

에어 블로워 구동용 50W급 고속 BLDC 모터에 관한 연구

백찬욱***, 서정무**, 유지윤*, 정인성**

*고려대학교, **전자부품연구원

A Study of 50W High Speed BLDC Motor for Air Blower Drive

Chan-Wook Baek***, Jung-Moo Seo**, Ji-Yoon Yoo*, In-Soung Jung*

Korea University*, Korea Electronics Technology Institute**

Abstract - 본 연구는 소형, 고효율 3kW급 고분자 전해질 연료공급 모듈용 에어블로워 개발에 있어 필수요소인 BLDC형 블로워 모터에 관한 것이다. 에어블로워의 목표출력(50W)에 최적화된 BLDC모터를 설계하기 위하여 등가자기회로법과 유한요소법을 이용하였고, 모터를 제작하여 해석결과와 비교 검증하였다.

1. 서 론

연료전지(Fuel Cell)는 신 재생에너지원 가운데 수소와 산소의 화학적 반응에 의해 전기를 발생한다. 다단계의 변환과정을 거치지 않아 발전방식에서 발생하는 손실을 줄일 수 있고, 발생된 폐열을 이용한 열병합발전(CHP)이 가능하기 때문에 80%이상의 고효율 출력을 발생하는 시스템으로 인식이 되고 있다. 연료전지는 운전조건에 따라 연료전지에 공급되는 연료가스의 유량과 압력 등에 의해 출력특성이 결정되어진다. 그래서 이를 담당하는 에어블로워 시스템은 연료전지의 화학적 동특성을 충분히 고려하여 설계, 제어 되어야한다. 이러한 에어블로워 시스템은 펌프, 팬, 콤프레셔 및 블로워 등으로 구성이 되며 이들의 성능은 주로 전동기와 전력변환장치, 제어 드라이브의 성능에 의존하게 된다. 특히 에어블로워 시스템을 설계할 시 유의 사항은 전체 시스템의 안정성과 경제성 및 제작 시 시스템 크기 등을 고려하여 펌프, 팬, 콤프레셔 및 블로워 등을 고성능, 고효율, 고밀도 및 저가의 특성을 갖도록 해야 한다는 것이다. 이를 위해 연료전지의 용량, 화학적 동특성 및 운전조건에 따라 에어블로워 시스템에 요구되는 전기적 동특성을 분석한 자료를 기반으로 하여, 연료전지용 에어블로워 시스템 개발에 있어 필수요소인 BLDC형 블로워 모터를 설계 및 제작 후 해석결과와 비교 검증하였다.

2. 에어블로워용 BLDC 모터 설계

2.1 요구사항 검토

모터의 필요 출력을 결정하기위해 제작된 블로워 시제품에 임의의 DC모터를 장착하여 구동시킨 후 DC모터의 N·T·I실험을 통해 부하점을 확인하였다. 표1에서와 같이 부하점은 정격토크 0.5kgfcm에서 출력 50W, 정격속도 10,000rpm으로 설계목표를 결정하였다.

표 1. 설계목표 사양

정격토크	0.5 kgfcm
정격전압	24V D.C
정격출력	50W
회전속도	10,000 rpm
효 율	70% 이상

2.2 BLDC 모터 설계

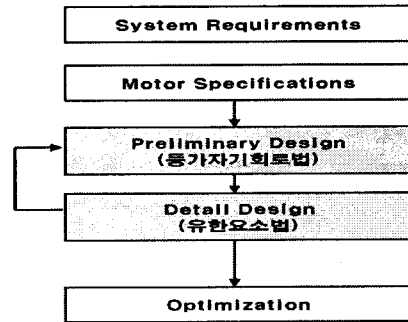


그림 1. 모터설계 수순

설계방법은 그림1과 같이 앞서 정해진 모터의 요구 성능을 토대로 등가자기회로법을 이용하여 간이 설계를 진행한 뒤 유한요소해석을 통한 성능확인 및 상세치수를 결정하는 방법으로 설계를 진행하였다.

