

靜電 모-터의 研究現況과 開發動向

문제덕* · 이동훈**

(*경북대 공대 전기공학과 부교수, **동 박사과정)

1. 序 論

- 1.1 에너지 變換과 모-터
- 1.2 靜電모-터의 長點

2. 靜電 모-터의 研究 現況

- 2.1 接觸 모-터(Contact Motor)
- 2.2 스파크 모-터(Spark Motor)
- 2.3 코로나 모-터(Corona Motor)
- 2.4 커패시터 모-터(Capacitor Motor)
- 2.5 誘導모-터(Induction Motor)
- 2.6 液中陷入모-터(Liquid Immersed Motor)
- 2.7 電石 모-터(Electret Motor)

3. 靜電 모-터의 開發 動向

4. 結 論

1. 序 論

1.1 에너지 變換과 모-터 [1-3]

電氣-機械 에너지 變換에 있어서 電氣에너지는 주로 電界와 磁界의 에너지로서 蓄積되며, 單位體積當 蓄積에너지는 다음 式(1) 및 (2)로 나타내어진다.

$$W_m = \mu H^2 / 2 = B^2 / 2\mu \quad (1)$$

$$W_e = \epsilon E^2 / 2 = D^2 / 2\epsilon \quad (2)$$

여기서 μ 는 透磁率, H는 磁界의 세기, B는 磁束密

度, ϵ 는 誘電率, E는 電界의 세기, 그리고 D는 電束密度이다.

式(1) 및 (2)로 부터 電界 및 磁界의 어느 쪽의 變換過程도 同一하게 利用될 수 있을 것으로 생각되나, 실제 電氣-機械 에너지 變換機로서 利用되고 있는 것은 거의 대부분 磁界 變換機이다.

電界와 磁界는 式(1)과 (2)에서 보는 바와 같이 서로 같은 形態의 式으로 나타남에도 불구하고 利用상이처럼 差가 나는 까닭은 무엇일까? 그것은 에너지 變換空間의 形態의 差가 크게 영향을 미치기 때문이다. 즉, 式(1)의 磁界의 경우 變換空間에서의 에너지 密度를 크게 하기 위해서는 B를 크게 해야 하며, 이空間은 대개 空氣中이므로 H를 크게 해야 하며 이는 使用 磁性材料의 磁器 飽和에 의해 限定된다. 현재 利用되고 있는 材料의 값으로는 1.5T 정도라고 보면 에너지 密度는 대개 10^6 J/m^3 정도이다. 그러나 式(2)의 電界의 경우, 마찬가지로 에너지 變換空間의 에너지 密度를 크게 하기 위해서는 D를 크게 해야 한다. 즉 E와 ϵ 를 크게 해야 하나, 이空間 역시 空氣中이므로 $\epsilon \approx 1$ 로서, 결국 E만을 크게 해야 한다. 따라서 E는 空氣의 絕緣破壞強度 즉 $3 \times 10^6 \text{ V/m}$ 로서 限定되며, 變換空間에서의 에너지 밀도는 50 J/m^3 로서 磁界 에너지 密度와 비교할 때 이 값은 수 만분의 일밖에 되지 않게 된다.

이 結果만으로 보면 에너지 變換機로서는 자연히 磁界에너지 變換機만이 사용될 수 밖에 없는 結論이 나오게 되며, 實際 磁界에너지 變換이 發電機나 모

-터에서 주로 사용되어 지고 있는 이유도 여기에 있다.

1.2 靜電 모-터의 長點[1-4]

역사적으로 보면 磁界形 모-터에 비해 100년 以前에 靜電 모-터가 考案 實現되었으며, 특히 18세기에 수많은 研究가 遂行되어 여러 형태의 靜電 모-터가 考案 實現된 바 있으나, 磁界形 모-터가 개발된 이래 에너지 變換 效率면에 의해 靜電形 모-터는 완전히 잊혀진 것으로 되었다.

그러나 近年에 이르러, 모-터의 用途가 매우 폭넓게 開發됨에 따라 반드시 大出力의 것만이 필요하지 않고 小型의 小에너지形 모-터의 필요에 따라 靜電 모-터가 새로운 見地에서 再檢討 해 볼 필요가 있게 되었다. 왜냐하면 小型의 모-터의 경우 에너지 變換 空間이 매우 적게 되면 그림 1 및 2에서 보는 바와

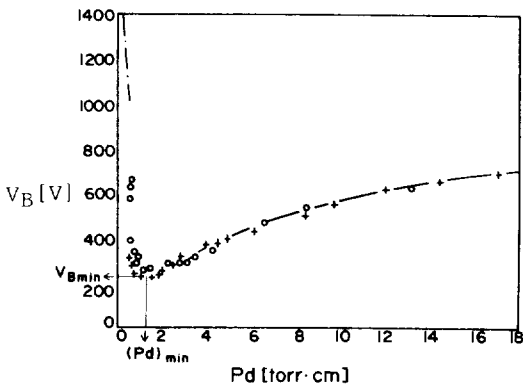


그림 1. V_B -pd characteristic

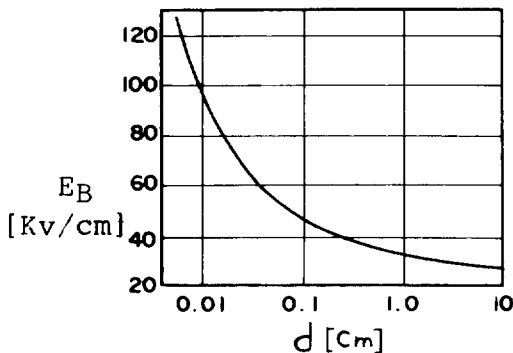


그림 2. V_B -d characteristic

같이 相對的인 電界強度가 매우 크게 되어 靜電 모-터의 效率를 높일 수 있게 되며, 특히 靜電 모-터의 경우 임피던스가 극히 크기 때문에 消耗 電力이 극히 작은 長點을 가지고 있다. 반면에 磁氣 모-터의 경우 그 규모를 작게 하면 磁氣 코일의 에너지 損失이 커져서 實用上 使用할 수 없게 된다.

따라서 近年에 이르러 超小型 靜電 모-터가 새롭게 研究 檢討되고 있으나 이제 시작된 狀態로 工學的으로나 理論的으로나 깊이 있게 다루어진 論文은 많지 않은 것 같다. 따라서 본 解説에서는 지금까지 開發된 중요한 靜電 모-터에 대하여 記述하고자 하며, 나아가 最近 크게 주목을 받고 있는 超小型 靜電 커패시터 모-터에 대하여 記述함으로써 현재까지의 靜電 모-터의 研究開發 現況과 앞으로의 研究 動向에 대하여 언급하고자 한다.

