

Hybrid Step Motor의 설계 및 시작품 제작에 관한 연구

A Study on the Designing of a Hybrid Step Motor and Its Prototype

김 광 배  
한국 과학 기술 원

백 문 홍  
전기 제어 연구 실

Kwang-Bae Kim

Moon-Hong Baeg

Power Controls Lab. / Korea Advanced Institute of Science & Technology

Abstract

This paper describes the modelling method of hybrid step motors including magnetic saturation effects of iron parts and the simulation for design of a prototype. Based on the above procedure, the prototype of a step motor is produced and its characteristics are discussed.

1. 개요

본 연구에서는 하이브리드 스텝 모우터( Hybrid Step Motor )의 칫수 및 매개변수를 선정하는 일련의 설계 방법을 제시 한다.

설계 대상이 되는 스텝 모우터는 5 1/4인치 FDD 용으로 고정자는 8개의 극, 극당 5개의치( teeth ), 회전자는 50개의치, 고정자와 회전자 사이에는 영구 자석이 있는 구조로서 스텝각은 1.8° 이다.

초창기 스텝모우터를 설계, 해석 할 때에는 공극에서의 자기특성만을 고려한 선형 모델로 연구되었으나 그러한 선형 모델은 실제 측정치와 큰 차이가 있었다. 그 이유는 작은 크기에서 큰 토크를 발생시키기 위해 동작점을 철심의 포화 영역에 맞추어 설계하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 철심부에서 발생하는 포화 현상 즉, 비선형성을 하나의 동작점에 대해 선형화 시켜 자기 등가회로를 유도하고 회전자와 고정자의 임의의 치( teeth ) 모양에 따른 공극 퍼어미언스 식을 유도 함으로써 하이브리드 스텝 모우터의 선형화 모델을 구하였다.

그 모델은 17원 1차 방식이고 그 해는 뉴우톤( Newton ) 방법으로 구하였다. 공극에서의 자속 밀도가 1.6T 정도 되도록 공극의 길이를 60μm 로 하고 치의 모양을 조절하여 공극 퍼어미언스가 정현파가

되는 모우터를 설계 제작 하였다.

컴퓨터 시뮬레이션한 토오크 곡선과 측정 장비로 측정한 시작품의 토오크 곡선을 비교 검토하였다. 또한 시작품의 동특성, 스텝 오차를 검토 하였다.

2. 등가 자기 회로

하이브리드 스텝 모우터의 수학적 모델을 구하기 위해 모델링 해야 할 부분은 공극, 철심부, 영구 자석 부분이다. 스텝 모우터는 대칭성이 있으므로 축 방향으로 반쪽만 생각할 수 있다. 그림 1은 시작품의 등가 자기 회로이다.