유한요소법을 이용한 전동기 특성해석에서의 지배방정식 유도과 정식화를 위해 사용되는 Maxwell 방정식과 보조방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_o \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.2)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{M} \quad (2.3)$$

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (2.4)$$

여기서 \vec{H} 는 자계의 세기(A/m), \vec{J}_o 는 입력 전류밀도(A/m²), \vec{B} 는 자속밀도(Wb/m²), μ 는 철심의 투자율, \vec{M} 은 영구자석의 자화, \vec{A} 는 자기벡터포텐셜을 나타낸다. 식(2.3), (2.4)를 이용해서 식(2.1)을 나타내면 식(2.5)와 같다.

$$\frac{1}{\mu} \nabla \times (\nabla \times \vec{A} - \vec{M}) = \vec{J}_o \quad (2.5)$$

\vec{M} 을 우변으로 이항하고 벡터 연산식에 의해 정리하면 식(2.6)과 같다.

$$\frac{1}{\mu} [\nabla (\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A}] = \vec{J}_o + \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{M} \quad (2.6)$$

Coulomb gauge($\nabla \cdot \vec{A} = 0$)을 이용하여 전개하면 식 (2.7)과 같은 Poisson 방정식을 구할 수 있다.

$$-\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial A}{\partial y} \right) \right) - J_o - J_m = 0 \quad (2.7)$$

여기서 J_m 은 등가자화전류를 나타내며 A, J_o, J_m 은 각각 $\vec{A}, \vec{J}_o, \vec{J}_m$ 의 z방향 성분을 의미한다.

기본적인 설계방향은 외경 60mm이하, 3상 BLDC타입으로, 블로워모터의 특성상 고속, 정속운전에 유리한 외전형으로 정하였고, 슬롯 수와 영구자석 극수는 6극 9슬롯으로 진행하였다. 이를 토대로 임의 형상을 갖는 고정자 코어를 설계하고 고정자 영역의 포화자속 밀도를 해석하였으며, 이로부터 코어 형상의 세부설계를 지향하고자 하였다. 표2는 등가회로해석에서 설계목표사양에 근사한 결과를 보인 파라미터를 정리한 것이다.

그림2는 위 설계항목에 대하여 등가자기회로해석으로 설계되어진 모터의 N·T·I 특성곡선을 나타낸다.

특성곡선에서 보듯이 정격출력 지점에서 전류 2.8A, 85.6% 정도의 효율과 10368rpm, 50.02W의 출력을 가짐을 확인할 수 있었다. 이때 전류밀도는 약 6.8A/mm²로 다소 높게 나왔으나, BLDC모터 설계 시 일반적 기준치에서 크게 벗어나지 않아 상기 해석한 내용을 바탕으로 유한요소해석을 통한 세부설계를 진행하였다.

그림3은 스테이터 코어와 로터의 자속 밀도를 유한요소법을 사용하여 2차원 해석한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 포화를 일으키는 부분이 일부 나타났다. 하지만 실제 로터 하우징의 구조가 평면이 아닌 입체적인 것을 감안한다면 자속이 분산되어 포화가 일어나진 않을 것이라 판단된다. 역기전력 해석에서도 그림4와 같이 11.785rpm에서 23.96V의 역기전력 크기를 가짐을 확인하였다. 이로부터 24V 구동 시 목표회전 속도를 달성함을 알 수 있다. 또한 정토크(전류 3[A]) 해석결과 그림5와 같이 71mNm로 목표치를 초과하여 만족시켰다.

