

SMC재질을 이용한 BLDC전동기의 치 형상에 따른 인덕턴스 변화가 전동기 특성에 미치는 영향

이상호, 이지영, 김영균, 홍정표, 김홍석*, 임태빈*
 창원대학교 전기공학과, *전자부품연구원

Effects of BLDC Motor Characteristic made of SMC Material
 from Inductance change according to Shape of Teeth

Sang-Ho Lee, Ji-Young Lee, Young-Kyoum Kim, Jung-Pyo Hong, Hong-Suck Kim*, Tae-Bin Im*
 Changwon National University, *KETI

Abstract - Inductance is an important parameter determining the characteristics of current waveform in electric motors. There are many kinds of inductances, however, self and mutual inductances are the major components. These inductances are changed under the variation of the magnetic circuit, current, frequency etc., even in the same winding distribution. Therefore this paper deals with the characteristics of inductance according to the shape of stator tooth. The analysis model is newly developed motor made of SMC(Soft Magnetic Composite) to reduce the core loss in high speed. the result of this paper gives the basic understandings of inductance to extend the applications of the motors.

1. 서 론

전동기 특성을 쉽게 파악하기 위해서 자기 회로를 전 기적인 파라미터인 저항, 역기전력 그리고 인덕턴스 등 으로 구성된 등가회로로 묘사할 수 있다. 특히, 인덕턴 스는 입력 전류 파형을 결정해주는 중요한 파라미터이다 [1]. 상 인덕턴스는 자기(self) 인덕턴스와 상호 (mutual) 인덕턴스로 나눌 수 있는데 이를 산정하는 방법에는 벡터 포텐셜의 폐 경로를 적분해서 권선에 채 고하는 자속을 이용하는 방법과 자기장 내에서 저장되는 에너지를 이용하는 방법이 있다 [1-4].

평균 토크를 최대화하면서 토크 리플을 최소화하기 위 해서는 평균 역기전력이 최대인 구간에서 입력 전류 파 형을 동기화시켜 입력해줘야 하며, 이때의 전류 파형은 인덕턴스와 저항에 의한 시정수로써 결정된다. 여기서 상 저항은 권선의 직경 및 권선 방식에 따라 달라지며 인덕턴스는 전동기 형상에 따라 변하는 자기저항에 의해 바뀌게 된다.

SMC(Soft Magnetic Composite) 재질은 복잡한 형상을 가지는 전동기에 적합할 뿐만 아니라 고속 회전 시에 발생하는 철손을 감소시킬 수 있는 장점을 지니고 있다 [5]. 전기 강판에서 발생하는 철손은 주파수에 비 례하는 히스테리시스손과 주파수 자속에 비례하는 와전 류손이 있다. 그런데, SMC 재질은 등방성의 자기적 특 성 등을 지니므로 전동기 회전 주파수에 따른 전동기 철 손은 약 1.1승배로 증가하는 특성을 가지게 되어 전동 기 출력 및 효율을 높일 수 있다.

본 논문에서는 권선 방식이 집중권이며, 6-step으로 구성하는 BLDC전동기로서, 치 형상에 따라 변화하는 상호 인덕턴스가 각 상 인덕턴스에 미치는 영향을 통해 올바른 인덕턴스를 산정하고 동특성 해석 결과와 실험 결과에 의한 전동기 특성을 비교해 볼 것이다.

2. 본 론

2.1 해석 이론

인덕턴스는 권선에 의한 턴수(N)와 자기 회로상의 저항(R_m)의 함수로 표현된다.

$$L = \frac{N^2}{R_m} = N^2 \times \frac{\mu S}{l} \quad (2. 1)$$

여기서 μ 는 투자율, S 는 자속이 지나는 경로의 단면 적 그리고 l 는 자속이 지나는 경로 길이를 나타낸 것이 다.

한 상에 대한 인덕턴스는 주 자속에 의한 자화 인덕턴 스와 고정자 슬롯에서 발생하는 누설 자속에 의한 누설 인덕턴스로 구성되며, 다음과 같은 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$L_A = L_{ls} + L_{as} \quad (2. 2)$$

$$L_B = L_{ls} + L_{bs}$$

$$L_C = L_{ls} + L_{cs}$$

여기서, L_A, L_B, L_C 는 각 상에서의 자기 인덕턴스, L_{ls} 는 슬롯, 엔드턴 등의 누설 자속에 의한 누설 인덕턴스 그 리고 L_{as}, L_{bs}, L_{cs} 는 각 상에서의 누설 자속을 제외한 자화 인덕턴스를 나타낸 것이다.[2]

6-step로 구성하는 BLDC에서 두 상 도통 시 선간 인덕턴스는 다음의 방정식과 같이 표현된다.

$$L = L_A + L_B \pm 2L_{AB} \quad (2. 3)$$

여기서, L 는 선간 인덕턴스, L_A, L_B 는 자기 인덕턴스, L_{AB} 는 상호 인덕턴스이다.

