

## 자로축소형 스위치드 릴럭턴스 모터의 설계와 측정

김진선  
유한대학 전자정보과

### Design and Measurement of Switched Reluctance Motor with Short Magnet Flux Path

Jinsun Kim  
Dept. of Electronics and Information Engineering

**Abstract** - The classical literature on SR motor design tends to focus on inner-rotor type motor rather than outer-rotor type motor, and does not provide a complete procedure for configuration of outer-rotor type SR motor calculations that are also needed in every SR motors design. It is interested in the design of SR motors by shortening the magnet flux path in the iron core for reducing the iron loss. The 5 phases outer-rotor type SR Motor with short magnet flux path is introduced in this paper. For this the rotor of prototype is designed in U-form with 8 rotor poles that are in 4 U-forms from one another separate constructed.

### 1. 서 론

반도체부품의 저렴화 및 고성능화에 의한 구동회로와 제어회로를 포함한 스위칭 모터인 브러시리스 DC모터(BLDC 모터), 스위치드 릴럭턴스 모터(switched reluctance motor), 스텝모터 등이 차세대 모터로 경쟁력을 확보하며 개발이 활발히 이루어지고 있다. 이러한 스위치드 모터는 고전적인 모터에 비해 특히 1kW이하 급 모터에서 효율 및 제어성능 면에서 월등히 우수하여 기존의 모터를 대체해 나가고 있다.[1] 경쟁력과 특성을 갖는 스위치드 모터 중에서 스위치드 릴럭턴스 모터는 구조적인 면과 제작비관점에서 경쟁력이 있는 모터로서 용도에 따른 모터의 설계개발이 활발히 이루어지고 있는 추세이다.[8]

본 논문을 통하여 소개되어지는 외각회전자형 스위치드 릴럭턴스 모터는 일반적인 스위치드 릴럭턴스 모터 자체의 장점 뿐 만아니라 구조적인 장점인 기계적인 안정도와 고정자 폴에 권선작업이 용이한 제작의 편리성이라는 장점을 추가로 갖는다. 반면에, 외각회전자형 스위치드 릴럭턴스 모터는 고정자 권선이 모터의 내부에 존재하여 고정자에서 발생하는 열의 발산이 외각의 회전자에 의해 방해를 받게 된다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제를 철손 생성의 억제와 냉각효과를 높이기 위한 모터의 새로운 구조설계에 초점을 맞추었으며, 종래의 일체형으로 연결된 회전자 폴의 개념을 떠나 분리된 "U"자형 회전자 폴 쌍의 형태인 10/8의 구조로 설계 하여 자로축소를 구현 하였고, 이를 통하여 열 발생 문제 및 효율의 문제를 개선하였다. 모터의 구동방식은 구조와 연동되는 구동방법으로 1상당 4개의 회전자 폴이 동시에 자화되는 구동방식을 취하였다.[7][9]

### 2. 본 론

#### 2.1 스위치드 릴럭턴스 모터의 인덕턴스 주기

스위치드 릴럭턴스 모터는 회전자의 위치에 따른 자기저항의 변화를 이용한 모터로써 회전자는 항상 그 상태에서 가장 자기저항이 작은 방향으로 힘을 받게 되어 고정자의 자력에 의해 회전된다. 이때 고정자에 유기되는 자력은 구동 회로에 의해 스텝핑 되고 차례대로 각각의 고정자 폴이 전자기력을 갖게 되어 연속적으로 회전자를 회전 시키게 된다.

여기서 중요한 인자인 자기저항은 회전자와 고정자의 매질에 의해서 성질이 정해질 뿐만 아니라 기계적인 설계에 의해서도 영향을 받는다. 회전자가 회전할 때 인덕턴스  $L$ 은 자기저항의 변화에 의해 회전자의 회전각에 따라서  $L_{max}$ 와  $L_{min}$  사이의 값을 연속적으로 갖게 된다.(그림 1)

