

磁氣浮上鐵道の 現狀과 展望

正田英介* · 권병일**

(일본 동경대 전기공학과)

* 교수 ** 대학원생

— 차례 —

1. 序論
2. 磁氣浮上鐵道の 動作原理
3. 磁氣浮上鐵道の 諸方式
4. 實用 및 開發中の 시스템
5. 磁氣浮上鐵道の 特徵
6. 結論

1. 序 論

보다 빠르고 汎通한 大量軌道交通機關의 實現을 위한 浮上式 鐵道の 構想은, 거의 一世紀 以前의 air cushion이나 水圧을 이용한 浮上車의 實驗으로부터 시작되어, 그 開發은 오랫동안의 人類의 꿈이었다. 1960年代 後半, 磁氣技術과 power electronics의 進歩를 배경으로 磁氣浮上의 適用도 具體化되어, 空氣浮上과 함께 實用化를 향한 本格的인 研究가 시작되었다.^{1)~4)}

1970年代 中半까지 프랑스·영국·미국 등에서 開發이 進行되어 왔던 空氣浮上鐵道는, 高速性和 環境性에 難點이 있어서 實用化에는 이르지 못하고, 新交通시스템에 部分的으로 適用되는 것에 그쳤다.^{5)~6)} 한편, 磁氣浮上鐵道の 開發은 關連技術의 進歩와 함께 높은 環境性和 走行性能을 살려서 着實히 實用化를 위한 開發이 進行되어 왔다.^{7)~10)}

1984年 8月, 英國의 Birmingham市에서는 新交通시스템形의 磁氣浮上鐵道가 世界 最初의 實用 交通機關으로서 營業을 시작하였으며, 日本의 쓰쿠바와 캐나다의 밴쿠버의 만국박람회에서는 日本의 HSST(High Speed Surface Transport)가 一般觀客에게 공개되어서 많은 사람들이 浮上走行을 체험하는 기회가 되었다. 日本의 鐵道技術 綜合研究所의 宮崎驗實線 및 서독의 Emsland에서는 300~400km/h速度의 plot type車兩에 의한 連續走行 試驗이 行해지고 있으며, 實用시스템의 가능성에 대한 연구도 進行되고 있으므로 磁氣浮上鐵道는 가까운 시일내에 實用化될 수 있다고 하여도 과언은 아닐 것이다. 특히, 日本의 HSST시스템은 美國의 Las Vegas에서 來年에 實用化될 계획이며, 日本 國內의 地方自治團體들도 磁氣浮上鐵道の 導入에 많은 관심을 나타내고 있어서, 日本 國內에서의 實用化도 멀지 않을 것으로 期待된다.

以下에서는 磁氣浮上鐵道の 基本的인 動作原理와 特徵, 開發 및 實用의 現狀, 高速시스템의 實用化의 전망, 從來의 鐵車輪, 鐵레일 방식의 鐵道와 比較했을 경우의 特徵等에 대해서 설명한다.

2. 磁氣浮上鐵道の 動作原理

磁氣浮上鐵道에서는 磁石이 發生하는 힘에 의해 車輛을 支持하고 軌道에 따라서 走行하도록 案内된다. 鐵車

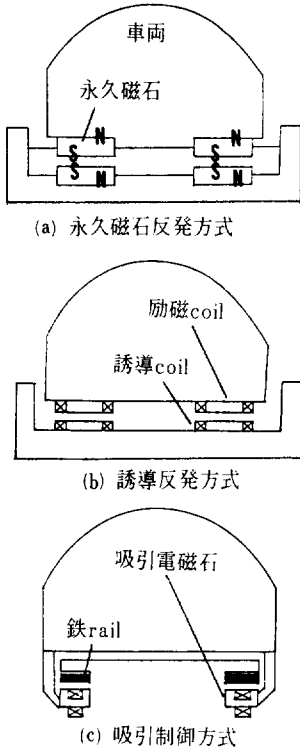


그림 1. 磁氣浮上鐵道の 原理 (支持方向만을 나타냄)

輪이 車輛을 支持해서 鐵레일 위를 走行하는 從來의 鐵道와는 달리, 支持·案内의 機構가 軌道에 接觸하지 않는 狀態에서 實現된다. 그러므로 車輛의 軌道에의 追從性이 向上되고, 曲線走行性能이 強化되며, 走行에 따르는 騒音이나 軌道の 振動을 적게 할 수 있어서 車輛과 軌道の 保守의 勞力이 輕減될 뿐 아니라 時速 400km 以上의 高速性能도 可能하다.

2.1 磁氣支持

磁氣支持로서는 그림 1에 나타낸 세가지 原理가 이용되고 있다.

(1) 永久磁石反發浮上: 같은 極성의 永久磁石間에 作用하는 反發力을 支持에 이용한다. 構成이 가장 簡單하고 本質的으로는 安全性이 높으나, 左右方向의 案内特性을 考慮하면 浮上特性이 不安定하다. 이러한 特性을 改善하기 위해서는 永久磁石의 配置를 復雜하게 하든가, 電磁吸引式의 案内磁石이 必要하게 되므로 車輛시스템 全體로서는 簡單한 構造가 되지 않는다. 뿐만 아니라 軌道를 따라서 永久磁石을 配置하는 데에 必要한 費用도

問題가 되어서, 적어도 現時點에서는 小形車輛의 支持에 만 適用될 수 있다. 實際로 소련에서는 K-mag 시스템의 小規模실험이 行해지고 있으나 開發단계에는 이르지 않고 있다.

(2) 誘導反發浮上: 그림(b)처럼 車輛에 부착된 자석이 地上에 설치된 短絡코일, 또는 導電sheet에 대해서 並進運動을 하게되면 코일이나 sheet에 電流가 誘導된다. 이 誘導電流와 磁石間에 作用하는 反發力을 支持에 이용하며 Electro-Dynamic Suspension (EDS) 방식이라 불리어 진다. 地上에 短絡코일을 설치할 경우에는, 磁石과 短絡코일 사이의 상대위치에 따라서는 支持力 뿐만아니라 抗力이 생기게 되며, 또한 短絡코일에 發生한 2次電流는 絡絡코일의 抵抗에 의해 소멸되어, 에너지 損失이 일어난다. 이 抗力은 速度가 증가함에 따라 감소한다. 短絡코일은 導電sheet로 대치 될 수 있다.¹²⁾ EDS 방식은 構造上, 磁石으로 부터 본 空際長이 크므로, 車輛을 支持하기 위한 充分한 힘을 發生하기 위해서는 強力한 大形의 磁石이 必要하다. 超電導磁石을 사용하게 되면 큰 起磁力이 얻어 지므로 큰 支持力이 얻어질 뿐만 아니라 車輛과 軌道間의 浮上空際長이 큰 走行이 가능하게 된다. 이 방식을 起電導方式이라 한다. 起電導方式은 日本과 캐나다에서 開發中에 있으며, 日本의 MLU시스템은 地上에 短絡코일을, 캐나다의 시스템은 導電sheet를 設置하고 있다.

EDS 방식의 支持力은, 磁石과 短絡코일間의 相對速度가 減少함에 따라 적어지므로, 車輛이 低速으로 走行할 경우에는 支持力이 不足하게 되며 靜止狀態에서는 零이 된다. 그러므로 車輛에는 浮上시스템과는 별도로 車輪第의 支持機構가 必要하게 되며, 靜止時와 低速走行時에는 이것으로 車輛을 支持하는 集中台車方式이 될 수 밖에 없으므로, 分布荷重의 利點이 減少한다. 따라서, 車輛의 重量과 費用이 增加하는 短點이 있지만, 支持原理가 完全히 受動的이며 시스템의 安全性과 信賴性도 높다.

