● 特別寄稿 ●

# 直線電動機와 그 應用

# Linear motor and it's applications

趙 正 萬　　工學博士 • 湖西大學 敎授

回轉運動을 하는 回轉電動機(rotary motor)에 對하여, 直線運動을 하는 電動機를 **直線電動機**(linear motor)라고 한다. 그동안 回轉電動機가 工場의 生産機械, 輸送機關 등의 驅動源으로서 많이 使用되어 왔었는데, 最近에는 工場의 生産機械는 물론, 輸送機關 등의 驅動源으로서, 時代의 脚光을 받고 새로 登場하여, 先進諸國에서는 高速化·低公害(騷音·振動의 低減)의 列車를 實用化시키기 위하여 直線電動機의 研究·開發과 試作·試驗에 拍車를 加하고 있는데, 우리나라에서는 아직 이 方面의 開拓·開發에 着手도 하고 있지 않기에, 이에 科學技術者들의 研究·開發을 促求하며, 企業家들과 行政당국의 關心을 喚起하고저 直線電動機의 基礎와 그 應用에 關하여 簡單히 紹介하고저 한다.

## 1. 直線電動機의 基礎

### 1.1 直線電動機의 構造와 種類

回轉運動을 하는 回轉運動機에 誘導電動機, 同期電動機 등이 있는데 對應하여, 直線運動을 하는 直線電動機에도 **直線誘導電動機**(linear induction motor, LIM), **直線同期電動機**(linear synchronous motor, LSM) 등이 있다.

回轉電動機의 固定子(stator)와 回轉子(rotor)에 對應하여, 直線電動機에서는 平板狀의 固定子(stator)와 走行子(runner)가 있어, 走行子는 固定子로부터 一定한 길이의 間隔으로, 이에 平行으로 走行한다. 1次卷線은 固定子에 있는 경우도 있고 走行子에 있는 경우도 있다.

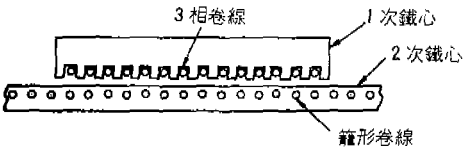
直線電動機는 直線運動을 無限으로 繼續할 수 없으므로 固定子 또는 走行子의 어느 한편이 直線運動의 길이보다 길지 않으면 안된다.

一般으로 2次 導体는 固体인데, 이것이 流体일 경우에는 電磁펌프(electromagnetic pump)로 된다. 이 電磁펌프도 2次導体가 流体일 뿐 原理와 構造는 直線誘導電動機와 같다.

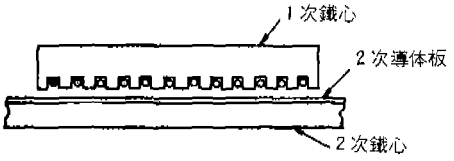
回轉誘導電動機를 展開하여 直線電動機化 시키면 **그림 1**과 같은 構造의 **平板狀直線 電動機**(plate linear motor or flat motor)로 된다.

이 平板狀 直線電動機는 **그림 2**와 같이 1次鐵心에서는 3相卷線이 設置되어 있고, 2次回路는 Al 등의 導体板을 2次鐵心의 表面에 貼付한 것이 많고, 2次鐵心을 非成層으로한 것이 많다.

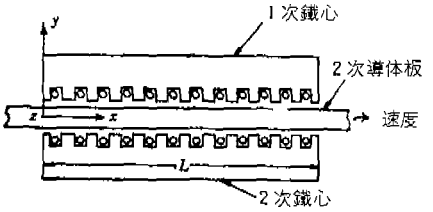
그림 2에서는 1次가 2次의 片側에만 있으므로 이것을 **片側式 直線誘導電動機**(single sided induction motor, SLIM)라고 하고, **그림 3**에서는 2次는 Al板만으로 하고, 그 兩側에 一定한 間隔으로 떼어 2次를 設置하여 있으므로, 이것을 **兩側式 直線誘導電動機**(donble sided linear induction motor, DLIM)라고 한다. 兩



