

특수설비용 단상 정전모터의 제작 및 특성 해석

(Manufacture and Characteristic Analysis of Single Phase
Electrostatic Motor for Special Equipment)

김광일*

(Kwang-il Kim)

요 약

정전 모-터는 일반적으로 분극전하와 전계의 상호작용을 이용한 것으로서 전계내에 축적되는 전계에너지($W = 1/2 * ED$)의 힘을 기계적 출력으로 도출하여 이용하는 것이다.

본 논문에서는 유한 요소법을 사용하여 단상 정전 모터의 전계와 등전위분포 및 미소한 토크를 시뮬레이션을 통하여 구하고 해석하였다. 그 결과 이 모터는 특성상 정전, 역전이 가능하고 고전압에서 응용이 가능하므로 특수기의 서어보모터로 쓸 수 있겠고, 설비중 고압으로 인한 위험이 따르는 곳의 안전예고기, 고전압계, 위상 판별기로도 사용이 가능할 것으로 기대된다.

Abstract

Electrostatic motors utilize generally an interaction between the polarization charges and the electric fields. The electrostatic energy ($W = 1/2ED$) stored in the electric fields converts to the forces of the motor as a mechanical output. Electric field, equipotential distribution and torque characteristics of the single phase electrostatic motor were analyzed through computer simulations by using a finite element method in this paper.

As a result, this motor can be used as a servomotor, high voltage measurement and a phase meter in special equipments, because it can be operated forward and backward.

1. 서 론

최근에 産業技術의 進歩에 따라 모든 機械 器具가

精密性和 招小型化로 되어가고 있는 趨勢에 있는 만큼^{1), 2), 3)} 小型特殊모터의 발전에 포인트를 두고 생각한 것이 정전 motor이다. 이 靜電 모터는 1842년 Andrew Gordon과 Erfurt에 의해 처음으로 제작되어 수 십년간 몇 종이 연구된 바가 있기는 하나⁴⁾ 5) 印加電壓이 매우 높고 Torque가 微弱했던 관계로

*정회원 : 경일대학교 전기공학과 교수
접수일자 : 1996. 9. 2

지금까지 實用化 되지 못하였다. 그러나 構造가 極히 간단하고 輕量이며 極小型으로 製作이 가능한 利點이 높기 評價되어 最近 일본을 위시한 여러나라에서 새롭게 研究됨이 일어 나고 있다. 이 전계 에너지형 Motor는 靜電 Motor 혹은 誘電 Motor라 부르고 있는데 주로 회전 자계식과 같은 개념으로 회전 전계나 이동 전계내에 유전체로된 회전체를 두어 정전 유도 작용으로 회전시키는 원리가 주된 것이었다. 본 연구는 전계분포를 공간적으로 균일하게 하고 고정자 전극배치를 편심으로 하여 회전자가 Maxwell응력으로 약한 전계에서 강한 전계로 흡인 회전토록 한 것이다. 또 이론적 전계해석으로 유한요소법 Program으로 직류전압에 대한 토크 계산을 하였다. 그러므로 본 연구는 변성기나 배울기를 사용하지않고 고압측정이나 고압설비 부분의 방재용 특수설비 부분의 동력장치로 사용 할 목적 하에 본 연구를 시행 하게되었으며, 응용분야로는 전력 설비 중 전기기기의 손상이나 뇌격등에 기인한 시설 파괴 위험이 따르는 곳의 안전예고기, 고전압계나 위상 판별기로도 사용이 가능할 것으로 기대된다.

2. 靜電 Motor 의 回轉原理

2.1 回轉 電界型

電磁型交流電動機에서의 回轉磁界와 같은 回轉電界는 그림 2.1과 같이 電極配置를 圓筒回轉子 주위에 설치하고 三相,二相,單相 交流電壓을 印加하면 發生한다.

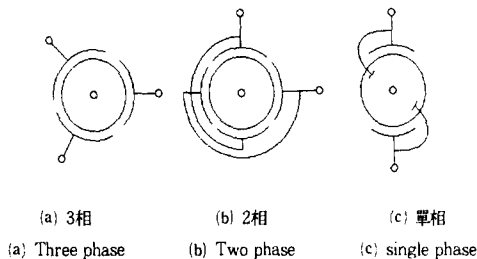


그림 2.1 靜電모터의 構造圖
 Fig. 2.1 Configuration of various electrostatic motor.