2. 靜電 모-터의 研究 現況

靜電 모-터를 適當히 分類해 보면 다음과 같은 세 가지로 分類할 수 있다. [2-4] 電荷를 모-터의 主部門(the active part of a motor)에 傳達하는 方法에 의해서 分類하면 :

- ① 接觸 모-터(contact motor)
- ② 스파크 모-터(spark motor)
- ③ 코로나 모-터(corona motor)
- ④ 커패시터 모-터(capacitor motor)
- ⑤ 誘導 모-터(induction motor)
- ⑥ 電石 모-터(electret motor)

사용하는 誘電體의 媒質에 따라서 分類하면 ;

- ① 液中 陷入 모-터(liquid immersed motor)
- ② 氣中 混入 모-터(gas immersed motor)

供給 電壓의 周期에 따라 分類하면 ;

- ① 同期 모-터(synchronous motor)
- ② 非同期 모-터(asynchronous motor)

등으로 나눌 수 있다.

2.1 接觸 모-터(contact motor)

1740년 初에 Andrew Gordon (Scottish)과 Erfurt (Germany)에 의해 2種의 靜電 모-터[4-5]가 開發되었다. 첫번째는 “electric bell”로서 그림 3은 이를 표시하고 있다. 2개의 벨은 靜電發電機 혹은 leyden

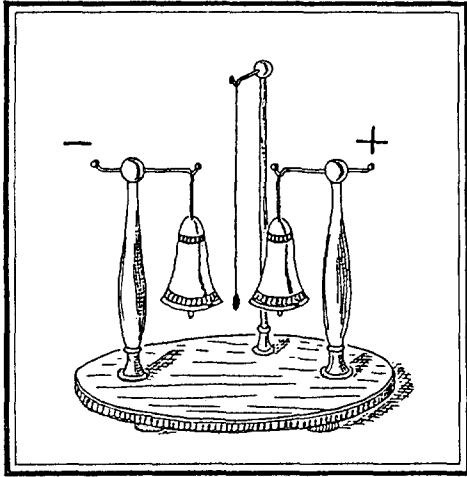


그림 3. Electric bell

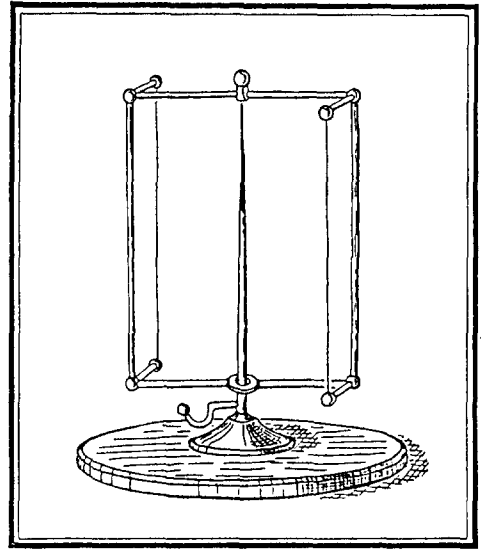


그림 5. Modified electric fly

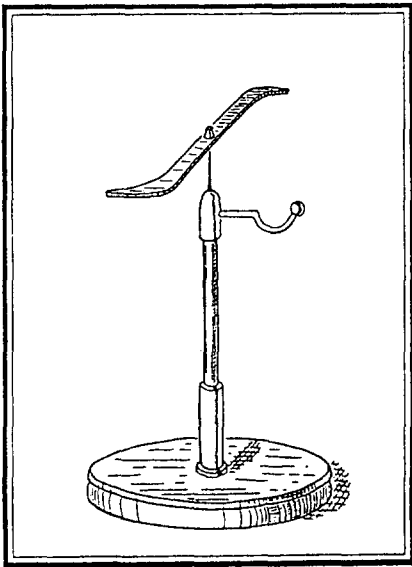


그림 4. Electric fly

jar에 연결된 각 正, 負의 電極으로 되어 있고, 導體 振動子(clapper)는 서로 反對로 荷電된 bell 사이에서 silk선에 의해 매달려 있다. 처음 손으로 振動子を 2개의 bell중 正側에 接觸시키면 振動子は 正의 電荷를 받는다. 이렇게 되면 振動子は 正側의 bell로부터는 反撥力을, 負側 bell로부터는 吸引力을 받게 되어 負側의 bell(種)을 치게 되고, 負側 種에 接觸되는 순간 正電荷는 中和되고 負側의 bell(種)으로부터 負電荷를 받게 된다. 이때 振動子は 負側의 bell

(種)으로부터는 反撥力을 正側의 bell(種)으로부터는 吸引力을 받게 된다. 따라서 이러한 動作의 反復이 繼續적으로 일어나서 往復 運動을 하게 된다. 이와 같이 되어 모-터의 可動部分인 振動子は bell(種)과의 接觸에 의해 電荷를 주고 받아 振動子和 bell(種)간의 靜電力에 의해 動作되기 때문에 이와 같은 形態의 모터를 接觸 모-터(contact motor)라 한다.

Andrew Gordon의 두번째 모-터는 "electric fly"라고 불리는 모-터이다. electric fly는 그림 4에서 보듯이 動作部가 가볍고 얇은 금속띠로서 만들어져 있고, 끝부분은 굽고 또 휘어져 있으며, 또한 絶緣된 針電極의 上部에 놓여있어서 용이하게 回轉할 수 있도록 되어 있다. 이 針에 高電壓을 印加하면, 可動部の 끝부분으로부터 corona 放電이 일어나고, 이때 可動部 周圍의 空氣는 可動部와 같은 極性으로 荷電되어지기 때문에 이 電荷雲과 可動部사이의 反撥力에 의해 回轉力이 생겨서 可動部(electric fly)는 回轉하게 된다.

또한 1887년 Bichat는 ewlectric fly의 可動金屬에의 放電電荷量을 增加시키기 위해서 금속띠 대신에 垂直細線을 使用했다. 즉, 그림 5에서 보는 바와 같이 可動部는 針狀의 垂直軸上을 回轉할 수 있도록 金屬의 垂直 frame이 設置되어 있고, 여기에 2개의 細線電極이 接續되어 있다. 이때 垂直 frame은 細線의 뒷 部分으로부터의 corona放電을 막으며 corona

放電은 細線電極에서만 나오게 함으로서 Andrew Gorden의 electric bell을 改良할 수 있었다.

2.2 스파크 모-터(spark motor)

2.2.1 Franklin의 spark motor[4.8-10]

1748년 Benjamin Franklin은 固定子和 回轉子 사이의 電荷授受를 spark에 의해 行에서 이들의 反撥力을 이용해서 그림 6와 같은 電氣風車(electric wind wheel)라는 것을 만들었다. 끝부분에 黃銅製 thimble이 각각 씌어져 있는 30개의 유리棒으로 形成된 可動部(車輪)는 木材의 水平支持圓板과 垂直軸에 의해서 回轉 可能하도록 되어 있다. 車輪 左右에 설치된 leyden jar의 電極棒은 黃銅 thimble과 近接 設置되어 있어서 黃銅thimble이 leyden jar의 電極棒附近을 스쳐 지나가면 兩쪽의 黃銅製 thimble(回轉子)와 leyden jar(固定子) 사이에서 spark가 일어나서 黃銅 thimble은 leyden jar의 電極棒과 同符號로 荷電된다. 이로 인한 反撥力에 의해서 車輪은 回轉할 수 있다. 이 모-터는 완전히 對稱이기 때문에 어느 한 방향으로 回轉할 수 있으나, 최초로 黃銅 thimble을 荷電시키기 위해서는 손으로 살짝 밀어 주어야 한다. 荷電된 黃銅 thimble이 90°이상 回轉하면 이번에는 反對符號의 電極과의 사이에서 吸引力을 받으므로 힘을 2배로 增加시킬 수 있다. 따라서

