

# 磁氣 浮上 列車用 리니어 모터의 機械的 不平衡 特性 考察

## Mechanical Unbalance Characteristics Analysis of Linear Motor for Magnetically Levitated Transit

任 達 鎬\* · 李 敏 明\*\* · 金 奎 卓\*\*\*  
(Dal-Ho Im · Min-Myung Lee · Gyu-Tak Kim)

*Abstract-* In this study, a variety of characteristics were shown experimentally under mechanically unbalanced states expected in a practical system that linear motor is used as a driving motor of magnetically levitated transit and the design criterion of the linear motor has been proposed. Since, with slip being at 0.1, end effect was reduced a little to increase thrust about 6.14 percents in case that sinusoidal current conducted 5[A] in short coil at each end of linear motor for compensation of it, if the ratio of sinusoidal current versus input current is adjusted properly, it is thought that this method shall be effective one. And if the gap of exit region is bigger than that of entry region, end effect will be reduced. As a result, more effective driving will be obtained.

### 1. 序 論

최근 산업사회의 高度化에 따라 直線運動을 必要로 하는 시스템의 數要가 날로 增加하고 있다. 그러나 이들 시스템을 驅動하는 動力裝置는 대부분 回轉型 電動機를 利用하고 있는 실정으로 直線運動系에 이용할 경우에는 回轉運動을 直線運動으로 變換하는 動力 變換 裝置가 필요하여 시스템 構成이 複雜하게 되며 이들 變換 裝置에 의한 損

失, 騒音, 振動등이 發生하여 非效率의이고(에너지 傳達效率: 40%미만), 精密位置 制御를 할 수 없다.

따라서 선진 외국에서는 電氣에너지를 直接 直線의인 力學的 에너지로 變換하여 直線 推力을 發生하는 리니어 모터의 開發에 拍車를 가하여 레이저 프린터를 비롯한 精密 FA, OA機器 및 각종 計測裝備 등에 널리 이용하고 있으며[1-6], 앞으로 그 應用範圍는 더욱 擴大될 것으로 기대된다.

리니어 모터를 高速으로 應用하는 대표적인 事例 가운데 하나인 리니어 모터 카의 長點[7-11]은 軌道와 레일의 摩擦力에 의해 推進力을 發生하는 一般 電鐵과는 달리 리니어 모터의 1次側과 2次側

---

\*正 會 員: 漢陽大 工大 電氣工學科 教授 · 工博  
\*\*正 會 員: 大田工業大 電氣工學科 副教授  
\*\*\*正 會 員: 漢陽大 工大 電氣工學科 講師 · 工博  
接受日字: 1990年 12月 24日  
1次修正: 1991年 4月 18日

사이에서 直接 推力를 發生하므로 軌道가 필요치 않아 低床化가 가능하여 터널의 斷面積을 크게 줄일 수 있으며(기존 電鐵 斷面積의 50%내외) 급커브 및 급구배에서의 運轉도 가능하여 都心과 같은 密集地域에서의 路線 設定이 既存 鐵道보다 훨씬 수월하다. 이에따라 일본에서는 오사카에 4Km의 試驗線路를 建設하여 90년 오사카 국제박람회를 기회로 운행중이며 동경에서는 순환선 地下鐵用 터널 공사가 한창이다. 또한 캐나다 Toronto시의 ALR (Advanced Light Rail Transit), 서독의 M-Bahn, 영국 Birmingham시의 Birmingham People Mover 등이 이미 商業運轉中이며 浮上 裝置를 兼備한 超高速 列車에의 實用化도 각국 정부의 적극적인 支援下에 研究를 進行中으로 2000년 대 商業化를 目標로 하고 있다. 이외에도 소련을 비롯한 동구권에선 전자 레일건과 같은 軍事目的 및 油壓機器들을 이용할 수 없는 혹한지와 같은 극한상황에의 이용을 目標로 研究中이다.

따라서 本 研究에서는 磁氣 浮上 列車의 驅動用 모터인 리니어 모터를 實 輸送系統에 適用할때 대두되는 前後, 左右 空隙 不平衡, 橫方向으로의 편위등이 리니어 모터의 發生 推力, 垂直力, 效率, 力率등에 미치는 影響 및 端部코일 방식에 의한 端部效果 補償 特性을 實驗을 통하여 紮明함으로서 磁氣 浮上型 超高速 電鐵 및 低床 輕量化 電鐵用 리니어 모터의 設計指標를 提示하였다.

## 2. 試驗機 製作 및 實驗시스템

### 2.1 實驗裝置

리니어 모터를 無人工場 自動化的 중추적 役割을 하는 自動 搬送裝置(최고속도: 18Km/h)와 같은 低速用이나 磁氣 浮上 超高速 電鐵(최고속도: 300Km/h) 및 低上 輕量化電鐵(최고속도: 70Km/h) 등의 高速用에 應用하기 위한 諸般特性資料를 導出하기 위하여 다음과 같은 特性試驗機를 設計, 製作하였다. 特性 試驗機를 片側式 리니어 모터로 한 이유는 다음과 같다[6, 12, 13].

- 1) 레일의 分岐나 交叉構造가 간단하다.
- 2) 車輛이나 파렛트의 편위에 兩側式 試驗機보다 비교적 쉽게 對處할 수 있으며, 한쪽으로 편위된 경우의 特性을 쉽게 紮明할 수 있다.
- 3) 車輛이나 파렛트의 높이를 작게할 수 있다.
- 4) 反作用 레일이나 프레임틀을 쉽게 裝置할 수 있다.