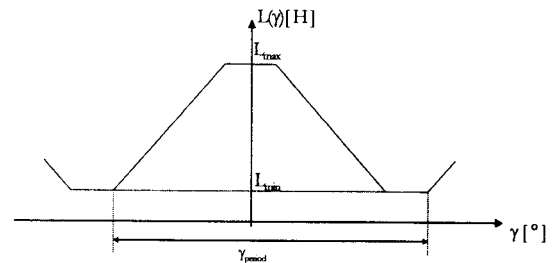


그림 1 회전자 위치에 따른 스위치드 릴럭턴스 모터의 인덕턴스 곡선

Fig. 1 Inductance profile of SR Motor dependent upon rotor position

인덕턴스의 값은 모터의 회전시 회전자와 고정자 폴의 조합에 따라서 위의 그림과 같이 반복이 되며 인덕턴스의 주기는 회전자 폴의 수에 의해 다음의 식(1)와 같이 정해진다.

$$\gamma_{period} = \frac{360^\circ}{N_R} \quad (1)$$

$N_R$  : 회전자 폴 수

스위치드 릴럭턴스 모터의 일반적인 모델은 고정자 폴의 수가 6이고 회전자 폴의 수가 4인 6/4모델이며 회전자의 축이 모터 내부중심에 있고 고정자 폴은 회전자 폴 주위로 바깥 면에 위치하게 된다. 그림 2는 6/4 모델의 단면도를 보여 주고 있다.

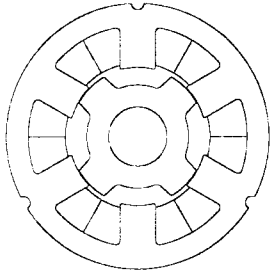


그림 2 회전자가 내부에 있는 일반적 6/4모델 스위치드 릴럭턴스 모터의 단면도  
Fig. 2 Cross-section of typical inner-rotor type 6/4 SR Motor

## 2.2 구조 설계

### 2.2.1 모터의 볼륨

설계 식에는 모터의 기본적인 데이터와 모터의 기계적인 크기와의 사이에 관계식으로 다음의 소위 "Esson's factor"를 통하여 모터의 용량과 볼륨의 관계를 정립 할 수 있다.

$$\frac{P}{\omega} = K^* \cdot R^2 \cdot l_{act} \quad (2)$$

이때 Esson's factor  $K^*$  [ $Nm/m^3$ ]는  $C_L$  과 최대 인덕션  $B_{MAX}$  에 비례한다. Esson's factor  $K^*$ 는 매질에 따라 변화하며 모터의 크기와 온도가 같을 때는 일정한 값을 갖는다.

식 (2) 는 다음과 같이 회전 모멘트와 관련 있는 식으로 변환할 수 있다.

$$T = K^* \cdot R^2 \cdot l_{act} \quad (3)$$

$K^*$ 는 파워 밀도를 상 중 하로 나눌 때 다음의 표 1을 기준으로 factor의 크기에 따라 분류될 수 있다. 본 논문에서 소개되는 프로토타입은 주어진 모터의 볼륨에서 원하는 회전 모멘트의 크기를 확보하기 위하여 에너지밀도를 최소범위의 경계 값인  $K^* = 10800 N/m^2$  으로 선택 하였다.

표 1 파워밀도의 일반적 구분

Table 1 General classification of power density

$K^*$ [ $N/m^2$ ]	파워 밀도
<10800	하
10800 ~ 21700	중
> 21700	상

이때 본 논문에서는 기본적인 값으로 회전 모멘트값인 1.5Nm를 대입하여 계산을 하였다.

$$1,5Nm = 10800 \frac{N}{m^2} \cdot R^2 \cdot l_{act}$$

$$R^2 l_{act} = 1,3855 \cdot 10^{-4} m^3 \quad (4)$$

여기서 표 2의 모터 실효거리  $l_{act}$ 와 모터의 지름  $R_M$ 과의 관계를 제시한 값을 인용하여 스탠더드 범위를 적용 하였다. 이 범위의 적용은 권선을 위한 고정자 슬롯의 최대 공간 확보를 위한 배려도 감안하여 적용되었다.

서보모터	$1 < \frac{l_{act}}{R_M} < 3$
표준모터	$0,25 < \frac{l_{act}}{R_M} < 0,7$

표 2 모터의 유효거리  $l_{act}$ 와 모터의 지름  $R_M$ 의 비율에 따른 모터의 용도구분

Table 2 Classification of motors in rate of active length vs radian of motor

프로토타입에서의 비율은  $l_{act}/R_M = 0.5$ 로 계산되었고 위의 식(4)에 대입하여 고정자의 지름  $R_S = 100mm$ ,  $l_{act} = 50mm$ 로 계산되어진다.