이와 같은 回轉電界가 發生하면 두 誘電體 境界面의 分極 界面電荷密度는

$$\sigma = \frac{Q_2 - Q_1}{s} = \frac{\epsilon_2 \rho_2 - \epsilon_1 \rho_1}{\rho_1 d_1 + \rho_2 d_2} E \quad (2.1)$$

여기서 Q_1, Q_2 는 두 유전체의 분극전하이고 S 는 전극의 면적이다. 誘電體의 比抵抗은 印加電壓에 따라 변하게 되지만 印加電壓이 일정하면 誘電率 ϵ_1, ϵ_2 는 일정하다. 그러므로 印加電壓의 크기에 따라 식 2.1의 分子에서 界面 分極電荷는 $\epsilon_2 \rho_2 > \epsilon_1 \rho_1$ 이면 正電荷, $\epsilon_2 \rho_2 < \epsilon_1 \rho_1$ 이면 負電荷로 되며 $\epsilon_2 \rho_2 = \epsilon_1 \rho_1$ 일 때는 分極 σ 는 發生치 않는다.^{2), 6)} 따라서 상대 電極의 電荷와 同種 혹은 異種의 電荷가 誘電體인 回轉體의 表面에 생겨 電極과 回轉體의 電荷가 서로 吸引 또는 反撥의 Coulomb力을 發生하여, 正 혹은 逆回轉을 한다.⁶⁾

2.2 不平等 電界型

偏心電極을 回轉子 주위에 配置 했을 때 誘電體界面(回轉子 表面)에 垂直인 電界가 가하여지면 界面과 電界가 垂直이라 할 수 있으므로 電界와 平行方向의 MAXWELL의 引張力이 생긴다.⁷⁾ 誘電體의 誘電率을 ϵ_1 , 空氣의 誘電率을 ϵ_0 라 할 때 界面에서의 인장력의 差는 $\epsilon_1 > \epsilon_0$ 이므로 그림 2.2에서 보는바와 같이 電極兩端에는 回轉子 表面에서 半徑方向으로 각각 F_{n1}, F_{n2} 의 힘을 받는다.

$$F_{n1} = 1/2(1/\epsilon_1 - 1/\epsilon_0)D_1^2$$

$$F_{n2} = 1/2(1/\epsilon_2 - 1/\epsilon_0)D_2^2 \quad (2.2)$$

단, D_1, D_2 는 gap大 와 gap小인 點의 電束密度이고 또 식 2.2에서 gap길이의 長短으로 인하여 $D_1 > D_2$ 이다. 따라서 $F_{n1} > F_{n2}$ 가 된다.

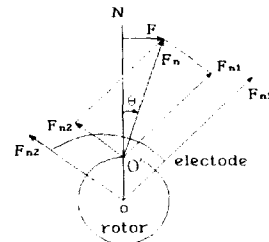


그림 2.2 靜電型 電動機의 回轉原理圖
 Fig. 2.2 A Principle of rotation of the electrostatic motor

이 두 힘의 합력 $F_n = F_{n1} + F_{n2}$ 는 oN선과 時計方向으로 $\angle\theta$ 를 이룬다. 따라서 回轉子 表面 o' 점에서 接線 分力 F가 생기고 이로 인하여 回轉體는 電界가 큰쪽(空際가 적은 쪽)으로 吸引이 된다. 따라서 이들의 합력 F_n 는 $F_n = F_{n1} + F_{n2}$ 가 되고 法線 N에서 θ 만큼 小 空際 쪽으로 移動된다. 따라서 힘은 $F_{n1} > F_{n2}$ 로 되어 F인 회살표 방향(時計方向)으로 回轉 하게된다.^{8), 9)}

3. 特性實驗

3.1 特性 實驗條件

特性을 살펴 보기 위하여 다음과 같이 試作品을 製作하여 實驗하였다. 本 靜電型 電動機의 試作品은 플라스틱(plastic), 베크라이트(bakelite), 合成樹脂 등을 回轉子로하고 軸은 鋼鐵材로 堅軸型으로 했으며 電極은 주석 아연판, 端子는 구리아연봉을 使用하였다. 프레임(frame) 材料는 베크라이트(bakelite)를 使用하였다. 이들의 試작품의 모형도를 살펴 보면 그림 3.1과 같고, 製원표는 표 3.1과 같다.