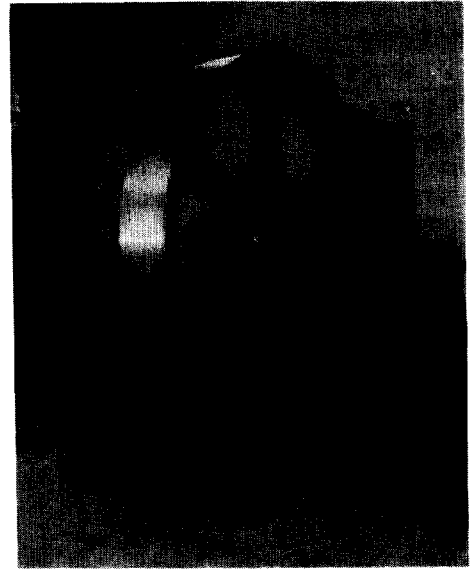


그림 1 1차측과 2차측.  
Fig. 1 The Primary and Secondary.

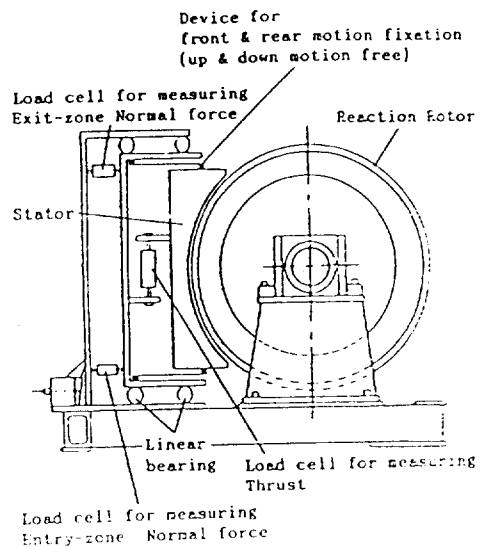


그림 2 리니어 모터 概略圖.  
Fig. 2 Outline of Linear Motor

그림 1은 本 研究에서 實驗한 試驗機의 1次側과 2次側인 回轉子의 外觀이며 線型運動 特性을 일정한 場所에서 試驗할 수 있도록 2次側을 回轉運動을 하는 無限 軌道로 試驗機를 設計, 製作하였으며 그 概畧圖를 그림 2에 나타내었다. 表 1은 本 試驗機의 仕様을 나타낸 것이다.

표 1 試驗機仕様

Table 1 Specification of experimental machine

	電氣의仕様	機械의仕様
1 次 側	方式:短1次片側式 相數(m):3相 極數(P):4極 定格電壓(V):220[V] 定格電流(I):165[A] 捲線抵抗(R <sub>l</sub> ):0.03[Ω]	鐵心值數:(幅)175[mm] (높이)110[mm] (길이)908[mm] 슬롯值數:(幅)175[mm] (길이)150[mm] (피치)12[mm] 極間隔:182[mm] 相當捲數:96[Turn] 每極每相當 슬롯數:3
2 次 側	抵抗率(ρ) Al:0.204E-6[Ω·m] Fe:0.665E-5[Ω·m]	두께:(Al)5[mm] (Fe)50[mm] 質量:1700[Kg] 值數:(幅)280[mm] (지름)2020[mm]

2.1.1 1차측(primary)

電磁 에너지 變換 機器는 크게 電壓力型과 電流力型으로 分類할 수 있다. 電壓力型機器는 相當捲數를 많이 하여 작은 電流로 요구하는 空際 起磁力을 얻을 수 있으나 리액턴스가 크게 增加하여 速應性이 떨어지는 缺點이 있으므로 본 試驗機는 磁氣 浮上 列車 中에서의 急加, 減速轉停을 감안하여 速應性이 좋은 電流力型 機器로 設計하여 相當 捲回數를 96으로 製作하였다. 또한 空際 起磁力 分布에 중요한 파라미터인 每極 每相當 슬롯수는 3으로 하였다. 이는 每極 每相當 슬롯수가 增加할수록 起磁力의 歪率이 減少하여 空際 起磁力 分布가 平滑적으로 되어 高調波 成分이 줄어들므로 損失, 騒音, 振動 등이 減少되는 理想的인 機器가 된다. 그러나 同期速度가 주어질 경우 每極 每相當 슬롯수를 무한히 增加시킬 수는 없으므로 리니어 모터에서는 3~4로 하는 것이 一般的이다[13, 14]. 따라서 본 試驗機에서도 3으로 選擇하였다. 또한 1次側 슬롯幅은 回轉型 電動機에 비해 리니어 모터가 空際가 매우 크기 때문에 漏洩 磁束이 많이 發生하여 效率 및 力率이 나쁘기 때문에 이를 줄이기 위한 하나의 方法으로 가급적 크게 한다. 또 슬롯형태도 開슬롯(open slot)으로 하는 것이 다소나마 漏洩 磁束을 줄일 수 있으며 齒幅과의 比도 1~2배 정도로 齒幅보다 슬롯幅을 크게 設計하는 것이 一般的으로 이와같은 현상이 一般 回轉型 電動機의 構造와 크게 다른점이다.

한편, 極間隔이 機器의 特性에 미치는 影響은 極間隔을 增加시키면 유도형 리니어모터의 설계정수 가운데 하나인 Laithwait씨가 제안한 Good-

ness factor G(이하 G라한다.) (12, 14, 15)가 增加하여 同期 速度가 增加하나, 이 경우 每極 每相當 슬롯수가 決定되면 極間隔을 增加시키기 위하여는 슬롯폭을 增加시키거나 齒幅을 增加시켜야 하며, 극단적인 경우는 슬롯깊이에 비해 幅이 너무 큰 기형적인 機器가 될 수 있으므로 極間隔의 決定에 신중을 기해야 하므로 磁氣 浮上 列車用 리니어 모터에서는 極間隔을 150~400[mm]에서 결정한다(12-14). 또한, 1次側의 길이가 결정된 경우에는 極數와의 相互關係도 考慮하여야 하므로 본 試驗機에서는 4極機를 基準으로 極間隔을 182[mm]로 하여 60[Hz]시 78[Km/h]의 同期速度도록 하였다. 空際長의 길이는 리니어 모터의 諸般 特性에 가장 큰 影響을 미치는 파라미터로서 본 試驗機에서는 機械的인 空際를 5[mm]에서 20[mm]까지 變化시킬 수 있도록 하였으며, 空際調節은 實驗裝置의 上, 下端部에 設置한 리니어 베어링을 이용하였다.