(3) 電磁吸引制御浮上: 그림(c)에 나타내듯이, 支持用의 鐵레일과 磁石間에 作用하는 吸引力으로 車輛을 支持한다. 그러나 吸引力의 支持해야 할 荷重보다 크면 磁石은 레일에 吸着되고, 吸引力이 不足하면 磁石은 落下해 버리므로 支持動作은 本質的으로 不安定하다.

그러므로 磁石은 電磁石으로 해서, 그림2에 나타내듯이 空際長을 檢出해서 이것이 一定值를 維持하도록 磁石에 흐르는 電流의 크기를 制御해서 安定化한다. 이러한 操作

에 의해 항상 荷重과 平衡한 支持力이 發生될 뿐 아니라 過度的인 外力의 影響이나 軌道의 不整에 따르는 空際長의 變化를 充分히 적게 해서 高速走行時에도 空際長은 一定하게 된다. 이 방식은 다른 두 방식과는 달리 能動的인 支持시스템으로 制御技術이 重要하며, 電磁石을 사용하므로 Electromagnetic Suspension(EMS)方式이라 불리어 진다. 磁石의 輕量化와 後述하는 線形電動機의 性能을 維持하기 위해서, 空際長은 8~10mm程度가 바람직하다. 軌道의 設置精度를 極端으로 높이지 않고서도 300~400km/h의 高速走行狀態에서도 짧은 空際長을 維持하기 위해서는 速應性和 精度가 높은 制御시스템이 必要하다. 그 構成에 대한 理論的인 研究은 많지 않지만,⁽¹³⁾⁽¹⁶⁾ 實際의 시스템에서는 그림 2와 같이 加速度信號로부터 狀態觀測器에서 測定한 磁石位置와 그 微分을 이용한 狀態 feed back에 의한 構成이 一般的이다. 階段狀의 變位에 대한 追從性を 改善하기 위해서는 磁石의 非線形特性도 考慮할 必要가 있어서, 空際長 磁束의 크기를 feed back 하는 경우도 있다.

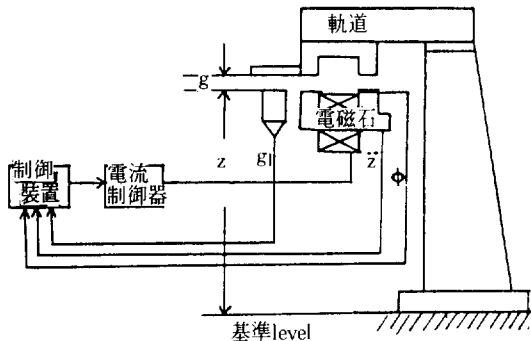


그림 2. 電磁吸引浮上의 制御시스템

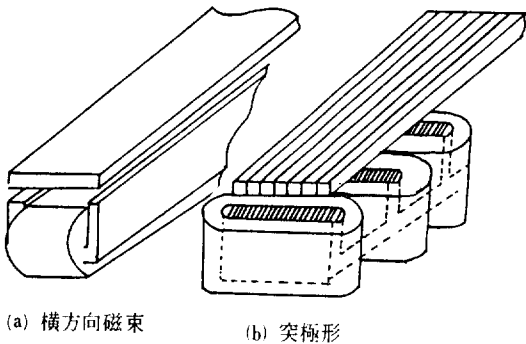


그림 3. 電磁石의 構造

電磁石으로는 그림 3과 같은 橫方向磁束形과 實極形의 두 종류가 있다. 橫方向磁束形은 構造는 簡單하지만, 레일을 成層할 수 없으므로 磁極幅을 좁게 하지 않으면 磁石의 走行에 따라 레일에 와전류를 발생시켜 電磁的인 走行抵抗이 發生한다. 支持力과 抵抗力의 比를 50 : 100 : 1程度로 設計하려면 좁고 긴 支持磁石이 된다.⁽¹⁷⁾ 突極形은 레일의 成層이 가능해서 抵抗을 적게 할 수 있으므로 集中形의 짧은 磁石이 사용된다.

2.2 磁氣案内

車輛의 走行에 대한 左右方向의 案内는, 레일과 磁石의 配置를 90° 回轉시켜서 考慮하면, 前節과 전혀 같은 原理로 實現할 수 있다. 그러나 車輛의 重量을 減少시키고, 軌道의 構造를 가능한 한 簡單히 하고자 하는 意圖에서 支持磁石과 案内磁石을 兼用하거나, 推進用的 線形電動機의 界磁磁石과 案内磁石을 兼用하는 等의 考案이 實際의 시스템에서는 行해지고 있다.

(1) Null Flux方式⁽¹⁸⁾: 起電導浮上의 超電導磁石은 推進用的 線形同期電動機의 界磁로 兼用되고 있다. 그림 4에 나타내듯이 線形同期電動機의 電機子卷線을 軌道에 左右2列로 配置해서, 各기 超電導코일과 對向하도록 한다. 電機子卷線은 左右並列로 接續되어 있으므로 超電導磁石이 變位해 있지 않는한 같은 推進電流가 흐른다. 하지만 코일이 左右로 變位하게 되면, 點線으로 나타낸 循環電流가 흘러서 變位를 補正하려는 힘이 作用하게 된다.

(2) stagger配置方式: 電磁吸引制御 浮上方式에서 그

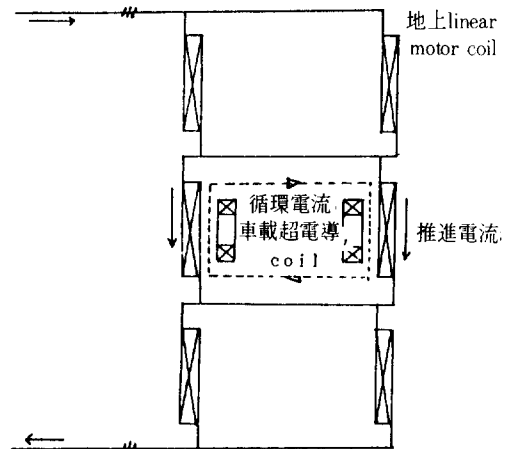


그림 4. null flux方式

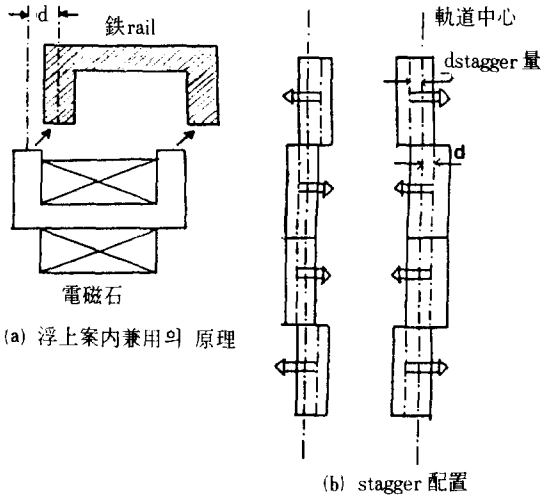


그림 5. stagger 配置方式

림 5(a)처럼 支持레일 斷面形狀을 U形으로 해서 浮上磁石이 이만큼 左右方向으로 變位시켜 配置시키면, 磁石에는 磁路를 가능한 한 짧게 하려는 힘이 作用하므로 支持力 外에도 左右方向의 變位를 零으로 하려는 案内力이 作用한다. 따라서 그림(b)처럼 4個의 磁石을 軌道의 中心線에 대해서 d만큼 左右變位하도록 配置하면, 화살표로 나타낸 左右案内力이 항상 作用해서 車輛은 軌道에 追從하게 된다.¹⁹⁾ yaw方向의 모멘트는 네힘이 平衡이면 零이 되므로 問題가 되지 않는다. stagger 配置 및 그에 대한 磁石의 設計의 內容은 독일의 Krauss Maffei社가 特許權을 소유하고 있으며, 日本에서는 No.912 822 “移動物체의 磁氣吊下裝置”로 特許權이 登錄되어 있다.

stagger 配置方式은 突極形으로도 實現될 수 있다. 以上에서 說明한 磁氣上構造는, 車體의 長手方問으로 多數의 支持磁石, 案内磁石을 똑같이 配置하는 모쥴式과 從來의 車輛과 같이 台車에 4個의 支持磁石과 4個의 案内磁石을 모아놓은 台車方式으로 大別된다. 台車方式은 機器의 收容空間이 넓을 뿐 아니라 原形電動機를 集中化하는 特徵이 있는 反面, 車重이 무겁게 되면 이것을 集中의 所以로 支持하는 磁石도 크게 되어 台車が 大型化된다. 모쥴式은 荷重과 磁石이 分散配置되어 軌道에의 負擔이 적어 지지만, 機器의 分散에 따르는 能率의 低下와 이것들을 收容하는 空間의 制約이 問題된다.

