

Slotless BLDC motor의 열적 특성을 고려한 설계

백승훈, 차현록*, 윤철호*, 강신영, 안재영, 김광현
전남대학교 전기공학과, 한국생산기술연구원*

Design of Slotless BLDC Motor Considering the Thermal Characteristic

S. H. Baek, H. R. Cha*, C. H. Yun*, S. Y. Kang, J. Y. An, K. H. Kim

Electrical engineering, Chonnam National University, Korea Institute of Industrial Technology*

Abstract - Slotless BLDC motor는 Slot과 Teeth가 없으므로 이에 따른 Cogging Torque 및 Torque Ripple이 거의 존재 하지 않으며, 전동기의 무게 또한 감소하게 된다. 또한 권선의 장주(Span)가 짧아 Inductance가 낮기 때문에 고속화가 용이해지며, Slot의 부재는 좀 더 많은 Coil권선을 이용할 수 있다. 하지만 모터의 구조상 전기장하가 높아짐에 따라 권선의 온도 상승에 대한 보완 등이 필요로 되어 지고 있다. 따라서 본 논문에서는 온도 상승 문제를 해결하기 위해 열 발생과 모터사이의 관계 규명을 전류 밀도 함수로 표시 하였고, 전류 밀도 최소화 설계 방법을 제안하였다. 피미언스법에 의한 간략 설계에 의해서 기본 설계를 실시 한 후 FEM을 통한 정밀 해석을 통해서 각각의 민감도를 분석하여 최적의 파라메타를 선정하는 방식을 취하였다. 또한 고속 회전 시 발생하는 진동을 저감하기 위해 모터의 길이방향 즉 축과의 관계를 통하여 진동 저감 설계를 제안하였다.

2. 본 론

2.1 Slotless BLDC motor의 특성 및 문제점

Slotless BLDC Motor는 Slot의 부재로 인해 air-gap이 커져 자속이 감소하기 때문에 출력을 증가시키기 위해서는 전류의 증가를 초래하게 된다[3]. 또한 현존하는 Slotless 모터의 경우 그림 1과 같이 회전자 측에 사용하는 고 에너지 적 자석으로 인해 회전자 Yoke를 설치하여야 하고, 이에 따라 회전자 관성 모멘트가 증가하는 단점을 갖추고 있으며, 또한 모터의 구조상 전기장하가 높아짐에 따라 권선의 온도 상승에 대한 보완 등이 필요로 되어 지고 있다[4]. 이를 해결하기 위해서 일단 열 발생과 모터와의 관계규명을 통해 문제점 해결 방안을 도출하였다. 또한 slotless BLDC motor의 특성을 알아보기 위해 아래와 같은 해석을 실시하였다.

1. 서 론

기존의 소형 제어 모터들은 고정자에 Slot을 파고 코일 권선을 하는 구조로 되어 있어 회전력을 얻기 위해 권선에 전력을 인가하면 Slot과 Teeth의 잡아당기는 힘(릴럭턴스토크)이 발생되는데 Slot이 홈으로 파여 있으므로 힘의 불균일이 필연적으로 발생 되게 되었다. 이러한 힘을 코깅 토크(Cogging Torque)라 하는데 이로 말미암아 기존 모터는 토크리플이 발생 하여 정밀도 저하 및 출력의 한계를 극복하기 어려웠다. Slotless BLDC motor의 회전자 구조는 기존의 Motor와 유사하지만 고정자에 Slot이 없이 Washer 모양의 원환을 적층 시키고 Tube 모양의 코일을 말아서 붙인 구조로 Slot 없는 모터이다 [1]. Slotless BLDC Motor는 Slot과 Teeth가 없으므로 이에 따른 Cogging Torque 및 Torque Ripple이 거의 존재 하지 않으며, 전동기의 무게 또한 감소하게 된다. 또한 권선의 장주(Span)가 짧아 Inductance가 낮기 때문에 고속화가 용이해지며, Slot의 부재는 좀 더 많은 Coil 권선을 이용할 수 있다[2]. 그러나 현존 하는 Slotless 모터의 경우 회전자 측에 사용하는 고 에너지 적 자석으로 인해 회전자 Yoke를 설치하여야 하고, 이에 따라 회전자 관성 모멘트가 증가하는 단점을 갖추고 있으며, 또한 모터의 구조상 전기장하가 높아짐에 따라 권선의 온도 상승에 대한 보완 등이 필요로 되어 지고 있다. 본 논문은 ϕ22 이하의 극소형 구조에서 고효율을 가지고 고속 회전을 하는 slotless 타입의 모터의 설계를 하고자 한다. slotless BLDC motor의 전반적인 특징을 알아보고, 위와 같은 온도 상승 문제를 해결하기 위해 열발생과 모터사이의 관계규명과 이를 적용한 설계 방법을 제안하였고, 또한 고속 회전 시 발생하는 진동을 저감하기 위해 모터의 길이방향 즉 축과의 관계를 통하여 진동 저감 설계를 제안하였다.