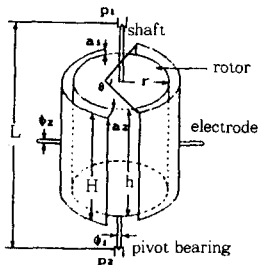


그림 3.1 試料模型
Fig. 3.1 Testing model

3.2 實驗裝置

이 形態의 不平等 電界型 誘電모터의 구동 電源으로는 AC 혹은 DC 電源으로도 可能하나 有限要素法에 의한 解析의 편의를 위하여 DC 高壓電源을 使用하였으며, 이는 日本 PULSE사의 것을 使用하였고 正極性 直流 高壓發生裝置로서 入力電壓 單相 200[V], 出力電壓 ± 100 [kV], 出力 電流 5[mA], Ripple 5[%]이다.

표 3.1 諸元表

Table 3.1 Specification

명 칭	기호	치 수	재 료
축 길 이	L	150 [mm]	강 철 봉
축 직 경	ϕ_1	2.6 [mm]	pivot bearing
상 축 받 이	p ₁		구리아연
하 축 받 이	p ₂		주석아연
극 단자 직경	ϕ_2	5 [mm]	
극 세로 길이	H	50 [mm]	
극 가로 길이	l	30 [mm]	
편심 극 반경	R	16.7 [mm]	
극의 편심각	θ	92 도	
좁은 공극	a ₁	2 [mm]	
넓은 공극	a ₂	4 [mm]	
회전자 반경	r	15 [mm]	폴리에틸렌 베이크라이트
회전자 길이	h	50 [mm]	
회전자 무게	W	6 [gr]	

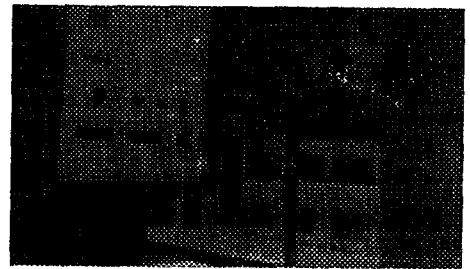


사진 1. 실험장치
Photo1. Device for experiment

여기서 諸般特性은 다음과 같다. 시험 방법은 單捲變壓器의 一次電壓을 서서히 上昇시키며 主變壓器 2차 電壓을 1,000[V]를 單位로 하여 회전자의 회전수를 光電式 回轉計(Tachometer)로 速度를 測定했으며 사진 1은 실험 장치를 나타낸 것이다. 實驗에서 回轉子는 유전율 $\epsilon_r = 2.7$ 과 $\epsilon_r = 3.2$ 에 대해서 행하였다. 편심 空際의 間隙은 最小 間隙을 2[mm]로 固定 하고 最大 間隙을 4[mm], 6[mm] 및 8[mm]로 하였는데 이 경우 대략 10~12[kV] 附近에서 起動을 시작하였고, 26[kV]以上에서는 Arc放電이 생겨 測定이 不可能 하였다. 이때의 測定當時 溫度는 20℃이고 濕度는 68[%]이었다.

4. 實驗 結果

4.1 토오크 계산법 및 컴퓨터 시뮬레이션

Poisson 방정식에 의한 정전계의 지배방정식($\nabla \cdot (\epsilon \nabla \varphi) = -\rho$)에 대한 에너지汎函數(Energy Functional)를

$$\chi = \iiint_V \{ \nabla \cdot (\epsilon \nabla \varphi) + \rho \} dv \quad (4.1)$$

라 하자.¹⁰⁾ 지배방정식의 解를 變分原理를 利用하여 求하기 위해서, 식 (4.1)에 變分 $\delta\varphi$ 를 곱하고 全領域 R에 대하여 積分한 것을 χ 라 하면

$$\delta\chi = \iint_R \{ \nabla \cdot (\epsilon \nabla \varphi) \cdot \delta\varphi + \rho \cdot \delta\varphi \} dxdy = 0 \quad (4.2)$$

이 되고, 벡터(vector) 항등식을 이용하여 식 (4.2)를 정리하면,

$$\delta\chi = \iint_R \epsilon \nabla \cdot (\delta\varphi \nabla \varphi) dxdy - \iint_R \epsilon \nabla \cdot (\delta\varphi) \nabla \varphi dxdy + \iint_R \rho \cdot \delta\varphi dxdy \quad (4.3)$$

이 되며, 식 4.3의 右邊 첫 번째 항은 Green의 定理로부터

$$\iint_R \epsilon \nabla \cdot (\delta\varphi \nabla \varphi) dxdy = \int r \epsilon (\delta\varphi \nabla \varphi) n d\Gamma \quad (4.4)$$