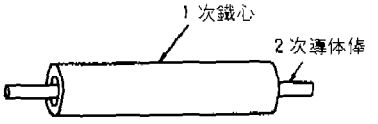

〈그림－1〉 片側式 直線誘導電動機




〈그림－2〉 片側式 直線誘導電動機




〈그림－3〉 兩側式 直線誘導電動機




〈그림－4〉 円筒形 直線誘導電動機

側式은 2次側에 鐵磁路를 要하지 않으므로 鐵量이 적게 든다. **그림 1～3**과 같이 1次에 對하여 2次가 긴 것을 **短1次形**(short primary type) 또는 **長2次形**(long pecondary type)이라고 한다. 또 2次에 對하여 1次가 긴것을 **長1次形**(long primary type) 또는 **短2次形**(short secondary type)이라고 한다.

**그림 4**와 같이 円筒鐵心의 內面에 2次卷線을 設置하고, 그 內部에 2次円筒導体를 設置한 **円筒狀 直線電動機**(tubular linear motor or rod motor)도 있다. 小形円筒狀 直線電動機에서는 1次卷線은 라선卷線(helical winding)으로 하고, 2次는 導体棒으로 되어있다.

以上의 直線電動機를 原理, 構造, 電源, 速度 등에 의하여 分類하면 **表1**과 같다.

〈表－1〉 直線電動機의 分類

| 原理 | 構造 | | 電源 | 速度 |
|---|---|---|---|---|
| | 形狀 | | | |
| 誘導形 | 平板狀 { 片側式 / 兩側式 } | 短2次形 (長2次形) | | 高速形 (大推進力連續形) |
| 同期形 | 円筒狀 | 短2次形 (長1次形) | | 低速形 (小推進力間歇形) |

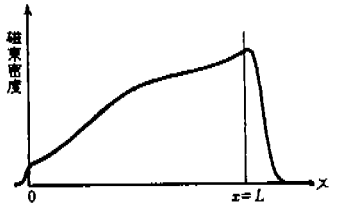
## 1.2 直線電動機의 特徵과 特性

回轉電動機와 直線電動機의 피라미터(parameter)를 比較하면, 表2와 같이, 回轉電動機의 同期回轉數 $n_s$는 周波數 $f$와 極數 $P$로 決定되고, 直線電動機의 同期速度 $V_s$는 周波數 $f$와 磁極間隔(pole pitch) $T$로 決定된다. 또 슬리프(slip) $S$는 各各 回轉數 것과 走行速度 $V$에 의하여 決定된다.

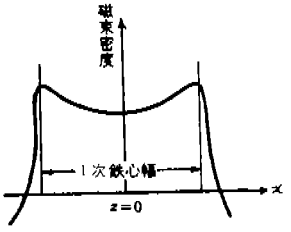
〈表－2〉 回轉電動機와 直線電動機의 比較

| | 回轉電動機 | 直線電動機 |
|---|---|---|
| 電磁力 | 回轉力(torgue) $T$〔N. m〕 | 推進力(force) $F$〔N〕 |
| 同期速度 | 同期回轉數 $n_s = \frac{2f}{P}$〔rpm〕 | 同期速度 $V_s = 2Tf$〔m/s〕 |
| 슬리프 (slip) | $S = \frac{n_s - n}{n_s}$ | $S = \frac{V_s - V}{V_s}$ |
| 2次效率 | $\tau = 1 - S$ | $\tau = 1 - S$ |

回轉電動機에서는 回轉數 $n$을 同期回轉數 $n_s$에 용이하게 接近시킬 수 있으나, 低速 直線電動機에서는 走行速度 $V$가 一般으로 크게 되기가 困難하므로 슬리프 $S$가 작게 되고, 따라서 효율 $\eta$가 작게 된다.




