

## 자기회로 해석을 통한 SRM의 인덕턴스 산정에 관한 연구

최경호\*, 김동희\*\*, 김민회\*\*\*

\*경북전문대학, \*\*영남대학교, \*\*\*영남이공대학

### A Study on the Inductance Calculation of SRM using Magnetic Circuit Analysis

Kyeong-Ho Choi\*, Dong-Hee Kim\*\*, Min-Huei Kim\*\*\*,

\*Kyungbuk College, \*\*Yeungnam University, \*\*\*Yeungnam College of Sci. & Tech.

#### ABSTRACT

This paper present a inductance calculation method of Switched Reluctance Motor (SRM) for torque characteristic analysis using analytical model. Recently, many approaches of inductance calculations are accomplished with Finite Element Analysis (FEM) and curve fitting method using complex nonlinear magnetic circuit model. In this paper, a simple method for inductance calculation is proposed based on the motor design parameters. The simulation result of the proposed method are compared with a FEM analysis result for , and a good accuracy is obtained.

#### 1. 서 론

전력전자 분야의 전력용 스위칭 소자의 개발 및 전자회로 분야의 눈부신 발전으로 고성능 제어방식이 실현됨에 따라 전동기 부분에서도 고성능 및 고효율이 가능하게 됨으로서 기존의 상용전동기에 대응한 새로운 전동기의 개발이 활발히 연구되고 있다. 특히, 직류전동기의 가장 큰 단점인 브러쉬를 사용하지 않고 영구자석을 이용한 브러쉬 없는 직류전동기와 가변속이 용이한 인버터-유도전동기 시스템 등이 대표적인 것이라 할 수 있다. 그러나 이러한 새로운 전동기의 개발로 인한 가격의 상승 및 제작의 어려움으로 실제 사용자에게는 큰 경제적인 부담을 주게 되었다. 따라서 이러한 단점을 보완하고 고성능 및 고효율의 장점을 가진 스위치드 릴럭턴스 전동기 (Switched Reluctance Motor, SRM)가 집중적으로 연구되고 있다. SRM은 고정자와 회전자 모두가 돌극형 구조로 되어 있으며, 각기 다른 갯수의 극을 가진다. 특히, 고정자 부분에만 권선이 감겨져 있고 회전자 부분에는 어떠한 형태의 권선이나 영구자석도 존재하지 않는 간단한

구조를 가지는 것이 SRM의 가장 큰 특징으로 볼 수 있다. 이러한 구조적 장점으로 인한 제작비용 절감의 효과와 기능상의 우수성으로 인하여 전반적인 산업분야에서 응용이 기대되고 있다. 최근에는 보다 효과적인 SRM의 적용을 위하여 전동기의 최적 설계 및 제어를 위해서 FEM 해석에서부터 복잡한 비선형 자기회로 해석에 이르기까지 다양한 방법이 시도되고 있다. 그러나 FEM을 이용한 방법은 상당한 시간적 소요와 모델 변형에 따른 재해석이 수행되어야 한다. 또한 자화곡선을 해석하기 위한 피팅계수법도 정확한 자화특성을 얻기 위해서 FEM 해석이나 실제 측정으로 얻은 인덕턴스나 쇠교자속을 필요로 한다<sup>[1][2][3]</sup>.

본 연구에서는 SRM의 인덕턴스를 전동기 설계시 얻어지는 치수만으로 간단하게 산정 할 수 있는 모델과 계산 방법을 제시하였다. 따라서 FEM해석으로 인한 시간의 절약과 직접 측정으로 인한 번거러움을 피하였다. 제시된 방법은 SRM의 각상이 독립적이므로 회전자의 위치와 권선전류에 의해서 자속이 쇠교되는 기본 원리를 이용하여, 회전자와 고정자가 접치는 시점에서 정렬상태까지의 자기회로 분석을 통하여 인덕턴스 변화를 계산하는 방법이다. 계산된 결과와 특성 해석법을 검증하기 위하여 FEM을 이용한 결과 및 측정된 결과와 비교 분석하였다. 또한 SRM의 구조를 간이화하여 구한 인덕턴스를 적용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 이를 통해 전동기의 특성을 각각 비교하여 제시된 방식의 실용성을 입증하였다.

