

전기자동차용 0.5[kW]급 공기압축기의 브러시리스 직류전동기 개발

(Development of Brushless DC Motor for 0.5[kW] Air Compressor of Electric Vehicle)

한만승* · 홍성렬 · 조주희 · 이상훈 · 박성준 · 김대경**

(Man-Seung Han · Song-Ryul Hong · Ju-Hee Jo · Sang-Hun Lee · Seong-Jun Park · Dae-Kyong Kim)

Abstract

Recently, it is increased to apply sensorless drive for BLDC (Brushless DC) motor to maximize operating efficiency and fuel efficiency to an electrical component of (H)EV. Especially, Electric vehicle component promotes a fuel efficiency enhancement by the carbon dioxide emissions regulation of a vehicle becoming the principal of the environmental pollution globally, the oil price hike that continued increasingly. We suggested the air compressor which applied BLDC motor for electric vehicle component and compared suggested BLDC motor with the conventional DC motor. The experimental results show that the driving efficiency was increased and was improved compressive force by suggested BLDC motor.

Key Words : Air Compressor, BLDC(Brushless DC) Motor, (H)EV

1. 서 론

자원고갈, 에너지 문제, 지구 온난화와 환경문제, 주요국의 CO2 규제정책과 같은 자동차 산업을 둘러싼 환경의 변화로 전기자동차의 필요성이 강력히 대두되고 있다. 전 세계적으로 원유 가격의 급등과 점차 중요해지는 환경문제의 중요성으로 인해 현재 자동차 시장은 기존의 내연기관으로 구성된 자동차를 대체하기 위해서 Hybrid Electric Vehicle (HEV) 및 Electric Vehicle (EV) 등 그린카 개발이 활발하다[1-3].

* 주저자 : 전남대학교 전기공학과 박사수료
** 교신저자 : 순천대학교 전기 제어공학과 조교수
Tel : 061-750-3546, Fax : 061-750-3540
E-mail : dkkim@sunchon.ac.kr

접수일자 : 2012년 6월 1일
1차심사 : 2012년 6월 8일, 2차심사 : 2012년 7월 13일
심사완료 : 2012년 7월 19일

그림 1과 같이 공기 압축기는 연비 향상과 차량의 고급화를 위하여 휠 서스펜션 및 도어 개폐용으로 적용되고 있다. 특히, 자동차 시스템의 효율을 높이기 위해서 공기 압축기의 전동화를 추진하고 있다.

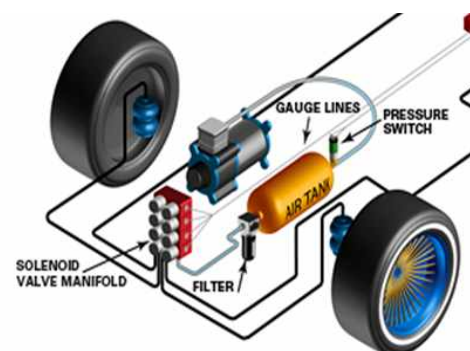


그림 1. 공기 압축기가 장착된 차량 구성도
Fig. 1. Air-compressor mounting on a vehicle

국내에서는 (H)EV용 공기 압축기는 주로 저가형 DC Motor가 사용되고 있으며, 고효율 브러시리스 직류전동기의 적용 사례가 없다. 브러시리스 직류전동기는 회전자에 권선을 감는 대신 영구자석을 장착하여 일반적인 DC Motor에 비해 관성대 토크 비율이 높으며 브러쉬가 없으므로 유지, 보수가 용이하고 브러쉬와 정류자원의 마찰에 의해 발생하는 스파크나 분진, 가청잡음이 없어 사용 환경에 제약을 받지 않는 장점을 가지고 있다. 또한 브러시리스 직류전동기는 가 변속 제어가 용이하고, 운전 영역 변화에 따른 효율 변화가 적은 특징을 가지고 있다[4-9]. 이러한 장점으로 차량 제조사에서는 HEV 및 EV뿐만 아니라 일반 차량에도 브러시리스 직류전동기 적용 전장제품을 연구 개발하고 있다.

본 논문에서는 전기자동차용 공기 압축기 구동 브러시리스 직류전동기 설계 및 특성해석을 수행하고 그 결과를 제시하였다. 또한 0.5[kW]급 공기 압축기 제작을 통하여 설계된 브러시리스 직류전동기의 성능을 측정하고, 기존의 DC Motor를 사용한 공기 압축기 성능과 비교함으로써 우수한 운전 효율성 및 압축 성능을 검증하였다.