(a) 端効果




(b) 縁効果

〈그림－5〉 갭中의 磁束密度分布

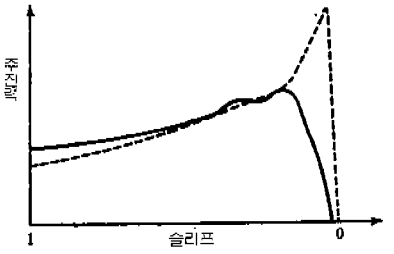
여기에서 슬리프 $S$를 작게 하기 위하여는 同期速度 $V_s$를 작게 設計하면 되나, 磁極間隔 $T$와 周波數 $f$를 極端으로 작게하기는 機械加工上 困難하다. 여기에 低速 直線電動機의 難點이 있다. 이에 對하여 高速 直線電動機에서는 슬리프 $S$를 작게할 수 있기 때문에 効率 $\eta$는 그리 問題되지 않는다.

直線 誘導電動機 LIM은 2次側의 構造가 簡單하므로, 보통 長2次形으로 만든다.

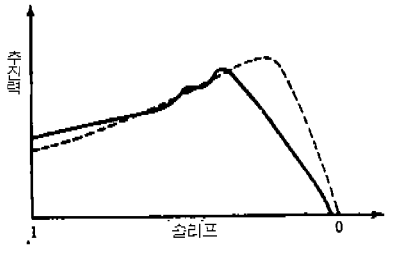
갭(gap)은 直線狀으로서, 그 入口端과 出口端에서 電磁界의 不連續性을 일으켜 特性에 影響을 미친다. 이것을 **端効果**(end effect) 라고 한다. 또 1次側의 鐵心의 두께가 有限이기 때문에 2次電流가 2次導体板의 幅方向에 電磁界의 不均一分布를 일으켜 特性에 影響을 미친다. 이것을 **縁効果**(edge effect)라고 한다.

**그림3**에 表示한 바와 같이 갭의 入口端의 中心에 直角座標의 原點을 定하면, 端効果 때문에 磁束密度의 振幅의 $x$ 方向의 分布는 **그림5**와(a) 같이 되어 入口端에서는 磁束密度는 거의 零이고, 出口端에서 最大로 된다.

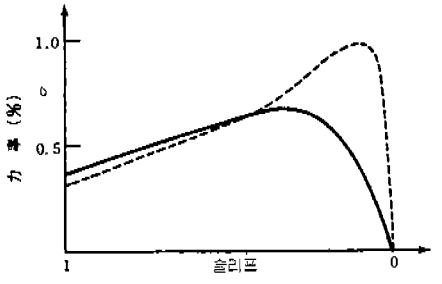
또 縁効果 때문에 磁束密度의 $Z$ 向方의 分布는 **그림5** (b)와 같이 되어, 中央이 볼록 들어간 分布로 된다.




〈그림－6〉 推進力－슬리프特性 (定電流運轉)




〈그림－7〉 推進力－슬리프特性 (定電壓運轉)




〈그림－8〉 力率－슬리프特性 (定電壓運轉)

端効果와 縁効果는 特性에 큰 影響을 미친다. 1次電流가 一定하게 유지될 경우의 推進力－슬리프特性의 一例를 들면 **그림6**과 같다.

實線은 端効果와 縁効果가 있는 實際의 特性曲線이고, 點線은 兩効果를 無視한 경우의 特性曲線이다. 端効果는 슬리프의 작은 곳에서 많이 나타나서 推進力을 減少시키고, 縁効果는 슬리프의 큰곳에서 많이 나타나서 實効2次 抵抗을 增加시켜 推進力을 增加시킨다.

定電壓 運轉時의 推進力－슬리프特性의 一例를 들면 **그림7**과 같다.

