

브러쉬리스 直流電動機의 코깅 토크 比較解析

吳 性 寶*

Comparative Analysis of Cogging Torque in a Brushless DC Motor

Oh Sung-bo*

ABSTRACT

This thesis describes a study on cogging torque comparative analysis of brushless DC motor, which is one of torque ripple. These features have made brushless DC motors as one of the best choices which replace conventional brush-type DC motors in servo and robotics application.

A cogging torque among the torque ripple in brushless DC motors is mainly due to the fluctuations of the field distribution which depends on the motor structure.

The purpose of this thesis is to develop mathematical analysis and the experimental method of torque capable of accurately predicting the cogging torque. In this thesis, two methods which enable us to predict the amount of cogging torque are presented. One is the mathematical analysis using the analytic solution of flux density. The second is the experimental method which measures cogging torque in order to compare the mathematical analysis.

When the two methods are compared with each other, a good agreement is obtained.

Therefore, using the above methods, we can predict the cogging torque without manufacturing the motor, and we can use the above method to design the various type brushless DC motors.

* 전기공학과

序 論

브러쉬리스 직류전동기는 직류기의 우수한 특성과 교류기의 견고함을 동시에 가지고, 회전자 위치 검출기가 내장되어 있어 속도제어 및 위치제어가 용이 하여 FA용기기, NC공작기계, 산업용 로봇과 OA기기 등에 각광을 받고 있다. 그러므로 이 전동기는 고정도의 정속도 운전 및 고정도 위치 결정의 용도로 많이 사용되고 있으며 이런 분야에 사용되는 전동기는 회전진동이 작은것이 요구되고 있다. 회전진동을 악화시키는 원인의 주된 것으로 전동기 토오크 맥동 즉 토오크리플이다'. 영구자석 브러쉬리스 전동기의 토오크 리플은 전기자의 구조와 구동방식에 의해 발생하고 일반적으로 회전자 1회전 마다 반복하여 주기적으로 변동한다. 회전 진동을 작게하는 방법중 토오크 리플을 줄이는 방법이 있으며 또한 토오크 리플의 발생 요인중에는 코깅 토오크가 있다는 회전자와 고정자 사이의 상호작용에 의해 발생하고 부하 전류와는 무관하다.^{2,3)} 그러므로 코깅 토오크의 정확한 해석과 저감 방법에 대한 정밀 회전계 해석에 관한 많은 관심을 갖게 되었으며 1970년 Konard Reichert는 공극, 철전류와 영구자석을 포함하는 장치에서 정자계 계산을 위한 수치적 방법을 제시하였고, 영구자석 동기 전동기에 적용하였다. 1975년 J. A. Wanger에 의해 브러쉬리스 직류전동기의 코깅 토오크에 대한 수치 해석법이 발표되었고, 1987년 Nady Boules는 구형과 전류를 갖는 영구자석 동기 전동기에서 코깅 토오크와 전류 토오크를 포함한 상세한 토오크 발생에 대하여 분석 하였다.⁴⁾ 이와같이 코깅 토오크의 정량적 해석은 기기의 토오크 특성을 개선 시킬 수 있을 뿐만 아니라 정

밀기기의 제어에 유효하므로, 본 연구에서는 해석 모델인 영구자석 브러쉬리스 직류전동기를 수학적 모델로 적용하여 이를 시뮬레이션 하였고 코깅 토오크 측정법을 제안하여 측정한 실험 결과와 비교 하였다.

코깅 토오크의 數學的 解析

브러쉬리스 직류전동기의 토오크 리플은 주로 자계분포의 변동과 공급전류파형에 기인하며, 고속에서 토오크 리플은 대개 시스템 관성에 의해 줄어들지만 저속인 경우, Robotics 또는 위치변환의 응용에서는 허용되지 않는 현저한 영향을 일으킨다. 특히 정밀 제어계에 이용되기 위해서는 토오크 리플로 인한 회전속도 변동을 극소화시키는 것이 요구되는데 토오크 리플을 일으키는 요인중 코깅 토오크는 외부장치로서 제어가 곤란하므로 전동기 설계시 반드시 고려하여야 하며 이와같은 기기제어에 있어 악화요인의 영향을 이론적으로 계산하는 것이 중요하다.