2.3. 線形電動機에 의한 推進

磁氣淨上鐵道の 車輛 驅動과 接觸 하지 않고 走行하

로 線形電動機에 의한 直接驅動이 必要 不可欠하다. 線形電動機는 回轉形의 電動機를 直線狀으로 展開한 것으로, 動作原理는 回轉形과 같으나 磁氣回路의 開方의이고, 鐵道用에서는 空際長이 크기 때문에 特性은 다르다.

(1) 線形電動機의 種類

磁氣淨上鐵도에 適用되고 있는 線形電動機로서는 誘道形, 同期形, 誘導形等이 있다. 無整流子形도 提案되어 道流形이라 불리어지기도 하지만,²⁰⁾ 原理의으로는 同期形과 差가 없으므로 同期形에 포함시켜서 考慮한다.

(a) 線形誘導電動機(LIM: Linear Induction Motor)

LIM에는 單軸式線形誘導電動機(SLIM: Single Linear Induction Motor)와 雙軸式線形誘導電動機(DLIM: Double Linear Induction Motor)가 있으며 그림 6에는

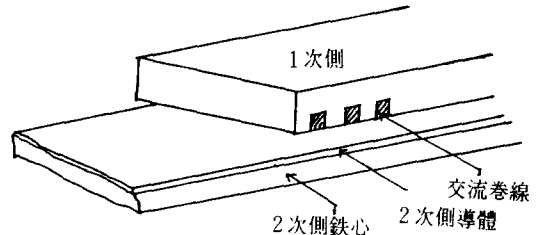


그림 6. 線形 誘導 電動機

SLIM의 構造를 나타내었다. SLIM은, 1次側과 2次側이 各各 1個이지만 DLIM은, 1次側이 2次側을 사이에두고 對稱으로 2個 配置되어 있다.

SLIM은 構造가 簡單하고, 比較的 짧은 空際長으로 運轉하여도 1次側과 2次側의 接觸 可能性이 적으며 車輛運動의 制約이 적다. 그러나 磁束의 通路가 길게 되어 누설磁束이 增加하므로 裝置의 에너지 效率이 나쁘다. 또한 1次側과 2次側 사이에 吸引力 또는 反發力이 작용하며, 端効는에 의해 이것의 크기는 1次側全長에 걸쳐서 一定하지 않으므로 爬疇모멘트도 어울러 발생한다. DLIM은, 磁束이 2個의 鐵心間을 通過하므로 에너지效率이 좋고, 1次側과 2次側사이의 힘은 兩側에서 消滅된다. 그러나 1次側과 2次側 사이의 構造的인 制約때문에 車輛運動이 制限되는 등의 短點이 있어서, 磁氣淨上鐵道에는 構造가 單純한 SLIM이 사용되는 경우가 많다.

LIM은 2次側의 構造가 簡單한 特徵이 있지만 空際長이 큰 이유등으로 에너지效率이 낮고, 高遠에서는 端效果에 의해 性能이 低下한다. 端效果를 줄이기 위해서는 폭이 좁고, 긴 構造가 되어야 하지만 길이는 曲線走行에 있어

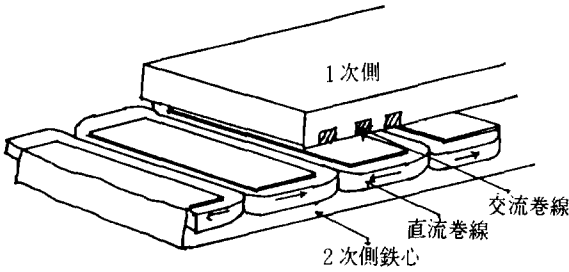


그림 7. 卷線形 2次 線形同期 電動機

서 曲率半徑等に 制限을 주게된다. 이와 같은 理由때문에 LIM은 300km/h 以上の 시스템에의 適用은 어려운 것으로 생각되지만, 中·低速用의 시스템에서는 코스트面의 特徵을 발휘할 수 있다.

(b) 線形同期電動機(SLM: Linear Synchronous Motor)

卷線形 2次 線形同期電動機를 그림7에 나타냈다. LSM은 回轉形同期電動機처럼 界磁와 電機子로 구성되며, 界磁는 鐵心에 卷線을 설치한 電磁石形, 空 코일을 超電導로서 이용하는 超電導코일형, 영구자석을 이용하는 영구자석形 등이 있다. 界磁에 超電導磁石을 사용할 경우, 超電導電動機라 불리어 진다.

LSM은 界磁磁石이 必要하므로 地上1次形이어야 하지만, 片側式 構成이어도 充分한 勵磁가 얻어지며 1次電流와 同期狀態에서 運轉되므로 性能은 양호하다. 界磁磁石은 支持나 案内用의 磁石으로도 쉽게 兼用할 수 있으므로 車輛 輕量化에도 유리하다.²¹⁾

LSM에 供給되는 1次電流는 界磁磁石의 動作과 同期의 移動磁界를 發生하여야 하므로 制御시스템의 構成이나, 性能에 대한 要求는 LIM의 경우보다 엄격하여, 速度는 公稱周波數에 의해서 制御된다.

(c) 誘導子形線電動機: LSM을 車上1次形으로 하려면은 勵磁도 1次側으로 부터 供給하여야 하므로 誘導子形線形電動機가 된다.

誘導子形線形電動機에는 異極誘導子形LSM, 同極誘導子形線形電動機에는 異極誘導子形LSM, 同極誘導子形LSM 등이 있으나 그림8에는 異極誘導子形LSM을 나타내었다. 2次側은 단지 輕網(mild steel)으로 구성되어 있다. 1次側의 DC勵磁코일은 隣接한 極과는 反對方向의 空隙磁界를 形成한다.

2次側에는 일시적 端効果電流는 급속히 消滅되며, 그 영향은 대단히 미약하다. 이경우의 2次電流는 힘의 發生에

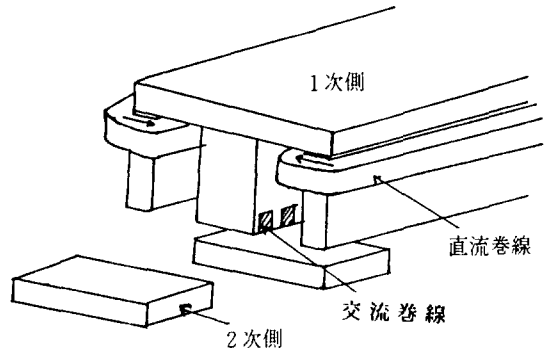


그림 8. 同極誘導子形線形同期電動機

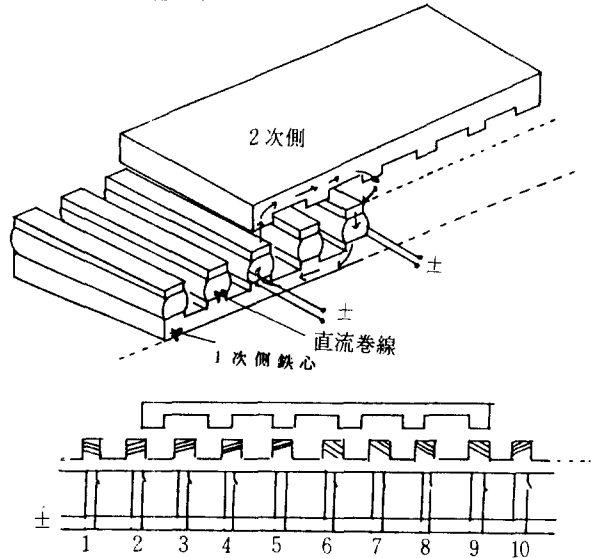


그림 9. linear switched reluctance motor

必要치 않으므로 實際적으로는 충분히 減少시킬 수 있다. 誘導子形電動機는 2次側의 鐵心構造가 複雜하게 되므로 高速用으로는 곤란하나, 1次와 2次間의 吸着力을 支持力으로 이용할 수 있는 이점이 있으므로 中·低速용으로 研究가 進行中에 있다.²²⁾