2. 공기 압축기용 브러시리스 직류전동기 설계

그림 2는 모터 개발의 순서도를 나타낸다. 첫 번째로 공기 압축기에서 요구하는 사항을 고려하여 목표 사양이 결정되며 기본, 상세, 최적설계가 수행된다. 다음 단계로 설계를 통하여 도출된 형상으로 구동모터의 제작 및 시험이 이루어지며 시험을 통하여 발생하는 문제점을 보완설계하고 다시 제작 및 평가를 통하여 개발이 완료된다.

구동모터의 슬롯과 극수의 조합은 성능목표를 만족하면서 제조공정 및 드라이브와의 매칭성도 고려되어 선정되어야 한다. 슬롯의 수는 제조공정 및 제조비용이 고려되어야 하며 극수는 회전자의 형상, 영구자석의 재질, 모터의 회전수 등이 고려되어 선정되어야 한다.

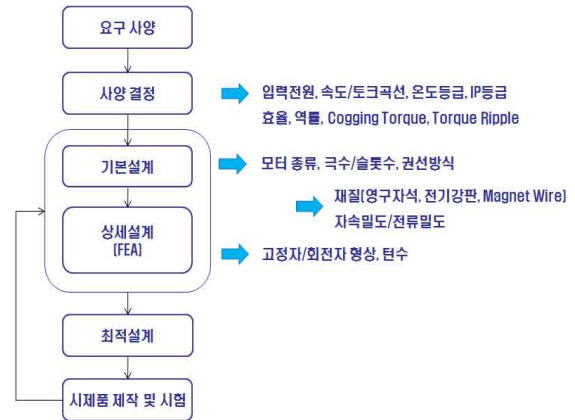


그림 2. 모터 개발 순서도
Fig. 2. Flow chart for development of motor

2.1 브러시리스 직류전동기 구조 및 제원

공기압축기용 구동모터 설계를 위하여 고정자의 설계변수는 그림 3과 같이 설정하였다. 공기압축기와의 인터페이스를 고려하여 고정자 외경 및 적층길이를 표 1과 같이 제한조건으로 설정하였으며 권선의 용이성을 위하여 SO와 보빈 및 압축기장착을 위하여 YT를 제한조건으로 설정하였다.

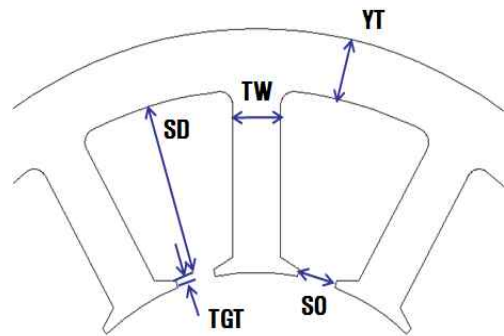


그림 3. 설계변수
Fig. 3. Design variable

공기 압축기용 브러시리스 직류전동기의 제원 및 2D 형상은 그림 4와 표 2와 같다. 설계된 전동기의 구조는 12개의 슬롯과 회전자에 8개의 Magnet으로 구성되어 있다. 또한 차량에 따른 구조적 제약성에 따른 외경을 크게 하지 못하는 것으로 표 2와 같이 구조적 사양으로 설계하였다.

표 1. 설계 제한조건
Table 1. Restricted conditions of design

제한조건	값	비 고
고정자 Core 외경	Φ70[mm]	압축부 인터페이스 고려
적층길이	80[mm] 이하	압축부 인터페이스 고려
SO	2[mm] 이상	권선시 노즐 공간 확보
YT	4[mm] 이상	보빈과 하우징 조립시 공간 확보

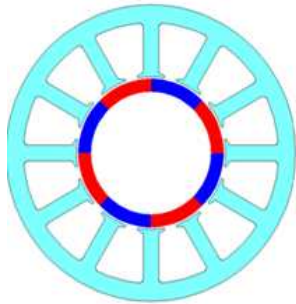


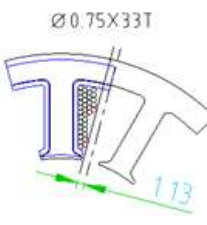
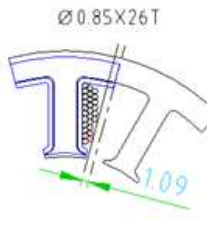
그림 4. 브러시리스 직류전동기의 설계 형상
Fig. 4. BLDC Motor Design Configuration

