

# Tubular Motor의 特性에 관한 研究

—試作 및 起動時의 特性—

論 文
28-3-5

## A Study on the Analysis of the Characteristics of a Tubular Motor —Trial Manufacture and the Characferistics in Starting Time—

任 達 鎬\* 李 殷 雄\*\* 張 錫 明\*\*\*  
(Dal Ho Im, Eun Eung Lee, Seok Myeong Jang)

### Abstract

The object of this paper is to try to develope Tulular Liner Induction Motor which consists of primary stator that generates traveling magnetic field from the three-phase winding of formed-wound concentric coil, and try to identify the characteristics of starting force.

To indentify the theoretical starting force formular we have quoted the conventional Maxwell's basic equation and Poisson's equation which are used in the general machines thereby having obtained the formular of the current with in the conductor and of the air gap magnetic field respectively. General starting force formular is acquired by applying the formular of the current and magnetic field which was theoretically derived above.

To this theoretically starting force formula various constants and the values of magnetic flux density resulting from the experimental motor are applied to present theoretically calculated values.

Comparing these theoretically caculated values experimentally weighed values, we have proved the validity of theoretical research.

### I. 序 論

産業構造가 複雜하여짐에 따라서 더욱 多樣한 驅動 裝置가 必要하게 되었다. 지금까지는 一般的으로 回轉 型 機械가 여러 機械의 變換過程을 거쳐 直線型 驅

動裝置로 利用되어왔으나 에너지 變換過程에 있어서의 非效率의 點을 除去하기 위하여, 直接 直線驅動力을 얻을 수 있는 方法을 研究해온 結果 오늘날 Linear Induction Motor의 開發에까지 이르게 되었다.

그런데 그 中에서도 tubular motor는 그 原理가 原子力, 化學, 金屬工業分野에서 Na, K, Bi 등의 液體金屬을 二次移動導體로 하는 電磁 펌프 등에 利用되고 있으며 産業에서의 그 應用分野는 廣範圍하다고 할 수 있다. 따라서 本 研究에서는 三相平衡卷線에 의해 勵

\*正會員: 漢陽大工大教授·(當學會調查理事)  
\*\*正會員: 忠南大工大電氣工學科助教授  
\*\*\*正會員: 忠南大工大電氣工學科  
接受日字: 1979年 2月 12日

磁되는 tube型 一次固定자와 固定子內에 圓筒型 알루미늄棒을 移動子로 갖는 構造의 tubular motor를 設計製作하고 特性解析에 가장 主가 되는 空隙內의 磁束密度와 二次導體에 誘起되는 渦電流, 또 이들에 의해 發生되는 推力를 maxwell方程式으로부터 二次導體인 알루미늄棒의 表面上에 誘起되는 渦電流는 兩端部에서 連續이라고 보아 境界條件等式을 세워 綜合特性式을 誘導하여 計算하였다. 그 結果와 考案設計된 試作機에 의한 實驗結果를 比較 檢討하여 特性式 및 그 誘導過程에서 세운 모든 假定的 妥當性을 立證시키는 등 앞으로 tubular motor의 特性改善 및 그 應用開發等に 參考資料를 얻고자 한다.

II. 理論式

(1) 基本方程式의 適用

本 研究의 特性理論式을 展開하는데 利用할 maxwell 電磁方程式은 다음과 같다.

$$\text{rot } \dot{E} = -\frac{\partial \dot{B}}{\partial t} \tag{1}$$

$$\text{rot } \dot{H} = \dot{J} \tag{2}$$

$$\dot{J} = \frac{1}{\rho} \dot{E} \tag{3}$$

그런데 위의 方程式으로부터 理論式을 展開해 나아가는데 있어서 tubular motor는 圓筒型이므로 그림 1.에서와 같이  $r, \theta, z$ 軸을 갖는 圓筒座標를 設定하고 可能한 몇가지의 制限條件을 주어 特性方程式을 簡易化시키기 위하여 다음과 같은 假定을 設定하였다.

(1) 空隙磁束密度의 方向은 二次移動子 表面에 對하여 垂直이어서  $r$ 方向成分만 存在한다.

(2) 空隙長이 一定하며 固定子의 一次電源은 平衡三相電流이다.

(3) 空隙磁界에 의한 二次導體의 移動子 電流는 中心軸에 對한 同心圓柱上에  $\theta$ 方向成分만의 面電流로 생각하며 表皮效果는 無視한다.

