

Double Cylinder Motor 설계 및 해석에 관한 연구

맹경호*, 박창순**

한국기술교육대학교 정보기술공학부

A study on the Design and Analysis of Double Cylinder motor

Kyung-Ho Maeng*, Chang-Soon Park**

School of Information Technology, Korea University of Technology and Education

Abstract - BLDC Motor has many advantages but the motor has slots in Stator like as other conventional Motors therefore cannot be eliminated torque ripple which is not acceptable for a special purpose. For high speed and high efficiency and no torque ripple is a Double Cylinder Motor suggested which has a air-gap-winding and rotating yoke with magnet. Because Airgap winding needs no slot and no ironloss is made in rotating yoke
In this paper describes design and construction and theoretical and experimental investigation of a Double Cylinder Motor.

여 효율적인 방열구조가 된다.

3) 큰 유효 공극 : Yoke에 Teeth가 없어 자기적인 인덕턴스가 낮아 전기적 시정수가 작아짐으로 인해 시스템 응답이 빠르다.

4) 토크의 선형성 : 기본적으로 DC 전동기의 동작원리와 같아 토크의 선형성 및 제어성이 우수하다.

1. 서 론

일반적인 BLDC 전동기는 다른 전동기들과 마찬가지로 전기자에 슬롯이 있기 때문에 코깁토크가 발생하고, 이는 토크리플의 가장 큰 원인이 되고 있다. 그러나 필요에 따라서는 토크리플이 없어야 하는 경우도 있으며, 토크리플을 감소 또는 제거하고자 자석에 Skew를 주거나 치면에 홈을 내는 방법 등이 적용되기도 하지만 근본적인 코깁토크의 제거를 위해서는 BLDC 전동기에서 전기자 측에 슬롯을 제거하여야 한다. 이런 면에서 Slotless BLDC Motor는 원인으로 코깁토크가 존재하지 않고 토크리플이 없는 Motor로서 각광을 받고 있다. 그러나 Slotless BLDC Motor는 Yoke가 고정되어 있고 Rotor가 회전하게 됨에 따라 원천적으로 Hysteresis 손실을 제거할 수 없으며, Inner Rotor Type이 많아 높은 회전수에서 발생하는 원심력에 내구성이 떨어진다. 이러한 단점을 개선하기 위하여 Yoke와 Magnet(Rotor부)이 함께 회전하는 Double Cylinder Motor가 있으며, Hysteresis 손실을 없애고 높은 관성 Moment 및 높은 효율을 얻고자 한다. 본 논문에서는 Double Cylinder Motor를 설계하고 제작하여 이론과 측정을 통하여 특성을 파악하고자 하였다.

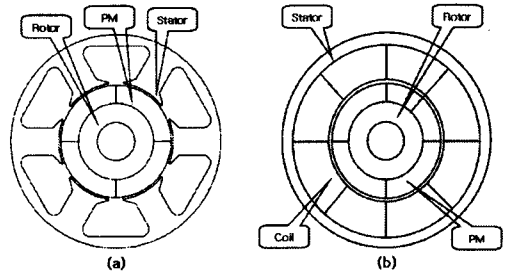
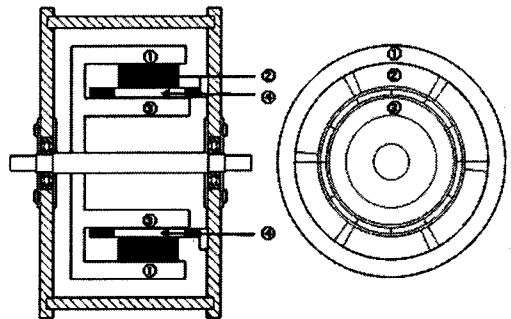


그림 1. 슬롯(a) 및 슬롯리스(b) Motor의 구조

2.1.2 Double Cylinder Motor

Slotless BLDC Motor에서 한 단계 높은 효율을 얻기 위한 Double Cylinder Motor는 그림 2와 같이 안쪽의 Magnet(Rotor부)과 Yoke를 함께 회전시킴으로써 Hysteresis 손실을 제거하여 더욱 효율을 높일 수 있는 장점이 있다[2].