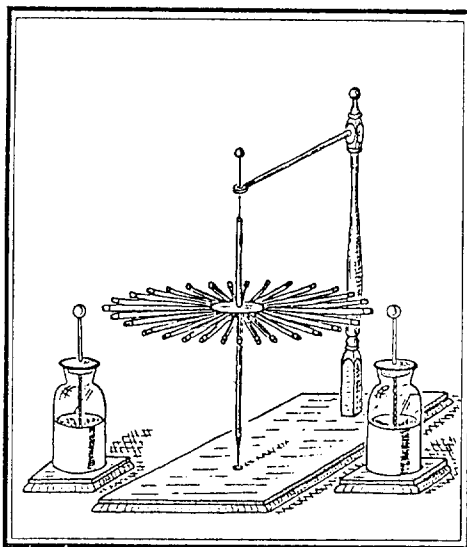


그림 6. Electric wind wheel

이 모-터는 훨씬 큰 速度로 回轉할 수 있게 된다. 이 모-터의 경우 黃銅 thimble과 leyden jar 電極과의 電荷의 授受를 spark에 의해서 行하기 때문에 spark motor라고 부른다.

2.2.2 自起動 spark motor[6]

1786년 A.D.Moore는 自起動(self-starting) 및 一定方向回轉(one way running)이 가능한 小型 spark motor를 考案했다. 그림 7에 나타난 Moore의 spark motor는 臺(base)와 垂直板이 良質의 絶緣體로 되어 있고, 垂直板에 직경 10cm, 두께 3mm의 plexiglass로 된 圓板을 취부해서 자유롭게 回轉할 수 있도록 되어 있으며, 이 回轉圓板의 周圍에는 小型導體球가 插入되어 있다. 이 모-터가 自起動 및 一定方向回轉이 可能하게 하기 위해서 回轉 圓板의 接線方向으로 짧은 補助電極(auxiliary rods)를 設定하고, 이 補助電荷에 靜電發電機의 正, 負 電極을 연결하도록 되어 있다. 왜냐하면 垂直圓板周圍의 小型導體球表面의 電荷가 補助電極의 接線方向, 즉 圓板의 回轉方向으로 集中 分布되기 때문이다.

위에 언급한 spark motor는 固定電極과 可動電極의 數를 增加시킴으로 더 強力한 出力을 낼 수 있지만, 電極 사이의 間隔이 좁게 되면 電極 사이에서 spark가 발생하여 motor는 短絡의 狀態로 된다. 즉, 動作電壓을 電極間의 氣中絶緣破壞電壓 以下로 낮추지 않으면 안되게 된다. 그러나 動作電壓을 낮추면 그 만큼 出力도 낮아진다. 따라서 電極의 數를 增加시키면 그 만큼 動作電壓도 낮추어야 하므로

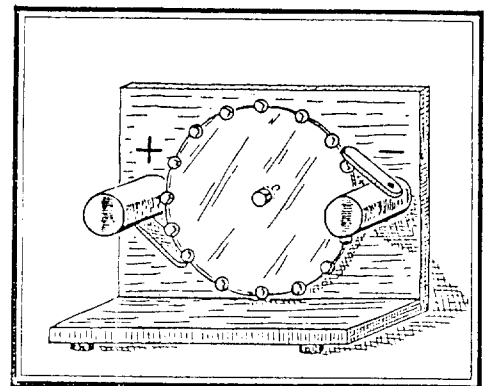


그림 7. Moore's self-starting spark motor

spark motor는 出力特性上 制限이 있어서 많은 數의 電極을 둘 수 없는 것이 短點이다.

2.3 코로나 모-터(corona motor) [4.7.11]

1867년 J.C.Pogendorf는 corona 放電을 이용한 모-터를 考案하였다. 그림 8에 나타낸 바와 같이 이 corona모-터는 垂直으로 세워진 유리圓板과 金屬製의 끝이 뾰족한 빗살(comb)형태의 電極들은 유리圓板의 반지름 방향으로 임의의 角度를 가지고 유리圓板의 表面에 붙어 있다. 이 빗 형태의 電極으로부터 corona放電을 일으켜 유리圓板을 荷電시키게 되어 있고, 유리圓板上에 同符號의 電荷를 荷電시킨다. 이렇게 함으로서 각각의 빗 電極은 同符號電荷를 가진 유리圓板의 片(segment)에 反撥하고, 反對符號의 電荷에 의해서 荷電된 유리圓板의 片(segment)를 끌어 당기며, 빗 電極과 유리圓板 사이의 계속된 corona放電에 의하여 유리圓板의 거의 대부분은 電荷로서 채워지고 모-터는 계속 回轉하게 된다.

이 모-터의 경우 torque및 power는 같은 크기의 스파크 모-터보다 훨씬 強하며, J.C.Pogendorf는 回轉유리圓板의 두께, 表面의 特性, 무게의 변화, 電極數, 電極의 極性및 電極의 取附角度를 變化시킴으로 100Kv에서 3000rpm, 100 watt의 出力을 얻을

수 있었다.

한편 1891년 W.McVay는 그림 9와 같은 형태의 corona 모-터를 제작했다. 이 corona 모-터의 경우 2개 水平유리圓板(직경 12inch)이 설치되어 있는데, 下側의 圓板은 固定되어 있고, 上側의 圓板은 回轉하도록 되어 있다. 또한 下側의 圓板에는 朱錫薄(tin foil)의 四分圓(quadrant)이 2장 붙어 있고, 각각 +, -의 高電壓 電源에 接속되어 있다. 반면 上側의 圓板은 朱錫薄(tin foil)의 16 sector로 區分되어 있다. 電源은 2개의 絶緣된 arm에 의해 供給되는데, 하나는 2개의 brush을 통해서 上側의 segment의 가장자리부분에 接續되고, 또 하나는 下側의 四分圓에 固定 接續되어 있다. 따라서 上側의 sector들과 下側의 四分圓과는 同極性이 되어 反撥力이 생겨나서 上側의 圓板이 回轉할 수 있도록 되어 있다. 특히 上側의 圓板에 설치된 中和線(neutralizer)은 上側의 sector가 反對符號로 荷電된 下側의 四分圓을 지나기 直前に 上側의 sector를 中和시킴으로 回轉圓板의 逆 torque를 줄일 수 있게 되어 있다.

이 모-터의 중요한 特徵은 固定四分圓과 回轉sector를 同時に 充電함으로서 比較的 큰 起動 torque를 얻을 수 있는 점과 신뢰할 만한 一定方向의 回轉을 할 수 있는 점이다.

