

저자 (Authors)	임명섭 Myung-Seop Lim
출처 (Source)	전기학회논문지 68(5) , 2019.5, 634-639(6 pages) The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers 68(5) , 2019.5, 634-639(6 pages)
발행처 (Publisher)	대한전기학회 The Korean Institute of Electrical Engineers
URL	http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeld=NODE08167658
APA Style	임명섭 (2019). [전기기기] 공간고조파해석 기법을 이용한 웨어러블 로봇용 SPMSM 설계. 전기학회논문지, 68(5), 634-639
이용정보 (Accessed)	한양대학교 166.104.66.*** 2021/06/14 14:18 (KST)

저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

Design of SPMSM for Wearable Robot by Using Space Harmonic Analysis

공간고조파해석 기법을 이용한 웨어러블 로봇용 SPMSM 설계

Myung-Seop Lim*

(임 명 섭)

Abstract - This paper discusses the analytical design method of a 125W surface-mounted permanent magnet synchronous motor (SPMSM) as an actuator for an exoskeleton wearable robot. Considering the properties of the wearable robot application, pole and slot combination is determined to minimize vibration as well as cogging torque. In addition, the shape of the magnetic core and permanent magnets are determined by using the analytical approaches including space harmonic analysis (SHA) to maximize torque density as well as minimize cogging torque and torque ripple, simultaneously. As a result, the SPMSM which has high torque density with small axial length, low cogging torque/torque ripple and a large hollow rotor is designed.

Key Words : Cogging torque, Eccentricity, Exoskeleton, Surface-mounted permanent magnet synchronous motor, Torque ripple, Wearable robot

1. 서 론

인간의 근력을 보조 혹은 강화해주는 역할을 하는 외골격(exoskeleton) 웨어러블 로봇(wearable robot)은 최근 다양한 분야에서 그 수요가 증가하고 있다. 특히, 근력 보조 및 재활이 필요한 노약자 및 환자들에게 필요한 의료용 로봇부터 근로자들의 노동 강도를 저감하고 보다 작업 효율을 향상시키기 위한 산업용, 그리고 군인들의 힘로 주파 능력 및 전투 능력을 향상시키기 위한 군사용 웨어러블 로봇으로서도 각광받고 있다[1]-[3].

웨어러블 로봇에서 전기모터는 주로 팔과 다리의 관절 부분에 위치하게 된다. 로봇의 무게 및 부피를 최소화하여 착용자의 불편함을 최소화하고, 로봇의 상품성을 극대화하기 위해서는 따라서 모터 자체의 축 방향 길이가 작은 코인타입, 즉 박형의 고토크/고출력 밀도 모터설계가 필수적이다. 또한, 모터의 회전자 내부에 기어를 설치하고, 전력이나 센서 신호들을 송수신하기 위한 배선들을 용이하게 위치시키기 위해서는 회전자 내부의 중공을 크게 설계해야만 한다. 게다가, 웨어러블 로봇 착용자의 움직임을 최대한 부드럽게 함으로써 착용자의 거부감을 최소화할 수 있도록 히스테리시스 토크, 코깅 토크, 토크 리플 등을 최소화해야만 한다[4],[5].

앞서 제시된 웨어러블 로봇에 최적화된 관절 구동용 모터를 설계하기 위해 본 논문에서는 고토크/고출력 밀도의 영구자석(permanent magnet, PM) 모터를 다룬다. 그 중에서도 코깅 토크와

크와 토크 리플을 최소화하기 위해 표면부착형 영구자석 동기전동기(surface-mounted permanent magnet synchronous motor, SPMSM)의 수식적 설계 방법을 제시한다. 먼저, 코깅 토크와 진동/소음을 고려하여 극 수와 슬롯 수를 결정한다. 두번째로, 모터 철심의 자기저항을 최소화하기 위한 고정자 철심 형상을 설계방법을 보여준다. 세번째로, 공간고조파 해석(space harmonic analysis, SHA)를 이용하여 회전자 영구자석의 자극 폭과 편심(eccentricity)량을 결정한다. 이때, 영구자석의 자극 폭과 편심량에 따른 역기전력(back-electromotive force, BEMF)의 크기와 왜형률(total harmonic distortion, THD) 그리고 코깅 토크의 크기 변화를 분석함으로써 설계 변수들의 최종 수치를 결정한다. 마지막으로, 설계된 모터의 비선형 유한요소해석(finite element method, FEM)을 통해 모터의 토크, 속도, 전류 등의 특성 곡선을 예측하고, 코깅 토크와 토크 리플과 같은 토크 특성을 해석한다.

