

논문 93-09

小型 靜電 誘導型 모터의 基礎 研究

文在德*, 李東勳**

A Basic Study on Miniature Size Electrostatic Induction Moter

Jae Duk Moon and Dong Hoon Lee

요 약

本 研究에서는 小型 靜電誘導型 모터를 제작하고 이 모터에 인가하는 3相 交流電壓 및 周波數를 可變하였을 때의 回轉子의 回轉速度의 特性을 실험적으로 검토하였다. 또한 靜電誘導型 모터의 作動機構上 回轉子 表層物質 및 內層物質의 表面抵抗率, 比誘電率 및 電荷緩和時定數를 變化시켜 回轉子 및 固定子 사이의 電界強度 및 回轉子 表面物質上의 表面誘起電荷의 分布 및 誘起速度를 變化시킴으로서 小型 靜電誘導型 모터의 회전자의 회전속도에 미치는 영향을 검토하였다. 實驗 結果, 回轉子 表層物質의 比誘電率, 表面抵抗率 및 電荷緩和時定數 및 內層物質의 比抵抗率이 모터의 回轉速度에 매우 큰 영향을 미침이 확인되었다. 또한 모터에 인가하는 3相 電源의 電壓 및 周波數도 모터의 回轉에 매우 큰 영향을 주며, 回轉速度는 印加電壓 및 周波數에 一次 比例하여 증가함을 보여주었다. 회전자의 表層物質이 BaTiO₃ 80% 內層物質이 Cu 일때 無負荷 最大速度는 4.5 kV, 220 Hz에서 5500 rpm이 얻어졌다.

Abstract

A miniature size electrostatic induction motor has been fabricated and studied with emphasis on the role of the surface resistivity, the relative dielectric constant and the charge relaxation time constant of the rotor surface materials and the rotor liner materials, which, however, control the surface charge induction and relaxation on the rotor material surface and the field intensity between the rotor and the stator of the motor.

It is found that the surface resistivity and/or the relative dielectric constant, and the charge relaxation time constant of the rotor surface material influenced significantly to motor speed controlled by the surface charge induction and relaxation on the rotor surface depending on the applied voltage and/or frequency changing. The resistivity of the rotor liner material is also found to be effected to the motor speed greatly by control of the field intensity between the rotor and the stator and of the surface charge distribution of the induced charge on the rotor.

As a result, a maximum no load rotor speed of the motor tested was about 5500 rpm at the applied voltage of 4.5 kV and the frequency of 220 Hz for the case of the rotor surface material of BaTiO₃ 80% in the resin binder layered on the copper-foil rotor liner material.

keywords : electrostatic induction motor(靜電誘導型모터), surface resistivity(表面抵抗率), dielectric constant(比誘電率), charge relaxation time constant(電荷緩和時定數), corona on-set(部分放電開始), surface material(表層物質), liner material(內層물질)

I. 序 論

- * 正會員 : 慶北大學校 電氣工學科
(Dept. of Elec. Eng., Kyungpook Nat'l Univ.)
- ** 正會員 : 釜山工業大學校 産業安全工學科
(Dept. of Industrial Safely Eng., Pusan Nat'l Univ. ofl Technology)
<접수일자 : 1993년 2월 27일>

靜電型 모터는 18~19세기에 걸쳐서 많은 研究가 시도되었으나 현재까지 실용에 이르지 못하는 못하고 있는 실정이다.^[1-3] 그러나, 1980年代에 들어 機械, 電氣

및 電子産業들의 技術向上과 半導體素子 및 部品의 全般의인 超小型化 趨勢와 silicon高集積素子製造技術과 微細構造操作技術(micromachining technology)이 크게 진전됨에 따라 超小型 모터의 開發이 크게 요구되고 있고, 1980年代 後半에 들어서는 靜電 마이크로모터가 大量生産性, 效率性, 消費電力의 極小性 등 종래의 磁氣型 모터가 갖지 못하는 극히 우수한 특성과 具現性을 가짐이 확인됨에 따라 많은 研究者들에 의해 폭넓게 研究가 수행되고 있는 실정이다.^[4-8]

한편, 靜電誘導型 모터의 回轉機構는 固定子에 인가되는 電源周波數에 따른 回轉子表層物質의 雙極子電荷의 遲延된 誘起(time-lag-induction of charge)에 의한 것으로, 回轉子表層의 電荷의 誘起密度, 誘起 및 緩和速度, 그리고 電荷의 分布 및 分散이 靜電誘導型 모터의 基本特性을 決定한다고 사료되기 때문에 이에 대한 實驗的 研究 檢討는 매우 必要한 실정이나 아직 國內外的으로 크게 研究되지 못한 실정이며,^[9-14] 다만, 이에 대한 이론적인 간단한 검토는 일부 발표된 바 있다.^[15]

본 論文은 小型 靜電誘導型 모터의 開發을 위한 基礎 研究로서, 비교적 제작이 용이한 cm 크기의 靜電誘導型 모터를 製作하고, 印加電壓 및 周波數 變化, 回轉子 材料内外의 表面抵抗率(surface and liner resistivity), 比誘電率 및 電荷緩和時定數의 變化가 試作된 靜電誘導型 모터의 回轉速度에 미치는 影響을 檢討한 研究結果이다.

II. 實驗 方法 및 實驗 裝置

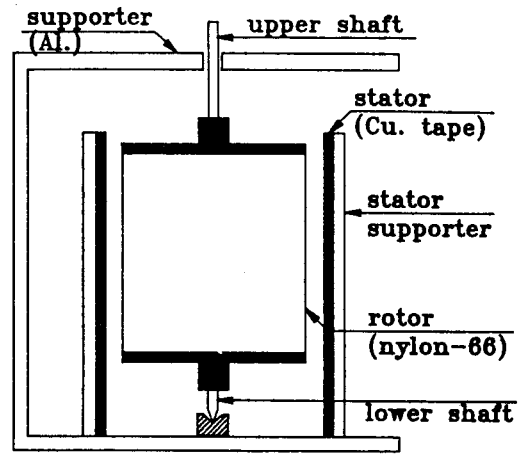
그림 1은 本 實驗에 사용한 靜電誘導型 모터의 外形概略圖 및 사진이다. 實驗 모터의 回轉子는 내부가 빈 絕緣圓筒型(nylon-66)으로 外徑은 25mm, 內徑이 23mm, 長이는 50mm로서 直徑 2mm의 金屬(stainless steel)의 軸으로 支持되어 있고, 質量은 10.00g, 慣性모우멘트(moment of inertia)는 식 (1)에 의거 約 14gcm²이다.

