

A Study of Design on the Surface Mounted Permanent Magnet Type BLDC Motor for a Ventilation Jet-Fan

Kim Young Kyoun*

Dept. of Electrical Engineering, Osan Univ., 45, Cheonghak-ro, Osan-si, Gyeonggi-do 18119, Korea

(Received 25 February 2018, Received in final form 20 March 2018, Accepted 22 March 2018)

This paper presents characteristics of design and analysis on the surface mounted permanent magnet type BLDC Motor, which is employed for a Ventilation Jet-Fan. To satisfy required specifications of the BLDC motor. Not only the ratio of the magnetic loading is used at the step of the initial design, but also an element finite method is taken at the step of the detail design. Finally both the design and analysis results are verified with experimental results.

Keywords : BLDC motor, permanent magnet, Finite element method, Jet-fan

환기용 팬구동용 영구자석 표면부착형 BLDC 모터 설계에 관한 연구

김영균*

오산대학교 전기과, 경기 오산시 청학로 45, 18119

(2018년 2월 25일 받음, 2018년 3월 20일 최종수정본 받음, 2018년 3월 22일 게재확정)

본 논문은 팬 구동에 적용되는 브러시리스(BLDC) 모터의 설계에 관하여 기술하였다. BLDC 모터의 출력사양에 부합하도록 자 기회로 초기설계는 장하분배법을 이용하였으며, 모터의 상세설계는 유한요소법을 이용하였다. 끝으로 설계결과에 대한 타당성은 실험을 통해서 검증하였다.

주제어 : BLDC 모터, 영구자석, 유한요소법, 제트팬

I. 서 론

최근 들어 국내 제조업 공장에서는 작업장의 쾌적성과 소음저감 등과 같은 작업환경 개선이 생산성 향상에 기여할 수 있다는 인식의 변화가 관측되고 있으며, 근로자의 생활수준 향상에 따른 환경개선 요구도 점차 높아지는 추세이다. 또한, 작업환경 개선에 대한 규제도 선진국 수준으로 강화되고 있으며, 나아가 경기장 및 주차장과 같은 실내환경에 대한 관심도 증가되고 있다. 이러한 대형 실내공간에서 공기중의 유해요소를 배출하고 환기하는 시스템은 설치비와 효율측면에서 환풍덕트시공 방식에서, 공기의 흐름을 제어하는 기류패턴 제어 방식으로 대부분 전환되고 있다[1, 2].

기류패턴제어 방식에 의한 실내 공기배출 및 환기 시스템

의 효율향상을 위해서는 팬 부착위치, 방향, 수량도 중요하지만 팬 자체를 구동하는 모터의 사양 또한 중요한 요소이다. 기류패턴제어 방식에서 기류의 이동거리는 정압의 3배에 비례하고 정압은 모터의 회전속도 제곱에 비례하기 때문에 고속으로 회전하는 모터를 장착하며, 이러한 환기용 팬을 제트팬이라고 한다. 일반적으로 환기용 제트팬에는 대부분이 유도모터가 사용되며, 유도모터는 별도의 인버터 없이 상용AC전원만으로 구동이 가능한 장점 때문에 팬구동 용도로 많이 사용된다. 하지만 유도모터는 일반적으로 효율이 낮고, 회전속도는 전원주파수에 비례하여 1800[rpm] 또는 3600[rpm] 사양을 가지는 것이 일반적이다. 이러한 유도모터의 제약으로 기류패턴제어 방식의 환기시스템에 사용되는 제트팬 구동용 모터의 회전속도 증가에 대한 요구가 커지고 있다[1, 2].

본 논문에서는 실내 공기배출 및 환기 시스템에 사용되는 제트팬 구동용 모터로서, 7,000[RPM]으로 회전하는 1.2[kW]급 고효율의 BLDC 모터의 설계에 관해서 기술하였다.

BLDC 모터는 일반 DC모터 및 유도모터와 비교하여 높은 효율특성을 가지며, 구동회로의 빠른 스위칭을 통해서 고속운전도 용이하다. 이러한 장점 때문에 BLDC 모터는 고효율, 고효율 및 고속 특성을 요구하는 시스템에 적합하고 그 적용 범위가 폭넓다[3. 4]. 본 논문에서는 제트팬 구동용 7,000 [RPM]급 BLDC 모터의 설계 및 특성해석에 대한 제반사항을 연구하고 설계를 수행하였으며, 설계결과의 타당성을 실험을 통해서 검증하였다.

