

영구자석 오버행 구조를 가진 소형 BLDC 모터의 2차원 해석 접근 방법

(2D Analysis Approach Method of a Small BLDC Motor Having Permanent Magnet Overhang Structure)

김희천* · 정태욱**

(Hoe-Cheon Kim · Tae-Uk Jung)

Abstract

This paper deals with the characteristic analysis of small power brushless DC (BLDC) motor considering the rotor magnet overhang flux. In the driving characteristics analysis using 2D FEA (Finite Element Analysis), the rotor magnet overhang effect can't be considered and it should be neglected. To consider rotor magnet overhang effect, 3D FEA should be required. But 3D FEA requires very long calculation time even though the high specification computer is used. In this paper, the 3D electromagnetic model of BLDC motor is approximated as the 2D electromagnetic model considering overhang effect. In this paper, the concept of overhang coefficient is applied, and the coefficient according to load torque variance is deduced.

Key Words : BLDC (Brushless DC) Motor, FEA (Finite Element Analysis), Overhang Coefficient

1. 서 론

BLDC 모터는 소형모터 영역에서 비교적 큰 토크를 얻을 수 있고 속도 제어등의 가변속 제어가 용이하며, 브러시가 없어 반영구적으로 사용 가능하다. 또한 고효율, 저소음의 성능적인 장점으로 인해 최근 각 분야에서 유도전동기와 직류전동기를 대체하고 있으며, 특

히 가전기기 및 오토모바일 등에 다양하게 대체되어 에너지효율 향상에 기여하고 있다. 현재까지 소형 모터로서는 다양한 모터들이 제시되어 있고 예전에는 구동소자의 가격 때문에 주로 상용 전원용 단상 모터 적용에 대해 고민하여 왔다. 하지만 최근에는 구동소자의 저가화와 반도체 소자, 고성능 마이크로프로세서의 급속한 발전에 따른 제어기술의 발달로 많은 성능 개선이 이루어져 경량화, 고속화로 인해 3상 BLDC 모터가 가장 경제적이면서도 효율적인 기술안으로 제시되고 있다.

특히 소비전력 저감 및 에너지절약 차원에서 BLDC 모터의 적용은 매우 효과적이기 때문에, 에너지 수요 관리 정책의 규제에 대응할 수 있다.

* 주저자 : 경남대학교 공대 전기공학과 박사과정

** 교신저자 : 경남대학교 공대 전기공학과 조교수

Tel : 055-249-2628

E-mail : tujung@kyungnam.ac.kr

접수일자 : 2012년 4월 20일

1차심사 : 2012년 4월 24일

심사완료 : 2012년 6월 4일

본 연구에 사용된 BLDC 모터는 구조적으로 영구자석이 고정자의 적층길이 보다 긴 오버행 구조를 가지고 있다. BLDC 모터의 설계시 보통 오버행 길이는 계자의 유효자속을 증가와 엔드턴에 의한 모터 내부구조의 공간 활용을 극대화하기 위해 1차측 코어 적층길이의 1.2~1.4배 정도로 채택하고 있다[1].

일반적으로 전동기 설계하기 전이나 기존에 개발된 전동기의 특성을 분석하기 위하여 수치해석에 의한 방법이 널리 이용되고 있다. 또한 전동기를 2차원으로 근사하여 계산하는 2차원 유한요소법이 학계나 산업계에서 보편화되어 있다.

하지만 영구자석 오버행의 영향은 구조적으로 3차원 해석을 수행이 필요하다. 3차원 유한요소법, 3차원 등가자기회로방법 및 3차원 공간고조파법등을 이용한 영구자석 오버행 특성을 해석한 연구는 많이 되어왔다. 이러한 이유는 비대칭적이거나 복잡한 구조를 갖는 전동기의 경우에는 2차원 방식으로는 정확하게 계산해 낼 수 없기 때문에 3차원 방식을 사용하게 된다.

3차원 해석방법은 미지절점수의 증가로 인하여 계산시간이 많이 걸리고, 그에 따른 메모리 증대가 요구된다. 또한 회전자 이동시 요소를 재분할해야 하는 등의 단점을 가지고 있다[1-5].