표 2. 브러시리스 직류전동기의 제원
Table 2. Specification of BLDC Motor

구분	항 목	제 원
사양	정격 출력 [W]	500
	정격 전압 [V]	24
	정격속도 [rpm]	3000
고정자	외경 [mm]	70
	내경 [mm]	36
	슬롯수	12
	재질	S18 0.35T
회전자	공극 [mm]	0.5
	외경 [mm]	35
	Magnet	Nd Bonded
	극수	8
	적층 길이[mm]	70

표 3은 설계된 모델별 슬롯 점적율을 나타낸다. 본 전동기 개발은 저전압 전동기 개발이므로 전동기 설계 시 활용할 수 있는 슬롯의 공간에 비해 두꺼운 코일이 권선되어야 하는 어려움이 있다. 따라서 점적율을 높이기 위해 2개의 모델을 개발하였으며, 최종 BLDC-2 모델을 선정하였다.

표 3. 설계된 모델별 슬롯 점적율
Table 3. Stator Slot Space Factor

구분	BLDC-1	BLDC-2
Winding Specification'	D0.75X33Turns	D0.85X26Turns
Stator Slot		
Space Factor	36.8[%]	36.9[%]

2.2 브러시리스 직류전동기의 특성해석

그림 5는 유한요소 해석을 이용한 설계된 전동기의 시뮬레이션 결과값을 나타내고 있다. 그림 5와 같이 자속밀도는 1.3T로 안정적이며 역기전력 8.5[V], 토크 리플 2.3[%]로 공기 압축기에 적용하기에 적합하다.

2.3 브러시리스 직류전동기의 특성시험

그림 6은 제작된 브러시리스 직류전동기 시제품을 나타낸다. 고정자는 집중권 방식의 12 슬롯 구조에 원활한 권선 조립을 위하여 인슐레이터를 제작하여 작업을 하였다. 제작된 회전자는 Ring 타입 3단으로의 Nd Bonded 8 극으로 조립하였다. 그림 7은 제작된 브러시리스 직류전동기의 특성시험 결과를 나타낸다. 그림 7 (a)는 회전자의 표면자속밀도를 나타내며,