$$I = m/2[(d_{or}/2)^2 + (d_{ir}/2)^2] \tag{1}$$

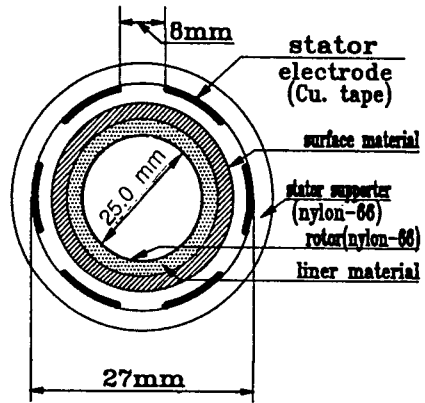
(여기서 m, l, d_{or}, d_{ir}은 표1을 참조)

또 모터의 固定子(nylon-66)는 圓筒型으로 内部直徑은 27mm, 長이는 60mm로서 内部表面(回轉子の 對向面)에는 導電性 테이프(copper tape, 7mm width,

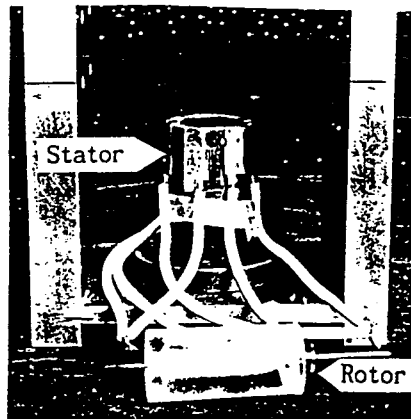
90μm thick)로서 6개의 固定電極이 回轉子表面과 對向하여 설정되어 있다.



(a) side view



(b) top view



(c) photograph

그림 1. 소형 정전유도형 모터의 개략도
Fig. 1. Schematic diagram and photograph of electrostatic induction motor fabricated.

固定子上的 인접 電極間의 間隔(interelectrode spacing)은 좁게 하는 것이 모터의 小型化 및 固定 電極數를 늘릴 수 있는 長點이 있으나, 너무 좁으면 印加電壓을 낮게해야 하는 문제점이 있다. 本 實驗에서는 固定子上的 인접 電極間의 間隔 設定을 위한 基礎實驗으로서 間隔이 7mm와 8mm인 경우의 I-V 特性을 測定한 結果 인접 電極間의 部分放電開始電壓이 약 5 kV임을 확인하고, 固定子 電極間의 間隔을 8mm, 最大印加電壓을 약 5 kV로 결정하여 실험했다. 또한 回轉子와 固定子사이의 空隙(air gap)은 토오크를 증가시키기 위해 가능한 한 적게 할수록 좋으나 固定子和 回轉子사이의 放電特性, 機械的인 製作의 精密性을 고려하여 本實驗에서는 1.0mm로 決定하여 實驗했다.

모터 驅動을 위한 印加電源裝置는 그림 2와 같이 구성하였으며, 3相 可變周波數 및 可變電壓裝置는 函數發生裝置(function generator)와 半導體 裝置를 사용하여 3相 可變電源을 만들고, 이를 高壓昇壓器(high voltage transformer)로서 可變 昇壓할 수 있도록 하였다. 이때 本 電源裝置의 출력과형은 상용의 교류전원과 동일하며, 다만 電壓은 최대 10 kV 까지, 周波數는 최대 1 kHz까지 가변 가능하게 하였다.^[11-12]

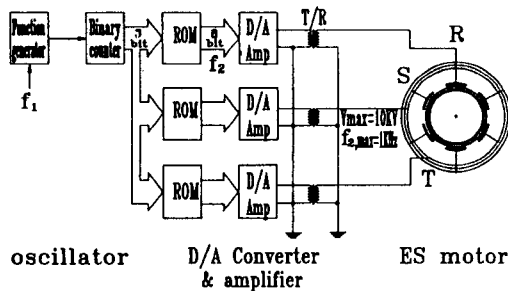


그림 2. 3상 가변전원장치의 개략도
 Fig. 2. Block diagram of 3 phase variable frequency and voltage power source.

표 1, 표 2 및 표 3은 각각 本 實驗을 위하여 제작된 모터의 상세한 諸元과 回轉子 表面物質의 電氣의 特性을 나타낸 것으로, 표 2는 回轉子 表面物質의 表面抵抗率의 變化를 위해서 polypropylence sheet (85 μm)를 基本物質로 하여 polypropylene, PP위에 titanium, Ti(Rare Metal Co., Japan, 4N)을 5Å, 그리고 nickel, Ni(Catayama Chemical Co., Japan, 4N)을 10 Å에서 20Å에서 50Å까지 眞空蒸着裝置(Anelva Co., Japan, EVD-500A)을 이용하여 증착한 回轉子 表面物

質의 電氣의 特性이다. 표 3에는 回轉子 表面物質의 比誘電率을 變化시키기 위하여 比誘電率이 매우 큰 BaTiO₃와 TiO₂(Aldrich Co., USA)을 10%에서 80%의 함유량별로 絶緣性結合劑(resin binder)와 混合해서 攪拌器로 약 800rpm에서 12時間 以上 교반한 잉크로 blade법에 의해 두께 약 20μm로 제작한 誘電體厚膜의 電氣의 特性을 나타냈다.