#### 2. 인덕턴스 산정

인덕턴스 계산은 세 가지 방법으로 구하였다. 먼저 본 논문에서 제시한 간단한 기계적인 치수만으로 계산하는 방법으로 Mathcad 프로그램을 활용하여 구하였으며, 두 번째는 상용 자계해석 프로그램인 Flux-2D를 이용하여 계산하였다. 세 번째는 SRM의 회전자를 회전각에 따라

고정시킨 후 전류변화에 따른 인덕턴스를 산정하였다.

표 1의 기계적인 제원은 본 연구의 인덕턴스 계산을 위해 연구 제작된 전동기의 사양을 나타내고 있다. 전기적 사양은 3상 6/4극 300[V], 750[W], 3000[rpm]의 정격을 가지는 SRM이다.

표 1 SR 전동기의 제원 (단위 mm)  
Table 1 Specification of SR Motor

명칭	치수	명칭	치수
축경	7.5	고정자 외부 반경	46
회전자 외부 반경	200	고정자 내부 반경	58
회전자 내부 반경	287	고정자 극호	30
회전자 극호	32	극수	6
극수	4	공극	0.3
상수	3	Steel	S-18
철심장 길이	57	슬롯단면적	410mm <sup>2</sup>

### 2.1 계산에 의한 인덕턴스 산정

SRM은 한 상 권선의 전류와 회전자의 위치에서만 자속쇄교가 일어나는 것을 우선적으로 고려하였다<sup>[4]</sup>. 인덕턴스 계산은 고정자와 회전자가 중첩이 일어나는 시점부터 정렬까지 계산하였으며, 고정자 권선의 앤드턴 효과를 무시한 2차원으로 해석하였다. 구조는 사각형 구조로 간이화하여 나타내었으며, 그림 1은 해석을 위한 6/4극 SRM구조를 나타내고 있다.

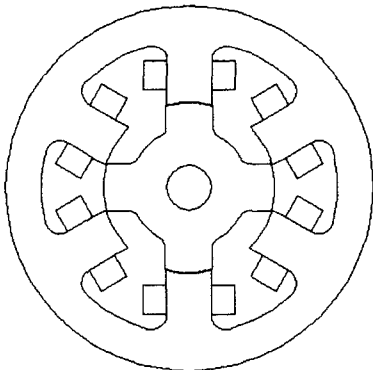


그림 1 해석을 위한 SRM 모델  
Fig. 1 SRM model for analysis

그림 2는 쇄교자속을 계산하기 위한 간략화된 구조를 보여주고 있다. 쇄교자속 계산은 암페어의 법칙을 사용하여 회전자 요크와 고정자 요크가 겹치기 시작한 상태에서 두 부분으로 나누어서 계산하였다. 즉, 프린징 현상에 의해 발생하는 쇄교자속  $\lambda_f$ 와, 회전자와 고정자 두 극에 직접적으로 쇄교되는  $\lambda_m$ 을 각각 계산하여 전체 자속을 구하였다. 그림 2에서  $n_{ser}$ 은 한 상에서 직렬회로 수,  $N_p$ 는 권선의 턴수,  $l_{stk}$ 는 철심장의 길이,  $B_f$ 와  $B_m$ 은 각각 공극과 철심에서 자속 밀도를 나타내고 있다.

그림 2와 같이 고정자와 회전자의 요크가 겹쳤을 때, 폐경로의 자속을 암페어 법칙을 적용하여 식(1)과 (2)를 얻을 수 있다<sup>[5]</sup>.