① Outer Rotor ② Magnet ③ Inner Rotor ④ Coil

그림 2. Double Cylinder Motor 구조

Double Cylinder Motor는 아래와 같은 특성이 있다.

- 1) Slotless BLDC Motor의 장점을 갖추고 있다.
- 2) 영구자석을 외부회전자(전기자) 안쪽에 부착한 형태로 원심력에 견디기 쉬운 구조로 되어있어 높은 회전수에 적합하다.
- 3) 외부 회전자 및 내부 회전자 양쪽에 자석을 부착하

2. Double Cylinder Motor

2.1 Motor 특성

2.1.1 Slotless BLDC Motor

Slotless BLDC Motor는 그림 1과 같이 기존 Motor에서 슬롯을 제거함으로써 코깁토크가 근본적으로 발생하지 않고 저진동, 저소음, 고효율화가 가능하여 산업계에서 상용화 노력이 지속되고 있다. 슬롯리스 전동기는 다음과 같은 특성을 가진다[1].

- 1) 기계적 슬롯제거 : 철심슬롯을 제거하여 영구자석에 대한 자기저항을 원주방향으로 균일하게 함으로써 코깁토크가 없다.
- 2) 코일의 에폭시 몰딩 : 코일을 Yoke에 직접 부착하

여 사용할 경우 고가의 자석을 최적상태로 사용할 수 있다.

- 4) 튼튼하고 간단한 구조로 되어있다.
- 5) Yoke가 Magnet과 함께 회전하므로 Hysteresis 손이 없어 높은 회전수에서 고효율을 얻을 수 있다.
- 6) 자계와 권선을 잘 배치하면 일정한 전기적 Torque가 발생하고 정속회전을 시킬 수 있다.
- 7) 희토류 자석을 사용할 경우 출력비를 높일 수가 있다.
- 8) 높은 회전력과 높은 관성 Moment를 얻을 수 있다.

2.2 Double Cylinder Motor 설계

모터 설계를 위하여 유한요소프로그램을 이용하였다. 기본사양은 표 1과 같으며 코일 Turn수 및 외형크기에 따라 해석, 설계하였다.

표 1. 모터 기본사양

입력전압[V]	24	전류[A]	10±10%
토크[Kg.cm]	4	코일절연저항[MΩ]	1
회전수[rpm]	2900±8%	권선결선방식	Y결선

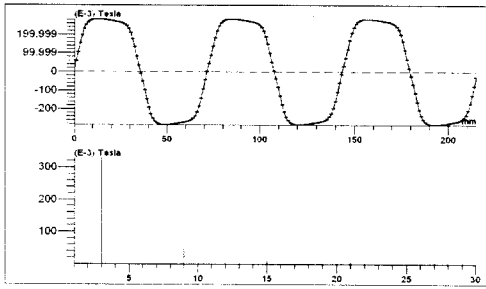


그림 3. 공극자속밀도 및 스펙트럼 분석(2900[rpm])

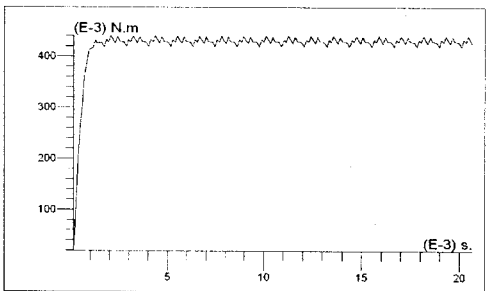


그림 4. 토크 그래프(2900[rpm])

해석결과 그림 3,4와 같이 공극자속밀도는 0.2363[T], 기계적 Torque는 4.34[kg·cm]로 나타났다. 실제 모터 제작 시 손실을 고려하여 실제 사양보다 약 10% 높게 설계하였다[3].