또한 이 토오크는 공극에서의 자속 분포와 전기자 철심의 모양에 직접적으로 관련이 있으며 이는 회전자각 위치에 따른 공극에 저장된 전체 에너지의 변화에 의해 나타낼 수 있다.⁵⁾ 해석한 모델은 영구자석 브러쉬리스 직류전동기로서 회전자 내부에 웨라이트 영구자석이 완전매입 되어 있다. 본 절에서는 코깅 토오크를 정밀하게 예견하고, 분석할 수 있는 수학적 방법을 제시하고자 한다. 코깅 토오크는 회전자각 위치에 대한 공극에 저장된 전체 에너지의 변화량을 계산하여 얻어진다.

$$T_c = D/2 \cdot \partial W / \partial l \quad (1)$$

식(1)에서는 기기의 철에 저장된 에너지를 무시하고, 회전자 위치에 따른 아주 미세한 변화를 한다고 가정한다. 그림1에서 D는 고정자의 내경이고, W 및 l은 각각 공극에 저장된 에너지와 회전자각의 위치를 나타낸다.

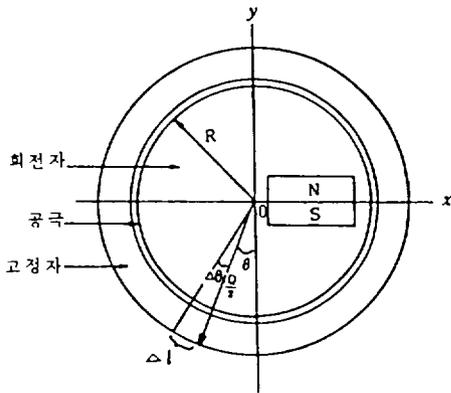


Fig. 1. Analysis model of ferrite magnet.

$$W = \int dw \quad (2)$$

$$dw = \frac{1}{2} \cdot B^2(l) / \mu_0 \cdot dv \quad (3)$$

$$dv = g \cdot dL \cdot dl \quad (4)$$

$$B_m(i) = \frac{4}{\pi} \cdot B_m \frac{1}{i^2(\theta_1 - \theta_0)} (\sin i\theta_1 - \sin i\theta_0) \quad (6)$$

여기서 $B_m = B_r \frac{\tau - 2l_1}{\tau - l_1 - l_0}$ $\tau = \frac{\pi D}{P}$ 이다.

공극에 저장된 에너지 W를 구하면 식(7)과 같다.

$$W = \int_{L1}^{L2} \int_{Y1}^{Y2} C_k \left[\sum_{i=1,3,5 \dots}^{\infty} \{B_m^2(i) \sin^2(i\alpha l)\} + \sum_{\substack{j=1,3,5 \dots \\ j=i+2, i+4 \dots}}^{\infty} \{2B_m(j) \sin(i\alpha l) \sin(j\alpha l)\} \right] dL dl$$

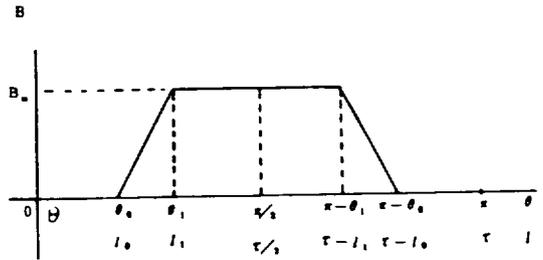


Fig. 2. Flux density distribution.