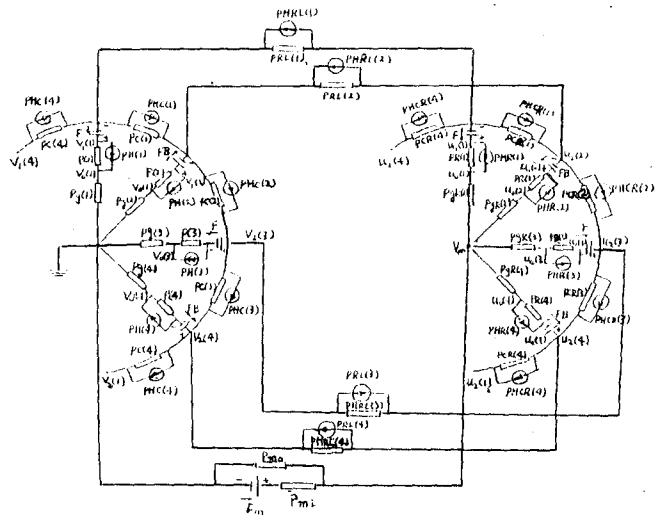


그림 1. 등가 자기 회로

Fig.1. Equivalent magnetic circuit

여기서

Pg(i), PgR(i) : 공극의 퍼어미언스

P(i), PR(i) : 고정자 극의 퍼어미언스

PH(i), PHR(i) : 고정자 극의 자속

PC(i), PCR(i) : : 요오크(Yoke)의 퍼어미언스  
 PHC(i), PHCR(i) : : 요오크(Yoke)의 자속  
 PRL(i) : : 고정자스택(stack)의 퍼어미언스  
 PHRL(i) : : 고정자스택(stack)의 자속  
 Fm : : 영구 자석의 등가 기자력  
 Pmi : : 영구 자석의 퍼어미언스  
 Pmo : : 회전자의 누설 퍼어미언스

(1) 공극 퍼어미언스 모델링

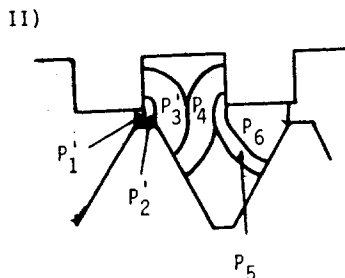
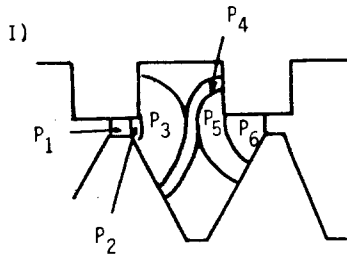
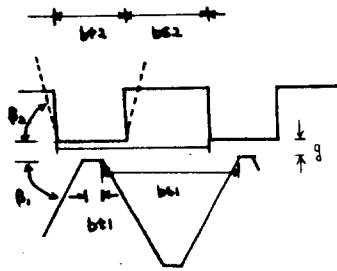
고정자, 회전자의 치(teeth) 모양 및 상대위치에 따라 공극을 통과하는 자속의 모양은 각기 다르다. 즉, 공극에서의 퍼어미언스는 회전자가 움직임에 따라 변화하게 된다. 다음과 같은 가정을 세워 각각에 대한 공극에서의 퍼어미언스를 구한다.

(가) 자속은 철심부를 직각으로 통과한다.

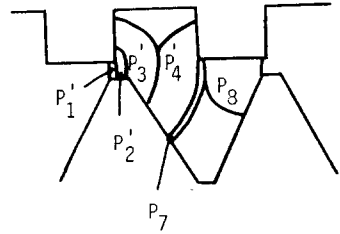
(나) 공극에서 자속은 직선이다.

(다) 공극 이외에서 자속은 원호이다.

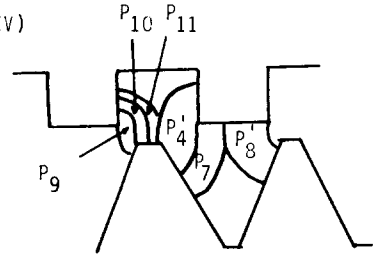
회전자가 움직임에 따라 자속의 모양은 크게 5구간에서 다르게 된다. 그 모양은 그림 2와 같다.



III)



IV)



V)

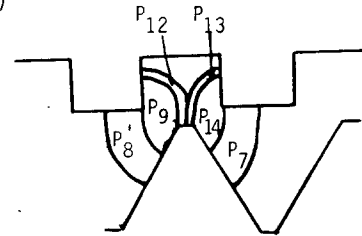


그림 2. 회전자 위치에 따른 자속의 형태  
Fig.2. Flux shape on air gap

각 자속 튜브(tube)의 퍼어미언스는 식 1에 의해 구할 수 있다.

$$P = \mu_0 \int t \cdot \frac{ds}{l} \quad (1)$$

여기서  $\mu_0$  : 공기중에서의 투자율

$t$  : 고정자의 스택 두께

$l$  : 자속의 길이

$ds$  : 자속의 미소 단면적

각 자속 튜브의 퍼어미언스는 표 1과 같다.