以上에 說明한 種類의 線形電動機外에도 그림9와 같은 linear switched reluctance motor의 연구도 進行中이다.²³⁾

1次側과 2次側의 極數및 極幅는 다르며, 2次側에는 卷線이 없다. 1次側의 두 極이 DC에 의해 勵磁될 경우, 各極은 가까운 2次側의 極을 끌어당기게 된다. 이러한 스위칭 動作을 連續함으로써 一定方向으로 推進시킬 수 있다.

(2) 車上1次式과 地上1次式: 線形誘導電動機의 推進에 必要한 에너지를 車輛으로 부터 供給하는가 地上設備에

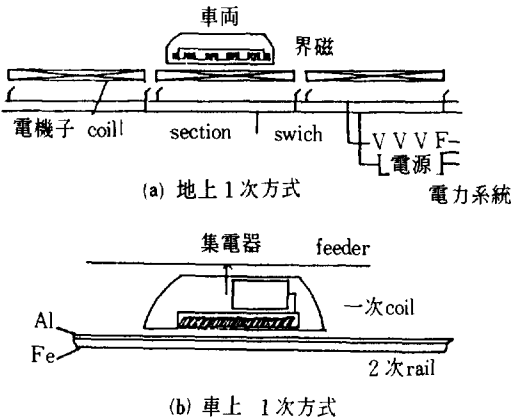


그림 10. 地上1次方式과 車上1次方式

서供給하는가의 문제는 feeder시스템構成과 關連해서 重要한 問題이다. 특히, 浮上鐵導는 高速의 應用을 目的으로 하고 있으므로 集電裝置도 實用化의 重要한 열쇄 中の 하나이다.

앞에서 설명한 線形誘導電動機의 特徵에 의해 現在 까지 開發, 實用化되어 있는 方式으로는 線形同期電動機를 이용한 地上1次方式과 線形誘導電動機를 이용한 車上1次方式에 限定되어 있으므로, 이 두가지 方式에 대한 長短點을 說明한다.

그림10(a)에 나타내듯이 地上1次方式은 車上에는 浮上糸와 補機類 外에 界磁磁石을 실을뿐 所要電力量이 적어서 Battery나 線形發電機等으로 充分히 供給할 수 있어서 接觸集電을 할 必要가 없으므로 시스템은 簡單化될 수 있다.

推進에 必要한 電力은 軌道에 따라 配置된 電機子卷線으로 부터 供給되는데, 地上設備이므로 重量이나 容積의 制約이 없어서 大容化할 수 있으므로 高速化가 가능하다. 이 推進電力은 車輛과 對向하고 있는 部分의 卷線에만 供給하는 것이 効率과 驅動的 安定性의 側面에서 바람직하므로 區間스위치(section swich)를 사용한다. 高速에서 큰 推進力을 발생시키려면 區間(section長은 짧게 하여야 하므로 스위치의 數가 늘어나게 되어 建設費가 增加하게 된다.

驅動的의 可變電壓, 可變周波數電源(VVVF 電源)은 각각의 열차와 同期로 運轉하여야 하므로, 多數의 列車가 走行하게 되면 比較的 짧은 거리에서 多數의 驅動用 電源이 必要하게 된다. 以上の 說明에서 알 수 있듯이 地上1次方式은 車輛이 輕量化되어 高速運轉에 適合하지만

地上設備가 複雜하게 된다.

이것에 比해서 그림(b)에 車上1次方式은 LIM의 2次導體인 A1板과 塊狀鐵心を 結친 reaction plate뿐이다. 推進을 위한 모든 에너지는 車上的 LIM의 1次卷線으로 부터 供給되며, 또한 推進力을 制御하기 위한 VVF 電源도 搭載하므로 全體적으로 車重과 機器의 空間이 增加하게 되어서 客室을 위한 空間이 어느 정도 얻어질 수 있을가가 問題된다.

推進·浮上に 必要한 모든 電力을 車輛에 供給하게 되므로 接觸集電하게 된다. 在來方式의 鐵道에서도 350km/h에서 集電을 하고 있으며, 浮上に 의해 車輛의 走行運轉은 安定되어 있는 狀態이므로 큰 制約은 되지 않지만 信賴性이나 保守의 問題를 감수할 수 밖에 없게 된다.

設備費가 낮고 需要의 增加에 對應해서 柔軟하게 輸送力을 增加할 수 있는 점이 車上1次方式의 特徵이다.

3. 磁氣浮上 鐵道の 諸方式

前章에서 說明하였듯이 磁氣浮上の 鐵道の 構成要素인 推進·浮上·案内에는 여러가지 方式이 있다. 한편, 經濟的인 시스템을 構成하기 위해서는 車輛의 輕量化와 地上設備의 單純化가 바람직하므로, 實際의 開發에 있어서는 이러한 方式을 組合해서 相定될 수 있는, 應用에 가장 適合하다고 생각되는 시스템이 構成되었다. 그러나 이러한 選擇에 대해서도 많은 議論이 있으므로, 4章에서 具體的인 시스템을 紹介하기 前에, 먼저 시스템의 構成에 대해서 說明하고자 한다.

3. 1 可能한 시스템의 構成

要素技術의 組合으로 可能한 시스템의 表1에 나타내었다. 表1에 說明된 시스템의 名稱은 名國에서의 具體的인 開發 例를 나타내고 있는데 대단히 많은 組合의 시스템이 檢討되었음을 알 수 있겠다. 그러나 *印으로 表示 하였듯이, 實用내지는 最終的인 開發段階에 있는 시스템은 다음의 세 시스템으로 압축되어 진다.

- ① 超電導 EDS—LSM方式
- ② 常電導 EMS—LSM方式
- ③ 常電導 EMS—LIM方式

표 1. 磁氣浮上鐵道の 要素技術의 組合

磁氣浮上方式 線形電動機方式		電磁吸引制御方式(EMS)				誘導反發方式(EDS)		
		支持·案内分離方式		支持案内兼用方式		超電導磁石		常電導磁石
		橫方向 磁束方式	突極支持磁束·橫方向 案内磁石	橫方向 磁束方式	突極 磁束方式	浮上·案内 推進兼用	浮上·案内 分離兼用	
地上一次 線形	鉄心形	技術적으로 兩立하지 않음	·技術적으로 可能 ·部分的으로 *M-Bahn 에서 實現 TR-05 *TR-06	兩立하지 않음		技術적으로 바람직하지 않음		
同期電動機 方式	空心形	設計例있음	技術적으로 兩立하지 않음	技術적으로 兩立하지 않음		*日本の MLU	·日本の 日本國鐵 ML500 技研모델 ·카나다 部分的으로 概念設計 日本國鐵 ·西獨 ALPS EET 概念設計	
車上一次 線形 誘導電動機 方式	片側式	·日本運輸性 EML 프로젝트 ·MBB KOMET	技術적으로 가능, 概念設計 있음	*HSST 프로젝트	*Birmingham 프로젝트	原理적으로는 EET에서 試驗		
	兩側式	技術적으로 可能	技術적으로 兩立하지 않음	·TR-02 ·TR-04	術적으로 로 可能	原理적으로 가능		
	U形二次	ULIMAS 概念設計	兩立하지 않음	技術적으로 로 可能하 나 困難	技術적으로 로 可能하 나 困難	技術적으로 바람직하지 않음		
車上一次 誘導子形 線形 電動機方式	homo polar 同期 電動機	루마니아 Magnibus	兩立하지 않음	技術적으로 바람직하지 않음		技術적으로 兩立하지 않음		
	hetero polar 同期 電動機	DELSYN 概念設計	兩立하지 않음	技術적으로 兩立하지 않음		技術적으로 兩立하지 않음		