여기서 영구자석 매입형기기에 대한 공극에서의 자속 밀도 분포의 식은 식(5)와 같다.

$$B(l) = \sum_{i=1,3,5 \dots}^{\infty} B_m(i) \sin(i\alpha l) \quad (5)$$

일반적인 자속 밀도의 분포는 그림2와 같다고 가정할때 식(5)의 $B_m(i)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 &= C_k [\sum B_m^2(i) L_r \{ b_t/2 - 1/4 i a (\sin(2ia(Y_0 + a_s/2 + b_t)) - \sin(2ia(Y_0 + a_s/2))) \} \\
 &\quad + \sum B_m(i) B_m(j) L_r \{ (1/a(i-j)) (\sin((i-j)a(Y_0 + a_s/2 + b_t)) - \sin((i-j)a(Y_0 + a_s))) \} - \\
 &\quad (1/a(i+j)) (\sin((i+j)a(Y_0 + a_s/2 + b_t)) - \sin((i+j)a(Y_0 + a_s/2))) \} \} \quad (7)
 \end{aligned}$$

여기서 계수 C_k 는 다음과 같다.

$$C_k = \frac{g(1+a_0/b_t)^2}{2 \mu_0}$$

$1 + a_s/b_t$ 는 자속이 전기자 치에 집중된다고 가정한 보정계수이다.

식(1)에 식(3)과 식(5)와 그리고 식(6)을 대입하면 코깅 토크의 수식은 식(8)이며, 코깅 토크는 공극내 자기 에너지의 회전각 변위의 변화율에 의하여 계산될 수 있으므로 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$T_c = D/2 \cdot \partial W / \partial l$$

$$\begin{aligned}
 &= D/2 \cdot C_k \left[\sum_{i=1,3,5 \dots}^{\infty} B_m^2(i) \frac{-1}{4\pi a \tan \phi} \frac{\sin(2iaY_2) - \sin(2iaY_1)}{L_1} \right] L_2 \\
 &+ C_k \left[\sum_{\substack{i=1,3,5 \dots \\ j=i+2, j+4, \dots}}^{\infty} B_m^2(i) B_m(j) \left\{ \frac{1}{(i-j)a \tan \phi} [\sin((i-j)aY_2) - \sin((i-j)aY_1)] \right\} \right] L_2 \\
 &- \frac{1}{(i+j)a \tan \phi} \left[\sin((i+j)aY_2) - \sin((i+j)aY_1) \right] \left. \right\} L_1 \quad (8)
 \end{aligned}$$

여기서

$$a = P/D$$

$$L_1 = -\frac{1}{2} L_r$$

$$L_2 = \frac{1}{2} L_r$$

$$Y_0 = \frac{\Theta}{a} = 1/a \cdot P/2 \cdot \Theta_{0m} = D/2 \cdot \Theta_{0m}$$

$$Y_1 = Y_0 + a_s/2 + L \tan \phi$$

$$Y_2 = Y_0 + a_s/2 + L \tan \phi + b_t$$

이며, 본 해석에서는 스큐우가 없는 ($\rho=0$) 경우 해석 모델에 대하여 데이터를 대입하여 코깅 토크를 구하였다.

코깅 토크의 시뮬레이션

본 연구에서 사용한 브러쉬리스 직류전동기의 단면도는 그림3과 같이 회전자에 영구자석을 완전히 대입 하였으며 제원은 표 1에 나타나 있으며 앞에서 구한 코깅 토크의 식(8)에 표 1에

나타난 제원을 대입하여 코깅 토크를 구하였다.