大氣壓의 空氣중에서 corona 放電을 일으키기 위해서 약 3KV/mm까지의 電界로 可能하기 때문에

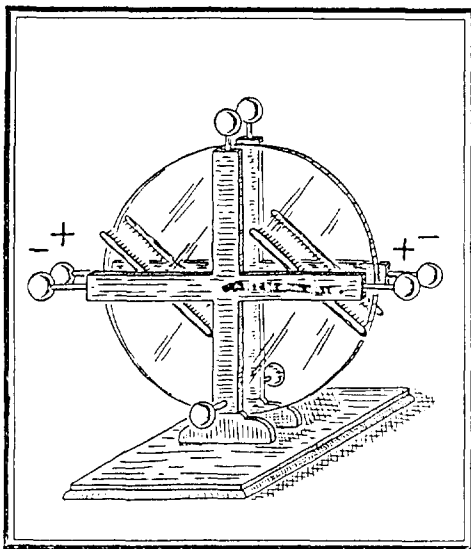


그림 8. J.C.Pogendorf's corona motor

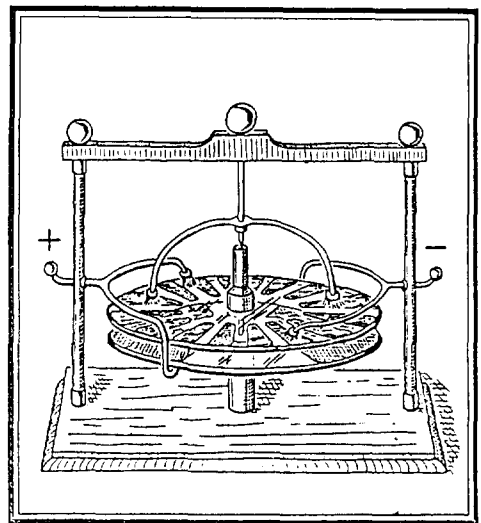


그림 9. W.McVay's corona motor

corona 모-터는 이 정도의 電壓을 供給할 수 있는 電源으로부터 作動할 수 있고, 또한 corona motor 는 構造가 간단하고 効率이 좋기 때문에 앞으로 研究 開發될 수 있는 所持가 있다고 할 수 있다.

2.4 커패시터 모-터(capacitor motor)

1889년 Karl Zipernowsky 는 그림 10과 같은 capacitor motor[4.12]를 考案했다. 이 모-터의 回轉子는 2쌍의 絶緣된 alumium sector로 構成되어 있고, 固定子는 回轉子를 둘러싸고 있는 4개의 複數 brass sector로 構成되어 있다. 回轉子에는 4부분의 整流子가 취부되어 있어서 回轉子の sector가 固定子の sector 사이를 들어갈 때에는 反對符號로 荷電되고 固定子の sector 사이를 빠져나올 때 同符號로 荷電되므로 回轉을 계속할 수 있다.

이 모-터는 直流高電壓은 물론 交流高電壓에서도 作動할 수 있는 것이 特徵이며, 交流電源에 의해 作動하는 경우 同期(synchronous) 및 非同期(asynchronous) 모-터로 나눌 수 있다. (Zipernowsky의 커패시터 모-터는 非同期 모-터로서 作動했다) 同期型 capacitor 靜電모-터는 整流者가 없는 단순한 多電極 capacitor 모-터이고, 또한 固定子和 回轉子사이에 적절한 周波數의 交流電壓을 繼續的으로 供給

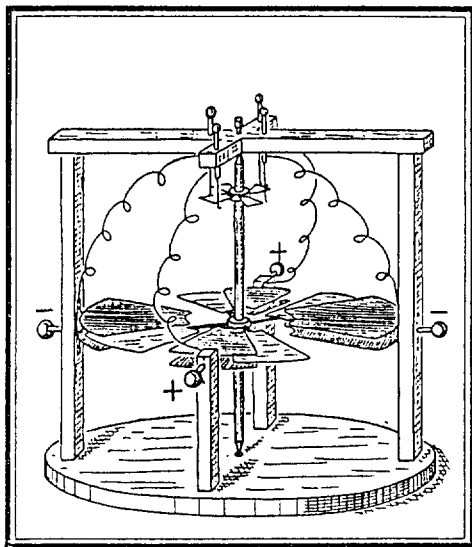


그림 10. Capacitor motor

함으로서 回轉子를 荷電시킬 수 있다. 그림 11은 이 方法을 채택한 corona 모-터를 나타낸 것이다. 이와 같은 모-터에 있어서 만약 回轉子가 供給電壓의 一週期동안 한개의 電極을 지나가면 그때 交流電壓은 整流子를 가진 直流電壓에 의해서 얻을 수 있는 效果를 얻을 수 있게 된다. 이때의 同期速度는 $2\pi f/N$ (f : 供給電壓의 周波數, N : 電極의 數)으로 나타내어진다.

1969년 B. Bollee에 의하면 capacitor 靜電 모-터의 回轉子에서의 最大 torque(T_{max})는 式(3)으로 나타내었다.

$$T_{max} = K N V^2 \tag{3}$$

여기서 K 는 幾何學的 常數, V 는 供給電壓의 最大值, N 은 電極의 數이다. 식 (3)으로부터 多電極 capacitor 모-터의 경우 速度는 늦지만, 큰 torque 를 낼수 있게 된다. 반면 出力은 供給電壓의 제공과 周波數에 比例하지만 電極의 數에는 영향을 받지 않는다. 특히 capacitor 靜電 모-터에서 중요한 媒介

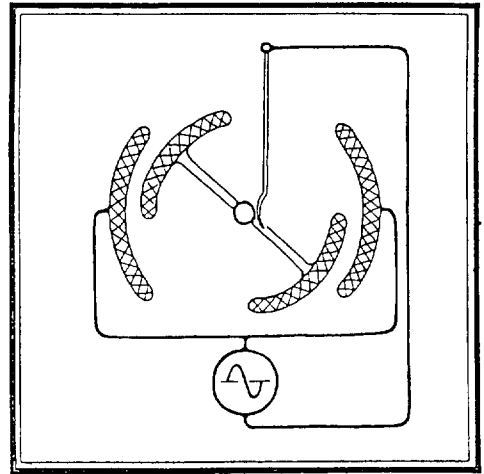


그림 11. Synchronous capacitor motor

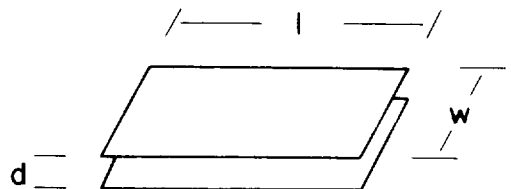


그림 12. Two conduction parallel plates capacitor

變數는 靜電容量의 差, 즉 $C_{max}-C_{min}$ 이다. 여기서 C_{max} 은 回轉子와 固定子 사이의 最大 capacitance 이고, C_{min} 은 回轉子가 回轉할때 일어나는 最小 capacitance이다. 이 靜電容量의 差가 클수록 torque 및 出力은 향상되므로 capacitor 모-터의 設計에 있어서 最大目標는 $C_{max}-C_{min}$ 값의 最大變化를 얻는 것이다.

最近에 이르러 silicon 工程技術中 微細工作技術인 micromachining technology[23~26]가 發達됨에 따라 이를 利用할 커패시터 모-터가 最近 W.S.N Trimmer와 K.J.Gavriel에 의해 發表되었는데, 이 모-터의 原理는 다음과 같다.

