

영구자석형 다자유도 구형전동기의 토크특성 분석과 효율 향상에 대한 연구

이호준*, 강동우*, 박현중*, 홍경표*, 이주*
한양대학교 전기공학과*

Analysis Torque Characteristic and Improved Efficiency of Permanent Magnet Multi-D.O.F. Spherical Motor

Ho-Joon Lee*, Dong-Woo Kang*, Hyun-Jong Park*, Kyung Pyo Hong*, Ju Lee*
Hanyang University Electrical Engineering*

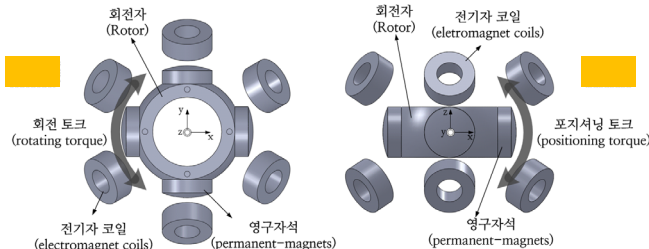
Abstract - A surfaced permanent magnet spherical motor is capable of operating as three degree of freedom that used for the joints of the robot's arm, leg, and eyes. Ongoing research like new concept is essential part of motor field, it will make a great contribution in the future the overall portion of the motor, is becoming expected. The author analysis torque characteristics in spherical motor with state of rotating and positioning. And future design direction is smaller motors with equivalent or higher output. Solutions as torque and efficiency improvements are selecting the core with special processing type like powder metallurgy materials. Their special characteristic is high permeability and low eddy current losses at high speed, so improved the torque and efficiency.

부 코일에 의한 자계와 상부 코일에 의한 자계를 분리하여 MATLAB을 통해 회전자계의 제적을 나타낸 것이 그림 2이다. 그림에서 볼 수 있듯이 상부 코일에 의한 자계와 하부 코일에 의한 자계가 서로 일치하지 않기 때문에 둘 사이에 힘이 발생하고 이 힘이 토크리플 성분으로 작용하는 것이다.

1. 서 론

구형모터란, 하나의 전동기로 다자유도를 구현하는 것으로 회전축이 구면을 따라서 이동하더라도 일정한 공극을 유지할 수 있다. 이런 구형모터의 연구는 계속 되어 왔고 앞으로 더욱 발전할 것이 분명하다. 본 논문에서 정밀한 제어를 방해하는 토크리플의 원인을 파악하고 효율을 개선하고자 하는 표면부착형 영구자석 구형 모터를 모델링 한 것이 그림 1이다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 yaw-pitch-roll 이라는 3자유도 구동을 하나의 모터로 가능하게 한다.

이 논문에서는 그림 1의 모델로부터 고정자와 회전자간의 비대칭 자계에 대하여 분석하였으며, 출력과 효율 향상을 위하여 고정자 재질들을 비교하고 있다.



〈그림 1〉 3자유도 구형모터의 구성

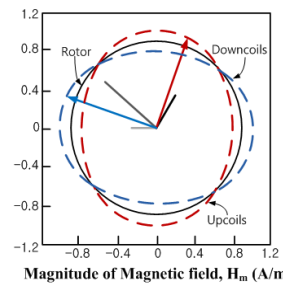
2. 본 론

2.1 틸팅각에 따른 토크특성

토크는 회전자에 의한 자계가 고정자에 의한 자계에 일치하기 위한 힘을 말하고 토크리플은 공간적, 시간적 고조파에 의해 나타나게 된다. 본 해석모델은 영구자석기로서 영구자석에 의한 공극자속이 공간적인 고조파를 만들어 내며, 코일에 흘리는 인가전류에 의한 자속이 시간적인 고조파를 만들어 낸다. 즉, 두 가지 경우 모두 정현적이라면 토크리플이 거의 존재하지 않지만 영구자석의 자속분포도 완전히 정현적이지 못하며, 실제 역기전력은 기본파와 고조파의 합이나 인가전류의 파형은 기본파에 대한 정현적인 cos함수로 인가되기 때문에 기본파 외에는 리플성분이 된다. 그리고 본 해석모델은 틸팅운동도 하는 특별한 구동 시스템으로 틸팅이 되었을 때 영구자석의 공극자속이 X, Y축에 대해 정사영시키면 정현적인 cos함수가 아닌 비정현적인 것을 알 수 있다.

