論 文
36~3~1

圓筒形 直線誘導電動機의 動作特性

Performance Characteristics of Tubular Linear Iduction Motor

李 殷 雄*
(Eun-Ung Lee)

Abstract

The purpose of this paper is to analysis and develop theoretically the characteristics of tubular linear induction motor, which is a special industrial motor that generates directly thrust force from electrical power.

The Poisson equation about vector potential which is created by the application of Maxwell electromagnetic equation with the speed considered, results in modified Bessel equation by the assumption that is applied to each region of the experimental motor.

Vector potential, magnetic flux density, secondary current, and thrust force according to its region respectively were found out by substituting boundary condition for this equation and rearranging.

Besides, a attendant materials, that is, thermal characteristic, which is one of the characteristics under the operation of experimental motor each part's magnetic flux distribution characteristics within active zone, the required time for reciprocating motion, and variation of power factor vs. a slip were found.

1. 序 論

電氣에너지로부터 直線推力이나 또는 直線推力의 周期的인 往復運動을 必要로 하는 圓筒型 誘導電動機가 系統의 簡單化와 에너지節約, 騷音 및 振動防止를 위하여 硏究되고 있다.[1)~20)]

이는 推力을 發生하는 空隙磁束의 方向에 따라 縱方向(longitudial) 磁束型[13)~14)]과 橫方向(transverse)磁束型[15),20)]으로 分類된다.

本 硏究에서는 이중 構造가 簡單하고低速運轉에서 端部效果를 無視할 수 있는 縱方向磁束型의 缺點을 檢討하여 이를 改良하려 하였다.

一般的으로 電動機는 空隙磁束의 不均一로 인한 磁氣吸引力이 發生함을 考慮하여 2次인 移動子를 非磁性體인 알루미늄으로 만들고 있다. 그래서 電氣裝荷를 크게 할 수가 없다. 큰 勵磁卷線을 設置해야 하는데 이로인하여 空隙이 커져 漏洩磁束이 많이 發生한다.

따라서 力率이 나빠진다. 또한 電動機 自體에서 發生하는 銅損과 鐵損熱을 放散하기 어려운 構造로되어 있어 溫度上昇이 크다.

本 硏究에서는 이러한 缺點을 除去하기 위하여 새로운 形態의 直線推力電動機를 구상하여 이를 設計製作하였다. 또 이 電動機의 特性을 解析하기 위해서 電磁場理論을 基本으로 한 새로운 技法을 開發하여 試作機에 適用하므로서 實測値와 一致함을 確認할 수 있었다. 따라서 이와같은 새로운 形態의 直線推力電動機의 設計에 크게 기여할것이며 또 이렇게 해서 設計된 새로운 電動機는 그 應用分野에 있어서 큰 役割을 할 것으로 생각한다.

本 論文에서 電磁場理論을 基本으로 한 特性解析法의 妥當性이 試作機의 諸 物理定數를 理論式에 代入하여 電算處理하므로서 確認되었다.

*正 會 員 : 忠南大 工大 電氣工學科 敎授 · 工博
接受日字 : 1986年 8月 9日
1次修正 : 1986年 10月 15日
2次修正 : 1986年 11月 5日

2. 假定設定과 基本理論

2.1 理論解析을 위한 모델과 假定設定

圓筒型 直線誘導電動機의 數學的 解析을 위한 모델은 그림 1과 같다.

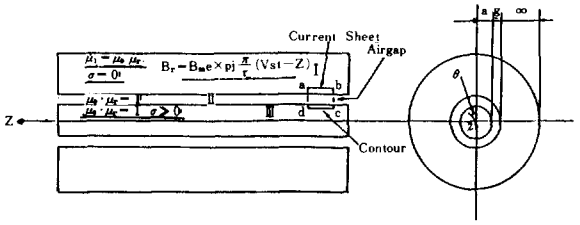


그림 1. Tubular전동기의 모델
Fig.1. Model of tubular motor.

圓筒型 構造로 되어 있으므로 圓筒座標軸을 設定하고 그림 1과 같이 3領域으로 나눈다.

領域(Ⅰ) (固定子) ; $\mu_s=\mu_o\mu_r, \mu_r>1,\ \sigma=0$

領域(Ⅱ) (空隙) ; $\mu_a=\mu_o, \mu_r=1,\ \sigma=0$

領域(Ⅲ) (移動子) ; $\mu_T=\mu_o, \mu_r=1,\ \sigma\neq 0$

實際現象을 理論的으로 展開하기 위해 다음과 같은 假定을 設定한다.

(1) 2次導體인 알루미늄棒의 길이는 無限히 길다.

(2) 1次인 固定子 鐵心의 磁氣飽和는 無視했으며 (比透磁率 $\mu_s\to\infty$) θ方向의 傳導度를 없애기 위해 硅素鋼板을 z軸에 나란하게 成層했다.

(3) 空隙의 길이는 均一하다.

(4) 界의 時間的 空間的 變化는 正弦波이고 高調波成分은 無視한다.

(5) 空隙磁束密度 成分은 2次導體面에 垂直인 r方向成分만 考慮한다.

(6) 環狀 型捲코일을 固定子 鐵心 스롯內에 z축에 垂直으로 設定하므로서 固定子의 勵磁電流는 θ方向의 面電流이다.

(7) 2次導體棒에 誘起되는 電流에 의한 表皮效果는 無視한다.

(8) 各 領域의 物理的 定數는 同質이고 等方向性이며 線型이다.