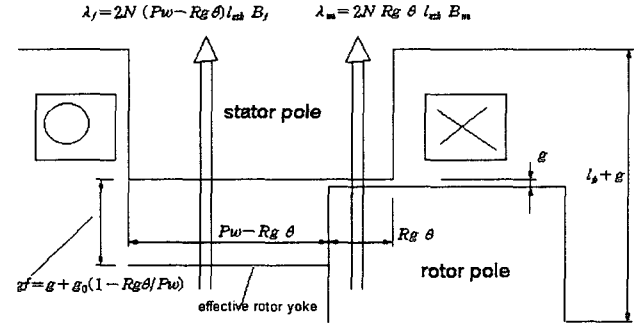


그림 2 고정자와 회전자가 겹칠 때 자속쇄교  
Fig. 2 Flux linked when the rotor and stator poles overlap

$$H_{Fe,m} \cdot 2 \cdot l_p + H_{g,m} \cdot 2 \cdot g = 2N_p \cdot I_p \quad (1)$$

$$H_{Fe,f} \cdot 2 \cdot l_p + H_{g,f} \cdot 2 \cdot g_f = 2N_p \cdot I_p \quad (2)$$

여기서,  $H_{Fe,m}$ 은 코어에서 자계의 세기,  $H_{g,m}$ 은 공극에서 자계의 세기이며,  $l_p$ 는 회전자와 고정자의 전체 길이,  $g$ 는 에어갭,  $I_p$ 는 상전류를 나타낸다.

주 자속밀도를 구하기 위해서는 주어진 일정한 폴의 단면적에 대한 밀도임으로 공극에서의 자속밀도와 철심의 자속밀도는 같다고 볼 수 있다. 마찬가지로 풀린정형상에 의한 자속밀도를 구할 때도 같은 방법이 적용된다. B와 H의 관계는 매질의 특성에 의해서 정해진다. 공극에서의 주자속밀도  $B_m$ 은 식 (3)으로, 요크에서 주자속 밀도는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$B_m = \mu_0 H_{g,m} \quad (3)$$

$$B_m = \frac{\mu H_{Fe,m}}{1 + \frac{\mu |H_{Fe,m}|}{B_{sat}}} + \mu_0 H_{Fe,m} \quad (4)$$

여기서,  $\mu$ 와  $B_{sat}$ 는 매질에 의해서 결정되어지는 상수이다. 식(3)은  $H_{g,m} = B_m / \mu_0$  이므로, 식(1)에 대입하면 식(5)와 (6)과 같이 나타낼 수 있으며, 다시 식(6)을 식(4)에 대입하면 식(7)과 같이  $B_m$ 을 나타낼 수 있으며,  $B_m$ 을 풀면 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_{Fe,m} \cdot l_p + \frac{B_m}{\mu_0} g = N_p I_p \quad (5)$$

$$H_{Fe,m} = \frac{N_p I_p}{l_p} - \frac{B_m}{\mu_0} \frac{g}{l_p} \quad (6)$$

$$B_m = \frac{\mu \left( \frac{N_p I_p}{l_p} - \frac{B_m g}{\mu_0 l_p} \right)}{1 + \frac{\mu \left( \frac{N_p I_p}{l_p} - \frac{B_m g}{\mu_0 l_p} \right)}{B_{sat}}} + \mu_0 \left( \frac{N_p I_p}{l_p} - \frac{B_m g}{\mu_0 l_p} \right) \quad (7)$$

$$B_m(\theta, I_p) = \frac{\mu_0 N_p}{2(1 + \frac{g}{l_p})g} \left[ \left(1 + \frac{2g}{l_p}\right) I_p + \frac{l_{m1} B_{sat}}{\mu N_p} - \sqrt{\left(\frac{l_{m1} B_{sat}}{\mu N_p}\right)^2 + \frac{2l_{m2} B_{sat}}{\mu N_p} I_p + I_p^2} \right] \quad (8)$$