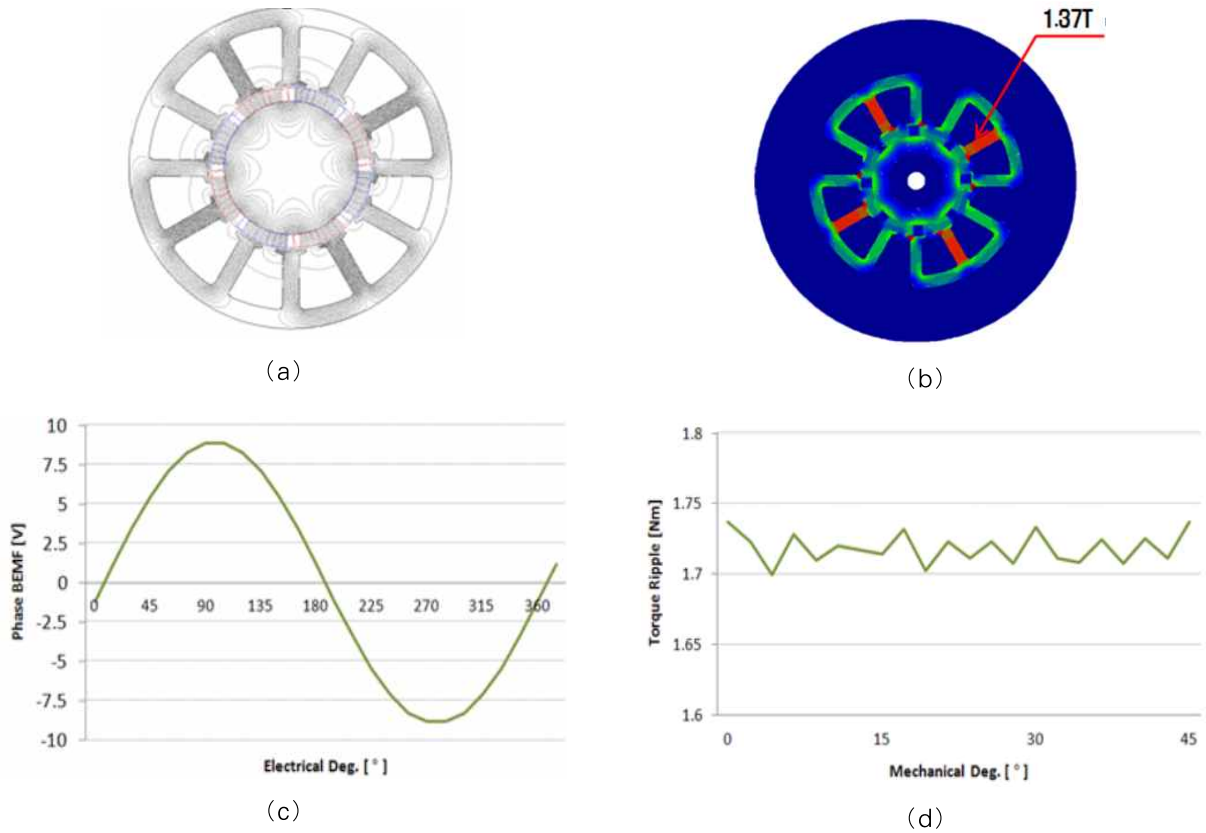


그림 5. 설계된 전동기의 특성분석 결과 (a) 자속선 (b) 자속밀도 (c) 역기전력(3,000[rpm]) (d) 토크리플
 Fig. 5. Characteristic analysis results of the designed motor (a) flux line (b) flux density (c) back EMF(3,000[rpm]) (d) torque ripple

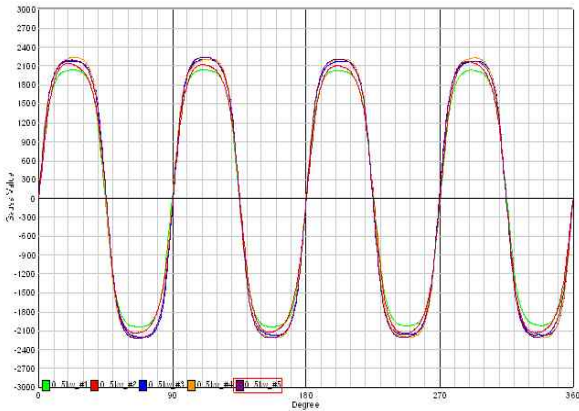


그림 6. 브러시리스 직류전동기의 시제품 (a) 회전자 (b) 고정자
 Fig. 6. Prototype of BLDC motor (a) rotor (b) stator

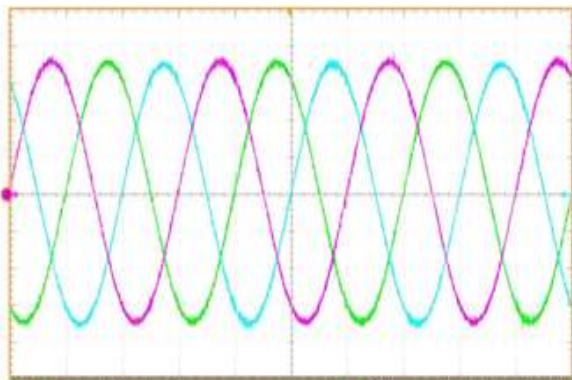
Ring Magnet는 착자 조건(착자전압, 착자커패시턴스)에 따라 영구자석의 표면자속밀도의 형태가 변화되며 변화되는 표면자속에 의하여 역기전력파형의 형태가

바뀌게 된다.

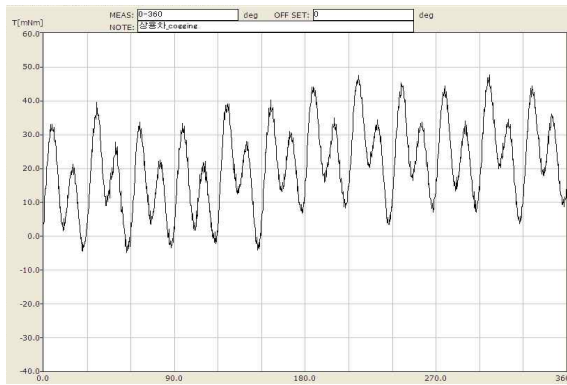
착자 조건은 착자 전압을 1,200[V]~2,000[V]로 200[V]씩 증가하면서 최적의 착자하여 역기전력 파형