### 2.2.2 인덕턴스 비

$L_{MAX} / L_{MIN}$  의 값은 스위치드 릴럭턴스 모터에서 기본적인 파라미터로 기계적 구조적 특성에 의한  $L(\theta)$  의 기울기에 의해서 스위치드 릴럭턴스 모터의 회전모멘트가 발생되어진다. 최적화된 모멘트의 발생을 위한 해당되는 인덕턴스의 비는 1.5에서 15사이에 존재 하여야하며,[3] 이 값이 증가 할수록 부하각의 흔들림이 커지게 되며, 특히 무부하운전시 더욱 커지게 된다. 또한 인덕턴스의 비는 고정자 폴과 회전자 폴 사이의 거리에 따라 변한다. 이 두 폴 사이의 거리 관계는 다시 회전자의 지름과 폴의 넓이와 관계가 있다. 언얼라인드 위치에서 측정된 값인  $L_{MIN}$ 는 회전자의 지름과 관계없이 고정자각과 회전자의 각에 의해서만 정해진다. 이에 반해서 얼라인드 위치에서 측정된 값인  $L_{MAX}$ 는 회전자 폴의 넓이과 고정자 폴의 넓이에 의해 정해진다. 이때 이 폴의 넓이는 모터의 지름이 커질수록 넓어지며, 외각회전자형 스위치드 릴럭턴스 모터의 경우 회전자와 고정자가 바뀌어 짐으로 권선의 공간 확보뿐만 아니라 인덕턴스 비의 충분한 확보를 위하여 고정자의 지름은 가능한 최대치에 가깝게 설계 되어져야 한다.

### 2.2.3 상수, 폴 수, 폴 각, 폴 넓이

모터의 기본적인 설계의 방향 정립을 위하여 상수

, 상 수와 회전자 폴 수와 관계, 고정자 폴 수와 최적화된 회전자 폴의 각과 고정자 폴각의 관계 등이 먼저 다루어지어야 한다.

위의 설계를 위한 기본적인 의문에는 스스로 회전을 시작할 수 있는 능력, 최적화된 인덕턴스의 비, 낮은 모멘트의 리플 등이 다루어지어야 한다. 자력회전 스위치드 릴럭턴스 모터는 일반적으로 3-상이 최소의 단위이며 이경우의 가장 일반적인 구조가 6/4 스위치드 릴럭턴스M이다. 자력회전의 경우 기계적인 구조만이 중요한 것이 아니라 전기적인 값도 고려되어야하며, 다음은 기계적인 구조와 전기적인 인자와의 관계를 다루었다. 상 수를 먼저 정하고 모터 전체의 크기를 감안한 폴의 수를 정했을 때 그에 따른 구동 시 1회전 당 스위칭의 횟수가 다음의 식으로 정하여 진다.

$$\frac{N_s}{\text{Rotation}} = N_{Ph} \cdot N_R \quad (2.5)$$

스위칭 각은

$$\theta_i = \frac{2\pi}{N_{Ph} \cdot N_R} \quad (2.6)$$

스위치드 릴럭턴스 모터는 원칙적으로 임의의 상 수를 갖을 수 있으나 자력회전을 위한 일반적 상 수의 최소 값은 3이며, 여기서 상의 수가 증가 할수록 스위칭 수가 증가 하고, 이때 지름이 같은 모터에서 인덕턴스의 비  $L_{MAX}/L_{MIN}$ 이 감소함을 알 수 있다. 이 상 수의 증가에 따른 스위칭 주파수의 증가는 인버터에 많은 부하를 주게 되고, 특히 전력반도체의 부하가 증가 된다. 이 스위칭 주파수는 인버터의 손실과 철손의 주 원인이 되며 이 철손의 주 원인이 되는 스위칭 주파수와와의 관계식은 다음의 식으로 계산되어 질 수 있다.