(4) fringing flux와 leakage flux는 없는 것으로 본다.

(5) 二次移動子는 無限히 긴 것으로 간주하며 active zone 內外의 境界에서 二次移動子알루미늄棒의 表面에 誘起되는 渦電流는 連續으로 본다.

(2) 基本方程式의 誘導

그림 1의 tubular motor의 解析모델에서 設定된 圓筒座標에 따라 空隙磁束密度와 그에 의해 誘起되는 二次導體電流에 관한 式을 誘導하기 위하여 式 (1)~(3)의 maxwell基本方程式을 引用하여 妥當한 假定에 의해 展開한다. 즉 一次固定子의 三相平衡 正弦波 勵磁電流  $\dot{J}_{1\theta} = J_{1\theta} e^{i(\omega t - \frac{\pi}{2})}$ 에 의해 勵磁되는 空隙磁束

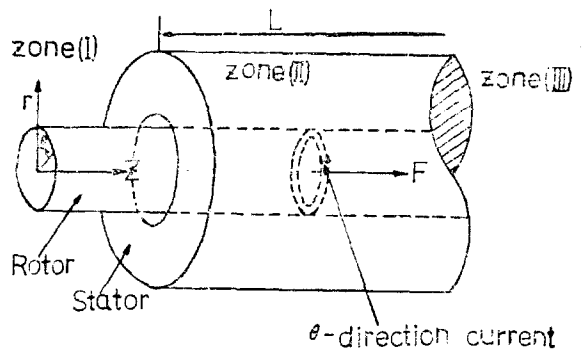


그림 1. Tubular motor의 모델

Fig. 1. The model of a tubular motor.

密度는  $r$ 方向成分인  $B_r$ 만이 存在하고 一次固定子 勵磁電流 및 二次알루미늄棒에 誘起되는 渦電流에 의한 電界는  $r, z$ 軸成分을 無視하면  $\theta$ 方向成分인  $E_\theta$ 만 存在하게 되므로 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{B}_r = B_r e^{i(\omega t - \frac{\pi}{2})} \tag{4}$$

$$\dot{E}_{z\theta} = E_{z\theta} e^{i(\omega t - \frac{\pi}{2})} \tag{5}$$

式 (1)로부터 active zone 內에서 다음과 같은 poisson方程式이 成立된다.

$$\nabla^2 \dot{E}_\theta = \frac{j\omega\mu_0}{\rho} \dot{E}_\theta \tag{6}$$

이를 假定에 의해  $\theta$ 方向成分에 對하여 展開하면

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \dot{E}_\theta}{\partial r} \right) - k^2 \dot{E}_\theta = 0 \tag{7}$$

$$\text{단 } k^2 = \frac{\pi^2}{r^2} + j\omega\mu_0 \frac{1}{\rho}$$

따라서 式 (7)의 微分方程式은 零次 第一種 Bessel 方程式이며 그 一般解는 다음과 같다.

$$\dot{E}_\theta = A \dot{I}_0(kr) + B \dot{K}_0(kr) \tag{8}$$

단  $\dot{I}_0(kr), \dot{K}_0(kr)$ 은 Bessel 函數로서

$$\dot{I}_0(kr) = \sum_{q=0}^{\infty} \frac{1}{q! \Gamma(q+1)} \left( \frac{kr}{2} \right)^{2q}$$

$\Gamma$ 는 Gamma 函數

그런데 本 tubular motor에서 二次알루미늄棒의 半徑  $r$ 이 零일때  $\dot{E}_\theta = 0$ 이고  $\dot{K}_0(kr) = \infty$ 이므로 積分常數  $B$ 는 零이 되어야 한다.

따라서 式 (8)은

$$\dot{E}_\theta = A \dot{I}_0(kr) e^{i(\omega t - \frac{\pi}{2})} \tag{9}$$

마찬가지로 式 (2)에 의하여

$$\frac{\partial \dot{B}_r}{\partial z} = \frac{\mu_0}{g} \dot{J}_\theta \tag{10}$$

또 式 (1)에 의하여

$$\frac{\partial \dot{E}_\theta}{\partial z} = -j\omega \dot{B}_r \tag{11}$$

또한 active zone 바깥, 即 領域 (I), (III)에서의 電界分布는 fringing, Leakage flux를 無視하기로 한 假定과 式 (1)로부터 다음과 같은 Laplace 方程式을