2. Maxwell電磁方程式의 適用

理論解析을 위한 Maxwell電磁方程式은 다음과 같다.

$$\nabla\times\mathbf{E}=-\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t} \tag{2-1}$$

$$\nabla\cdot\mathbf{B}=0 \tag{2-2}$$

$$\nabla\times\mathbf{H}=\mathbf{J} \tag{2-3}$$

$$\mathbf{B}=\mu\mathbf{H} \tag{2-4}$$

$$\mathbf{J}=\sigma(\mathbf{E}+\boldsymbol{v}\times\mathbf{B}) \tag{2-5}$$

$$\mathbf{B}=\nabla\times\mathbf{A} \tag{2-6}$$

式(2-1), (2-3), (2-4), (2-5)과 (2-6)을 組合하여 式(2-7)을 얻는다.

$$\nabla\times\nabla\times\mathbf{A}=\mu\ \sigma\left(-\frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t}+\boldsymbol{v}\times\nabla\times\mathbf{A}\right) \tag{2-7}$$

自由電荷가 없는 移動子에서는 $\nabla\cdot\mathbf{A}=0$ 이므로 式(2-7)은 式(2-8)과 같이 된다.

$$\nabla^2\mathbf{A}=\mu\sigma\left(\frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t}-\boldsymbol{v}\times\nabla\times\mathbf{A}\right) \tag{2-8}$$

한편, 假定(3)～(5)를 參照하면 移動磁界에 대한 一般的인 表現式으로부터 固定子에서 發生된 r方向成分의 磁束密度 $\mathbf{B}_r$은 空隙에서 式(2-9)과 같이 된다.

$$\mathbf{B}_r(\theta,z,t)=B_m\,e^{j\frac{\pi}{\tau}(v_st-z)}\cdot\hat{a}_r \tag{2-9}$$

여기서 同期速度 v_s는 式(2-10)과 같다.

$$v_s=2\tau f \tag{2-10}$$

空隙磁束密度 $\mathbf{B}$를 구하기 위해 式(2-8)과 같은 磁氣벡터포텐셜 $\mathbf{A}$의 2階偏微分方程式에서 時間變化率 $\frac{\partial}{\partial t}$를 $j\frac{\pi}{\tau}v_s$로, z方向의 變化率 $\frac{\partial}{\partial z}$를 $-\frac{\pi}{\Gamma}$로 置換하고 假定(4)～(7)과 式(2-6)에서 벡터 포텐셜은 θ方向成分뿐이다.

$$\mathbf{A}(z,r,t)=A_m\,e^{j\frac{\pi}{\tau}(v_st-z)}\,\hat{a}_\theta \tag{2-11}$$

3. 圓筒座標에 의한 特性式 誘導

3.1 各 領域의 벡터 포텐셜 誘導

機械系를 準定常狀態로 보아 式(2-8)를 圓筒座標系로 展開하고 2章의 假定(6), (7)을 適用하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial\mathbf{A}}{\partial r}\right)+\frac{\partial^2\mathbf{A}}{\partial z^2}=j\mu\sigma\frac{\pi}{\tau}sv_s\ \mathbf{A}\cdot\hat{a}_\theta \tag{3-1}$$

式(3-1)에서 移動子의 速度 $\boldsymbol{v}$를 方向벡터로 表示

하면

$$\boldsymbol{v}_s = v_z \cdot \hat{a}_z \tag{3-2}$$

로 되며, 移動子의 z方向速度 v_z는

$$v_z = (1-s)v_s \tag{3-3}$$

이고, 移動磁束의 同期角速度 ω_s는

$$\omega_s = \frac{\pi}{\tau} v_s \tag{3-4}$$

로 된다. 式(3-3)에서 s는 스립이다.

그림 1 에서와 같이 解析領域인 active zone內에서 固定子, 空隙, 移動子를 各各 Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ으로 區分한다.

式(3-1)과 式(2-11)에서 固定子鐵心의 導電率이 2章의 假定(2)에 의하면 零이므로

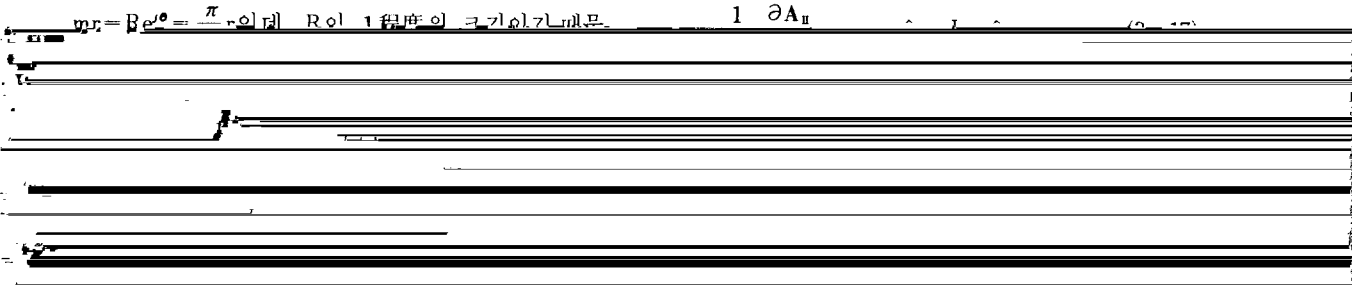
$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial \mathbf{A}_I}{\partial r}\right) - m^2 \mathbf{A}_I = 0 \tag{3-5}$$

이고, 여기서 $m^2 = \left(\frac{\pi}{\tau}\right)^2$이고 $\mathbf{A}_I$은 固定子인 領域 Ⅰ에서의 벡터포텐셜이다. 零次 第1種, 第2種 變形Bessel函數의 解를 갖는 Bessel微分方程式이 된다. 따라서 固定子 鐵心領域(Ⅰ)과 空隙領域(Ⅱ)에서의 벡터 포텐셜 $\mathbf{A}_I$, $\mathbf{A}_{II}$의 一般式은 式(3-5)에서 다음과 같이 된다.

