

영구자석을 이용한 자기부상열차 개발 동향

한형석 · 성호경 · 신병천 | 한국기계연구원 자기부상열차실용화사업단
Hyung-Suk · Young-Jung Kim · Byung-Chun Shin

1. 서론

미래 궤도 교통수단 중의 하나로 자기부상열차가 국내외적으로 연구개발 및 상용화가 이루어지고 있다. 자기부상열차의 부상방식은 크게 2가지 방식으로 분류된다. 첫째로, EMS(electromagnetic suspension)으로 부상력이 전자석에 의하여 만들어지며 정지상태에서도 부상이 가능하고 주행 시 자기 저항력이 작은 것이 장점이다. 반면에 부상력을 얻기 위하여는 항상 제어가 필요하기 때문에 신뢰성 확보에 어려우며 궤도와 대차의 갭이 1 cm 내외로 작아 궤도의 건설 공차를 엄격하게 관리해야하는 단점이 있다. 이 방식으로 개발된 시스템이 TRANSRAPID[1], Linimo[2] UTM[3] 등이 있다. 둘째로, EDS(electrodynamic suspension)으로 부상(반발력)을 얻기 위해서는 차량을 일정한 속도 이상으로 주행시켜야 한다. 이 방식은 제어가 없이도 안정성이 보장되며 대차와 궤도의 간극을 10 cm내외로 크게 할 수 있다는 장점을 갖는다. 반면에 자기저항이 크고 자기장이 승객 구역

으로 누출이 일어날 수 있고 원천적으로 감쇠력이 부족하여 승차감이 나쁠 수 있다. 대표적인 EDS 방식 열차가 초전도 자기부상열차인 MLX[4]이다. 이 두 방식은 여전히 극복해야 할 문제들을 가지고 있다. 최근에는 기존의 방식이 가지고 있는 문제들을 극복하기 위한 대안으로 EDS의 단점을 최소화하면서 EDS의 장점을 갖도록 하는 새로운 개념으로 미국의 GeneralAtomics사와 Magplane사에서 영구자석을 Halback array로 배치하여 자기부상력을 발생시키는 방법이 시도되고 있다.

본 고에서는 새로운 개념으로 시도되고 있는 영구자석을 이용한 자기부상열차 기술동향을 General Atomics와 Magplane사를 중심으로 소개하고자 한다.

2. 기술동향

2.1 General Atomics

GA(General Atomics)는 FTA(Federal Transit



시스템 사양	값
날씨/안내	모든 날씨 운행
부상/안내	영구자석 Halbach array, 수동 부상/안내
추진	LSM(선형동기모터)
운영	완전 자동 무인 운영
안전	자동열차제어, 탈선 방지 구조, 고가궤도
최고속도	160 km/hr
평균속도	50 km/hr
차량 크기	12 m x 2.6 m x 3 m
평균전력소비	50kW
궤도 경사	10%
최소곡률반경	18.3m
승객용량	100명
선로	고가궤도
차량중량	16500 kg(만차), 9500 kg(공차)
열차구성	4 차량
최대가속도	1.6m/s ²
최대 Jerk	2.5m/s ³
내부 소음 수준	< 65 dBA
차 내부 DC 자기장	< 5 Gauss
승차감	ISO 2631 (1987)

Table 1. Specifications of GA Maglev

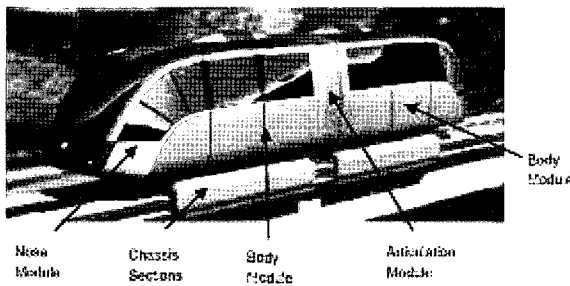


Fig. 1. GA Urban Maglev vehicle

Administration)의 지원으로 영구자석을 이용한 도시형 자기부상열차를 개발하고 있다.[5] 2004년 이태 샌디에고 시험노선에서 시제차량을 이용한 주행 시험을 수행하고 있다. 현재 산·학·연·관 컨소시엄을 구성하여 개발을 진행하고 있다. GA 시스템은 단순성, 안전성, 정속성, 10% 경사 등판, 작은 선회 반경 및 모든 기후조건에서 운행 가능성을 목표로 하고 있으며 주요 사양은 Table 1과 같다.

