

# 팬구동용 저압 8/6 SRM의 설계 및 구동 특성

## Design and Drive Characteristics of Low Voltage 8/6 SRM for Fan Application

안진우\*  
(Jin-Woo Ahn)

**Abstract** - In this paper, 4-phase switched reluctance motor(SRM) with 8-stator and 6-rotor pole structure is proposed for a high speed fan with a low voltage. The air blower has unidirectional rotation characteristics and requires a low torque ripple and noise as well as high efficiency. To achieve the requirements, voltage and current according to loading condition of limited specification is considered. Design process is to select the bore diameter, pole arc, yoke of stator and rotor to get a high torque and efficiency. To verify the validity of the proposed structure, finite element method(FEM) is employed to get the performances. And the converter for the proposed SRM is employed a 1.5q power converter for cost effectiveness. Prototype SRM is manufactured and tested, and the test results show this design is within the specification and good for the air blower applications.

**Key Words** : Switched Reluctance Motor, 4-Phase 8/6 SRM, Low voltage, High speed, Unidirectional rotation, Blower

### 1. 서론

최근 산업분야에서 적용분야에 따라 송풍기 및 압축기의 전동시스템 효율을 높이고 그 크기를 간소화하거나 경제적인 전동기와 그에 따른 제어기에 대한 개발이 연구되고 있다. 이러한 특성을 가진 전동시스템의 에너지 소비에 따른 효율 개선의 효과는 매우 높을 것으로 판단되고 있으며, 적합한 전동시스템의 기술개발이 매우 중요하다. 송풍기 및 압축기가 적용되고 있는 산업분야는 사용 환경이 매우 열악함으로 기계적 구조와 내환경성이 우수하고, 저가형으로 고속운전에 적합한 전동기가 필수적이다. 스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, 이하 SRM)는 이중 돌극형 구조이며 고정자 권선에만 여자시키는 구조로, 회전자에는 권선과 자석이 없는 아닌 단순한 전자기적 구조를 가지고 있어, 고효율, 고토크/관성비, 넓은 범위의 가변속운전의 장점을 가진 전동기로서 송풍기 및 압축기 등에서 SRM을 활용하는 사례가 점점 증가하고 있다[1-5]. 본 논문에서는 제한된 조건에 따른 송풍기용 저전압/대전류형 전동시스템으로 SRM의 실용가능성을 검증하기 위해 저가형 및 저소음 운전이 가능한 극 조합의 SRM 설계 및 구동 특성을 해석하였다. 기초 설계는 출력조건에 따른 회전자 외경, 고정자 및 회전자 극의 조합, 극 호각, 요크를 산정하고 결정된 파라미터를 FEM을 통한 자계해석과 실험을 통해 실용가능성을 입증하고자 한다.

### 2. 송풍기용 SRM의 설계 조건 및 특성분석

#### 2.1 전동기의 설계조건

\* Corresponding Author : Dept. of Mechatronics Eng., Kyungsung University

E-mail : jwahn@ks.ac.kr

Received : April 28, 2014; Accepted : August 22, 2014

300[W]급 저전압/대전류를 가지는 송풍기용으로 저가형 및 저소음용 SRM의 개발에서 유의할 사항은 기존의 SRM은 고전압/소전류에 대응하여 설계되었다는 것이다. 표 1에서 제한된 전동기의 설계 규격은 입력전압 12[V], 최대전류는 60[A], 정격속도는 5,000[rpm], 효율은 86[%]이다. 낮은 전압과 비교적 높은 전류에서 SRM이 구동되어진다. 그러므로 전압강하가 낮은 저전압/대전류 전용 고효율 인버터와 전동기가 설계되어야 한다.