(a)



(b)



(c)

그림 7. 제작된 전동기의 특성실험 결과 (a) 회전자의 표면자속밀도 (b) 역기전력(3,000[rpm], 2[V/Div.]) (c) 코깅 토크

Fig. 7. Characteristic experimental results of the designed motor (a) flux density of rotor (b) back EMF(3,000[rpm]) (c) cogging torque

측정을 수행하였다. 착자 후 평균 표면 자속밀도는 2,211Gauss가 측정되었고, 그림 7 (b)와 같이 역기전력전압은 7.3[V]로 측정되었다. 그림 7 (c)는 코깅 토크 측정 파형을 나타낸다. 설계된 전동기의 코깅 토크는 정격토크(1.59[Nm]) 대비 40[mNm]로 2.5%의 양호한 수준으로 판단된다.

그림 8은 부하시험 장치를 나타낸다. 드라이브의 입력전원은 24[V] 배터리를 대신하여 DC전원 공급장치를 설치하였다. 그림 9는 제작된 전동기의 부하시험 결과를 나타낸다. 정격상태(0.5[kW], 3,000[rpm], 1.59[Nm])에서 효율 85%를 나타내고, 최대효율은 0.8~1.0[Nm] 구간에서 87%를 나타낸다.

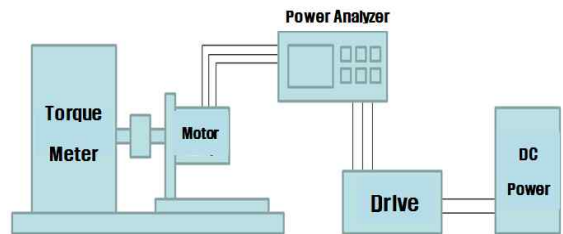


그림 8. 부하시험 장치
Fig. 8. Load test equipment

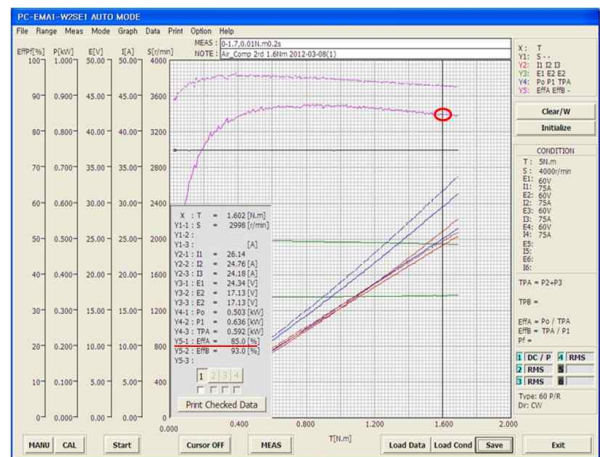


그림 9. 부하시험 결과
Fig. 9. Result of load test

표 4는 T-N 시험 결과를 보여주고 있다. 설계 요구 조건과 비슷한 시험결과를 볼 수 있다.

표 4. T-N 시험 결과
Table 4. Results of T-N test

항목		설계 요구조건	결과값
정격	출력[kW]	0.500	0.503
	속도[rpm]	3000	2998
	토크[Nm]	1.59	1.602
	상전류[Arms]	24.3	24.5
	효율[%]_정격	83.6	85.0
	효율[%]_최대	-	87.0

3. 공기 압축기의 특성 시험

그림 10은 제작된 브러시리스 직류전동기를 적용한 공기 압축기의 3D 모델을 보여주고 있으며, 구성으로서는 전동기 고정자, 압축 축과 연결되어 있는 전동기 회전자, 고압에 의한 방열처리를 하는 방열 상부와 하부, 압력을 실행하는 크랭크가 부착되어 있는 압력추진 좌 하우징과 우 하우징으로 구분 장착되어 있다. 또한 깨끗한 공기가 흡입될 수 있도록 에어 필터링을 해주는 에어필터부로 구성되어 있다.