2.1.1 차량

Fig. 1은 GA사에서 개발 중인 도시형자기부상열차 형상

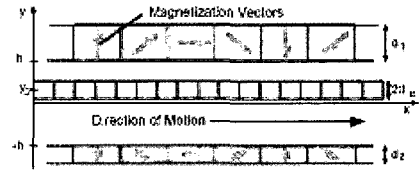
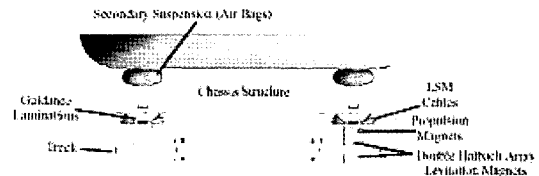


Fig. 2. Double Halbach array levitation magnets result in improved lift-to-drag ratio, and a stiffer primary suspension system

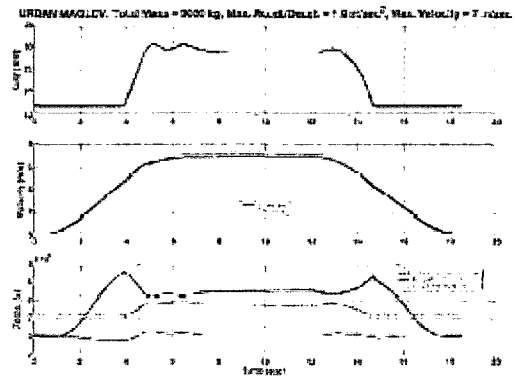


Fig. 3. Typical gap and speed profiles during testing

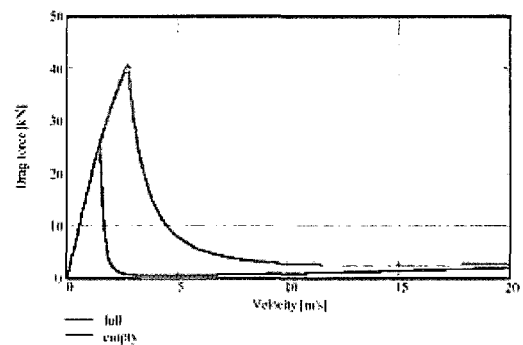


Fig. 4. Magnetic drag vs. velocity including the effect of wind resistance and eddy currents

으로 무인운전으로 시간당 12,000 명의 승객 수송을 목표로 하고 있다. 차량의 길이는 12 m 이고 차량 중간은 관절식으

로 연결된다. 운영자로 하여금 유연성 있게 운행 계획을 수립할 수 있고 건설 및 유지보수 비용을 줄일 수 있을 것으로 기대하고 있다.

차량에는 능동제어 시스템이 없고 모든 제어 및 안전장치는 궤도 측면에 설치되어 있다.

2.1.2 부상 및 안내

부상 기술은 "Inductrack"라 불리우며, 고자기장(1.4 Tesla) NdFeB 영구자석 육면체를 Fig. 2와 같이 2중 "Halbach" 배열로 배치한 것이 특징이다. "Halbach" 배열의 장점 중의 하나는 자기장이 궤도에만 집중되고 승객 영역에서는 자기장 방비대책이 없어도 안전 범위를 만족한다는 것이다. Fig. 2에서 부상, 안내 추진을 위한 영구자석 및 선형동기모터(LSM)의 설치 위치를 보여주고 있다. 궤도(track)와 영구자석으로 이루어진 Halbach 배열의 상호작용에 의하여 차량을 부상시키게 된다. 대차와 궤도의 간극은 25 mm 이므로 궤도 건설 공차에 여유가 있다. EDS 시스템이기 때문에 부상력은 3~4 m/s 에서 발생하는데 역을 빠져나갈 때 부상하게 된다. Fig. 3은 시험차량을 이용한 부상력 시험 결과로 약 2.4 m/s 에서부터 부상력이 증가하는 것을 볼 수 있다.