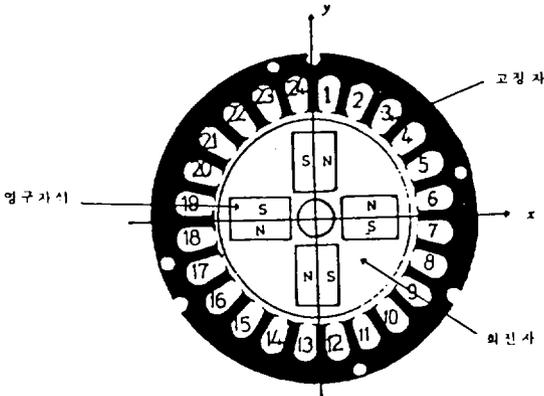
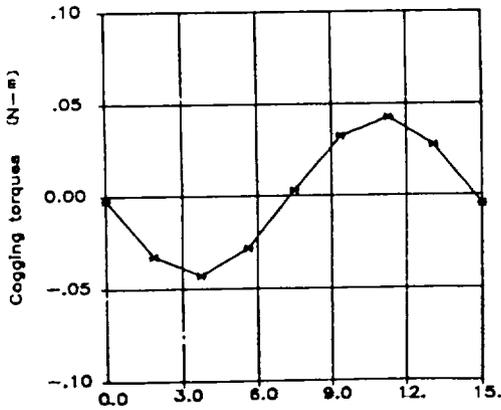


Fig. 3. Cross sectional view of brushless dc motor.

본 연구에서 적용된 전동기는 스큐우가 없는 경우($\phi=0$)로써 고조파는 11차 까지 고려하였고 회전자를 기계각으로 15도까지 1.875도 간격으로 회전시켰다.

그림 4는 영구자석 브러쉬리스 직류전동기의 코깅 토크를 계산하기 위한 알고리즘의 흐름도이며, 표 2는 코깅 토크의 계산결과이다. 그 결과에 의한 코깅 토크 곡선은 그림 5와 같다.



Cogging torques [N-m]
Fig. 5. Cogging torque curve.

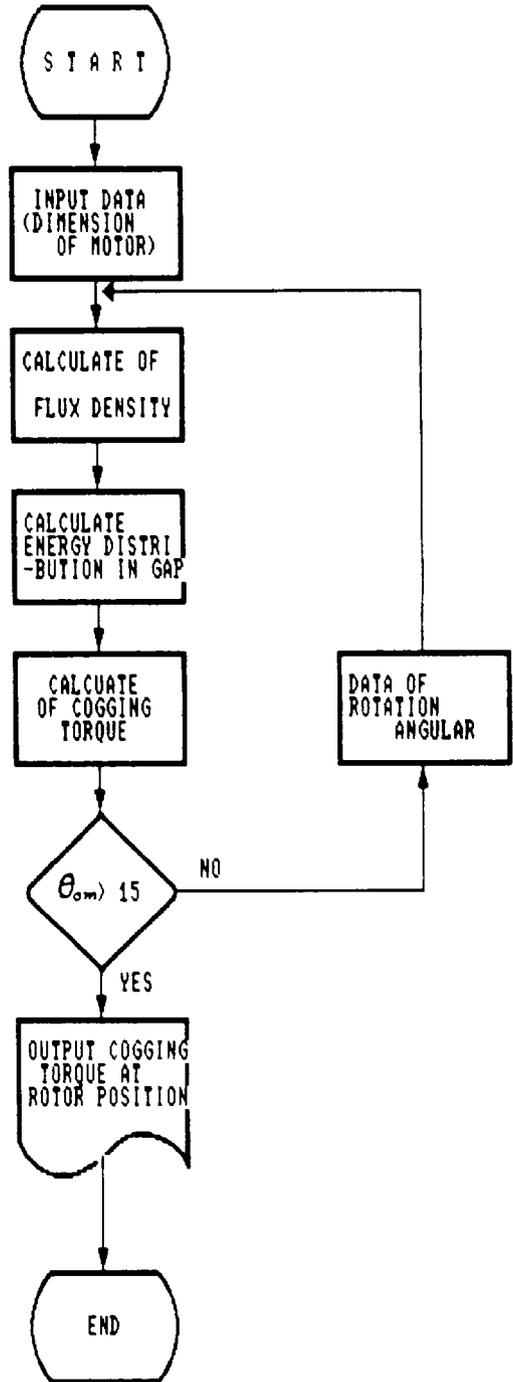


Fig. 4. Flowchart of calculating the cogging torque.

