

슬롯리스 BLDC 모터의 권선방식에 따른 특성 연구

서정무, 김주한, 류세현
지능메카트로닉스 연구센터, 전자부품연구원

A Study on Slotless BLDC Motor with respect to Winding Method

Jung-Moo Seo, Joo-Han Kim, Se-Hyun Rhyu

Intelligent Mechatronics Research Center, Korea Electronic Technology Institute

Abstract - 본 논문에서는 슬롯리스 BLDC 모터의 설계 및 해석방법에 관하여 기술한다. 유한 요소해석과 전압 방정식을 이용하여 사각, 마름모, 그리고 육각형상의 권선방식에 따른 각각의 성능 특성을 예측하여 비교하고 제작특성을 파악한다.

1. 서 론

산업전반에 자동화가 진전되고 복합적 기능이 강조됨에 따라 다양한 형태의 구동모듈에 대한 요구와 적용이 증대되고 있다. 구동 및 관절용 액추에이터의 개발 기술은 영상처리 및 정밀 제어 기술 등과 함께 로봇산업의 핵심 기반 기술의 하나로서 향후 관련시장의 확대와 함께 소형화 및 고성능화가 꾸준히 요구될 전망이다. 본 논문에서는 로봇시스템용 관절 및 구동 모듈에 탑재 가능한 소형의 BLDC 모터를 설계하고 권선방식에 따른 특성을 살펴본다. 제안된 모터는 소형화에 유리한 슬롯리스 타입으로서, 구조가 간단하며 이론적으로 코깁토크가 발생하지 않아 정밀 구동에 유리하다. 12V 구동의 10W 정격출력을 목표로 설계된 모터는 시작품 제작을 통해 출력특성을 확인한다.

2. 본 론

2.1 기본 설계 모델

제안된 모터의 외경은 22[mm]로 제안되어 설계된다. 기본설계 방향은 고출력을 위하여 Nd 소결의 2극 영구자석을 이용하고 9개의 단일 권선을 분포권 형태로 배치한다. 집중권 및 분포권 형태의 슬롯리스 BLDC 모터의 특성에 관한 기존의 연구는 주로 수식을 통한 해석적인 방법으로 사각형상의 단일코일을 고려한 경우가 대부분이었다.[1-3]. 본 연구에서는 유한요소해석을 통하여 초기 모델의 권선방식에 따른 역기전력 분포 및 크기를 확인하고 전압방정식을 이용하여 특성을 파악하였다. 기본형상 및 세부 제원은 그림 1 및 표 1과 같다.

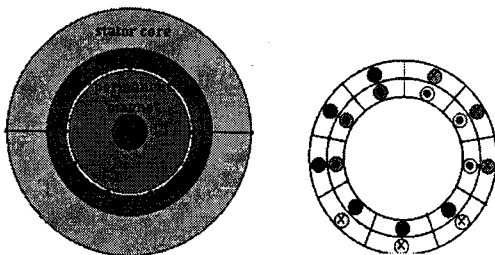


그림 1. 기본 형상 및 권선 배치도

표 1. 세부 제원

극수	2
단일 코일수	9(coilpitch 3)
스테이터 코어 외경[mm]	21.0
공극[mm]	0.3
영구자석 외경[mm]	10.4
축방향 길이[mm]	26.0
영구자석 종류	Nd sintered 38H(Br:1.26T)
상당 턴수	42

2.2 권선방식에 따른 특성 분석

전술한 바와 같이 본 연구에서는 3가지 형태의 권선, 즉 사각, 마름모, 그리고 육각의 권선에 따른 출력을 검토하였다. 사각권선의 배치도와 2차원 유한요소해석을 통하여 사각권선 모델의 역기전력을 계산한 결과는 그림 2와 같다.