표 1. 자속 튜브의 퍼어미언스

Table.1. Permeance of flux tube

$P_1 = \frac{bt_1}{g}$
$P'_1 = \frac{bt_1 - \alpha + b}{g}$
$P_2 = \frac{1}{\beta l} \ln \frac{g + (b - \alpha)\beta l}{g}$

$$P_2' = \frac{1}{\beta 2} \ln \frac{g+(\alpha-b)\beta 2}{g}$$

$$P_3 = \frac{1}{\beta 1+\beta 2} \ln \frac{g+\beta s 2(\beta 1+\beta 2) / 2+(b-\alpha) \beta 1}{g+(b-\alpha) \beta 1}$$

$$P_3' = \frac{1}{\beta 1+\beta 2} \ln \frac{g+\beta s 2(\beta 1+\beta 2) / 2-(\alpha-b) \beta 1}{g+(\alpha-b) \beta 2}$$

$$P_4 = \frac{1}{\beta 1-\beta 2} \ln \frac{g+(\beta s 2 / 2-\alpha) \beta 2+\beta 1 \beta s 1 / 2}{g+\beta s 2(\beta 2 / 2+(b s 1 / 2-\alpha) \beta 1)}$$

$$P_4' = \frac{1}{\beta 1-\beta 2} \ln \frac{g+(b-\alpha+\beta s 2) \beta 1}{g+(b-\alpha+\beta s 2 / 2) \beta 1+\beta 2 . \beta s 2 / 2}$$

$$P_5 = \frac{1}{\beta 1+\beta 2} \ln \frac{g+\beta s 1(\beta 1+\beta 2) / 2-(b+\alpha) \beta 2}{g+\beta 1(b+\alpha)}$$

$$P_6 = \frac{1}{\beta 1} \ln \frac{g+(b+\alpha) \beta 1}{g}$$

$$P_7 = \frac{1}{\beta 1} \ln \frac{g+\beta 1 . \beta s 1 / 2}{g+((\beta s 1+\beta s 2) / 2-\alpha) \beta 1}$$

$$P_8 = \frac{1}{\beta 1} \ln \frac{g+\beta 1 . \beta s 1 / 2}{g}$$

$$P_8' = \frac{1}{\beta 1} \ln \frac{g+\beta 1 . \beta s 1 / 2}{g+(\alpha-(\beta t 1+\beta t 2) / 2) \beta 1}$$

$$P_9 = \frac{1}{\beta 1-\beta 2} \ln \frac{g+(\alpha-(\beta t 1+\beta t 2) / 2) \beta 1}{g+(\alpha-(\beta t 1+\beta t 2) / 2) \beta 2}$$

$$P_{10} = \frac{1}{\beta 2} \ln \frac{g+(\alpha-b) \beta 2}{g+(\alpha-(b+\beta t 1) \beta 2)}$$

$$P_{11} = \frac{1}{\beta 1+\beta 2} \ln \frac{g+(\beta s 2 / 2+b-\alpha) \beta 1+\beta 1 . \beta s 2 / 2}{g+(\alpha-b) \beta 2}$$

$$P_{12} = \frac{1}{\beta 2} \ln \frac{g+\beta 2 . \beta s 2 / 2}{g+(\alpha-(\beta t 1+\beta t 2) / 2) \beta 2}$$

$$P_{13} = \frac{1}{\beta 2} \ln \frac{g+\beta 2 . \beta s 2 / 2}{g+\beta 2(\beta s 2+b-\alpha)}$$

$$P_{14} = \frac{1}{\beta 1-\beta 2} \ln \frac{g+(b+\beta s 2-\alpha) \beta 1}{g+(b+\beta s 2-\alpha) \beta 2}$$

회전자 위치에 따른 공극의 퍼어미언스는 다음과 같다.