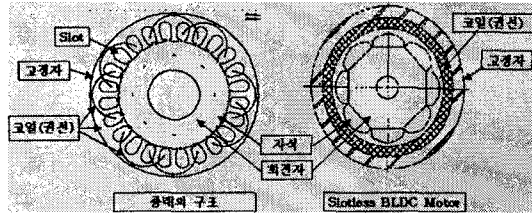


그림 1 Slotless BLDC motor의 구조

2.1.1 열과 전류밀도와의 관계

기기의 온도 상승은 기기의 냉각에 도움이 되는 표면적 O내에 발생하는 손실을 W라고 하면, 단위표면적당의 손실 W/O에 비례하는 온도차가 기기와 외기 사이에서 생긴다. 즉, 기기의 온도상승 θ는

$$\theta = \frac{W}{\kappa O} = \frac{W}{\lambda}$$

여기서 κ : 단위표면적당의 외기에 대한 열의 전도도 κ 는 기기의 냉각방식, 절연의 정도 등에 의해서 달라지며 손실의 단위가 [W], 표면적의 단위가 [m²]인 경우, $\kappa = 10 \sim 35 [W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$ 정도이다. 또한 κO 는 온도차 1[$^\circ C$]마다 일어나는 방열속도[W]이므로, 이것을 유효 냉각면적이라고 부르고 λ 로 나타내기로 하였다. 열의 전도도를 증가시키기 위해서 회전기에서는 철심이 직접 외기와 접촉하고 있어 통풍 덕트를 시설하든가, 냉각 팬을 달든가 하여 유효 냉각면적을 충분히 증가시키는 대책을 하고 있다. 그러나 코일은 열의 전도도가 좋지 못한 절연물로 감싸여 있고, 또한 철심 내에 깊숙이 들어가 있으므로, 유효 냉각면적을 철심에서처럼 충분히 증가시킬 수가 없다. 코일의 단면적을 크게 설계하므로 열의 발생을 억제시킬 수 있다. 여기서 알 수 있듯이 모터에 발생하는 열에는

코일의 단면적과 전류와 밀접한 연관관계가 있음을 알 수 있다. 즉 전류밀도에 따라 모터에 발생하는 열이 결정되어 진다고 사료된다. 또한, 냉각장치의 유무에 따라 모터의 열발생이 달라질 수 있지만, 모터 설계 측면에서 보자면, 전류밀도와와의 연관성이 가장 크다고 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 동일 출력에서 전류밀도가 낮은 설계 사양으로 최적화하기 위해 아래와 같은 설계 방법을 제안하였다.