한편, 리니어모터의 發生 推力 및 垂直力을 測定하기 위하여 1次側에 3개의 load cell을 設置하였다. 上, 下의 load cell은 垂直力을 測定하기 위한 것으로, 이는 리니어 모터에서만 發生하는 端部 效果에 의하여 入口端 및 出口端의 空際 磁束 分布가 相異하여 垂直力도 入, 出口端에서 다른 特性을 나타내므로 2개를 設置하여 測定하였다. 또한 1次側 中心部의 load cell은 發生推力를 測定하기 위한 것이다. Load cell은 Minebea사의 MODEL T3B1 1T을 사용하였다. 1次側의 支持는 2次側 進行 方向으로는 1次側 中心部의 load cell로 支持시켰으며 垂直方向으로는 上, 下端의 loadcell로 支持시켰다. 이때 水平 및 垂直方向의 摩擦을 없애기 위하여 垂直方向으로는 리니어 베어링을, 進行方向으로는 강판 스프링을 이용하였으며 각 齒부분에 探索코일(search coil)을 設置하여 空際 磁束密度를 測定하였다.

端部 效果의 補償方法으로는 入口端과 出口端의 兩端部에 端部 코일을 設置하여 交番電流를 인가하는 方法과 兩端部의 한 極分에서는 코일 피치를 무시하고 捲線을 施行하여 空際 起磁力 分布를 正弦的으로 하는 方法 및 1次鐵心部의 上端部에 슬롯을 과 三相捲線을 시행하는 方法, Gramme ring 捲線法(16, 17) 등이 提案되었으나 본 試驗機에서는 端部코일 方式을 採擇하였다.

2.1.2 2次側(secondary)

片側式 리니어 모터의 2次側 直徑은 리니어 모

터에서만 발생하는 端部 效果에 의한 殘留磁束 (end effect 波)이 回轉子가 한바퀴 回轉한 다음 다시 1次側에 영향을 미치지 않게 하기 위하여는 回轉子の 直徑이 클수록 좋다.

그러나 回轉子 直徑을 增加시키면 2次側의 重量이 크게 增加하며 機械的 強度면에서도 많은 문제점이 發生하게 된다. 또, 機械的인 振動과 電氣的 振動에 의한 共鳴現象이 發生하면 매우 위험하게 되므로 直徑을 크게 하는 것은 리니어 모터의 特性 파악을 위하여는 매우 중요하나 wheel balance 등의 安定度면에서 많은 위험이 수반된다. 따라서 본 試驗機에서는 時速 350[Km/h]까지는 端部 效果의 影響을 받지 않도록 하며, 高速 리니어 모터의 特性도 糾明할 수 있도록 2次側 回轉子の 直徑을 2020[mm]로 製作하였으며 그 重量은 1700[Kg]이다.

한편 리니어 모터는 空隙磁束과 2次側의 導體에 유기된 渦電流에 의하여 推力가 發生한다. 따라서 2次側을 導體로만 構成하여도 되나 이와 같이 設計하면 磁氣抵抗이 매우 크게 되어 空隙磁束을 形成하기 위한 勵磁電流가 매우 커야 한다. 따라서 片側式인 경우는 2次導體板 뒤에 磁性體(이를 back iron이라 한다)를 첨부시켜 磁氣抵抗을 줄이고 있다. Back iron의 두께는 空隙 磁束密度에 크게 좌우되나 두께가 增加하면 回轉子 重量이 매우 增加하게 되어 慣性增加로 인한 속응성 低下 및 機器의 性能評價 指數 중 하나인 출력/질량비가 떨어져 非效率的인 機械가 되므로 back iron의 두께는 磁束의 浸透깊이를 考慮하여 4~6[cm]로 하는 것이 일반적이다(6, 12). 따라서 본 試驗機에서는 5[cm]로 製作하였으며 2次側 back iron의 材質은 鐵損 및 經濟性 등을 考慮하여 일반 강판으로 제작하였다.

또한 2次側 導體板 材料로서는 여러 종류를 이용할 수 있으나 機械的 강도등의 문제로 인하여 AI를 제일 많이 이용하고 있으므로 본 試驗機에서도 AI판을 사용하였으며 두께는 磁氣的인 空隙을 감안하여 5[mm]로 設計, 製作하였다. 또한 1, 2次側의 폭比는 1.4배정도가 리니어 모터에서 發生하는 橫方向 Edge Effect를 最小化 시킬 수 있으며(17-19), 또한 出力/質量比 등이 가장 양호하다. 그러나 본 試驗機는 리니어모터에서 發生하는 諸特性을 규명하기 위하여 1次側의 幅을 175[mm]로 製作하였으므로 이의 1.4배보다 다소 큰 280[mm]로 製作하였다.

### 2.1.3 周邊 設備

본 試驗機의 電源 供給은 電壓型 PWM인버터 (二和電機製 모델명 : HDT-200)를 이용하였으며 주파수 可變 범위는 0-360[Hz], 電壓 可變範圍는 0-400[V]까지이다.

따라서 이 電源 供給 裝置는 自動 搬送裝置등에서의 低速型 리니어 모터의 特性 糾明은 물론 磁氣 浮上型 超高速 電鐵을 추진하는 高速型 리니어 모터의 特性 糾明도 實驗할 수 있도록 하였다. 리니어 모터에서 發生하는 端部效果를 糾明하기 위하여 3相 誘導 電動機를 裝置하였으며 2次側 回轉子와 誘導 電動機를 變速 기어로 연결하여 低速에서부터 超高速까지 回轉 速度를 變化할 수 있도록 하였다. 또한 設定 電壓, 設定 周波數로 리니어 모터를 驅動시킬 때 速度 變化에 따른 諸特性 變化를 實測하기 위한 負荷로서 直流 發展機를 裝置하였으며 이때의 連結도 變速기어를 택하였다.