$$\mathbf{A}_I = \{A_n I_o(mr) + B_n K_o(mr)\} e^{j\frac{\pi}{\tau}(v_s t - z)} \tag{3-7}$$

$$\mathbf{A}_{II} = \{C_n I_o(mr) + D_n K_o(mr)\} e^{j\frac{\pi}{\tau}(vst - z)} \tag{3-8}$$

여기서 A_n, B_n, C_n, D_n은 任意의 常數이고, I_o, K_o는 零次 第1種, 第2種의 變形Bessel函數이며, $mr = Re^{j\theta} = \frac{\pi}{\tau} r$의데 R이 1程度의 크기가 되므로



에 變形Bessel函數는 다음과 같이 一般式을 使用한다.

$$I_n(x) = \sum_{b=1}^{\infty} \frac{x^{n+b}}{2^{n+2b} b!\,\Gamma(n+b+1)} \tag{3-9}$$

$$K_n(x) = \frac{\pi}{\tau}\frac{I_{-n}(x) - I_n(x)}{\sin n\pi} \tag{3-10}$$

여기서 b, n은 常數를 나타내고 Γ는 Gamma函數로 表示한다. 比透磁率이 $\mu_r = 1$이고 導電率이 σ인 領域(Ⅲ)의 2次導體棒의 磁氣벡터포텐셜 $\mathbf{A}_{III}$는 式(3-6)에서

$$\mathbf{A}_{III} = \{E_n I_o(kr) + F_n K_o(kr)\} e^{j\frac{\pi}{\tau}(v_s t - z)} \tag{3-11}$$

$Re^{j\theta}$, $R = r\left[\left(\frac{\pi}{\tau}\right)^4 + (\mu_o \sigma s v_s)^2\right]^{\frac{1}{4}}$이고 R이 1程度이므로 1程度이므로 變形 Bessel函數의 一般解의 係數I_o,K_o는 領域(Ⅰ), (Ⅱ)에서와 같이 一般式이 使用된다. 여기서

$$\theta = \tan^{-1}\frac{\sqrt{\left(\frac{\pi}{\tau}\right)^4 + (\mu_o \sigma s v_s)^2}}{\mu_o \sigma s v_s} \tag{3-12}$$

이다.

2.2 境界條件과 磁束密度

2次導體棒의 中心으로부터 無限히 먼 點($r\to\infty$)의 磁界는 零이므로 式(3-7)의 係數A_n은 零이 되어야 한다. 따라서

$$\mathbf{A}_I = B_n K_o(mr) e^{j\frac{\pi}{\tau}(v_s t - z)} \tag{3-13}$$

로 되며 2次導體棒의 半徑 a보다 매우 작은 點($r\to o$)의 磁界는 零이므로 式(3-11)에서 K_o의係數 F_n은 零이 되어 式(3-14)가 얻어진다.

$$\mathbf{A}_{III} = E_n I_o(kr) e^{j\frac{\pi}{\tau}(v_s t - z)} \tag{3-14}$$

또 두개의 連續된 領域의 境界에서 磁束의 法線成分과 磁界의 接線成分의 基本的 性質을 考慮하면 境界條件式은 다음과 같다.

(1) r=a+g;固定子와 空隙사이

$$\mathbf{A}_I|_{r=a+g} \cdot \hat{a}_r = \mathbf{A}_{II}|_{r=a+g} \cdot \hat{a}_r \tag{3-15}$$

$$\hat{a}_z \times (\mathbf{H}_{II} - \mathbf{H}_I) = J_s \cdot \hat{a}_\theta \tag{3-16}$$

式(3-16)에 式(2-4)와 (2-6)을 代入하고 假定(2)를 考慮하여 整理하면 式(3-17)과 같다.

$$\frac{1}{\quad} \frac{\partial \mathbf{A}_{II}}{\quad} \qquad (3-17)$$

(2) r=a;空隙과 移動子사이

$$\mathbf{A}_{II}|_{r=a} = \mathbf{A}_{III}|_{r=a} \tag{3-18}$$

$$\frac{\partial \mathbf{A}_{II}}{\partial r}\Big|_{r=a} = \frac{\partial \mathbf{A}_{III}}{\partial r}\Big|_{r=a} \tag{3-19}$$

式(3-15), (3-17)에 式(3-13), (3-8)을 代入하여 整理하면

$$B_n K_o(ma+mg) = C_n I_o(ma+mg) + D_n K_o(ma+mg) \tag{3-20}$$

$$C_n I'(mr)|_{r=a+g} + D_n K_o'(mr)|_{r=a+g} = \mu_o J_s \tag{3-21}$$

$$I_o'(x)=I_1(x) \tag{3-22}$$

$$K_o'(x)=K_1(x) \tag{3-23}$$

$$C_nI_1(ma+mg)-D_nK_1(ma+mg)=\frac{\mu_o}{m}J_s \tag{3-24}$$

가 된다. 또 式(3-18), (3-19)에 式(3-8), (3-11), (3-22), (3-23)을 代入하여 整理하면 다음과 같이 된다.

$$C_nI_o(ma)+D_nK_o(ma)=E_nI_o(ka) \tag{3-25}$$

$$C_nI_1(ma)-D_nK_1(\ a)=\frac{k}{m}E_nI_1(ka) \tag{3-26}$$

여기서 各 係數들은

$$\left.\begin{aligned} &L=K_o(ma+mg),\quad M=I_o(ma+mg)\\ &N=I_1(ma+mg),\quad P=K_1(ma+mg)\\ &Q=I_o(ma),\quad R=K_o(ma)\\ &S=I_o(ka),\quad T=I_1(ka)\\ &U=I_1(ma),\quad W=K_1(ma)\end{aligned}\right\} \tag{3-27}$$