3. 2 세方式의 相互比較²⁴⁾

高速 시스템이라고는 할지라도 名方式의 性能上, ㉔는 最高速度 500km/h, ㉕는 400km/h, ㉖는 300km/h로 限定된다고 할 수 있겠다. ㉔는 日本의 鐵道技術綜合研究所 및 카나다에서 開發과 研究가 進行되고 있으며, ㉕는 서독 研究技術省에 Ensland 試驗線으로 試用試驗中이며, ㉖는 日本의 HSST 시스템과 英國의 British Rail이 開發한 Birmingham 시스템에 採用된 方式이지만 아직 低速의 實用

運轉의 經驗만 있을 뿐 高速用의 開發은 곧 開始될 展望이 다.

이러한 方式의 性能上의 特徵을 表 2 에 나타내었다. 實用 시스템에서는 사용되는 周圍의 條件에 의해 이것들의 特徵이 充分히 살려질 수 있는 方式이 採用될 것이다.

4. 實用 및 開發中의 시스템

各國에서, 여러가지의 視點으로부터, 많은 磁氣浮上 鐵

표 2. 세 방식의 相互比較

評價指標	A EDS/LSM	B EMS/LSM	C EMS/LIM
空 隙 長	100mm程度 空隙을 크게 하는 것이 가능하므로 安全性上, 軌道建設上 利點이 있다.	10mm程度 空隙이 짧기 때문에 軌道建設上, 乘車感上 制御等이 複雜하게 된다.	10mm程度 空隙이 짧기 때문에 레일의 施工을 精密하게 하여야 한다.
磁石重量比	日本の MLU 試驗車는 3.85t/t 台車方式으로 하면 減少될 可能性이 있다.	TR-06는 3.4t/t이며, MLU보다는 좀 낮지만 實用規模를 考慮하면 꽤 낮다.	HSST-03는 LIM을 넣어서 3.19t/t이며 地上一次에 가까운 值이다. VVVF 電源을 塔載하면 좀 더 낮아진다.
乘 車 感	本來 damping이 나쁜 사이지만 MLU는 damping板 等の 效果로 좋다. 車輪走行 時에는 問題가 있음	一次 spring系로서 磁石의 軌道追從性과 乘車感을 調整한다. 휘어질 수 있는 磁石의 導入도 考慮될 수 있다.	LIM의 torque ripple과 함께 module에 걸리는 힘이 複雜하므로 二次 spring만으로 處理하려고 하면 空隙이 커진다.
에너지效率	空心·超電導 等으로 基幹部는 좋다. 冷却은 分散의 程度에 依存한다.	鉄心때문에 力率은 低下한다. 效率을 좋게 하려고 section길이 짧게 하려면 費用이 많이 든다.	0.5程度로 낮다. LIM의 垂直力을 억제하면 에너지 效率이 低下되고, 最高速度가 限定된다.
環 境 性	高速이므로 空力騒音으로 不和磁界가 強하므로, 客室內·軌道周圍에의 누설磁束이 問題된다.	車輛의 形狀때문에 空力騒音이 꽤 높다.	接觸部나 레일接續部의 振動에 注意를 要한다. 누설磁界는 在來 鐵道와 같다.
信 賴 性	冷却시스템이 問題.	浮上系電源이 多事例로 構成되므로 整合性에 問題.	塔載機器는 많지만, 짧은 列車을 빈번하게 走行하는 方式을 취하면 汎用機器의 使用이 可能하므로 問題없다.

道の 要素研究가 進行되고 있지만 本章에서는 實用 및 實用規模車輛으로 實驗이 行해지고 있는 것에 限定해서 紹介하며 시스템의 詳細한 技術的인 內用과 運轉經驗에 대해서는 省略한다. 興味가 있는 諸者는 文獻을 參照하기 바란다.^{10), 25) 27)}

4. 1 日本의 超電導浮上列車(Linear Motor Car Maglev)^{28), 29)}

日本의 鐵道技術綜合研究所는 最高速度 400km/h 以上の 超高速浮上鐵道の 實現을 目標로 開發을 進行하고 있다. 시스템의 安全을 위해서 車輛과 軌道間의 機械的 空隙長을 10cm 정도로 크게 하고자 하는 要求를 만족시키고 초고속 주행을 가능하게 하는 큰 구동력을 얻기 위해서, 超電導磁石에 의한 EDS方式을 採用하고 있다. 1975년부터 宮崎縣(미야자키현)에 7km의 試驗線을 建設하였다.

1977년부터는 逆丁形軌道에서 ML-500試驗車에 의한 走行試驗이 行해져, 最高速度 517km의 高速走行, 模擬

tunnel內의 走行實驗이 行해졌다. 이 試驗에 의해 超電導磁石을 이용한 EDS-地上 1次 LIM方式의 超高速鐵道の 技術的可能性이 立證되었다.

1980년부터는 軌道の 構造를 U形으로 바뀌어서, 實際의 旅客輸送機의 모델인 MLU-001에 의한 試驗이 行해졌다. 그림11(MLU-002)의 寫眞에서 보이듯이 U形軌道에는 左



그림 11. 미야자키 試驗線의 MLU-002차량.

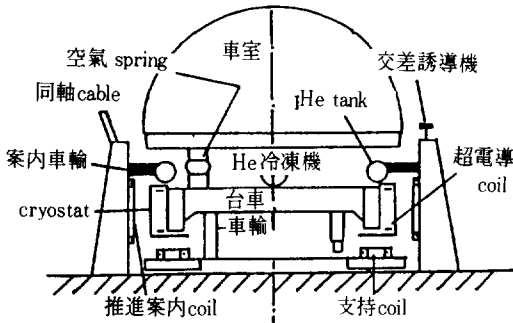


그림 12. MLU-001의 斷面圖

右에 推進·案内用的 常電導코일, 底部에 支持用的 短絡코일이 配置되어 있다. 推進코일에는 Cycloconverter 로부터 0~33.1Hz의 可變周波數·可變電壓의 交流가 供給되어 車上의 超電導코일과의 相互關係에 의해 推力를 發生시킨다.

MLU-001는 3輛編成이며 各車는 車重10 t, 크기는 10.1m×3.3m×3.0m, 全體로서 32座席이다. 車輛의 斷面을 그림12에 나타냈다. Cryostat는 斷面이 工形으로 各車輛의 片側에 2個씩 裝備되어, 그 속에는 1個로 推進·支持·案内 모두의 機能을 하는 超電導코일이 두 개씩 들어 있다. He 冷凍機等的 冷却系와 各車輛 모두에 搭載되어 있다. 列車는 低速에서는 車輪으로 走行하며 200km/h 前後의 速度에서 完全히 浮上하게 된다.

이 列車는 1輛에서 부터 3輛까지 여러 編成으로 試驗되었는데 先頭車는 3萬km 以上の 走行을 行하였다. 車輛의 基本的인 走行特性이나 冷却시스템特性, 信賴性의 데타가 얻어졌으며 有人走行에서도 良好한 乘車感을 나타내었다.