II. BLDC 모터 설계 이론

1. 모터 설계 프로세스

BLDC 모터의 설계는 우선 시스템의 출력 요구사항을 파악하여 목표출력을 결정하고 장하분배법을 이용하여 회전자와 고정자의 기본치수를 결정하는 기초설계 단계를 거치고, 그 결과가 요구사항에 부합하는지 검토하게 된다. 또한, 모터의 구동특성은 기기의 회로정수에 의해 결정되기 때문에 모터내부의 전자기적 비선형성을 고려한 정밀해석이 필요하다. 이를 위하여 초기설계 단계로부터 구한 설계값을 이용하여 수치해석방법으로 널리 사용되고 있는 유한요소법(FEM)을 이용하여 모터의 구동특성해석에 필요한 회로정수와 모터출력의 제반특성을 해석하고 분석하는 과정을 통해서 상세설계를 진행하게 된다. Fig. 1에는 본 논문에서 제시한 제트팬 구동용 BLDC 모터의 설계과정을 나타내었다.

2. BLDC 모터 초기설계를 위한 장하분배

본 논문의 설계대상 모터는 3상 구형과 구동방식의 BLDC 모터이며, 영구자석이 회전자의 표면에 부착되는 모터로서, 고정자와 회전자의 형상을 간단하게 도식적으로 나타내면 Fig. 2와 같이 묘사할 수 있다.

여기서 D_m 은 회전자의 기계적 직경이며, D_s 는 축계의 직경

을 나타낸다. 그리고 D_a 는 고정자의 내경을 나타내며, l_m 은 영구자석의 두께, l_g 는 공극의 길이를 각각 나타낸다.

장하분배법은 전기장하와 자기장하를 적절히 분배하여 Fig. 2에 나타낸 BLDC 모터의 개략적인 주요 형상치수를 비교적 쉽게 결정할 수 있다[4, 5].

$$M = \frac{P\Phi_g}{mNI} \tag{1}$$

위 식에서 M 은 장하비로써 전기장하에 대한 자기장하의 비로 정의한다. 여기서, m 은 상수, N 은 상당 직렬턴수, I 는 상전류, P 는 극수 및 Φ_g 는 극당 공극자속량을 각각 나타낸다. 일반적으로 영구자석을 사용하는 모터의 경우 60 이상인 것으로 알려져 있으며, 이를 변경하여 설계 사양에 만족하는 형상치수를 도출할 수 있다. 장하비를 이용하여 모터의 형상치수를 도출하는 것은 아래 식과 같이 모터의 출력이 전기장하를 나타내는 항, 자기장하를 대표하는 항 및 전동기의 형상을 표현하는 항의 곱으로 표현할 수 있기 때문이다.

$$VA = K_0 \times f \times B_g \times ac \times D_m^2 L \tag{2}$$

여기서, VA 는 기기용량이라하며, 모터의 출력을 의미한다. B_g 는 공극자속밀도로서 자기비장하라고 하며, ac 는 극당 전기자권선의 기자력을 나타내는 전기비장하이다. 그리고 L 은 모터 회전자 코어의 길이를 나타내며, 계수 K_0 는 다음과 같다.

$$K_0 = \frac{4.44 \times K_w \times m \times \pi^2}{P^2} \tag{3}$$

여기서, K_w 는 권선계수이다. 장하비 M 을 이용하여 모터를 설계하는 것은 간단한 산술적 계산으로 그 결과를 쉽게 얻을 수 있는 장점이 있는 반면에 자기회로에서 발생하는 자속의 누설과 포화를 고려하지 못하므로 설계결과의 신뢰도는 낮다. 이를

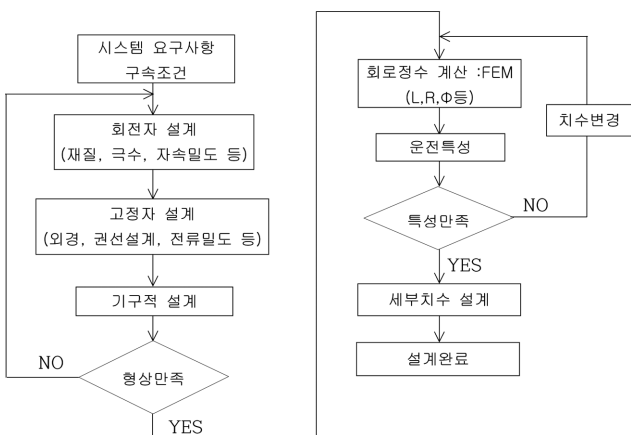


Fig. 1. Design process for the BLDC Motor in Ventilation Jet-Fan.