Table 1. Dimension of brushless dc motor.

Symbol and Identifier	Data
a_s : Slot opening	$2.5 \times 10^{-3} [m]$
B_r : Magnet residual induction	0.4(T)
b_r : Tooth width	$7.31 \times 10^{-3} [m]$
D : Inside diameter of the sator	$120 \times 10^{-3} [m]$
g : Air gap length	$0.5 \times 10^{-3} [m]$
P : Number of poles	4
L_r : Rotor axial length	$80 \times 10^{-3} [m]$
Q_s : Number of slots	24

Table 2 Calculated value of cogging torque.

Position # of rotation	Mechanical angle (degree)	Cogging torque in N-m
1	0.0	-2.200E-3
2	1.875	-3.245E-2
3	3.75	-4.280E-2
4	5.625	-2.784E-2
5	7.5	-3.289E-3
6	9.375	3.252E-2
7	11.25	4.281E-2
8	13.125	2.766E-2
9	15	-4.675E-3

브러쉬리스 직류 전동기의 驅動 및 코깅
토크 測定 方法

브러쉬리스 직류전동기의 驅動 시스템 構成

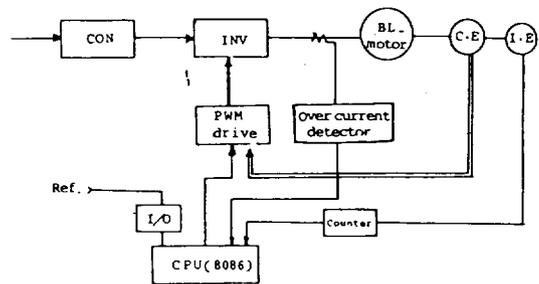


Fig. 6. Block diagram of control circuit.

본 연구에서 사용된 영구자석 브러쉬리스 직류 전동기는 3상 전압원 인버터에 의해서 구동되며 이때의 회전자 위치 검출기로 전류엔코더 (commutation encoder)를 사용하였다. 이 엔코더는 photo transistor가 있어서 회전자의 위치에 해당하는 정보를 간단하게 인버터의 각상에 보내어 인버터를 구동한다. 이것은 회전자 위치 검출기로 레졸버나 인크리멘탈 엔코더를 사용했을 경우에 회전위치 검출회로가 대단히 복잡하고 어렵다는 문제점을 쉽게 해결할 수가 있다는 장점을 가진다. 그리고 속도 제어는 PI제어에 의해 이루어지고 인버터에 흐르는 전류가 정격이상으로 흐르는 것을 방지하기 위해 전류검출기를 사용하여 정격이상으로 흐를때 인버터 각상의 transistor 베이스에 보내어진 펄스를 차단하도록 시스템을 구성하였다.

코깅 토크의 測定 方法

일반적으로 전동기의 토크 측정은 M-G set를 가지고 발전기에 연결된 부하를 가변하는 것에 의해 전동기의 토크를 측정기로 측정한다. 본 연구에 사용된 전동기는 200[V] 200[W]의 정격을 가진 영구자석 브러쉬리스 직류전동기로서 M-G set를 가지고 디지털 토크 측정기를 이용하여 토크를 측정하였다.