1987年 3月에는 plot type인 MLU-002를 完成했다. MLU-002는 이전 까지의 研究의 開發成果를 集大成함과 동시에, 最終段階의 이미지를 明確히 表現해서 安全性 및 實用化의 最終 確認을 하기 위해서 製作되었다. 最高速度 500km/h로 計畫된 車輛이지만, 現在의 實驗線 길이 的 制約 때문에 420km/h 정도를 目標로, 1987年 9月, 352km/h까지의 試運轉이 기록되었다.

最近, 日本의 많은 地方自治團體가 이 시스템의 導入에 積極性을 보이고 있으므로, 日本 國內에서의 實用化도 멀지 않은 것으로 期待된다.

4. 2 TR(Trans rapid)常電導浮上 列車^{30), 31)}

서독에서는 研究技術省이 中心이 되어 EMS·地上 1次

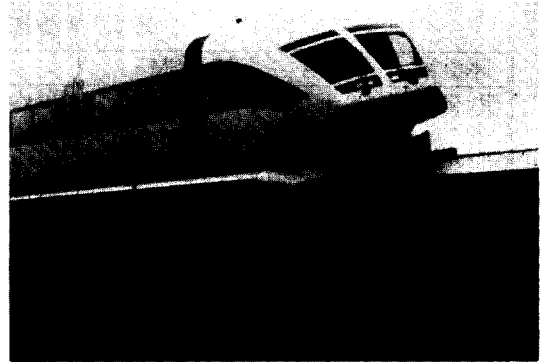


그림 13. 서독 Emsland 試驗線의 TR-06車輛

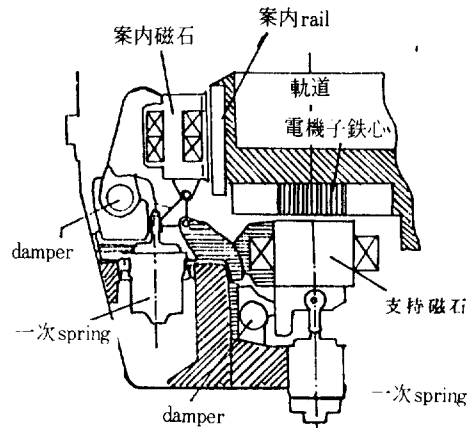


그림 14. TR-06의 台重構成

LSM方式에 의한 磁氣浮上 鐵道의 開發이 進行되고 있다. 이 方式은 1979年의 Hamburg 國際交通博의 場內輸送機關 TR-05시스템으로 그 技術의 可能性이 立證 되었다. 그 후, 高速鐵道로서의 實際規模와 運轉mode로서의 連續 實證試驗을 行하기 위해서 北西獨의 Emsland에 全長 21km의, loop를 포함하는 試驗線이 建設되어 그림13에 나타낸 2輛編成車에 의한 走行試驗이 繼續되었다. 試驗線에는 400 km/h의 通過에 견딜 수 있는 分岐裝置도 設備되어 있어서 實用시스템의 모든 構成要素가 試驗되고 있다.

軌道는 高架方式으로 콘크리트製와 鐵製의 두種類이다. 그림 14에 나타내듯이 軌道의 下面과 側面에 LSM의 電機子와 案内用的 鐵레일이 부착되어 있다. 電機子鐵心은 支持用 레일도 兼하고 있다. 電機子鐵心과, 그 卷線이 되는 cable의 부착을 위한 自動化機械가 사용되는 등 施工面의 開發도 進行되고 있다.

TR-06車輛은 最高速度 約400km/h로 設計되어 있으며,

浮上空隙長은 10mm이지만 8mm의 走行에도 成功했다. 그림 14에 나타내듯이 支持磁石은 LSM의 界磁도 弱하므로 突極形이며 案内磁石은 橫方向磁束形으로 되어 있다. 이들 磁石은, 軌道에의 追從性과 乘客의 乘車感을 兩立 시키기 위해서, 1次spring을 통해서 台車에 부착되어 있다. 1車輛에는 磁氣車輪이라 불리는 台車が 連續적으로 4個 配置되어 있으며 各台車에는 片側에 各各 4個의 支持磁石과 案内磁石이 갖추어져 있어서 1個가 故障를 일으켜도 運轉이 繼續될 수 있도록 設計되어 있다.

最近, 11km의 延長區間이 建設됨에 따라 試驗區間은 總 31.5km이며, 지난 12月에는 416km/h의 試驗에 成功하였다. 뿐만 아니라 보다 信賴性과 制御性이 높은 磁氣浮上系를 갖춘 TR-06II의 計畫도 進行中이어서, 車輛의 設計는 이미 完成되어 1988年 末에는 運轉될 予定이다. 이 車輛은 輕量化 및 空氣力學上의 改良, 騒音 레벨, 速度向上의 技術이 採用되었다.

TR시스템의 實用化의 檢討도, Las Vegas-Los Angeles 또는 Köln-Frankfurt의 區間을 對象으로 進行되고 있다.

4. 3 HSST 프로젝트

日本航空은 空港과 都心間을 연결하는 高速旅客輸送을 目標로, EMS-車上 1次 LIM方式의 HSST라 불리는, 磁氣浮上鐵道의 開發을 繼續해 왔다. 그 3號機인 HSST-03이 1985년의 쓰쿠바의 萬國博覽會에서 一般顧客에게 공개되어 60萬이 넘는 乘客에게 이용되었다.

HSST-03은 그림15에 나타내듯이 全長13.8m, 自重約 12 t, 座度數47의 車輛으로 module 이라 불리는 左右 獨立懸架의 6個의 磁氣車輪으로 支持·案内된다. 軌道는 350m의 2beam方式의 U形軌道이며 推進·案内·支持兼

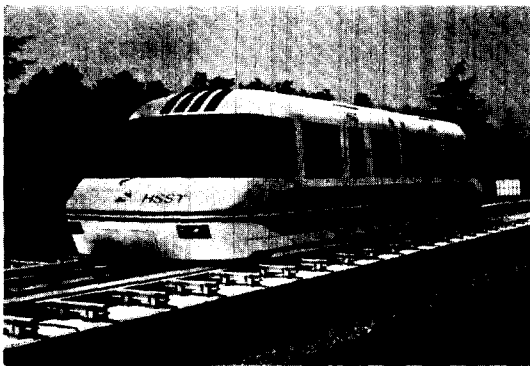


그림 15. HSST-03 車輛

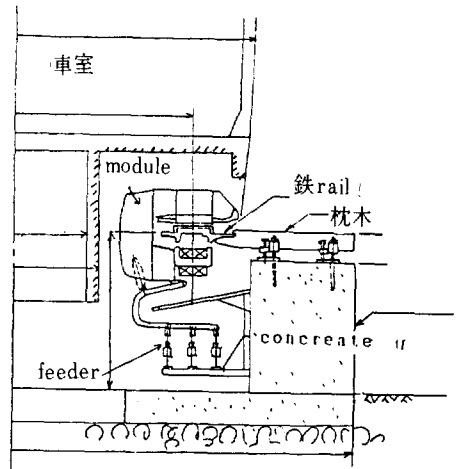
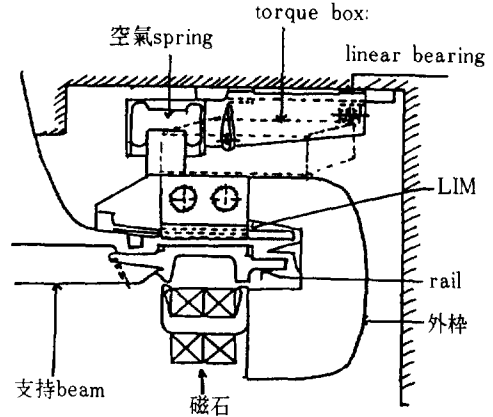


그림 16. HSST-03의 module과 軌道

용의 레일 2 본이 左右에 부착되어 있다. 쓰쿠바에서는 軌道가 짧았기 때문에 走行最高速度는 30km/h에 머물렀지만 車輛의 性能으로서 60km/h까지 走行할 수 있다. 車輛이 1輛이고 軌道도 짧았기 때문에, 經濟性을 配慮해서, 본래는 탑재해야 할 VVVF電原을 地上에 두고 feed line으로 부터 可變周波數交流流를 LIM에 供給했다.