實線은 端効果와 縁効果가 있는 實際의 特性曲線이고, 點線은 兩効果를 無視한 경우의 特性曲線이다. 이 경우도 端効果는 슬리프의 작은

곳에서 推進力을 減少시키고, 슬리프의 큰곳에서 推進力을 增加시킨다.

그림 8은 定電壓 運轉時의 力率 特性으로서, 端效果는 슬리프의 작은 곳의 力率을 많이 低下시키고, 緣效果는 슬리프의 큰곳의 力率을 增加시킨다.

역시 實線은 端效果와 緣效果가 있는 경우의 實際의 力率特性이고, 點線은 兩效果를 無視한 경우의 力率特性이다.

# 2. 直線電動機의 應用

## 2.1 低速直線電動機의 應用

直線電動機는 直線運動을 하는 物体의 驅動에 使用하면, 齒車裝置 없이 大推進力이 얻어지고, 速度調節도 容易하므로 工業上, 其他 여러方面에 利用할 수 있다.

이미 實用化된 것도 많고, 또 實用可能한 것도 많다. 여기에 이들을 몇가지 列擧하여 보겠다.

(1) 金屬材料, 部品 등의 整列, 搬送, 등에 便利하다.

(2) 1次, 2次間의 吸引力을 利用하면, 鐵板 등의 引上, 移送을 同時에 行할 수 있다.

(3) 薄板材料의 切斷 등에 適當하다.

(4) 크레인(crane), 호이스트(hoist) 등에도 適當하다.

(5) 使用空間이 적게 들어 工場·倉庫·車輛·昇降機 등의 도오어(door)에도 適當하다.

(6) 로울러 콘베어(roller conveyer), 벨트 콘베어(belt conveyer) 등에도 適當하다.

(7) 織機의 북(shutle)의 往復運動에도 適當하다.

(8) 設置空間이 적게 들어 自動車用 터언 테이블(turn table) 등에도 適當하다.

(9) 磁氣選鑛機(magnctic separator)는 從來의 回轉式에 比하여, 可動部가 없기 때문에 運用·保守가 便利하다.

(10) 電磁펌프는 Fe, Al 등의 鑄造用 熔融 金屬의 注湯·移送 등에 便利하다.

이外에도 많은 用途가 開拓되어 가고 있다.

## 2.2 高速 直線電動機의 應用

輸送機關의 高速化는 人類가 要求하여온 念願이였었다. 그리하여 現在까지 繼續 努力하여 왔었다.

그런데 現在의 列車는 車輪(wheel)과 軌道(rail)와의 摩擦力을 利用하여 推進하는 것으로서, 그 速度가 어느 限度 以上으로 되면, 車輪과 軌道와의 사이의 摩擦力이 車輛의 走行低抗보다 작게 되어, 車輪이 空轉한다. 그 限界速度는 300~350km/h 의 사이에 있다고 한다. 또 現在의 列車는 高速化와 同時에 列車運行 回數가 增加되어 發生하는 騷音과 振動 등의 公害도 社會的 問題로 되어 왔다.

이와같이 하여 이 列車의 高速化와 低公害를 目標로 하여, 先進諸國에서는 車輛을 그 走行路(guide way)와 非接觸 狀態로 浮上(支持·案內)·推進할 수 있는 새로운 方式의 高速列車의

〈表-3〉 磁氣浮上式高速列車의 技術方式

| | |
|---|---|
| 浮上技術 | 超傳導 EDL 方式 |
| | 超傳導 EML 方式 |
| | 常傳導 EDL 方式 |
| | 常傳導 EML 方式 |
| 推進技術 | 空心 LSM 方式 |
| | 空心 LIM 方式 |
| | 鐵心 LSM 方式 |
| | 鐵心 LIM 方式 |

〈表-4〉 磁氣浮上式高速列車의 種類

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 超傳導 | EDL | 形 | 空心 | LSM | 式 |
| 〃 | 〃 | | 〃 | LIM | 〃 |
| 〃 | EML | 形 | 〃 | LSM | 〃 |
| 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | LIM | 〃 |
| 常傳導 | EDL | 形 | 鐵心 | LSM | 〃 |
| 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | LIM | 〃 |
| 〃 | EML | 〃 | 〃 | LSM | 〃 |
| 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | LIM | 〃 |