표 1 송풍기용 저전압형 SRM의 규격  
Table 1 Specification of low voltage SRM for air-blower

Parameter	Value	Parameter	Value
입력전압[V]	12	정격전류[A]	29
정격속도[rpm]	5,000	정격출력[W]	300
목표 효율[%]	86	정격토크[N.m]	0.5

#### 2.2 전동기의 특성분석

송풍기용 SRM의 고정자 및 회전자 극의 조합은 현재까지의 연구결과 4/2, 6/4, 8/6, 12/8 극의 조합이 가장 실용성이 높은 것으로 입증되고 있다[6-7]. 2상 4/2 SRM은 토크가 발생하지 않는 데드존(dead zone) 구간이 존재하고 이에 따라 초기구동이 불가능한 영역이 존재하고 이를 보완하기 위해서는 부가적인 장치나 제어기법이 요구된다.

2상 SRM의 경우 데드존 문제를 해결하기 위해 고정자 및 회전자의 형상 설계 기법이 요구된다. 또한, 짧은 자속 자로(short flux path)를 가지므로 같은 출력대비 높은 이용률을 가지도록 설계된 2상의 4/3과 6/5 극 등의 다양한 극의 조합을 가지는 SRM이 개발되었다[8-15]. 2상의 4/2극의 조합을 가지는 SRM은 스위칭소자가 다른 6/4, 8/6, 12/8에 비해 2개~4개 작게 사용되어 가격경쟁력이 높다. 하지만, 이

와 같은 SRM의 극의 조합은 저전압/고전류에 적합하지 않다. 그 이유는 2상의 경우 한 회전당 스트로크 각이 90°이다. 이에 따른 토크 리플이 높고 평균토크는 6/4, 8/6 및 12/8보다 낮다. 일반적으로 송풍기용 저전압/대전류형 SRM의 경우 토크특성이 우수한 극의 조합을 가지는 SRM이 유리하다. 2상의 4/2의 극의 조합은 속도특성이 우수하므로 20,000rpm이상의 고전압/소전류형 송풍기용으로 유리하다. 한회전당 스트로크 각이 6/4의 경우 30°이고 12/8의 경우 15°이다. 이에 따라 4/2의 극조합보다 토크 리플은 낮고 평균토크는 4/2보다 높다. 6/4극 및 12/8극은 토크특성이 4/2극보다 우수하며, 저전압/대전류에 적용하기에 적합하다. 하지만, 제한된 전류로 인해 각 상에서 발생하는 최대 토크가 고정되어 있다. 제한된 전류에 따라 만족되는 평균 토크를 얻기 위해서는 다른 극 조합보다 평균토크가 높은 8/6극을 가지는 SRM이 적합하다. 이는 4상으로 한 회전당 스트로크 각은 60°로 8/6 극은 상간 토크 리플이 3상의 12/8극보다는 낮지만, 저전압/대전류형에서 평균토크 및 효율은 타 전동기보다 높게 나타나므로 요구되는 출력을 만족할 수 있다고 판단하여 그림 1과 같은 4상 8/6 SRM을 채택하였다.

하지만, 일반적인 전력변환기를 구성할 경우 3상보다 스위치가 2개 증가하고 2상보다 4개 증가하는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 일반적인 비대칭 인버터가 아닌 3상 전동기와 동일하게 스위치를 사용하여 구동력을 얻을 수 있도록 한다.

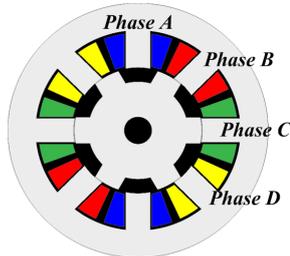


그림 1 제안된 4상 8/6 SRM  
Fig. 1 Proposed 4-phase 8/6 SRM

그림 3은 채택된 4상 8/6 SRM용의 1.5q 스위치 컨버터를 보여준다. 짝수배의 상수를 가지는 전동기에 사용되는 구동회로로서 그림 3과 같이 전동기권선과 연결된다. 상부 스위치 Q12는 두 상에 공통으로 사용되는 구조인데 상권선의 조합에 주의해야 한다. 즉, A상과 C상, B상과 D상의 스위치를 공유하게 된다.