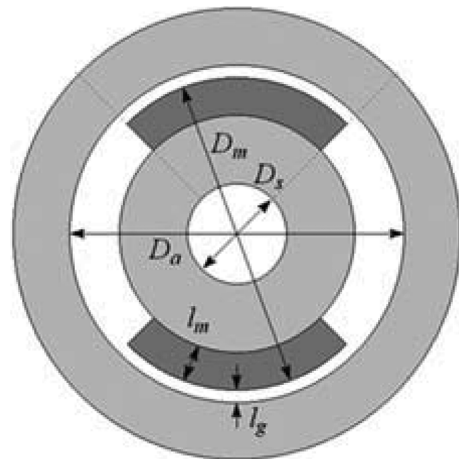


Fig. 2. Design variables of the BLDC motor at the initial design step.

보완하기 위해서 상세설계단계를 그치게 되며, 이때에는 유한 요소법과 같은 수치해석 기법을 사용하는 것이 일반적이다.

3. BLDC 모터 상세설계를 위한 수치해석 기법

일반적으로 BLDC 모터에서 자기회로내 자속의 경로가 반경방향일 경우에, 대칭성을 고려하여 1극분 또는 2극분의 2차원모델만으로 수치해석이 가능하다. 본 논문에서도 설계 대상인 제트팬 구동용 BLDC 모터의 자기적 비선형성을 고려한 특성해석을 위해서 2차원 유한요소 해석을 수행하였다. 영구자석을 포함하는 BLDC 모터의 유한요소해석은 2차원 정자계 문제로 보고, 해석모델을 변위전류를 무시한 준 정상상태라고 가정하여 아래와 같은 맥스웰 방정식을 적용할 수 있다[5-7].

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_0 \tag{4}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{5}$$

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \tag{6}$$

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} + \vec{M}_r \tag{7}$$

여기서, \vec{H} 는 자계의 세기, \vec{J}_0 는 입력전류 밀도, \vec{B} 는 자속 밀도, μ_0 는 공기의 투자율, \vec{M} 은 자화량, χ_m 은 자화율, \vec{M}_r 은 영구자석의 잔류자화량이다.

$$\nabla \times \vec{A} = \vec{B} \tag{8}$$

위 식과 같은 자속밀도 \vec{B} 와 자기벡터포텐셜 \vec{A} 의 관계식을 이용하여 BLDC 모터 내부의 전자기현상에 대해서 다음과 같은 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \right) = -J_0 - \frac{1}{\mu_r} \left(\frac{\partial M_{ry}}{\partial x} - \frac{\partial M_{rx}}{\partial y} \right) \tag{9}$$

여기서, μ 는 재료의 투자율, μ_r 은 영구자석의 비투자율을 나타내며, 다음과 같은 가정이 성립한다.

2차원 유한요소법은 해석영역을 1차 삼각요소로 분할하고 각 요소내에서의 자기벡터포텐셜을 식(9)에 나타난 지배방식을 적용하여 계산함으로써 해석영역내의 전자기적 현상을 해석할 수 있게 된다.

III. 제트팬 구동용 BLDC 모터 설계

환기용 제트팬 구동용 BLDC 모터를 설계하기 위하여 필요한 제반 설계사항을 Table I과, Table II에 나타내었다. Table I은 모터의 설계에 필요한 전기적 설계 사양을 나타내었으며, Table II는 BLDC 모터 자기회로 설계에 필요한 사항을 정리

Table I. Required conditions of the motor.

항 목	설계 사양	단위
DC link 전압	310	[V]
상 수	3	-
정격 회전속도	7,000	[rpm]
정격 출력	1,200	[W]

Table II. Design specifications of the motor.

항 목	설계 사양	단위
영구자석 재질	Nd-Fe-B	-
영구자석 잔류자속밀도	1.2	[T]
영구자석 자화방향	Radial direction	-
전기자 구동방식	구형과 구동	-
전기자 권선방법	Y 결선, 분포권	-
전기자 코일의 접적율	29	[%]
고정자 철심 재질	S18	-
회전자 철심 재질	S45C	-
공극길이	1	[mm]

Table III. Design results of the BLDC Motor in Ventilation Jet-Fan.