라 놓으면 式(3-20), (3-24), (3-25), (3-26)은 다음과 같이 된다.

$$B_nL=C_nM+D_nL \tag{3-28}$$

$$C_nN-D_nP=\frac{\mu_o}{m}J_s \tag{3-29}$$

$$C_nQ+D_nR=E_nS \tag{3-30}$$

$$C_nU-D_nW=\frac{k}{m}E_nT \tag{3-31}$$

式(3-28)～(3-31)의 聯立方程式을 풀면

$$B_n=\frac{\mu_oJ_s}{mLN}\left[1-\frac{MP(mSU-kQT)-LN\left(SN-\frac{k}{m}QT\right)}{kT(PQ+NR)+mS(NW-PU)}\right] \tag{3-32}$$

$$C_n=\frac{\mu_oJ_s}{mN}\left[1-\frac{P(mSU-ROT)}{kT(TQ+NR)+mS(NW-PU)}\ \frac{k}{}\right] \tag{3-33}$$

$$D_n=\mu_oJ_s\frac{SU-\frac{k}{m}QT}{kT(PQ+NR)+mS(NW-PU)} \tag{3-34}$$

$$E_n=\mu_oJ_s\frac{RU+QW}{kT(PQ+NR)+mS(NW-PU)} \tag{3-35}$$

로 되며 式(3-35)에 式(3-27)을 代入하여 整理하면

$$E_n=\mu_oJ_s\left[\frac{K_o(ma)I_1(ma)+\frac{I_o(ma)K_1(ma)}{K_o(ma)\}+mI_o(ka)\{I_1(ma+mg)K_1(ma)-\frac{}{K_1(ma+mg)I_1(ma)\}}\right] \tag{3-36}$$

로 된다. 따라서 磁氣벡터포텐셜 $\mathbf{A}_{\text{III}}$은

$$\mathbf{A}_{\text{III}}=\mu_oJ_s\left[\frac{K_o(ma)I_1(ma)+\frac{I_o(ma)K_1(ma)}{(ma+mg)K_o(ma)\}+mI_o(ka)\{I_1(ma+mg)}{kI_1(ka)\{K_1(ma+mg)I_o(ma)+I_1}\right.$$
$$\left.\frac{}{K_1(ma)-K_1(ma+mg)I_1(ma)\}}\right]\times I_o(kr)e^{j\frac{\pi}{\tau}v_st-z)} \tag{3-37}$$

로 되여 移動子를 鎖交하는 空隙磁束密度는

$$\mathbf{B}_{\text{III}}\cdot\hat{a}_r=j\frac{\pi}{\tau}\mathbf{A}_{\text{III}} \tag{3-38}$$

로 된다. 그러므로 移動子의 表面位置의 磁束密度는

$$\mathbf{B}_{\text{III}}|_{r=a}=j\frac{\pi}{\tau}E_nI_o(ka)e^{j\frac{\pi}{\tau}(v_st-z)} \tag{3-39}$$

로 된다.

3.3 移動子의 電流密度

移動子의 速度變化에 따른 電流密度를 구하기 위해 式(2-6)에서 2章의 假定(5)를 참조하면

$$\nabla\times\mathbf{A}_{\text{III}}=-\frac{\partial\mathbf{A}_{\text{III}}}{\partial z}\cdot\hat{a}_r \tag{3-40}$$

이 되고, 式(2-1)과 式(2-6)에서 移動子의 電界 $\mathbf{E}_{\text{III}}$는

$$\mathbf{E}_{\text{III}}=-\frac{\partial\mathbf{A}_{\text{III}}}{\partial t} \tag{3-41}$$

로 된다. 式(3-3)과 (3-40)을 式(2-5)에 代入하여 方向벡터를 一致시키면 移動子의 電流密度 $\mathbf{J}_T$는

$$\mathbf{J}_T\cdot\hat{a}_\theta=-j\frac{\pi}{\tau}sv_s\mathbf{A}_{\text{III}}\cdot\hat{a}_\theta \tag{3-42}$$

로 되며 式(3-42)에 式(3-37)을 代入하면 動移表面(r=a)의 面電流密度 J_T는 式(3-43)과 같이 해진다.

$$J_{T_{r=a}}=-j\frac{\pi}{\tau}sv_s\sigma\mu_oJ_s\left[\frac{K_o(ma)}{kI_o(ka)\{K_1(ma+mg)I_o(}\right. \tag{3-43}$$

$$\frac{I_1(ma)+I_o(ma)}{+I_1(ma+mg)K_o(ma)\}+mI_o(ka)\{I_1(ma+mg)K_1(ma)-K_1(ma+mg)I_1(ma)\}}\Big]\times I_o(ka)e^{j\frac{\pi}{\tau}(v_st-z)} \quad (3-43)$$

3.4 移動子의 發生推力

移動子의 表面積當 作用하는 Lorentz의 힘은

$$f_z=J_T\cdot\hat{a}_\theta\times B_{III}\cdot\hat{a}_r \quad (3-44)$$

의 實數部이므로 다음과 같이 表示된다.

$$f_z=-\frac{1}{2}R_e(J_T\cdot B_{III}^*)\cdot\hat{a}_z \quad (3-45)$$

이와같이 式(3-39)와 式(3-43)의 積으로 얻어지는 移動子의 全推力은

$$F_z=\frac{1}{9.8}\int_o^{2\pi}\int_o^{p\tau}f_z d\theta dz=\frac{1}{9.8}\frac{\pi^3}{\tau}\mu_o^2J_s^2ps v_s\sigma\Big[\frac{K_o(ma)I_1(ma)+}{kI_1(ka)\{K_1(ma+mg)I_o(ma)+I_1(ma+mg)}\frac{I_o(ma)K_1(ma)}{K_o(ma)\}+mI_o(ka)\{I_1(ma+mg)K_1(ma)-}\frac{}{K_1(ma+mg)I_1(ma)\}}\Big][kg] \quad (3-46)$$

으로 얻어진다.