여기서,  $l_{m1} = l_p + (\mu_r + 1)g$ ,  $l_{m2} = l_p - (\mu_r - 1)g$ 이다. 그림 2에서 나타낸 쇄교자속을 구하기 위한 두 식  $\lambda_f = 2N(Pw - Rg\theta)l_{stk} \cdot B_f$ ,  $\lambda_m = 2N \cdot Rg \cdot \theta \cdot l_{stk} \cdot B_m$  은 B field를 구함으로써 얻어질 수 있다. 권선의 병렬회로수  $n_{ser}$ 을 고려하여 쇄교자속을 구하면 다음 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_m(\theta, I_\phi) = \lambda_0 \frac{R_g \theta}{(1 + \frac{g}{l_p})g} \left[ \left(1 + \frac{2g}{l_p}\right) \frac{I_\phi}{n_{par}} + \frac{l_{m1} B_{sat}}{\mu N_p} - \sqrt{\left(\frac{l_{m1} B_{sat}}{\mu N_p}\right)^2 + \frac{2l_{m2} B_{sat}}{\mu N_p} \frac{I_\phi}{n_{par}} + \left(\frac{I_\phi}{n_{par}}\right)^2} \right] \quad (9)$$

여기서,  $\lambda_0 = n_{ser} \cdot \mu_0 \cdot \frac{N_p}{2} \cdot l_{stk} \cdot s_{tf}$ ,  $s_{tf}$  는 코어의 점적률을 나타내며,  $\theta$ 는 고정자 코어와 회전자 코어가 겹치기 시작하는 부분을  $0^\circ$ 로 하였다. 프린징 현상에 의한 쇄교자속  $\lambda_f = 2N(Pw - Rg\theta)l_{stk} B_f$  은 같은 방법으로 구할 수 있다.

$$\lambda_f(\theta, I_\phi) = \lambda_0 \frac{Pw - Rg\theta}{g_f} \left[ \left(1 + \frac{2g_f}{l_p}\right) \frac{I_\phi}{n_{par}} + \frac{l_{f1} B_{sat}}{\mu N_p} - \sqrt{\left(\frac{l_{f1} B_{sat}}{\mu N_p}\right)^2 + \frac{2l_{f2} B_{sat}}{\mu N_p} \frac{I_\phi}{n_{par}} + \left(\frac{I_\phi}{n_{par}}\right)^2} \right] \quad (10)$$

여기서,  $g_f(\theta) = g + g_0 \left(1 + \frac{R_g \theta}{P_w}\right)$ ,

$$l_{f1} = l_p + (\mu_r + 1)g_f, \quad l_{f2} = l_p - (\mu_r - 1)g_f$$

$$g_0 = \frac{n_{ser}}{n_{par}} \mu_0 N_p^2 \frac{l_{stk} \cdot s_{tf} \cdot P_w}{L_{po}} - g \text{ 이다.}$$

따라서 전체 SRM의 쇄교 자속은 주 자속과 플린징 현상에 의한 자속의 합으로 식(11)로 나타낼 수 있다.

$$\lambda_\phi(\theta, I_\phi) = \lambda_m(\theta, I_\phi) + \lambda_f(\theta, I_\phi) \quad (11)$$

SRM의 전기적인 전압방정식은 식 (12)와 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_\phi = \frac{d\lambda_\phi(\theta, I_\phi)}{dt} = \frac{\partial \lambda_\phi(\theta, I_\phi)}{\partial I_\phi} \frac{dI_\phi}{dt} + \frac{\partial \lambda_\phi(\theta, I_\phi)}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (12)$$

$$V_\phi = L_\phi(\theta, I_\phi) \frac{dI_\phi}{dt} + K_\phi(\theta, I_\phi) \cdot \omega_m \quad (13)$$