만족한다.

$$\nabla^2 \dot{E}'_\theta = 0 \quad (12)$$

따라서 式 (12)를 앞에서 設定된 圓筒座標內에서 展開하면

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \dot{E}'_\theta}{\partial r} \right) - m^2 \dot{E}'_\theta = 0$$

$$\text{단 } m^2 = -\frac{\pi^2}{c^2} \quad (13)$$

式 (13)은 零次 第一種 Bessel 方程式이므로

$$\dot{E}'_\theta = \dot{C} I_0(mr) + \dot{K} K_0(mr) \quad (14)$$

여기서  $I_0(mr)$ ,  $K_0(mr)$ 은 Bessel 函數이며

$$I_0(mr) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n! \Gamma(n_0 + 1)} \left( \frac{mr}{2} \right)^{2n}$$

그런데  $E'_\theta$ 도 active zone 內에서의 電界의 경우와 마찬가지로이므로

$$\dot{E}'_\theta = C I_0(mr) e^{j(\omega t - \frac{\pi}{c} z)} \quad (15)$$

또 式 (4), (9), (11)에 의하면

$$-j \frac{\pi}{c} \dot{E}_\theta = -j \omega \dot{B}_r \quad (16)$$

이므로 空際磁束密度  $\dot{B}_r$ 의 一般解은

$$\dot{B}_r = \frac{\pi}{\omega c} \dot{A} I_0(kr) e^{j(\omega t - \frac{\pi}{c} z)} \quad (17)$$

여기서 積分常數  $\dot{A}$ ,  $\dot{C}$ 를 알아야 하므로 다음과 같은 境界條件等式을 세운다.

(i) tubular motor의 2次導體(Al)棒의 길이가 無限히 긴 것으로 볼 때 그 表面에 誘起된 渦電流에 의한 電界는 active zone 內외의 境界部分에서 連續이라고 보아

$$\dot{E}_{2\theta} (r \cdot z) \Big|_{z=0, l} = \dot{E}'_{2\theta} (r \cdot z) \Big|_{z=0, l}$$

단 active zone 內, 外의 2次알루미늄棒에 誘起되는 渦電流에 의한 電界  $\dot{E}_{2\theta}$ ,  $\dot{E}'_{2\theta}$ 는 式 (9), (15)에서  $r=a$ 인 경우로 본다.

(ii) 境界條件等式 (i)과 式 (10)에서 空際內에 分布된 電界는 一次固定子勵磁電流에 의한 電界  $\dot{E}_{1\theta}$ 와 2次導體에 誘起된 渦電流에 의한 電界  $\dot{E}'_{2\theta}$ 의 合인  $\dot{E}_\theta = \dot{E}_{1\theta} + \dot{E}'_{2\theta}$ 라 할 수 있으므로 兩端部에서 다음과 같은 境界條件等식이 成立될 수 있다.

$$\dot{E}'_{2\theta} \Big|_{z=0, l} = \frac{g\rho}{\mu_0} \cdot \frac{\partial \dot{B}_r}{\partial z} - \dot{J}_{1\theta} \rho \Big|_{z=0, l} \quad (19)$$

따라서 境界條件等式 (i)와 式 (9), (15) 또 (ii)와 式 (15), (17)에 의하여 다음과 같은 等식이 成立한다.

$$\dot{A} I_0(ka) = \dot{C} I_0(ma) \quad (20)$$

$$\dot{C} I_0(ma) = -j \frac{g\rho}{\mu_0 \omega} \left( \frac{\pi}{c} \right)^2 \dot{A} I_0(ka) - \dot{J}_{1\theta} \rho \quad (21)$$

式 (20), (21)에 의하여 積分常數  $\dot{A}$ ,  $\dot{C}$ 를 구하면

$$\dot{A} = \frac{-\dot{J}_{1\theta} \rho}{I_0(ka) \left\{ 1 + j \frac{g\rho}{\mu_0 \omega} \left( \frac{\pi}{c} \right)^2 \right\}} \quad (22)$$

$$\dot{C} = \frac{-\dot{J}_{1\theta} \rho}{I_0(ma) \left\{ 1 + j \frac{g\rho}{\mu_0 \omega} \left( \frac{\pi}{c} \right)^2 \right\}} \quad (23)$$