2. 극 수-슬롯 수 결정

제어기의 전압 및 전류 주파수는 고속 운전을 위해 극 수에 비례하여 증가해야만 한다. 실제 모터의 극 수는 최대 회전 속도와 제어기의 성능에 의해 제한된다. 따라서 본 연구에서는 모터의 극 수를 최대 16극으로 한정하여 검토하였다. 또한, 본 논문에서는 웨어러블 로봇용 모터의 특성상 고정자 권선의 엔드턴(end-turn) 높이를 최소화하기 위해 집중권만을 검토하였다.

극 수-슬롯 수 조합을 결정하기 위해서 우선, 모터의 코깅 토크를 분석하였다. 코깅 토크의 크기는 코깅 토크의 주파수에 반비례하고, 코깅 토크의 주파수는 이론적으로 극 수와 슬롯 수의 최소 공배수(LCM)에 의해 결정 된다[6]-[9]. 따라서, 코깅 토크

* Corresponding Author : School of Mechanical Engineering, Yeungnam University, Korea.

E-mail: limmang87@yu.ac.kr

http://orcid.org/0000-0002-5339-2728

Received : March 12, 2019; Accepted : April 8, 2019

의 크기를 최소화하기 위해 다양한 극 수와 슬롯 수 조합에 따른 LCM을 검토하였다. 두 번째로는 모터의 진동/소음 특성을 고려하기 위해 식 (1)과 (2)를 사용하여 고정자의 변형량과 진동/소음 차수(noise/vibration order, force order)를 살펴보았다 [10].

$$\mu = \frac{|0.5r_\lambda \mp s_1|}{p} = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

식 (1)에서, r_λ 는 진동/소음 차수이고, s_1 과 p 각각 슬롯 수와 극 쌍수이다. 식 (2)에서와 같이 고정자 철심의 변형량 Δd 는 진동/소음 차수 r_λ 에 4제곱에 반비례하는 것을 알 수 있다 [11].

$$\Delta d \propto \frac{1}{r_\lambda^4} \quad (2)$$

Table 1은 식 (1)과 (2)를 토대로 하여 계산된 극 수와 슬롯 수의 조합에 따른 LCM과 진동/소음 차수를 보여준다. 전

표 1 극 / 슬롯 수 조합에 따른 특성

Table 1 Characteristics according to the pole/slot number combinations

극/슬롯	LCM(극, 슬롯)	Force order r_λ
12 / 15	60	6
12 / 18	36	12
14 / 18	126	6
14 / 21	42	14
16 / 18	144	4
16 / 24	48	16

결과적으로, LCM과 진동/소음 차수가 높을수록 각각 코깁 토크의 크기와 고정자 철심의 변형에 따른 진동/소음이 낮다는 것을 의미한다. 분석결과인 Table 1을 보면, 16극 24슬롯 모델이 진동/소음 차수가 가장 크기 때문에 고정자의 변형에 의한 진동/소음이 가장 작을 것으로 예상된다. 하지만, 14극 18슬롯이나 16극 18슬롯 모델들 보다 극 수와 슬롯 수의 LCM이 작기 때문에 상대적으로 더 큰 코깁 토크를 갖는다는 것을 예상할 수 있다. 한편, 코깁 토크가 가장 작은 두 모델인 14극 18슬롯과 16극 18슬롯 모델의 진동/소음 차수를 살펴보면, 14극 18슬롯 모델의 진동/소음 차수가 더 크기 때문에 고정자의 변형, 즉 진동이 더 작을 것이라는 것을 추론할 수 있다. 결론적으로, 코깁 토크의 저감과 진동/소음 저감은 서로 상충되는 설계 특성을 갖는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 웨어러블 로봇용이라는 모터의 특성에 맞추어 착용자의 움직임에 보다 직접적인 영향을 주는 코깁 토크를 최소화하기 위해 극 수와 슬롯 수를 14극 18슬롯으로 결정하였다.