리니어 모터의 回轉 速度 및 負荷變動등에 따른 負荷토크등을 實測하기 위하여 2次側 回轉子와 變速기어 사이에 토크 transducer(Minebe社 모델명 : TMNR-200KM-U)를 裝착하였으며 RPM sensor는 0~2000[rpm], 負荷토크는 0~200[Kg·m]를 택하였다.

### 2.2 實驗 條件

片側式 리니어 모터를 搬送裝置와 같은 低速型和 磁氣 浮上 超高速 電鐵이나 低床輕量化과 같은 高速用으로 應用하기 위한 基本 特性資料를 導出하기 위하여 다음과 같은 條件하에서 實驗하였다.

가. 리니어 모터의 1次側과 2次側間의 機械的 空隙은(이하 空隙이라 함) 5, 10, 15[mm]로 制限한다.

나. 1次側은 2次側 回轉子の 중안에 위치하며

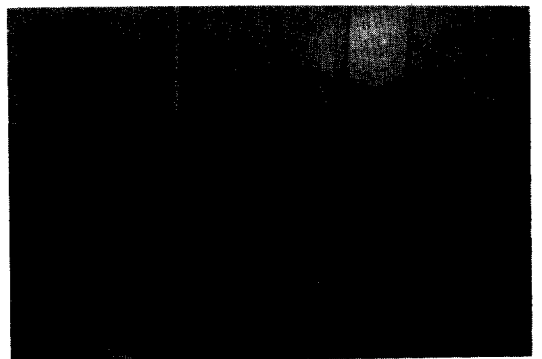


그림 3 試驗設備.  
Fig. 3 Test Facility.

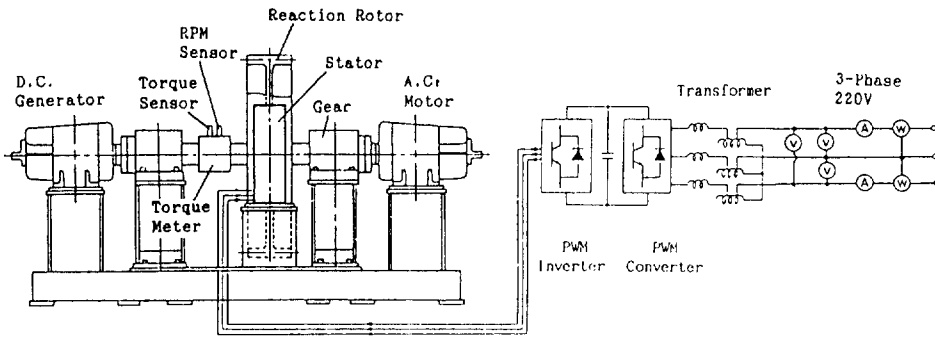


그림 4 試驗 設備 概略圖.  
Fig. 4 Outline of Test Facility.

이로부터 10[mm]씩 편위시킨다.

- 다. 1次側과 2次側間的 相對運動에서 2次側의 進行方向을 基準으로 하여 出口端과 入口端에서의 공극을 15[mm], 5[mm]로 한 不均衡 狀態 및 左右 空際 不平衡狀態에서 推力 特性 및 吸引力, 反撥力 特性을 實驗한다.
- 라. 負荷는 直流 他勵磁 發電機를 택하였으며, 勵磁을 一定하게 하고 速度에 比例하는 負荷 토크를 選擇한다.
- 마. 試驗速度는 0~80[km/h] 範圍로 한다.
- 바. 1次側과 2次側間的 吸引力과 反撥力 特性은 端部效果를 考慮하여 入, 出口端에서 동시에 實測한다.

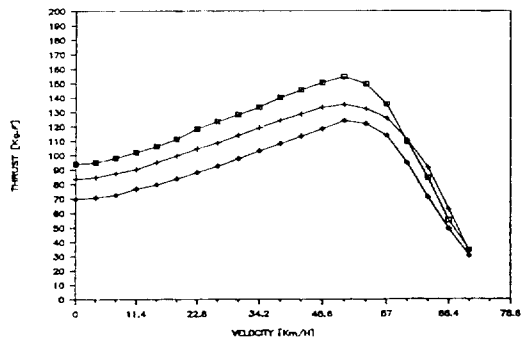
그림 3에 본 試驗 設備의 전체 外觀을, 그림 4에 概略圖를 나타내었다.

### 3. 特性 實驗 및 結果 考察

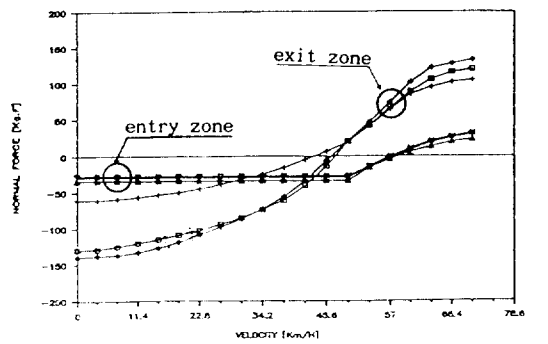
#### 3.1 空際 不平衡에 따른 特性 考察

리니어 모터를 磁氣 浮上 列車나 自動 搬送 裝置의 驅動用 모터로 이용하는 경우에는 曲線 經路나 傾斜地等を 走行하게 되어 走行方向 및 鐵心 成層方向으로 空際 不平衡 現象이 나타나 機器의 諸般 特成이 달라지므로 本節에서는 空際 不平衡에 따른 諸特性을 實驗을 통하여 규명하였다.