따라서 本 tubular motor의 空際內에서 그 空間의 位置에 따른 電界分布現象 및 磁束密度分布를 究明할 수 있는 理論式을 式 (3), (9), (22)와 式 (17), (22)에 의하여 각각 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\dot{E}_\theta = \dot{\delta} \cdot e^{j(\omega t - \frac{\pi}{c} z)} \quad (23)$$

$$\dot{B}_r = \frac{\pi}{\omega c} \dot{\delta} e^{j(\omega t - \frac{\pi}{c} z)}$$

$$\text{단 } \dot{\delta} = \frac{-\dot{I}_0(kr) \dot{J}_{1\theta} \rho}{I_0(ka) \left\{ 1 + \frac{g\rho}{\mu_0 \omega} \left( \frac{\pi}{c} \right)^2 \right\}}$$

$\dot{J}_{1\theta}$  : 一次勵磁 電流密度 [A/m]

또한 空際內에서 分布된 電界에 의한 電流密度  $\dot{J}_\theta$ 는 式 (3), (23)에 의하여

$$\dot{J}_\theta = \frac{\dot{\delta}}{\rho} e^{j(\omega t - \frac{\pi}{c} z)} \quad (25)$$

그런데  $\theta$ 方向으로 分布된 一次固定子 勵磁電流密度  $\dot{J}_{1\theta}$ 와  $r$ 方向으로의 空際磁束密度  $B_r$ 는  $z$ 方向으로의 推력을 發生시키는데 本 tubular motor에서 發生되는 時間的 平均推力の 크기는 다음 式과 같다.

$$F = \frac{L}{9.8} \int_0^a \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} R_c (B_r \cdot \dot{J}_{1\theta}^*) d\theta \cdot dr [\text{kg} \cdot \text{m}] \quad (26)$$

단  $\dot{J}_{1\theta}^*$ 는  $\dot{J}_{1\theta}$ 의 conjugate vector

$R_c$ 는 實數部

## II. 作機 및 實驗

### III-1 試作機仕様

實驗을 위하여 製作된 試作機는 3相6極의 tubular motor로써 그림 2와 같으며 그 重要仕様은 다음과 같다.

鐵心길이 : 510 [mm]

鐵心內徑 : 41 [mm]

슬롯數 : 25

슬롯幅 : 10 [mm]

슬롯깊이 : 10 [mm]

齒幅 : 10 [mm]

와 같으며 珪素鋼板을 成層시켜 鐵心을 製作하였고 內部는 알루미늄棒을 넣기 위하여 圓筒型으로 하였으며 또한 勵磁 coil을 卷線하기 쉽고 放熱이 容易하도록 하기 위하여 약간의 磁氣損失은 있더라도 固定子를 兩分하여 製作하였고 移動子는 直徑 41 [mm], 길이 1200

[mm]의 알루미늄棒으로 하였다.

1次固定자와 2次移動자가 同心軸으로 되도록 하고 그 空隙은 2.5[mm]로 均一하게 하였으며 運轉時 마찰을 最少로 하기 위하여 軸에 特殊渦車로 移動자를 지지하였다.

1次勵磁卷線은 1φ의 enamel coil을 400회를 捲線하여 Bond로 接着型捲시켜 그림 3에서와 같이 3相6極으로 接續하였으며 移動자가 起動時부터 出口脫出時까지 걸리는 時間을 測定하여 平均速度를 재기 위한 裝置를 付着시켰다.

III-2. 實驗方法

3相電源의 入力電壓을 Inductrol을 使用하여 0~300[V]까지 變化시키면서 spring balance로 移動자를 固定시킨 拘束狀態에서 Search coil로부터 空隙磁束密度