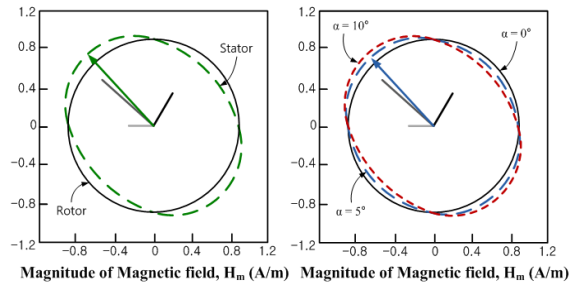
틸팅 안 할 경우 상부 코일 6개에 일반 회전형 모터와 같이 입력전류가 평행 3상임을 보여주고 있다. 하지만 틸팅 할 경우 틸팅각에 따라 상부 코일 6개에 크기가 서로 다른 전류가 인가되는 것을 볼 수 있다. 이처럼 각 상전류의 크기가 일정하지 않는 불평형 3상 전류가 회전축뿐만 아니라 X, Y축의 토크로 나타나 토크리플을 만들게 된다.

X, Y축 토크 즉, 토크리플은 안정적인 구동을 방해하는 성분으로 상

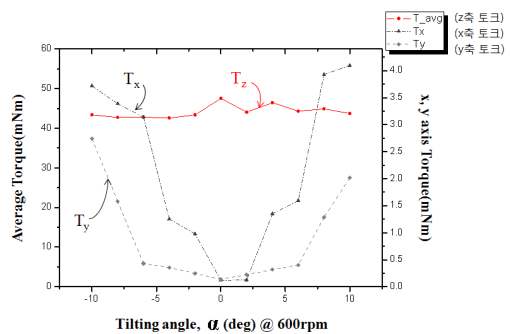


〈그림 2〉 고정자 코일에 의한 자계

그림 3(a)는 앞서 분리해서 나타냈던 고정자 회전자계를 합성하여 나타낸 것과 영구자석에 의한 자계를 함께 도식화 한 것이다. 영구자석에 의한 자계는 항상 회전자 기준으로 구형을 나타내는 반면 고정자의 회전자계는 회전자 기준으로 정사영하면 다음과 같이 타원의 형태가 됨을 그림을 통해 알 수 있다. 자계의 불일치로 인한 고조파가 리플에 작용한 것이다. 그림 3(b)는 3상 고정자의 회전자계를 틸팅각에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 틸팅각이 0인 경우는 영구자석에 의한 자계와 일치하지만, 틸팅각이 0이 아닌 경우 고정자에 의한 회전자계가 타원의 형태로 되고 틸팅각이 커짐에 따라 타원의 장축길이가 더 커지고 단축길이가 더 작아지는 타원의 형태가 된다.



(a) 회전자와 고정자의 회전자계
(b) 포지셔닝각에 따른 회전자계 추이



〈그림 4〉 포지셔닝 각에 따른 X, Y, Z축 토크

그림 4는 실제 틸팅각이 변함에 따라 각 축에 대한 토크를 나타낸 것이다. 는 X축 토크, 는 Y축 토크, 그리고 는 Z축 토크이다. 틸팅각에 따라 Z축, 즉 회전축에 대한 토크는 거의 일정하지만 X,Y축 토크는 틸팅각이 증가할수록 큰 것을 볼 수 있다. 이는 영구자석의 자속분포와 역기전력의 파형이 틸팅각이 커짐에 따라 공간적, 시간적 고조파 성분의 증가로 X축과 Y축의 토크가 증가하는 것이다. 이를 통해서 어떤 틸팅각이라도 X, Y축에 대한 토크성분 즉 토크리플 성분은 회전자 축에 대한 토크와 효율에는 영향을 미치지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 틸팅각이 0인 상태에서의 토크와 효율 개선을 위한 연구를 수행하였다.