- (1)  $0 \leq \alpha < (\beta t 2-\beta t 1) / 2$  일때  
 $P = P_1+P_2+P_3+P_4+P_5+P_6$
- (2)  $(\beta t 2-\beta t 1) / 2 \leq \alpha < \beta s 2 / 2$  일때  
 $P = P_1+P_2+P_3+P_4+P_5+P_6$
- (3)  $\beta s 2 / 2 \leq \alpha < (\beta t 1+\beta t 2) / 2$  일때  
 $P = P_1+P_2+P_3+P_4+P_7+p_8$
- (4)  $(\beta t 1+\beta t 2) / 2 \leq \alpha < \beta s 2 / 2+b$  일때  
 $P = P_4+P_7+P_8+P_9+P_{10}+P_{11}$
- (5)  $\beta s 2 / 2+b \leq \alpha < (\beta s 2+\beta t 2) / 2$  일때  
 $P = P_7+P_8+p_9+P_{12}+P_{13}+P_{14}$

표 2는 모우터 치수이다. 이러한 구조를 가질때 시작 품의 공극 퍼어미언스는 그림 3 같다.

표 2. 모우터의 치수

$\beta t 1=0.20 \text{mm}$	$\beta 1=60^\circ$
$\beta t 2=0.62 \text{mm}$	$\beta 2=90^\circ$
$\beta s 1=1.18 \text{mm}$	$g=60 \mu \text{m}$
$\beta s 2=0.76 \text{mm}$	$t: 12 \text{mm stack}$

그 퍼어미언스 곡선을 Fourier 변환했을 때 제 2 고조파 성분은 1%, 제 3 고조파 성분은 9%, 제 4 고조파 성분은 0.6%로 거의 정현파가 된다.

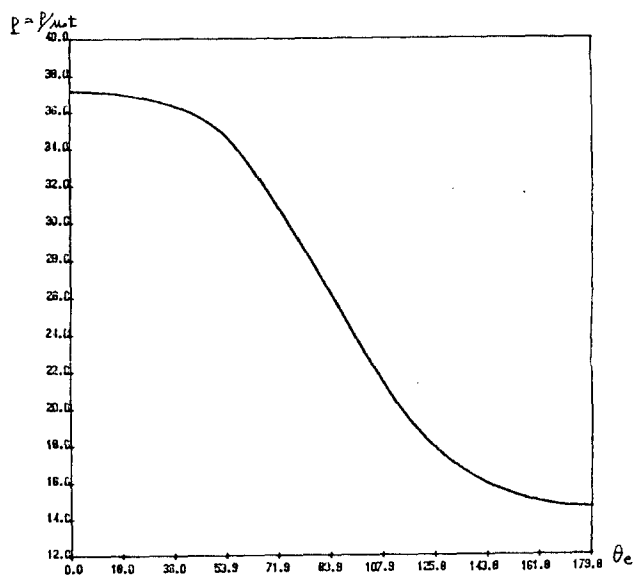


그림 3. 정규화된 공극의 퍼어미언스  
 Fig.3 Normalized air gap permeance

(2) 철심부의 모델링

그림 1 에서 보는 바와 같이 철심부는 20개 부분으로 되어 있다. 철심의 B-H 특성은 그림 4 에서와 같이 자계의 세기가 커짐에 따라 포화 현상을 나타낸다. 그러한 비선형 곡선을 동작점 Q 에 대하여 선형화 시키면 식 2와 같이 된다.

$$B = B_0 + H \left. \frac{dB}{dH} \right|_Q \quad (2)$$

식 2에 철심부의 단면적 S 를 곱하고 식을 정리하면  $\phi$ -F 관계인 식 3을 얻을 수 있다.

$$\phi = \phi_0 + F P \quad (3)$$

- $\phi$  : 철심부의 자속수
- F : 철심부에 걸리는 기자력
- P : 철심부의 퍼어미언스

선형화된 식 3을 자기 회로로 나타내면 그림 5와 같다.