各 module에는 5mm의 stagger 配置된 4個의 橫方向磁束形의 電磁石이 부착되어 있어서 支持力과 左右案内力을 同時에 發生하게 되어 있다. 浮上空隙長은 11mm이며, 그림16과 같이 레일의 反對側에 對向해서 13mm의 空隙長을 거쳐서, 1個의 LIM의 鐵心이 부착되어 있다. 2次導體는 5mm 두께의 Al板으로 레일 上部에 固定되어 있다. module은 案内力을 確保하기 위해서, Linear bearing으로 左右 平行移動되도록 自由度를 갖으며 torque box 로서 rolling을 억제한다.

LIM과 浮上磁石의 運動은 機械的으로 結合되어 있으므로 LIM이 發生하는 垂直力의 影響을 極力 억제하도록 스립周波數一定制御로 推進力을 制御한다. 스립周波數를 크게 하면 垂直力은 항상 零에 가까운 値로 維持되지만 驅動系의 에너지 效率은 低下된다.

HSST-03은 昨年, 벵쿠버의 萬國博에도 出品되어, 250 mR의 曲線部를 포함하는 450m의 軌道에서 一般觀客에게 空開되어, 曲線部의 通過에서도 良好한 案内特性을 발휘하는 것이 立證되었다.

現在, HSST-03에 뒤이은 HSST-04號機가 製作中이며 이것은 1988年 3月부터 5月까지 埼玉縣의 熊谷市에서 開催豫定인 「埼玉博覽會」에서 1車輛으로 展示走行에 사용되게 되어있다. HSST-04는 展示用이 아닌 實用型을 意圖해서 設計되었으며, 博覽會가 끝난 후에는 出力을 向上시켜, 미국의 Las Vegas에서 實用運轉될 計畫이다. Las Vegas의 다운타운과 호텔街間 約7km의 區間을 5輛編成의 HSST가 最高速度 230km로 1時間에 6回 往復運轉될 계획이다.

4. 4 Birmingham 시스템^{31) 32)}

Birmingham시스템은, British Rail에 의해 開發된 E-MS-車上 1次 LIM方式의 新交通시스템으로, Birmingham 國際空港과 國鐵의 空港駅間의 620m를 複線의 高架軌道로 연결한다. 1984年 8月에 世界 最初의 實用 磁氣浮上 鐵道로서 開業해서, 現在 1日 15時間의 完全自動運轉을 계속하고 있다. 昨年 1月까지 延 6000時間을 넘은 운전을 하고 있으며 平均稼働率 98% 以上으로 200萬 以上の 乘客이 利用했다.

그림 17에 나타내듯이, 車輛은 40人乘(座席數 8)으로, 車

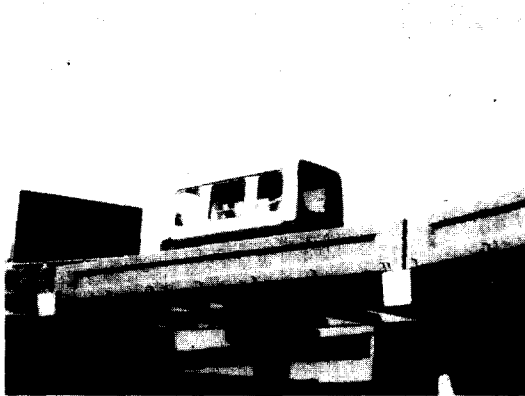


그림 17. Birmingham市에서 實用되고 있는 磁氣浮上車輛

長 6 m, 車重 8 t의 小形이어서 單車 또는 2輛編成으로 軌道를 往復運行한다. 軌道에는 左右에 支持·案内兼用의 成層된 支持레일, 中央에 T形의 鋼板위에 Aluminium板을 부착한 LIM의 2次레일이 놓여있다. 90秒로 兩 駅間을 연결하기 위해서 空隙長이 20mm임에도 불구하고, LIM은 4KN의 推力을 始動時에 發生하도록 設計되어 있다.

浮上系는, 突極形의 支持磁石을 片側에 41個의 stagger 配置한, 支持, 案内兼用形으로 stagger量은 10mm, 空隙長은 15mm로 큰 편이다. 1台車가 直接 客室에 부착된 構造여서 乘車感은 조금 나쁘지만 塔載 트랜지스터 VVVF 電源과 磁石電流制御器等을 콤팩트하게 床下에 부착하고 있는 것이 特徵이다.

5. 磁氣浮上 鐵道の 特徵

磁氣浮上 鐵道の 本格的인 開發과 實用을 통해서, 在來方式의 鐵道와 比較한 磁氣浮上 鐵道の 特徵이 明確해 지게 되었다. 本章에서는 이러한 特徵에 대해서 說明한다.

5. 1 騒音

浮上式 鐵道の 最大의 特徵은 非接觸走行에 의한 軌道 周圍에의 騒音·振動의 減少이다. 그림 18에 서독의 騒音에 대한 豫測值과 實驗結果를 나타낸다. 實驗結果는 모두 25m 地點에서의 最大騒音 level이다. TR-06는 空氣力學 騒音때문에 꽤 높은 騒音이지만, 低速의 HSST는 豫測值보다 낮다. 在來方式의 例인 서독의 ET-403을 나타냈으며, 新幹線의 騒音規制值과 比較해도 磁氣浮上 鐵道가 充

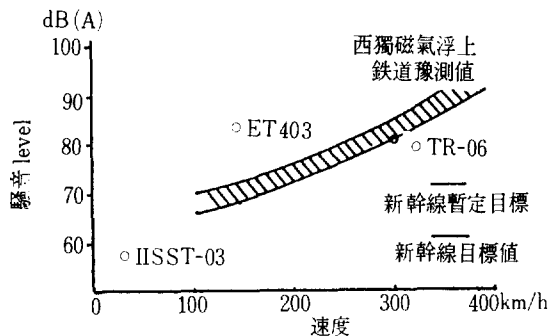


그림 18. 騒音 level의 比較

분한 低空害特性을 나타내고 있음이 立證되었다고 할 수 있겠다.

5. 2 所要 에너지

浮上에 必要한 電力은 TR-06가 1.5kW/t, HSST-03가 1.25kW/t으로 充分히 적은 值이다. 以後, 空際長의 短縮 및 power electronics 機器의 進歩와 더불어 이 值은 더욱 낮아질 것으로 豫想된다.

推進用電力에 대해서는 Birmingham 시스템이 1往復 1.6kWh(單車), HSST-03가 쓰꾸바의 350m 軌道往復에서 3.3kWh을 記錄하고 있는데 車重과 加速度區間의 長이를 考慮하면 거의 같은 level이다. 低速에서는 乘客 1人, 1km當의 에너지 消費로 換算하면 在來式의 鐵道와 거의 같다. TR-06에 대해서는 아직 이러한 데이터가 報告된 적이 없지만, 245km/h에서 加速中의 力率과 効率의 積이 0.76으로 記錄되어 있어서 驅動系 性能으로서는 우수한 것으로 나타났다.

5. 3 建設費用

磁氣浮上 鐵道の 建設費는, 急勾配와 작은 曲率半徑의 軌道가 許用되므로, 特定區間에 대해서는 在來方式보다 낮으나 車輛과 地上設備에 대해서는 높은 것으로 알려져 있다. 都市內 交通시스템에 대해 比較한 例33에서는, 容量當의 建設費는 新交通시스템의 半程度로 豫想되어서, HSS-T-03이나 Birmingham의 數值와도 一致한다.