3. 고정자 설계

모터의 고정자 형상을 설계하기 위해서는 철심의 전체 자기저항(reluctance, R_m)을 최소화하기 위한 고정자의 치 폭과 요크 폭이 수식적으로 결정되어야 한다. Fig. 1에서 14극 18슬롯 모델의 등포텐셜선(equipotential line)에서 볼 수 있듯이 치의 중심을 통과하는 자속은 고정자 요크에서 양쪽으로 나누어지고, 이렇게 나누어진 자속은 그 양 옆의 치를 통과하여 다시 회전자 방향으로 흐르게 된다. 철심을 통과하는 이러한 자속 경로는 연속적으로 존재하기 때문에 셀 수 없이 많으며, 따라서 평균 자기저항을 얻기 위해서는 평균 자속 경로를 결정해야 한다 [12]. 자속 경로의 중앙이 평균적인 자속밀도를 갖는다고 가정하면, 평균 자속밀도 경로는 Fig. 1의 검은색 화살표로 나타낼 수 있다.

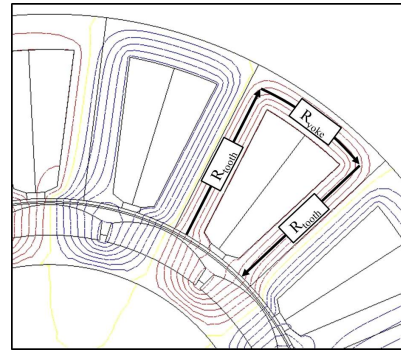


그림 1 14극 18슬롯 모델의 등포텐셜선과 자기회로
Fig. 1 Equipotential line and magnetic circuit of a 14pole 18slot model

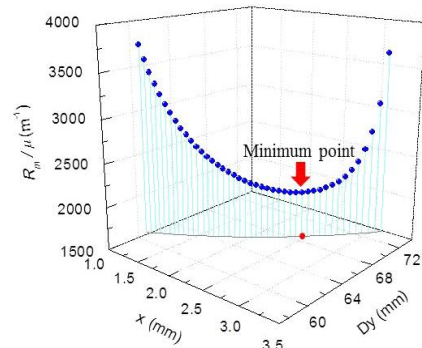


그림 2 14극 18슬롯 모델 고정자의 총 자기저항
Fig. 2 Total reluctance in the stator of the 14pole 18slot model

따라서, 식 (3)~(5)를 이용하여 고정자 철심 전체의 자기저항을 고정자의 형상 정보로부터 계산할 수 있다.

$$R_m = 2 \times R_{tooth} + R_{yoke} \quad (3)$$

$$R_{tooth} = \frac{D_y + D_h - 2D_s}{8\mu \cdot x \cdot L_{st}}, \quad R_{yoke} = \frac{\pi \cdot (D_y + D_h)}{\mu \cdot L_{st} \cdot (D_h - D_y)} \quad (4)$$

$$D_y = sn \cdot x \cdot \frac{2}{\pi} + \sqrt{\left(\frac{2}{\pi} \cdot sn \cdot x\right)^2 + D_s^2} - \frac{4}{\pi} \cdot sn \cdot (x \cdot D_s - AS) \quad (5)$$

앞선 수식들에서, D_h 와 D_s 는 각각 고정자의 외경과 내경이다. D_y 는 고정자 요크의 내경이고, μ 는 철심의 투자율이다. L_{stik} 는 철심의 적층 길이이고, sn 은 슬롯 수이며, x 는 치 폭 길이의 절반을 의미한다. D_s 는 회전자 외경과 공극 길이에 의해 계산될 수 있고, D_y 는 코일의 턴 수와 전류 밀도로부터 계산된 슬롯 면적 AS 에 의해 계산된다. 계산된 자기저항은 Fig. 2에서와 같이 x 와 D_y 에 의해 결정된다. 따라서, 모터의 자기저항이 최소가 되는 점을 Fig. 3에서 찾음으로써 이때의 x 와 D_y 를 찾을 수 있고, 결과적으로 자기저항이 최소가 되는 고정자 철심의 형상을 결정할 수 있다.