로 된다. 여기서 Γ 는 全體領域의 境界이고, n 은 境界에 垂直인 單位벡터이다. 式 4.3의 右邊 두번째 항을 變分の 性質을 이용하여 간단히 하면,

$$\iint_R \epsilon \nabla \cdot (\delta\varphi) \nabla \varphi = \iint_R \epsilon \frac{1}{2} \delta(\nabla \varphi)^2 dxdy \quad (4.5)$$

로 되며, 식 4.4와 식 4.5로부터 식 4.2를 定理하면

$$\delta\chi = \int r \epsilon (\delta\varphi \nabla \varphi) n d\Gamma - \iint_R \epsilon \frac{1}{2} \delta(\nabla \varphi)^2 dxdy + \iint_R \rho \cdot \delta\varphi dxdy = 0 \quad (4.6)$$

이 된다.

식 4.6에서 φ 가 定數, 또는 $\frac{\partial \chi}{\partial n} = 0$ 을 만족시키도록 境界를 잡으면 右邊의 첫 번째 항은 零이 된다. 따라서 에너지汎函數 χ 는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \chi &= \iint_R \epsilon \frac{1}{2} \delta(\nabla \varphi)^2 dxdy - \iint_R \rho \varphi dxdy \\ &= \iint_R \epsilon \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \right\} dxdy - \iint_R \rho \cdot \delta\varphi dxdy \end{aligned} \quad (4.7)$$

식 4.7의 에너지汎函數를 最小로 하는 條件인

$$\frac{\partial \chi}{\partial \varphi_e} = \sum \frac{\partial \chi^{(e)}}{\partial \varphi_e} = 0 \quad (4.8)$$

으로부터 未知의 스칼라 포텐셜이 구해진다.^{10), 11)}

回轉子에 作用하는 토오크를 구하기 위해서는 回轉子を 둘러싸고 있는 각 要素에 대한 토오크를 구해서 그것의 合으로 全體 토오크를 求한다.

그러므로 한 要素에 대한 推력 $\Delta F^{(e)}$ 는

$$\begin{aligned} \Delta F^{(e)} &= P \Delta S^{(e)} \\ &= \frac{\epsilon_0 \Delta S^{(e)}}{2} \{ (2n_x E_x + 2n_y E_y) (E_x i + E_y j) \\ &\quad - (E_x^2 + E_y^2) (n_x i + n_y j) \} \\ &= \frac{\epsilon_0 l \frac{d l}{2}}{2} (F_x i + F_y j) \end{aligned} \quad (4.9)$$

이고, 여기서 P 는 표면 應력이다. 한 要素에서의 토오크 $\Delta T^{(e)}$ 의 값은 位置벡터 r 과 電氣力 $\Delta F^{(e)}$ 의 벡터의 乘積으로부터 求해지며 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \Delta T^{(e)} &= r \times P \Delta S^{(e)} \\ &= \frac{\epsilon_0 l \frac{d l}{2}}{2} (r_x F_y - r_y F_x) k \\ &= \frac{\epsilon_0 l \frac{d l}{2}}{2} (T_x - T_y) k \end{aligned} \quad (4.10)$$

그러므로 全體 토오크 T 는

$$T = \sum_{e=1}^m \Delta T^{(e)} \quad (4.11)$$

와 같이 表現되며, 여기서 m 은 積分面 S 와 交叉하는 要素수이다.

有限要素법으로 電界의 세기를 구하고, 맥스웰 應力法으로 空隙要素에서의 토오크를 計算 하였다. 그림 4.1은 靜電 모-터에 있어 토오크 發生時의 要素分割圖이며, 정전 모-터의 전체를 모델로 한 것이다.

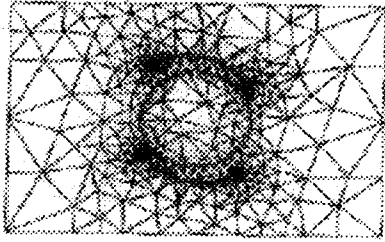


그림 4.1 Torque發生 要素分割圖
Fig. 4.1 Element mesh for developing torque

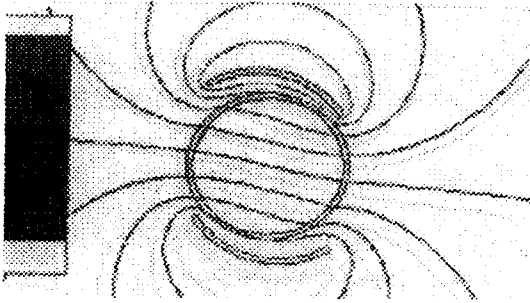


그림 4.2 Torque發生 等電位分布圖
Fig. 4.2 Equipotential distribution chart for developing torque