高速시스템에 대해서는 Las Vegas-Los Angeles 間에 대한 TR-06와 在來方式 鐵道の 比較例에 의하면 前者가 조금 낮은 值이다.

鐵製 guide way의 量産이나 車輛方式의 標準化, 施工 方法의 確立等에 의해 磁氣浮上 鐵道の 費用은 아직도 낮아질 要因을 안고 있어서, 이후 더욱 經濟性이 좋아질 것으로 展望된다.

6. 結 論

人類가 輸送手段으로 軌道와 車輪을 사용하기 시작해서 부터 數世紀가 지나, 그 環境性과 高速性은 限界에 達하고 있다. 이것을 自動車나 航空機로 代替하기에는 輸送能力의 面에 問題가 있다. 磁氣浮上鐵道는 軌道交通機關의 特徵을 살리면서 그 限界를 극복하려는 것으로서 긴開發努力의 結果, 거의 實用化 段階에 들어가고 있다고 할 수 있겠

다.

유럽, 미국은, 地域社會의 活性化를 目標로, 이러한 새로운 방식의 交通機關의 導入을 積極的으로 추진하고 있으나, 日本에서는 技術開發만이 先行되어 왔다. HSST-03이 一般에게 公開된 쓰꾸바萬博에서 실시된 양케트에 의하면, 2/3 以上이 有料일지라도 이러한 施設이 必要하다고 생각하고 있는 것으로 나타나서, 高速·低公害의 새로운 輸送시스템에 대한 期待는 큰 것으로 생각된다.

1985년, 이탈리아의 交通시스템研究所가 世界의 專門家를 대상으로한 양케트에 의하면, 10年以內에 磁氣浮上鐵道가 實現될 것으로 期待하며, 適地는 미국과 日本人 것으로 나타났다(表 3).

표 3. 實現 時期에 관한 양케트 結果

都市間 輸送에 磁氣浮上鐵道가 實現될 時期			
國	10年 以內	10年~20年	20年 以上
유 럽		7	5
日 本		10	5
미 국	1	7	4

이러한 情勢의 배경과 自治團體의 導入에 대한 積極性을 생각할때, 앞으로 더욱더 실용화를 目標로한 개발 연구의 必要性을 절실하게 느낀다.

參 考 文 獻

- 1) 奥 他 : 超高速新幹線, 中公新書 272(1971)
- 2) Powell, J.R. et al. : High Speed Transport by Magnetically Suspended Trains, ASME Publication No. 66 WA / RR5(1966)
- 3) Guderjahn, C.A. et al. : Magnetic Suspension and Guidance for High Speed Rockets by Superconducting Magnets, Journal of Applied Physics, 40, 5, pp. 2133-40(1969)
- 4) Coffey, H.T. et al. : Magnetic Suspension and Guidance of High Speed Vehicles, Journal of Applied Physics, 40, 5, p. 2161(1969)
- 5) Hovering Shuttles Elevate Otis into People-mover Market, Railway Gazette Int, p. 619, Aug.,(1984)
- 6) Wormley, D.N. et al. : Noncontacting Suspension and Propulsion of Ground Transportation Vehicles, US Dot Report-DPB-50 / 79 / 3(1979)
- 7) 山村 他 : 磁氣浮上 鐵道, 電學誌, pp. 803~833(-1979)
- 8) E.R. Laithwaite : Transport Without Wheels, elek Science(1977)
- 9) B.V. Jaywant : Electromagnetic Levitation and Suspension Techniques, Edward Arnold(1981)

- 10) Maglev Transport : Now and for the Future, IMech(1984)
- 11) E. Gottzein : Knolle Magnettrans(catalogue)(198-5)
- 12) B.V. Jaywant : Electrmagnetic Levitation and Suspension Techniques, Edward Arnold, pp 36~38(1-981)
- 13) E. Gottzein : Das "Magnetische Rad" als Autonome Functions-einheit Modularer Trag- und Führsysteme für Magnetbahnen, Fortschr-Ber. 8 / 68, VDI(1984)
- 14) 山村 他 : 磁氣浮上車の制御理論, 電學誌, pp. 752~759 (1979)
- 15) B.V. Jaywant et al. : Feedback Control System for DC Electromagnets in Passenger Carrying Vehicles, Int. J. of Control, Vol. 24, pp. 627~639(1979)
- 16) D.A. Limbert et al. : Controlled Dynamic Characteristics of Ferromagnetic Vehicle Suspension Providing Simultaneous Lift and Guidance, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 101, pp. 217~222(1979)
- 17) 山村 他 : 차량의 磁氣浮上用 吸引電磁石의 速度特性解析 電學論 B., pp. 209~215(1975)
- 18) K. Nakamura et al. : LSM Propulsion System of the Miyazaki Maglev Test Track, Proc. Int. Cont. on Maglev Transport '85, IEE Japan(1985)
- 19) Y. Hikasa, et al. : Detail and Experimental Results of Ferromagnetic Levitation System of Japan Air Lines HSST-01 / 02 Vehicles, IEEE. Trans. on VT, Vol. VT-29, Nol, pp. 35~41(1980)
- 20) T. Umemori et al. : Development of DC Linear Motor, IEEE Tr. on PAS, Vol. PAS-98, pp. 145-6~1465(1979)
- 21) K.Glatzel et al. : the Development of the Magnetically Suspended Transportation System in the Federal Republic of Germany. IEEE Tr. on VT; Vol. VT-29, pp. 3~17(1980).
- 22) R.G.Gilliland et al. : a Linear Synchronous Propulsion Motor for Intergrated Magnetic Propulsion and Suspension, Proc. Int. Cont. on Maglev & Linar Drives, IEEE Pub. 86CH 2276-4, pp. 157-164(1986)
- 23) K.Admaiak et al. : the Switched Reluctance Motor as a Low-Speed Linear Drive, Proc. Int. Conf. on Maglev & Linear Drives, IEEE Pub 87CH2443-0, pp. 39~43(1987)
- 24) 正田 : 電氣吸引・電氣反發浮上輸送機關の性能比較, 昭和60年 電氣・情報関連學會連合大會, S7-7, pp. 1~173~1~176(1985)
- 25) Proc. Int. Conf. on Maglev Transport '85, IEE Japan (1985)
- 26) Proc. Int. Conf. on Maglev & Linear Drives, IEEE pub86CH2276-4(1986)
- 27) Proc. Int. Conf. on Maglev & Linear Drives, IEEE pub87CH2443-0(1987)
- 28) K. Nakamura, et al. : LSM Propulsion System of the Miyazaki Maglev Test Track, Proc. Int. Conf. on Maglev Transport '85, IEE Japan, pp91~98 (1985)
- 29) H. Tanaka et al. : the Status of Maglev Testing at JNR, Proc. Int. Con. on Maglev & Linear Drives, IEEE pub86CH-2276, pp 41~45(1986)
- 30) H.G. Raschbicher et al. : Status of the Maglev and Linear Drive Technology Program in the Federal Republic of Germany, Proc. Int. Con. on Maglev & Linear Drives, IEEE pub86CH-2276, pp 147-154 (1986)
- 31) S. Suzuki et al. : Operation Experience of HSST-03 System at Expo '85 and EXPO'86, Proc. Int. Conf. on Maglev and Linear Drives, IEEE pub87-CH2443- 0 pp. 129~132(1987)
- 32) B.H. North : Birmingham Airport Maglev-the Development and Design of the Support and Guidway, Proc. Int. Conf. on Maglev Transport'85, pp 237~242(1985)
- 33) E.H. Dalgleish : a Review of Birmingham Maglev after one year in Public Service, Proc. Int. Conf. on Maglev and Linear Drives, IEEE. pub86CH2276, pp 1~5(1986)