4. 회전자 설계

본 연구에서는 회전자의 자극 폭(pole angle)과 편심(eccentricity)을 결정하기 위한 수식적인 방법으로 공간고조파 해석(space harmonic analysis, SHA)을 이용하였다. 공간고조파 해석은 아래의 가정들을 기반으로 한다.

- 영구자석들은 선형적으로 자화되어 있고, 완전 착자 및 자화가 되어 있다.
- 단부효과와 프린징 효과는 고려하지 않는다.
- 회전자와 고정자 철심은 등방성 재질이며, 투자율은 무한대이다.

편심을 고려한 공간고조파 해석을 위해서는 영구자석을 원주 방향에 따라 여러 미소 조각으로 나누어 해석을 할 필요가 있다. 나눠진 영구자석 미소 조각들은 그 두께가 원주 방향에 따라 각각 다르고, 이는 공극의 길이가 다르다고 할 수 있다. 만약 이러한 자석의 분할 개수를 충분히 높인다면, 분할된 미소 자석들의 두께는 서로 다르지만, 미분의 개념을 통해 각각의 분할된 미소 자석 한 개는 일정한 두께와 공극 길이를 가진다고 가정할 수 있다. 따라서, 각각의 분할된 미소 자석에 대해서는 편심이 없는 일반적인 SPMSM과 동일한 지배 방정식 및 경계조건을 적용하여 각각의 미소 자석에 의한 공극 자속밀도를 계산할 수 있다 [13]-[15]. 공극 영역에서의 지배 방정식 Laplace equation과 영구자석이 존재하는 반경 범위 영역에서 지배 방정식 Poisson equation은 각각 식 (6)과 (7)이다.

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad (6)$$

$$\nabla^2 \Phi = \frac{1}{\mu_{rec}} \nabla \cdot \vec{M} \quad (7)$$

Φ 와 M 은 각각 자기 스칼라 포텐셜(magnetic scalar potential)과 자화벡터(magnetization vector)를 의미하고, μ_{rec} 는 리코일 투자율을 의미한다. 마지막으로, 중점의 원리에 따라 그 결과를 모두 합함으로써 수학적 오류 없이 편심을 고려한 공극 자속 밀도를 수식적으로 계산할 수 있다. 공간고조파 해석법의 신뢰성을 확인해보기 위해 임의의 모델에 대해 공간고조파 해석 결과와 유한요소해석(FEM)을 수행하였다. 임의의 모델은 영구자석의 잔류 자속 밀도가 1T이고, 10mm의 편심이 적용된 slot-less SPMSM 모델이다. 그 해석 결과로써 공극에서의 반경 방향과 접선방향의 자속밀도가 Fig. 3과 Fig. 4에 제시되어 있다. 그 결과를 살펴보면, 공간고조파 해석 결과가 유한요소해석 결과와 매우 유사함을 확인할 수 있다.