표 1. 製作된 靜電誘導型 모터의 諸元
 Table 1. Specifications of fabricated motor

specifications of motor tested	
air gap, g	1.0mm
outer diameter of rotor, d _{or}	25.0mm
inner diameter of rotor, d _{ir}	23.0mm
length of rotor, l _r	50.0mm
weight of rotor, m	10.0 g
surface area of rotor, s	98.2×10 ³ mm ²
diameter of stator, d _s	27.0mm
width of stator electrode, w	7.0mm
interelectrode spacing between stator electrode, t	8.0mm
number of pole, p	3
pole pitch, p _p	2
applied voltage to the motor tested, V	0~5100V
applied frequency to the motor tested, V	0~300Hz

표 2. 回轉子 表面物質의 電氣의 物性
 Table 2. Electric characteristics of rotor materials

surface materials of the rotor	surface resistivity ρ _s (Ω/□)	symbol	surface materials of the rotor	surface resistivity ρ _s (Ω/□)	symbol
polypropylene	8.5×10 ¹¹	PP	Ti 40Å vapour deposited on polypropylene	3.4×10 ⁹	Ti 40Å
Ti 5Å vapour deposited on polypropylene	4.3×10 ¹¹	Ti 5Å	Ti 50Å vapour deposited on polypropylene	2.6×10 ⁹	Ti 50Å
Ti 10Å vapour deposited on polypropylene	3.2×10 ¹¹	Ti 10Å	Ni 10Å vapour deposited on polypropylene	1.4×10 ⁸	NI 10Å
Ti 20Å vapour deposited on polypropylene	2.8×10 ¹¹	Ti 20Å	Ni 15Å vapour deposited on polypropylene	2×10 ⁶	NI 15Å
Ti 30Å vapour deposited on polypropylene	3.4×10 ¹⁰	Ti 30Å	Ni 20Å vapour deposited on polypropylene	2×10 ⁵	NI 20Å
copper tape	0	Cu			

표 3. 回轉子 表面物質의 電氣的 物性

Table 3. Electric characteristics of rotor materials

rotor materials	dielectric constant(ϵ_r) at 120 Hz	surface resistivity $\rho_s(\Omega/\square)$	relaxation time constant $\tau = \epsilon_0 \epsilon_r \rho_s$	symbol
Binder+ 10% TiO ₂	10.5	0.6×10^{12}	55.8	TiO ₂ 10%
Binder+ 20% TiO ₂	12.5	0.6×10^{12}	63.8	TiO ₂ 20%
Binder+ 30% TiO ₂	14.3	0.6×10^{12}	76.0	TiO ₂ 30%
Binder+ 50% TiO ₂	20.7	0.7×10^{12}	128.3	TiO ₂ 50%
Binder+ 70% TiO ₂	38.6	0.8×10^{12}	273.4	TiO ₂ 70%
Binder+ 10% BaTiO ₃	19.2	0.7×10^{12}	119.0	BaTiO ₃ 10%
Binder+ 20% BaTiO ₃	27.6	0.8×10^{12}	195.5	BaTiO ₃ 20%
Binder+ 30% BaTiO ₃	33.7	0.8×10^{12}	238.7	BaTiO ₃ 30%
Binder+ 40% BaTiO ₃	45.9	0.8×10^{12}	325.2	BaTiO ₃ 40%
Binder+ 50% BaTiO ₃	57.3	0.8×10^{12}	405.9	BaTiO ₃ 50%
Binder+ 60% BaTiO ₃	63.9	0.9×10^{12}	509.3	BaTiO ₃ 60%
Binder+ 70% BaTiO ₃	75.5	0.8×10^{12}	534.8	BaTiO ₃ 70%
Binder+ 80% BaTiO ₃	85.4	1.1×10^{12}	831.8	BaTiO ₃ 80%

本 實驗에서 적용한 表面抵抗率 (surface resistivity) ρ_s , 比誘電率(relative dielectric constant) ϵ_r 은 恒溫恒濕(20°C, 35% RH)이 되는 電磁遮蔽(electromagnetic shield room)에서 表面抵抗測定裝置(Hewlett Packard Co., USA, 4329A) 및 digital LCR meter (ED Engineering Co., Korea, EDC-1620)을 사용해서 直接測定하였다. [15-17] 電荷緩和時定數(charge relaxation time constant)는 식(2)을 사용하여 구하였으며, 여기서 ϵ_0 는 眞空中의 誘電率을 나타낸다.

$$\tau = \epsilon_0 \epsilon_r \rho_s \quad (2)$$

또한 모터의 回轉速度는 digital tachometer(Ono Sokki Co., Japan, HT-431)로 測定하였으며, 印加電壓 및 周波數는 高電壓測定器(HV probe, Keithley Co., England, 1600A), 電壓計(digital voltmeter) 및 오실로스코프(oscilloscope)를 이용하였다.

III. 實驗 結果 및 考察

그림 3은 靜電誘導型 모터의 動作機構上 가장 중요한 요인 중의 하나인 回轉子 表層物質(surface material)의 電荷誘起密度 및 誘起電荷時定數를 결정짓는 比誘電率이 靜電모터의 특성에 미치는 영향을 검토한 것이다. [12-15] 즉, 回轉子表層物質을 표 2 및 표 3에 보인 바와 같이 하며, 回轉子內層物質(liner material)은 Cu로 하고, 固定子電極에는 그림 2와 같이 제작된 3相 交流電壓 4500V를 固定印加하고 周波數만 可變하였을 때 10 種類의 回轉子 表層物質에 대한 回轉子의 回轉速度 n의 變化를 나타낸 것이다.

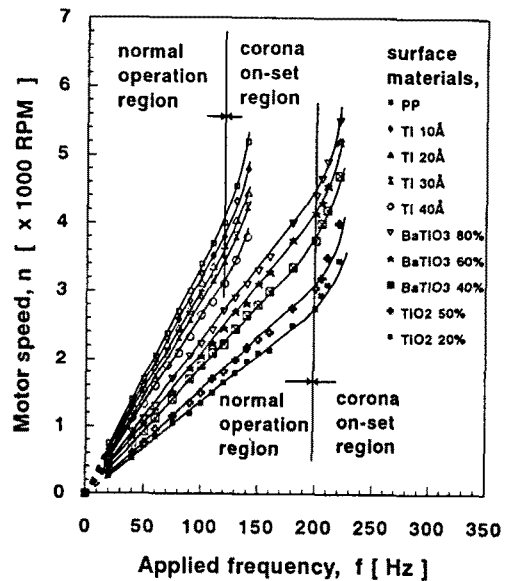


그림 3. 고정자에 인가한 3상 전압의 주파수 변화에 따른 회전자의 회전속도 (회전자 내층물질; Cu., V=4500V)
 Fig. 3. Motor speed as a function of different frequencies of applied voltage to stator. (liner material; Cu., V=4500V)