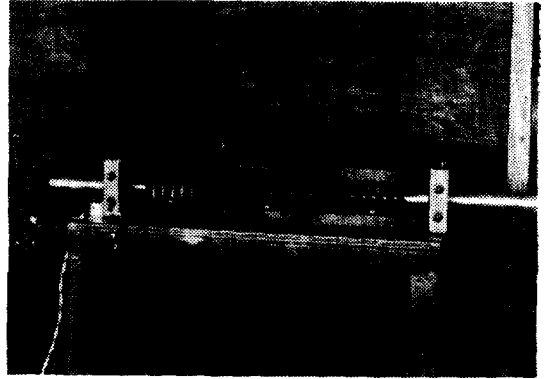
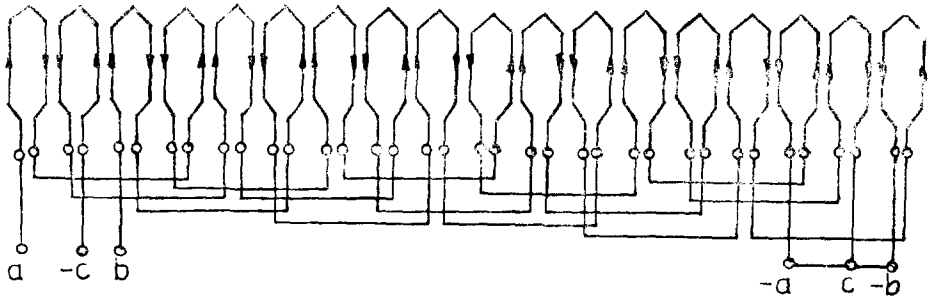


그림 2. 試驗機(tubular motor)

Fig. 2. An experimental tubular motor



A method of winding of 3 phase Tubular Motor

그림 3. 3相 tubular motor의 捲線法

Fig. 3. The method of winding of a 3 phase tubular motor

및 誘起電壓, 電流를 磁束計, V.T.V.M等으로 測定하였고 進行反對方向에 固定시킨 spring balance에 의해 推力를 測定하였다.

IV. 實驗値와 理論値의 比較檢討

理論値와 實驗値를 比較檢討하기 위하여 式 (23)~(36)으로부터 起動時 1次勵磁電流密度變化에 따른 空隙內의 電界分布, 磁束密度 및 發生推力를 電子計算機 (IBM360)로 얻은 結果를 分析하여 다음과 같이 그림 4, 5를 얻었다.

이때 使用된 物理定數는 다음과 같다.

- $a = 1.8 \times 10^{-2} [m]$
- $r = 5.7 \times 10^{-2} [m]$
- $L = 3.42 \times 10^{-1} [m]$
- $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} [H/m]$
- $\rho = 6.55 \times 10^{-6} [\Omega]$
- $\tau = 1.8 \times 10^{-2} [m]$

$q=4$

$n=4$

① 그림 4: 理論値를 그린 graph로써 一次勵磁電流密度를 變化시킴에 따라 電界 및 空隙磁束密度가 線型的으로 比例하여 變하며 空隙內에서 發生되는 推力는 拋物線으로 제곱에 比例함을 볼 수 있다.

② 그림 5: 實驗値를 그린 graph로써 역시 印加된 電壓에 따라 電流, 空隙磁束密度가 線型的으로 變하며 推力 拋物線으로써 제곱에 比例함을 보인다.

따라서 理論値와 實驗値가 勵磁電流密度 및 電壓變化에 따라 거의 一致하므로 理論式 및 設定된 假定이 妥當함을 알 수 있다.

또한 空隙磁束密度가 1次固定자 勵磁電流密度 및 電壓의 變化에 따라 直線的으로 變化하여 發生推力가 제곱에 比例함을 볼때 本 tubular motor의 起動時 特性이 一般誘導電動機의 特性과 一致함을 究明할 수 있다.

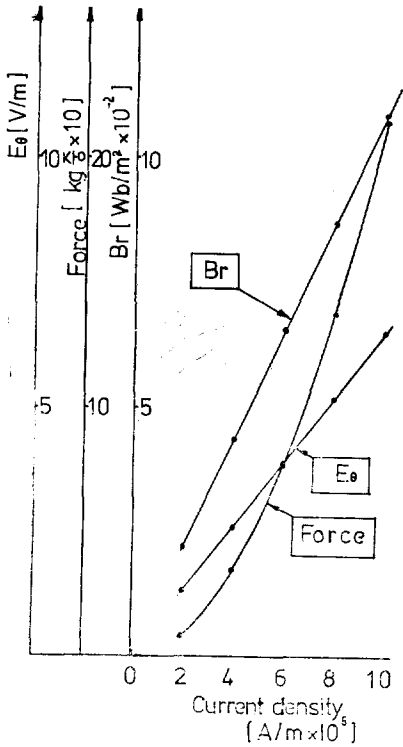


그림 4. 理論計算特性

Fig. 4. The characteristics of theoretical values.