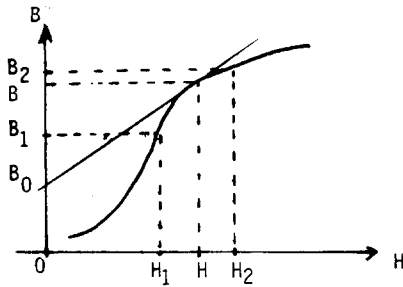


그림 4. 규초 강판의 B-H곡선  
Fig. B-H Curve of iron

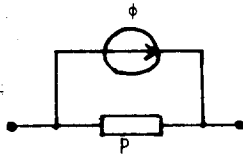


그림 5. 철심부의 등가자기회로  
Fig.5 Equivalent magnetic circuit of iron part

(3) 영구 자석의 모델링

영구 자석이 모우터에 사용될때 동작점은 영구 자석의 B-H 곡선의 2 상한에 있게 된다. 그림 6는 영구 자석의  $\phi$ -F 곡선이고  $F_m$  은 영구 자석의 등가 기자력,  $\tan \alpha$  는 자석에서 본 외부 퍼어미언스,  $\tan \delta$  는 자석의 내부 퍼어미언스,  $\ell$  은 부하 선, Q 는 동작점이다. 이와 같이 영구 자석을 자기 회로로 나타내면 그림 7과 같다.

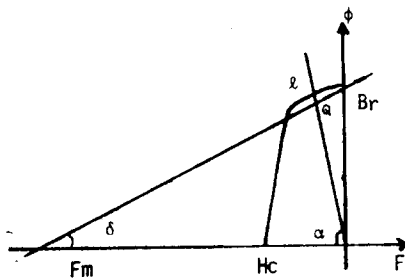


그림 6. 영구 자석의  $\phi$ -F 곡선  
Fig. 6  $\phi$ -F curve of permanent magnet.

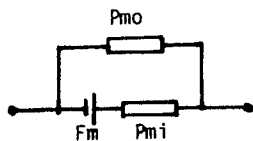


그림 7. 영구 자석의 등가자기 회로  
Fig. 7 Equivalent magnetic circuit of permanent magnet.

3. 시뮬레이션

그림 1의 자기등가 회로로 부터 마다 (node) 방정식을 세우면 식 4와 같은 17원 1차 방정식이 된다.

