

고출력 브러시리스 직류전동기 개발

최태인\*, 공영경\*, 김현철\*, 김창림\*\*, 송종환\*\*, 홍성영\*\*, 김병섭\*\*, 정용배\*\*, 최경호\*\*  
 국방과학연구소\*, (주)효성\*\*

The development of BLDC motor with high power density

T.I.Choi\*, Y.K.Kong\*, H.C.Kim\*, C.L.Kim\*\*, J.W.Song\*\*, S.Y.Hong\*\*, B.S.Kim\*\*, Y.B.Jung\*\*, K.H.Choi\*\*  
 ADD\*, HYOSUNG Corp.\*\*

**Abstract** - ADD has developed a special BLDCM(brushless d.c. motor) that has small size and high power density. The model of BLDCM is like that of advanced nation. Design, production and test carried out by ADD and HYOSUNG Corp.. We simulated back EMF of phase, inductance of line and eddy current loss of rotor after we tested the motor at 80 Kw. According to analysis we have established the performance of 100Kw power recently. There are the same results that we designed.

1. 서 론

군사용으로 사용되고 있는 전동기는 많은 것이 고려되지만 그 중 가장 기본적인 설계 개념이 경량화와 고출력이 요구되고 있다. 신소재, 전력전자 및 센서의 발달 등으로 최근에 와서는 중량 대 출력비가 과거에 비해 수 배에 달할 정도로 진보되어 왔다.

40MGOe급 회로류계 영구자석과 고압, 높은 스윙칭 주파수 및 쉬운 제어성을 갖는 IGBT 소자와 속도 센서 및 고루자율의 코아 재료 및 센서 등이 적용되었다. 또한 7상 6극의 최적화된 전동기 이용률 기술과 DSP TMS320C31을 이용한 실시간 운전 등의 기술이 적용되었다.

본 논문에서는 80%의 목표 달성 후 100%의 목표달성을 위해, 상세 설계 검토를 행하였다. 상세 설계 검토 내용은 인덕턴스, 역기전력, 와전류 손실 등을 유한요소 해석으로 검토 해 보았다. 이 검토 결과를 토대로 제작 및 시험을 행하였다. 시험 결과 원하는 사양을 만족하는 고출력 브러시리스 직류전동기를 개발하게 되었다.

2. 본 론

본 논문의 전동기는 표 1과 같은 사양을 갖고 있다.

표 1 전동기 주요 특성

구분	설계 내용
회전수	25,000rpm
출력	100Kw
공극	1.5mm
상수	7상
극수	6극
영구자석	SmCo
상당 역기전력	143V/25000rpm
선간 인덕턴스	108 μH
상 저항	11mΩ
스윙칭 소자	IGBT SKM 195 GB
IGBT 드라이버	SKHI 22A
극 위치 센서	자극 센서 방식
DSP	TMS320C31

2.1 목표 성능 80% 달성 시의 시험 결과

표면부착형 브러시리스 전동기 개발 초기에는 영구자석이 고속회전시 영구자석의 이탈문제 및 낮은 역기전력 등의 문제로 목표 출력의 65% 정도 실험을 수행하였다. 영구자석의 접촉제 및 지지 방법의 개선 등으로 영구자석 이탈문제는 해결이 되었고, 착자 방법의 개선으로 낮은 역기전력 문제를 해결함으로써 목표 출력의 80% 정도 달성할 수 있었으나 다음과 같은 문제점들이 발견 되었다.

- 설계/제작품 역기전력 차이
- 낮은 인덕턴스로 상전류 불안정
- 고속시 엔코더와 상전류 간의 불일치

2.1.1 역기전력

역기전력의 설계치는 25000[rpm] 회전시 상당 143[V](선간 286[V])이다. 그러나 착자하는 방법에 따라 역기전력이 120[V]~170[V] 정도로 변화하게 되어 실제 자기회로 설계치가 바르게 설계 되었는지 검토가 요구되게 되었다. 그림 1은 25000[rpm] 회전시 선간 유기전압이 328[V]가 측정 결과이다.