그림 5는 空際 不平衡에 따른 推力 및 垂直力 變化를 나타낸 것으로서 2次側 進行方向으로의 空際 不平衡(longitudinal unbalance)은 端部 效果로 인하여 出口端部로 磁束이 치우치므로 入口端을 5[mm], 出口端을 15[mm]로 하였으며 左右 空際 不平衡은 모터의 進行方向 중심축을 10[mm]로 하고 左右 5[mm]의 偏差를 준 경우의 解析 結果이



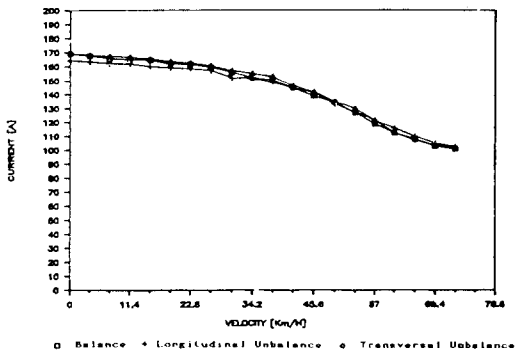
a) 發生推力.



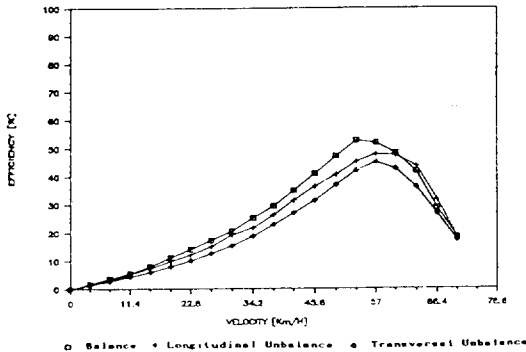
b) 垂直力.

그림 5 空際 不平衡時 推力, 垂直力 特性.  
Fig. 5 Thrust and Normal Force characteristics at Unbalance air gap.

다. 그림 5. a)의 推力 特性에서 알 수 있는 바와 같이 前後 空際 不平衡시, 最大推力이 發生하는  $s=0.3$ 이상의 運轉領域에서는 平均 10[%]內외의 推力 減少現象이 나타났으며 最大 發生推力은 平衡 狀態의 155.62[Kg · f]에서 133.44[Kg · f]로



a) 入力電流.



b) 効率.

그림 6 空隙 不平衡時 入力電流 및 効率 特性.  
Fig. 6 Primary Current and Efficiency Characteristics at Unbalance Air Gap.

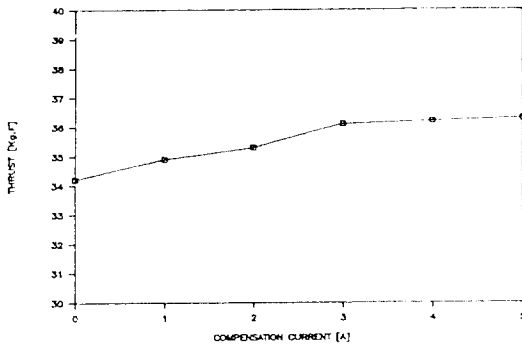


그림 7 補償 電流-推力 特性.  
Fig. 7 Compensation Current-Thrust.

14.25[%] 減少하였다. 그러나 本 試驗機의 安全 運轉 領域인  $s=0.1$ 附近에서는 오히려 3~4[%] 정도 推力가 增加하는 現象이 나타났다. 이는 2次側의 速度가 增加할수록 出口端附近의 磁束 偏重現象이 深化되나 出口端部의 空隙이 커 磁束 偏重現象을 抑制하기 때문으로 磁界 進行方向의 空隙 不

平衡에 따라 端部效果波중 反射波가 줄어들기 때문이라 思料된다. 따라서 리니어 모터를 單方向으로만 走行시키는 시스템에 적용할 때에는 出口端의 空隙을 入口端의 空隙보다 다소 크게 設計하는 것이 效率的인 運轉이 되리라 思料된다.

또한 橫方向 空隙 不平衡(transversal unbalance)特性에서는 全 運轉 領域에서 20[%]내외의 推力 減少現象이 나타났다.

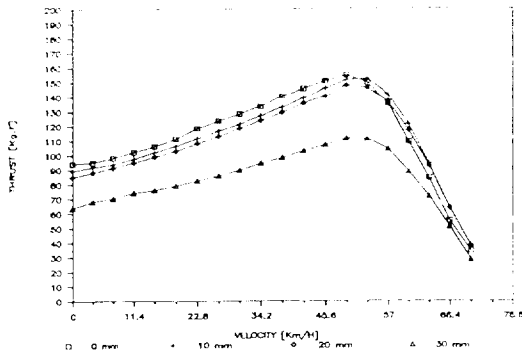
한편 리니어 모터를 浮上 시스템의 驅動用 모터로 이용하는 경우, 浮上 磁石의 容量에 결정적 役割을 하는 入, 出口端部에서의 垂直力 特性은 그림 5.b)에서 보는바와 같이 前, 後 空隙 不平衡時 入口端部에서의 反撥力이 다소 增加하나 安定 運轉領域에서의 吸引力은 오히려 減少하는 現象이 나타났다. 그러나 左, 右 空隙 不平衡特性에서의 垂直力은 全 運轉領域에서 一定 空隙時보다 크게 나타났다. 이는 空隙이 작은 쪽으로의 磁束 偏重現象이 두드러져 端部 效果가 크게 發生했기 때문이다.

또한 出口端部에서의 垂直力 特性은 入口端部에서의 特性和 類似하였으며 左右 空隙 不平衡 상태에서는 全 運轉 領域에서 垂直力이 크게 나타났다. 그러나 前後 不平衡일 경우, 起動時에는 平衡 運轉時 垂直力의 57[%]内外로 크게 減少하며  $s=0.1$  부근에서 12.5[%]정도 減少하는 現象이 나타났다. 따라서 磁氣 浮上 列車나 wafer 搬送과 같은 浮上 運搬 시스템에 리니어 모터를 應用할 경우에는 前後 空隙差를 두고 運轉시키는 것이 리니어 모터에서 發生하는 垂直力의 輕減으로 浮上 시스템의 容量을 減少시킬 수 있어 效率的인 運轉이 되리라 思料된다.