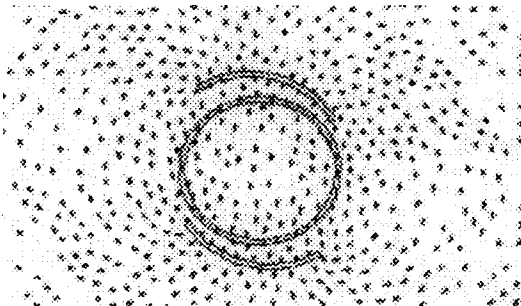


그림 4.3 電界 Vector圖
Fig. 4.3 Electric field vector mapping

電極과 회전자 사이의 空腔要素에서 電界의 세기가 가장 심하게 변하므로 토오르크의 計算 誤差를 줄이기 위해 電極과 회전자 사이의 空腔要素에서의 要素數를 현저히 增加시켰다.

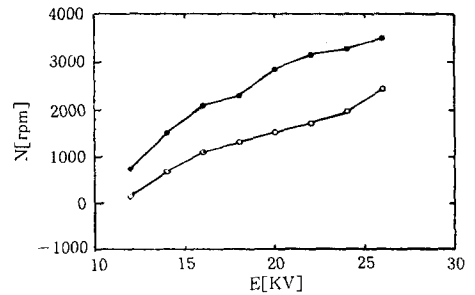
그림 4.2는 靜電 모-터의 全 領域에 가해지는 電界의 形成 分布를 有限要素法에 의한 컴퓨터 프로그램으로 구해낸 것을 나타내고 있음을 보여 준 것이며, 平等 電界로서 循環하는 分布임을 알수 있다.

그림 4.3은 電界 Vector도를 나타낸다. 모든 境界에서의 境界條件은 Neumann境界條件으로 近似化

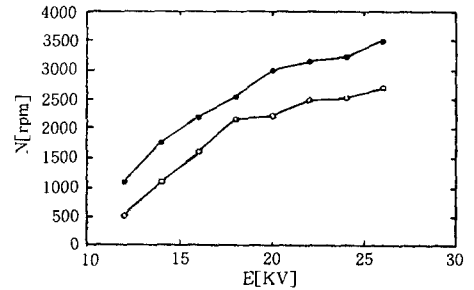
하였다.

4.2 電界解析과 Torque 特性

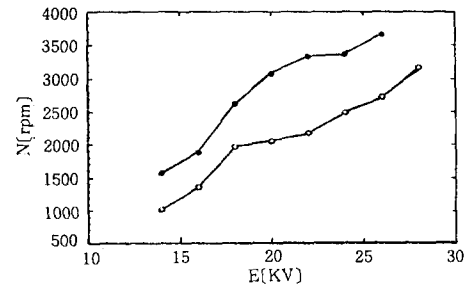
전계에 의한 제반 특성은 다음과 같다. 그림 4.4는 전압과 속도 관계를 나타낸 것이다. 따라서 그림 4.4의 (a)(b)(c)에서 電壓에 따라 速度의 變化가 난이한 것은 축받이의 不均一性 및 比精密性 때문일 것으로 보여진다. 그림 (a)는 편심에 의한 공극의 간극 변화를 전압-회전수 특성에 대하여 조사 하였으며



(a) 試料模型 B-1, P-1



(b) 試料模型 B-2, p-2



(c) 試料模型 B-3, P-3

그림 4.4 電壓-速度 特性
Fig. 4.4 Characteristics of speed and voltage

그림 (b)는 좁은 空腔 2[mm]를 Constant로 하고, 넓은 空腔을 4[mm]기점으로 2[mm]를 키워 6[mm]로

한 경우인데, 이것 또한 12[kV]에서 起動했고 다 같이 26[kV]에서 Arc 放電이 생겼다.