본 논문에서는 유한요소 특성해석에 있어 3차원 방식의 단점과 2차원 방식에서 영구자석 오버행의 구조적 해석 단점을 개선하고, 오버행 구조의 특성해석을 쉽게 접근하여 적용 및 활용할 수 있는 기법을 제안하였다.

이 기법은 최적화 설계를 위한 많은 특성계산 해석 시간을 단축하기 위하여 2차원 해석을 사용 하였으며, 오버행에 따른 유효자속량을 고려하여 오버행계수를 산정하고 3차원 해석모델을 2차원 등가화를 가능하게 하여 실험하였다.

2. BLDC 모터 구조 및 특성식

2.1 BLDC 모터의 구조

그림 1은 본 연구에서 사용된 BLDC 모터의 실제 모델과 3D 모델링 형상을 보여준다. 사용된 BLDC

모터의 영구자석은 링형 Ferrite로 자극 전체가 원주방향으로 균일하게 위치되어 있으나, 영구자석 내측에는 비자성체 재질로 구성되어 있다. 또한 회전자 영구자석의 축의 길이는 8[mm], 고정자는 5[mm]로 구성되어 있다. 1.6배의 크기로 회전자의 영구자석의 축이 높은 오버행구조로 되어 있으며, 6극 12슬롯으로 3상 120도 통전 방식의 내전형이다. 또한 고정자의 권선은 집중권 방식으로 결선되어있다. 표 1은 본 연구에 사용된 BLDC 모터의 제원을 나타냈다.

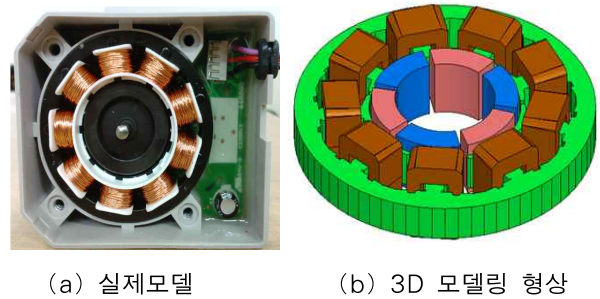


그림 1. 영구자석 오버행 BLDC 모터 구조
Fig. 1. The structure of magnet overhang BLDC motor

표 1. BLDC 모터의 설계 사양
Table 1. The specification of BLDC motor

구분	항목	설계 값	단위
사 양	정격출력	2.1	[W]
	정격전압	15	[V]
	정격회전속도	1580	[rpm]
	정격토크	0.013	[Nm]
	상수	3상	
	극수	6극	
	슬롯수	9슬롯	
회전자	외경	23.25	[mm]
	내경	13.95	[mm]
	영구자석 두께	8	[mm]
고정자	외경	48	[mm]
	내경	24	[mm]
	적층	5	[mm]

2.2 BLDC 모터의 수학적 모델링

BLDC 모터의 동작특성을 이해하는 가장 빠른 방법은 “Speed-Torque” 곡선을 이해하는 것이다. BLDC 모터의 특성곡선을 이해하고 유추하기 위한 수식들을 살펴보면 다음과 같다. 일정 속도에서 발생토크와 전류 사이에는 다음과 같은 방정식이 성립한다[2].

$$P_{out} = EI = \omega_m T \quad [W] \quad (1)$$

여기서 E는 선간 역기전력이고 I는 공급전류이다. 역기전력 E는 다음과 같이 역기전력 상수와 회전속도로 표현된다.

$$E = \frac{P}{a} \cdot Z \cdot \Phi \cdot \frac{N}{60} = k_E \omega_m \quad [V] \quad (2)$$

여기서 ω_m 은 각속도를 나타내고 $k_E [V \cdot s/rad]$ 는 역기전력 상수를 나타낸다.

식 (1)과 (2)에 의해서 다음과 같이 전류에 대한 토크 식을 표현할 수 있다.

$$T = \frac{Z}{2\pi} \frac{P}{a} \Phi I = k_T I \quad [N \cdot m] \quad (3)$$

$$T = T_{eff} + T_{loss} \quad (4)$$

즉, 토크는 전류에 비례한다. 식 (3)의 비례상수 $k_T [N \cdot m/A]$ 를 토크 상수라 한다. 이상적인 경우 $k_E = k_T$ 이다.