4. 實驗과 結果檢討

4.1 試作機

特性을 解析하고 實驗하기 위해 製作한 試作機와 實驗裝置는 그림 2와 같고 試作機의 칫수와 物理定數는 表 1과 같으며 製作에 考慮한 事項은 다음과 같다.

1) 固定子鐵心은 渦流를 除去하고 磁束方向을 考慮하여 스롯을 낸 硅素鋼板을 軸方向에 나란하게 成層하였다.

2) 空隙을 작게하기 위해 固定子의 스롯內에 巻線보빈(bobbin)없이 型捲하여 固着시켰다.

3) 固定子 스롯內에는 固定子巻線外에도 磁束分布와 溫度變化를 測定하기 위한 탐색코일을 設置하였다.

4) 移動子의 連續運轉이 可能하도록 하기 위해 移動子를 圓形으로 만들고, 固定子는 移動子가 만드는 圓을 3等分한 位置에 나누워 設置하였다.

5) 移動子는 空隙磁束의 不均一로 困해 發生하는 磁氣吸引力과 渦電流密度等을 考慮하여 常磁性體인 알루미늄을 使用하였다.

표 1. 물리정수와 시작기의 칫수
Table 1. Physical constants and dimension of experimental motor

I. Stator	
number of phase	3
supply frequency	f=60[Hz]
length	L=258×3[mm]
height	H=50[mm]
number of slots	S=18×3
number of poles	p=2 or 6
pole pitch	τ=53[mm] or 123[mm]
synchronous speed	$v_s=2\tau f$[m/s]
slip	s=0.1~1
slot depth	20[mm] (average)
slot width	8[mm]
teeth width	6[mm]
material	0.35[mm] thickness electrical steel RM-14
magnctic flux density	B=0.8~0.9[wb/m²]
relative permeability	μ_r=7 000
number of coils	18×3
turns of coil	0.7mm enamel coil×132[turns]
permissible current of coil	about 5 [A]
search coil:measuring core temp.	0.6[mm] coil (100Ω at 0℃)
measuring coil temp.	0.6[mm] coil (100Ω at 0℃)
measuring emf	0.7[mm] enamel coil 4 turn
II. Air gap	
length of airgap	2[mm] (average)
permeability of free space	$\mu_0=4\pi\times10^{-7}$[H/m]
III. Traveller	
material	aluminium alloy 6066
aluminium purity	93-93.6[%]
length	2.866[m]
weight	7.1015[kg]
radius of bar	1.71×10^{-2}[m]
conductivity	$\sigma=2.15\times10^7$[℧/m]
relative permeability	μ_r=1
relative electric resistance	0.047[Ωmm²/m]
thermal conductivity	0.35[Cal/cm.s.c°]
specific gravity	2.70 [g/cm²]

그림 2. 실험장치
Fig.2 Experimental apparatus.

6) 往復運動과 往復運轉에 所要되는 時間을 測定하기 위해 相順可逆繼電器와 timer等의 制御裝置를 附着하였다.

7) 磁氣飽和를 無視할 수 있는 充分한 量의 鐵心材料를 使用하였다.

4.2 實驗方法

그림2와 같은 實驗裝置로 다음과 같이 實驗하였다.

1) $\frac{1}{100}$[sec]의 速度變化를 計測할 수 있는 電氣時計와 速度計를 使用하였다.

2) 3相 誘導電壓調整器로 入力電壓을 制御하면서 動力計로 推力을 測定하였다.

3) 固定子스롯에 磁束密度를 測定하기 위해 設置한 탐색코일의 誘起電力을 마이크로볼트메터로測定하고 磁束計로 測定한 入·出端口의 磁束을 比較하므로서 磁束計로 測定이 不可能한 ative-zone內의 各位置의 空隙磁束密度分布를 구했다.

4) 固定子스롯의 各 位置에 設置한 溫度測定用 탐색코일의 溫度에 따른 抵抗값 變化를 測定하므로서 稼動時間에 따른 固定子의 溫度上昇값을 測定하였다.

5) 入力電力과 動力計로 測定한 出力을 比較함으로써 效率을 算出하였다.

4.3 實驗結果 및 分析

實驗結果를 分析하여 그림3~14에 나타냈다. 그림에 나타낸 理論値는 式(3-43), (3-46)에 表1의 諸 物理定數를 넣어 電算處理하여 얻은 값이다. 그리고 理論値와 實測値의 差異는 試作機의 材料와 部品의 質과도 關係가 있을 것으로 짐작된다. 그림3~5에서 電壓上昇에 따라 推力, 電流, 速度가 上昇하는 것은 一般 誘導電動機의 特性과 類似하며, 그림5에서 速度는 極數에 反比例하는 것이 타당하나 低電壓下에서는 1次電流密度의 增加率이 6極에서 보다 2極일때가 작고 空隙磁束密度 增加分中

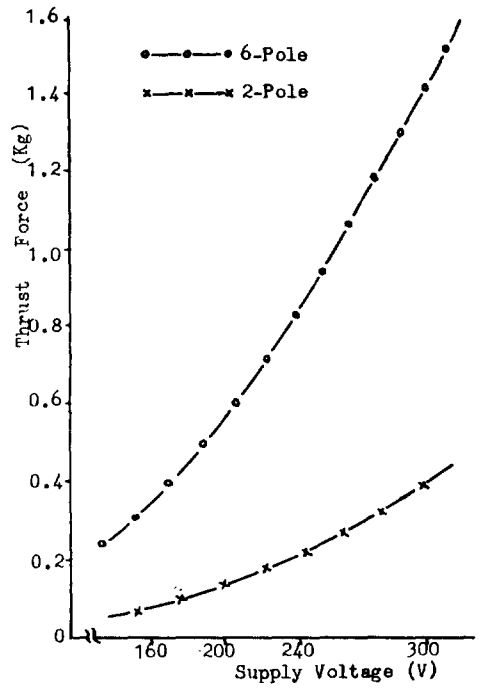


그림 3. 전압대추력
Fig.4. Thrust force vs. voltage.