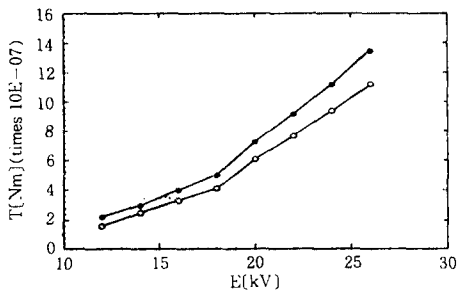
그리고 그림 (c)는 좁은空隙 2[mm]와 넓은空隙 8 [mm]로 한 경우를 나타내며 起動 電壓은 높은 반면 速度는 대단히 빨랐으며 28[kV]에서 短落 되었다. 그림내의 ○ 점은 유전율 $\epsilon=2.7$ 이고 ● 점은 $\epsilon=3.2$ 의 경우이다.

Maxwell 2D program에 의한 인가전압-Torque 특성은 그림 4.5와 같다. 이에 따라 實驗한 模型은 誘電體 재질과 조합하여 총 6가지로 구분되며 이를 표 4.1과 같이 命名 한다.

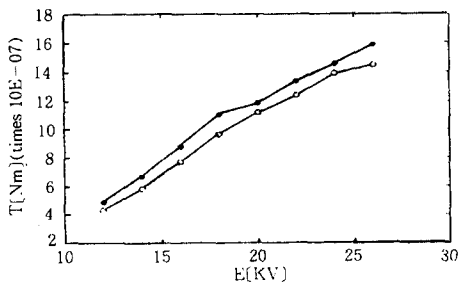
그림 4.5 (a)는 모형 B-1, P-1 및 (b)는 模型 B-2, P-2의 電壓-回轉數 特性으로서 12[kV]에서 起動했고 26[kV]부근에서 arc 放電이 생겼다. 그리고 그림 (c)는 模型 B-3과 P-3의 電壓-回轉

표 4.1 試料模型
Table 4.1 Testing model

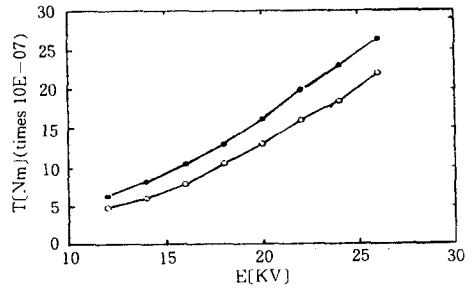
ϵ_r	최대간극	최대간극	최대간극
2.7	5 [mm]	6 [mm]	8 [mm]
3.2	P-1	P-2	P-3



(a) 試料模型 B-1, P-1



(b) 試料模型 B-2, P-2



(c) 試料模型 B-3, P-3

그림 4.5 電壓-Torque 특성
Fig. 4.5 Characteristics of Voltage and Torque

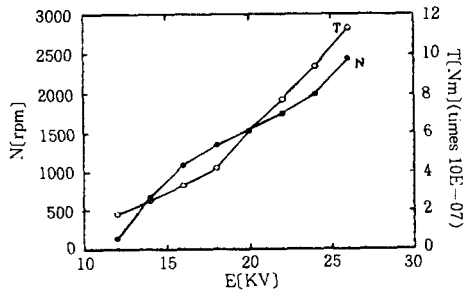
數 特性이고 약 14[kV]에서 起動 하였다.

그림 4.4의 電壓-速度特性이나 그림 4.5의 電壓-Torque特性은 모두 電壓증가에 따라 回轉數나 Torque가 增加하며 선형적이다.

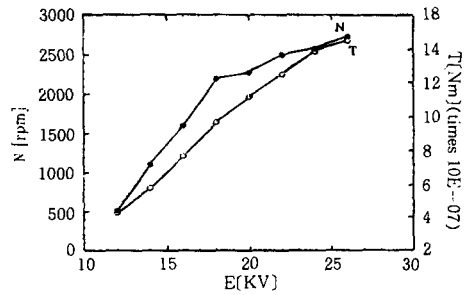
그러나, 電壓에 대한 回轉數 및 Torque의 增加 比率는 同一하지 않다. 이를 考察하기 위하여 그림 4.4와 그림 4.5를 同一平面에 圖示하면 그림 4.6과 같다.

그림 4.5에서 전압-Torque特性은 비교적 線形的이고 電壓-回轉數 特性은 어떤 電壓範圍까지는 線形的이나 飽和傾向이 있다. 한편 그림 4.6의 (a)와 (d) 特性에서 두 부분이 速度 또, 그림 4.8의 (a), (b)는 印加電壓이 14[kV], 16[kV]일 때보다 토크가 크게 나타났는데 이는 實驗중 축받이의 精密性 부족에서 오는 스트레스에 의한 순간적 속도 변화와 스트레스를 벗어날 때의 가속에 기인 한 것으로 생각한다.

