논 문
60P-4-2

로봇청소기용 BLDC 모터

BLDC Motors for Robot Vacuum Cleaners

김 현 중†
(Hyun-Jung Kim)

Abstract - This paper is presented for robot vacuum cleaners using BLDC motors. Recently, BLDC motors which require smaller size, lower sound noise and higher efficiency have been placed in high value-added products including robot vacuum cleaners, vehicle cars and other industry applications. The DC motors have higher sound noise, higher height of the size and lower efficiency due to electro-magnetic structure using the brushes and the commutators. The proposed BLDC motors are appropriate for the motors adequate in regards to higher efficiency, longer life cycle time, and smaller height of the size when robot vacuum cleaners go to some lower height of the space like under sleeping beds and because it's power source is batteries. The paper shows the performance of the BLDC motors designed by the Finite Element Analysis(FEA) of the electro-magnetic field. This paper shows the mechanical structure and the prototype of the motor with the impeller. The performance characteristics of the BLDC motors with the hall sensor controller are verified by the experimental results.

Key Words : BLDC Motor, Robot, Vacuum Cleaner, FEA, Impeller, Motor Controller

1. 서 론

진공청소기가 발명된 지 약 100년이 지난 현재, 청소기가 로봇으로 변신을 꾀하고 있다. 세계 각국에서 개발되고 있는 서비스 로봇의 중요한 기능 중 하나가 바로 로봇청소기이다. 로봇청소기는 고감도 센서를 통해 청소할 공간의 크기와 청소시간을 파악해 스스로 청소를 하는 청소기이다. 진공청소기는 전기를 이용해 강한 흡입력으로 먼지를 빨아들이는 것이 원리이지만, 로봇청소기는 충전배터리를 통해 브러시로 먼지를 쓸어 담고, 이를 진공으로 흡입하는 원리이다. 진공으로 빨아들이기 위해서, 임펠러(impeller) 모터가 필수적으로 요구된다. 기존의 로봇청소기에 적용되는 DC 모터의 경우, 모터의 기계적인 구조와 전자계의 구조적 한계에 따라 효율이 낮고, 소음이 크며, 정류자와 브러시의 회전시 연속적인 접촉 마찰로 인하여 수명이 짧은 여러 가지 문제점을 가지고 있다. 로봇청소기에 장착된 DC 모터는 높이가 커서 침대 밑(통상의 100mm 높이)과 같은 공간을 청소하는 것이 불가능하다. [1].

이러한 단점들을 극복하고, 청소 공간을 확대하며, 동작 시간을 연장시키고, 소음 및 진동을 줄임으로서 소비자의 만족도를 더욱 충족시킬 수 있도록 하는 연구들이 진행되고 있다.

본 논문에서는 로봇청소기의 소형화가 가능한 성능을 확보하기 위하여 고 효율로 운전되는 슬림형 임펠러 BLDC 모터를 설계 개발하였다[2]. 전자장 해석을 위해 맥스웰(Maxwell) 방적식으로부터 지배 방정식을 도출하여 전자계 설계를 하였으며, 청소기용 모터의 전기적인 요구 사양에 일치하는 BLDC모터와 홀 센서 구동형 제어기를 설계 제작하였다[3]. 제작된 BLDC모터는 로봇청소기에 장착하여 모터의 성능을 실험으로 비교 분석하고, 제안된 모터의 고효율, 저소음 성능특성 결과를 얻었으며, 성능은 실험을 통하여 타당성을 보였다.

† 교신저자, 정회원 : 유한대학 컴퓨터제어과 교수 · 공박
E-mail: kimhj@yuhan.ac.kr
접수일자 : 2011년 8월 5일
최종완료 : 2011년 8월 29일

2. 본 론

2.1 로봇청소기

현재 국내 청소 로봇 기술은 부품, 소재산업(센서, 감속기, 모터, 진공용 부품) 등에서 기술적 자립화가 미약한 실정이다. 가정용 서비스 로봇의 지능화는 반도체 및 나노기술 없이는 불가능한 분야이기에 우리의 IT산업의 성과를 바탕으로 도전 가능하다고 판단된다.