2.2 열적 특성을 고려한 설계

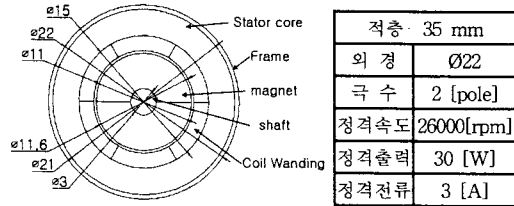


그림 2 Slotless BLDC motor의 기본 스펙 및 정격조건

본 논문에서 연구한 slotless BLDC motor는 Ø22 motor로서 소형에 고속 회전을 가진 motor이다. 초기 설계된 slotless motor는 그림 2와 같은 정격 조건을 설정하였다. 정격 조건은 그림과 같이 2극 3상 모터이고, 정격속도 26000rpm, 30W이다. 그다음으로는 모터의 체격을 결정하는 것이다. 모터의 체격을 결정하는 데에는 일반적인 BLDC motor의 특성을 기초로 하여 새로 설계하는 모터의 체격을 결정하게 된다. 그 후 퍼미언스법에 의한 간략 설계에 의해서 기본 설계를 실시한 후 FEM을 통한 정밀 해석을 통해서 각각의 민감도를 분석하여 최적의 파라메타를 선정하는 방식을 취하였다.

2.2.1 Parameter 별 FEM 해석

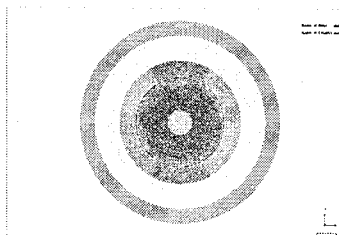


그림 3 Slotless BLDC motor 요소분할도

slotless BLDC motor의 특성을 알기 위해 초기 사양으로 해석을 실시하였다. 해석 방법은 유한요소법을 이용하였다. 아래 그림 3은 요소 분할도를 나타내고 있고, 정격 조건을 만족하는 설계 사양을 얻기 위해 parameter를 선정하고 각 parameter를 가변시켜 해석을 진행하였다. 출력변수로는 출력과 전류밀도, S/F를 선정하였다. 해석은 역기전력을 일정하게 유지하여 그에 따른 전류밀도, S/F, 출력에 대해서 어떻게 변화되는지를 알아본 것이다. parameter 선정은 정격조건에서 고정된 부분을 제외한 적층(stator 적층, rotor 적층), 선경, 턴 수, rotor 외경, stator core 내경, air-gap 길이를 선정하였다. 해석한 후 분석한 결과는 아래와 같다.

2.2.2 해석 결과 및 민감도 분석

위의 해석결과들은 역기전압을 일정하게 유지하여 해석한 것이다. 위에서 해석한 결과를 토대로 정격조건에 맞는 사양을 도출하여 보았다. 먼저 정격조건에 맞게 각 parameter가 변화폭과 출력변수의 변화폭을 구한 다음 이를 그래프로 도식화하여 가장 민감하게 반응하는 인자

와 그렇지 않은 인자를 구별하였다. 그런 다음 해석결과를 이용하여 최적 형상 설계를 하여 보았다.

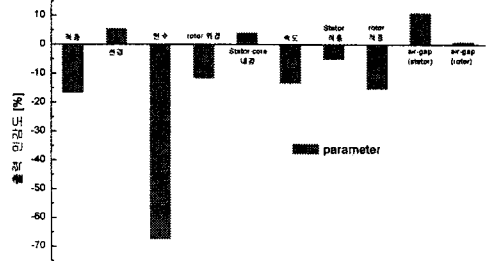


그림 4 출력에 대한 민감도

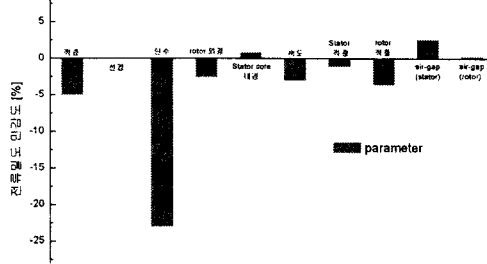
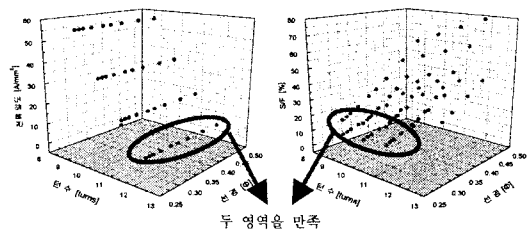