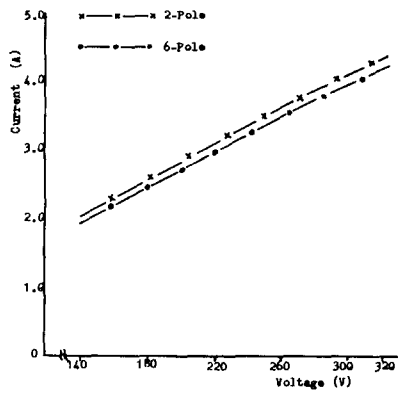


그림 4. 전압 대전류
Fig.4. Current vs. voltage.

2次를 鎖交하는 磁束보다 漏洩磁束分의 比가 큰即 等價리악턴스가 크기 때문에 極數가 작을 때 速度가 늦을 수 있다고 分析된다. 이것은 定面電流密度에서 6極의 力率이 2極보다 좋은 그림6과 定面電流密度에서 空隙磁束密度가 2極보다 6極의 경우가 큰 그림7에서 立證된다.

한편 試作機가 2極機로 試驗하기가 不適當함을 推測할 수 있다. 따라서 그림8에서 實測이 不可能한 部分은 電算處理한 理論値로 推定하였으며, 印加電壓을 變化시켜가며 速度를 測定하여 逆算하므로서 스립과 推力關係를 確認하였다.

空隙磁束이 一定할 때 移動子電流는 스립에 比例함을 그림9에서 알 수 있으며 力率이 60% 程度임을 그림10에서 알 수 있는데 이는 지금까지 硏究되고 있는 直線誘導電動機보다 좋고 負荷抵抗이 스립에 反比例하기 때문에 力率도 스립에 反比例함을알 수 있다. 그림11에서 效率이 40%程度를 얻을수있으며 스립 $\frac{1}{2}$에서 最大가 됨은 直線誘導電動機의特性과 類似하다. 그림12에서 入口端보다 出口端의 空隙磁束密度가 큰 것은 直線誘導電動機보다는 작지만 端部效界가 存在함을 意味하는 것으로 작은 理由는 低速

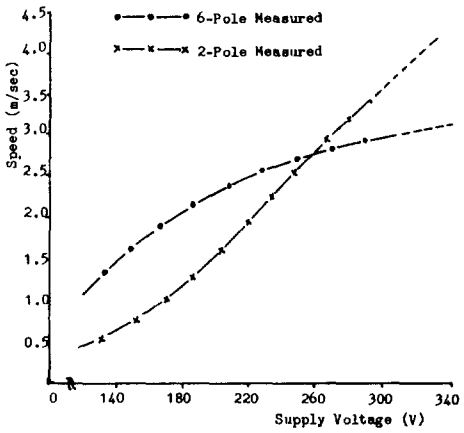


그림 5. 전압 대속도
Fig.5. Speed. vs. voltage.

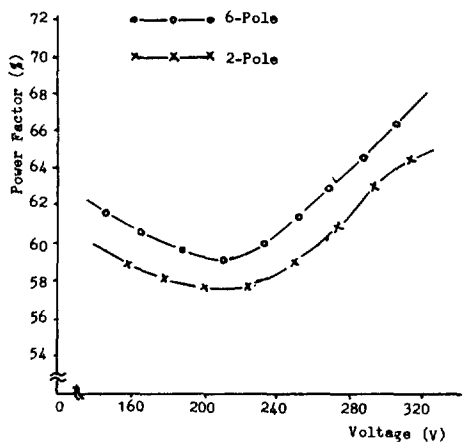


그림 6. 전압 대역률
Fig.6. Power factor vs. voltage.

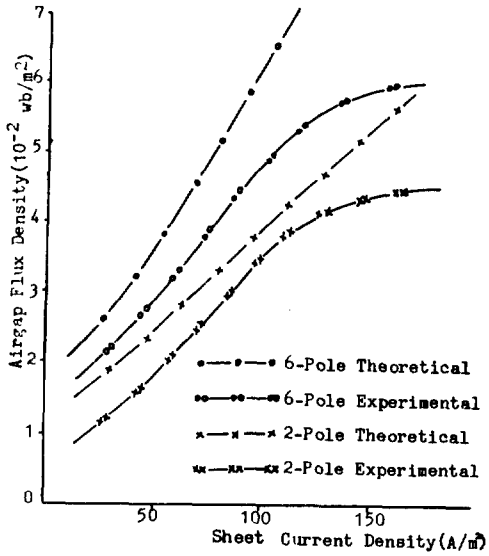


그림 7. 면전류밀도 대 공극자속 밀도
Fig.7. Airgap fllux density vs. sheet current density.

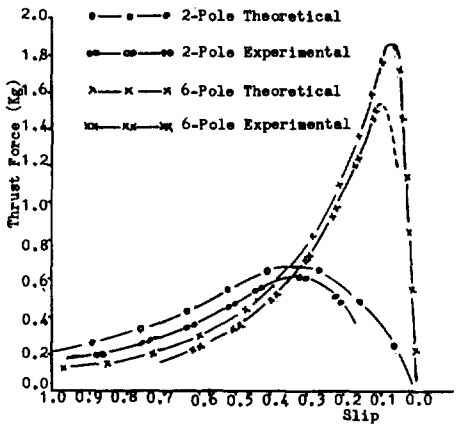


그림 8. 슬립 대 추력
Fig.8. Thrust force vs. slip.