2.2 효율개선을 위한 코어재질 선택

본 논문에서 선택된 분말성형 코어와 기존 순철가공 된 코어를 사용하여 3D-FEM 시뮬레이션을 수행하였다. 구형모터의 구조적인 특성상 3D-FEM으로 해석하여야 했으며, 시뮬레이션은 고정자 코어만을 달리 하여 같은 조건으로 해석하였으며, 와전류손실의 수치적인 차이를 보기 위해 저속구간과 고속구간으로 크게 나누어 해석하였다. 또한 본 구형모터는 로봇의 안구에 적용시키기 위한 연구로 기존 회전형 모터와 비교할 경우 비교적 낮은 속도에서 구동된다. 저속구간에 해당하는 200rpm, 그리고 고속구간에 해당하는 1000rpm에 대하여 평균토크와 와전류 손실을 분석해보았다.

우선 저속구간에 해당하는 200rpm에서 분말성형 코어와 순철가공 코어를 사용하였을 때의 평균 토크 값을 비교하였다. 그림 -는 분말성형 코어를 사용하였을 때의 평균토크, 그림 -는 순철가공 코어를 사용하였을 때의 평균토크 값을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 분말성형 코어의 평균토크가 69.78mNm로 순철가공된 코어의 평균토크가 63.53mNm 보다 약 10% 더 큰 출력을 내는 것을 확인할 수 있다. 이는 분말성형코어의 재질이 더 높은 투자율을 갖기 때문이다. 마찬가지로 고속구간에 해당하는 1000rpm에서 앞서 했던 것과 같이 분말성형 코어와 순철가공 코어를 사용하였을 때의 평균토크 값을 비교하였다. 그림 -는 분말성형 코어를 사용하였을 때의 평균토크, 그림 -는 순철가공 코어를 사용하였을 때의 평균토크 값을 나타내고 있다. 각 각 평균토크 값은 75.84mNm, 69.25mNm이며, 분말성형 코어를 사용하게 되면 약 12% 더 큰 출력을 갖는다.

그리고 와전류, eddy current는 일반적으로 금속을 강한 자기장 내에서 움직이거나 자기장을 급격하게 변화시킬 때 전자기유도 효과에 의해 금속판에 소용돌이 형태로 흐르는 전류를 말한다. 일반 회전형 모터의 경우 와전류를 줄이기 위해 서로 절연된 얇은 철판을 여러 장 적층한 철심을 사용한다. 하지만 구형모터의 경우 적층된 코어를 사용할 수 없는 환경이기에 기존에는 통 코어를 이용하여 가공한 형태를 사용하였다. 순철가공 된 코어의 경우 와전류로 인한 손실이 커 모터 전체의 출력이 매우 낮았다. 하지만 분말성형 코어는 분말가루의 각 입자가 등방성 재질로서 높은 투자율을 갖고 절연된 층을 가지고 있으며 와전류의 움직임을 방해하여 손실을 줄인다. 이런 재질을 높은 온도와 압력에서 압착하여 제작하고 높은 밀도를 가지고 있어 강도도 뛰어난 편이다. 또한 구형모터처럼 특수한 구조인 경우 가공하는 것보다 좀 더 제작 용이성을 갖고 있다.

따라서 분말성형 코어와 순철가공 된 코어를 사용하였을 때 시뮬레이션 결과를 살펴보면 저속구간인 경우 와전류손 실이 거의 비슷한 값으로 영향이 크게 없다. 하지만 고속구간으로 갈수록 순철가공 된 코어는 와전류손이 약 160%상승하였지만, 분말성형 코어는 약 20%정도 상승하였다. 즉 분말성형 코어가 순철가공 코어에 비해 와전류손실이 약 84% 작은 것을 확인할 수 있다.

다음으로 효율은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\eta = \frac{P_{출력}}{P_{입력}} \cdot 100 = \frac{\tau\omega}{12 \cdot (e_0 + RI) \cdot I} \cdot 100$$

즉 입력전력은 무부하시 역기전력 상수 값과 저항 그리고 인가되는 전류에 의해 결정이 되며 출력전력은 회전축에 대한 토크와 각속도의 곱으로 구할 수 있다. 여기서 입력전력에 12가 곱해지는 것은 12개의 코일에 각 각 전류가 인가되기 때문이다.