항 목	설계 값	단 위
극수/슬롯수	2/24	-
고정자 외경/회전자 외경	95/50	[mm]
적층 길이	65	[mm]
상당 직렬 권수	90	[Turn]
접적율	23	[%]
상당 저항	1.1	[Ω@20]
코일 직경	0.5Φ	[mm]
토크상수	0.17	[Nm]/[A]

하여 나타내었다. 제트팬 구동용 BLDC 모터의 결선은 3상 Y 결선, 구동방식은 구형과구동이며, 회전자는 영구자석 표면부착형으로 결정하였으며, 회전자 철심의 재질은 설계시에는 고정자와 같은 재질을 고려하였으나, 시제품 제작에 있어서는 생산성을 고려하여, 전기강판을 사용하는 고정자 철심재질과는 다르게 기계구조용 탄소강재인 S45C를 사용하였다.

Table III은 Fig. 1에 나타낸 BLDC 모터 설계절차에 따라 설계한 제트팬 구동용 BLDC 모터의 주요 설계결과를 정리하여 나타내었다. BLDC 전동기의 극수는 회전 속도를 고려하여 2극으로 설계하였으며, 토크상수는 0.17[Nm]/[A]가 되도록 설계하였다. 한편, Fig. 2에는 초기설계 단계에서 전동기의 형상을 결정하는 주요설계 변수를 나타내었다. 그리고, Fig. 3a는 BLDC 모터 고정자 및 회전자의 등포텐셜 분포도를 나타내고 있으며, Fig. 3b는 자속밀도 분포도를 나타낸다. 그리고 Fig. 3c는 BLDC 모터 고정자 철심의 요크자속밀도 분포를 나타내고 있으며, Fig. 3d는 치 자속밀도 분포특성을 각각 나타낸다.

유한요소 해석결과로부터 상세설계된 모터의 요크 자속밀

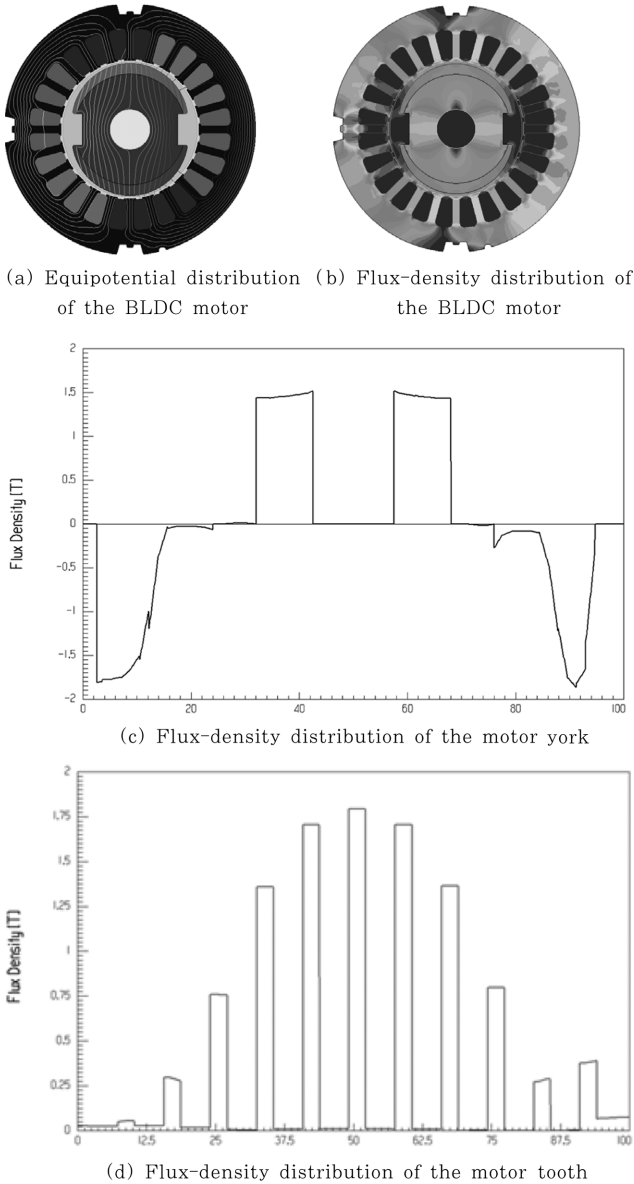


Fig. 3. The results of the finite element analysis.