일반적으로 상 A와 C는 전류는 겹치는 일이 거의 없으므로 각 상의 전류를 독립적으로 제어할 수 있다. A/C와 B/D 상의 스위치

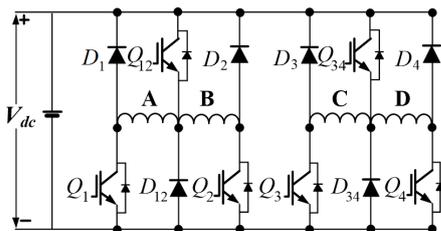


그림 2 4상 8/6 SRM용의 1.5q 컨버터  
Fig. 2 1.5q converter for 4-phase 8/6 SRM

를 공유함으로써 3상 컨버터와 동일한 수의 스위치를 갖는다. 주의할 점은 각 스위치에 흐르는 피크전류 값은 같으나 실효전류 값이 다르기 때문에 각 스위치는 도전손실에 의한 발열이 다르므로 설계시 주의해야 한다.

### 3. 전동기의 설계

제한된 설계에 따라 적합한 극의 조합을 검토하여 채택된 극의 조합은 4상 8/6 SRM이며, 회전자 외경 및 고정자 외경, 스택을 선정하고, 선정된 고정자 및 회전자의 외경, 스택을 기준으로 극호각, 요크, 권선의 수 등을 결정한다. 결정된 파라미터로 FEM를 수행하고, 만족하는 결과 값이 나오도록 파라미터를 조정하며 반복적인 해석을 수행한다.

이 과정을 통해 설계가 완료되며, 설계된 내용을 기반으로 시제품 전동기를 제작한다. 제작된 전동기의 성능을 검증하기 위해 각각의 상 저항 및 인덕턴스를 측정하고 상 저항과 인덕턴스 특성이 설계 값과의 오차 범위 밖이면, 시제품 전동기의 재제작을 고려한다. 이와 같은 과정으로 만족하는 결과 값을 얻었다면, 실험을 통해 전동기의 성능을 평가 한다. 이러한 과정을 그림 4에서 보여준다.

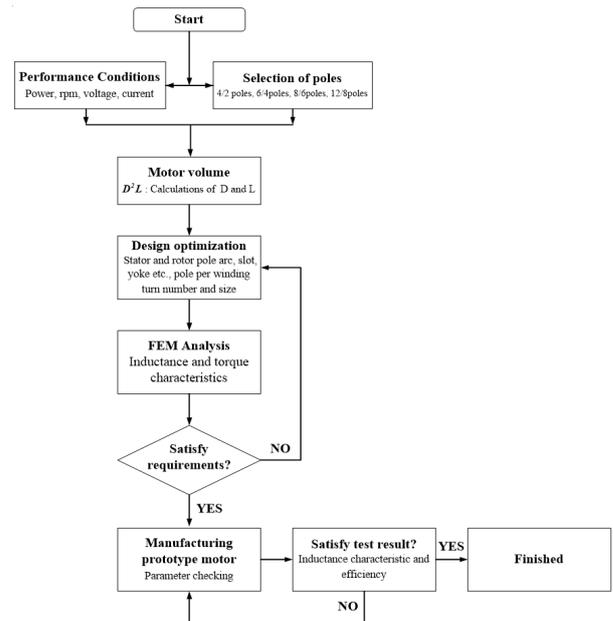


그림 3 설계 및 시험 과정  
Fig. 3 Design and test process

#### 3.1 전동기의 기초설계

제안된 극의 조합은 8극의 고정자와 6극의 회전자를 가지는 4상 SRM이다. 채택된 8/6 SRM의 회전자 외경을 산정하기 위해 토크방정식을 적용한다. 토크방정식은 출력 방정식으로부터 유도되며, 식 (1)과 같다.