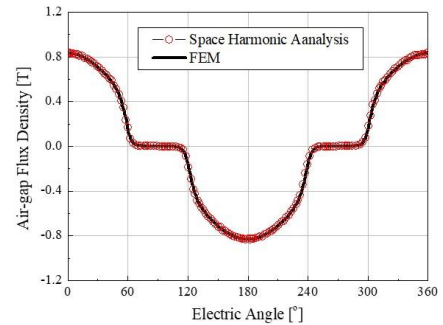


그림 3 반경 방향 자속 밀도의 FEM과 SHA 결과

Fig. 3 FEM and SHA results of magnetic flux density in radial direction

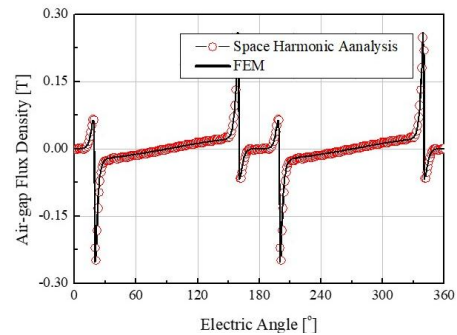


그림 4 접선 방향 자속 밀도의 FEM과 SHA 결과

Fig. 4 FEM and SHA results of magnetic flux density in tangential direction

Fig. 5와 Fig. 6은 앞서 언급된 공간고조파 해석을 이용하여 모터의 자극 폭과 편심에 따른 코깁 토크의 크기, 역기전력(Back-electromotive force, BEMF)의 크기와 왜형률(Total harmonic distortion, THD)를 보여준다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이, 자극 피치(pole pitch) 대비 자극 폭(pole angle)이 0.7일 때, 역기전력의 왜형률과 코깁 토크의 크기가 최소가 되는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 이 점에서는 역기전력의 크기가 상대적으로 작고, 따라서 모터의 토크 및 출력 밀도가 상대적으로 낮을 수밖에

에 없다. 따라서, 본 연구에서는 코깅 토크가 매우 작고 역기전력이 큰 자극 피치 대비 자극 폭이 0.92인 점을 최적의 기본 설계 지점으로 결정하였고, 역기전력의 왜형률은 편심을 통해 저감하는 것을 설계 목표로 하였다. Fig. 6에서는 편심의 변화에 따른 코깅 토크의 크기, 역기전력의 크기와 왜형률의 해석 결과가 나와 있다. 이 해석 결과를 기반으로 하여, 역기전력의 왜형률과 코깅 토크의 크기가 가장 작은 15.5mm를 최적의 편심량으로 결정하였다. 결과적으로, 역기전력의 크기는 최대화하면서 동시에 역기전력의 왜형률과 코깅 토크의 크기를 최소화하기 위해 자극 피치 대비 자극 폭은 0.92로, 회전자의 편심량은 15.5mm로 결정되었다.

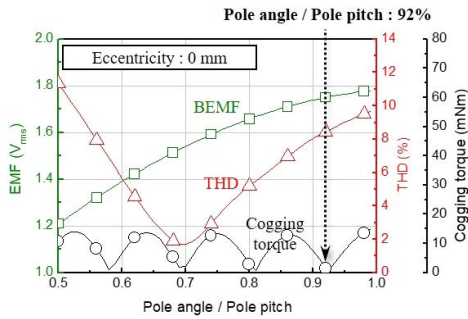


그림 5 자극 폭에 따른 파라미터 변화
 Fig. 5 Parameter variations according to the pole angle

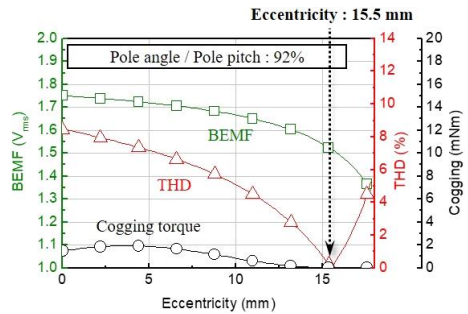


그림 6 편심에 따른 파라미터 변화
 Fig. 6 Parameter variations according to the eccentricity

5. 설계 결과

5.1 설계된 모터의 파라미터 분석

앞선 설계 결과로써 14극 18슬롯 SPMSM모델의 형상과 목표 성능이 Fig. 7과 Table 2에 제시되어 있다. Fig. 7의 형상을 살펴보면, 회전자의 영구자석에 편심이 적용되어 있으며, 앞서 언급한 바와 같이 회전자 내경이 33mm로 매우 크기 때문에 웨어러블 로봇 구동용으로서 기어의 설치나 각종 배선 작업에 용이한 형상이라는 것을 알 수 있다. 또한, Table 2에서 나타나 있듯이 적층 길이가 7mm로 모터의 축 방향 길이, 즉 두께가 매우 얇은 모터

형상으로 인하여 웨어러블 로봇의 관절에 직접 장착을 하기 용이하다는 것을 알 수 있다.