도는 최대 1.5[T]를 넘지 않으며, 치자속밀도는 최대 1.75[T]를 넘지 않는 것을 알 수 있으며, 이는 사용하는 철심재료의 포화자속밀도 한계를 넘지 않는 값으로 철심포화를 고려한 고정자 철심의 자기회로 설계가 적합한 것으로 사료된다. 회전자철심은 고정자 철심과 동일한 재료로 설계하였으나, 영구자석을 회전자 철심에 부착해야하기 때문에 접착강도를 높이고 향후 생산성을 고려하여 조립성 향상을 위하여 기계구조용 탄소강사용하여 시작품을 제작하였다. 이는 회전자가 다소 고속으로 회전할지라도 회전자 철심에 영구자석이 부착되어 같이 회전하므로 자속의 변화가 거의 없어 영구자석의 자속이 회전자 철심에 미치는 영향이 미흡할 것이라는 판단에 따른 것이다. Fig. 4는 1000[RPM]에서 BLDC 모터의 무부하역기전

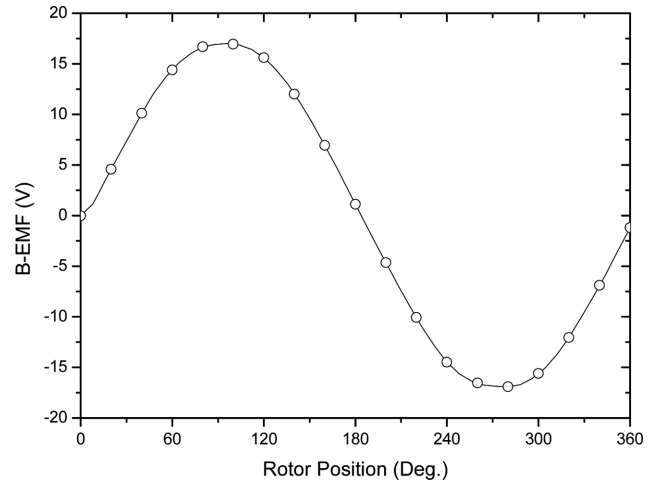


Fig. 4. The analysis result of the Induced voltage in the motor.

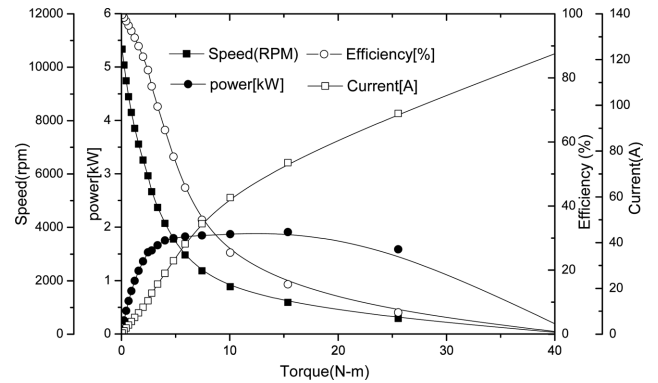


Fig. 5. The analysis result according to speed vs. torque of the motor.

압특성을 해석한 결과를 나타낸 것이고, Fig. 5는 BLDC 모터의 속도-토크 특성을 해석한 결과를 나타낸다. 특성해석결과로부터 모터의 정격회전속도 7000[RPM]에서 전동기의 효율은 효율 89[%]로 설계되었으며, 이는 동손만을 고려한 해석결과 이다. 이때 공급전압은 Vdc 310[V]이며, 모터의 설계치 상저항 값은 1.1[Ω]이며, 부하전류는 약 8[A]로 정격출력은 1.2[kW]로 목표설계 사양을 만족하였다.

IV. 제트팬 구동용 BLDC 모터 설계 결과

Fig. 6은 설계한 제트팬 구동용 BLDC 모터의 고정자와 회전자 시작품 사진을 각각 나타낸다. Fig. 6a는 BLDC 모터의 고정자를 나타내고 있으며, Fig. 6b는 BLDC 모터의 회전자를 각각 나타내고 있다.