$$\begin{aligned}
 &V_0(1) [P_g(1) + P_g(1)I] - V_2(1) F(1) = F_H(1) + F_P(1) \\
 &V_0(2) [P_g(2) + P_g(2)I] - V_2(2) F(2) = F_H(2) + F_P(2) \\
 &V_0(3) [P_g(3) + P_g(3)I] - V_2(3) F(3) = F_H(3) + F_P(3) \\
 &V_0(4) [P_g(4) + P_g(4)I] - V_2(4) F(4) = F_H(4) + F_P(4) \\
 &U_0(1) [P_gR(1) + PR(1)I] - U_2(1) PR(1) - V_m P_gR(1) \\
 &= -F_HR(1) + F_P(1) \\
 &U_0(2) [P_gR(2) + PR(2)I] - U_2(2) PR(2) - V_m P_gR(2) \\
 &= -F_HR(2) + F_P(2) \\
 &U_0(3) [P_gR(3) + PR(3)I] - U_2(3) PR(2) - V_m P_gR(3) \\
 &= -F_HR(3) + F_P(3) \\
 &U_0(4) [P_gR(4) + PR(4)I] - U_2(4) PR(4) - V_m P_gR(4) \\
 &= -F_HR(4) + F_P(4) \\
 &V_0(1) P_g(1) + V_2(1) [PC(1) + PC(4) + PRL(1)I] \\
 &- V_2(2) PC(1) - V_2(4) PC(4) - U_2(1) PRL(1) \\
 &= -F_H(1) + F_H(4) + F_HRL(1) \\
 &V_0(2) P_g(2) + V_2(2) [PC(2) + PC(1) + PRL(2)I] \\
 &- V_2(3) PC(2) - V_2(1) PC(1) - U_2(2) PRL(2) \\
 &= -F_H(2) + F_H(1) + F_HRL(2) \\
 &V_0(3) P_g(3) + V_2(3) [PC(3) + PC(2) + PRL(3)I] \\
 &- V_2(4) PC(3) - V_2(2) PC(2) - U_2(3) PRL(3) \\
 &= -F_H(3) + F_H(2) + F_HRL(3) \\
 &V_0(4) P_g(4) + V_2(4) [PC(4) + PC(3) + PRL(4)I] \\
 &- V_2(1) PC(4) - V_2(3) PC(3) - U_2(4) PRL(4) \\
 &= -F_H(4) + F_H(3) + F_HRL(4) \\
 &U_0(1) - V_m I P_gR(1) + U_2(1) [F_P(1) + F_P(4) + PRL(1)I] \\
 &- U_2(2) PRC(1) - U_2(4) PRC(4) - V_2(1) PRL(1) \\
 &= -F_H(1) + F_H(4) - F_HRL(1) \\
 &U_0(2) - V_m I P_gR(2) + U_2(2) [F_P(2) + F_P(1) + PRL(2)I] \\
 &- U_2(3) PRC(2) - U_2(1) PRC(1) - V_2(2) PRL(2) \\
 &= -F_H(2) + F_H(1) - F_HRL(2) \\
 &U_0(3) - V_m I P_gR(3) + U_2(3) [F_P(3) + F_P(2) + PRL(3)I] \\
 &- U_2(4) PRC(3) - U_2(2) PRC(2) - V_2(3) PRL(3) \\
 &= -F_H(3) + F_H(2) - F_HRL(3) \\
 &U_0(4) - V_m I P_gR(4) + U_2(4) [F_P(4) + F_P(3) + PRL(4)I] \\
 &- U_2(1) PRC(4) - U_2(3) PRC(3) - V_2(4) PRL(4) \\
 &= -F_H(4) + F_H(3) - F_HRL(4) \\
 &V_m I P_m o + P_m i + P_gR(1) + P_gR(2) + P_gR(3) + P_gR(4)I \\
 &- U_0(1) P_gR(1) - U_0(2) P_gR(2) - U_0(3) P_gR(3) - U_0(4) P_gR(4) \\
 &= F_m I F_m
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

20개의 철심부의 자계세기를 적절히 추측하여 초기값을 설정하면 식 4로 부터 철심부 각 부분에서의 기자력 및 공극에서의 기자력을 얻을 수 있다. 이와같은 뉴우톤 ( Newton ) 방법의 흐름도는 그림 8과 같다. 공극에서의 기자력이 계산되면 식6에 의해 하이브리드 스텝모우터의 발생 토오크를 계산할 수 있다. 모우터에 인가되는 전류가 일정하다고 할때 1개의 극당 발생하는 토오크는 식 5와 같다.

$$T = 5.1 Z_s \cdot Z_r F^2 \frac{dp}{d\theta_e} \quad [\text{Kg-cm}] \tag{5}$$

여기서  $\theta_e$  : 회전자 전기각  
 $Z_r$  : 회전자 치수  
 $Z_s$  : 고정자 1개의 극당 치수  
 $p$  : 고정자 1개 치에 대한 퍼어미언스  
 $F$  : 공극에서의 기자력  
 앞에서 모우터의 1/2만 등가회로로 구성하였으므로 하이브리드 스텝모우터의 총 발생토오크는 식 6과 같다.