10 種類의 表層物質 모두의 回轉速度는 一定 電壓에서 電源周波數가 증가할수록 直線의으로 증가함을 보여준다, 周波數가 낮은 15Hz 以下에서는 회전하지만 불안정한 상태이고, 또 周波數가 높아지면 部分放電이 발생하여 回轉이 非正常狀態로 되는 것을 보여준다. 즉, 回轉子表層에 Ti를 眞空 증착한 경우는 印加周波數가 120Hz, BaTiO₃ 및 TiO₂ 粉末을 回轉子表層에

함유시킨 경우는 印加周波數가 200Hz를 넘으면 固定子和 回轉子 間隔내에서 部分放電이 發生하여 異常 高速回轉現象이 나타났다. 回轉子表層物質의 變化에 따른 最大回轉數는 回轉子表層에 BaTiO₃ 80%의 시편의 경우로서 V_p=4500V, f=200 Hz에서 약 5500 rpm을 나타내었다. 이는 固定子에 印加한 3相 交流電壓의 周波數의 增加에 따른 回轉子表層上의 雙極子의 誘起密度와 誘起速度가 增加하여 回轉速度에 기여하기 때문이라고 사료된다. 즉, 比誘電率이 매우 큰 強誘電體物質인 BaTiO₃를 80%로 많이 함유시킴으로 말미암은 雙極子誘起密度의 增加, 또한 印加周波數의 증가에 따른 誘起速度의 증가가 모터의 回轉數 增加에 比例해서 기여했기 때문으로 사료되며, 이에 대한 자세한 것은 후술한다.

그림 4는 回轉子表層物質로서 PP로 하고, 回轉子 內層物質로서 표2에서 나타내는 것과 같은 Ni 10Å로 했을 때, 固定子電極에 印加하는 3相 交流電壓 및 周波數를 變化시켰을 때의 回轉子의 回轉速度를 나타낸 것으로, 印加電壓이 높아지면 回轉數도 증가하는 경향을 보여주며 또한 그림 3에서 보는 바와 같이 印加周波數가 增加하면 回轉數도 크게 증가하였다.

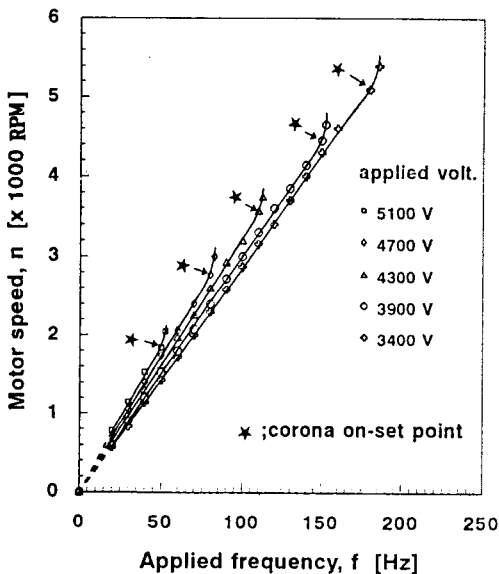


그림 4. 고정자에 인가한 3상 전압의 주파수 변화에 따른 회전자의 회전속도 (내층물질; Ni 10 Å, 표층물질; PP)

Fig. 4. Motor speed as a function of different frequencies of applied voltage to stator. (liner material; Ni 10 Å, surface material; PP)

그러나 印加電壓이 클수록 回轉子 表面과 固定子 電極間에 部分放電이 일어나서 실용상 유익하지 못함을 보여주었다. 즉, 印加電壓이 3400V에서는 185 Hz, 3900V에서는 150 Hz, 4300V에서는 110 Hz, 4700V에서는 80 Hz 및 5100V에서는 50 Hz의 周波數에서 각각 回轉子和 固定子 間的 部分放電發生으로 不安定한 回轉을 하는 高電壓 非正常 高速回轉現象이 나타났는데, 이상의 결과로 보아 모터의 印加電壓에 따라서 어떤 適定한 臨界周波數의 값이 존재함을 보여주며, 따라서 본 모터의 경우 部分放電開始電壓이하의 周波數 領域에서만 運轉되어야 함을 보여준다.

그림 5는 回轉子表層物質로서 比誘電率이 큰 BaTiO₃ 60%로 하고, 回轉子內層物質로서 導電率이 큰 Cu로 했을 때, 固定子電極電壓을 4100V, 4500V, 4750V, 4900V 및 5100V로 可變 印加하고, 印加周波數를 變化시켰을 때의 回轉子의 回轉速度를 나타낸 것으로, 基本特性은 그림 4의 것과 비슷하나, 同一 印加電壓에 있어서의 印加周波數 變化量에 따른 回轉數 變化量 ($\Delta n/\Delta f$), 즉 기울기(slope)가 그림 4의 것에 비해

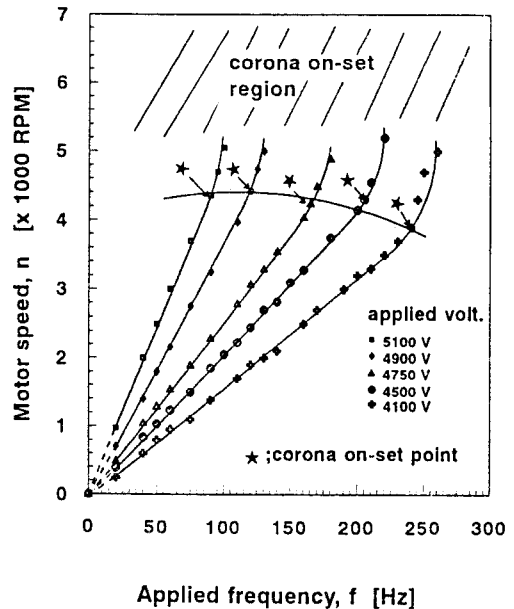


그림 5. 고정자에 인가한 3상 전압의 주파수 변화에 따른 회전자의 회전속도 (내층물질; Cu., 표층물질; BaTiO₃ 60%)

Fig. 5. Motor speed as a function of different frequencies of applied voltage to stator. (liner material; Cu., surface material; BaTiO₃ 60%)