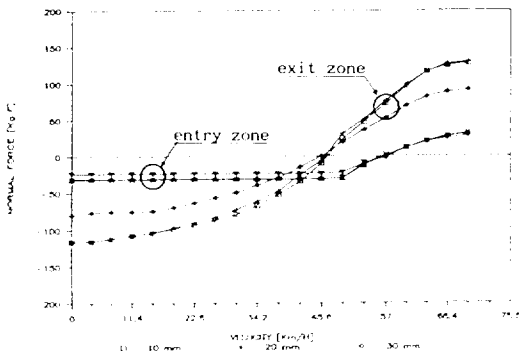
그림 6은 空隙 不平衡時의 1次 入力 電流 및 效率特性을 圖示한 것으로서 1次 入力 電流 및 力率은 큰 차이가 없으며 效率는 高 슬립領域에서는 減少하나 低 슬립領域에서는 오히려 增加한다.

따라서 리니어 모터를 浮上 시스템과 併用하여 運轉시키는 경우에는 前, 後의 空隙 不平衡은 低 슬립領域에서 機器의 諸般特性을 向上시키나 左, 右 空隙 不平衡은 全運轉 領域에서 諸般特性이 惡化되므로 左右 空隙 不平衡이 發生하지 않도록 시스템을 設計하여야 한다.

한편 그림 7은 2장에서 언급한 바와같이 兩 端部의 存在로 인한 端部效果를 補償하기 위하여 단락코일에 交番 電流를 인가한 경우의 推力 特性을 實驗에 의하여 규명한 것으로서 交番 電流가 5[A]인 경우 즉 入力 電流 대 交番 電流의 비가 20:1인 경우, 推力가 106.14[%]인 36.3[Kg·f]로 增加하



a) 發生推力.



b) 垂直力.

그림 8 偏位特性.  
Fig. 8 Displacement characteristics.

여 端部 效果를 다소나감 減少시킬 수 있었다. 이는 兩端部에 入力電流을 흘리므로써 空腔 起磁力 分布를 正弦의으로 하여 兩端部에서의 磁極의 세기를 增加시킨 결과로 本 研究에서는  $s=0.1$ 인 경우만 다루었으나 각 運轉슬림에서 入力電流對 交番電流인 比를 적절히 選擇하면 端部 效果를 效果的으로 補償할 수 있으리라 思料된다.

3.2 橫方向偏位에 따른 特性 考察

本 節서는 리니어 모터의 2次側이 1次側의 중심으로부터 鐵心 成層方向으로 편위된 경우 및 空腔 變化에 따른 諸般 特性을 考察하고자 한다.

그림 8은 橫方向 편위에 따른 推力 및 垂直力 變化를 圖示한 것이다. 일반적으로 리니어 모터에서 發生하는 橫方向 edge effect의 影響을 적게하면서 機器의 評價指數 가운데 하나인 出力/質量比가 最大로 되는 1次側과 2次側의 幅比는 1.4로 알려져 있다(17-19). 그러나 本 論文의 適用 모델은 1次側의 有效斷面積이 一定한 상태에서 極間隔과 鐵心幅 등의 相互關係등을 糾明하기 위한 試作機

인 關係로 2次側의 幅이 1次側 幅 175[mm]의 1.4배보다 큰 280[mm]이므로 10, 20[mm]偏位時에도 左右 대칭시의 特性과 큰 차이를 보이지 않았다. 즉 20[mm] 偏位된 경우에도 偏位된 부분의 overhang의 長이 32.5[mm]로 1, 2次側의 幅比가 1.4배인 경우의 overhang長이 35[mm]와 큰 차이를 보이지 않아 低 슬림 領域에서는 橫方向 edge effect가 거의 나타나지 않았다. 이는 2次側의 走行速度가 낮은 高슬림 領域에서는 2次側에 유기되는 渦電流가 많아 active領域內에서도 磁界 進行方向 成分電流가 發生하여 推力이 減少되었으나 安定 運轉領域인  $s=0.1$ 부근의 低 슬림에서는 2次側의 渦電流가 크지 않아 active領域內로의 浸透가 적어 平衡狀態의 運轉時와 큰 차이를 보이지 않았다.

그러나 30[mm] 偏位된 경우에는 偏位된 부분의 overhang의 長이 22.5[mm]로 35[mm]의 64.3[%]에 지나지 않으므로 active領域內에서도 2次側 渦電流 成分중 磁界 進行方向의 成分이 급격히 增加하여 空腔 磁束의 歪形이 크게 나타나 推力 및 垂直力이 平衡狀態의 70[%]內外로 減少하였다. 그러나 力率 및 1次 電流에는 그다지 큰 影響을 미치지 않아 30[mm]편위시에는 效率이 크게 低下되었다. 따라서 磁氣 浮上 列車나 自動 搬送 裝置에서와 같이 曲線 經路를 走行하여 橫方向으로 편위가 發生하는 시스템에 리니어 모터를 應用할 경우에는 發生推力의 減少, 偏向力등을 考慮하여 1, 2次側의 幅比가 1.4배보다 크게 設計하여 偏位된 부분의 overhang長이 最少 1.4배가 되도록 하여야 하며 推力/質量比등을 考慮하여 1.4배로 한 경우는 橫方向 편위가 發生하지 않도록 하여야 한다.