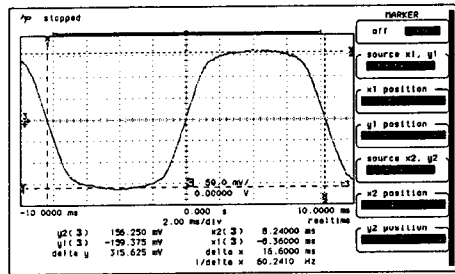


그림 1 역기전력(선간 유기전압 328V:점선기준)

2.1.2 인덕턴스 측정치

선간 인덕턴스의 설계치가 1[kHz]~10[kHz]시 108[μH]이다. 그러나 전동기의 측정된 선간 인덕턴스는 표 2와 같다.

표 2 측정된 선간 인덕턴스

주파수(Hz)	전동기 + 리액터		전동기	
	L(μH)	R(오옴)	L(μH)	R(오옴)
100	121	35	74	-
400	100	50	76	-
1K	95	110	72	56
4K	80	400	58	312
10K	71	920	43	673

표 2에서 선간 인덕턴스 값은 설계치 보다 낮아 80[Kw] 부하시험시 그림 2와 같이 상전류 파형이 인덕턴스가 적어 di/dt 기울기가 커져 전류제한이 되는

200[A] 이상으로 넓고 있다. 따라서 선간 인덕턴스 설계치 만큼 개선시키기 위해 유한요소 해석에 의해 설계 검토가 요구되게 되었다.

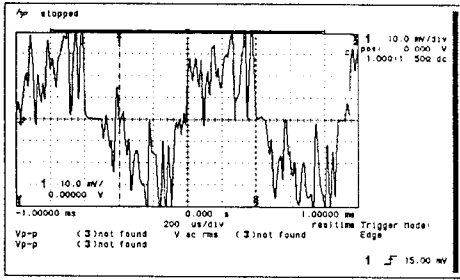


그림 2 20000(rpm), 65[Kw] 상전류 파형

### 2.1.3 상전류 파형

그림 3은 20000(rpm), 75[Kw] 부하시험시 나타난 결과로서 엔코더 셋팅에 대해 상전류가 동위상을 가져야 하나, 실제 결과에서는 60[μs] 만큼 지연되고 있다. 따라서 엔코더 셋팅을 앞서게 할 필요가 있으며, 이에 대한 검토가 요구되었다.

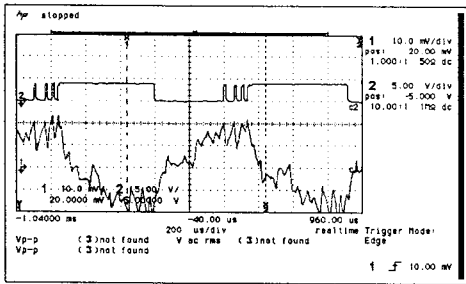


그림 3 엔코더에 대해 지연되는 상전류(20000rpm)

## 2.2 유한요소 해석

### 2.2.1 인덕턴스

80%의 목표 달성한 전동기의 선간 인덕턴스가 70[μH]가 되어 16[μsec] 당 리플 200[A]가 되고 평균 전류가 약 100[A]정도가 되었다. 이는 선간 인덕턴스가 낮아서 전동기의 토크를 만드는 전기자 상전류의 크기가 적고 리플 전류의 침투 전류가 커지게 된다. 따라서 선간 인덕턴스의 크기를 적정한 크기로 향상 시킬 필요가 있다. 개선될 인덕턴스의 값은 108[μH]로서 50[μsec] 당 리플 전류 100[A]가 되고 평균 전류가 약 150[A]정도가 되었다.

인덕턴스를 향상시키는 방법으로는

- 1) 회전자 구조 및 공극길이 변경
- 2) 전기회로 설계 변경
- 3) 자성웨이 사용
- 4) 고정자 단절권에서 전절권으로 변경

이 중에서 3), 4)을 채택하였다. 표 3에 인덕턴스 해석 결과 값을 나타내고 있다. 그 중에 3안이 가장 잇점이 많아 채택하였으며, 다음과 같은 장점을 갖는다.