외부 공급 전압 V_s 는 역기전력 E와 전동기 권선에 서의 전압 강하와 동일하며 이는 식 (5)와 같다. 식 (5)에 식 (2)와 (3)을 대입한 식 (6)으로부터 속도-토크 특성곡선을 얻을 수 있다.

$$V_s = E + RI \quad (5)$$

$$V_s = k_E \omega_m + R \frac{T}{k_T} \quad (6)$$

3. 유한요소해석

3.1 유한요소법 이용

본 논문에서는 BLDC 모터의 전자기구조 분석 및 출력특성 비교를 위하여 유한요소법을 이용하였다. 유한요소법에 의한 전동기의 특성과 결과는 그 해의 오차가 크지 않다고 하여 설계의 근거자료로 이용되고 있다.

기존의 방사자속형 회전기의 경우, 계산시간 단축 및 모델링의 간편성 등의 이점으로 2차원해석이 주로 사용되어져 왔다. 그러나 2차원 유한요소해석의 경우 단면의 수직방향으로 기하학적, 물리적 양이 일정하다는 조건이 필요하고, 영구자석 오버행을 가진 BLDC 모터는 구조적 특징으로 2차원 유한요소해석에 어려움이 존재하기 때문에 3차원 유한요소해석 기법이 사용되어진다[4-5]. 하지만 3차원 유한요소해석 기법은 해석시간이 많이 걸리므로 오버행 계수를 산정하여 2차원 유한요소해석 기법을 사용하여 실험하였다.

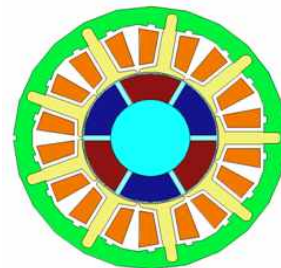


그림 2. BLDC 모터의 2차원 모델링
Fig. 2. 2-dimensional modeling of BLDC motor

3.2 오버행계수 산정

오버행 구조의 BLDC 전동기의 3차원 모델을 2차원 등가화 모델로 표현하기 위해 적층 구조에 따라 인자를 선정하였으며, 그림 3과 같이 표현하였다.

이와 같이 영구자석 오버행 구조는 동일한 축방향 길이의 단부권선에 의한 유효 자속량을 보다 더 확보할 수 있으므로 출력 향상이 가능하다[3]. 2차원 등가화 모델로 표현하기 위해 영구자석 오버행에 따른 유

효 자속량의 비를 산출하여 해석을 가능하게 하였다.

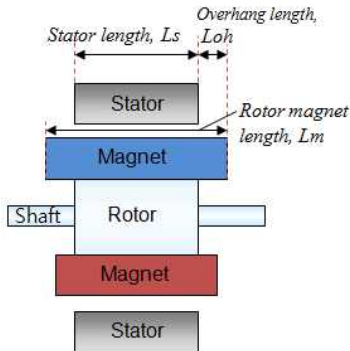


그림 3. BLDC 모터 단면도 및 오버행 형태
Fig. 3. Cross sectional view of BLDC motor and overhang

오버행계수를 산출하기 위해서 실험적 결과와 2차원 해석결과를 비교하였다. 또한 해석상의 편의를 위하여 자기회로의 자속밀도 및 자계가 균일하고, 그 단면적 및 길이도 일정하며 자성체의 자기특성도 선형적이라고 가정하였다. 그림 4에서 비교결과 영구자석 오버행에 따른 유효자속량의 차이만큼의 오차가 발생한다. 그리고 2차원 해석에서의 유효공극 자속 결과특성을 확보하여 특성곡선을 그렸다. 그 결과를 그림 5에서 확인할 수 있다. 이 유효공극 자속을 근거로 측정치와 해석치의 오차 원인인 오버행 L_{oh} 에 따른 프링징 효과 (Fringing effect) 등의 유효자속량 값을 유추하였다. 이 유추방법은 토크 오차 성분만큼의 자속량을 추출하였으며, 그 결과 선형적인 특성으로 그림 6과 같은 유효자석 성분의 오버행 계수가 산출되었다.