1) 1상에 대한 유기기전력

$$E = \sqrt{2} \pi f k_w u \Phi_p [V] \quad (1)$$

- ※ 회전수 2900[rpm] $f = 145 [Hz]$
- ※ 권선계수 $k_w = 0.86603$ ※ $w = 50 [Turn]$
- ※ Back E.M.F = 6.76[V]

2) 극당 발생자속

$$\Phi_p = \frac{E}{\sqrt{2} \pi f k_w u} = \frac{6.76}{\sqrt{2} \pi \times 145 \times 0.8660 \times 50} = 2.423 \times 10^{-4} [wb] \quad (2)$$

3) Pole Pitch

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D_l}{2P} = \frac{\pi \cdot 76.5}{6} = 40.05 [mm] \quad (3)$$

$$l = 30 [mm]$$

4) 공극자속밀도

$$B_g = \frac{\Phi_p}{\tau_p \cdot l} = \frac{2.423 \times 10^{-4}}{40.05 \times 10^{-3} \times 30 \times 10^{-3}} = 0.2016 [T] \quad (4)$$

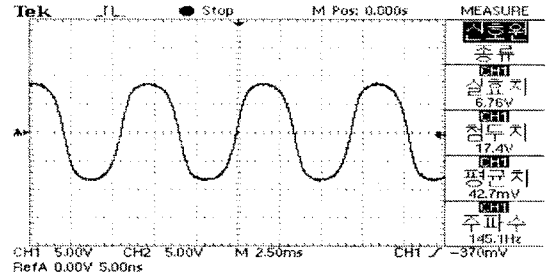


그림 5. Back-EMF Test 결과(2900[rpm])

표 2. 모터 설계 Parameter

공극자속밀도[T]	0.2016	상전압[V _{rms}]	6.76
Pole Pitch[mm]	40.05	전류 [A _{rms}]	10
극당발생자속[Wb]	2.423×10^{-4}	토크[kg·cm]	4.34
권선계수	0.8660	사용권선	AWG17
상당도체수[Turn]	50	유효공극[mm]	7.75

표 2는 모터 설계에 이용된 parameter를 나타내며, 그림 6,7은 제작된 Motor의 실제 사진이다.

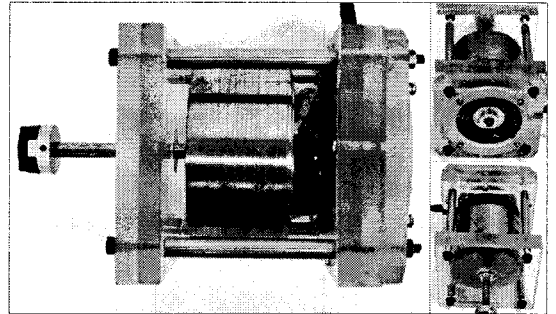


그림 6. 제작된 Double Cylinder Motor

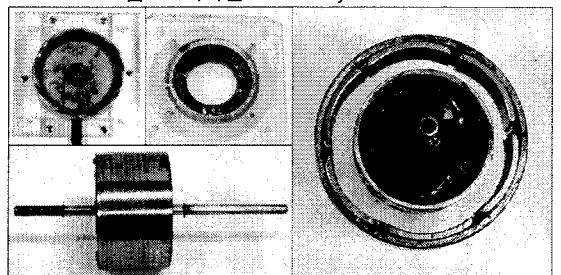


그림 7. 모터의 내부구조

2.3 Motor Test 결과

제작된 Double Cylinder Motor에 대한 부하 및 무부하 Test 결과는 그림 8,9로 나타내었다. 부하 Test 결과 Torque는 2900[rpm]에서 4.02[kg·cm]으로 나타났으며, 효율은 66.05[%]로 측정되었다. 최대 효율은 3600[rpm]에서 82.86[%]로, 이때의 Torque는 2.54[kg·cm]이었다.

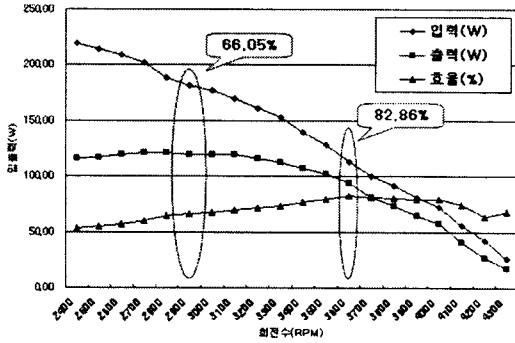


그림 8. 부하 Test 특성곡선

또한 무부하 Test 결과 손실은 2900[rpm]에서는 9.59[W], 3600[rpm]에서는 12.92[W]로 측정되었다. 각 결과에 대한 손실계산은 식 5-8과 같다.