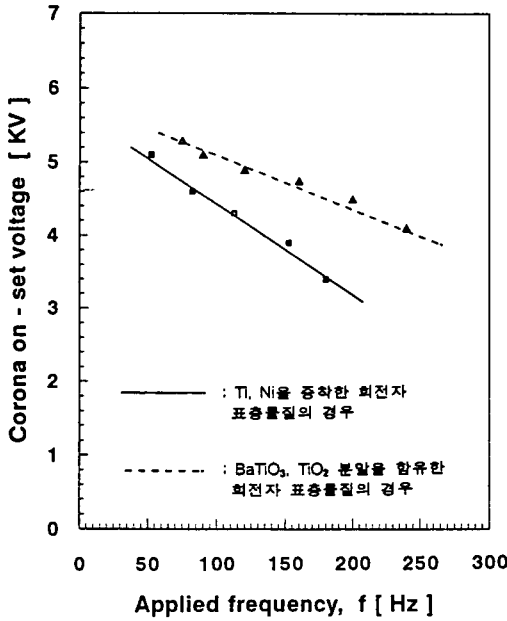


그림 6. 인가주파수의 변화에 따른 부분방전개시전압

Fig. 6. Corona on-set voltages as a function of different frequencies.

작았으며, 부분방전發生條件은 4100V에서는 240 Hz, 4500V에서는 160 Hz, 4750V에서는 140 Hz, 4900V에서는 110 Hz 및 5100V에서는 90 Hz로서 각각 回轉子와 固定子 間에 發生하여 不安定한 高電壓 非正常高速 回轉現象을 나타내었다.

그림 6은 그림 4 및 그림 5로부터 구한 印加周波數에 따른 部分放電發生特性을 나타낸 것으로서 回轉子內層物質로서 Cu로 하고 회전자 表層物質로서 TiO_2 , $BaTiO_3$ 粉末 및 Ti, Ni를 PP위에 眞空蒸着한 것을 사용한 경우 固定子電極에 印加한 交流電壓의 周波數의 變化에 따른 部分放電開始電壓을 나타낸 것으로서, 印加周波數 增加에 따라 部分放電開始電壓은 直線적으로 감소함을 보여준다. 한편, 表層物質이 TiO_2 나 $BaTiO_3$ 의 경우가 PP 위에 Ti나 Ni를 증착한 경우보다 동일한 印加周波數에 대해서 部分放電開始電壓이 약 300V~1000V정도 높게 나타나는 것을 보여주었으며, 이는 TiO_2 나 $BaTiO_3$ 와 같은 比誘電率이 큰 物質이 Ti나 Ni과 같은 導電性 物質을 PP위에 증착한 것보다 絶緣耐力電壓이 크기 때문에 實適用時 더욱 유효함을 보여준다.

그림 7은 回轉子表層物質로서 PP와 Ti 5Å의 2種類로 하고, 回轉子內層物質로서 Ni 10Å으로 하며, 固定子에 印加周波數를 40 Hz, 50 Hz, 90 Hz 및 120 Hz로 고정했을때, 印加하는 3相交流電壓의 變化에 따른 回轉子の 回轉速度의 關係를 보여준 것이다. 印加電壓에 따른 실험모터의 특성은 3개 領域 즉 모터의 回轉子가 전혀 움직이지 않는 低電壓 停止領域 I (motor stop region, 3400V 以下), 모터의 回轉子가 매우 안정되고 정상적으로 回轉하는 中電壓 正常領域 II (normal operation region, 3400V-5100V), 그리고 回轉子の 回轉은 高速이나 回轉子和 固定子사이의 部分放電이 發生하여 불안정한 회전을 하는 高電壓 非正常領域 III (abnormal high speed region, 3900V 또는 5100V 以上)으로 구분되었다. 이상의 결과로 보아 모터의 印加電壓은 어떤 適定値가 존재함을 보여주며, 모터는 正常領域II에서 運轉되어야 함을 보여주고 있으며, 이때 中電壓 正常領域에서는 印加電壓增加분에 대한 回轉子の 回轉速度上昇率 $\Delta n/\Delta V$ 는 150rpm/kV로 나타났다.

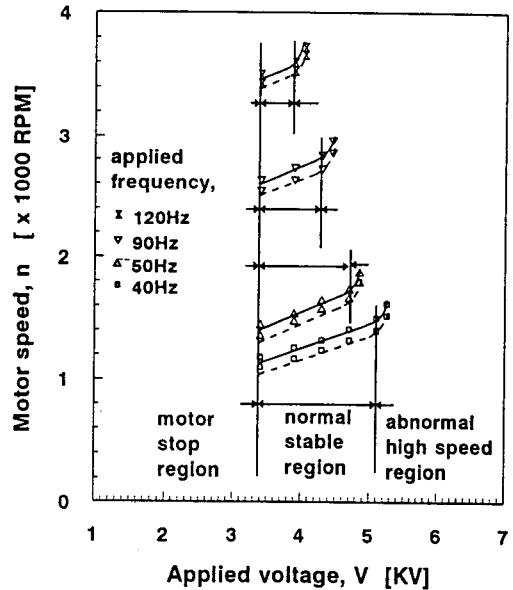


그림 7. 인가 전압의 변화에 따른 회전자의 회전속도 (내층물질; Ni 10 Å, 표층물질; PP ----- Ti 5 Å -----)

Fig. 7. Motor speed as a function of variable applied voltage. (liner material; Ni 10 Å, surface material; PP ----- Ti 5 Å -----)

그림 8은 回轉子表層物質로서 $BaTiO_3$ 30%와 $BaTiO_3$

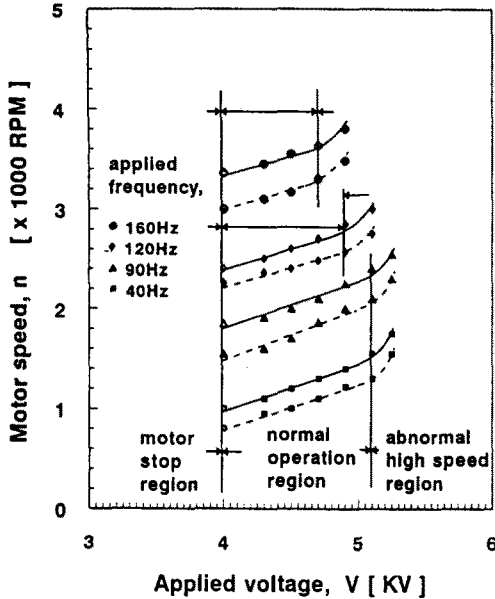


그림 8. 인가 전압의 변화에 따른 회전자의 회전속도 (내층물질; Cu., 표층물질; BaTiO₃ 80% — BaTiO₃ 30% -----)