오버행 계수 K_{oh} 는 3차원 해석모델을 2차원 등가화를 가능하게 만들어주는 계수로서, 2차원 해석시 식 (7)과 같이 사용된다.

$$B_m = \frac{\Phi_{M2D}}{A_M} \times K_{oh} \quad (7)$$

오버행 계수에 의해 원래의 영구자석 자속밀도의 값을 각 부하토크에 따라 영구자석 자속밀도 B_m 으로 설정하여 2차원 유한요소해석을 하였다. 그리고 제안된 오버행 계수의 타당성을 입증하기 위해 무부하 및 부

하에 따라 실험치와 해석결과를 비교검증하였다.

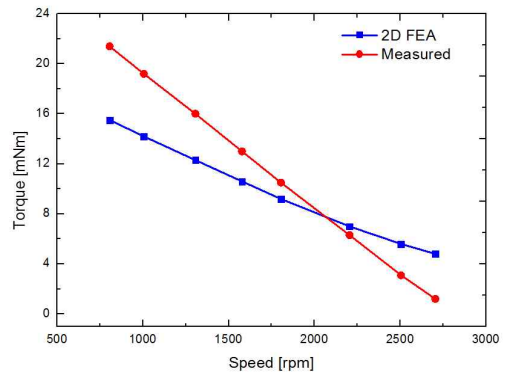


그림 4. 측정치 및 2D FEA 토크특성 결과
Fig. 4. Characteristics of torque result on measurement and 2D FEA

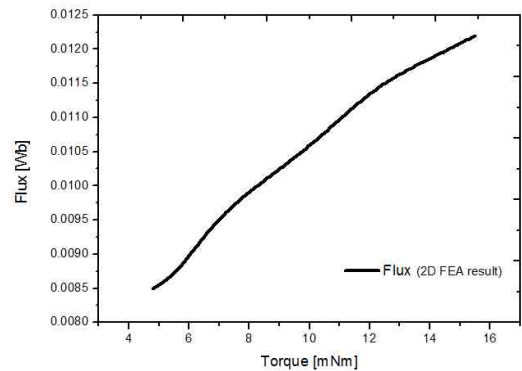


그림 5. 2D FEA의 동작점 자속 특성결과
Fig. 5. Characteristics result on operating point flux of 2D FEA

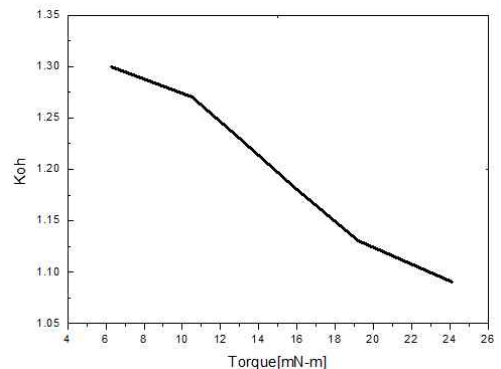


그림 6. 토크에 따른 오버행 계수 산출
Fig. 6. Overhang coefficient curve according to load torque

4. 오버행계수를 적용한 유한요소해석

4.1 역기전력 특성 해석

2차원 FEA를 해석을 진행하기 위해 제안한 오버행 계수를 적용하여 측정치 및 3D FEA의 역기전력 결과와 비교하였다. 그림 7은 3차원 해석모델을 보여준다.

그림 8은 정격 회전속도에서 측정치 기준으로 오버행 계수 미적용 및 적용한 FEA 해석결과 파형의 값을 비교하였으며, 오버행 영향의 유효자속 값을 대응할 수 있는 2차원 해석의 가능성을 보여주고 있다.