$$T = kD_r^2 L_{stk} \tag{1}$$

(여기서,  $T$ : 토크,  $k$ : 출력계수,  $D_r$ : 회전자 외경,  $L_{stk}$ : 스택 길이)

식(1)의 토크방정식으로부터 유도된 회전자 외경은 다음 식(2)에 의해서 산정된다.

$$D_r = \sqrt{\frac{T}{k \cdot L_{stk}}} \tag{2}$$

식(2)에서 회전자 외경을 산정하기 위해서는  $k$ 의 범위를 결정해야 한다. 이  $k$ 의 범위에 대한 범위는 참고문헌[1]을 바탕으로 결정하였다. 그 범위는 표 2에 주어졌으며, 제안된 SRM의 설계에서는 Integral-HP industrial을 선택하여, 그 범위를 결정하였다.

표 2 전동기 형태에 따른 출력계수  $k$ 의 범위

Table 2  $k$  range of output constant according to motor type.

Motor type	$k, N \cdot m/m^3$
Small total-enclosed	2,000~5,500
Integral-HP industrial	5,500~20,000
High performance servo	10,000~40,000
Aerospace	20,000~60,000
Large liquid-cooled	80,000~200,000

산정된 회전자 외경으로부터 전동기의 회전자 및 고정자 극의 수에 따른 비를 식(3)에 의해 고정자 외경이 산정되며, 회전자 및 고정자 극의 수에 따른 비는 표 3 나타내었다.

$$D_s = \frac{D_r}{0.53} \tag{3}$$

표 3 극의 수에 따른 고정자 및 회전자의 비

Table 3 Ratio of stator and rotor according to number of poles

Phase	$N_s$	$N_r$	$D_s/D_r$
3	6	4	0.50
3	12	8	0.57
4	8	6	0.53

고정자 및 회전자 극호각의 설계를 통해 전동기의 자기기동(Self-starting) 및 회전자의 위치에 따른 최소 인덕턴스와 관련하여 퍼미언스, 상호 인덕턴스 등을 최소화해야 한다.

전동기의 견고성, 진동소음과 권선공간 등을 고려하여 식(4)에 의해 고정자 및 회전자 극호각을 산정한다.

$$\beta_r \geq \beta_s \tag{4}$$

(여기서,  $\beta_r$ : 회전자 극호각,  $\beta_s$ : 고정자 극호각)

산정된 회전자 외경과 고정자 및 회전자의 극호각으로부터 극 폭이 다음 식(5)와 (6)에서 산정한다.

$$t_s = 2 \cdot (D_r/2 + g) \cdot \sin \left( \frac{\beta_s}{360} \right) \tag{5}$$

$$t_r = 2 \cdot (D_r/2) \cdot \sin \left( \frac{\beta_r}{360} \right) \tag{6}$$

(여기서,  $t_s$ : 고정자 극의 폭,  $t_r$ : 회전자 극의 폭)

산정된 회전자 및 고정자 극 폭으로부터 회전자 및 고정자 극의 요크는 식(7)과 (8)에 의해서 산정된다.

$$y_s \geq 2.8t_s \tag{7}$$

$$y_r \geq 0.65t_r \tag{8}$$

(여기서,  $y_s$ : 고정자 극의 요크,  $y_r$ : 회전자 극의 요크)

위의 식으로부터 산정된 고정자 및 회전자의 내경/외경, 극호각, 극의 폭, 극의 요크가 기초 산정되었다. 산정된 파라미터들을 최적화 설계를 위해 전용설계 툴을 참조하여 하였다.

### 3.2 전동기의 최적화 설계

기초 설계에서 고정자 및 회전자의 비는 0.53배로 산정하여, 고정자 반경을 얻었지만, 요구 성능의 효율을 만족하기 위해서 회전자의 외경을 23mm로 증가하여, 이에 따른 회전자 및 고정자 비를 0.49배로 결정하였다. 고정자 및 회전자의 자기기동 및 최소 인덕턴스와 퍼미언스, 상호 인덕턴스 등을 최소화하기 위해 고정자 극호각은 22°, 회전자 극호각은 24°로 결정하였다. 설계된 전동기의 상 배치와 외형치수는 그림 5와 같으며, 적층길이는 45mm이다. 이와 같이 결정된 각각의 파라미터의 설계치수를 표 4에 나타내었다.