국내의 청소용 로봇은 주로 초음파 센서, 범퍼, 충돌감지 범퍼 센서를 탑재하여 예약, 정음, 장애물 감지, 자동충전기능 등 다양한 기술을 선보이고 있다. 그러나, 먼지를 흡입하는 핵심 모터의 경우 개발 등이 매우 저조한 상태이다. 일반적으로 국내의 로봇 청소기의 경우 DC 모터를 채용하여 사용하고 있으며, 주로 일본 및 중국으로부터 수입에 전적으로 의존하고 있는 실정이다[4].

2.2 BLDC 모터

그림 1은 제안하는 로봇청소기용 BLDC모터의 구조를 보여주고 있다. 모터 하우징에 압입되어 있는 볼베어링은 축(shaft)을 지지하며, 축은 로터마그넷, 임펠러와 함께 회전한다. 모터 하우징 위에 고정되어 있는 PCB는 모터 제어기이며, 로터마그넷의 회전 위치를 PCB에 고정된 홀 센서를 통해 감지하여 모터의 속도를 제어한다.

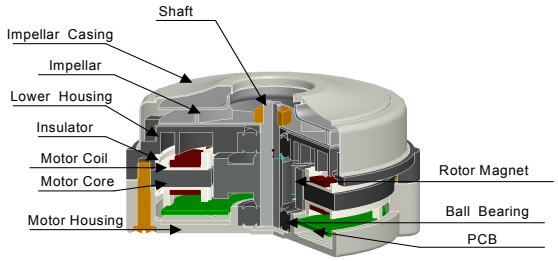


그림 1 BLDC 모터의 구조
Fig. 1 Structure of the BLDC Motors

전자장의 수치해석을 위해 맥스웰 방정식으로부터 계 방정식을 유도하고, Galerkin 법에 의하여 유한요소 행렬식을 도출한다. 그리고 시간 차분법과 이동 요소 기법과 맥스웰 응력법에 의해 회전 토크를 계산한다. 이와 같은 전자계 설계 법을 기초로 BLDC 모터의 전자계 부를 구성하는 영구자석, 코일과 고정자를 최적으로 설계한다.

그림 2는 제안된 BLDC 모터의 자속선도를 나타내고 있으며, 에어갭(air-gap) 자속밀도는 0.389[T]로 분포되어 있다. 그림 3은 정격속도 18,000[rpm]에서의 84% 효율을 보여주고 있으며, 역기전력 상수는 0.0128[Vsec/rad] 이다.

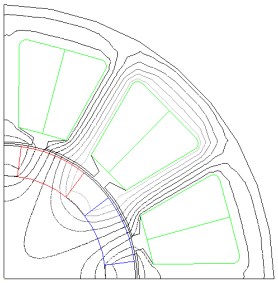


그림 2 제안된 BLDC 모터의 자속선도
Fig. 2 Flux line of the proposed BLDC motors

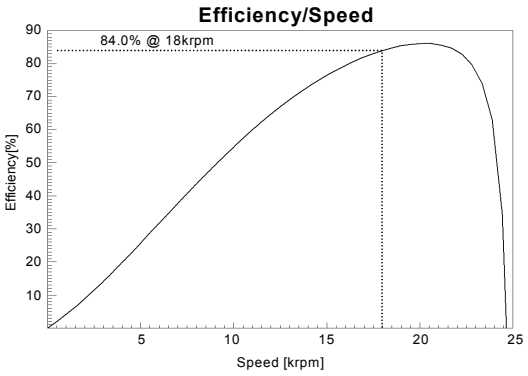
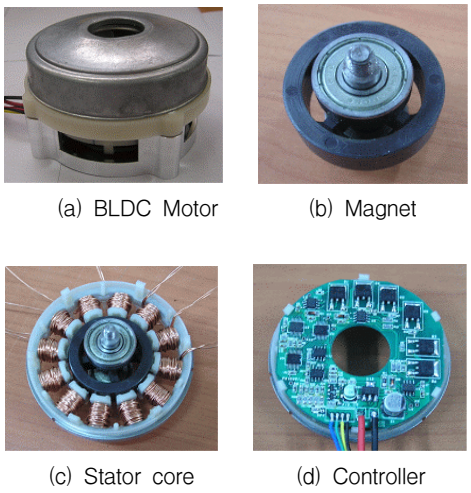