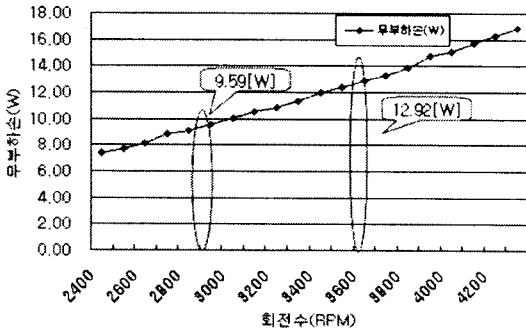


그림 9. 무부하 Test 특성곡선

1) 부하 Test 결과 2900[rpm]에서의 입력전류는 7.55[A]였으며, 상당저항은 0.1903[Ω]으로 측정되었다. 부하손의 대부분은 동손이므로 손실은 식 5와 같이 계산할 수 있다[3].

$$P_{CU} = I_{ac}^2 \times R \times (2Phase) \quad (5)$$

$$= 7.55^2 \times 0.1903 \times 2 = 21.68 [W]$$

2) 무부하 Test결과 2900[rpm]에서 손실은 9.59[W]로 측정되었다. 무부하 손실에는 철손, 마찰손, 풍손 등이 있으며 철손이 큰 비중을 가진다.

$$P_{notload} = 9.59 [W] \quad (6)$$

3) 인버터 손실은 대부분 FET 손실이므로 FET의 R_{DS} 저항에 의한 손실이다. 인버터 손실은 식 7과 같이 계산되었다.

$$P_{FET} = I_{ac}^2 \times R_{DS} \times (2Phase) \quad (7)$$

$$= 7.55^2 \times 0.11 \times 2 = 12.53 [W]$$

4) 기타 손실로 발생된 부분은 제어회로손실, 전원저항,

구동드라이브와 권선과의 접촉저항 등에 의해 발생되며 손실은 아래와 같이 측정되었다.

$$P_{etc} = 17.69 [W] \quad (8)$$

각 손실에 대하여 2900[rpm]을 기준으로 입력과 출력에 관계를 그림 10에 나타내었으며, 회전수에 따른 효율, 동손, 무부하손, 인버터손 및 기타 손실 관계 그래프를 그림 11에 도시하였다.

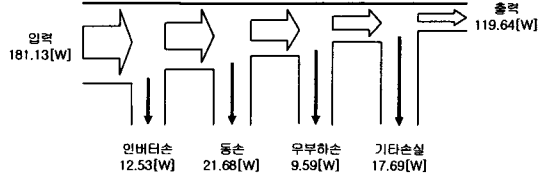


그림 10. 2900[rpm]에서의 손실 입출력관계

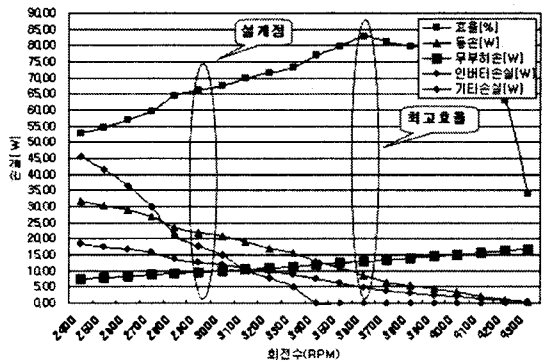


그림 11. 회전수에 따른 손실 그래프

이론적으로 최대 효율은 철손과 동손이 같은 지점에서 형성되나, 무부하 및 부하 테스트가 동일한 상태에서 Test가 불가능하여 약간의 오차가 발생되었다. 동손과 철손이 같은 지점은 약 3450[rpm]에서 형성되었다. 식 9,10 참고[4].

