선로의 유지보수 노력이 바퀴식에 비하여 현저히 작다는 것이다. 하지만, 추가 적용은 이루어지지 않았다. 2016년 2월에는 한국 자기부상열차 ECOBEE가 인천공항에서 실용화되었다. 최고 속도는 110km/h 이고 완전 무인운전이다. 실제 운행결과 저소음, 저진동에 있어서 탁월하며 차량과 선로의 유지보수에도 비용이 낮다는 것이 증명되었다. 현재, 제주도, 시흥시, 러시아 등에서 적용이 검토되고 있다. 중국은 2016년 5월에 창사에서 도시형을 실용화했다. 그리고 2017년 12월에는 베이징에서도 실용화되었다. 중국의 기술은 Linimo, ECOBEE와 유사하다고 할 수 있다. 중국 후난성은 향후 2030년까지 1000km의 도시형 자기부상열차 노선을 건설하고자 하는 포부를 갖고 있다. 창사 다음으로 장자제(장가계)에 도입하는 프로젝트가 추진되고 있다. 장자제는 년 600만명이 찾는 관광명소인 반면에 대중교통이 부족한 실정이다. 때문에 친환경적인 자기부상열차를 적용하는 것은 실현될 것으로 전망된다. 2025년 개통을 목표로 일본에서 '추오신간센'이 건설 중에 있다. 도쿄와 오사까를 시속 500km로 연결하는 것이 목표이다. 1단계로 도쿄-나고야를 2025년에 개통할 계획이다. 기존 바퀴식 신칸센의 승객 포화를 고려할 때 수익성에서 긍정적이다. 전 구간이 지하터널로 알려져 있다. 지상으로 건설할 경우 토지보상비가 필요하고 직선화에서 불리하기 때문이다. L0로 이름이 붙여져 있으며 603km/h의 기록을 갖고 있다. 일본은 이 기술을 미국에 수출하기 위한 노력을 기울이고 있다. 뉴욕과 워싱턴을 1시간 내로 연결하는 것이다. 이를 위해서 일본은 건설비의 50%를 제공하겠다고 미국에 제안했다. 미국 연방에서는 타당성 검토에 자금을 투입하고 있다. 일본의 궁극적 목표는 미국의 주요 고속도로를 L0 기술로 잇는 것이다. L0의 부상기술은 그림 4에서와 같은 원리를 택하고 있으며 추진은 선형동기전동기를 사용하고 있다. 한국에서도 초고속 자기부상열차를 개발하고 있다. 그림 11은 한국에서 개발한 초고속 자기부상 시험차를 보여주고 있다. 부상, 추진 기술은 상전도흡인식과 선형동기전동기를 채택하고 있다. SUMA 550은 국토교통부의 지원은 받아서 한국철도기술연구원, 한국기계연구원, 우진산전, 한국철도시설공단이 참여했다.

그림 5. 초고속 자기부상열차 Transrapid (상하이)

그림 6. 도시형 자기부상열차 Linimo (나고야)

그림 7. 도시형 자기부상열차 ECOBEE (인천공항)

그림 8. 도시형 자기부상열차 (중국 창사)

그림 9. 도시형 자기부상열차 (중국 베이징)

그림 10. 초고속 자기부상열차 L0 (도쿄-오사까)

그림 11. 한국 초고속 자기부상열차 SUMA 550

이상에서 소개한 실용화 사례 이외에도 연구단계에 있는 시스템이 브라질과 러시아에 있다. 현재, 자기부상열차 기술개발에는 중국이 가장 적극적이다. 일본과 한국은 이미 개발한 열차를 상용화하는데 주력하고 있다. 자기부상열차 확산 측면에서는 중국이 가장 활발하다. 개발도상국을 중심으로 경전철 건설에 있어서 자기부상열차가 후보 차종의 하나로 검토되고 있다. 하지만, 자기부상열차의 고유한 장점에 비하여는 확산 실적이 미흡하다고 할 수 있다. 그 사유들 중에는 신기술, 기존 철도와의 철도 비호환성, 경제성에 대한 실증 부족 등이 원인이라고 할 수 있다.

4. 진공튜브 열차

자기부상열차 기술개발에 있어서 최근에 큰 관심을 일으키는 것이 일명 Hyperloop로 알려진 진공튜브 열차이다. 지상에서 열차의 최고 속도는 공기저항에 의하여 제한된다. 즉, 공기저항에 의하여 대기 상태에서는 시속 500km 정도가 최고 속도라고 할 수 있다. 이 한계속도를 돌파하기 위한 것이 진공튜브를 이용하는 것이다. 이러한 개념은 물론 새로운 것은 아니지만 최근에 대시 관심을 끌기 시작하고 있다. 개념은 그림 12와 같다. 현재, 미국에서 2개의 회사가 개발을 주도 하고 있다. 인도, 러시아, 북유럽, 미국 등에서 이 개념을 적용하기 위한 노력이 진행 중이다. 여기서 주목할 것은 Hyperloop 개념에서 차량은 자기부상식을 채택하는 것이 주류라는 것이다. 구체적으로 영구자석을 이용한 자기유도식이 많은 연구자들에 의하여 채택되고 있다. 아음속을 고려할 때 정교한 부상제어가 요구되고 공극이 작은 상전도흡인식에 비하여 부상제어가 필요없고 공극을 크게 할 수 있는 자기유도식이 선호되는 것이다. 많은 전문가들의 의견에 따르면 이러한 개념은 실제 승객을 태우기까지는 많은 기간이 소요될 것이라고 한다. 그 이유는 진공튜브 내에서의 승객의 안전 때문이다.