Fig. 8. Motor speed as a function of variable applied voltage. (liner material; Cu., surface material; BaTiO₃ 80% — BaTiO₃ 30% -----)

80% 2種類로 하고 內層物質로서 Cu로 했을 때, 固定子에 印加周波數를 40 Hz, 90 Hz, 120 Hz 및 160 Hz로 한 경우의 印加 3相交流電壓의 變化에 따른 回轉子의 回轉速度特性을 나타낸 것이다. 印加電壓에 따른 실험모터의 特性은 그림 8의 回轉子表層物質 및 內層物質이 BaTiO₃ 및 Cu쪽이 그림 7의 PP와 Ti 5Å 및 Ti 10Å 증착에 비해 中電壓의 正常領域의 幅이 印加周波數가 낮을 때는 35% 정도 적어지나, 印加周波數가 높을 때는 40% 정도 더 큼을 보여준다. 이는 回轉子表層物質로서 BaTiO₃보다 Ti를 적절히 증착한 쪽이 實適用上 더욱 有效함을 보여준다. 한편, 모터 동작 상태의 영역은 그림 7와 같이 3개 領域 즉, 低電壓 停止領域 I (motor stop region, 4000V 以下), 中電壓 正常領域 II (normal operation region, 4000V~5100V 以上) 그리고 高電壓 非正常領域 III (abnormal high speed region, 4750V~5100V 以上)으로 구분되었다. 이상의 결과 또한 그림 7에서와 같이 모터의 印加電壓은 어떤 적정값이 존재함을 보여주었다. 이때 印加電壓增加분에 대한 回轉子의 回轉速度上昇率 $\Delta n / \Delta V$ 는 480rpm/kV로 그림 7의 경우와 비교해서 약 3배

정도의 큰 상승을 나타냈으며, 實適用時 더 有效함을 보여주었다.

전술했듯이, 靜電誘導型 모터의 動作機構중 다른 중요한 요인 중의 하나는 誘起 및 移動電荷의 緩和 (charge relaxation)를 결정하는 表層 및 內層物質의 電氣抵抗이라고 할 수 있다.^[12-15] 따라서, 이하 表層 및 內層物質의 電氣抵抗이 모터회전에 미치는 영향을 실험적으로 검토하였다.

그림 9는 回轉子表層物質로서 표 2 및 표 3에 나타난 것과 같은 PP, Ti 5Å, Ti 15Å, Ti 60Å 및 BaTiO₃ 80%로 하고, 固定子에 印加하는 電壓 및 印加周波數를 3900V 및 60Hz로 각각 固定하였을 때, 回轉子 內層物質의 表面抵抗率 ρ_{si} 는 回轉子物質의 內側表面 (liner)에 Ni를 진공증착시킴으로서 Ni의 증착량에 따라 변화되고, 內層의 表面抵抗率變化에 따른 回轉子의 回轉速度 n를 나타낸 것이다. 그림 9에서 보듯이 回轉子 內層物質의 表面抵抗率이 增加할수록 回轉子의 回轉速度가 減少함을 보여준다. 이는 回轉子 內層物質의 表面抵抗率이 적을수록 回轉子 內層物質의 表面上에 電荷分布을 균일하게 함으로서 回轉子 表面上의

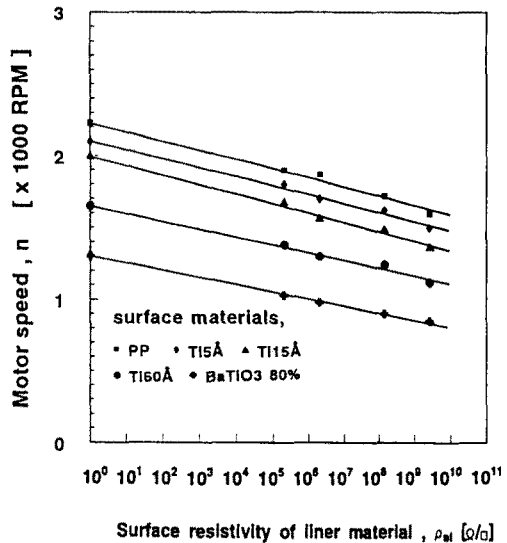


그림 9. 내층물질의 표면저항을 변화에 따른 회전속도 (인가전압; 3900V, 인가주파수; 60Hz)

Fig. 9. Motor speed as a function of surface resistivities of rotor liner materials. (V=3900V, f=60Hz constant)

誘起分極된 雙極子의 밀집상태를 균일하게 함으로서 상대적으로 誘起電荷數를 증가시킨 것과 같은 효과를

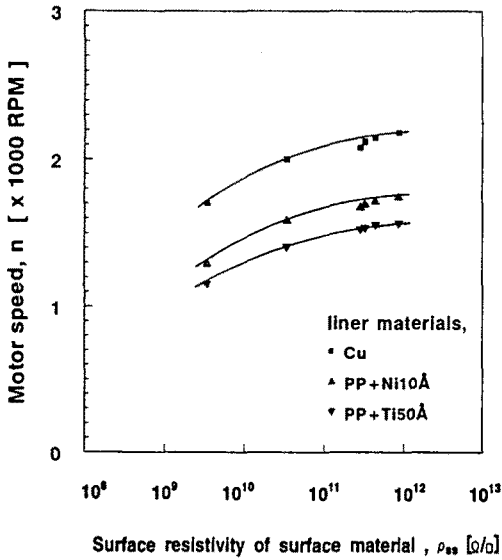


그림 10. 표층물질의 표면저항을 변화에 따른 회전 속도(인가전압; 3900V, 인가주파수; 60 Hz)
 Fig. 10. Motor speed as a function of surface resistivities or rotor surface materials. (V=3900V, f=60Hz constant)

갖게 하기 때문이라고 사료된다. 따라서, 실용적인 면에서는 回轉子表層物質로서는 電氣抵抗이 큰 PP를, 內層物質로서는 電氣抵抗이 작은 것을 씀이 좋을 것으로 보여준다.