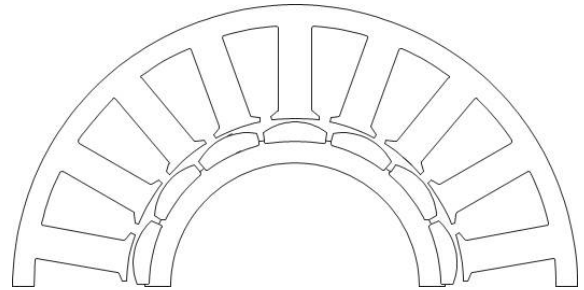


그림 7 설계된 모터 형상
 Fig. 7 Shape of the designed motor

표 2 요구 사양
 Table 2 Required specification

Quantity	Unit	Value
Supply voltage	V_{DC}	24
Current limit	A_{rms}	10.61
Power	W	125
Torque	Nm	0.4
Max. speed	rpm	3,000
Outer diameter	mm	75
Inner diameter of rotor	mm	33
Stack length	mm	7
Control method	-	$I_d=0$ control
Cogging, Ripple	Nm	Minimization

Fig. 8에서 보여지는 역기전력의 비선형 유한요소해석 결과와 공간고조파 해석 결과를 비교해보면, 모두 1000rpm에서의 무부하 역기전력의 크기가 약 1.35 V_{rms} 로 그 결과에 큰 오차가 없음을 확인할 수 있었다. 마지막으로 코일의 상저항은 형상 정보로부터 수식적 산정으로 통해 실은 기준 51.9 mOhm으로 계산되었다.

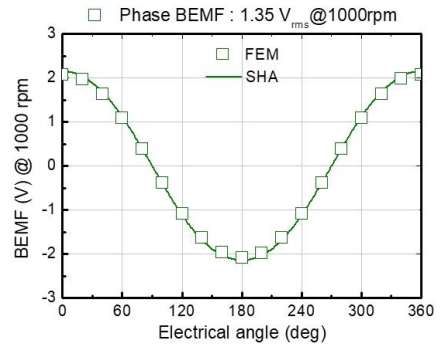


그림 8 설계된 모터의 역기전력 파형
 Fig. 8 BEMF waveform of the designed motor

5.2 설계된 모터의 특성 곡선

본 연구에서는 철손을 고려한 d, q축 등가회로를 이용하여 정상 상태 조건에서의 모터 특성 곡선을 예측하였다 [16]. 모터의 속도, 토크, 전류의 크기 및 위상각 등의 특성 해석 결과가 Fig. 9에 나타나 있고, 그 결과 Table 2에 제시되어 있는 목표 사양을 모두 만족함을 확인할 수 있다.

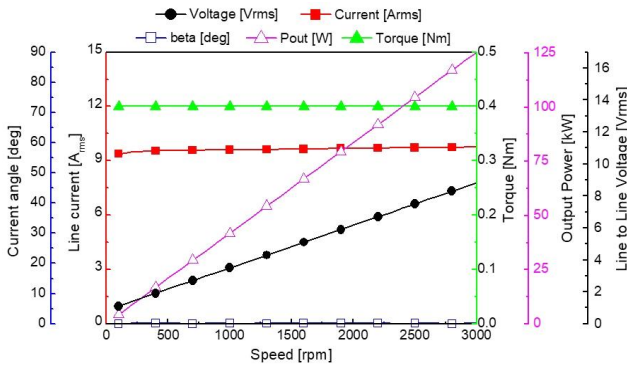


그림 9 설계된 모터의 특성 곡선
Fig. 9 Characteristics curve of the designed motor

설계된 SPMSM의 속도, 토크, 전류의 크기와 위상각 등의 특성 곡선뿐만 아니라, 코깅 토크와 토크 리플과 같은 토크 특성의 비선형 유한요소해석 결과가 Fig. 10과 Fig. 11에 각각 제시되어 있다. 코깅 토크 결과를 보면 그 진폭의 크기가 약 0.21 mNm로 매우 작다는 것을 확인할 수 있다. 이 해석 결과는 공간고조파 해석 시 무시되는 단부효과나 프링징 효과에 의해 영향을 받을 수 있고, 유한요소해석을 할 때 요소의 크기나 해석 수렴율에 의해서도 영향을 받을 수 있으며, 실제 제작 및 시험을 할 때에도 제작 공차나 시험 오차에 의해 유의미하게 변할 수 있는 작은 수치이다. 토크 리플 역시 0.62%로 매우 작기 때문에 웨어러블 로봇의 착용자가 큰 거부감이나 이질감 없이 구동이 가능할 것으로 예상할 수 있다.