- 1) 역기전력이 좀 더 사각파에 가까움
- 2) 저항의 변화 없이 인덕턴스만 증가시키므로 전류 리플 감소에 효과적임
- 3) 와전류에 의한 손실 감소시킴

표 3 인덕턴스 해석 결과

	기준	1안	2안	3안
권선절	단절	단절	단절	전절
자성웨이	없음	Magnoval 2232	$\mu_r=4$	Magnoval 2232
공극	1.5 mm	1.5 mm	1.5 mm	1.5 mm
티타늄	2.5 mm	2.0 mm	2.0 mm	2.5 mm
구리밴드	-	1.0 mm	1.0 mm	1.0 mm
자석두께	9.5 mm	9.5 mm	9.5 mm	9.0 mm
자석길이	94 mm	94 mm	77 mm	88 mm
철심장	102 mm	102 mm	102 mm	102 mm
회전자외경	74 mm	74 mm	74 mm	74 mm
인덕턴스	60+Lo μH	91 μH	105 μH	101 μH
역기전력	171 V	174 V	143 V	145 V

### 2.2.2 역기전력

유한요소 해석에 의해 회전자 구조 및 공극에 따른 역기전력 값을 구하였다. 이는 회전자가 해석된 역기전력 값과 실제로 제작하여 착자되는 과정에서 생길 수 있는 B-H 곡선 값의 차이를 규명할 수 있고, 선간 및 상에 유기되는 역기전력 파형 및 값을 구하여 원하는 값에 근접시킬 수 있다. 80%의 목표성능까지 가지 몇 번에 걸쳐 제작된 회전자에서 원하는 역기전력 파형 및 값을 얻기가 실제 무척 어려웠던 경험이 있다. 해석에 의해 원하는 역기전력이 그림 4와 같다.

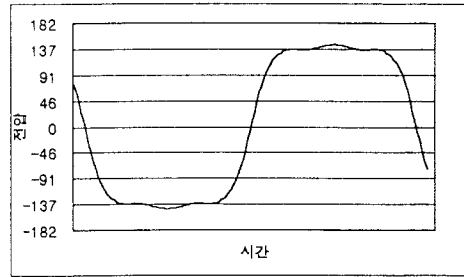


그림 4 해석된 역기전력

### 2.2.3 와전류 손실

유한요소 해석에 의해 단위길이 당 소비전력(W/m)를 표 4와 같이 구하였다.

표 4 구리밴드의 와전류손

구리밴드 유무	웨이	티타늄 [W/m]	구리 [W/m]	자석(SmCo) [W/m]	합계 [Watt/m]
없음	비자성	4412.3	-	56.1	4468.9
	자성 ( $\mu_r=3$ )	2223.1	-	162.8	2385.9
있음	비자성	3801.8	1299.2	3.2	5104.2
	자성 ( $\mu_r=3$ )	1883.6	691.7	4.6	2579.9

표 4에서 알 수 있듯이 구리밴드가 있을 때 자석에서 발생하는 소비전력이 큰 폭으로 감소하고 있음을 알 수 있고, 특히 자성웨이의 사용으로 와전류 손실을 크게 감소시킴을 알 수 있다.

## 2.3 실험 결과

### 2.3.1 역기전력 파형

정속으로 회전시켜 측정한 역기전력 파형이 그림 5와 그림 6과 같다. 그림 5는 유기된 상전압이고, 그림 6은 유기된 선간전압이다.

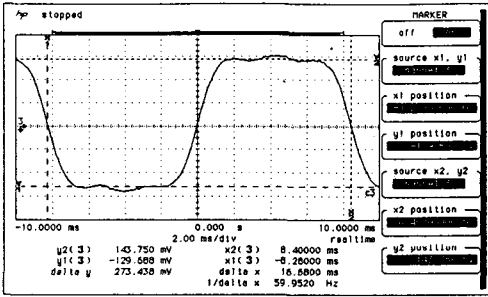


그림 5 상에 유기된 역기전력(143V/25000rpm)

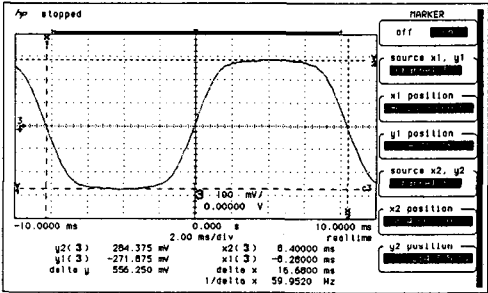


그림 6 선간에 유기된 역기전력(286V/25000rpm)

### 2.3.2 상전류 파형

110[μH]에 대한 상전류는 그림 7, 그림 8과 같다.