絶緣物로 채워진 平行平坂컨덴서의 靜電容量은 다음 式(4)와 같다.

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 w l / d \quad [F] \quad (4)$$

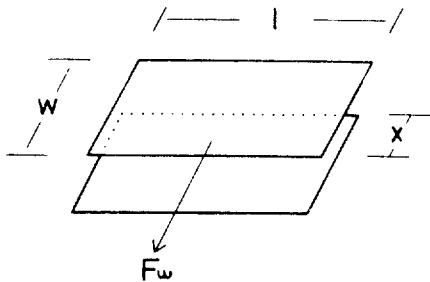


그림 13. Two parallel plates which overlap x

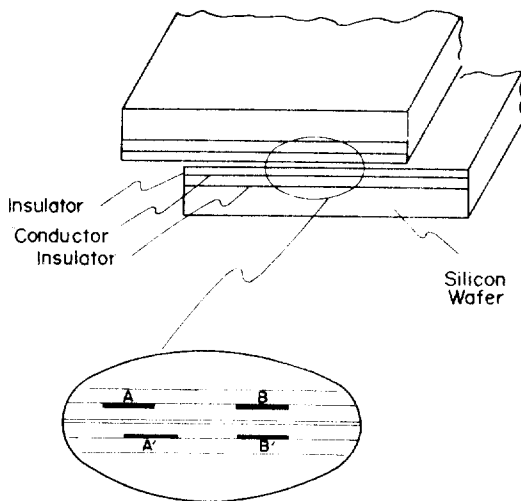


그림 14. A linear electrostatic motor made on a silicon wafer

여기서 w 는 極板의 폭, l 은 極板의 길이, d 는 極板間隔, $\epsilon_r \epsilon_0$ 는 誘電體의 比誘電率 및 自由 空間의 誘電率이다.

그림 12에서 電壓 V 가 極板 사이에 가해지면, 컨덴서의 靜電에너지 (potential energy)는 다음 式(5)로 나타낸다.

$$U = -CV^2/2 = -\epsilon_r \epsilon_0 w l V^2 / 2d \quad [J] \quad (5)$$

여기서 $-$ 의 符號는 電源으로부터 供給된 에너지를 의미한다. 만약, 그림 13에 나타낸 바와 같이, 對向 極板의 配置를 x 만큼 어긋나게 시킨 狀態에서 靜電 에너지는 다음 式(6)으로 나타낼 수 있다.

$$U = -\epsilon_r \epsilon_0 x l V^2 / 2d \quad [J] \quad (6)$$

또한 w, l 및 d 方向의 힘을 구하기 위해서는 컨덴서가 가지는 靜電에너지의 負偏微分을 해야 하므로 w 方向의 힘을 계산하면 式(7)로 나타낼 수 있다.

$$F_w = -\partial U / \partial x = \epsilon_r \epsilon_0 l V^2 / 2d \quad [N] \quad (7)$$

마찬가지로 l 과 d 方向의 힘도 역시 다음 式(8) 및 (9)로 나타낼 수 있게 된다.

$$F_l = -\partial U / \partial l = \epsilon_r \epsilon_0 x V^2 / 2d \quad [N] \quad (8)$$

$$F_d = -\partial U / \partial d = \epsilon_r \epsilon_0 x l V^2 / 2d^2 \quad [N] \quad (9)$$

여기서 힘 F_w 는 兩極板에 平行한 힘으로서 이는 對向 極板의 配置를 서로 一致시키려는 쪽으로 작용한다. 이러한 一致시키려는 힘 (aligning force) F_w 를 利用해서 線形 및 回轉 靜電 모-터를 製作할 수 있다. 단위 길이당 힘 f_w 는 다음 式(10)으로 나타낼 수 있다.

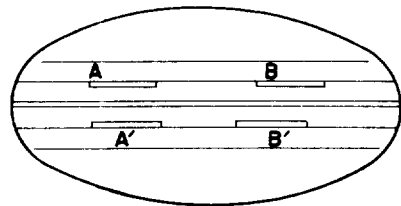


그림 15. New aligned plates A-A'

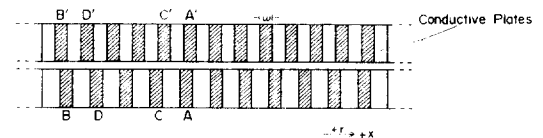


그림 16. Phase relationship between the electrostatic plates

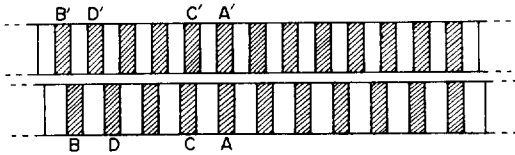


그림 17. New phase relation

$$fw = Fw/1 = \epsilon_r \epsilon_0 V^2 / 2d$$

$$= \epsilon_r \epsilon_0 d E^2 / 2 \quad [N/m] \quad (10)$$

즉 電界의 세기 $E(v/d)$ 의 제곱에 비례하는 이러한 힘 fw 가 靜電 모-터의 torque를 결정하는 중요한 常數인 것이다.

이러한 原理를 이용한 線形 靜電 모-터는 그림 14에 나타난 바와 같이 比對稱 平行平坂 컨덴서의 雙들로 構成되어있다. 印加電壓이 比對稱板(A-A')에 가해지면 式 (7)에서 구한 힘 Fw 가 그림 15에서 보는 바와 같이 板 A-A'를 서로 일치하게끔 작용하게 된다. 한편 板 B-B'는 서로 一致하지 못하여서, 다시 원래의 위치로 되돌아가려는 힘이 일어난다. 이러한 간단한 設計에서는 힘이 比較的 적지만 여러개의 커패시터를 使用하므로써 線形 靜電 모-터의 힘을 增加시킬 수 있다. 즉 그림 16과 같은 板形狀을 가진 여러개의 커패시터의 上, 下板의 導體 및 絕緣體를 서로 마주보게 하면서 對向面의 配置를 약간 어긋나게 함으로서 한 方向의 運動을 할 수 있고, 힘도 增加시킬 수 있다. 이때 板 A-A'에 電壓을 印加하면 對稱的인 위치로 움직이려는 힘이 발생한다. 만약 上板을 固定시키고 下板을 자유로이 움직이도록 하면 +x 方向으로 $w/3$ 만큼 움직이려는 힘을 일으킨다. 그림 17은 板 A-A'에 電壓을 印加한 후의 새로운 配置를 나타낸다. 이러한 對向極板 配置의 어긋난 정도가 커패시터 靜電 모-터의 중요한 常數인 것이다.

實驗에 의하면 silicon wafer上에서 제작된 靜電 모-터의 경우 $w=6$ micron, $d=1$ micron, $l=5$ cm 및 $V=100$ volts일때 1.87 N의 힘이 發生함을 確認했다. 이와 같은 方法은 아직 충분한 모-터로서 開發되어 있지는 못하지만 현재 美國과 日本등에서 크게 研究되고 있으므로 멀지않아 開發되리라고 史料된다.