안내력은 차량에 설치된 추진용 영구자석에 의하여 수동적으로 발생한다. 결과적으로 부상, 안내력은 제어가 없이도 안정한 시스템인 것이 장점이다. Fig. 4는 저항력을 보여주고 있다. 저항력은 약 3 m/s 까지는 증가하나 그 이상에서는 속도가 증가함에 따라 감소하는 특징이 있는 것을 알 수 있다.

2.1.3 승차감

승차감은 전적으로 수동형 2차 현가장치에 의하여 결정된다. 1차 현가 즉 영구자석에 의한 부상력은 상대적으로 강성이 크고 감쇠가 작기 때문이다. 결과적으로 부상, 안내력은 제어가 없이도 안정한 시스템인 것이 장점이라는 하나 감쇠가 부족하여 승차감을 확보하기 위해서는 능동적인 2차 현가장치가 요구된다. 궤도의 불규칙도에 의한 영향을 최소화하기 위한 방안의 하나로 영구자석 배열을 길게(3.6 m) 설계한다.

2.1.3 추진 시스템

대차와 궤도의 공극이 크고 EDS 방식이기 때문에 선형동

기모터를 이용하는 것이 적합하다는 검토 결과를 얻었다고 한다. 대량 수송에서는 차량마다코일을 설치하는 선형유도모터(LIM)에 비하여 선형동기모터가 비용측면에서 효과적이라고 판단했다고 한다. 또한 선형동기모터는 추진력뿐만 아니라 안내력과 부상력도 부가적으로 제공하는 장점이 있다. 이러한 부가적인 힘을 얻기 위해서는 선형동기모터의 철심 형상을 최적화해야 한다. 이 부가적인 부상력으로 저항력을 줄이고 그 결과 전력 소비를 줄이는 효과가 있다. 선형동기모터는 제조비용을 줄이기 위하여 고체 동선(solid copper cable)으로 단순 3상 와인딩(simple three-phase winding) 구조를 이용한다.[Fig. 5] 이 3상 와인딩은 영구자석과 상호작용하여 추진력을 발생시키며 완성차량에서는 최대 50 kN에 이른다.