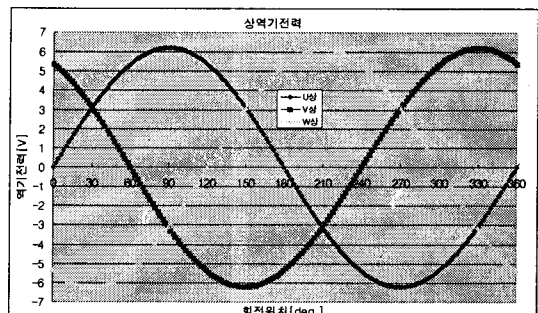
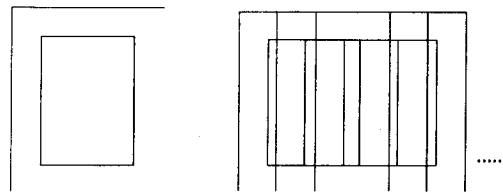


그림 2. 사각권선의 배치 및 역기전력(@20,000rpm)

마름모 권선 모델은 구조상 3차원 모델링 및 해석이 필요하다. 본 연구에서는 마름모 구조의 권선을 축방향으로 일정구간씩 구분하여 해석한 후 계산값을 산술적으로 더하는 방법을 이용하였다. 그림 3에 해석을 위한 마름모 권선의 구분 모델과 각 해석영역에서의 권선 배치를 나타내었다.

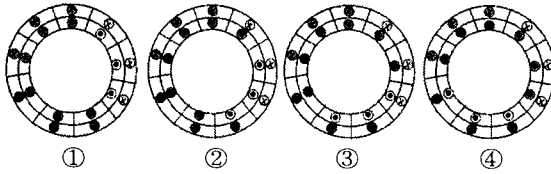
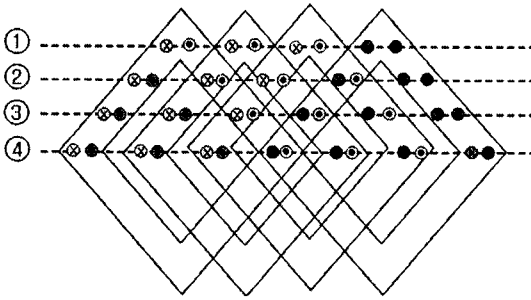


그림 3. 마름모 권선의 구간별 권선배치도

그림 3과 같은 방법으로 구간별 역기전력을 구한 후, 코일 하단부의 반복부분을 고려하여(0, 0.3 부분) 역기전력의 총합을 계산하였다. 그림 4는 3D 해석결과와 2D 해석결과를 비교한 그림이다. 약 8% 정도의 오차를 보이는 것을 확인하였으며, 일정한 보정 계수를 활용한다면 전술한 2차원 해석방법이 타당하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