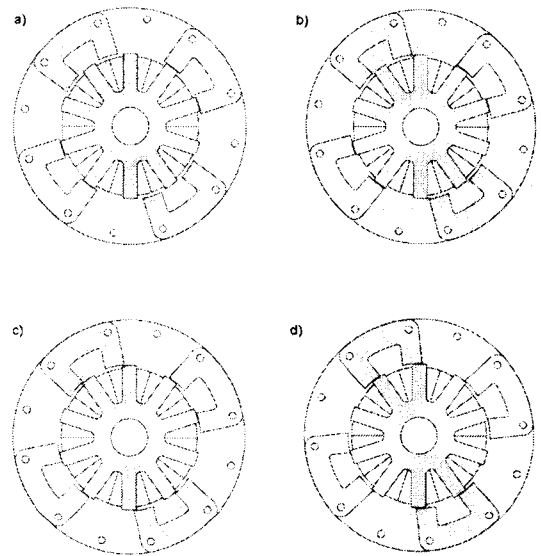
$$f = \frac{N_s \cdot N_{Ph} \cdot n}{60} \quad (2.7)$$

이때  $N_s$  = 스위치 횟수,  $N_{ph}$  = 상 수,  $n$  = 회전수,  $f$  = 스위치 주파수 이다.

### 2.3 5 상 외각회전자형 스위치드 릴럭턴스 모터 설계

본 논문을 통하여 소개되는 프로토타입의 볼륨은 회전 모멘트 목표치인 1.5Nm에 맞추어 결정되었고, U자형 회전자의 도입과 1상당 2개조의 고정자 폴을 자화시키기 위하여 4개의 고정자 폴에 동시에 전류를 흘리는 구동방식을 사용하였다. 이때 고정자 폴의 이용율이 40%, 회전자 폴의 이용율이 50%가

되도록 설계되었으며, 모터의 운전시 자력선이 해당 고정자 폴과 회전자 폴에만 발생되게 되어 기존의 일체형 회전자 폴 방식의 경우 전체 회전자 core에 자력선이 생성되었을 때와 달리, 자력선에 의한 철손을 감소시킬 수 있다. U자형 회전자 폴은 분리 조립되어 폴 사이의 공간이 확보되어 고정자에서 구리손, 철손, 와류손에 의해 발생하는 열이 방출되며 또한 회전 시 공냉효과를 기대 할 수 있다.(그림 9) 모터의 기대 회전 모멘트 및 회전에 대한 설계의 타당성을 검토 하기위하여 FEM(finite element methode)으로 회전자의 회전각에 따른 자기력선을 나타내었으며 이때 전류의 값은 10A로 하였고 이의 결과 값은 철심의 자화곡선에 이용되었다.(그림 3)



a)  $\theta = -18^\circ$ , b)  $\theta = -14^\circ$ , c)  $\theta = -10^\circ$ , d)  $\theta = -6^\circ$   
그림 3 회전자의 회전에 따른 자력선변화 ( $I_{eff}=10A$  일때 FEM결과)

Fig. 3 Variation of magnet flux path within rotation of rotor

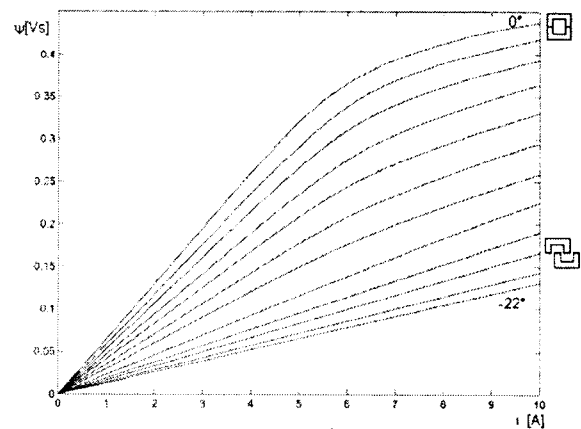


그림 4  $\psi$ -i 곡선,  $\theta = \{0^\circ, -2^\circ, -4^\circ, \dots, -22^\circ\}$   
Fig.  $\psi$ -i characteristic,  $\theta = \{0^\circ, -2^\circ, -4^\circ, \dots, -22^\circ\}$

## 2.4 구동 방법

10개의 고정자 폴중 매 상 마다 4개의 폴이 방사형 대칭인 2개의 조를 이루어 자화가 되며, 자화가 되는 고정자 폴의 조합은 회전방향에 따라 다음의 표 3 와 같다.