2.5 誘導모-터(induction motor)

1892-1893년 Richardo Arno와 W.Weiler는 그림 18과 같은 새로운 형태의 誘導靜電모-터[4.13]를 考案하였다. 그들은 電界中에서의 誘電體의 分極(polarization)이 電界보다 位相이 늦어지는 原理를 利用함으로 電界中에 놓여진 誘電體가 電界의 方向으로 回轉하도록 하는 힘을 일으킨다는 것을 알았다. 靜電發電機로부터의 高電壓을 整流子(commutator)에 의해 固定子の 4개의 片(segment)에 차례 차례로 供給하여 回轉電界를 만들고, 固定子片 A가 +이고, 固定子片 B는 -일 때 固定子에 의한 電界는 그림에서 보는 바와 같이 誘電體의 回轉子에 分極電荷를 誘導하며 整流子が 1/4回轉을 완료할 때 固定子片 C는 +, D는 -로 된다. 이렇게 해서 電界가 90°回轉하면 電界는 새로운 方向(처음에 대해서 90°)으로 回轉子에 分極電荷를 誘導한다. 그러나 分極電荷가 畧으로 緩和하는 데는 時間이 걸리기 때문에, 初期分極電荷중 일부는 여전히 回轉子에 남는다. 그래서 回轉子 위의 分極電荷의 分布는 固定子위의 電荷에 대해서 對稱的이지 못하다. 그러므로 回轉子電荷와 固定子電荷 사이의 吸引, 反撥力에 의해서 torque가 發生하여 回轉子는 回轉할 수 있게 된다.

이러한 모-터는 分極電荷의 誘導에 의해 動作되어지기 때문에 이를 誘導모-터라 한다. 最近 상당한 關心을 끄는 여러가지 形態의 誘導모-터가 考案發

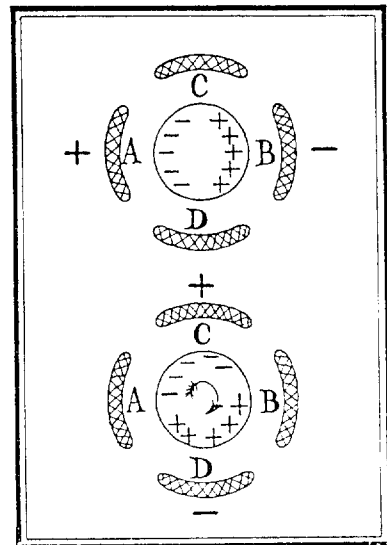


그림 18. Induction motor

表되고 있으며, 이들 모-터는 直流 및 交流에서도 作動되며, 低電壓에서도 作動하고, brush나 slip ring이 必要없기 때문에 摩擦損失이 적은 長點이 있어서 크게 關心을 끌고 있다.

2.6 液中 陷入 모-터(liquid-immersed motor) [4,14~16]

1893년 W.Weiler는 그림 19에 보는 바와 같이 2개의 球型電極을 陷入시킨 弱導電性 液體中에 유리 cylinder를 놓고 球型電極을 靜電發電機에 연결하였을 때 유리 cylinder가 回轉한다는 것을 發見했다. 이 모-터의 動作原理는 corona 放電에 의해서가 아니고 液體에서의 傳導電流(conduction current)에 의해서 電荷가 回轉유리cylinder의 表面에 附着되어, 그 靜電力에 의해서 回轉하는 것이다.

Weiler의 液中陷入誘導 모-터는 最近(1968년) P. E.Secker 및 그의 同僚研究者에 의해 상당히 활발하게 研究되어졌다. 그들은 液體로서 hexane, amylalcohol을 첨가한 hexane, ethylalcohol, isoamylalcohol 등을 사용했다. 이들은 그림 20에서 보는 바와 같이 각 面이 1.8cm²의 stainless steel로 된 6개의 固定子和 perspex로 된 回轉子로 되어있는 모-터를 考案하였다. 이 모-터의 回轉子は 直徑 7/8inch, 길이 2inch이고, 표면에는 高誘電體(titanium ceramic in polystyrene)의 물질로 덮혀있으며, 30KV의 入力

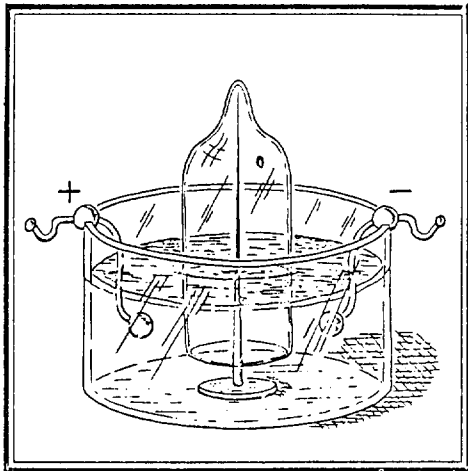


그림 19. W.Weiler's liquid immersed motor

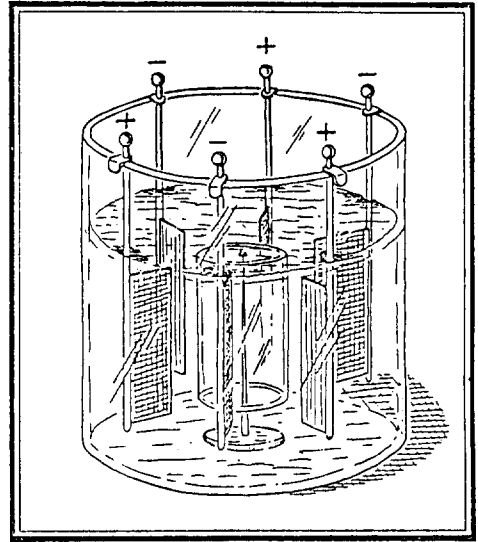


그림 20. P.E.Secker's liquid immersed motor

電壓으로 1700 rpm 回轉하고 效率은 50%였다. 그러나 이와 같은 모-터의 경우 모-터가 液體中에서 回轉하므로 液體中에 일어날 수 있는 靜電流體力學(electro hydrodynamic) 損失 때문에 比較的 效率이 낮은 短點이 있게 된다.

2.7 電石모-터(electret motor) [4,17-18]

일반적으로 electret는 永久充電誘電體로서 磁石(magnet)에 對抗하여 電石(electret)이라고도 하며, 磁石의 N,S극 대신에 +, -電荷를 永久적으로 가지고 있는 永久分極막대를 말한다. 이러한 電石(electret)을 이용한 motor가 1961년 러시아의 物理學者 A.N. Gubkin에 의해 提案되어졌다. 그림 21에 나타낸 이 모-터의 固定子は 2개의 平行平板 capacitor로 서로 對稱的으로 설치되어 있고, 回轉子は 兩面이 서로 同量 異符號를 띤 平板electret로서 構成되어 있으며, 또한 回轉子は 固定子の capacitor사이를 통과할 수 있게 垂直軸위에 設置되어 있다. 電壓이 2쌍의, 固定子(平行平板 capacitor)에 加해지면, 固定子板 A와 D는 +로, B와 C는 -로 荷電된다. 이 순간 固定子は 回轉 electret를 끌어 당겨서 固定子(平行平板 capacitor) 사이로 들어간다. 固定子사이에 들어간 electret가