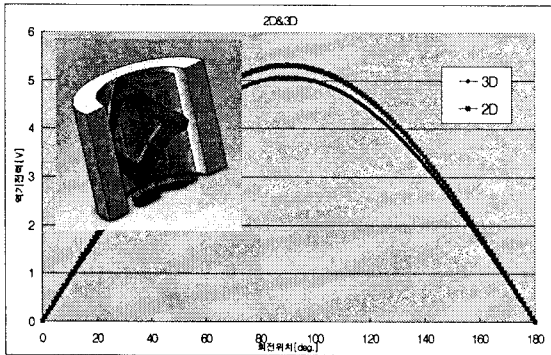


그림 4. 마름모 권선의 2D&3D 역기전력 해석비교

마름모 권선 모델의 해석결과 약 5.1[V]의 값으로 동일 축방향 길이 대하여 사각권선 모델 대비 역기전력의 크기가 약 80% 정도 수준인 것을 확인하였다. 또한, 사각 권선의 경우 상하측의 엔드턴 부분의 반경방향 두께가 권선의 다른 영역과 비교하여 크기 때문에(본 연구대상인 코일피치 3의 경우 엔드턴 부분은 3층으로 구성) 스테이터 코어와 영구자석의 축방향 길이는 제작상 상하측의 엔드턴을 제외한 수직부분만으로 구성된다. 즉, 권선의 축방향 길이는 동일하다고 할지라도 코어와 영구자석의 축방향 길이는 사각권선이 더 작기 때문에 동일 자속량에 대한 두 권선의 역기전력 크기의 차이는 더 크다고 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 사각권선의 수직방향 성분과 마름모 권선의 사선방향 성분을 고려한 육각권선 모델에 대해 진행하였다. 육각권선의 해석방법은 사선부분은 마름모권선 해석 방법과 동일하게 적용하면서 중간 수직성분은 사각권선의 해석방법을 적용하였다. 그림 5는 사각권선의 상하 엔드턴 부분과 육각권선의 해석구간을 나타낸다.

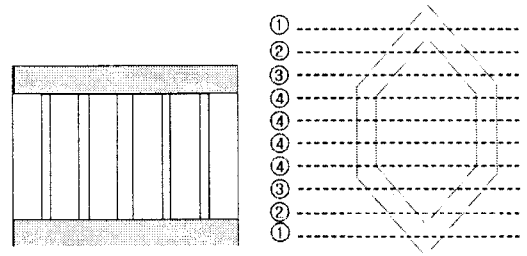


그림 5. 사각권선의 엔드턴 중첩부 및 육각권선의 구분 해석 구간

그림 6은 육각권선의 역기전력 해석결과를 나타낸다. 사선부분의 길이를 8[mm], 수직부분의 길이를 12[mm]로 하여 해석한 결과, 약 7.85[V]의 값으로 마름모 권선과 비교하여 약 50%정도 큰 역기전력의 값을 갖는 것을 확인하였다.

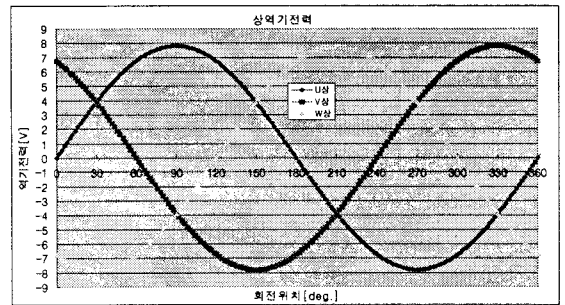


그림 6. 육각권선의 배치 및 역기전력(@20,000rpm)

그림 7은 육각권선을 이용하여 설계된 슬롯리스 BLDC 모터의 설계 결과를 나타낸다. 유한요소해석을 통하여 계산된 역기전력 상수를 전압방정식에 대입하고 정격토크의 20%정도를 마찰토크로 감안하여 N-T_I 곡선을 산출하였다. 육각권선의 경우 사각권선이나 마름모권선과 비교하여 동일한 권선 길이라 할지라도 사선부분의 각도 등에 따라 특성이 매우 다양하고, 점적율 또한 가변적이다. 따라서 권선 세부 설계시 점적율과 전류밀도의 고려가 요구된다. 본 연구에서는 2wire 병렬권선을 적용하여 동일면적에서 턴수 증대를 꾀하였다.