2상 도통구간에 대하여 상호 인덕턴스가 (+)부호인 경우는 타 코일에 의한 쇄고 자속이 주 자속과 같은 방 향을 이루고 있을 때를 말하며, (-)부호인 경우는 타 코 일에 의한 쇄고 자속 방향이 주 자속과 반대가 되어 주 자속을 억제하거나 상쇄시킬 때를 말하는 것이다. 또한 두 상의 위상차가 90°보다 작거나 같을 때 적용된다.

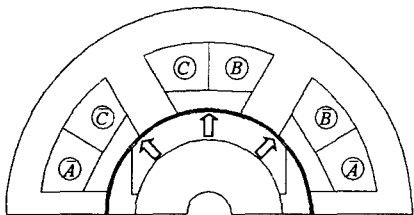
2. 2 해석 모델

해석 대상 전동기는 청소기용 전동기로 제작된 BLDC 전동기로서 정격속도가 10000rpm인 고속회전 용이다. 표 1은 해석 대상 전동기의 사양을 나타낸 것이 다. 2극에 6슬롯이며 고정자 외경은 100mm, 적층 길 이는 51mm이다. 최소 공극은 0.7 mm로서, 홀센서 삽 입을 위해 영구자석의 경계 부분이 그림 1과 같은 절단 면을 가진다.

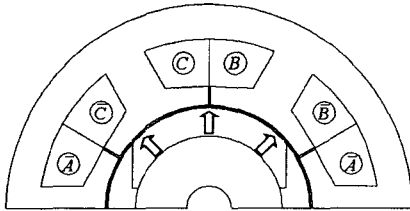
그림 1은 슬롯 오픈 폭에 따른 인덕턴스를 비교하기 위한 해석모델을 나타낸 것이다. 그림 1 (a)는 치 형상

표1. 해석 모델 사양

항목	내용	단위	
DC link 전압	310	V	
상 수	3	-	
정격 속도	10000	rpm	
정격 토크	2.55	kgf-cm	
정격 출력	260	W	
전기자	전류	1	A
	상당직렬턴수	330	Turns
	권선방식	집중권	-
	상 저항	4.75	ohm
영구자석	Br	0.4	T
	μ_{rec}	1.05	-
	자화방향	radial	-
철심 재질	SMC		
구동 방식	6-step구동 (120° 도통)		



(a) 슬롯 오픈 폭이 매우 클 때



(b) 슬롯 오픈 폭이 매우 작을 때

그림 1. 해석 대상 전동기 형상

에 따라 상호 인덕턴스 성분이 선간 인덕턴스에 미치는 영향을 알아보기 위한 모델로서 슬롯 오픈 폭이 매우 클 때를 나타낸 것이며, 그림 1 (b)는 실제 제작된 전동기 형상을 나타낸 것으로서 슬롯 오픈 폭은 0.5mm 이다.

2.3 해석 방법

그림 2는 일반적인 인덕턴스 산정 방법을 나타낸 것이다. 인덕턴스 산정에 앞서 철심 내 자기 포화 상태를 고려한 철심의 비투자율을 반영해야 한다.

한 상에 의한 자기 인덕턴스를 산정하기 위해서는 2상 도통에 의한 기자력을 인가한 상태에서 비선형 해석을 수행하고, 영구자석의 잔류 자속밀도에 의한 기자력이 없는 상태에서 한 상의 기자력만 인가한 상태에서 선형 해석을 하게 된다. 이것은 운전상태를 고려한 것이므로 상 기자력에 의해 코일에 쇄교하는 자속 및 자기 저장 에너지를 이용하여 자기 인덕턴스를 구하였다.

두 상에 의한 선간 인덕턴스를 산정하기 위해서는 비선형 해석은 위와 동일하게 해석한 다음, 영구자석에 의한 기자력을 제외한 두 상에 의한 기자력만을 인가한다. 선형 해석 시 자기 회로에서의 자기 수반 · 저장 에너지는 같은 값을 가지므로 에너지를 이용한 선간 인덕턴스를 구하였다. 상호 인덕턴스는 식 (2.3)을 이용해서 구하였다.