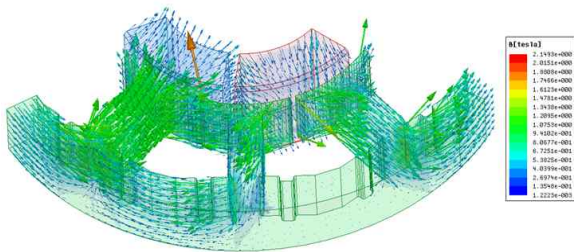


그림 7. 3차원 유한요소해석 모델
Fig. 7. 3D FEA modelling

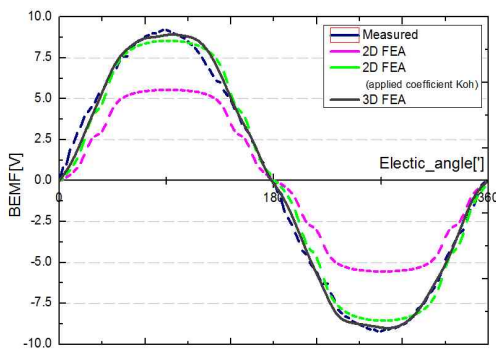


그림 8. 측정치와 3D 및 오버행 계수에 따른 해석치의 역기전력 파형
Fig. 8. Back EMF waveform comparison whether to consider overhang effect or not

그림 8의 측정치 역기전압은 6.69[V]이며, 3차원 해석모델은 6.5[V]이다. 2차원 FEA 결과에서 오버행 계수가 고려되지 않았을 경우 4.15[V]이며, 이 값은 회전자 영구자석의 축이 고정자 적층과 동일한 축방향길이의 단부권선과 같은 해석 상태이다[6]. 하지만 오버

행 계수가 적용된 2차원 FEA의 결과는 측정치 및 3D 해석치와 근사한 6.62[V]의 값의 결과가 도출되므로 오버행영향의 유효자속이 확보되고 있음을 확인할 수 있다. 이로써, 제안된 오버행 계수를 활용하여 부하특성 실험진행이 가능해졌다.

4.2 부하특성 해석

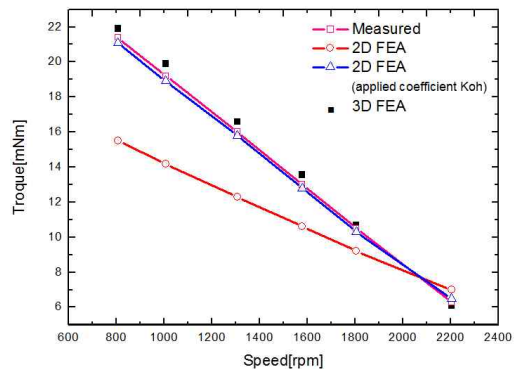


그림 9. Speed-Torque 특성 측정치와 오버행을 고려한 해석치 비교

Fig. 9. Comparison of speed-torque characteristics analysis result applying overhang coefficient

산출된 오버행 계수를 적용하여 각 부하별 특성해석을 진행하였으며, S-T 커브특성 해석결과를 실험치와 비교로 오버행 계수적용에 대한 2차원 FEA의 타당성을 입증하였다. 그림 9는 오버행 계수의 미적용과 적용에 따른 해석결과와 측정치의 결과를 비교하여 나타났다. 그 결과 오버행 계수를 적용한 해석결과는 측정치와 근사한 값의 결과가 비교되었으며, 이는 각 부하별 오버행영향의 유효 자속량이 고려되어 근사한 결과가 도출된 것이다.

또한 오버행계수 곡선이 적용되지 않은 해석결과는 오버행 구조를 시행하지 않은 BLDC 모터 특성을 나타내며, 오버행의 구조의 시행 유·무에 대한 결과를 확인할 수 있다. 오버행을 시행했을 경우 토크 활용성이 크며, 프런징 효과에 의해 고정자에 쇄교하는 유효 자속량의 증가함을 확인할 수 있다.

그리고 BLDC 모터의 측정치와 해석결과에서 도출된 효율 특성커브를 비교한 결과를 그림 10에서 보여

주며, 오버행 계수를 적용한 2차원 FEA 결과가 유효함을 입증하고 있다.