그림 3 BLDC 모터의 속도 및 효율
Fig. 3 Speed and efficiency of the BLDC Motor

모터의 구조적인 설계와 전자계 설계를 통해서 모터 하우징 밑면부터 임펠러 케이싱 윗면까지의 높이는 65[mm]로 기존 DC 모터의 높이(120mm)보다 55[mm]가 낮으며, 이로부터 로봇 청소기 전체 높이를 100mm이하로 설계할 수 있다.

2.3 실험 결과

그림 4는 개발된 로봇청소기용 BLDC모터, 스테이터 코어, 자석, 모터 제어기를 보여주고 있으며, 아래 표 1은 로봇청소기용 BLDC 모터의 사양을 보여주고 있다.



(a) BLDC Motor (b) Magnet

(c) Stator core (d) Controller

그림 4 개발된 BLDC 모터와 로봇 청소기
Fig. 4 The developed BLDC Motor and robot vacuum cleaner

표 1 BLDC 모터의 사양
Table 1 Specification for BLDC Motor

분 류	단위/규격	사양
극수	Poles	9
상수(슬롯수)	Phases(Y결선)	3(12)
정격 속도	RPM	18,000
입력	W	100
입력 전압	V_{DC}	28.8
한상 정격 전류	A_{rms}	2.83
DC 코일 저항	ohm	0.245
자석	Bonded Ferrite	Y20
자석 잔류 자속밀도	T	0.32
스테이터 코어	Si(30%)	S30
스테이터 코어 크기	mm	¢38x¢76x t6.0
자석 크기	mm	¢28.6x¢37xt14
정격효율	%	84
에어 갭	mm	0.5

그림 5는 로봇 청소기용 BLDC 모터 제어기의 블록도를 보여주고 있다. 로봇 청소기의 주 제어기는 모터의 속도 지령과 동작, 정지를 제어하며, 모터에서 과전류가 흐르면 모터제어기에서 보내는 경고(fault) 신호를 받아 처리한다. 제어기는 발생된 톱니파와 속도 지령값을 비교하여 PWM 구형파를 발생하고, 이 신호로부터 6개의 FET를 제어하는 순수한 아날로그 회로로 구성된다.

그림 6은 개발된 BLDC 모터를 적용한 로봇청소기의 특성을 보여주고 있다. 그림 (a)는 회전 속도가 18,000[rpm]일 때 모터 제어기의 상 전류의 실효치는 2.83[A]이었으며, (b)는 유량에 따른 효율곡선과 입력을 보여주고 있으며, 이때 효율은 약 46.2[%]였다.

이는 모터 자체 효율 84[%]에 임펠러 효율(55%)로 인해 전체 효율이 감소했음을 볼 수 있다. DC 모터의 경우는 약 39%이다. 그림 (c)는 54.8[W]의 흡입력과 402[mmH_2O)의 진공도 성능을 보여주고 있다. 그림 (d)는 마이크를 통하여 국내 S사의 로봇 청소기에 BLDC 모터가 장착하고 1[m] 위에서 1/3 Octave Band 형식으로 소음을 측정한 값으로 암소음 16[dB] 이하의 무향실에서 52[dB] 값을 보여주고 있으며, DC 모터의 경우 58[dB]였다.