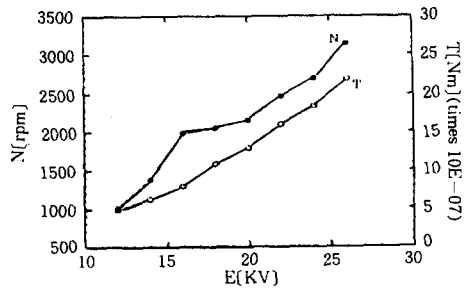
이들 나머지 특성들의 原因은 偏心電極의 傾斜에 따라 回轉數 및 電極傾斜에 대한 回轉數 및 Torque의 特性曲線을 求한 Torque의 一定시의 變化가 심한 것에 起因함이 아닌가 하여 印加電壓 것이 그림 4.7 (a), (b)와 그림 4.8의 (a), (b)이다. 그림 4.7의 (a), (b)는 Gap에 대한 回轉數特性으로 印加電壓은 각각 14[kV], 16[kV]일 때이다. 이들에서 空隙長 6[mm]일때 最大이면 이 以上の 偏心電極일 때는 回轉數는 減少된다. 이는 回轉數의 誘電率에 관계없이 같은 경향이다.의 電極의 變位角에 대한 Torque特性이므로, 變位角과 最大空隙長의 관계는 前述한 바와 같이 0°는 4[mm], 4°는 6[mm], 6°는 8[mm]에



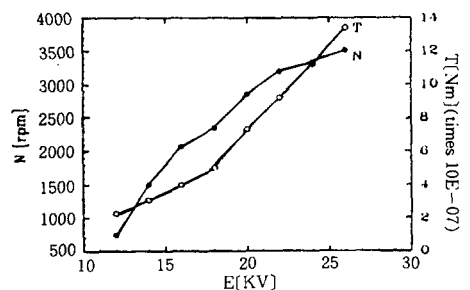
(a) 試料模型 B-1



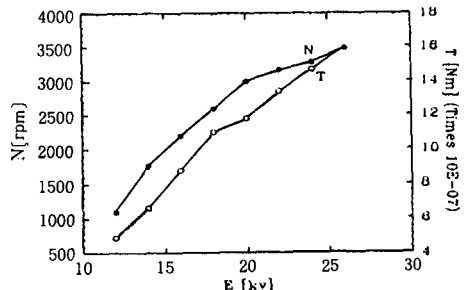
(b) 試料模型 B-2



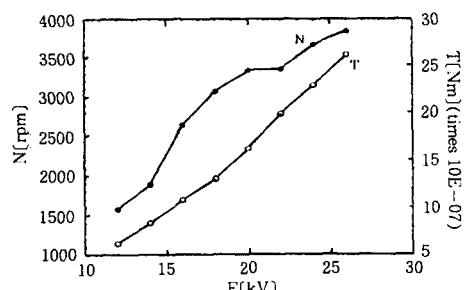
(c) 試料模型 B-3



(d) 試料模型 P-1



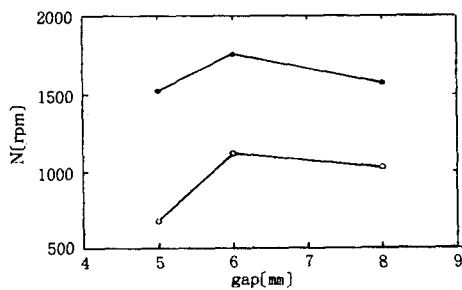
(e) 試料模型 P-2



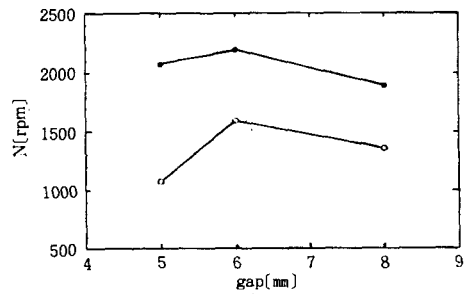
(f) 試料模型 P-3

그림 4.6 電壓 對 速度, Torque 特性

Fig. 4.6 Characteristic of Torque and Voltage on speed



(a) 14[kV] 경우



(b) 16[kV] 경우

그림 4.7 電壓 一定일 때 空隙長에 對한 速度特性

Fig. 4.7 Characteristic of Air gap and speed(voltage constant)

해당하는데 이 경우 Torque는 4°附近(空隙長 6

[mm])일 때 最大이며 이 이상 電極을 偏心으로 한

境遇는 Torque가 減少하였다.