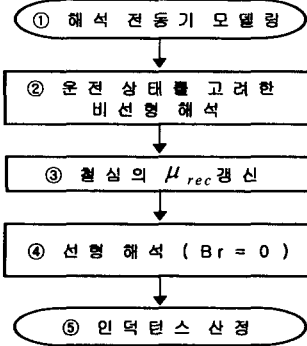
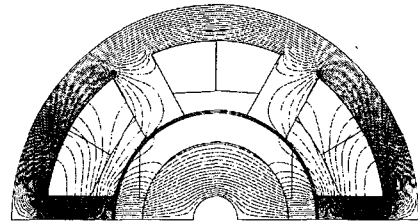
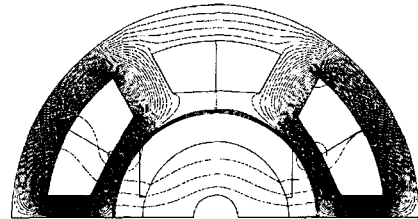


그림 2. 인덕턴스 산정 순서



(a) 슬롯 오픈 폭이 매우 클 때



(b) 슬롯 오픈 폭이 매우 작을 때

그림 3. A상에 의한 자기 인덕턴스 산정 시 자속분포

2.4 해석 결과

그림 3은 A상에 의한 자기 인덕턴스를 산정할 때 치 중심 부분에서의 자속 분포를 나타낸 것이다. 그림 3 (a)는 슬롯 오픈 폭이 매우 클 때의 자속 분포로서 여자된 A상 코일로 쇄교하는 자속만이 존재하며 다른 상 코일로 쇄교하는 자속은 거의 존재하지 않는다. 슬롯 오픈 폭이 큰 경우 자기 저항이 커지므로 C상으로의 자속이 없는 것이다. 그림 3 (b)는 슬롯 오픈 폭이 매우 작을 때의 자속 분포를 나타낸 것으로서 치 끝부분에서 자기 저항이 작아 C상으로 쇄교하는 자속 경로가 만들어져 A상에 의한 쇄교 자속이 C상 코일에 쇄교하는 상호 인덕턴스 성분이 존재하게 되는 것이다.

그림 4는 A-C상에 의한 선간 인덕턴스를 산정할 때 치 중심 부분에서의 자속 분포를 나타낸 것이다.

그림 5는 상호 인덕턴스가 선간 인덕턴스에 미치는 영향을 알아보기 위해 그림 3, 4의 결과로부터 자속밀도 분포를 나타낸 것이다. 이 때 자속밀도는 치 중심 부분에 대하여 수직성분을 나타낸 것이다. 그림 5 (a)와 같이 슬롯 오픈 폭이 매우 큰 경우에 A상에 의한 인덕턴스가 선간 인덕턴스 때에도 비슷한 값을 가지므로 식 (2.3)을 참고로 할 때 상호 인덕턴스 성분이 아주 작은 값을 가지거나 존재하지 않는다. 반면 그림 5 (b)와 같이 슬롯 오픈 폭이 매우 작아 치 끝부분에서 다른 상으로의 자속 경로가 생겼을 경우에는 상호 인덕턴스 성분이 선간 인덕턴스를 감소시키는 상호 간섭이 발생한다.

그림 6은 슬롯 오픈 폭이 좁은 경우, A상 권선에 전

류가 인가되었을 때 발생하는 자속이 다른 권선에 어떻게 쇄교하는 가를 도식화 한 것이다. 일반적으로 슬롯 오픈 폭이 넓은 집중권에서는 여자된 A상에만 자속이 쇄교하나, 그림과 같이 오픈 폭이 좁은 경우에는 집중권의 경우에도 인접해 있는 선간에 영향을 미치게 된다. 따라서, 실제 제작된 전동기에서는 슬롯 오픈 폭이 매우 좁게 만들어져 있으므로 상호 인덕턴스 성분이 크게 나타난다. 2D-FEM을 통해서 각 상의 자기 상호 인덕턴스 성분을 산정한 결과 그 값은 각각 77 [mH], 55 [mH]이었다. 그림 7은 동적 시뮬레이션 결과를 실험에 의한 전동기 특성 곡선과 비교한 것이다.