運轉狀態에서 測定한 것이고 構造上으로 磁氣回路가 無端이며 圓筒形으로 되어 있어 橫稜効果(transverse edge effect)가 없기 때문으로 推測된다. 그림13에서 알수 있는 것처럼 稼動時間에 따른 溫度上昇은 損失熱의 放散이 잘 되지않음을 나타내므로 冷却方式이 함께 隨行되어야 할 것으로 判斷된다. 그림14에서 印加電壓이 높을 때 可逆時間이 짧은 것은 發生推力이 電壓에 比例하므로 逆推力도 마찬가지로 發生함을 나타내며 이는 그림3의 타당성을 立證하는 것이다.

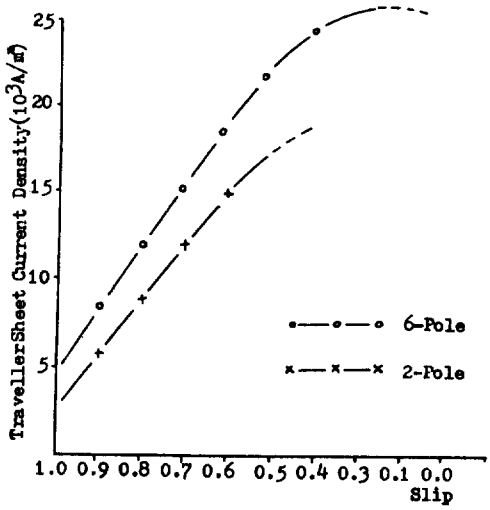


그림9. 슬립 대 이동 자연전류밀도
Fig.9. Traveller sheet current density vs. slip.

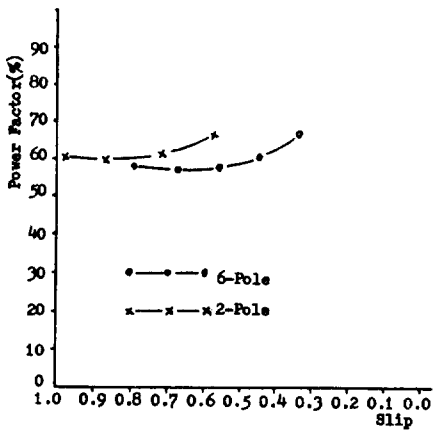


그림10. 슬립 대 역률
Fig.10. Power factor vs. slip.

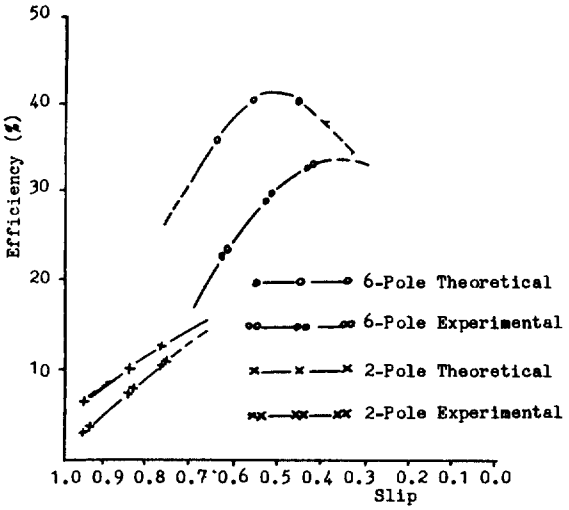


그림11. 슬립 대 효율
Fig.11. Efficiency vs. slip.

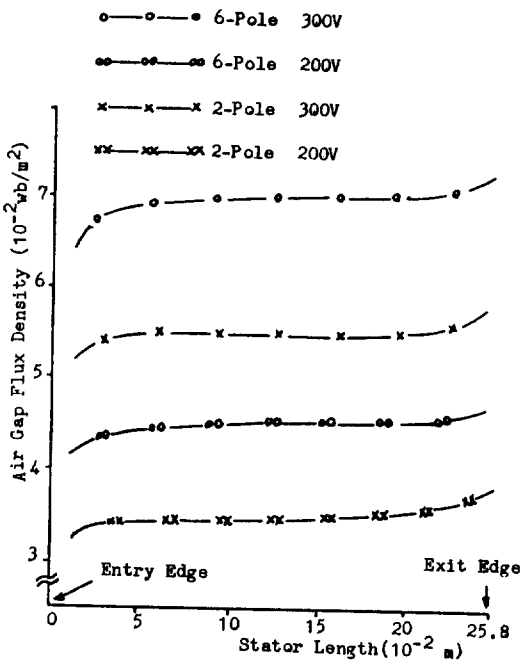


그림12. 공극자속밀도 분포.
Fig.12. Airgap flux-density distribution.

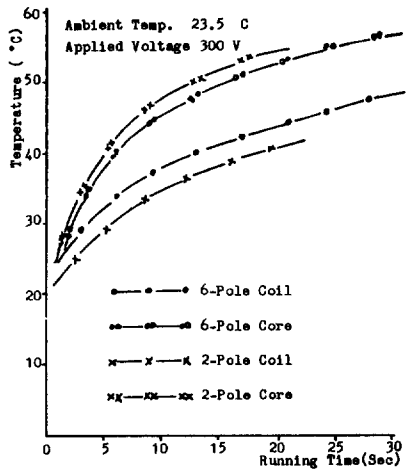


그림13. 이동 대 온도

Fig.13. Temperature vs. running time.