그림 5 전류밀도에 대한 민감도

또한 그림 4, 5에서처럼 각각의 parameter 마다 출력변수들에 대한 민감도를 %의 형태로 나타내었다. 민감도는 각 parameter의 증가분에 대해 출력변수들의 변화정도를 수치적으로 나타낸 정도를 말한다. 여기서 가장 민감한 parameter와 출력변수와의 관계를 파악하고 이를 설계 방향에 적용하였다. 그리고 앞에서 설명한 열발생의 감소를 위해 기존대비 전류밀도를 감소하는 방향으로 설계의 초점을 맞추었고, 정격조건인 속도 26000rpm에서 출력 30W가 되도록 설정하였다. 그리고 초기 사양 시제품 측정 시 열발생과 소음 측면에서 정격 조건에 미치지 못하였기 때문에 이를 향상 시키는 해석 방향을 아래와 같이 선정했다.

2.2.3 전류밀도를 고려한 설계



(1) 변수에 따른 전류밀도 (2) 변수에 따른 S/F
그림 6 변수에 따른 전류밀도와 S/F의 변화

우선 위의 각 parameter 별로 해석하여 나타난 민감도를 토대로 전류밀도에 영향을 미치는 변수를 설정하였다. 해석 시 변수로 설정된 것은 선경, 턴 수, reels의 수이고 각각의 변수의 조합에 따라 전류밀도를 구해 보았다. 선경, 턴 수, reels의 변화에 따른 전류밀도를 3차원 그래프로 그려보면 그림 6과 같다. 그림 6과 같이 선경이 커지므로 전류밀도가 감소함을 알 수 있었다. 하지만 선경이 커지므로 인해 space factor가 커져 그에 따른 적절한 점을 찾기 위해 각 변수의 변화에 따른 코일의 space factor를 구해 이를 그래프로 나타내 보았다. 초기 설계에서 얻어진 S/F의 한계점-33% 보다 작게 설

정되는 점들과 전류밀도 사이의 상관관계에 의해 최적점을 찾아보았다. 그 결과 아래의 표 1과 같은 점들을 찾을 수 있었다.

선경[ϕ]	턴수[turns]	reel	전류밀도[A/mm ²]	S/F[%]
0.37	12	1	5.3013	21.581
0.4	12	1	5.2999	25.223
0.45	12	1	5.3067	31.923

표 1. 전류밀도를 고려한 설계 사양

2.2.4 진동 저감을 위한 설계

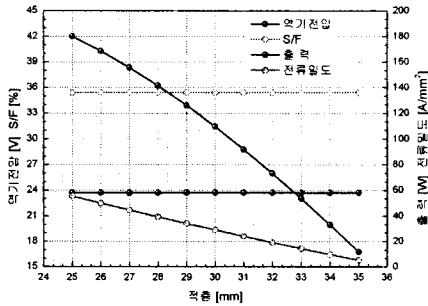


그림 7 적층에 따른 특성 변화

두 번째로 설계 시 고려한 사항은 적층의 길이이다. 초기에 설계된 모터의 경우 진동과 소음이 목표치보다 높게 나왔다. 이를 줄이기 위해 적층의 길이에 변화를 주었다. 적층을 변수로 선택하였는데, 이는 적층을 그림 7에서와 같이 변화시켰을 때 적층이 적어질수록 출력이 증가함을 알 수 있었고, 또한 초기 사양 시작품의 소음 측정 결과 기준 대비 많은 소음이 발생하였고, 진동이 심함을 알 수 있었는데, 적층이 적어지면 진동의 감소에 영향을 줄 것이 예상된다. 민감도에서 나타난 것과 적층 감소는 출력 증가와 전류밀도 증가에도 영향을 미치므로 적절한 점을 찾아야 한다. 위의 두 해석 결과를 적용하여 새로운 최적 설계 사양을 도출할 수 있었다. 그 최적 사양은 아래와 같다.

