

다자유도 구형 구동 모터의 와전류 손실 저감을 통한 효율 향상 연구

홍경표*, 이원국*, 이호준*, 강동우*, 원성홍**, 이 주*
 한양대학교*, 동양미래대학교**

Improve of efficiency of Multi D.O.F spherical motor through the reduction of eddy current loss

Kyung-Pyo Hong*, Won-Kook Lee*, Ho-Joon Lee*, Dong-Woo Kang*, Sung-Hong Won**, Ju Lee*
 Hanyang University*, Dongyang Mirae University**

Abstract - Efficiency of Multi D.O.F spherical motor is one of the important performance indicators. So Through the reduction of eddy current loss on how to improve the efficiency were studied. Stator iron core's material with high permeability and resistivity of material using the eddy current loss was reduced. However, it was the disadvantages of production and economic. For these reasons, prevent eddy current loss of the iron core of multi D.O.F spherical motor as a viable alternative to motor using rotor with double-air gap.

1. 서 론

다자유도 구동 구형 모터는 회전자가 회전 운동뿐 아니라 기울임 운동으로 정의되는 포지셔닝 운동이 병행되는 특수한 타입의 모터이다. 다자유도 구동 구형 모터의 구동 특성 때문에 자동화 기계와 같은 로봇 산업, 군사 탐지용 전차, 감시용 카메라에 적용이 가능하다. 특히 인간과 유사한 부드러운 동작이 요구되는 로봇 관절용에 적용 가능하다. 다자유도 구동 구형 모터는 1 자유도의 모터를 여러 개 사용한 시스템에서 이 모터들을 다자유도의 구동 모터 한 개로 대체를 함으로써 시스템의 체적을 줄이고 효율을 개선할 수 있다는 장점을 가지고 있다.[1], [2] 따라서 다자유도 구동 구형 모터를 이용하여 기어를 사용한 여러 개의 1 자유도 모터를 대체하기 위해서는 기존의 시스템 효율을 극복할 수 있어야 한다. 이처럼 다자유도 구동 구형 모터에서 중요한 성능 지표 중 하나가 효율이다. 본 논문에서는 프레임형 다자유도 구동 구형 모터의 고정자 철심 코어 재질 변화를 통한 효율 개선과 문제점을 서술하였으며 이런 문제점을 해결하기 위한 이중 공극형 회전자를 가진 새로운 다자유도 구동 구형 모터인 이중 공극형 다자유도 모터를 통하여 제작성을 고려한 효율 개선 연구를 수행하였다.

2. 본 론

2.1 와전류 손실의 저감을 통한 효율 개선 정의

다자유도 구동 구형 모터에서 효율은 중요한 성능 지표이므로 효율을 향상시키는 연구가 필요하게 된다. 효율을 향상시키는 방법의 하나가 와전류 손실 저감을 통하여 효율을 향상시키는 것이다. 단위 체적당 와전류 손실의 특성식은 식 (1)과 같이 정의한다.[3]

$$P_e = \frac{c^2}{12\rho} \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 \tag{1}$$

한 주기 동안의 단위체적당 평균 와전류 손실의 특성식은 식 (2)로 정의할 수 있다.

$$P_e = \int_0^{2\pi} \frac{c^2}{12\rho} \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 d\theta \tag{2}$$

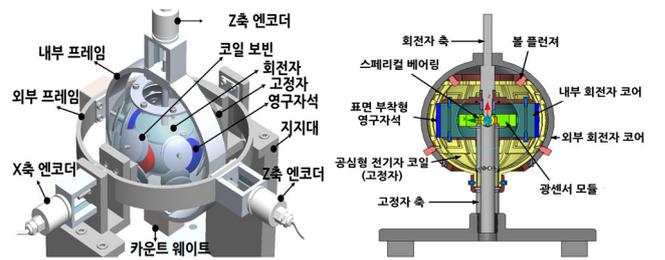
여기서 c 는 철심의 적층 길이, ρ 는 저항율을 나타낸다. 와전류 손실의 특성식은 와전류 손실의 경향과 저감대책을 세울 때 중요하다.