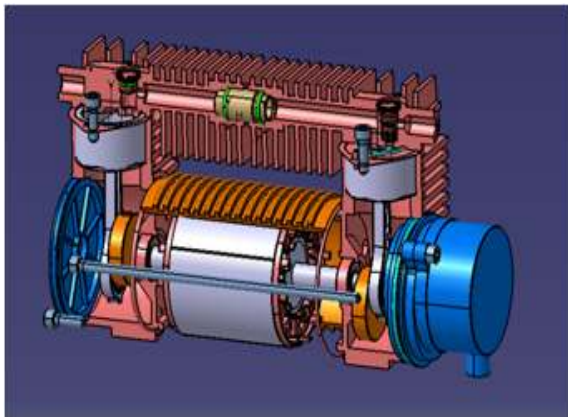


그림 10. 공기 압축기 3D 모델
Fig. 10. 3D model for air-compressor

그림 11은 공기 압축기 시제품 조립하는 과정을 보여주고 있으며, 시제품을 조립하기까지 크게 12단계의

절차를 거쳐 완성되게 된다.



그림 11. 공기압축기 조립 과정
Fig. 11. Air-compressor assembly process

제작된 공기 압축기 특성을 측정하기 위해서 그림 12와 같이 공기 압축기 특성시험 간이장치를 제작하였다. 간이장치 구성은 설계된 브러시리스 직류전동기가 조립되어 있는 공기 압축기, 공기 압축기 드라이브, 공기 압력을 실시간으로 정보 제공할 수 있는 압력 센서모듈, 유량을 실시간으로 파악할 수 있는 유량 센서, 공기 압축기에서 제공된 공기를 담아놓는 에어탱크로 구성되어 있다.



그림 12. 공기 압축기 특성시험 간이장치
Fig. 12. Characteristic test for air-compressor simplified equipment

그림 13은 설계된 전동기 모델을 제작된 공기 압축기에 장착하여 특성시험을 수행하였으며, 기존의 DC motor를 사용한 기존 공기 압축기와 비교 시험하였다. 특히 BLDC-2 모델이 11.5[bar] 이상까지 압축이 가능하였다.

표 5는 목표 압력에 대한 충전 시간에 대한 비교를 보여준다. 충전 시간은 설계된 2개의 모델이 기존 공기 압축기 보다 약 충전 시간이 4분 40초 정도 단축되는 우수한 성능을 보임을 알 수 있었다.

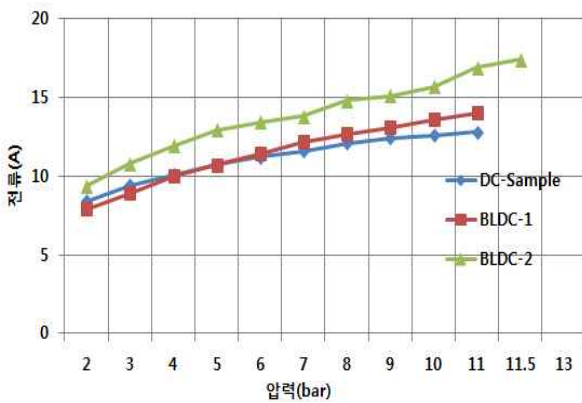


그림 13. 공기 압축기의 특성시험 결과
Fig. 13. Characteristic test Results of air-compressor

표 5. 목표 압력에 대한 충전 시간
Table 5. Charge time for target pressure

구분	충진 시간	목표 압력	충진시간 단축시간
DC-Motor	10분45초	11.5	-
BLDC-1	6분01초	11.5	4분 44초
BLDC-2	6분05초	11.5	4분 40초

4. 결 론

본 논문은 전기자동차용 공기 압축기의 브러시리스 직류전동기 개발에 대해 다루었다. 0.5[kW]급 공기 압축기 구조 및 요구사항을 반영하여 전동기 요구 정격 및 제한 사항이 결정하였다. 또한 설계된

전동기의 단품 특성 시험 뿐만 아니라 공기 압축기에 적용하여 압축기의 특성 시험을 통하여 비교 분석하였다.

개발된 브러시리스 직류전동기는 T-N 시험을 통하여 설계 요구조건에 만족하였고, 개발된 공기 압축기는 DC motor가 적용된 기존 압축기 보다 공기 압축 성능 뿐만 아니라 충전 시간 단축에서 우수한 성능을 보임을 알 수 있었다.