여기서,  $\omega_m = \frac{d\theta}{dt}$  로 회전자의 기계적인 속도를 나타낸다. 식 (13)에서 상 인덕턴스는 식 (14)와 같이 구할 수 있다.

$$L_\phi(\theta, I_\phi) = \frac{\partial \lambda_\phi(\theta, I_\phi)}{\partial I_\phi} = \frac{\partial \lambda_m(\theta, I_\phi)}{\partial I_\phi} + \frac{\partial \lambda_f(\theta, I_\phi)}{\partial I_\phi} \quad (14)$$

그림 3은 1[Hp], 6/4극 SRM을 모델로 하여 위에서 주어진 식을 이용하여 인덕턴스를 계산한 값으로서 회전자의 회전각과 전류에 따른 인덕턴스를 나타내고 있다.

## 2.2 FEM에 의한 인덕턴스 산정

SRM의 운전특성을 고려하여 인덕턴스의 계산은 전류를 0.4[A]에서 5.2[A]까지 0.4 스텝으로 설정하였다<sup>[6]</sup>. 자체해석은 상용프로그램을 이용하였으며, 각각의 회전자를 1도씩 이동 시켜 비정렬에서 정렬까지 수행하였다.

그림 4는 회전자의 회전각에 따른 각각의 전류에서 인덕턴스의 파형을 나타내고 있다.

## 2.3 측정에 의한 인덕턴스 산정

SRM의 인덕턴스 측정은 AC전원을 인가하여 식(15)에 의하여 계산한다<sup>[2]</sup>. 전류를 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 2.0[A]로 정렬상태에서 비정렬상태까지 회전자를 4. 씩 이동시키면서 측정하였다. 전동기 시뮬레이션 결과 피크 전류치는 5.2[A]까지 상승하나 측정에서는 코일의 손상을 고려하여 실효치 전류 이하에서만 측정하였다.

$$L = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\left(\frac{V_{ac}}{I_{ac}}\right)^2 - R^2} \quad (15)$$

여기서, f는 주파수, Vac 와 Iac는 입력전압 및 전류, R 는 권선저항이다.

## 2.4 결과비교 및 검토

그림 3은 상기 수식에서 계산된 인덕턴스를 나타내고 있으며, 전류 0.4~5.2[A]까지 변화시킬 때, 회전자의 회전각도에 대한 계산결과이다. 그림 4는 동일 전동기의 구조로 FEM해석에 의해 얻어진 결과이며 그림 5는 측정에 의해 얻어진 결과를 나타내고 있다. 그림 6은 계산과 해석 및 측정된 경우 전류에 따른 인덕턴스를 비교한 것을 보여준다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 실험결과

인덕턴스 변화에 따른 전동기의 동특성을 얻기 위하여 위에서 구해진 인덕턴스를 각각 전류 및 회전자의 위치에 따라 적용하였을 때 특성변화로서 스위칭각은 턴온  $-15^\circ$ , 턴오프  $15^\circ$ 로 일정하게 두고 회전수를 변화 시켜 얻어진 결과이다. 그림 7은 1000[rpm]에서 토크 1[Nm]에서의 전류와 전압파형이며, 그림 8은 2000[rpm]에서의 전류와 전압파형을 나타내고 있다. SRM 구동용 컨버터는 제어의 다양성이 뛰어나고 각상의 전류제어기가 독립적이어서 두상의 전류중첩이 가능한 비대칭 브릿지와 히스테리시스 전류제어기를 사용하였다.