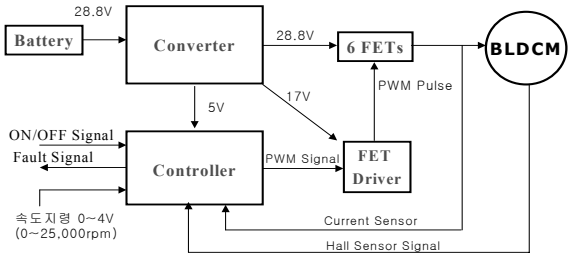
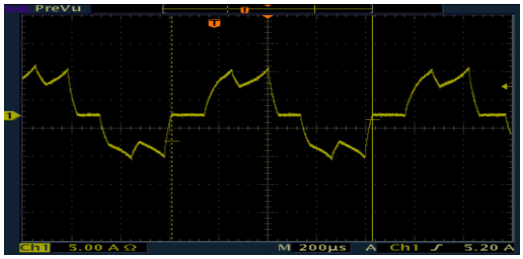


그림 5 로봇 청소기용 BLDC 모터 제어기 블록도

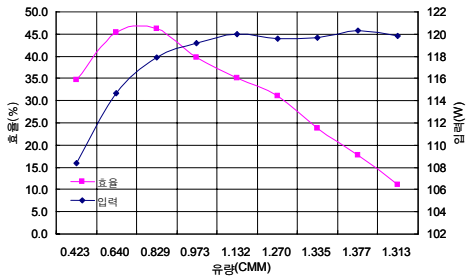
Fig. 5 Block diagram of the controller for BLDC motors of robot vacuum cleaner



[5A/200usec @ 18,000rpm]

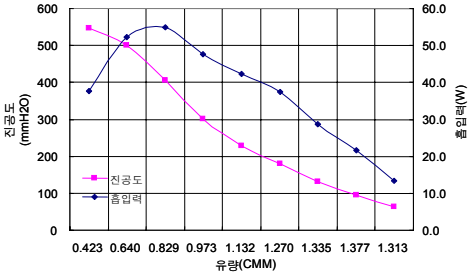
(a) 한상 전류

(a) One phase current



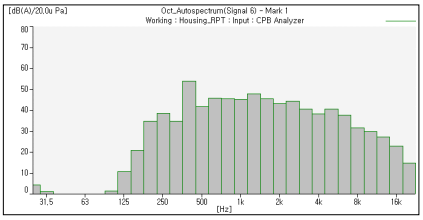
(b) 유량, 효율, 입력

(b) Corrected air flow, efficiency and input power



(c) 유량, 진공도, 흡입력

(c) Corrected air flow, air power and vacuum level



(d) 소음

(d) Acoustic noise

그림 6 개발된 BLDC 모터를 적용한 로봇청소기의 특성

Fig. 6 Characteristics of the robot vacuum cleaner with the developed BLDC motor

3. 결 론

본 논문에서는 로봇청소기의 사용 환경과 성능을 개선하기 위하여 슬림형 임펠러 BLDC 모터를 설계 개발하였다. 65[mm] 크기에서 성능을 확보하기 위하여 DC 모터에서 브러시와 정류자를 제거한 BLDC 모터를 최적으로 설계 제작하였으며, 실험을 통하여 기존 DC 모터에 비해 제안된 모터가 효율, 소음, 성능 등이 양호한 특성을 가지고 있는 것을 볼 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2008학년도 유한대학 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

[1] 이은웅, 김일중, 김종겸, "전동력 응용 기술의 현재와 미래," Proceeding of KIEE, Vol.45, No.12, pp.28-32, 1996.

[2] J.R. Hendershot Jr and Tje Miller, "Design of Brushless Permanent-Magnet Motors", Clarendon Press, 1994.

[3] 中田高義 外, 有限要素法交流電磁石 設計 應用, 森北出判株式會社, 1991.

[4] 이현정, 손은석, "국내 가정용 로봇 청소기 시장 동향", 전자부품연구원, 2011.

저 자 소 개

김 현 중(金 炫 中)

1964년 5월 23일생. 1989년 인하대 전기공학과 졸업. 1992년 인하대 전기공학과 대학원 졸업(공학석사). 1995년 동대학원 졸업 (공학박사). 1995년. 9 ~ 현재 유한대학 컴퓨터제어과 교수

Tel : 02) 2610-0832 / Fax : 02) 2610-0351

E-mail : kimhj@yuhan.ac.kr