Fig. 7은 1000[RPM]에서 무부하시 역기전압 파형의 측정 결과를 나타내고 있으며, 설계결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 제트팬 구동용 BLDC 모터의 속도-토크 특성을

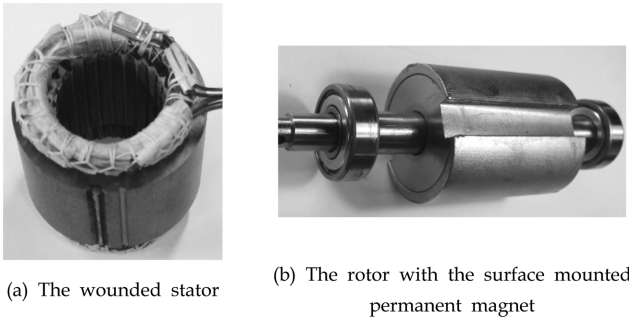


Fig. 6. The manufactured prototype of the BLDC motor for the jet-fan.

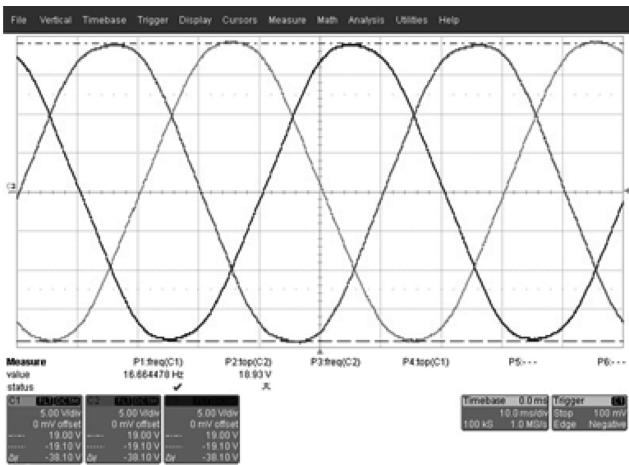


Fig. 7. The experimental result of the Induced voltage in the prototype motor.

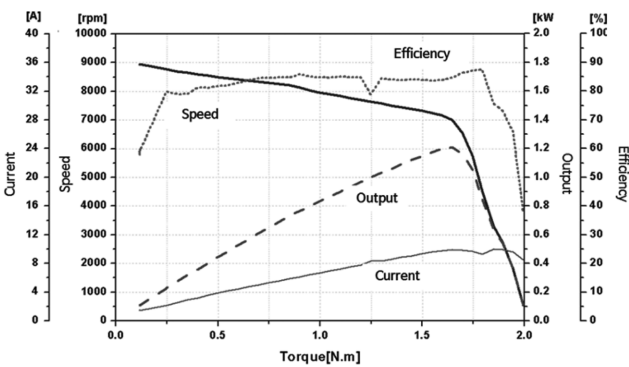


Fig. 8. The experimental result of according to speed vs. torque of the prototype motor.

다이내모미터를 이용하여 측정된 결과를 나타내었다. 정격 회전수 7000[rpm]에서 정격출력 1.2[kW]를 달성하였다. 이때 효율은 약 86.8[%]로 측정되었으며, 설계결과와 잘 부합하는 것을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 환기용 제트팬 구동용 BLDC 모터의 자기 회로를 설계하고 그 결과를 실험을 통해서 검증하였다. 환기용 제트팬 구동용 모터의 요구사항에 부합하기 위해서 장하 분배를 이용하여 초기설계를 도출하고 유한요소법을 이용하여 상세설계를 수행하였다. 이상의 본 논문에서 기술한 제트팬 구동용 BLDC 모터 설계결과가 일반 산업용 BLDC 모터 설계 및 개발에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2017년도 오산대학교 교내 학술 연구지원비에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- [1] D. Y. Han and J. W. Yoon, Korean J. Air-Cond. Refrig Eng. **17**, 147 (2005).
- [2] J. H. Min, D. H. Kim, and J. T. Chung, Proceeding of the KSME Conference, 2765 (2008).
- [3] Y. Li, J. Zou, and Y. Lu, IEEE Trans. Magn. **39**, 3523 (2003).
- [4] J. R. Hendershot Jr. and T. J. E. Miller, Design of Brushless Permanent-Magnet Motors, Magna Physics Publishing and Clarendon Press (1994).
- [5] K. F. Rasmussen, J. H. Davies, T. J. E. Miller, M. I. MacGill, and M. Olaru, IEEE Trans. Ind. Appl. **36**, 1547 (2000).
- [6] J. Mizia, K. Adamiak, A. R. Eastham, and G. E. Dawson, IEEE Trans. Magn. **24**, 447 (1988).
- [7] S. J. Salon, Finite Element of Electrical Machines, Kluwer Academic Publishers (1995).