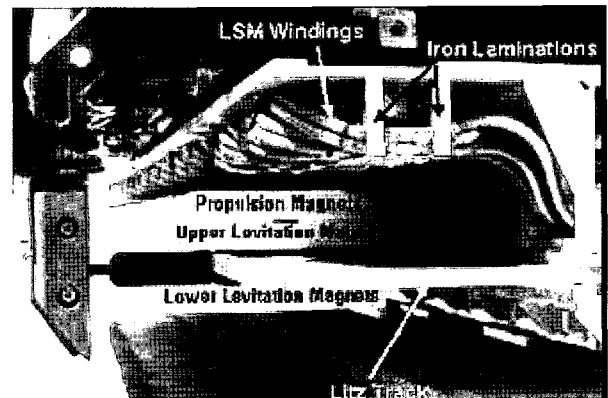


Fig. 5. Vehicles levitation, propulsion and guidance system

2.2 Magplane

Magplane사는 미국 FRA(Federal Railway Administration)의 지원으로 1992년부터 자기부상열차 연구를 시작하였다. 1992년 이래 중요한 변화가 있었는데 가장 큰 변화는 부상력의 발생 원리를 초전도체에서 영구자석으로의 변경이다. 그러한 변경으로 시스템을 단순화 할 수 있고 신뢰성을 향상시킬 수 있다는 것이다. 그러나 영구자석의 무게가 초전도체에 비하여 40% 큰 단점이 있다. 1992년 초기에는 500 km/hr를 목표로 하였으나 시장성을 고려하여 160 km/hr 이하로 수정하였다. 1992년에는 공극이 15 cm 이었으나 무게를 줄이기 위하여 10 cm로 감소시켰다. 1992년 고속 차량에서는 감쇠력을 능동제어 공기저항력 표면을 이용하였으나 저속에서는 선형동기모터의 상을 제어하여 감쇠력을 얻었다. 그러나 최근의 차량에서는 전 속도 구



간에서 부상패드(lift pad)를 이용하여 제어한다. 부상패드의 이륙 속도는 5 m/s이며, 전자기적 저항력과 추진력을 줄이기 위하여 부상패드를 이륙 속도 이하에서는 차체 내부로 들여보냈다가 이륙속도에 도달하면 펼친다. 2005년에 500 m 시험 노선을 건설하여 80 km/hr 의 주행시험과 2006년에는 중국에 2,000 m 시험노선에서 160 km/hr 주행시험 예정인 것으로 알려져 있다.[6]

2.2.1 구성

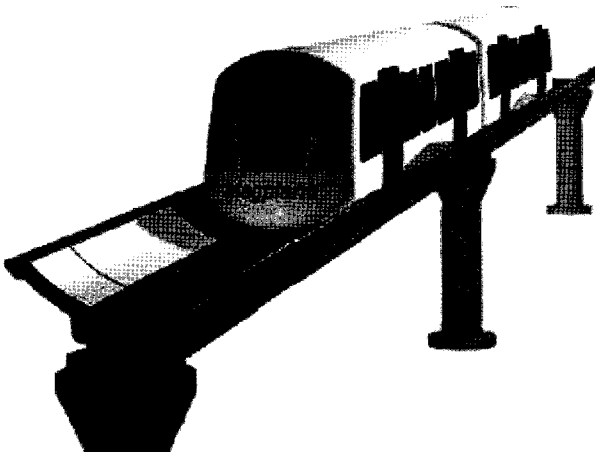


Fig. 6. Trough-like concrete span with surface mounted levitation sheets and a motor winding directly below the vehicle

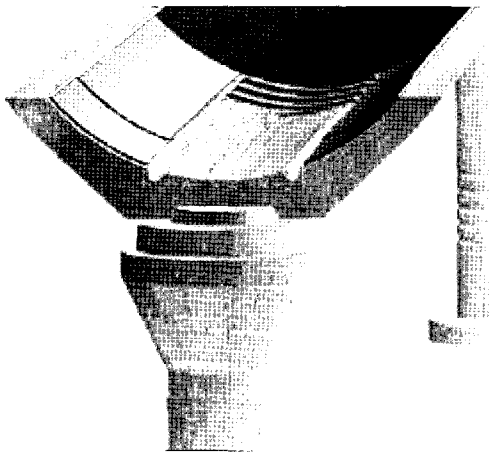


Fig. 7. Expanded view illustrating the motor winding and structural insert

Fig. 6~Fig. 10에서와 같이 전도부상구조는 적층 슈트이다. 슈트 사이 또는 공극 사이에는 전기적 전도성을 필요로 하지 않는다. 슈트는 스펀 구조물에 부착된다. 전도 슈트와 선현동기모터의 표면은 아스팔트 보호층으로 덮여진다. 선로는 원형 형상이며 콘크리트로 만들어진다.