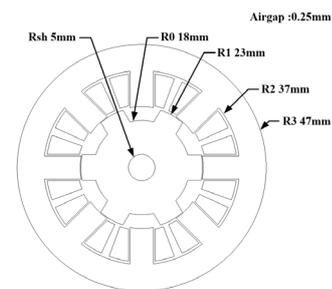


그림 4 설계된 고정자와 회전자의 형상

Fig. 4 Designed stator and rotor

표 4 제안된 4상 8/6 SRM의 설계치수

Table 4 Design value of Proposed 4-phase 8/6 SRM

Parameter	Design value	Unit
Stator radius	47	mm
Rotor radius	23	mm
Stator pole arc	22°	degree
Rotor pole arc	24°	degree
Air-gap	0.25	mm
Stack length	45	mm
Number of turn per pole	14	turn

### 3.3 설계된 전동기의 특성해석

최적화 설계된 치수를 기반으로 FEM 시뮬레이션 수행하였다. FEM의 해석결과 그림 6의 인덕턴스 및 토크 특성을 얻을 수 있었다. 그림 6은 인덕턴스 특성, 7은 토크 특성을 보여준다.

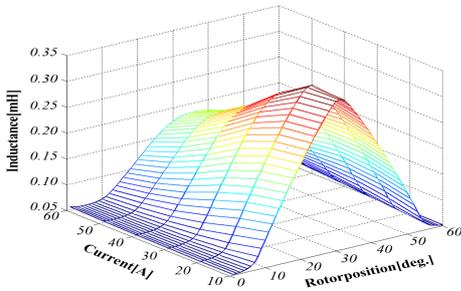


그림 5 4상 8/6SRM의 인덕턴스 특성  
Fig. 5 Inductance characteristic of 4-phase 8/6SRM

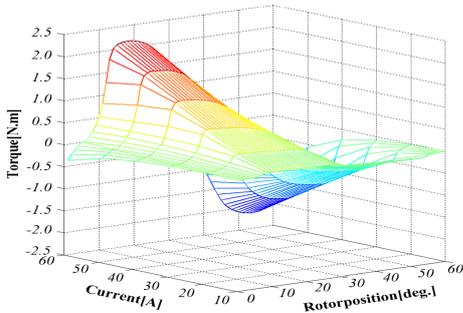


그림 6 4상 8/6SRM의 토크 특성  
Fig. 6 Torque characteristic of 4-phase 8/6SRM

그림 8은 시뮬레이션을 통한 S-T 특성과 효율을 보여준다. 전동기의 정격 속도 5,000rpm에서 정격전류가 29[A]일 때 정격 토크 0.507N.m, 효율 86%의 값을 얻으므로 요구하는 조건을 만족시킬 수 있다.

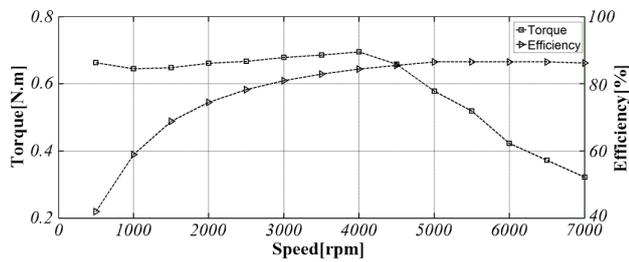


그림 7 속도-토크에 따른 효율곡선  
Fig. 7 Efficiency curve according to speed-torque

### 3. 시작품제작

그림 9는 설계된 송풍기용 SRM의 3D 모델링을 보여준다. 설계된 모델을 기반으로 제작된 시작품은 그림 10에서 보여준다.