일반적인 원통형 모터의 경우 회전자 회전운동에 의해 고정자의 철심 내부를 시변하는 자속이 관통함으로써 발생하는 와전류 손실을 줄이기 위해 얇은 강판을 적층 하여 제작하는 것이 일반적이지만 다자유도 구동 구형 모터의 경우 고정자의 형상이 구형이기 때문에 얇은 강판을 이용하여 적층 하려면 후가공처리가 필요하거나 구형의 형상을 유지할 수 있도록 다른 반경을 가지는 여러 강판을 제작해야 하는 제작상의 어려움이 존재한다.

이런 이유로 특성식을 통하여 다자유도 구동 구형 모터의 와전류 손실의 경향과 저감대책으로 고정자 재질을 투자율과 저항율이 높은 재질을 사용하여 와전류 손실을 줄이는 방식과 구조적으로 철심 코어 내시

변하는 자속밀도를 억제하여 와전류 손실을 줄이는 방식을 와전류 손실의 저감 대책으로 선택하여 연구를 진행하였다.

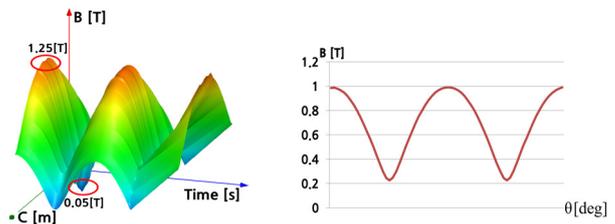
2.1.1 특성식을 통한 와전류 손실의 경향과 저감 대책 연구



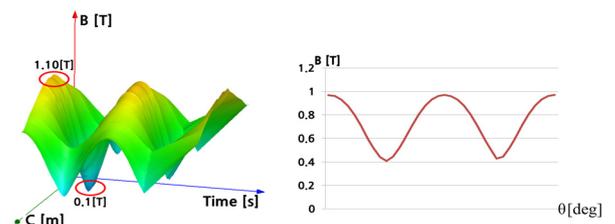
<그림 1> 프레임형 다자유도 구동 구형 모터의 구조
 <그림 2> 이중 공극형 다자유도 구동 구형 모터의 구조

<그림 3>과 <그림 4>는 SM45C 재질과 Somaloy 550 재질을 각각 고정자 철심 코어로 사용한 <그림 1>의 구조를 가진 프레임형 다자유도 구동 구형 모터의 고정자 철심 코어에서의 자속밀도의 시변을 보여주는 그래프이다. 그래프를 보게 되면 SM45C 재질을 사용한 고정자 철심 코어 내에서의 자속밀도의 변화가 크다는 것을 알 수 있다. <표 1>은 식 (2)의 특성식을 통하여 와전류 손실을 계산한 표이다. 높은 저항율과 투자율 그리고 고정자 철심 코어에서의 자속밀도의 시변 값이 작은 Somaloy 550 재질을 고정자 철심 코어로 사용한 모델의 와전류 손실이 SM45C 재질을 사용한 모델에 비하여 저감 되었다.

회전자의 회전운동에 의한 철심 코어 내 시변하는 자속밀도 성분이 없다면 회전자 회전운동에 의해 발생하는 와전류 손실을 억제할 수 있기에 <그림 2>의 구조를 가진 내부 회전자와 최외각의 외부 회전자가 구조적으로 같이 동기 속도로 회전하여 외부 회전자 철심 코어에 내부 회전자의 회전운동에 의한 와전류 손실이 발생하지 않는 새로운 타입의 이중 공극형 다자유도 모터에 대한 연구를 진행하였다. 이런 경향성을 특성식을 통하여 알 수 있다.



<그림 3> SM45C 재질 고정자 철심에서의 자속밀도 그래프



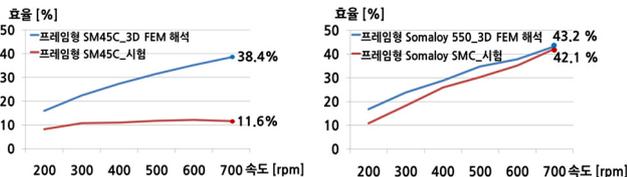
<그림 4> Somaloy 550 재질 고정자 철심에서의 자속밀도 그래프