Fig. 8. End-on view illustrating the large operating gap

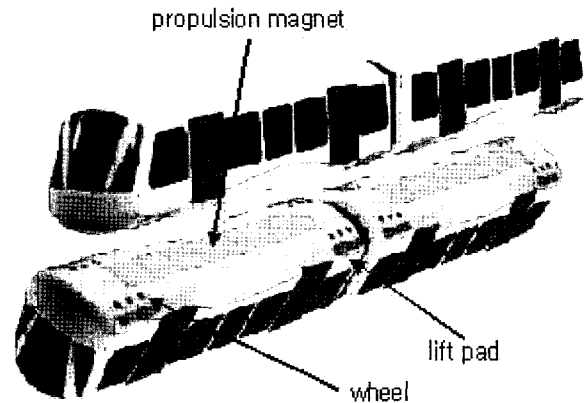


Fig. 9. Transit vehicle illustrating lift pads, propulsion magnets and wheels

2.2.2 차량

도시간 차량은 모든 승객이 좌석이고 비행기와 유사하게 5 좌석 배치를 하였다. 승객 밀도는 2 명/m² 이고 도시형은 기존의 철도차량과 유사하게 설계하였다. 2개의 차량이 중간에서 관절되도록 하여 주행가능 최소 곡률반경을 줄였다. 도시형은 입석을 포함하여 승객 밀도를 정상 상태에서는 4 명~8명/m²이 되도록 하였다. 구유처럼 생긴 형상은 차량이 궤도에서 Fig. 10에서와 같이 ±10까지 경사 주행이 가능하고 결과적으로 횡 가속도를 줄이는 장점이 있다. 반면에

제어기는 70 km/hr 이상에서는 공기역학적 표면을 이용하여 감쇠력을 제어한다. 전 속도구역에서 상하진동은 선형동기모터의 위상각을 이용하여 감쇠력을 제어하는 기법을 적용하고 있다.

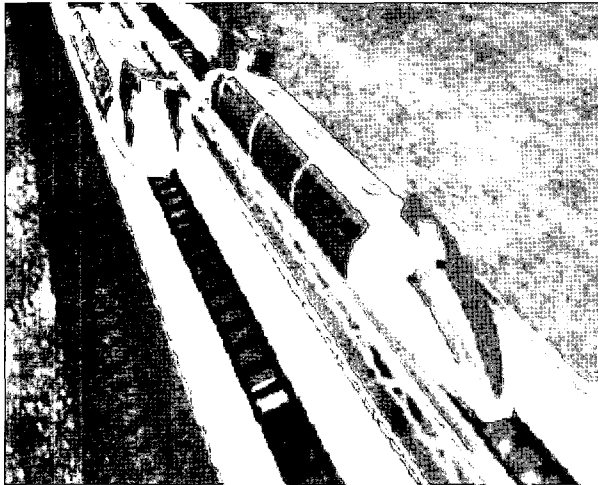


Fig. 10. Passive banking in curves of ± 10 degrees

경사를 크게 하면 추진 모터의 코일 설치에 어려움이 있다. 1차 현가 즉 부상력은 기본적으로 안정하나 감쇠가 부족하기 때문에 능동적 제어가 요구된다. 그 방안으로 저속에서는 기계적으로 부상패드의 위치를 제어하여 감쇠력을 제어한다. 이 부상패드는 2차현가 장치에 평행하게 설치된다. 이를 위하여 전자기적 구동기를 설치하여 감쇠력과 위치를 제어한다. 이 제어기는 궤도의 불규칙으로부터의 고주파수 진동과 저주파수 진동으로부터 절연 기능을 수행한다. 70 km/hr 이상에서는 공기역학적 표면을 이용하여 감쇠력을 제어한다. 전 속도구역에서 상하진동은 선형동기모터의 위상각을 이용하여 감쇠력을 제어하는 기법을 적용하고 있다.

2.2.3 부상 자석

차체에 설치된 부상, 추진 영구 자석은 네오디뮴-철-붕소(neodymium-iron-boron) 재료를 이용한다. 이 자석을 Halback 배열로 Fig. 11과 같이 배열한다. 부상패드의 형상을 최적화시켜 5,900 kg의 영구자석으로 32,000 kg의 하중을 부상시키도록 하였다. Fig. 12에서는 부상력과 저항에 대한 해석 결과를 보여주고 있다. 부상력은 10 m/s 이상에서 최대가 되고 반면에 저항력은 감소하는 것을 볼 수 있다. 이러한 부상력, 저항력은 슈트의 재료와 두께의 함수이며 구리

가 이용될 수 있다.