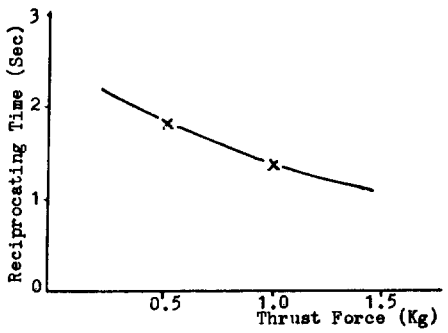


그림14. 추력 대 왕복시간

Fig.14. Reciprocating time vs. thrust force.

5. 結 論

開發되고 있는 直線推力電動機의 缺點을 補完하기 위해 새로운 形態를 考案하고, 이를 任意의 仕樣으로 設計試作하여 電磁場理論을 基盤으로 特性을 解析하였다. 圓筒座標系를 適用하여 移動子電流와 推力을 구하는 理論式을 定立하였으며 設計製作한 試作機에 適用해본 結果 實驗値에 接近함을 確認할 수 있어 理論式의 타당함을 確認할 수 있었다.

本 研究에서 提案한 電動機가

1) 極數에 比例하여 力率이 좋아지고 推力이 上昇하며

2) 端部効果는 있으나 横稜効果는 없고

3) 印加電壓制御로 速度, 電流密度, 空隙磁束密度, 推力等이 制御됨을 알 수 있었다.

이상의 研究結果에서 얻어진 特性解析法을 적용하므로서 指定仕樣의 最適設計 理論을 導出할 수 있을 것으로 생각되며 앞으로 正確한 端部効果, 發生熱等을 解析하고, 可逆作用을 위한 運動方程式의 樹立, 冷却方法, 製作方法等을 繼續的으로 研究해야 한다고 생각한다.

參考文獻

1) Nasar S.A., Boldea I., "Linear Motion Electric Machines" (book), John Wiley & Sons, Inc., 1976.

2) Laithwaite E.R., "Linear Electric Machines - A Personal View", Proc. IEEE, Vol.83, No.2, pp.251-290, Feb., 1975.

3) Yamamura S., "Theory of Linear Induction Motors 2nd", (book) University of Tokyo Press, 1978.

4) Poloujadoff M., "The Theory of Linear Induction Machinery", (book) Clarendon Press, London, 1980.

5) 임달호, 이은웅, 장석명, "단부효과를 고려한 Linear Induction Motor의 동특성해석(I)", 대한전기학회지, Vol.31, No.4, pp.52-59, Apr., 1982.

6) Bolton H., "Transverse Edge-Effect in Sheet-Rotor Induction Motors", Proc.IEE, Vol.116, No.5, pp.725-731, May.1969.

7) Ooi B.T., "A Generalized Machine Theory of the Linear Induction Motor", IEEE, Trans. Paper T73-130-2, Winter Power Meeting, 1973.

8) Laithwaite E.R., "Oscillating Machines, Synchronous and Asynchronous", Proc.IEE, Paper No. 3955, pp.411-414, Oct.1962.

9) Green C.W., Paus R.J.A., "Application of DC Linear Machines as Short-stroke and Static Actuator", Proc.IEE, Vol.116, No.4, pp.599-604, Apr., 1969.

10) 内海達見 "圓筒形誘導電磁ポソプの 解析", JIEE, Vol.98, No.53-88, 99.9-16, Aug., 1978.

11) 鹿野決男, 古幡情司, "圓筒形單相誘導電磁流體ポソプ", JIEE, Vol.96-98, No.51-349, pp.17-22, Aug., 1976.

12) Convert E.E., Boedeker L.R., Haodeman C.W., "Recent Results of Studies of The Travelling Wave pump", AIAA Journal, Vol.2, No.6, pp.1040, June.,1964.

13) 임달호, 이은웅, 장석명, "Tubular Motor 의 특성에관한연구", 대한전기학회지, Vol.28, No.3, pp.72-77,

Mar.,1979.

14) Davis M.W., "Development of Concentric Linear Induction Motor", Trans, IEEE, Vol.91, No.4, pp. 1506–1513, 1972.

15) Eastharn J.F., Alwash J.H., "Transverse–Flux Tubular Motors", Proc,IEE., Vol.111, No.6, pp.1123–1131, June 1964.

16) Bleys C.A., Demonchy M., & Rioux C., "Evaluation of The Electrical Performance of Cylinderical Solid Conducting Rotor, Asynchronous Machines using Fourier Analysis to Determine the Internal Magnetic Field Distribution", Electric Machine & Power System, Vol.7, pp. 357–367, 1982.

17) Saleh M.A., Ali S.M., Sakr M.F., "Electric Tubular Motor with Composite Rotor", Electric Machines & Electromechanics, Vol.4, No.1, pp.47–57, 1979.

18) Saleh M.A., Ali S.M., Fahim A.A., "Numerical Analysis of Tubular Induction Motor with Composite Rotor", Electric Machines & Electromechanics, Vol.4, No.2–3, pp.101–111, 1979.

19) Zagirnyak M.V., Pai R.M., Nasar S.A., "Analysis of Tubular Linear Induction Motor, Using the Concept of Surface Impedance",IEEE, Trans., Vol. MAC 21, No.4, pp.1310–1313, 1985.

20) Laithwaite E.R., Eastharn J.F., Bolton H.R., "Linear Motors with Transverse Flux", Proc.IEE, Vol.118, No.112, pp.1761–1767, Dec.1971.

21) Lloyd E.A., "Impedance of Long Solenoids with Nonferrous Tubular Core", Proc,IEE, Vol.114, No. 4, pp.533–536, Apr., 1967.

22) Reitz J.R., Hilford F.J., Christy R.W., "Foundation of Electromagnetic Theory 3rd", (book), Addison Wesley Inc., pp.201–204, 1979.