그림 10은 回轉子內層物質로서 Cu, Ni 10Å 및 Ti 50Å으로 하고, 回轉子表層物質의 表面抵抗率 ρ_{ss} 는 回轉子表層위에 Ti를 진공증착시킴으로서 Ti의 증착량에 따라 變化되고, 이 表面抵抗率 變化에 따른 回轉子의 回轉速度를 나타낸 것으로, 回轉子表層物質의 表面抵抗率이 증가할수록 回轉速度가 완만히 증가하면서 포화함을 보여 주었다. 이는 그림 9에서 전술했듯이 회전자 表面抵抗率이 적을수록 回轉子表層物質의 表面上에 誘起된 電荷의 緩和時間이 짧아짐에 따른 상대적인 誘起電荷密度가 작아지기 때문에 이로 인해 回轉子의 回轉速度가 감소한다고 사료된다. 한편 表面抵抗率이 증가할수록 回轉子表層物質의 表面上에 誘起된 電荷의 緩和時間이 비교적 길어지기 때문에 誘起電荷의 殘在時間이 커짐에 따라 殘在誘起電荷密度가 상대적으로 커져서 回轉數도 커지기때문으로 사료된다.

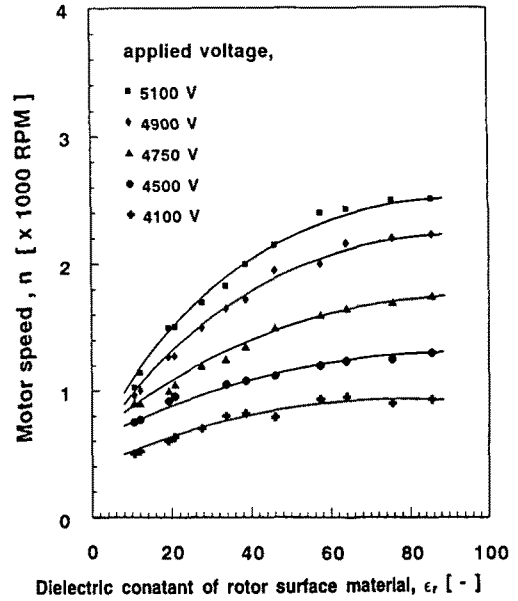


그림 11. 표층물질의 비유전을 변화에 따른 회전 속도(인가주파수; 60Hz, 내층물질; Cu.)
 Fig. 11. Motor speed as a function of dielectric constant of rotor surface materials. (f=60Hz constant, liner material; Cu.)

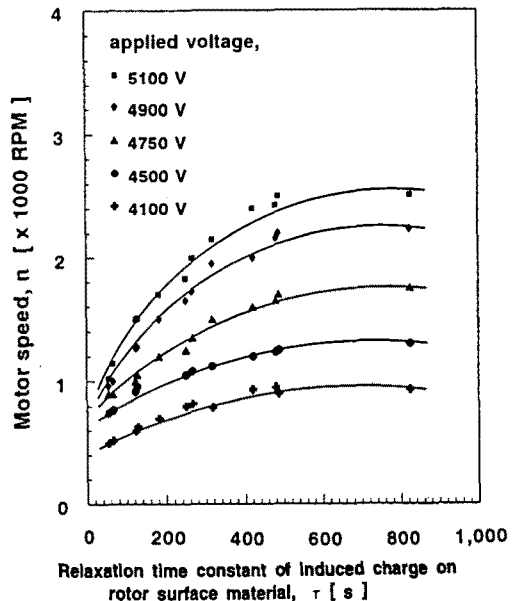


그림 12. 표층물질의 전하완화시정수 변화에 따른 회전 속도(인가주파수; 60Hz, 내층물질; Cu.)
 Fig. 12. Motor speed as a function of charge relaxation time constant of rotor surface materials. (f=60Hz constant, liner material; Cu.)

그림 11은 표 3의 回轉子表層物質의 比誘電率 ϵ_r 의 변화와 印加電壓을 4100V, 4500V, 4750V, 4900V 및 5100V로 변화시켰을 때의 回轉子의 回轉速度特性을 나타낸 것으로 印加電壓이 낮은 4100V, 4500V 및 4750V의 경우에는 回轉子表層物質의 ϵ_r 의 값이 50까지는 回轉速度가 완만히 증가하다가 ϵ_r 이 60이상의 경우에는 回轉速度가 서서히 飽和하는 경향을 보여준다. 한편 인가전압이 높은 4900V 및 5100V에서는 回轉子表層物質의 ϵ_r 의 값이 50까지는 回轉速度가 급격히 증가하다가 그 이후에서는 서서히 飽和하는 경향을 나타냈다. 이와같이 回轉子表層物質의 ϵ_r 이 클수록 回轉子의 回轉速度가 增加하는 이유는 單位面積當 誘起分極의 數가 ϵ_r 에 비례하여 커지기 때문인 것으로 사료된다.

한편, 그림 3, 9, 10 및 11의 실험결과로부터 구한 回轉子表層物質의 表面上의 誘起電荷의 誘起分極緩和時定數(induced charge relaxation time constant)를 그림 12에 나타내었다. 그림 12에서 보듯이, 回轉子表層物質의 종류에 관계없이 回轉子表層物質의 時定數가 커지면 回轉數도 커짐을 보여주며, 時定數가 500秒보다 더 커지면 回轉數는 飽和하였다.

IV. 結 論

小形 靜電誘導型 모터의 개발을 위한 基礎研究로서 小型 靜電誘導型 모터를 제작하고, 印加電壓, 印加周波數의 變化, 回轉子表層物質 및 回轉子內層物質의 表面抵抗率, 比誘電率 및 電荷緩和時定數의 變化에 따른 回轉子의 回轉速度特性을 조사한 결과 다음과 같은 結論을 얻었다.