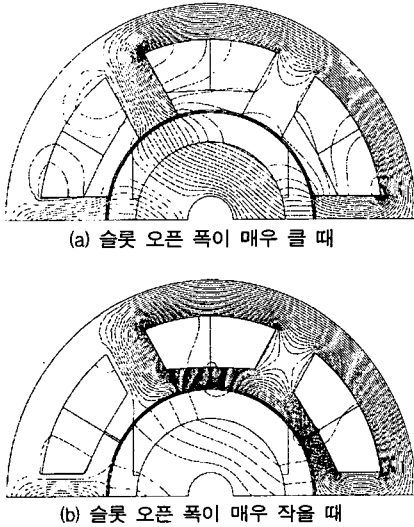


그림 4. A-C상에 의한 선간 인덕턴스 산정 시 자속분포

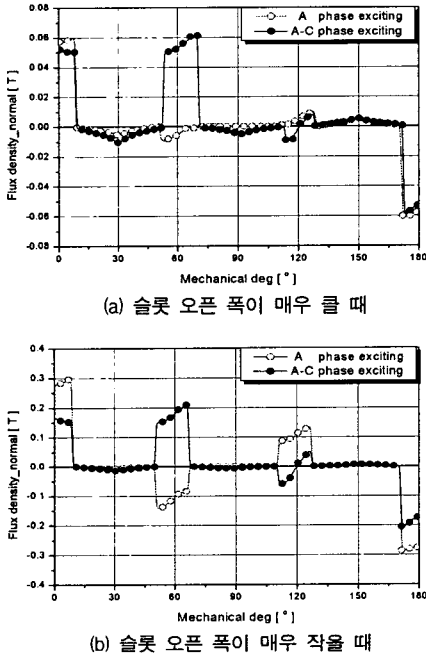


그림 5. 슬롯 형태에 따른 치 중심에서의 자속밀도 분포

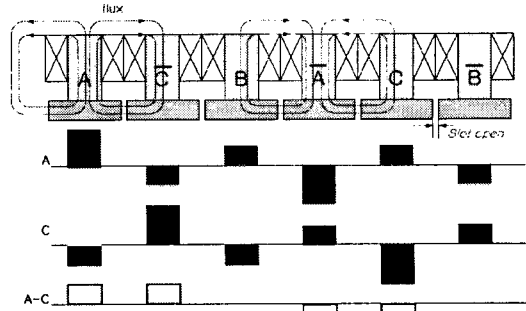


그림 6. 슬롯 오픈 폭이 좁은 경우의 A상 전류에 의해 발생하는 자속 경로

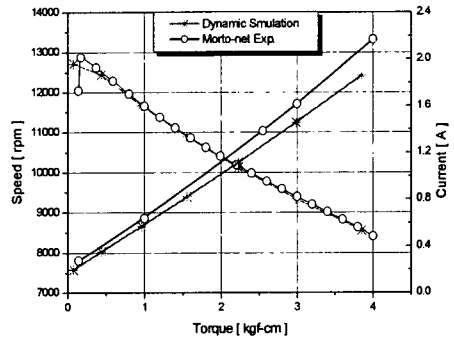


그림 7. 토크-속도 특성 비교

3. 결 론

전류 파형을 결정하는 인덕턴스는 자속 경로에 따라 달라진다. 특히 치 형상에 따른 자기저항에 의해 상호 인덕턴스가 선간 인덕턴스를 증가 시키거나 감소시킬 수 있다.

본 논문에서는 최근에 주목받고 있는 전동기 조립 방법 중에 하나인 분할 코어형식을 취하는 경우, 좁은 슬롯 오픈 폭에 의해서 상호 인덕턴스가 기준에 알고 있던 집중권인 경우와 달리, 다른 상에 크게 영향을 미침으로서, 선간 인덕턴스를 감소시킬 수 있음을 보였다.

따라서, 전동기의 보다 정확한 특성을 예측하기 위해서는, 전동기의 제작 방법이 발달함에 따라 형상변화의 범위가 넓어지므로, 전동기의 파라미터도 변화할 수 있음을 예측하여 보다 신중하게 파라미터를 산정해야 될 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] J.R. HENDERSHOT JR and TJE MILLER "Design of Brushless Permanent-Magnet Motors", OXFORD MAGNA PHYSICS, 1994
- [2] D.W.Novotny and T.A.Lipo "Vector Control and Dynamics of AC Drives", OXFORD, 1996
- [3] T.A.Lipo "Introduction to AC Machine Design", vol.1, WisPERC UW-Madison, pp155-160,1996
- [4] Mohan, Undeland and Robbins "Power Electronics", WILEY, 2003
- [5] Goga Cvetkovski, Lidija Petkovska and Milan Cundev, "Improved Design of a Novel PM Disk Motor by Using Soft Magnetic Composite Material.", IEEE, Trans. Magnetics, vol. 38, No. 5, Sept 2002