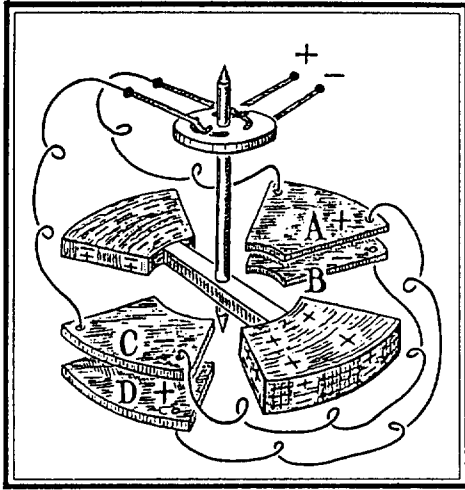


그림 21. A.N.Gubkin's electret motor

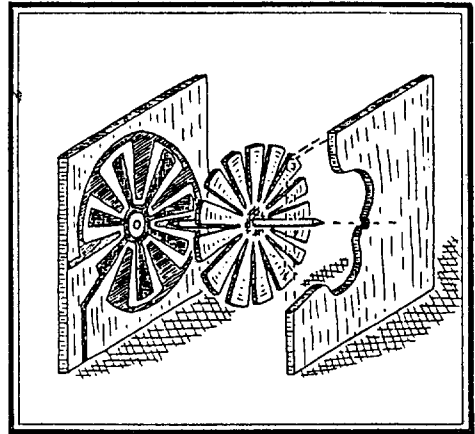


그림 23. Synchronous electret motor

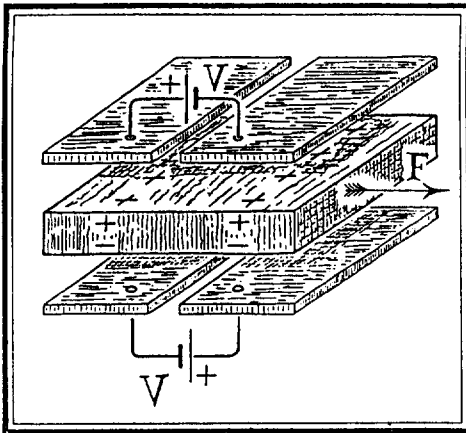


그림 22. Electret motor using slot effect

고정자사이를 빠져나오게 되면 整流子에 의해 極性이 바뀌게 되고 electret는 다시 反撥力을 받게 되며, 이렇게 해서 回轉 electret는 繼續的으로 回轉하게 된다.

그러나 electret는 적절한 遮幣를 하지 않으면 그의 極性を 잃어버리기 때문에 1970년 Jeffimenko와 Walker는 그림 22와 같은 완벽한 遮幣가 가능한, 즉 슬롯 效果(slot effect)를 이용한 모-터를 提案하였다. 즉, 하나의 electret가 각각 slot를 가진 2쌍의 電極사이에 놓여지고, 電壓이 電極에 가해지면 electret는 slot에 대해서 垂直方向으로 또는 電極板에 대해서 水平方向으로 힘을 받게 되며, 이러한 配

列로 인해 electret의 완벽한 遮幣를 얻을 수 있으며 또한 相對的으로 큰 힘을 얻을 수 있게 된다.

이외에도 그림 23과 같은 電氣時計를 위한 同期 electret motor가 最近 General Time Co.에 의해서 發表되어졌다. 이 모-터는 직경이 1 1/4inch, 두께 1/4 inch이며, 回轉子는 15개의 sector로 나뉘어진 얇은 plastic electret가 15장 積層되어 있고, 또한 이는 PCB(Printed Circuit Board)로 제작된 2개의 固定板사이에 위치해 있다. 각 固定板은 30개의 電極을 가지고 있는데, 이는 2개의 入力端子에 대해서 교대로 接續되어 있다. 이의 動作은 그림 22에서 설명한 slot effect을 利用한 모-터와 類似하지만 整流子에 의하지 않고 交流電壓에 의해서 電極의 極性的 反轉을 行하는 차이가 있을 뿐이다.

3. 靜電모-터의 開發動向[4.19.22]

이상 靜電 모-터의 開發 現況에 대하여 언급하였으나, 본 절에서는 최근 研究 開發되고 있는 靜電 모-터에 대하여 記述한다. Bollee는 超小型 電磁石 모-터는 에너지 變換 空間에서의 磁束 에너지 傳達의 減少로 인해 効率이 減少하는 반면 超小型 capacitor 및 誘導型靜電 모-터의 경우 効率が 크게 되므로 小型系에서는 靜電모-터가 더 넓게 選擇될 수 있을 것으로 指摘한 바 있다. 즉 低 torque 및 低出力이 필요한 여러 部分의 sensor 및 制御裝置와 같은 超小型모-터의 경우에 있어서는 앞에서 언급한

小型靜電모-터가 매우 有用하게 適用될 수 있을 것이다. 특히 Jeffimenko의 實驗에 의하면 electret 모-터는 最高 1 watt까지의 系에서는 매우 有用할 수 있다는 것을 알 수 있다.

현재 가장 有望한 靜電 모-터의 하나로 corona를 利用한 모-터를 들 수 있으며, 이는 다음과 같은 有效한 特性을 가지고 있다.

- ① 設計가 극히 간단하다.
- ② 所要資材費가 적게 든다.
- ③ 補修가 매우 간단하다.
- ④ 金屬材料를 거의 사용하지 않으므로서 出力/무게의 比가 매우 높다.
- ⑤ 小型으로서는 충분한 出力까지 開發할 수 있다.
- ⑥ 高速回轉이 가능하다.

靜電 모-터의 또 다른 중요한 特性은 電磁石모-터에 比해서 매우 다양한 入力으로서 動作할 수 있다는 것이다. 물론 기존의 電磁石모-터를 動作하는데 使用되어진 入力이 그대로 靜電모-터를 動作시키는 데에도 使用되어질 수 있다. 그러나 靜電모-터는 매우 높은 임피던스를 가지고 있어서 극히 적은 電流가 必要하기 때문에 다른 形態의 入力에 대해서도 動作할 수 있다.

靜電모-터를 動作시키기 위한 入力裝置으로는 첫째 capacitor를 들 수 있다. 즉, 高誘電率, 低損失의 誘電體를 갖는 capacitor는 충분한 電氣에너지를 貯藏할 수 있는 有用한 수단이 될 것이고, 또한 靜電모-터를 動作시키기 위해서 化學電池 대신에 使用되어질 수 있을 것이다. 靜電모-터를 動作시키기 위한 두번째 形態의 入力은 Zambonipile 形態의 高임피던스, 高電壓 battery이다. [4] 또한 근래에는 靜電發電機의 電源 開發에 대해서 상당한 研究가 行해지고 있다. [27,28] 마지막으로 靜電 모-터의 재미있는 形態의 入力로서는 大氣中電氣(atmospheric electric field)를 들 수 있다. 大氣電氣의 抽出은 Jeffimenko에 의해서 提案되어졌으며, 그는 實驗에서 그림 24와 같은 간단한 接地 안테나에 의해 에너지를 抽出해서 electret모-터 및 corona모-터를 作動시켰다. 이러한 實驗으로 볼 때 小型靜電모-터는 大氣中電氣로서도 作動할 수도 있음을 보여주며, 안테나의 設計方法에 따라 더 큰 靜電모-터도 作動할 수도 있는 것으로 알려져 있다. [8,29]