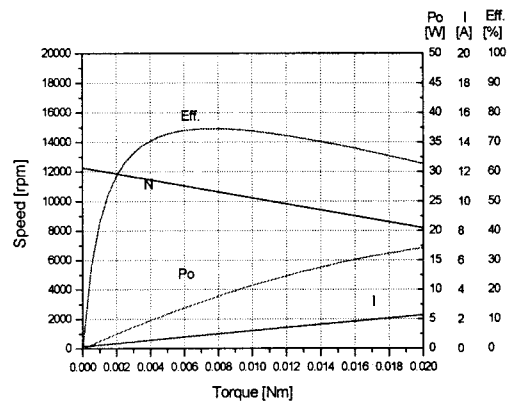


그림 7. 설계된 슬롯리스 BLDC 모터의 특성곡선

2.3 제작 및 성능 평가

그림 8은 모터의 제작과정을 나타낸다. 코일의 형상에 따른 권선 지그를 구성하여 단일 코일을 제작한 후, 영

구자석 및 공극을 고려한 권선조립지그 외측에 9개의 단일 코일을 배치한다. 이때 단일코일의 정밀한 배치와 정렬을 위하여 조립지그 외측의 수직성분 코일 변 사이에 별도의 홈을 구성하고 시편을 결합하여 조립성을 향상시키고자 하였다. 코일 정렬 배치 후 시편을 제거하고 압착지그를 이용하여 코일의 외측을 압착하고 외부에서 열풍을 가하여 적당히 고정시킨다. 이후 권선 외측에 절연테이프를 결합하고 권선체를 스테이터 코어 내측에 삽입하여 고정자를 완성한다.

[참고 문헌]

[1] M. Markovic, Y. Perriard, "Simplified Design Methodology for a Slotless Brushless DC Motor", *IEEE Trans. Mag n.*, vol.42, no.12, pp.3842-3846, 2006
 [2] N. Bianchi, S. Bolognani, F. Luise "Analysis and Design of PM Brushless Motor for High-Speed Operations", *IEEE Trans. Energy conversion*, vol.20, no.3, pp.629-637, 2005
 [3] N. Bianchi, S. Bolognani, F. Luise "High Speed Drive Using a Slotless PM Motor", *IEEE Trans. Power electronics*, vol.21, no.4, pp.1083-1090, 2006

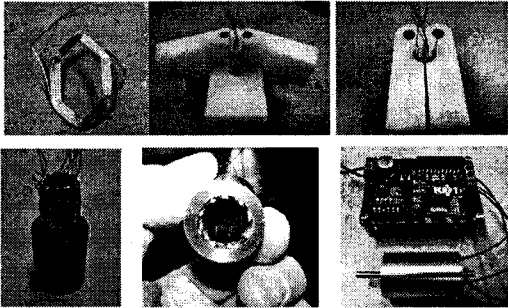


그림 8. 모터의 제작과정

그림 9는 제작된 모터의 특성곡선을 나타낸다. 제작상의 편의를 위하여 모터는 센서리스 타입으로 진행하였으며, 별도 준비된 구동 드라이버를 이용하여 출력 특성을 확인하였다. 그림에서와 같이 무부하 속도는 12,000[rpm]을 다소 상회하며, 최대 효율은 약 74[%], 정격지점에서의 효율은 약 72[%]로 측정되어 설계치와 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

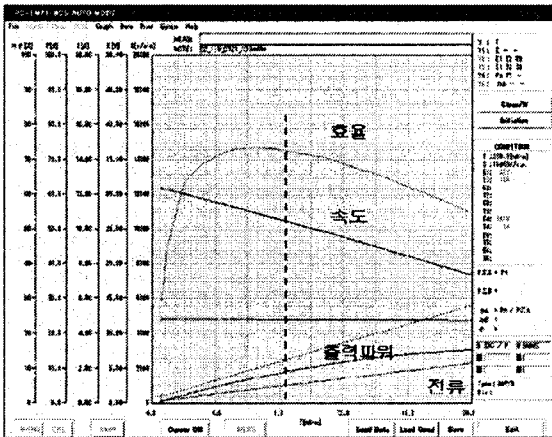


그림 9. 제작된 모터의 특성곡선

3. 결 론

본 논문에서는 로봇 관절 구동용 소형 슬롯리스 BLDC 모터의 설계에 대한 연구를 기술하였다. 사각, 마름모, 육각권선 형태에 따른 전자계 특성을 비교하고 육각권선의 모터를 설계 및 제작하여 성능을 확인하였다. 향후 육각권선의 사선 및 수직성분 비율에 따른 정량적인 설계파라미터 정립을 위한 추가 연구의 필요성을 확인하였으며, 권선제작상의 정밀도 및 조립성 향상을 위한 제작기술의 개선방안도 고려되어야 할 것으로 보인다.