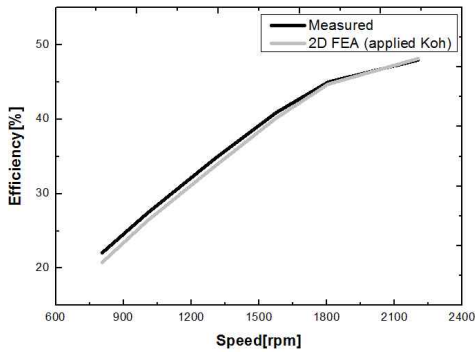


그림 10. 측정치와 2D FEA의 효율특성 결과비교
Fig. 10. Comparison of efficiency characteristics result of experimental and FEA

5. 결 론

본 논문에서는 영구자석 오버행 구조를 가지는 BLDC 모터의 특성해석을 3차원 FEA를 활용하지 않고 2차원 FEA로 수행할 수 있는 기법을 제안하였다. 영구자석 오버행구조의 모터 특성상 3차원 해석을 수행되어야 하지만 시간적 문제 등의 단점들을 보완하기 위해 2차원 해석수행 기법을 제안하였다. 2차원 해석을 수행하기 위해서 부하토크에 따른 오버행 계수를 산출하였으며, 이에 의해 오버행영향의 유효 자속분이 고려되어 2차원 해석 수행이 가능해졌다. 또한 오버행 계수의 적용에 따른 해석결과를 실험치와 비교하여 해석의 타당성을 입증하였다. 따라서 3차원 해석과 2차원 해석에서의 단점들을 보완하여 2차원 해석으로 영구자석 오버행 구조를 가지는 BLDC 모터의 특성해석을 효과적으로 접근할 수 있게 되었으며, 또한 본 논문에서 사용된 BLDC 모터의 전자기 구조의 개선을 위해 효율적으로 진행될 것으로 예상된다.

이 연구결과물은 2011학년도 경남대학교 학술진흥연구비 지원에 의한 것임

References

- [1] H. Kwon, J. Lee, Y. D. Chun, S. Kim, Y. H. Kim, B. Im, H. K. Sung, "A Study on the Permanent Magnet Overhang Effect in Brushless DC Motor", Summer Conference in KIEE, pp.599~601, July 18~20, 2001.
- [2] J. J. R. Hendershot Jr. and T. J. E. Miller, "Design of Brushless Permanent-Magnet Motors", MAGNA PHYSICS PUBLISHING and CLARENDON PRESS OXFORD, pp.5-1~5-66, 1994.
- [3] Han-Byul Kang, Byung-Taek Kim, Soo-Whang Baek, Hong-Seck Kim, Byung-Hi Kwon, "Analysis and Design of the Single-phase Line Start Permanent Magnet Motor Considering Overhang Effect", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, v.58 no.1, pp.49-56, 2009.
- [4] Su-Jin Lee, Sung-Hi Kim, Jung-Pyo Hong, Byoung-Young Song, Jong-Won Park, "Characteristic Analysis of the Water Pump Motor considering Polar Anisotropic Ferrite Bonded Magnet", ICEMS, 2010 International Conference, pp.1242-1245, oct. 2010.
- [5] Gyu-Hong Kang, Duck-Hyun Kim, "Characteristics of Torque and Vibration-Noise take into account Permanent Magnet Overhang of BLDC Motor for Robots", The transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, pp.346-352, 2006.
- [6] J. P. Wang and D. K. Lieu, "Influence of permanent magnet overhang on the performance of the Brushless dc motor", journal of Applied Physics, Vol. 83, pp. 6362-6364, 1998.

◇ 저자소개 ◇



김회천 (金會千)

1985년 4월 10일생. 2010년 경남대학교 전기공학과 졸업. 2012년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : (055)249-2628

E-mail : backas1000@naver.com



정태욱 (鄭泰旭)

1970년 5월 16일생. 1993년 부산대학교 전기공학 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학 졸업(박사). 1996~2006년 LG전자 DAC연구소 책임연구원. 2006~2007년 한국생산기술연구원 선임연구원. 2007년 ~ 현재 경남대학교 전기공학과 조교수.

Tel : (055)249-2628

E-mail : tujung@kyungnam.ac.kr