2.2.4 추진 자석

추진력을 최대화하기 위해서는 자석의 분포 면적을 최대화해야 한다. 차체에 영구자석 배열을 두껍게 만들수록 자기장이 커지고 반면에 전류와 추진 저항력이 작아진다. 그러나 영구자석의 무게가 증가하여 비용이 증가한다. 시험 차량에서는 8 cm 두께, 1 m 폭, 10 m 길이로 설치하여 5,600 kg이 소요되었다. 무게를 줄이기 위하여 Fig. 13과 같은 형상으로 최적화하는 기법이 이용되기도 하였다. 그 결과 영구자석 표면에서는 0.47 Tesla, 10 cm 떨어진 곳에서는 0.25 Tesla의 자속밀도를 나타내었다.

2.2.4 선형동기모터

선형동기모터의 코일 와인딩 파장은 1 m이다. 와인딩은

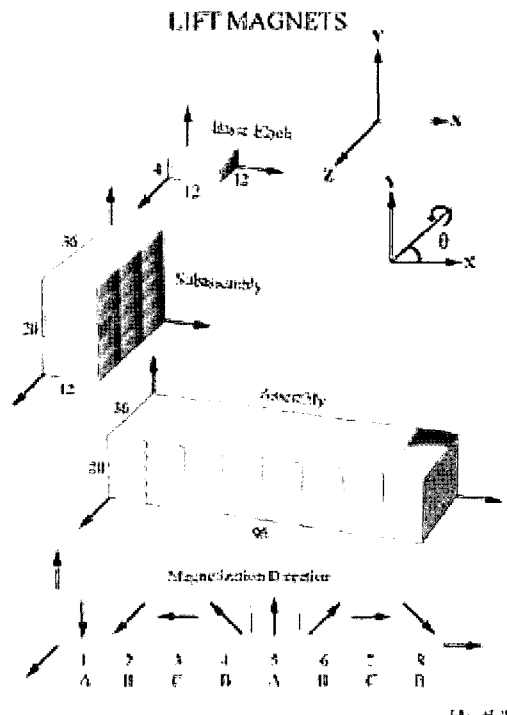


Fig. 11. Lift pad magnetic structure built from magnetized unit blocks

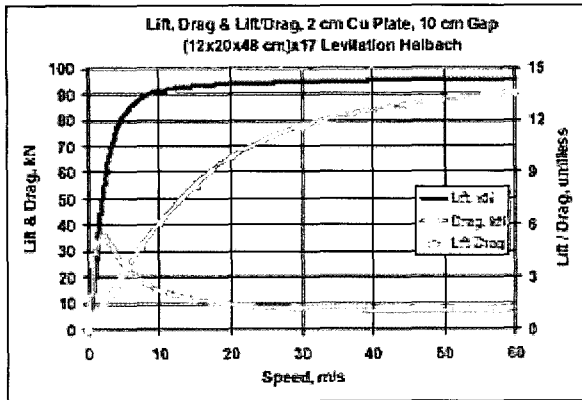


Fig. 12. Lift, drag, L/D (3-D analysis)