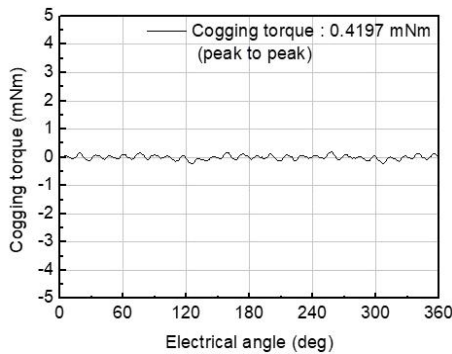


그림 10 설계된 모터의 역기전력 파형
Fig. 10 BEMF waveform of the designed motor

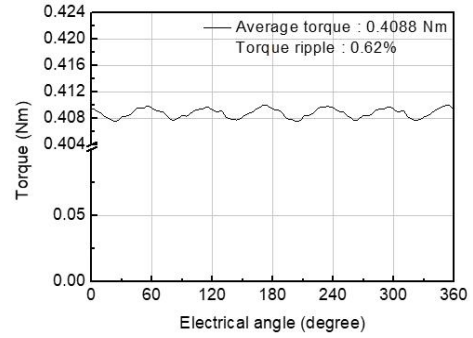


그림 11 설계된 모터의 토크 리플
Fig. 11 Torque ripple of the designed motor

6. 결 론

웨어러블 로봇용 모터의 특징으로 착용자로 하여금 이질감이 나 부담감을 최소화하고 상품성을 극대화하기 위해 1) 축 방향 길이를 최소화하고, 2) 회전자 내경을 극대화하여 중공을 최대화하며, 3) 코깅 토크와 토크 리플을 최소화하고, 4) 토크 및 출력밀도를 최대화할 필요가 있다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 설계 목표를 만족하기 위해 수식적인 설계 방법으로써 진동 특성과 코깅 토크 특성을 고려한 극 수와 슬롯 수 결정, 자기 등가 회로를 기반으로 하는 고정자 형상 설계 방법과 공간고조파 해석을 기반으로 하는 회전자 형상 설계 방법을 보여준다. 특히 공간고조파 해석을 이용함으로써 자극 폭과 편심률에 따른 역기전력의 크기와 왜형을 그리고 코깅 토크의 경향성을 손쉽게 확인할 수 있었다. 설계 결과, 회전자 중공이 33mm이고 적층 길이가 7mm인 0.4Nm-125W의 SPMSM이 설계되었다. 기본적인 목표 성능을 만족함은 물론 코깅 토크 진폭과 토크 리플의 크기 역시 각각 0.21 mNm와 0.62%로 매우 작아 웨어러블 로봇의 구동용 모터로서 적합하다는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 2019년도 (재)동일문화장학재단 학술연구비 지원에 의해 수행되었음.

References

[1] A. T. Asbeck, S. M. M. De Rossi, I. Galiana, Y. Ding, and C. J. Walsh, "Stronger, Smarter, Softer: Next-Generation Wearable Robots", *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Vol. 21, No. 4, pp.22-23, Dec. 2014.