3.3 空腔變化에 따른 特性 考察

한편 空腔이 리니어 모터의 諸般 特性에 미치는 影響을 규명하기 위하여 空腔長을 5[mm], 10[mm], 15[mm]로 하여 實驗하였다. 그림 9은 2次側 回轉子의 도체판의 두께가 5[mm]인 알루미늄판에 대하여 空腔變化에 따른 垂直力 및 推力變化를 나타낸 것으로 推력은 다음식으로 주어진다 (15, 18).

$$F = \frac{\mu_0}{3\pi} \cdot \frac{w\rho[(NI_s)^2]}{g_e} \cdot \frac{1}{sG+1/sG}$$

여기서  $G=2\mu_0\tau^2f/\pi\rho g_e$ 이다.

위 식으로부터 最大 發生 推力은  $sG=1$ 로 주어지므로 空腔이 10[mm]인 경우 最大 推力이  $s=$

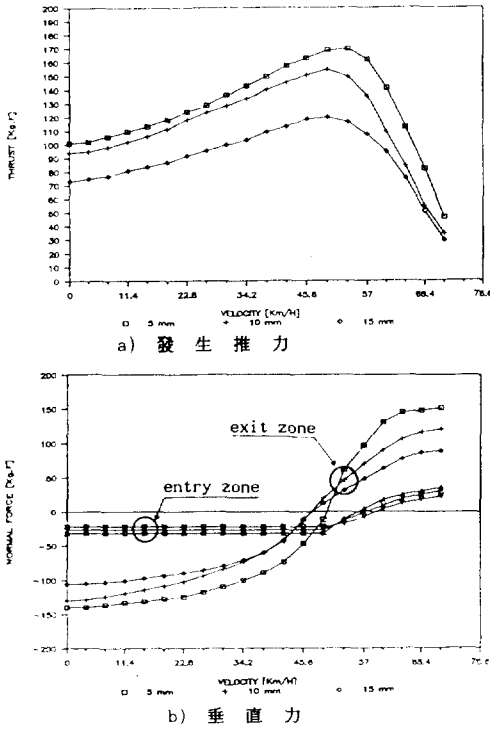


그림 9 空腔變化特性.  
Fig. 9 Air gap Variation characteristics.

0.38에서 나타나므로 리니어 모터의 設計定數인  $G$ 는 2.597로 계산된다.

일반적으로 리니어 모터에서는 端部 등의 影響으로  $s=0$ 인 경우에도 走行方向과 反對方向으로 制動力이 발생한다. 따라서  $s=0$ 일때 制動力을 없애도록 리니어 모터를 設計하여야 하는데 4極機의 리니어 모터에서는  $G$ 값이 10일때 制動力이 발생하지 않아 理想的인 機器가 된다(14, 17).

따라서 본 試驗機의  $G$ 값을 10으로 높이기 위하여는 空腔을 줄이거나 2次導體板의 두께 또는 極間隔을 增加시켜야 한다. 2次導體板의 두께를 增加시키면 磁氣的인 空腔이 增加하므로  $G$ 값 增加에 별 影響을 주지 못하며, 極間隔을 增加시키면 同期 速度가 增加되어 定格 運轉 速度가 결정된 경우 走行速度가 매우 커져 이를 줄이려면 運轉슬립을 增加시켜야 하므로, 效率特性이 나빠져 極間隔 또한 임의로 增加시킬 수는 없다. 결국  $G$ 값을 10으로 하려면 空腔을 減少시켜야 하는데 본 試驗機서는 空腔을 3.9[mm]로 하여야 한다. 그러나 이는 磁氣 浮上 列車등과 같은 高速用에서는 列車 走行時의 1, 2次側間의 機械的인 접촉 위험, 리니어 모터에서 發生하는 垂直力의 급증에 의한 浮上

마그네트의 容量 增加, 施工上의 技術的 문제점등으로 인하여  $G$ 값 選定에 慎重을 기하여야 한다.

그림 9의 推力 및 垂直力 特性에서 알 수 있는 바와 같이 空腔이 增加할수록 리니어 모터의 設計定數인  $G$ 값이 減少하여 最大推力가 發生하는 슬립이 커진다. 空腔이 10[mm]인 경우는 5[mm]인 경우보다 發生推力는 平均 6.23[%] 減少하였다. 그러나 入, 出口端部에서의 垂直力은 入口端部에서 15.6[%], 出口端部에서 17.76[%] 減少한다.

따라서 浮上 시스템의 推進用 모터로서 리니어 모터를 이용하는 경우에는 空腔을 5[mm]로 하면 發生推力는 增加하나 리니어 모터에서 發生하는 垂直力을 考慮하여 浮上 마그네트의 크기를 결정하여야 하므로 마그네트의 容量이 크게 增加하여 全體 시스템의 綜合 效率는 오히려 떨어지므로 浮上 시스템에 리니어 모터를 이용하는 경우, 空腔은 10[mm]內外로 하는 것이 效率的이다.

한편 빈번한 加, 減速 運轉으로 起動時 最大推力가 要求되는 搬送裝置등에 리니어모터를 應用하는 경우에는  $G$ 는 1 또는 그 부근의 값을 선택하여야 한다. 본 試驗機에서는 空腔이 38.9[mm]일 때  $G$ 값이 1이 되어 起動時 最大 推力가 發生하나 그 絶對值가 너무 적어 效率 및 力率 特性이 극히 나쁘게 된다. 그러므로  $G$ 값을 增加시켜야 한나 이 경우 슬립-推力 特性이 일반 回轉機의 토크 特性과 같은 樣相으로 나타나 起動時的 推力가 最大가 되지 않는다. 따라서 본 研究에서는 理想的인 機器보다는 空腔이 多少 增加되고 同期速度에서 多少間의 制動力이 存在하더라도 起動時 推力가 最大 發生 推力의 80[%] 정도되는  $G$ 를 택한 경우,  $G$ 는 2로 이때의 空腔은 15[mm]이다. 空腔이 15[mm]인 경우의 推力特性은 5[mm]인 경우의 70[%]內外로 減少하였으며 入, 出口端部에서의 垂直力도 크게 減少하였다. 위의 結果로부터 自動搬送 裝置와 같은 시스템에 리니어 모터를 應用할 경우에는 高效率 運轉範圍에서 垂直力이 吸引力으로 作用하므로 軌道와의 摩擦力 증가로 走行特性이 低下되는 主 原因이 되므로 空腔 길이가 작은 것이 반드시 效率的인 運轉이 되는 것은 아니다. 한편 空腔이 5[mm]인 경우  $s=0.27$ 부근에서 最大 效率 63.48[%]로 나타나 他 研究者의 試驗結果 [1, 39]와 比較할 때 매우 만족스러운 結果를 얻었다(6-8).