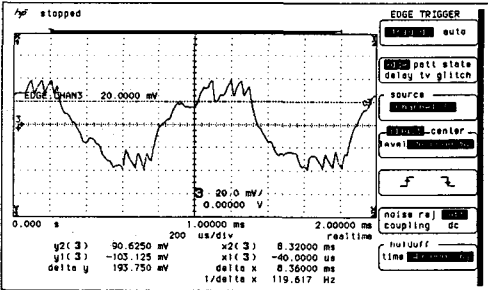


그림 7 기준 엔코더 셋팅시 상전류

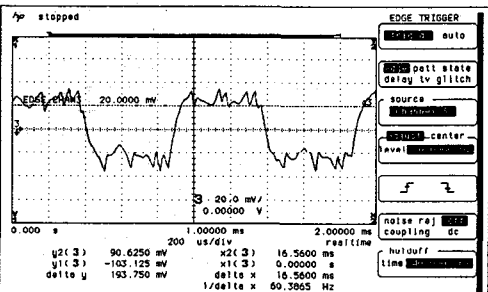


그림 8 엔코더 신호를 약간 leading시 상전류

### 2.3.3 부하시험 결과

그림 9는 100[Kw]의 부하시험한 결과이다. 부하기는 와전류형 다이내모메타를 이용하였다.

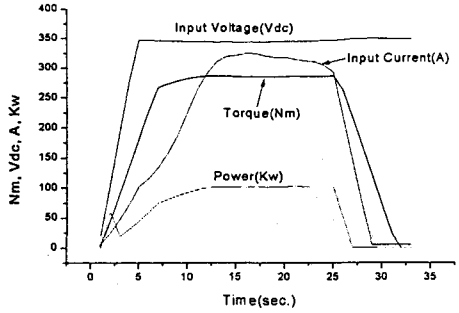


그림 9 100Kw 부하시험 결과

### 3. 결론

본 논문은 100(Kw)급의 고출력 브러시리스 직류전동기를 개발하기 위해 제작하여 80[Kw] 부하시험 중 역기전력, 선간 인덕턴스, 상전류 등이 설계치와 일치하지 않는 문제점 등을 확인하게 되었다. 유한요소 해석을 이용하여, 역기전력, 인덕턴스 및 와전류 등을 해석하여 얻어진 결과를 토대로 제작/실험하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 해석된 역기전력과 제작/실험한 결과 값이 잘 일치됨을 확인하였다.
- 2) 해석된 선간 인덕턴스는 계측된 값과 잘 일치됨을 확인하였고, 상전류의 di/dt 기울기를 개선시켰다.
- 3) 해석된 와전류손을 근거로 회전자에 발생열이 최소로 되는 구조로 하여 손실을 감소시켰다.
- 4) 엔코더 셋팅에 대한 상전류의 지연을 엔코더 셋팅을 앞서게(leading) 하여 고속 회전에 대한 상전류 파형을 개선시켰다.

### [참고 문헌]

- [1] Jocek F. Gieras and Mitchell Wing. Permanent Magnet Motor Technology Design and Application, Marcel Dekker, Inc.
- [2] T.J.E. Miller, Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives, Clarendon Press, Oxford, 1989
- [3] Peter Mongeau, "High Torque/High Power Density Permanent Magnet Motors", Naval Symposium on Electric Machines, proceedings, July 28-31, 1997, The Hotel Viking, Newport, RI, U.S.A.
- [4] J.R. Handershot Jr, T.J.E. Miller, Design of Brushless Permanent Magnet Motors, Magna Physics Publishing, 1994
- [5] T.J.E. Miller, R. Rabinovici, "Back-EMF Waveforms and core losses in brushless DC motors", IEE Proc. Electric Power Appl., vol. 141, No. 3, May 1994
- [6] 공영경 외 6명, "단시간 고출력 BLDC 전동기 개발", 추계학술대회 논문집, pp 43-45, 1998. 11