5. 전망

이상에서 자기부상열차의 원리, 특징 및 실용화 현황을 소개했다. 이제 자기부상열차의 전망을 살펴볼 필요가 있다. 비록 필자의 주관성이 개입돼 있지만 다음과 같이 확산 전망을 검토하고자 한다. 먼저 미래 도시모습과 대중교통 시스템의 발전방향을 예상해볼 필요가 있다. 미래 도시는 스마트시티로 가고 있다. 그에 따라서 철도도 스마트시티에 적합해야 한다. 다른 요구사항으로는 미래는 초연결사회이다. 시간과 공간의 제약 없이 모든 것이 연결된다. 이를 위해서는 지역 간의 거리한계를 극복하기 위한 고속 교통수단이 필요하다. 또한 24시간 운행해야 할 것 이다. 자기부상열차가 장기적으로 확산되려면 스마트시티, 초연결사회에 부합해야 한다고 할 수 있다.

그림 12. 진공튜브 열차 Hyperloop

이 부합성을 검토하기 위해서 자기부상열차의 운행 속도에 따라서 도시형(100km/h), 초고속(500km/h), 아음속(1000km/h)로 구분해서 논하고자 한다. 도시형은 기존 지하철, 경전철급이다. 도시형은 친환경성이 최우선인 도시에 적합하다. 도시화가 급속하게 진행되는 개발도상국을 중심으로 저소음, 저진동이 중요시 되는 곳에 적합하다. 이를 고려할 때 중국에서 많은 수요가 예상된다. 한국의 경우 도시철도가 추가로 건설될 예정이고 한국은 도심에 거주하는 인구가 많아 진동소음 수준이 낮은 자기부상열차가 적합하다고 할 수 있다. 반면에 유럽, 일본은 이미 도시철도가 건설돼 있어서 수요가 적다고 할 수 있다. 최근에는 러시아에서 신도시 건설로 인하여 4개의 노선 건설이 검토되고 있다. 도시형의 전망은 개발국을 중심으로 수요가 늘 것으로 보인다. 초고속의 경우는 개발 초기에 비하여 바퀴식의 속도가 400km/h에 이르면서 자기부상열차와의 속도 간극이 좁아지면서 수요가 축소되었다고 할 수 있다. 하지만, 바퀴식은 여전히 350km/h 이상으로 운영하는 것이 문제를 가지고 있어서 400km/h 이상을 요구하는 노선에는 수요가 있을 수 있다. 미국, 중국을 중심으로 시장이 형성될 가능성이 높다. 한국의 경우, KTX 중심으로 철도네트워크가 구축되고 있다. 따라서 주요 노선보다는 주요지점 간을 잇거나 주요 노선 사이를 잇는 노선에 수요가 있을 수 있다. 일본 추오시칸센의 개통이 촉진제가 될 가능성이 있다. 아음속은 경우 기술적으로 큰 이목을 끄는 것이 사실이다. 또한 수요도 많은 것으로 나타나고 있다. 다만, 시속 1000km, 진공튜브라는 특성으로 실제 승객을 나르기까지는 긴 시간을 필요로 할 것 같다.

결론적으로 자기부상열차는 원천적으로 친환경적인 장점을 갖는다. 하지만 바퀴식 또한 친환적으로 발전하여 두 방식의 차별성이 자기부상열차의 등장 시점에 비하여 축소된 것이 사실이다. 그래서 두 시스템은 경쟁적인 관계라기보다는 수요자에게 다양성을 제공하는데 의미가 있다고 본다. 친환경성이 우선인 곳에서는 자기부상열차를 선택할 수 있도록 선택의 폭을 넓혀주는 것이다. 미래 사회가 스마트시티, 초연결사회로 가는 것을 볼 때 자기부상열차에게도 기회가 온다고 볼 수 있다.

참고문헌

〔1〕 Hyung-Suk Han and Dong-Sung Kim, "Magnetic Levitation", Springer, January (2016)
〔2〕 https://hyperloop-one.com/
〔3〕 http://www.linimo.jp
〔4〕 http://www.transrapid.de

저자이력

한형석(韓亨錫)
2000~2017년까지 도시형 자기부상열차, 초고속 자기부상열차 및 자기부상식 컨베이어 기술개발 수행. 현재, 초고속 및 아음속 자기부상 기술 개발 수행 중. 저서로는 'Magnetic Levitation'이 있음.
현재 한국기계연구원 책임연구원