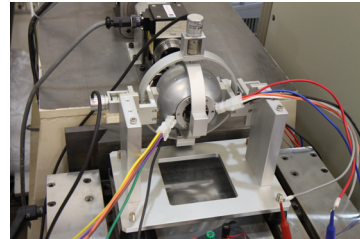
〈표 1〉 코어재질 비교를 통한 토크와 효율

	200rpm (저속)		1000rpm (고속)	
	순철가공	분말성형	순철가공	분말성형
평균 토크 [mNm]	63.53	69.78	69.25	75.84
와전류 손 [W]	0.016	0.015	2.55	0.39
효율 [%]	8.95	9.83	38.4	42.06

결과적으로 분말성형을 하였을 경우 기존보다 평균토크가 약 9% 상승되고 와전류손이 약 84% 감소하여 효율이 상승됨을 알 수 있다. 그리고 분말성형 하였을 경우 저속구간에 비해 고속구간에서 와전류손의 증가 비율이 낮아 효율의 증가분이 저속에 비해 고속구간이 크게 나타난다. 따라서 본 논문에서 선택한 분말성형 코어가 기존에 순철가공 코어가 가지고 있던 문제인 와전류 손실을 줄이고 효율이 크게 향상되어 특성에 관해서는 대안이 될 수 있을 것이다.

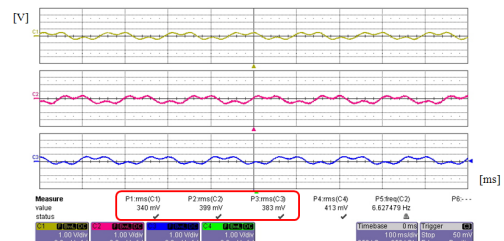
2.3 실험을 통한 검증 및 토의

본 논문의 다자유도 구형모터의 특성을 실험적으로 파악하기 위해서는 특수 지그가 반드시 필요로 한다. 다음 그림 5는 실제 구형모터의 역기전력 실험을 위한 실험 장치이다. 그리고 토크특성 해석에서 입력전류가 같다면 역기전력 상수를 시뮬레이션 결과와 실험을 통한 결과를 비교함으로써 타당성을 검증 할 수 있다.



〈그림 5〉 다자유도 구형모터의 역기전력 실험

먼저 3D-FEM해석을 통해 역기전력 파형을 살펴보면 기본파인 Cosine함수파형에 많은 공간 고조파가 포함되 있다. 고조파 분석을 통한 역기전력 상수 값은 388mV이다. 이는 그림 6에서 살펴볼 수 있듯이 실험으로 측정된 역기전력 상수 값인 383mV로 거의 같다. 이를 통해 앞선 출력과 효율 향상에 대한 신뢰성을 가지고 있다고 볼 수 있다.



〈그림 6〉 실험을 통한 역기전력 파형(200rpm)

3. 결 론

영구자석형 구형 모터는 3자유도 구동을 하나의 시스템으로 단순화한 형태로 군사형 차량, 로봇의 관절, 안구 등 활용범위가 점차 증가하고 있다. 지금까지 연구된 구형모터는 효율이나 평균토크가 아주 작은 편이라 활용범위 또한 좁기 때문에 두 가지 모두를 향상시킬 필요가 있다. 이에 코어 재질 또는 영구자석의 레셀을 키우는 방법이 가능하며, 특히 코어재질을 Soft Magnet Composite(SMC)을 사용할 경우 제작적인 유연성, 모터의 출력특성을 향상시키는데 큰 역할을 한다.

그리고 포지셔닝 각이 달라짐에 따라 회전자와 고정자의 자계에 비대칭성으로 인해 토크리플로 작용하여 안정적인 구동을 방해하게 된다. 또한 시제품을 제작하여 3D-FEM해석과 실험을 병행하여 다자유도 구형모터의 특성을 확인하였다.

감사의 글

본 논문은 교육과학기술부 국가지정연구소 (과제번호:ROA-2008-000-20048-0)사업의 연구비 지원으로 수행된 논문입니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Sung-hong Won, "A study on the analysis and the control characteristics of a 3 D.O.F. spherical motor for robotic joints," Ph.D. thesis, Hanyang University, Seoul, Korea, February 2007.
- [2] M. Persson, P. Jansson, "Advanced in powder metallurgy soft magnetic composite materials for electrical machines," Impact of New Materials on Design, December 1995.