표 2. 설계 Parameter

항 목	Value	Unit
영구자석	Nd-Bonded	Br=0.6 T
	두께	2 mm
권선	경	0.55 mm
	상당 직렬 턴수	48 Turns
고정자	적층폭	12 mm
회전자	외경	56 mm

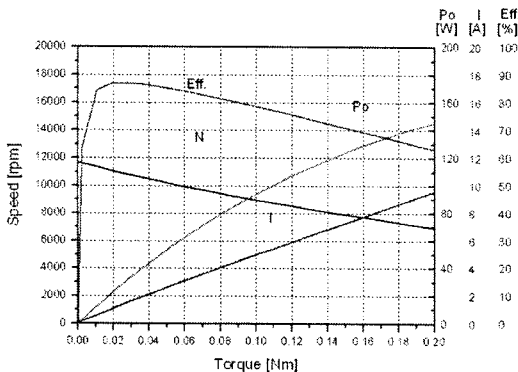


그림 2. 등가회로로 설계된모터의 N·T·I특성



그림 3. 자속밀도 분포 해석

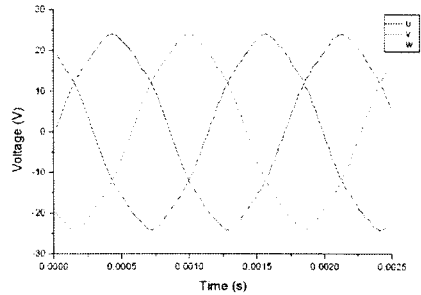


그림 4. 선간역기전력 해석 결과

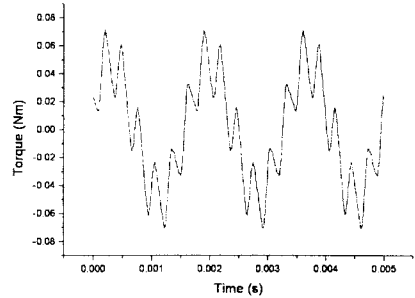
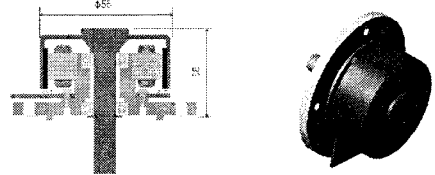


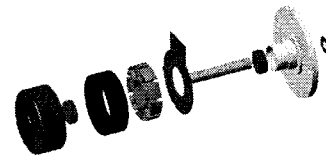
그림 5. 정토크 해석 결과(전류 : 3[A])



(a) 단면도



(b) 조립도



(c) 세부조립도

그림 6. 시작품 모델링

상기 해석한 내용이 에어블로워 구동용 50W급 외전형 BLDC모터 목표사양에 적합한 특성을 보이므로 해석결과를 토대로 기구부를 포함한 설계를 진행하였다. 그림6은 설계된 모터의 기구부를 포함한 전체를 모델링한 것으로, 단면도(a)와 조립도(b), 세부조립도(c)를 나타낸 것이다

2.3 제작 및 특성평가

그림7과 같이 시작품이 제작되었다. 시험 제작된 모터의 성능을 평가하기 위해 히스테리시스 브레이크를 사용한 로드셀 방식의 상용 토크측정 장비(SUGAWARA社)를 이용하여 시제작된 모터의 N·T·I특성을 평가 하였다. 그림8은 상용 계측장비를 이용하여 시제작된 모터를 측정하는 모습이다.

최초 제작된 모터의 특성을 측정한 결과 정격지점에서 효율55%, 7900rpm, 출력 40W로서 목표치에 도달하지 못하였다. 특성을 올리기 위하여 마그넷의 차차조건을 변화시켜 회전수를 조절하였다. 또한 선경을 0.65mm로 늘리고, 턴수를 14턴으로 낮추어 출력 및 효율의 상승과 전류밀도의 감소를 시도하였다. 하지만 약간의 효율상승 효과만 얻었을 뿐, 정격지점에서 60%의 낮은 효율을 보였고, 3.8A의 높은 전류는 전류밀도 증가로 이어져 구동 시 많은 열이 발생하였다.