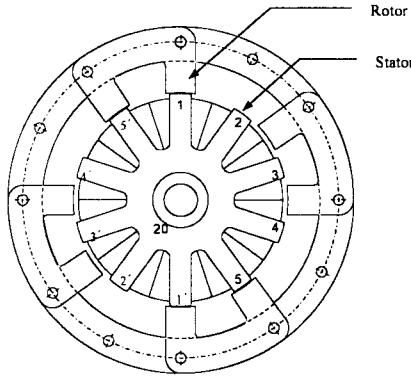


그림 5 U자형 회전자 폴을 가진 외각회전자형 10/8 스위치드 릴럭턴스 모터의 단면도

Fig. 5 Cross-section of outer-rotor type 10/8 스위치드 릴럭턴스 Motor with U-rotor 폴

표 3 양방향 회전을 위한 고정자 폴 조합 및 스위칭 순서

Table 3 stator pole switching sequence and pole combination for bi-rotation

회전방향	고정자 폴 switching 순서
오른쪽	3-4-3'-4', 1-2-1'-2', 4-5-4'-5', 2-3-2'-3', 5-1-5'-1'
왼쪽	2-3-2'-3', 4-5-4'-5', 1-2-1'-2', 3-4-3'-4', 5-1-5'-1'

프로토 타입의 회전자 위치의 인식을 위하여 광센서인 SFH900 소자를 사용하여 특정위치의 회전자 위치만을 선택적으로 사용하였다. 이를 위하여 회전자에 반사경을 부착하여 SFH900이 이 반사경과 만날 때 마다 신호를 보내어 스위치 하였다. SFH900에서 나오는 신호는 로직 회로를 통하여 표 3과 같이 로터의 회전 방향에 따른 스위칭 조합을 만들어 IR2110 소자를 통해 전력반도체를 스위칭 하여 다음의 그림 5와 같이 회전자의 회전각과 동기화된 전류의 흐름을 만들어 내었다.

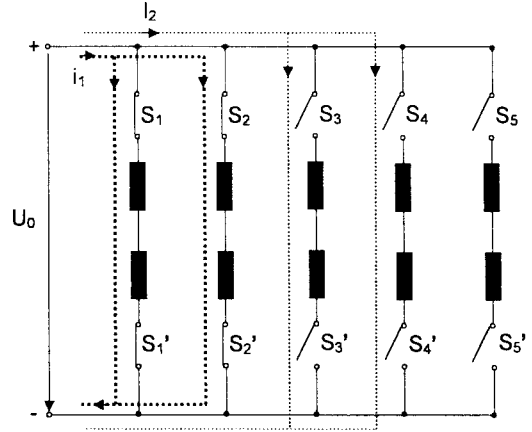


그림 6 고정자 폴 스위칭 조합에 의한 전류의 흐름도

Fig. 6 Current in the schematic circuit with stator pole switching combination

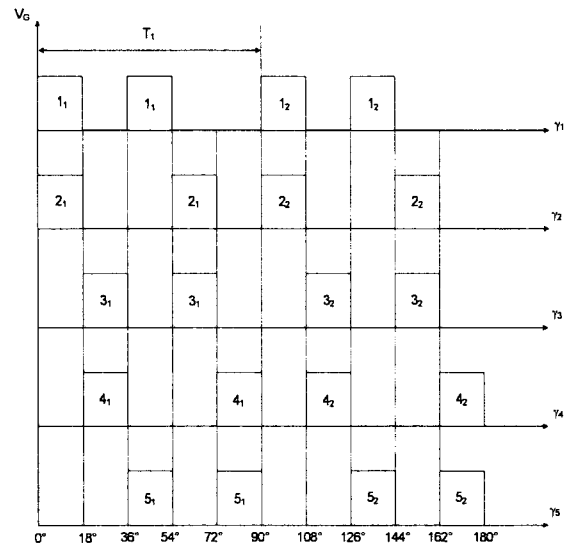


그림 6 컨트롤 전압의 흐름도  
Fig. 6 Switched control voltage

## 2.5 측정

아래의 표4는 프로토타입 모터의 사양을 나타낸다. 모터의 지름은 외각회전자의 바깥원의 지름이고 모터의 길이는 스테이터의 두께와 같다.

표 4 프로토 타입의 기계적 및 전기적 데이터

Table 4 mechanical and electrical data of prototype

최대 측정 출력	2kW
최대 측정 속도	2150rpm
모터 지름(active)	296mm
모터 길이(active)	120mm
상 수	5
고정자 폴 수	10
회전자 폴 수	8

설계된 프로토타입 모터는 입력전압을 200V 까지 증가시키면서 속도와 부하의 증가에 따른 전류를 측정하였다.