$$\eta = \frac{VI - (R_{CU}I^2 + P_{Fe})}{VI} = 1 - \left(\frac{R_{CU}I}{V} + \frac{P_{Fe}}{VI} \right) \quad (9)$$

효율이 최대가 되는 전류 I를 구하기 위하여

$$y = \frac{R_{CU}I}{V} + \frac{P_{Fe}}{VI} \quad \text{라 놓고,} \quad (10)$$

$$\frac{dy}{dI} = \frac{1}{V} \left(R_{CU} - \frac{P_{Fe}}{I^2} \right) = 0 \quad \text{이라고 하면,}$$

$$R_{CU}I^2 - P_{Fe} = 0 \quad , \quad R_{CU}I^2 = P_{Fe}$$

2.4 해석결과에 따른 Motor 특징분석

2.4.1 자기인덕턴스

일반적으로 슬롯이 있는 경우 출력이 증가할수록 자기인덕턴스가 증가한다. 슬롯형과 슬롯리스형의 자기에너지는 식 11,12로 구할 수 있다.

$$\text{슬롯리스 Type : } W_L = \frac{1}{2} H_L B_L = \frac{1}{2} \mu_0 H_L^2 \quad (11)$$

$$\text{슬롯 Type : } W_L = \frac{1}{2} \mu_0 \left(\frac{i}{b_n} \right)^2 \quad , \quad b_n : \text{슬롯의 폭} \quad (12)$$

$$\text{여기서 } H_L = \frac{i}{b_n} \quad \text{된다.} \quad (13)$$

슬롯이 있을 경우 자계강도 (i/b_n)는 슬롯의 폭(b_n)은 고정되어 있으므로 전류가 증가하면 커지게 된다. 따라서 식 12로부터 자계에너지도 증가하게 되고, 자기인덕

턴스도 증가하는 특성을 갖는다.

$$L_{self} = \frac{2W_L}{f^2} \quad (14)$$

그러나 Double Cylinder Motor는 식 11로부터 슬롯이 없으므로 자계강도 H_L 는 항상 일정하다. 그러므로 슬롯형에 비하여 전류가 증가되어도 자기 인덕턴스는 증가되지 않음을 알 수 있다.

그림 12는 드라이브에서 모터에 인가된 전압파형이다. 인가전압은 Trapezoidal 방식이며, 자기인덕턴스의 영향이 적음을 육안으로 알 수 있다.[5].

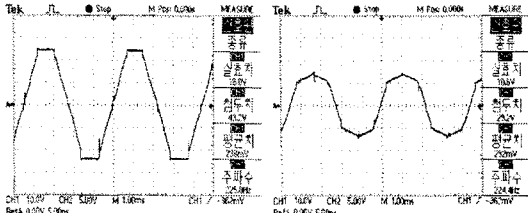


그림 12. 선간전압(왼쪽) 및 상전압(오른쪽) 파형

2.4.2 코킹 토크 리플 감소

그림 13은 슬롯리스형의 Double Cylinder Motor와 일반적인 슬롯형 BLDC 전동기의 자속밀도 분포를 보여준다. 시뮬레이션 결과와 같이 슬롯리스형은 슬롯형에 비해 자속밀도가 매우 고르게 분포되어 있어, 그림 4와 같이 토크리플이 저감됨을 알 수 있다. 토크리플은 식 14와 같이 계산할 수 있다[6].

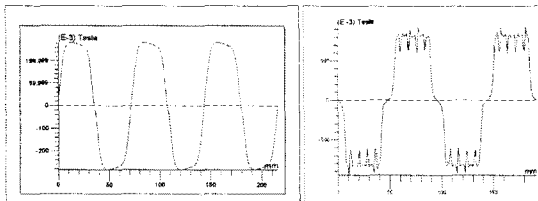


그림 13. 슬롯리스형과 슬롯형의 자속밀도 분포

$$\begin{aligned} \text{Torque RF} &= \sqrt{\left(\frac{T_{RMS}}{T_{Mean}}\right)^2} - 1 \\ &= \sqrt{\left(\frac{0.4249}{0.4229}\right)^2} - 1 = 0.097 \end{aligned} \quad (14)$$

2.4.3 회전수에 따른 토크의 선형성

그림 14는 회전수에 따른 토크특성 그래프이다. DC 전동기와 마찬가지로 Double Cylinder Motor는 회전수가 증가함에 따라 선형적으로 토크가 감소하는 특성을 가진다.