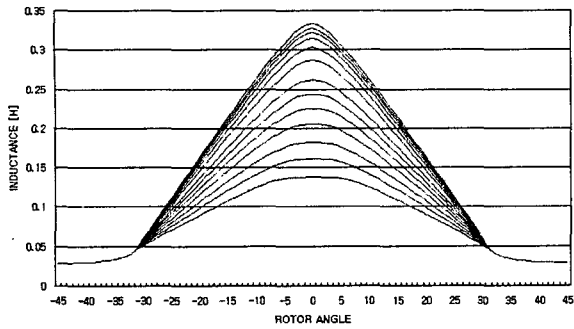


그림 3 인덕턴스 계산결과  
Fig. 3 Computed Inductance curve

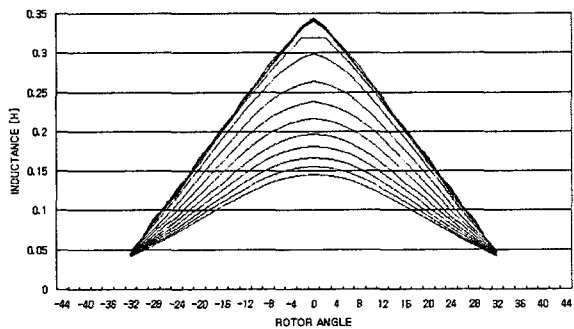


그림 4 FEM으로 해석한 인덕턴스  
Fig. 4 Inductance curve by FEM analysis

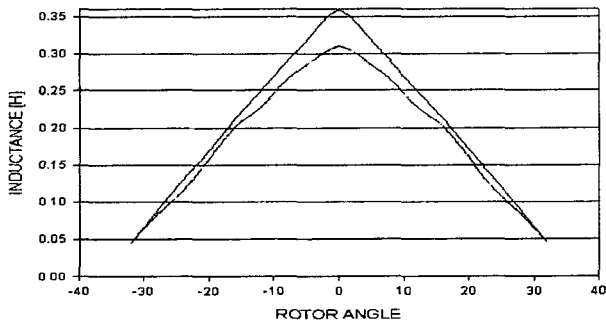


그림 5 인덕턴스 측정치  
Fig. 5 Measured inductance

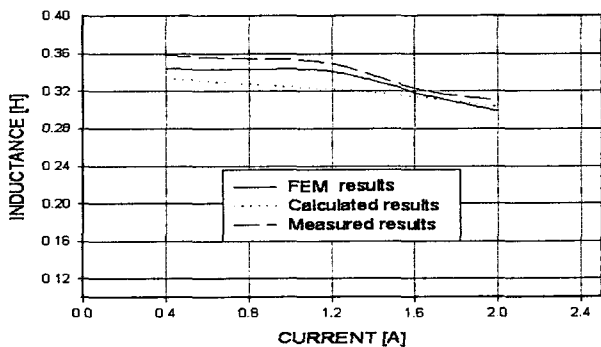
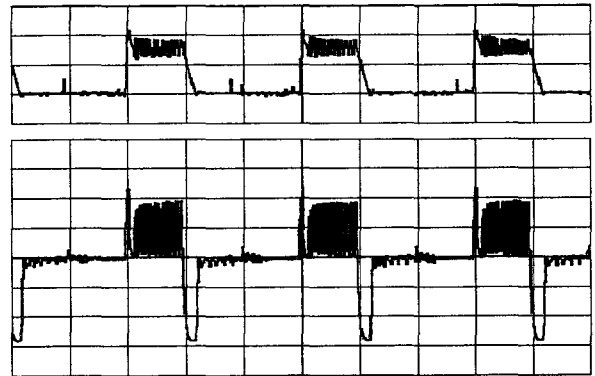
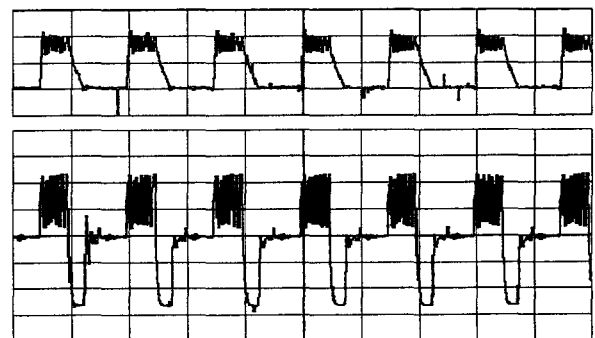