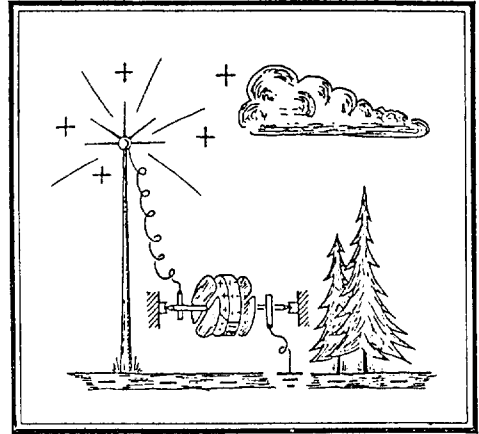


그림 24. Electret motor using atmospheric electricity

또한 最近 silicon製造工程技術을 利用한 커패시터 靜電모-터가 W.S.N.Trimmer와 K.J.Gavrielle에 의해 發表되었다. [26] 靜電모-터는 高電壓및 機械의 正確性의 不足 때문에 實際적으로는 過用이 별로 없었으나, silicon製造工程技術및 micromachining技術의 進展은 靜電모-터의 展望을 크게 變化시켰다. 즉 silicon wafer, 誘電體, 導體 및 anisotropic etching, 半導體 製造技術인 微細機械操作技術(micromachining technology)를 利用함으로써 高精度의 正確性을 가지면서도 큰 電界를 形成할 수 있음은 물론 silicon substrate위에 photolithograph된 많은 數의 導體를 micrometer 單位까지의 超微細線形으로 metalizing해서 出力을 增加시킬 수 있게 되며, silicon wafer의 表面絶緣層은 數百萬 V/cm의 電界에 견딜 수 있는 特性을 가지고 있어서 이 分野의 發展 可能性은 앞으로 매우 크다고 볼 수 있다. [25,26]

4. 結 論

靜電모-터는 磁界型 모-터에 比해 100년 이상 일찍 開發되었으나 電氣-機械 變換効率が 낮기 때문에 磁界形 모-터가 開發된 이래 使用되어지지 못했으나, 最近 科學이 發達됨에 따라 超小型의 低에너지 型모-터의 應用에 크게 脚光을 받게 됨에 따라 消耗모-터의 技術的인 面은 물론 學術的인 面에의 全般

적인 再檢討가 要求되고 있는 實情이다.

그러나 현재 靜電 모-터의 開發 研究는 극히 基礎 段階에 머물고 있는 實情이며, 또한 靜電모-터에 대한 거의 대부분의 論文이 여러가지 形態에 대한 性能 및 形狀에 대해서만 다루고 있고, 오직 몇편의 論文만이 設計의 最適化 및 理論의 解析을 보여주고 있는 實情으로 靜電모-터는 여전히 未開拓 分野이며, 앞으로 微細機械操作技術(micromachining technology)의 발달과 더불어 매우 研究할만한 價値가 있는 分野 중의 하나라고 사료된다. 그런 意味에서 불배 본 解說이 國內 靜電모-터 開發 研究의 한 契機가 되었으면 한다.

참 고 문 헌

- [1] 田 春生, "放電 및 高電壓 工學," 東明社, pp. 74-77, 1985
- [2] 日本高分子學會編, "靜電氣 handbook," pp. 510-514, 1982
- [3] 日本靜電氣學會編, "靜電氣 Handbook," pp. 651-675, 1986
- [4] Oleg D.Jefimenco, "Electrostatic Motor," Electret Science Company, Star City, 1973
- [5] A. Christenson and S.Moller, AIIA Journal, Vol. 5, pp. 1768-1783, 1967
- [6] A.D.Moore, "Electrostatics and Its Application," Electrical and Computer Engineering Department University of Michigan, pp. 131-147, 1972
- [7] L.B. Loeb, "Electrical Coronas," University of California Press, Berkley, pp. 402-406, 1965
- [8] Oleg D.Jefimenco, American Journal of Physics, Vol. 39, pp. 1139-1140, 1971
- [9] A.D.Moore, "Electrostatics," Doubleday and Company Inc., New York, pp. 104-108 and 109, 1968
- [10] R.H.Dressel, High School Science Bulletin of the New Mexico State University, Vol. 6, pp. 3-4, 1964
- [11] C.P.Gilmore and W.J.Hawkins, Popular Science Monthly, Vol. 198, PP. 95-97 and 114, 1971
- [12] B. bollee, Philips Technical Review, Vol. 30, PP. 178-194, 1969
- [13] Soon Dal Choi, "A Surface Charge Induction Motor," Institute of Plasma Research Stanford University, 1969,
- [14] P.E.Secker and M.R.Belmont, Journal of Applied Physics, Vol. 3, PP. 216-220, 1970
- [15] J.R.Melcher and G.I.Taylor, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 1, PP. 111-146, 1969
- [16] P.E.Secker and I.N.Scialom, Journal of Applied Physics, Vol. 39, PP. 2957-2961, 1969
- [17] A.N.Gubkin, "Electret," Academy of Sciences, Moscow, PP. 130-133, 1961
- [18] Oleg D.Jefimenco, Proceedings of the West Virginia Academy of Sciences, Vol. 40, PP. 345-348, 1968
- [19] Oleg D.Jefimenco and D.K.Walker, Conference on Dielectric Materials Measurements and Applications, The Institution of Electrical Engineers, London, PP. 146-149, 1970
- [20] Oleg D.Jefimenco and H.Fischbach-Nazairo, Proceedings of the West Virginia Academy of Sciences, Vol. 42, PP. 216-221, 1971
- [21] Oleg D.Jefimenco, American Journal of Physics, Vol. 39, PP. 776-778, 1971
- [22] C.P.Gilmore and W.J.Hawkins, Popular Science Monthly, Vol. 198, PP. 95-97 and 114, 1971
- [23] 양 상식, "극소형 전자 기계 장치에 관한 연구 전망," 대한전기학회 (ISSN 1013-0772), PP.14-19, Jun 1990
- [24] L.Marton, Advances in Electronics and Electron Physics, Academy Press, Vol. 26, PP. 409, 1969
- [25] A.M.Feury, T.L.Poteat and W.S.N.Trimmer, "A. Micromachined Manipulator for Submicron Positioning of Optical Fibers," IEEE Solid-State Sensors Workshop, IEEE Electron Devices Society, Hilton Head Island, South California, June 1980
- [26] W.S.N. Trimmer and K.J.Gavriel, "Design Considerations for a Practical Electrostatic Micromotor," AT&T Bell Laboratories, Holmdel, New Jersey 07788
- [27] N.J. Felici; Elektrostatistische Hochspannungs Generatoren G. Braun, Karlsruhe, 1957.
- [28] J. Hughes and P. Secker; New Scientist of Physics, Vol. 39, pp. 468-470, 1971.
- [29] W. Aston; West Virginia University Magazine, Vol. 3, No. 4, pp. 6-11, Spring 1971.