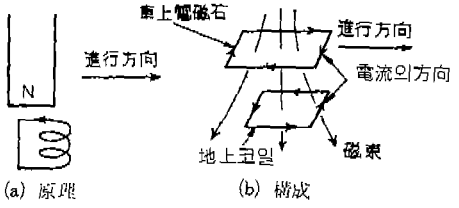
研究·開發을 熱心으로 進行하고 있다. 이 高速化·低公害를 目的으로 새로 登場한 것이 磁氣浮上式 高速列車이다. 이 磁氣浮上式 高速列車의 技術方式을 表示하면 表3과 같다. 이 表3의 技術方式을 組合하면 **表4**와 같이 여러種類의 高速列車가 생각된다.

表3과 같이 高速列車의 推進力 發生에는 LSM과 LIM이 使用되는데, LSM은 地上코일의 만드는 磁界의 移動에 同期로 車上磁石이 移動하도록 만든 直線電動機이고, LIM은 車上磁石이 非同期로 移動하도록 만든 直線電動機이다.

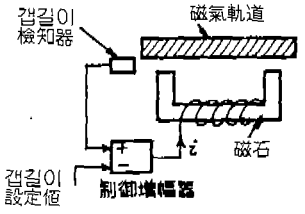
一般으로 큰 推進力을 發生하기 위하여는 超傳導코일(spuer conducting coil ; SC coil )의 만드는 超傳導磁石(super conducting magnet ; SCM)을 使用하고, 작은 推進力을 發生하기 위하여는 常傳導코일(mormal conducting NC coil)의 만드는 常傳導磁石(normal conducting magnet ; NCM)을 使用한다.

地上코일은 常傳導의 導線을 감아, 보통 可變周波數의 正弦波電流를 흘린다.

LSM은 LIM에 比하여 高速性能이 良好하고 地上코일과 車上磁石과의 사이의 갭을 크게 하여도 性能의 低下가 적다는 特徵을 갖고 있다.




〈그림-9〉 EDL의 原理와 構成




〈그림-10〉 EML의 原理와 構成

또 表3과 같이 高速列車의 浮上方式으로는 電流反發浮上(electrodynamic levitation; EDL)과 磁氣吸引浮上(electramagnetic levitation ; EML)이 있는데, 前者는 큰 浮上力을 얻는데, 後者는 작은 浮上力을 얻는데 使用한다.

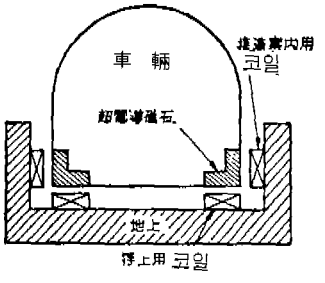
EDL은 **그림9**와 같이 走行하는 車上磁石이 走行路에 設置한 2次코일에 高速으로 進入하면, 地上코일에는 電流가 誘起되어 車上磁石과 同極性의 電磁石으로 되어 兩極間의 反發力에 의하여 車輛을 浮上시키는 方式이다. 列車의 左右 方向의 案內는 車輪에 붙어 있는 훌랜지(flange)로 非接觸으로 行하고 있다.

EML은 **그림10**과 같이 磁氣軌道에 對向하여 磁石을 配置하면, 兩者間에 發生하는 磁氣吸引力에 의하여 車輛을 浮上시키는 方式이다. 이 兩者間에 發生하는 吸引力은 元來 不安定하므로 浮上力도 不安定하다.