2.2.5 해석 결과 및 해석치와 실측치 비교

	단위	초기 모델	최종 모델
reels	-	2	1
턴 수	turns	11	11
저항	Ω	0.52335	0.45558
결선방법	-	Y	Y
Rotor 내경	ϕ	4	4
Rotor 외경	ϕ	10.5	10.5
Rotor 길이	mm	35	25
Stator 길이	mm	35	25
Stator 내경	ϕ	11.1	11.1
Magnet	-	Neo-38VH	Neo-38VH

표 2 최종 모델 사양

그림 8과 같이 초기 모델의 경우는 포화된 온도가 59.3℃ 이었는데, 최적 설계 모델의 경우에는 그보다 낮은 41.2℃로서 열발생이 저감됨을 알 수 있다.

표 3은 최적 설계 사양으로 해석한 토크 및 출력의 결과를 나타낸 것이고, 위의 사양으로 모터를 제작하여 해석치와 실측치의 특성을 비교하여 보았는데, 아래와 같이 비슷한 추이로 나타남을 알 수 있었다.

	단위	설계치	실측치
전류	A	2.1	2.12
회전수	rpm	26,000	25,795
토크	kgcm	0.1413	0.114
출력	W	30	30
효율	%	64.897	75.7

표 2 설계치와 실측치의 비교

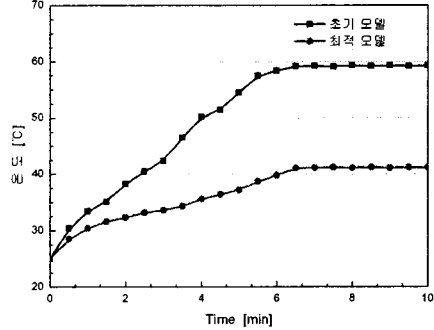


그림 8 초기 모델과 최적 모델의 온도 변화 비교

3. 결 론

본 논문은 열발생을 저감하기 위해 아래와 같은 설계를 제시 하였다. slotless BLDC motor의 특성을 파악하기 위해 parameter 선정 후 각 parameter를 변화시켜 해석 실시하였고 열발생을 감소하기 위해 전류밀도 측면을 고려한 설계 사양 확립하였으며, 진동 발생 저감을 위한 적층 감소를 고려 설계 사양 분석(선경 0.45 ϕ , 턴수 12 turns, 적층 25mm 확정)하였다. 위의 개발 결과 아래 표와 같이 초기 사양과 비교해서 정격회전수는 25,795rpm으로 목표치에 근접하게 나왔고, 효율은 세계 수준인 42%보다 훨씬 높은 77.4%로 향상 되었다. 또한 소음은 초기 사양 41.8dB에서 최종 사양의 제작품은 36.3dB로 향상되었다. 온도저항계수도 14.4℃/W에서 세계 수준보다 향상된 9.6℃/W로 전반적으로 개발 목표치에 도달하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] T. Kenjo and S. NAgamori, Permanent-magnet and Brushless DC Motors, Clarendon Press, Oxford, New York, 1985
- [2] Yongxiao Chen, Jianxin Shen, and Zemin Fang, Topology and Preliminary Design of Slotless Brushless DC Motor, Department of Electrical Engineering Zhejiang, IEEE, 1997
- [3] T. S. Tan, "Design and Analysis of a Slotless Permanent Magnet Motor." M. Eng. thesis, National University of Singapore, 1993
- [4] J. R. Hendershot Jr and Tje Miller, "Design of Brushless Permanent-magnet Motors."