또한 力率 및 入力 電流 特性은 空腔이 5[mm]인 경우 각각 49~55[%], 172~98[A]로 나타났으며 10, 15[mm]인 경우도 類似한 樣相으로 15[mm]인 경우 5[mm]보다 10[%]정도 減少하였다.



#### 4. 結 論

최근 産業社會의 高度化에 따라 直線運動을 必要로 하는 시스템의 需要가 날로 增加하여 直線推력을 發生하는 리니어 모터에 대한 關心이 高潮되고 있다. 따라서 본 研究에서는 리니어 모터를 磁氣 浮上 列車의 驅動源으로 利用하는 경우 豫想되는 前後, 左右 空際 不平衡 狀態 및 橫方向 偏位時의 特性을 實驗的으로 糾明함으로써 磁氣 浮上型 超高速 電鐵이나 低床 輕量化 電鐵등의 驅動用 리니어 모터의 設計指標를 提示하였다.

端部效果의 한 補償策으로서 兩端部の 단락코일에 5[A]까지의 交番電流를 인가한 결과 發生推력이 最大 6.4[%]增加하여 端部效果를 다소나마 減少시킬 수 있으므로 入力電流 對 交番電流의 比를 적절히 조절하면 效果的인 補償이 될 수 있으리라 보며 리니어 모터를 단방향으로 運轉시키는 경우에는 出口端의 空際를 平均空際보다 5[mm]정도 크게 하는 것이 端部效果의 減少로 效率的인 運轉이 되리라 思料된다.

앞으로 機械的 振動이 計測裝備에 미치는 影響의 最小化, 自動計測, 橫方向 Edge Effect의 精確한 補償등이 이루어지면 좀 더 精確한 特性 分析이 可能하리라 보며 이는 차후의 研究課題라 思料된다.

#### 참 고 문 헌

[1] 三輪善一郎, “리니어모터의 應用과 將來性”, 技術誌「神鋼電氣」 Vol. 27 No. 3 通卷94號, pp. 4~6, 1982.

[2] 小豆 照男, “FA機器返送裝置”への 應用”, 「機械設計」 第32卷, 第3號 pp. 52~57, 1988.

[3] 山田一, “리니어모터와 應用技術” 大日本法令印刷(株), 1976.

[4] 日本電氣學會, “리니어모터와 其의 應用”, 오ーム社, 1984.

[5] 山田一, “産業用 리니어모터”, 工業調查會, 芳山印刷(株).

[6] H. Yamada, “Handbook of Linear Motor Application”, Kogyo chosakai Publishing Co., Ltd. 1986.

[7] S. Nonaka, N. Fuji, T. Watanabe, “Experimental Study on Characteristics of Linear Induction Motor for Urban Transit”, Trans.

IEE Japan, Vol. 108 D, No. 5, pp. 477~484, 1988.

[8] S. Nonaka, N. Fujii, T. Watanabe and Y. Kojima, “Test Facility and Test Results of Singled-Sided LIM for Urban Transit”, Maglev June 9-10, pp. 111~120, 1988.

[9] S. Nonaka, N. Fuji, “Valuation of Method of Compensating End Effect by Devising Primary Winding in High Speed LIM”, IEE Japan 59-B80, pp. 677~684, 1984.

[10] S. Nonaka, N. Fuji, Y. Kojima, “Dynamic characteristics of Linear Induction Motor for Urban Transit under constant V/f Drive”, Trans. IEE Japan, Vol. 109, D, No. 7, pp. 493~499, 1989.

[11] Dal-Ho Im, Eung-Chan Park, Gyu-Tak Kim, “Experimental Results of Single Sided L.I.M”, Proc. of Int. Con. on Maglev., Yokohama, pp. 209~214, July, 1989.

[12] Sakutaro Nonaka, Tsuyoshi Higuchi, “On the Design of single-Sided Linear Induction Motors for Propulsion of Vehicles”, Trans. IEE of Japan, Vol. 107-D, No. 11, Nov., 1987.

[13] 日本學, 宮尾脩美, “리니어모터 設計應用의 要點”, 日本工業技術センタ, 1985.

[14] I. Boldea, S.A. Nasar, “Optimum Goodness Criterion for Linear Induction Motor Design”, Proc. IEE, Vol. 123, 1, pp. 89~92, 1976.

[15] S.A. Nasar & I. Boldea, “Linear Motion Electrical Machines”, John Wiley & Sons., 1976.

[16] S. Nonaka, M. Matsusaki, “Analysis of Performance Characteristics of Various Primary Windings”, IEE Japan 54-B49, pp. 395~401, 1979.

[17] 任達鎬, 金完植, 金奎卓, “自動搬送 裝置用 L.I.M.의 機動特性에 관한 研究”, 電氣學會論文誌, Vol. 38, No. 6, pp. 393~400, 1989.

[18] H. Bolton, “Transverse Edge Effect in Sheet-Rotor Induction Motors” Proc. IEE, Vol. 166, No. 5, pp. 725~731, 1969.

[19] E.R. Laithwaithe, J.F. Eastham, H.R. Bolton, “Linear Motors with Transverse Flux”, Proc. IEE, Vol. 118~12, pp. 1761~1767, 1971.