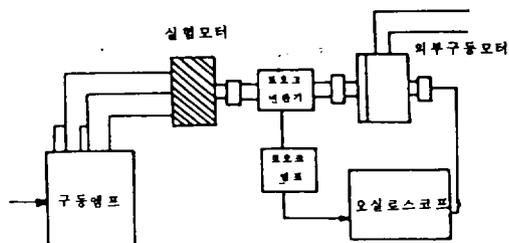
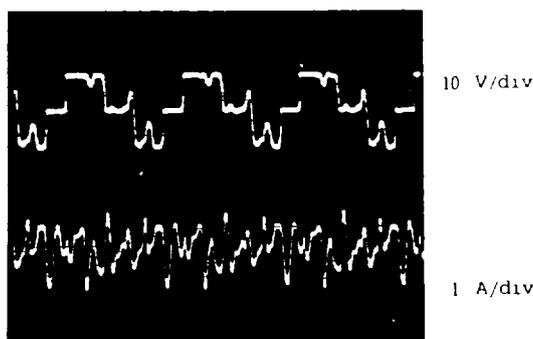


Fig. 7. Block diagram of cogging torque detecting apparatus.

그리고 코깅 토크를 측정하는 방법은 영구자석 브러쉬리스 직류전동기에 구동전원을 공급해서 극저속으로 회전시켜 코깅 토크를 측정할 수 있지만 구동전류에 의한 발생 토크 때문에 아주 미세한 코깅 토크를 측정하는데 아주 불합리하다."

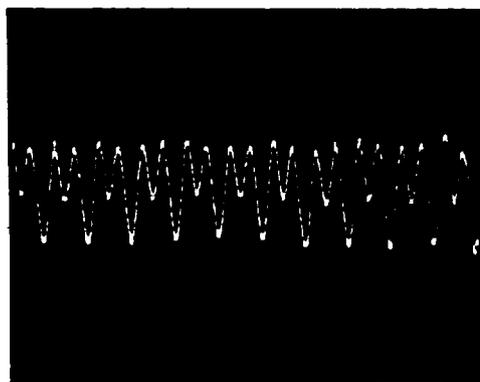
따라서 구동전원을 공급하지 않고 브러쉬리스 직류전동기를 외부구동모터에 의해 실험 모터를 정격 속도의 약 1퍼센트로 회전시켜 그림7과 같은 구성에 의해 디지털 토크 측정기의 아날로그 출력단자에서 오실로스코프로 측정한다.



상 : 5 ms/div, 하 : 5 ms/div

전압파형 전류파형

Fig. 8. Waveform of driving voltage & current.



20 mv/div 50 mv/div

Fig. 9. Waveform of torque output.

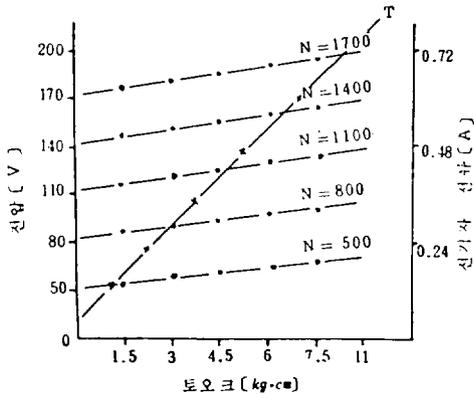


Fig. 10. Speed & torque characteristics.

그림 8은 정격전압 200[V] 정격 출력 200[W]인 영구자석형 브러쉬리스 직류전동기에 전원을 공급하였을 경우의 구동전압 및 전류파형이다. 그림 9는 부하시의 토오크 출력 파형이고, 그림 10은 토오크 대 속도 변화시의 특성을 나타낸 것이다.

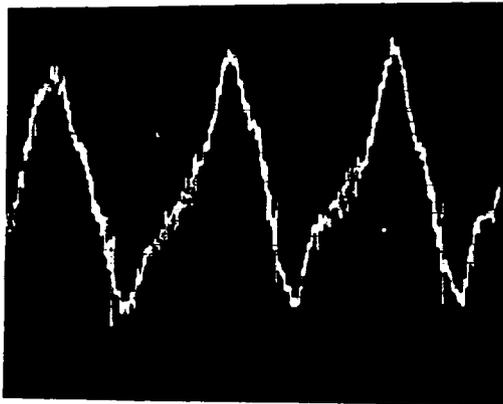


Fig. 11. Waveform of cogging torque.