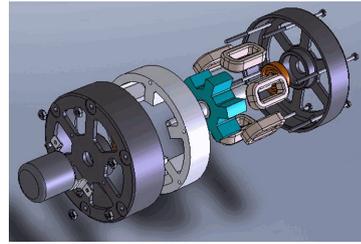


그림 8 3D 모델링  
Fig. 8 3D modeling

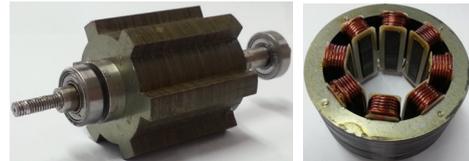


그림 9 제작된 시작품  
Fig. 9 Prototype Motor

## 4. 시작 전동기의 특성해석

### 4.1 시작 전동기의 인덕턴스 측정

제작된 시작 전동기의 측정된 인덕턴스는 그림 11과 같다. 측정된 최대 인덕턴스는 0.172mH이고 최소 인덕턴스는 0.0186mH이다. 이 값은 시뮬레이션에서 얻은 최소 인덕턴스와 최대 인덕턴스와 약 10%의 차이를 보인다. 이 오차는 제작상 발생할 수 있고 이는 허용 가능 범위 내에 있다고 판단된다.

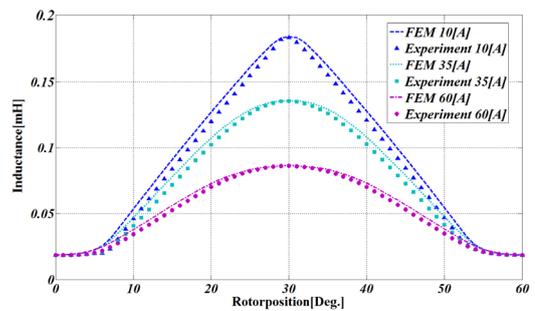


그림 10 측정된 인덕턴스  
Fig. 10 Measured inductance

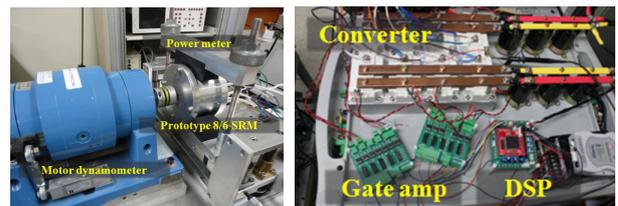


그림 11 시작전동기의 특성시험장치  
Fig. 11 Characteristic test Set-up

### 4.2 4상 8/6 SRM의 구동 실험

그림 12는 부하 실험을 위한 전동기 다이내모미터와 시작 전동기 및 구동용 전력변환기를 보여준다.

시작 전동기에 부착된 엔코더에서 회전자의 위치를 읽어 DSP를 통해 속도를 제어하고 시뮬레이션에서 선정된 턴 온과 턴 오프의 각도를 기준으로 미세 조정을 통하여 정격 속도 5,000rpm에 정격 토크 0.507N.m에서의 전류 파형을 다음 그림 13과 같다.

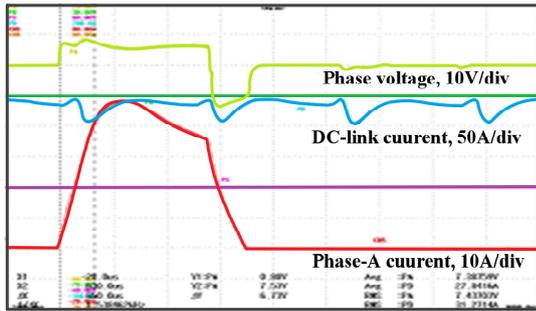
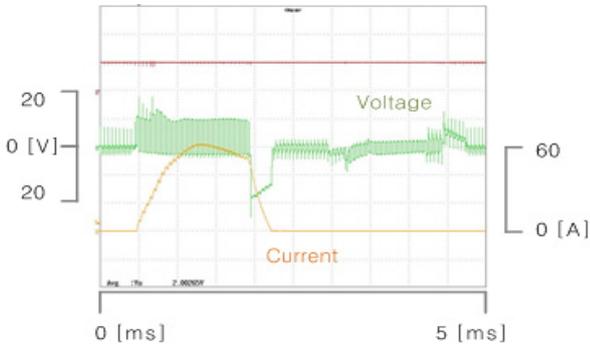