- (1) 製作된 小型모터는 印加周波數가 일정할때 印加電壓의 증가에 따라 回轉數가 直線的으로 증가하며, 回轉領域은 低電壓 非回轉領域, 中電壓 正常回轉領域, 그리고 回轉子和 固定子間의 空間에서 部分放電이 발생하는 非正常 高速回轉領域 3領域으로 구분되어, 모터는 正常的인 中電壓領域에서 동작되어야 함을 보여 주었다.
- (2) 印加電壓이 일정할때는 印加周波數의 增加에 따라서 回轉子의 回轉速度가 直線的으로 증가함을 보여 주었으며, 印加周波數가 크게 증가하여 臨界周波數 以上の 周波數에서는 固定子和 回轉子 사이에 部分放電이 발생하여 모터는 非正常 高

速回轉現象을 보였으며,

- (3) 以上の 1, 2항의 結果, 本 靜電誘導型 모터의 경우 回轉數가 印加電壓 및 印加周波數 變化에 따라 직선적으로 增加(또는 減少)하는 特性을 이용하여 回轉速度調節이 매우 간단함을 보여준다. 특히, 一定 電壓下에 印加周波數를 가변시킴으로 매우 넓은 속도범위 (1000~5000rpm)에 걸쳐 유효하게 가변할 수 있는 特性을 보여 주었다.
- (4) 回轉子 表層物質의 比誘電率은 클수록 回轉速度를 크게 하며, 또한 回轉子表層의 表面抵抗率도 클수록 회전속도가 증가됨을 보여 주었다. 따라서 이 두 요소를 곱한 回轉子 表層의 誘起電荷緩和時定數는 클수록 回轉速度는 증가하나, 시정수 $\tau \geq 500$ 秒에서는 回轉數가 飽和되어 감을 보여주었다.
- (5) 한편, 電荷分布 및 回轉子和 固定子間의 電界調節을 위한 回轉子內層物質의 電氣抵抗率은 적을수록 回轉速度를 증가시킬 뿐만 아니라, 모터의 回轉이 安定되는 正常的인 領域(normal and stable speed region)이 넓어지게 됨을 보여 주었다.

감사의 글

회전자 제작을 위한 진공증착에 많은 도움을 주신 대구대학교 물리교육과 최용준 교수님과 이진호군 및 최승화양 그리고 BaTiO₃ 시편을 제공해 주신 (주) 대양전기 서승정 사장님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] P. Benjamin, A History of Electricity, John Wiley & Sons, p. 506, 1989.
- [2] 日本靜電氣學會編, 靜電氣ハンドブック, Ohm社, pp. 664-672, 1981.
- [3] Oleg D. Jefimenko, Electrostatic Motors, Electret Science Company, Star City, 1973.
- [4] Soon Dal Choi and Donald A. Dunn ; "A Surface Charge Induction Motor," *Proc. of IEEE*, 59, 5, pp. 737-748, 1971
- [5] E.R. Mognaschi, J.H. Calderwood ; "Asynchronous Dielectric Motor," *IEE Proceedings*, vol. 137, Pt.A, no.6, Nov.1990.
- [6] Masayuki Hattory and Kazutoshi Asano ; "A

- Study on Cylindrical Electrostatic Corona Motor," *Proc. of the Institute of Electrostatics, Japan*, pp. 81-89, 1991.
- [7] Long-Shen Fan, Yu-Chong Tai, and Richard S. Muller; "IC-Processed Electrostatic Micromotor," *Sensors and Actuators*, vol. 20, pp. 41-47, 1989.
- [8] W.S.N Trimmer, and K.J. Gabriel; "Design Considerations for a Practical Electrostatic Micro-Motor," *Sensors and Actuators*, vol. 11, pp. 189-206, 1987.
- [9] 文在德, 李東勳; "靜電모터의 研究現況과 開發動向," *大韓電氣學會誌*, vol. 40, no. 2, pp. 7-15, 1991.
- [10] 文在德, 李東勳; "靜電誘導型 모터의 基礎研究 (I)," *大韓電氣學會夏季學術大會論文集*, pp. 322-325, 1991.
- [11] 文在德, 李東勳; "靜電誘導型 모터의 基礎研究 (II)," *大韓電氣學會夏季學術大會論文集*, pp. 522-525, 1992.
- [12] 文在德, 李東勳; "靜電誘導型 모터의 基礎研究 (III)," *韓國센서學會技術大會論文集*, pp. 110-113, 1992.
- [13] Dong-Hoon Lee; "A Basic Study of Induction Type Electrostatic Motor," *Proceedings of International Session in 1992 Annual Meeting, The Institute of Electrostatics Japan*, pp. 77-80, 1992.
- [14] Jae-Duk Moon and Dong-Hoon Lee; "A Miniature Size Electrostatic Induction Motor," *Record of IEEE-IAS Annual Meeting 1993*. (Oct. 3-8, 1993, Toronto, Canada) (To be presented)
- [15] S. F. Bart and J. H. Lang; "An analysis of Electroquasistatic Induction Motor," *Sensors and Actuators*, vol. 20, pp. 97-106, 1989.
- [16] 大橋朝夫, *靜電氣工學*, 朝創書店, pp. 62-72, 1985.
- [17] *日本工業規格, 導電率測定法通則, JIS K0112*, 1991.
- [18] *日本工業規格, 電氣絶緣材料の誘電正接及び誘電率試驗方法, JEC 150*, 1991.

著 者 紹 介



文 在 德

1946년 7월 25일생. 1970년 경북대학교 사대 물리교육과 졸업(이학사). 1975년 동대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1979년~1982년 일본동경대학 대학원 전기공학과 졸업(공학박사).

1982년~1983년 일본 Simon사 동경대학 파견연구원. 1986년~1987년 Univ. of Western Ontario, CANADA 전기공학과 및 Applied Electrostatics Research Centre 교환교수. 1983년 10월 일본정전기학회 학술논문상 수상. 1990년 9월 ISESP, Harry J. White Award 수상. 1992년 11월 대한전기학회 학술상 수상. 현재 경북대학교 전기공학과 교수.



李 東 勳

1955년 12월 11일생. 1980년 동아대학교 전기공학과 졸업(공학사). 1985년 동 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1990년~1993년 경북대학교 대학원 전기공학과 박사과정(수료). 1976

년~1982년 (주)대한조선공사. 1985년~1987년 (주)현대중공업 선박해양연구소 선임연구원. 1987~현재 부산공업대학교 산업안전공학과 조교수.