그림 11은 그림 7의 실험 장치에 의해 정격전압 및 정격출력이 200[V]에 200[W]인 영구자석형 브러쉬리스 직류전동기를 정격속도 1750[rpm]의 약 1퍼센트인 20[rpm]에서 회전 시켰을 때의 코깅 토오크 파형이다.

結果 및 考察

본 연구에서 코깅 토오크의 수학적 해석을 위한 이론식을 제시하고, 컴퓨터 시뮬레이션을 했다. 1주기에 해당하는 기계각 0도에서 15도 사이를 8간격으로 등분하여 각각의 위치에서 코깅 토오크를 계산하였다.

코깅 토오크 측정을 위한 실험 방법으로 외부 구동전동기는 기동 토오크가 큰 120[V] 3[A]의 정격을 가진 직류전동기를 사용하였으며 해석 전동기의 정격회전수 1750rpm의 약 1퍼센트에 해당하는 20[rpm]으로 회전 시키면서 해석 전동기와 토오크 측정기의 검출기 및 외부 구동 전동기 축의 수평을 유지 하도록 하였다.

이때 코깅 토오크의 실측파형은 그림 11과 같으며 이때 디지털 토오크 측정기에 나타난 토오크치는 5.22×10^{-2} [N-m] 이었으며 수학적 방법에 의한 코깅 토오크의 값은 4.28×10^{-2} [N-m] 이다.

摘 要

본 연구에서는 영구자석 브러쉬리스 직류전동기의 코깅 토오크를 해석하기 위하여 수학적 해석과 실험에 의한 방법을 사용하였는데 일반적으로 실험적 해석 방법은 적용범위가 국한되어 아주

미세한 코깅 토크를 정확하게 측정하는 것이 어렵다.

그 이유는 코깅 토크를 측정하고자 하는 전동기의 정격속도의 약 1퍼센트 정도의 극저속으로 돌려져 측정하고자 하는 전동기가 외부 구동 전동기에 정확하게 일직선 상에 놓여 있는 상태에서 디지털 측정기로 측정하여야 한다.

그러나 이때 아주미세한 마찰이 존재하면 코깅 토크를 정확하게 측정하는 것이 어렵기 때문에

실제 전동기를 설계하는 과정에서는 적용하기가 어려우므로 전동기 설계시 이 방법에 의한 설계를 한다는것이 불합리함을 알 수 있었다.

따라서 본 연구에서는 수학적해석에 의한 방법을 제시하여 실험에 의한 방법과 정량적으로 잘 일치함을 알 수 있기 때문에 이방법을 이용하여 여러가지 형태의 새로운 영구자석 브러쉬리스 직류전동기 설계에 있어 코깅 토크의 정밀해석에 유효할 것으로 사료된다.

參 考 文 獻

- 1) Ernard Datvat, et al., 1985. Modeling of a Brushless DC Motor with Solid Parts Involving Eddy Currents, IEEE Trans. on Ins. Appl., Vol. IA-21, No. 1:202~206.
- 2) Doko Yasuhiko, et al., 1985. The basis and Application of Brushless Servo-Motor, Sogo Electronics Publishing Co., Tokyo.
- 3) Kenjo.T. and S.Nagamori. 1984. Permanent magnet and Brushless DC Motor, sogo Electronics Publishing Co., Tokyo.
- 4) Jaime De La Ree, Nady Boules. 1987. Torque Production in Permanent Magnet Synchronous Motor, IEEE. Trans. on Ind. appl., Vol. IA-23:15~20.
- 5) Binns, K. J. et al., 1975. Computation of Magnet Field of permanent magnet, proc, IEEE, Vol. 122, No.12:1377~1381.
- 6) Humio Tajima et al., 1987. Analysis of Cogging Torgue by Finite Element Methods, Trans of IEEE, Vol. 107D, No. 5.