$$T = 10.2 \sum_{i=1}^4 ZrZs F_{gi} \frac{dP_i}{d\theta_e} \quad [ \text{Kg-cm} ] \quad (6)$$

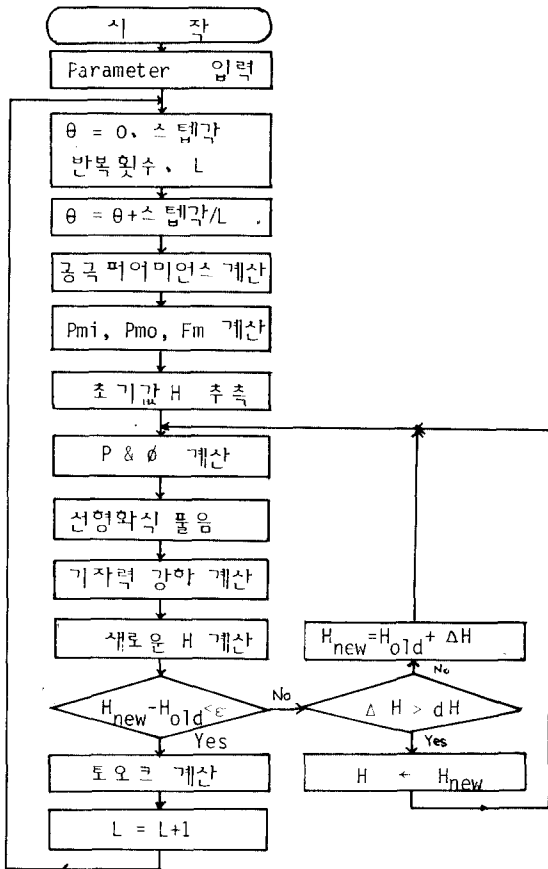


그림 8. 토오크 계산 흐름도

Fig. 8 Flow chart of torque calculation

표 3은 시작품의 설계치이다.

Table 3. Design value of a proto-type

표 3. 시작품의 설계치

공극의 작축 밀도	1.6 T
권선 수(극당)	220
인가 전압	12 Volt
인가 전류	0.16 Amp.
공극의 길이	60 $\mu$ m
토오크(1상 여자)	540 g-cm

표 3의 설계치에 의해 제작된 시작품의 정 토오크 곡선과 시뮬레이션에 의한 정 토오크 곡선의 비교는 그림 9와 같다. 2상 여자일때 정 토오크의 최대값은 600 g-cm 정도이다.

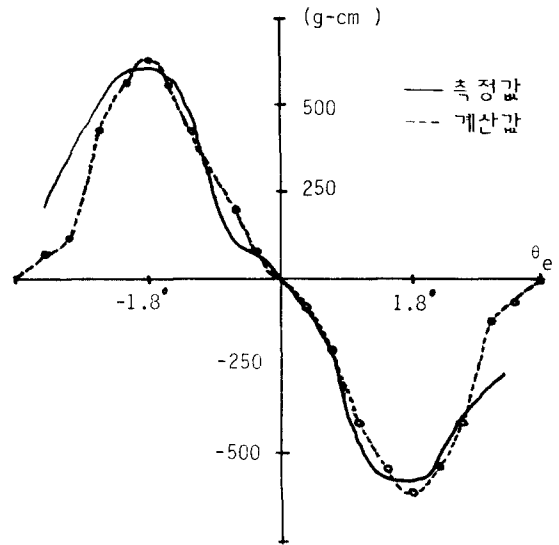


그림 9. 정 토오크 곡선

Fig. 9 Static holding torque curve

4. 스텝 모우터 시작품의 특성시험 및 검토  
시작품의 외형은 그림 10과 같다. 시작품은 5 1/4인치 FDD 용으로 제작되었다. 시작품의 특성시험 결과는 표 4와 같다.