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. 2010T100100797)

References

- [1] Sang-Taek Lee, Ju-Hee Cho, Dae-Kyong Kim, "Trends in Development of Electrical Traction systems", Journal of KIPE, vol. 16 no.2 , pp.32-37, 2011. 4.
- [2] C. C. Chan and K. T. Chau, Modern Electric Vehicle Technology, Oxford, U.K.: Oxford Univ. Press, 2011.
- [3] M. Eshani, K. M. Rahman, and H. A. Toliyat, "Propulsion system design of electric and hybrid vehicles," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 44, no. 1, pp. 19-27, 1997.
- [4] Duane Hanselman, Brushless Permanent Magnet Motor Design, The Writers' Collective, 2003.
- [5] Dae-Kyong Kim, Kwang-Woon Lee, Byung-II Kwon, "Commutation torque ripple reduction in a position sensorless brushless DC Motor drive," IEEE Trans. On Power Electronics, vol. 21, no. 6, pp. 1762-1768, Nov. 2006.
- [6] Kwang-woon Lee, Dae-kyong Kim, Byung-Taek Kim, Byung-il Kwon, "A Novel Starting Method of the SPM-type BLDC Motors without Position Sensor for Reciprocating Compressor", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 44, no. 1, Jan./Feb. 2008.
- [7] Seung-gun Lee , Dae-Kyong Kim, Seung-Hak Yang , Young-Cheol Lim, "A Study on Low-Cost Sensorless Drive of Brushless DC Motor for Compressor Using Random PWM", Journal of KIEE vol. 22, no. 10, pp.97-103, 2008. 10.
- [8] Jang-young Choi, Hyung-il Park, Seok-Myeong Jang, Sung-Ho Lee, "Design and Analysis of Surface-Mounted PM Motor of Compressor for Electric Vehicles Applications according to Slot/Pole Combinations", Transactions of KIEE vol. 60, no.10, pp.1846-1857, 2011. 10.
- [9] Z. Q. Zhu, Z. P. Xia, L. J. WU and G. W. Jewell, "Influence of slot and pole number combination on radial force and vibration modes in fractional slot PM brushless machines having single- and double- layer winding," IEEE ECCE 2009, pp. 3443-3450, 2009.

◇ 저자소개 ◇



한만승 (韓萬勝)

1969년 10월 5일생. 2009년 전남대학교 전기공학과 졸업(석사). 1996~2009년 6월 대우일렉트로닉스 연구소 책임연구원. 2010~2012년 전남대학교 전기공학과 졸업(박사수료). 2009년~현재 (주)고아정공 Motor기술연구소 수석(연).



홍성렬 (趙柱熙)

1971년 1월 3일생. 2010년 호남대학교 전기공학과 졸업. 1996~2009년 6월 대우일렉트로닉스 연구소 책임연구원. 2012년 전남대학교 전기공학과 대학원 석사과정 재학중. 2009년~현재 (주)고아정공 Motor기술연구소 책임(연).



조주희 (趙柱熙)

1974년 7월 1일생. 2001년 한양대 전자컴퓨터공학부 졸업. 2003년 동 대학원 전자전기제어계측공학과 졸업(석사). 2004년 현대로템 중앙연구소 연구원. 2005~2009년 (주)코모텍 부설연구소 책임(연). 현재 전자부품연구원 디지털 컨버전스연구센터 선임(연).



이상훈 (李相勳)

1974년 8월 11일생. 2000년 경성대학교 전기공학과 졸업. 2006년 부산대학교 메카트로닉스협동과정 졸업(박사). 2002년~2004년 9월 KT전기 기술연구소 주임연구원. 2007~2009년 삼성전기 Power사업팀 책임연구원. 2010년~현재 한국승강기 대학 승강기 전기설계과 전임강사.



박성준 (朴晟濬)

1965년 3월 20일생. 1991년 부산대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 지능 기계공학과 졸업(박사). 1996년 3월~2000년 2월 거제대학 전기과 조교수. 2000년 3월~2003년 8월 동명대학 전기공학과 조교수. 2003년 8월~현재 전남대학교 전기공학과 부교수.



김대경 (金大慶)

1972년 9월 27일생. 2001년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 동 대학원 전자전기제어계측공학과 졸업(박사). 2001~2005년 삼성전자 가전연구소 선임연구원. 2005~2011년 전자부품연구원 디지털컨버전스연구센터 센터장. 2011년~현재 순천대학교 전기제어공학과 조교수.