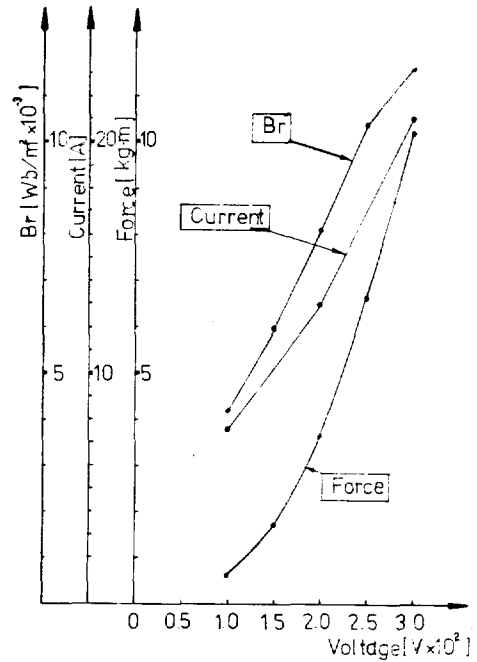


그림 5. 實驗值 特性

Fig. 5. The characteristics of experimental values

VII. 結 論

直線型 驅動裝置로 適合한 tubular motor를 考案 製作하였고 maxwell方程式으로부터 擬가지 假定 및 境界條件等식에 의해 起動時의 特性理論을 誘導한 後 物理定數를 代入하여 電子計算機處理로 얻은 理論值와 實驗值를 比較檢討하여 理論式誘導가 妥當함을 보였으며 다음과 같은 사실을 考察할 수 있었다.

(1) tubular motor의 起動時의 空際磁束密度 및 電界分布가 1次固定子勵磁電流, 電壓에 따라 直線的으로 變化하며 發生推力는 거의 比例한다.

(2) 起動時에는 一般誘導電動機의 特性과 一致한다. 따라서 本 論文은 運轉速度 및 空際位置에 따라 空際磁束密度 및 電界分布, 發生推力等 諸特性의 變化를 究明하는데 土臺가 될 수 있으리라 생각된다.

<記 號>

- $\dot{B}_r$ : r成分의 空際磁束密度[Wb/m<sup>2</sup>]
- $\dot{E}_\theta$ :  $\theta$ 成分의 active zone內의 電界[V/m]
- $\dot{E}_\theta'$ :  $\theta$ 成分의 active zone밖의 電界[V/m]
- $J_{1\theta}$ : 1次固定子 勵磁電流의  $\theta$ 成分[A/m]

- $J_{2\theta}$ : 2次移動子에 誘起된 渦電流[A/m]
- $\rho$ : 2次導體 面抵抗率[ $\Omega$ /m]
- $\tau$ : 極間隙[m]
- $L$ : 固定子 길이[m]
- $\omega$ : 角速度[rad/sec]
- $a$ : 2次 알루미늄棒半徑[m]

參 考 文 獻

1. Murray, W.Davis "Development of concentric Linear Induction motor"—Trans. A. IEE. 91 pp. 1905—1913 (1972)
2. J.F. Eastham & J.H. Alwash "Transverse-flux tublar motors"—Proc. IEE. Vol. 119, No. 12, Dec. (1972)
3. W.L. Weeks "Electromagnetic Theory for Engineering Applications"—John Wiley & Sons, Inc. (1964) pp. 469—527
4. F.B. Hildebrand "Advanced calculus for Applications" Prentice-Hall, Inc.(1962) pp. 142—156

5. Eric. R. Laithwaite "Linear Electric Machines—a Personal view"—Proc. IEE. Vol. 63, No. 2 pp. 250—290 Feb. (1975)
6. Michel, Poloujadoff "Linear Induction Machine"—IEEE. Spectrum 72—80 Feb. (1971)
7. E.R. Laithwaite, "Induction Machine for Special Purpose." George. News. LTD., London pp. 121—125 (1966)
8. J.C. West., & Hesmondhalgh, D.E., "The analysis of Thick-Cylinder Induction Machines" IEE. 477—11 pp. 172—181 (1961)
9. E.R. Laith Waite, & S.A. Nasar.,—"Linear motion Electrical Machines." Proc. IEE. 58 pp. 531—542 (1970)
10. 內海達見 "圓筒形誘導電磁 Pump의 解析"—JIEE. Vol. 198—8 53—B81 Aug. (1978)
11. 鹿野快男 "圓筒形單相誘導電磁流體 Pump"—JIEE, Vol. 96—13 No. Aug. 1976