그림 10. 하이브리드 스텝 모우터의 시작품

Fig. 10 Prototype of hybrid step motor

표 4. 시험 결과

Table 4. Test results

Seek 시간	5ms
정착 시간	45 - 60 ms
위치 오차	5% 이내(최대)
자기동 주파수	650 pps
Slewing 주파수	1600 - 1700 pps
기동 토오크	450 - 480 g.cm
최대유지 토오크	550 - 610 g.cm

시작품의 위치 오차와 동 특성 곡선은 그림 11 및

그림 12와 같다.

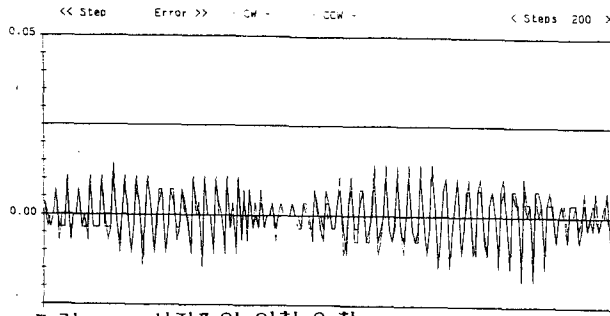


그림 11. 시작품의 위치 오차

Fig. 11 Position accuracy of prototype

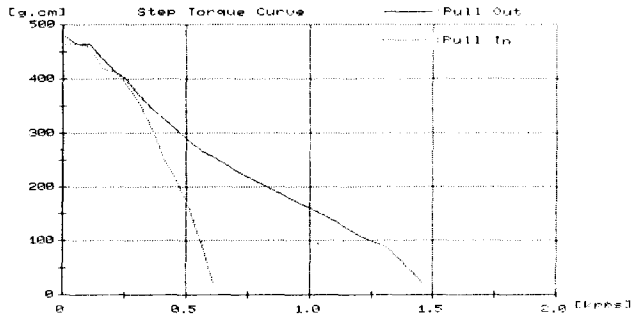


그림 12. 시작품의 동특성 곡선

Fig. 12 Pull-in and Pull out curve of prototype

## 5. 결론

철심부의 비선형 특성을 동작점에 대하여 선형화 시키는 기법과 회전자 및 고정자의 치 모양에 따른 공극 퍼미언스 계산법을 제시 함으로써 시작품 제작에 앞서 컴퓨터 시뮬레이션을 해 보는 일련의 설계방법을 제시 하였다. 제작된 시작품은 5 1/4 FDD용으로 사용 가능하다.

## 참고 문헌

- (1) H.D. Chai, "Permeance Model of Reluctance Force Between Toothed Structures", Proceedings, Third Annual Symposium on Incremental Motion Control Systems and Devices, pp. K-1 to K-12, 1973.
- (2) B.C. Kuo, Y.J. Chen, "A nonlinear Magnetic Circuit Model and Its Application to Static Holding Torque Prediction of Hybrid Step Motors", Proc. Thirteenth Annual Symposium on IMCSD, pp. 303-313, 1984.
- (3) B.C. Kuo, "Effect of Tooth Shape on the Position Accuracy of Step Motors", Proc., Twelfth Annual Symposium on IMCSD, pp. 149 -

158, 1983.

- (4) B.C. Kuo, Dan Hunter, "How to used the IBM PC For Step Motor Design and Simulation", Proc., Thirteenth Annual Symposium on IMCSD, pp. 181 - 213, 1984.
- (5) G.A. Gao, B.C. Kuo, "Permeance Model of Saturated Tooth Structure and Its Utilization in Step Motor Design" Proc., Eleventh Annual Symposium on IMCSD, pp. 233 - 240, 1982.
- (6) M.R. Harris, A. Hughes, P.J. Lawrenson, "Static torque production in Saturated Doubly-Salient Machines", Proc. IEE, Vol. 122, No. 10, Oct. 1975.
- (7) B.C. Kuo, "Theory of Applications of Step Motors", West, 1974.