시제작된 모터의 입출력 특성이 설계 시 예측되었던 특성치와 많은 차이가 나는 원인을 다각도로 분석한 결과, 설계시에는 고려하지 않았던 기계손이 많은 비중을 차지함을 유추할 수 있었다. 즉, 베어링에 예압을 주어 회전자의 위치 안정성을 증대시키고자 채택하였던 웨이브와셔의 탄성이 너무 강하여 축계의 마찰손이 큰 비중을 차지하게 된 것으로 판단되어 이의 개선을 위한 기구부 개선을 진행하였다. 하부요크와 베어링사이 에 위치한 웨이브와셔의 예압을 줄이기 위해 베어링 단의 깊이를 최초 7.3mm에서 7.5mm, 7.8mm, 8mm로 가공하여 측정하여본 결과 단의 깊이가 7.8mm에서 속도 9385rpm, 효율 70.9%, 출력 50.4W, 전류 2.96A로 목표 특성에 근사한 특성을 나타냄을 확인할 수 있었다.

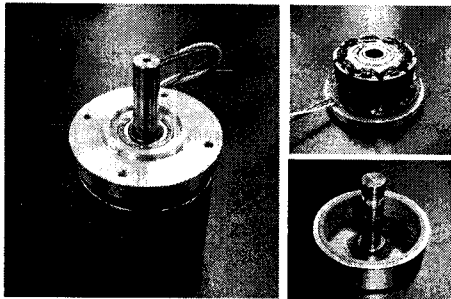


그림 7. 시작품 사진



그림 8. 시작품 특성측정 사진

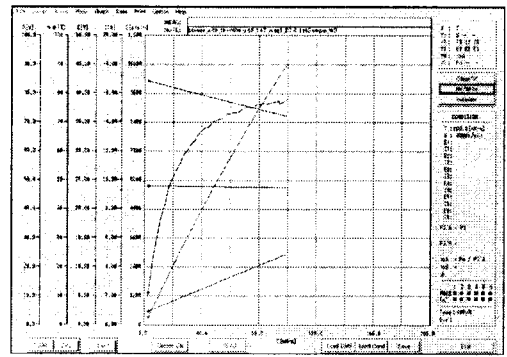


그림 9. 시작품의 N·T·I 특성

그림9는 최종 시험 제작된 블로워 모터의 N·T·I특성을 측정한 결과이다. 정격에서 속도 9,385rpm, 출력 50.4W, 전류 2.96A, 효율 71%의 성능을 보였다. 이로써 본 연구 목표에 부합하는 에어 블로워 구동을 위한 외전형 BLDC모터 설계의 타당성을 확인할 수 있었다.

3. 결 론

본 논문에서는 연료전지용 에어 블로워 시스템의 구성에 있어 중요 구성품인 에어 블로워 구동용 BLDC Motor를 설계 및 제작하여, 제작된 모터의 특성평가를 통해 해석결과와 비교 검증한 내용을 다루었다. 본 연구를 통하여 BLDC모터 설계 제작과정에서 발생하는 조립 공차와 구동 시 기계손의 중요성을 확인할 수 있었다. 이로써 자기등가회로기법과 유한요소법에 있어 보다 정확한 해석을 위한 기계손 및 각종 손실계산에 관한 노하우 축적과 더불어 부품가공의 정밀성이 함께 요구된다. 또한 모터 구동에 있어서 정밀 제작된 고정용 에어 블로워 시스템구동용 모터로서 요구되는 저 소음, 저 진동을 구현할 수 있는 정현파 구동에 관한 연구도 향후 함께 진행되어져야 하겠다.

[참 고 문 헌]

- [1] J. R. Hendershot Jr. and T. J. E. Miller, "Design of Brushless Permanent Magnet Motors", *MAGNA PHYSICS PUBLISHING and CLARENDON·OXFORD*, 1994
- [2] J. R. Brauer, "Finite Element Software Aids Motor Design", *A. O. Smith Data System, Inc.*, PP. 1-7, 1985
- [3] Antonio Savini and Giancarlo Fasola, "Computer Aided Design of Heavily Saturated DC Motor", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. MAG-19, No5, PP. 2088~2090, 1983