〈표 1〉 특성식을 통한 와전류 손실 계산

	프레임형	프레임형
	SM45C	Somaloy 550
$\rho[\mu\Omega m]$	0.162	30
$c[m]$	0.09	0.09
$\int_0^{2\pi} \left(\frac{dB}{dt}\right)^2 d\theta$	0.265	0.173
$P_c [W/m^3]$	1104.17	3.89

2.2 프레임형 다자유도 구동 구형 모터의 효율 시험 평가

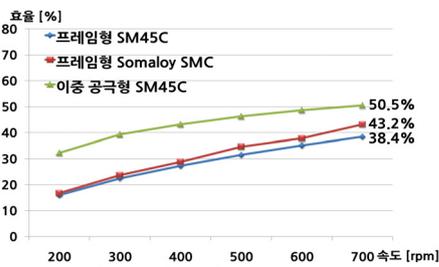
〈그림 5〉는 프레임형 다자유도 구동 구형 모터의 3D FEM 해석을 통한 효율 측정값과 효율 시험을 통하여 검증한 효율 비교 그래프이다. 프레임형 다자유도 구동 구형 모터의 3D FEM 해석을 통한 효율 측정값을 보게 되면 높은 저항율과 투자율을 가진 Somaloy 550재질을 고정자 철심 코어로 사용한 모델의 효율이 SM45C재질을 사용한 모델에 비하여 개선되었다. 시험을 통한 효율 측정값을 보게 되면 SM45C 재질을 고정자 철심 코어로 사용한 모델의 경우 낮은 저항율에 의해 고속으로 회전함에 따른 와전류에 의한 브레이킹 토크로 인하여 더 큰 전력을 소비하게 되어 효율이 급격하게 저하되는 현상을 시험을 통하여 확인할 수 있었다. Somaloy 550 재질을 사용한 모델의 경우 높은 저항율과 투자율에 의해 시험과 3D FEM 해석으로 측정된 효율이 큰 차이를 보이지 않았다.



〈그림 5〉 재질에 따른 효율 비교 그래프

2.3 프레임형과 이중공극형 모터의 3D FEM을 통한 효율 비교

〈그림 6〉은 프레임형 다자유도 구동 구형 모터의 고정자 재질을 SM45C와 Somaloy 550을 사용한 다자유도 구동 구형 모터와 SM45C재질을 철심 코어로 사용한 이중 공극형 다자유도 구동 구형 모터의 효율 비교 그래프이다. 그래프를 보게 되면 SM45C재질을 고정자 철심 코어로 사용한 모델보다 투자율과 저항율이 높은 Somaloy SMC재질을 고정자 철심 코어로 사용한 모델이 효율이 향상되었으며 특히 이중 공극형 다자유도 구동 구형 모터는 내부 회전자와 외부 회전자 같이 동기 속도로 회전하기에 내부 회전자의 회전운동에 의해 외부 회전자 철심 코어에 와전류가 발생하지 않아 이에 따른 와전류 손실을 억제할 수 있어 효율이 프레임형 다자유도 구동 구형 모터보다 개선되었다. 고정자 철심 코어 내 와전류 발생이 저감 되면 와전류에 의해 발생 되는 브레이킹 토크가 저감되어 공극에서의 평균 토크의 저감을 줄일 수 있어 브레이킹 토크에 의한 효율 저감을 예방할 수 있다. 〈표 2〉는 공극에서의 각 모델의 평균 토크 값이며 고정자 철심 코어 내 와전류 발생이 줄어 프레임형 Somaloy 550모델이 프레임형 SM45C모델 보다 공극에서의 평균 토크 값이 크게 발생하는 것을 알 수 있으며 특히 이중 공극형 다자유도 구동 구형 모터는 내부 회전자의 회전운동에 의한 외부 회전자 철심 코어 내 와전류가 발생하지 않으므로 브레이킹 토크에 의한 공극에서의 평균 토크 저감을 최대한 억제할 수 있다.