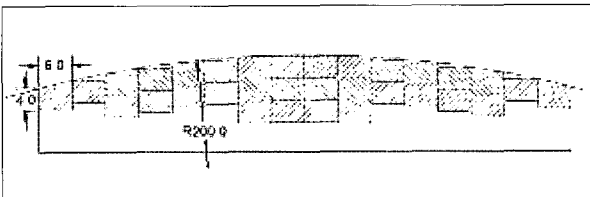


Fig. 13. Optimized cross-section propulsion magnet

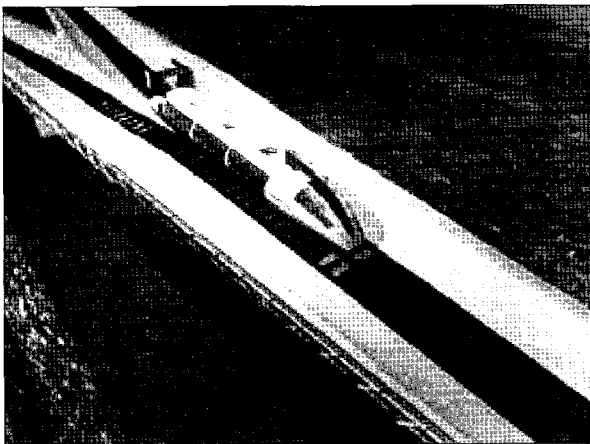


Fig. 14. Magnetic Switch

"helical winding"으로 6개의 전도체로 구성되어 있다. 모터 모듈의 길이는 10 m이고 궤도 스패와 맞게 하기 위하여 연속적으로 10 개 모듈이 필요하다. "helical winding"는 궤도 스패에 고정된다. 선형동기모터의 제어 블록의 길이는 차량 길이의 1/2이 되도록 하였다.

2.2.5 분기

분기는 2가지 방식으로 이루어진다. 첫째는 구유 같은 형상으로 인하여 움직이는 부분이 없는 분기기가 가능하다. [Fig. 14] 넓은 구간에서 추진 영구자석과 부상패드를 상

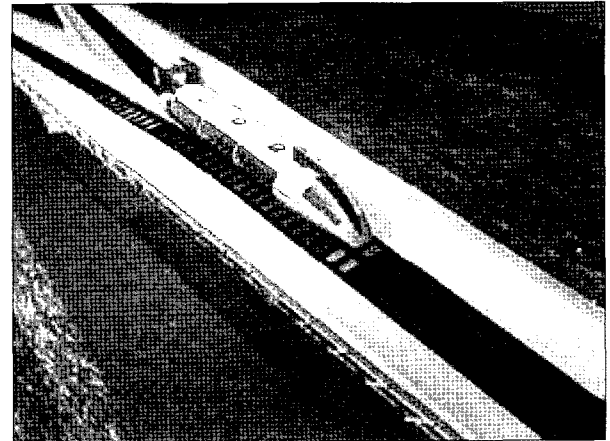


Fig. 15. Mechanical Switch

호작용시켜 선로를 변경한다. 두 번째로는 Fig. 15와 같이 기계적으로 궤도를 분기시키는 방법이다.

4. 맺는말

이상과 같이 영구자석을 이용하는 새로운 개념의 자기부상 열차 기술 동향을 소개하였다. 이러한 새로운 개념의 시도에도 장점이 있기 때문에 동 분야의 연구개발에 활용할 수 있을 것으로 기대한다. ☞

참고문헌

1. Dories, W. and Viola B.(2004). "Further development programme for the TRANSRAPID of the Federal Ministry of Transport, Building and Housing," Maglev 2004, Vol. I, pp. 23-31.
2. Yasuda, Y., Fujino, M., Tanaka, M. and Ishimoto, S.(2004). "The first HSST Maglev commercial train in Japan," Maglev 2004, Vol. I, pp. 76-85.
3. Inkun, K., Munhwan, Y., Kyuhwan, H. Gyes, P. and Heungbae, B. (1998). "Status of the Maglev development in Korea," Maglev 1998, pp.34-38.
4. Miyamoto, S., Osada, Y., Katsumi, Y. and Tsutomu, F. (2004). "The Status of the running tests of JR-Maglev," Maglev 2004, Vol. I, pp. 60-64.
5. Gurol, S., Baldi, R. and Bever, R. (2004). "Status of the General Atomics low speed urban Maglev technology development program," Maglev 2004, Vol. I, pp. 269-274.
6. Montgomery, D.B. (2004). "Overview of the 2004 Magplane Design," Maglev 2006, Vol. I, pp. 106-113.