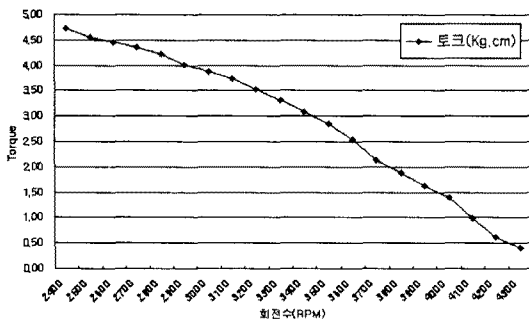


그림 14. 회전수에 따른 토크곡선

2.4.4 철손 감소

철손 중 Hysteresis 손은 식 15과 같이 주파수가 증가할수록 손실이 증가하게 된다[5].

$$P_h = K_h B_{max}^2 f \quad (15)$$

B_{max} : 최대자속밀도, K_h : 재질에 따른 상수

Double Cylinder Motor는 Magnet과 Yoke가 함께 회전함으로 Hysteresis 손실이 존재하지 않아 높은 회전수에서 높은 효율을 얻을 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 기존의 Slotless BLDC Motor가 가지는 Hysteresis 손을 저감시키고 효율을 높이기 위하여, 두 개의 회전자를 가지는 Double Cylinder Motor를 설계하고 제작하여, 그 특성을 해석하였다.

2.1절에서 언급한 것과 같이 Double Cylinder Motor는 Slotless BLDC Motor의 특성을 그대로 가지면서 Yoke와 Magnet(Rotor)이 함께 회전함에 따라 Hysteresis 손을 원천적으로 제거하고, 높은 관성 Moment를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

또한, 특성 Test 결과 기존의 Motor에 비하여 진동, 소음이 저감됨을 알 수 있었으며, 기존의 BLDC Motor에 비하여 높은 효율을 보였다.

측정에 사용된 Model은 1차 시작품으로 다음 제작 시에 설계 치와 맞는 크기의 Magnet과 Yoke의 사용, 기계적으로 안정된 제품을 제작한다면 더욱 높은 효율을 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 또한, Magnet이 현재 외부 회전자에만 부착되어 있으므로 안쪽 회전자에 동일하게 자석을 부착하여 그 효율을 극대화 하고, 유효 공극을 좀 더 최적화시킨다면 더욱 높은 특성향상이 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 홍선기, 천장성, "Analysis of the Characteristics for slotless type BLDC motor", 대한전기학회, 2003
- [2] Jai Chun Chang, "Theoretische und experimentelle Untersuchungen an einem elektronisch kommutierten Gleichstrom-Doppelzylinderlaufermotor", Thesis TU Berlin 1984.
- [3] 안영일, 박창순, "자동차 Cooling Fan 구동용 motor에 BLDC Motor 적용에 관한 설계해석 및 특성연구", 한국기술교육대학교논문지, 2004.
- [4] 박창순 "전기기기", 한국기술교육대학교, 1999.
- [5] Paresh C, Sen, 신대철외, "전기기가공학", Wiley, 1998.
- [6] J.R Hendershot Jr, Tje Miller, "Design of Brushless Permanent-Magnet Motors", Clarendon Press, 1994.
- [7] Richard Wolfson, Jay, "일반물리학", 탐구당, 1994.
- [8] Duane C. Hanselman, "Brushless Permanent-Magnet Motor Design", McGraw-Hill, Inc, 1994.
- [9] Nasar, S.A, "Permanent Magnet, Reluctance, and Self-Synchronous Motors", Boca Raton : CRC, 1993.
- [10] Thmas J. Sokira and Wolfgang Jaffe, "Brushless DC Motors - Electronic Commutation and Controls", TAB Books Inc, 1989.
- [11] 大川光吉 著, 원종수, "페라이트 자석회전기의 설계", 동일출판사, 1995.