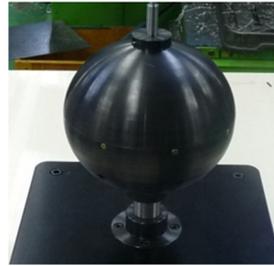


〈그림 6〉 각 모델 효율 비교 그래프

〈표 2〉 다자유도 구형 모터의 각 모델의 평균 토크

	프레임형	프레임형	이중 공극형
	SM45C	Somaloy 550	SM45C
$T[mNm]$	495	525	670

2.4 와전류 손실 저감과 제작성을 고려한 이중 공극형 모터 제작



〈그림 7〉

〈그림 7〉 이중 공극형 다자유도 구동 구형 모터



〈그림 8〉

〈그림 8〉 Somaloy 550재질을 사용한 프레임형 모터의 고정자 단면

와전류 손실의 특성식을 통하여 프레임형 다자유도 구동 구형 모터의 와전류 손실의 경향을 분석하고 저감 대책으로 고정자 철심 코어 재질을 높은 저항율과 투자율을 가지는 Somaloy 550재질을 통한 와전류 손실 저감으로 효율 향상에 대한 검증은 3D FEM 해석을 통하여 시행 후 모터를 제작하여 시험을 통하여 검증하여 보았다.

고정자 철심 코어 재질을 Somaloy 550을 사용하여 와전류 손실을 저감하였지만 〈그림 8〉에서 보는 것과 같이 불균일한 고정자 두께와 약한 내강성으로 제작이 어렵다는 단점이 있다. 이런 제작상의 문제점과 와전류 손실을 최대한으로 억제할 수 있는 대안으로 〈그림 7〉의 이중 공극형 다자유도 구동 구형 모터를 제작하게 되었다.

프레임형 다자유도 구동 구형 모터와 달리 이중 공극형 다자유도 구동 구형 모터는 영구자석이 부착된 내부 회전자와 최외각에 위치한 외부 회전자가 구조적으로 연결되어 있어 동기속도로 같이 회전하게 되므로 내부회전자 회전운동에 의해 발생한 자속은 외부 회전자 철심에서 시변하지 않기 때문에 구조적으로 내부회전자의 회전운동에 의한 외부 회전자 철심 코어 내 와전류 손실은 존재하지 않게 되어 〈그림 6〉에서 보는 것과 같이 효율을 개선할 수 있었으며 제작성이 좋아졌다.

3. 결 론

본 논문에서는 와전류 손실의 특성식을 통한 와전류 손실의 경향을 예측하고 이를 저감하는 대책으로 프레임형 다자유도 구동 구형 모터의 고정자 철심 코어 재질을 높은 저항율과 투자율을 가진 Somaloy 550을 사용하여 와전류 손실의 저감을 통하여 효율 향상에 대한 연구를 진행하였지만 제작성과 경제성의 단점이 있어 이를 해결 하고자 새로운 구조적 형상의 이중 공극형 다자유도 구동 구형 모터를 현실적 대안으로 제시하여 연구를 진행하였다. 이중 공극형 다자유도 구동 구형 모터의 외부회전자와 내부회전자가 구조적으로 연결되어 동기속도로 같이 회전하게 되어 내부 회전자의 회전에 의해 발생한 자속이 외부 회전자 철심 코어 내에서 시변하지 않으므로 내부 회전자 운동에 의한 와전류 손실을 억제하는 구조적 특징이 있으며 철심 코어 내 와전류의 발생이 최대한 억제됨에 따라 와전류에 의한 브레이킹 토크의 발생을 최대한 예방하여 공극에서의 평균 토크의 저감을 예방하여 손실을 최대한 줄였다. 이런 강점으로 3D FEM 해석을 통한 효율을 기존의 프레임형 다자유도 구동 구형 모터보다 향상시킬 수 있었으며 구조가 간단해져서 많은 어플리케이션에 적용 가능하게 되었다.

향후 연구 계획으로 이중 공극형 다자유도 구동 구형 모터의 효율 시험 평가를 진행할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2008-0060145).

참고 문헌

[1] Sung-Hong Won, "A Study on the Analysis and the Control characteristics of a 3 D.O.F Spherical Motor for Robotic joints", PhD. thesis, Hanyang University, Seoul, 2007
 [2] Liang Yan, I-Ming Chen, Guilin Yang and KoK-Meng Lee, "Analytical and Experimental Investigation on the Magnetic Field and Torque of a Permanent Magnet Spherical Actuator", IEEE/ASME Transaction on Mechatronics, Vol. 11, No. 4, August 2006.
 [3] 이 주, "전기기기" 홍릉과학출판사, pp.125-130, 2011