[2] C. Nabeshima, K. Ayusawa, C. Hochberg, and E. Yoshida,

- “Standard Performance Test of Wearable Robots for Lumber Support”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 3, No. 3, pp. 2182-2189, July 2018.
- [3] J. H. Choo, and J. H. Park, “Increasing Payload Capacity of Wearable Robots Using Linear Actuators”, *IEEE/ASME Trans. Mech.*, Vol. 22, No. 4, pp. 1663-1673, Aug. 2017.
- [4] J. M. Seo, S. H. Ryu, J. H. Kim, J. H. Choi, and I. S. Jung, “Design of Axial Flux Permanent Magnet Brushless DC Motor for Robot Joint Module”, in *Proc. IEEE Int. Power Elec. Conf.* pp. 1336-1340, June 2010
- [5] S. W. Hwang, M. S. Lim, and J. P. Hong, “Hysteresis Torque Estimation Method Based on Iron-Loss Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motor”, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 52, No. 7, Art. No. 8204904, July 2016.
- [6] T. Sun, J. M. Kim, G. H. Lee, J. P. Hong, and M. R. Choi, “Effect of Pole and Slot Combination on Noise and Vibration in Permanent Magnet Synchronous Motor”, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 47, No. 5, pp. 1038-1041, May 2011.
- [7] J. M. Kim, M. H. Yoon, J. P. Hong, and S. I. Kim, “Analysis of Cogging Torque Caused by Manufacturing Tolerances of Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Power Steering”, *IET Electr. Power Appl.*, Vol. 10, No. 8, pp. 691-696, Sept. 2016.
- [8] M. R. Park, J. W. Jung, D. Y. Kim, J. P. Hong, and M. S. Lim, “Design of High Torque Density Multi-Core Concentrated Flux-Type Synchronous Motors Considering Vibration Characteristics”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 55, No. 2, pp. 1351-1359, March/April 2019.
- [9] M. Valavi, A. Nysveen, R. Nilssen, R. D. Lorenz, and T. Rolvag, “Influence of Pole and Slot Combinations on Magnetic Forces and Vibration in Low-Speed PM Wind Generator”, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 50, No. 5, Art. No. 8700111, May 2014.
- [10] J. F. Gieras, C. Wang, and J. C. Lai, “Radial Forces in Synchronous Machines with Slotted Stator”, in *Noise of Polyphase of Electric Motors*, CRC Press Taylor & Francis Group, LLC, 2006, pp. 51-53.
- [11] D. Y. Kim, M. R. Park, J. H. Sim, and J. P. Hong, “Advanced Method of Selecting Number of Poles and Slots for Low-Frequency Vibration Reduction of Traction Motor for Elevator”, *IEEE/ASME Trans. Mech.*, Vol. 22, No. 4, pp. 1554-1562, Aug. 2017.
- [12] M. S. Lim, S. H. Chai, and J. P. Hong, “Design and Verification of 150-krpm PMSM Based on Experiment Results of Prototype”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 62, No. 12, pp. 7827-7836, Mar. 2015.
- [13] J. Y. Choi, “Quasi-3D analysis of Axial Flux Permanent Magnet Rotating Machines using Space Harmonic Methods”, *Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 60, No. 5, pp. 942-948, May 2011.
- [14] K. C. Min, H. B. Kang, M. K. Park, H. W. Cho, and J. Y. Choi, “Eddy Current Loss Analysis in Radial Flux Type Synchronous Permanent Magnet Coupling using Space Harmonic Methods”, *Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 63, No. 10, pp. 1377-1383, Sept. 2014.
- [15] S. W. Suh, M. M. Koo, H. B. Kang, and J. Y. Choi, “Comparison and Analysis of Armature Reaction Magnetic Field of Linear Generator with Coreless/Cored Type Three Phases Concentrated Winding by using Space Harmonic Analytical Method”, *Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 64, No. 1, pp. 64-71, Jan. 2015.
- [16] J. Hur, “Characteristic Analysis of Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor in Electrohydraulic Power Steering Systems”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 55, No. 6, pp. 2316-2323, Jun. 2008.

저 자 소 개



임 명 섭(Myung-Seop Lim)

1987년 1월 17일 생. 2012년 한양대학교 기계공학부 학사 졸업. 2014년 동대학원 자동차공학과 석사 졸업. 2017년 동대학원 미래자동차공학과 박사 졸업. 2017년 3월~2018년 2월 현대모비스 (책임)연구원. 2018년 3월~현재 영남대학교 기계공학부 조교수.

Tel : 053-810-2452

E-mail : limmang87@yu.ac.kr