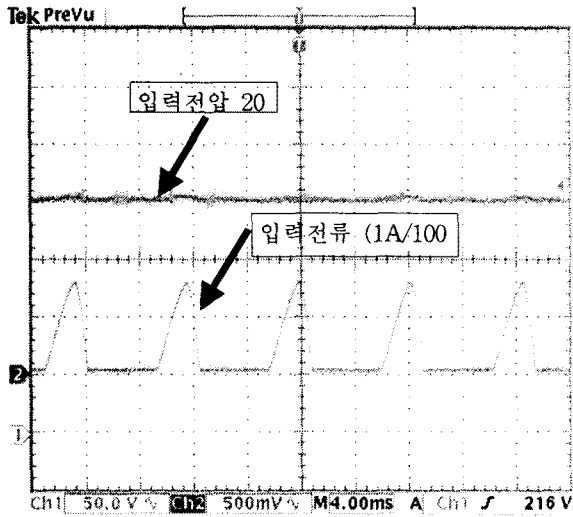


그림7 입력전류파형(입력전압 200V, 속도 2170rpm)  
Fig. 7 input current curve (input voltage 200V, rot. 2170rpm)

그림7은 입력전압 200V 일때 입력되는 전류 곡선을 측정한것이다. 이때의 회전속도는 2170rpm 으로 측정되었다.

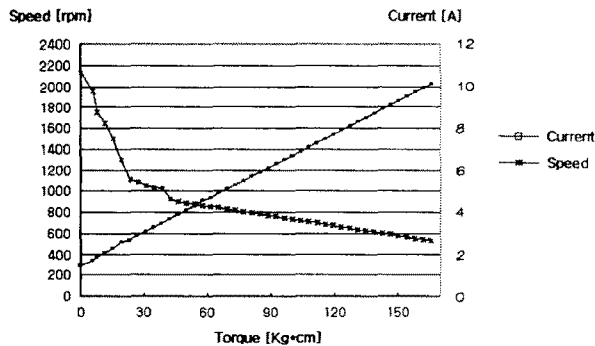


그림8 입력전압 200V에서 토크, 전류, 회전속도  
Fig. 8 Torque, current, revolution curve at input voltage 200V

그림 8은 입력전압을 200V로 고정 시킨 상태에서 먼저 무부하 속도를 측정하였고, 부하토크를 0.4Nm 간격으로 증가시키면서 전류값과 회전속도를 측정하여 토크, 전류, 회전속도 곡선을 구한 것이다. 이때 전류는 부하의 증가에 따라 선형적으로 증가 하였으며, 입력전류 10.1A 까지 측정 하였다. 회전속도는 부하의 증가에 따라 처음 5Nm 이하까지는 급하게 줄어들다가 6Nm 이후부터 점차 기울기가 완만해 졌다. 부하 16.6Nm 일때 입력전류 값 10.1A에 따른 목표 출력 값 2KW가 측정되었다.

프로토타입 모터의 효율은 정격회전수에서 부하 모멘트  $M_L$  에 의한 개별계산법에 의해 정해질 수 있다. 모터의 회전속도  $N=1200\text{rpm}$  일 때 토크 값 3Nm을 아래의 식에 적용 계산 하여  $\eta = 84\%$  의 값을 얻었다.

$$\eta = \frac{P_{\text{출력}}}{P_{\text{입력}}} * 100\% = \frac{P_{\text{출력}}}{P_{\text{손실}} + P_{\text{출력}}} * 100\%$$