그림 12 특성시험 결과  
Fig. 12 Test Result

구동 시험을 통해 측정된 정격 속도 5,000rpm, 토크 0.507N.m시 효율은 약 83%로 측정되었다.

전동기의 속도별 특성을 확인하기 위해서는 정격속도를



(a) 2,000rpm



(b) 4,000rpm

그림 13 정격 속도 이하에서의 시험 결과  
Fig. 13 Test result under rated speed

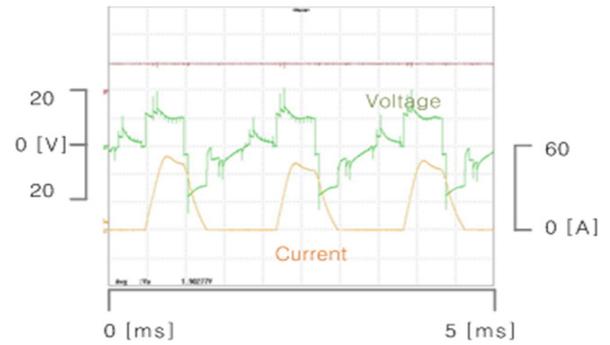


그림 14 정격 속도 이상(6,000 [rpm])에서의 시험 결과  
Fig. 14 Test result over rated speed at 6,000 [rpm]

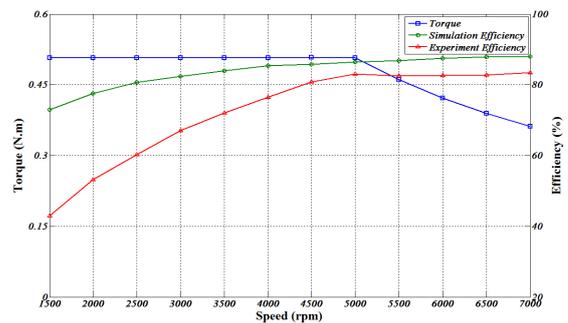


그림 15 시작전동기의 특성시험 결과  
Fig. 15 Test Results of Prototype Motor

기준으로 정격속도 이하에서 정격 토크 0.507N.m를 일정할 때의 정격속도 이상에서 정격전력 300W을 일정할 때의 실험파형은 다음 그림 14과 15에서 나타내고 있다. 그림 16은 속도-토크/속도-효율 곡선으로 전동기의 성능을 보여준다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 송풍기용 SRM을 설계하고 특성 해석과 시작품 평가를 통해 성능을 확인하였다. 시작 전동기의 인덕턴스 값이 설계치와 10% 정도 오차가 있으며, 이는 시작 전동기의 제작에서 발생한 것으로 평가된다. 측정된 전동기 효율 83%는 설계된 효율과 3%의 오차를 가진다. 이는 제작된 전력회로의 불완전과 시뮬레이션에서 포함하지 못한 다양한 손실에 기인된 것으로 허용 가능한 범위이다. 특히 낮은 부하영역에서는 전력회로의 손실이 상대적으로 커서 시작전동기의 측정효율이 낮은 것으로 평가된다. 그러나 전동기의 동작영역인 정격에서 설계목표효율 80%를 상회하여 이 전동기는 송풍기용으로 우수한 성능을 가짐을 확인하였다.

### 감사의 글

이 논문은 2014학년도 경성대학교 학술연구비지원에 의하여 연구되었음.