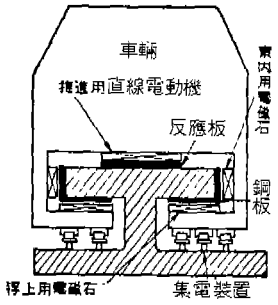
磁石의 勵磁電流를 一定하게 두면, 吸引力은 兩者間의 갭에 의하여 左右되어, 갭의 距離가 너무 近接하면 吸引力은 增大하여 磁石의 軌道에 吸着되어 버리고, 너무 遠隔되면 吸引力은 減少하여 磁石이 軌道에 落下되어 버린다.

그러므로 갭센서(gap sensor)로 갭의 길이를 測定하여 設定値와 比較하여 兩者의 差에 應하여 勵磁電流를 制御하는 閉回路 制御를 必要로 한다. 또 EML에는 支持用磁石과 案內用 磁石을 別置하는 方式과 支持와 案內에 磁石을 共用하는 方式이 있다.

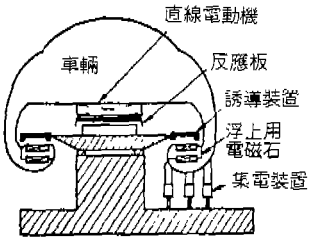
**表4**에서 超傳導 EDL 形 空心 LSM 式과 超傳導 EDL 形 空心 LIM 式은 高速性能이 優秀하고, 浮上能力도 優秀한데 同期式인 前者가 非同期式인 後者보다 더 優秀하다고 한다. 이들은 最高速度 500km/h 까지 可能하고, 浮上의 높이




〈그림-11〉 超傳導 EDL 形 空心 LSM式 超高速列車




〈그림-12〉 常傳導 EML形 鐵心 LIM式
中高速列車(支持·案內 磁石列車)




〈그림-13〉 常傳導EML形 鐵心 LIM式
中高速列車(支持·案內磁石共用)

는 10~25cm 程度로서 大都市間 大量 高速輸送用 超高速 列車로서 適當하다고 한다.

이 超高速 列車는 浮上(支持·案內)의 制御를 必要치 않고, 또 集電도 必要치 않다.

高速에서는 完全히 非接觸이나, 低速에서는 支持力이 不足하므로 補助支持裝置를 必要로 한다. 超傳導EDL形 空心 LSM式 超高速列車의 一例를 들면 **그림11**과 같다. 日本, 카나다, 西獨, 英, 佛, 美, 蘇 등 諸國에서는 超傳導 EDL形 空心LSM式을 大都市間 大量 高速輸送用 超高速列車로서 最高速度 500km/h를 目標로 熱心히 研究·開發을 進行하고 있다. 또 한편 美, 蘇 등에서는 超傳導 EDL形 空心 LIM式도 研究·開發하고 있다.

또 表4에서 常傳導EML形 鐵心LIM 式은 最高速度 300km/h 까지 可能하고 浮上의 높이는 10~15mm程度로서 近郊 輸送用 中高速列車로서 適當하다고 한다. 그리하여 非同期式인 前者가 同期式인 後者보다 優秀하다고 한다. 이 中高速列車는 浮上(支持·案內)의 制御를 必要로 하고, 또 集電도 必要로 한다. 支持·案內 磁石을 別置한 常傳導 EML形 鐵心LIM式 中高速列車의 一例를 들면 **그림12**와 같고, 支持·案內 磁石을 共用한 常傳導EML形 鐵心LIM式 中高速列車의 一例를 들면 **그림13**과 같다.

日本, 카나다, 西獨, 英, 佛, 美, 蘇 등 諸國에서는 常傳導EML形 鐵心LIM을 近郊輸送用 中高速列車로서 最高速度 300km/h를 目標로 熱心히 研究·開發을 進行하고 있다. 또 한편 이들 諸國에서는 常傳導 EML形 鐵心LSM 式도 研究·開發하고 있다.

---

前서울大學校 工科大學 敎授
前全北大學校 工科大學 敎授 및 學長
前建國大學校 工科大學 敎授 및 學長
現 湖西大學 敎授