$$P_{\text{손실}} = P_{Fe} + P_r + R * I^2$$

$$P_{\text{출력}} = M_L * \omega$$

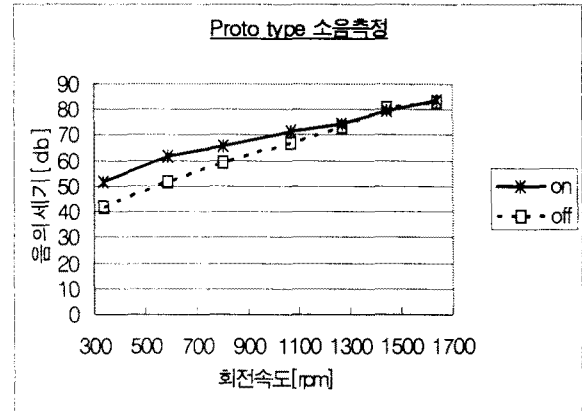


그림 9 회전속도 대비 음의 세기 비교  
Fig. 9 rotation vs. sound noise

소음의 측정은 그림 9의 측정 결과와 같이 속도가 증가할수록 음의 세기는 높아졌다. 낮은 속도에서 전압을 가할 때의 음의 세기와 전압=0V일때의 음의 세기는 약 10db의 차이를 보이며 속도가 증가 할수록 두 곡선의 차이는 줄어들어 1700rpm 부근에서는 약 80db로 같았다.

전류의 흐름전환 또는 코깅토크에 의한 소음은 저속에서 10db정도로 나타났으며, 고속으로 갈수록 전원의 유무에 따른 소음의 차이가 사라짐은 전압의 증가로 인한 소음의 추가 발생이 없음을 알 수 있다. 속도에 비례하여 증가하는 음의 세기는 기계적인 소음으로 1000rpm 증가 시 약 40db정도 기계적인 소음이 발생하였다.

### 3. 결 론

자로축소 구현을 위한 아이디어 도출과 각각의 값 결정을 위한 방법을 도입하여 회전자 풀이 U자형으로 설계된 외각회전자형 스위치드 릴럭턴스 모터가 설계되었고, 모터볼륨의 결정을 위하여서는 Esson's factor의 범위와 모터의 기본 범위를 기준으로 정하였다. 나머지 크기의 결정은 자력회전, 고정자 슬롯의 최대면적확보, 낮은 모멘트 리플 등을 기준으로 하여 설정되었다. 설계된 모터는 FEM으로 회전모멘트의 적정성과 구동방식의 타당성이 검토되어, 고정자 풀 수가 10, U자형 회전자 풀 쌍의 수가 4개인 형식으로 설계되어졌다. 이때 U자형 회전자 풀은 사이에 공간을 두어 고정자 코어에서 발생되

는 열 방출이 용이하게 설계되었으며, 구동방식은 4개의 고정자 폴이 동시에 자화되도록 하여 코어 이용율이 2/5로 운전하고 축소된 자로를 형성시켰다.

[참 고 문 헌]

- [1] 2002년도 소형모터 산업현황조사 보고서. 중소기업진흥공단 2002/11
- [2] Amin,B., : Structure of High Performance Switched Reluctance Machines and their Power Feeding Circuitries. ETEP Vol.2, No.4, July/August 1992, pp 215- 221
- [3] Rabinovici, R. : Scaling of switched reluctance motors. IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 142, No. 1, January 1995 pp 1-4
- [4] Radun, A.V. : Design Considerations for the Switched Reluctance motor. IEEE Transactions on industry applications, Vol. 31, No. 5, September/October 1995 pp 1079-1087
- [5] Becerra, Roger C., Ehsani, M., Miller, T.J.E. : Commutation of SR Motors. IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 8, No. 3, July 1993 pp 257-263
- [6] Stiebler,M., Liu,K. : Closed-loop Control of a Switched Reluctance Generator. PEMC '96, Vol. 3, , Sept. 1996, Budapest pp 229-233
- [7] Krishnan,R., Arumugam,R., Lindsay,J.F. : Design Procedure for Switched-Reluctance Motors. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 24, No. 3, May/June 1998 pp 456-460
- [8] Draheim, I. : Theoretische und experimentelle Untersuchungen an geschalteten Reluktanzmotoren unter besonderer Berücksichtigung einer Markt- und Potentialanalyse. Diss., TU Berlin, 1998
- [9] Hendershot, J.R. : Short Flux Paths Cool SR Motors. Machine Design, September 21, 1989 pp 106-111
- [10] Jänike, L. : Finite Elemente Methode mit adaptiver Netzgenerierung für die Berechnung dreidimensionaler elektromagnetischer Felder. Diss., TU Berlin, 1994
- [11] Knauer, R. : SFH900, eine preisgünstige Miniatur-Reflexlichtschranke , Siemens Componentes 21, Heft 6, 1983, pp 229-234
- [12] Gutt, H.-J. : Reluktanzmotoren kleiner Leistung, etz Archiv, Bd. 10, H. 11, 1988, pp 345-354