References

[1] J.W. Ahn and B. C. Kim "Drive Characteristics of Single Phase SRM for Fan Application", Journal of The Korean Institute of Power Electronics, vol. 8, No.5, 2003, pp. 450-454

[2] J.W. Ahn, "Model and Simulation of the Switched Reluctance Motor Drive System", KIEE International Trans. on EMECS, vol. 2, No8, 2002, pp. 201-206

[3] S.H. Lee, D.H. Lee, Y.J. An, J.W. Ahn, "Performance of SR Drive for Hydraulic Pump", Journal of Electrical Engineering & Technology, vol 2, no1, 2007, pp55-60

[4] T.H. Kim, S.H. Lee, J.W. Ahn "Design of High Speed SR drive system for Fuel Pump of Fuel Cell Electric Vehicle" 2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2012 pp. 594-597

[5] D. H. Lee, H. K. M. Khoi, J. W. Ahn, "Design and Analysis of High Speed 4/2 SRMs for an air-blower", IEEE International Symposium Industrial Electronics, pp.1242-1246, July 2010.

[6] R. Krishnan : Switched Reluctance Motor Drives. CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, 2001.

[7] R. Krishnan, R. Arumugan, J. F. Lindsay, "Design Procedure for Switched Reluctance Motors", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 24, 1988, pp. 456-461

[8] D. H. Lee, J. W. Ahn, "A Simple Negative Torque Compensation Scheme for a High Speed Switched Reluctance Motor", Journal of Power Electronics, Vol. 12, No. 1, pp. 58-66, 2012.

[9] J.W. Ahn, "Characteristics Analysis of Short Flux-path 4/3 SRM" Journal of International Conference on Electrical Machines and Systems Vol. 2, No.1, pp.40-44, 2013

[10] M. Tanujaya, Dong-Hee Lee, Jin-Woo Ahn, "Design a Novel Switched Reluctance Motor for Neighborhoods Electric Vehicle", ECCE-Asia, June 2011.

[11] J.W. Ahn, H. K. M. Khoi, D.H. Lee, "Design and analysis of high speed 4/2 SRMs for an air-blower", 2010 IEEE International Symposium on, Industrial Electronics (ISIE), vol., no., pp.1242-1246, 4-7 July 2010.

[12] Tanujaya, M, D. H. Lee, J. W. Ahn, "Characteristic analysis of a Novel 6/5 c-core type three-phase Switched Reluctance Motor", IEEE International Conference of Electrical Machines and System, pp. 1-6, Aug 2011.

[13] D. H. Lee, T. H. Pham and J. W. Ahn, "Design and operation characteristics of four-two pole high-speed SRM for torque ripple reduction," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 9, pp. 3637-3643,

Sep. 2013.

[14] H. K. M. Khoi, J.W. Ahn, D.H. Hee, "Current Control Scheme of High Speed SRM using Low Resolution Encoder", Journal of power Electronics, Vol. 11, No.4, pp. 520-526, 2011.

[15] D.H. Lee, J.W. Ahn, "Performance of High-Speed 4/2 Switched Reluctance Motor, "Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol.6, No. 5, pp. 640-646, 2011.

저 자 소 개



안진우(Jin-Woo Ahn)

1958년생. 1984년 부산대 전기공학과 졸업, 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 경성대 메카트로닉스공학과 교수, Journal of International Conference on Electrical Machines and Systems(JICEMS) 편집위원장, 고령친화 이저라이프 사업단장, BK21<sup>+</sup>고속전동력 메카트로닉스 부품설계고급인력양성 사업단장, IEEE IAS/PELS/IES Korea Jt. Chapter 의장, ICEMS2013, IEEE/ICIT2014, IEEE/ITEC2016 조직위원장, 당학회 이사, 학술위원장(2011, 2013), 현재 전기기기 및 에너지변환시스템 부문회 부회장  
Tel : 051-663-4773  
E-mail : jwahn@ks.ac.kr