이러한 원인은 電極을 偏心시키면 시킬 수록 電界의 不平等이 심하여 最大 空際長 附近의 電界가 減少됨에 起因하는 것이라 생각된다.

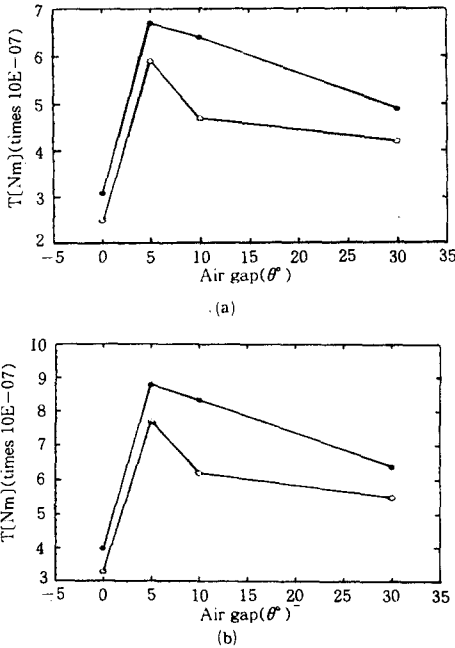


그림 4.8 電壓一定일 때 變位角에 대한 Torque特性
Fig. 4.8 Characteristic of Air gap and Torque.(Voltage constant)

5. 結論

以上과 같이 實驗 및 시뮬레이션을 통해 본 不平等電界型 정전모터는 電源은 直流, 交流 兩用이며, 特別한 裝置없이 交流單相電源으로 正轉 逆轉이 可能하다. 또, 逆回轉은 電極의 偏心을 逆으로 하면 된다. 電壓增加에 대한 回轉數 혹은 Torque는 다같이 선형임을 알 수 있으며, 變位角과 最大空際長의 관계는 前述한 바와 같이 0°는 4(mm), 4°는 6(mm), 6°는 8(mm)에 해당하는데 이 경우 Torque는 4°附近(空際長 6(mm))일 때가 最大이며 이 이상 電極을 偏心으로 한 境遇는 Torque가 減少한다. 그 이유는

電極을 偏心시키면 시킬 수록 電界의 不平等이 더 심하여 지고 最大 空際長 附近의 電界도 크게 減少되는 데 起因하는 것이라 생각된다. 단지 電壓 대 回轉數의 隱密한 關係식의 도출은 가일층의 精密 加工에 의한 裝置의 製作과 더 많은 特性調査가 要求되며 장차의 많은 형태의 정전모터 研究가 더 필요하다고 생각한다.

참고 문헌

- 1) 編輯室 “몸안으로 들어가는 마이크로 로봇”, 科學東亞 8月號, pp.98~101, 1990.
- 2) 秋山勇治: 小型特殊모터·日本電氣學會誌 112卷3, 平成 4年 pp.187~191.
- 3) 大崎: 特殊모터, 新原理 모터, 省力自動化(昭 60~11).
- 4) OLGЕ D. JEFIMENKO “ELECTROSTATIC MOTORS” ELECTRET SCIENTIFIC CO, 1973.
- 5) 堤 秀夫, 矢作吉之助 “強誘電體靜電型交流發電機의 基礎 研究”, 電氣學會雜誌, 昭和32年5月.
- 6) 加藤一郎: “實用性が期待されて靜電型プラスチック 回轉機” OHM雜誌, Vol.12, pp.26~29, 1960.
- 7) M. Marinescu and N. Marinescu, “Numerical Computation of Torques in Permanent Magnet Motors by Maxwell Stress and Energy Method,” IEEE Trans. on MAG, Vol. 24, No.1, pp.463~466, 1988.
- 8) 日本靜電氣學會編 “靜電氣ハントフブック”, オーム社, pp.651~652, 1981.
- 9) 岡 中田: 固體誘電體論, pp.64~146.
- 10) 任達鎬著: 電氣系의 有限要素法, 東明社, 1987.
- 11) S.R.H.Hoole, “On Finte Element Force Computation from Two and Three-Dimensional Magnetostatic

◇ 著者紹介 ◇



김 광 일(金光一)

1940년 9월 9일생. 1963년 한양대학교 공대 전기공학과 졸업. 1976년 8월 영남대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년 8월 영남대학교 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 경일대학교 공대 전기공학과 교수.