그림 6 인덕턴스 비교  
Fig. 6 Inductance comparison



(X=0.5ms/div, Y=2.5V/div, 2A/div, 150V/div)  
그림 7 1000[rpm]에서의 상전류 및 상전압 파형 측정  
Fig. 7 Measured gate signal, phase voltage and current waveforms at 1,000[rpm]



(X=0.5ms/div, Y=2.5V/div, 2A/div, 150V/div)  
그림 8 2000[rpm]에서 측정된 상전류 및 상전압 파형  
Fig. 8 Measured gate signal, phase voltage and current waveforms at 2,000[rpm]

#### 3.3 결과 분석

SRM의 토크 특성은 회전자의 위치에 따른 전류와 인덕턴스의 변화로 얻어진다. 따라서 보다 정확한 인덕턴스를 적용한 SRM 시뮬레이션은 전동기의 정확한 특성을 얻는데 필수적이라고 할 수 있다. 그림 9와 10은 최근 전동기의 특성을 얻는데 가장 많이 사용되는 자계해

석법으로 구해진 인덕턴스를 적용했을 때와 제시된 방법인 계산에 의해 얻어진 결과를 적용했을 때, 전동기에 실제로 적용되는 인덕턴스 파형을 나타내고 있으며, 두 경우의 파형이 거의 일치함을 알 수 있었다.

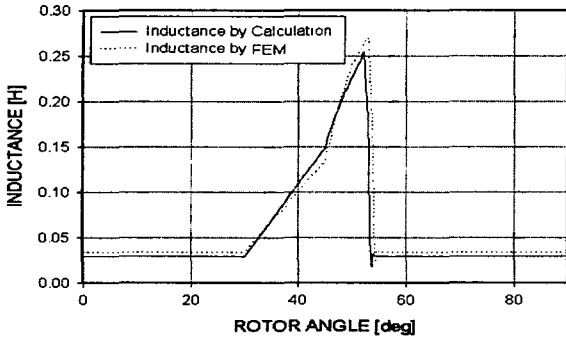


그림 9 1000[rpm]에서 인덕턴스 파형 비교  
Fig. 9 Compared inductance wave at 1000[rpm]

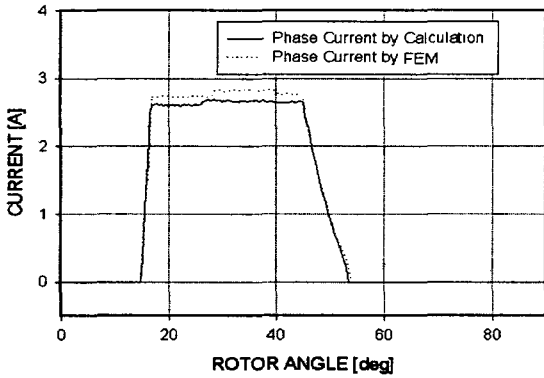


그림 10 1000[rpm]에서 상전류 파형 비교  
Fig. 10 Compared Phase Current wave at 1000[rpm]

#### 4. 결 론

최근에는 보다 효과적인 SRM의 적용을 위하여 전동기 최적 설계 및 다양한 제어기법이 연구되고 있다. 그 방법으로는 FEM해석에서부터 복잡한 비선형 자기회로 해석에 이르기까지 다양하게 시도되고 있다 그러나 FEM을 이용한 방법은 상당한 시간적 소요와 모델 변형에 따른 재 해석이 수행되어야 한다. 또한 자화곡선을 해석하기 위한 피팅계수법도 정확한 자화특성을 얻기 위해서는 FEM 해석 결과나 측정치나 경험치가 필요하다.

따라서 수요자의 모델 변형에 빠르게 대처하기 위해서는 보다 정확하면서 간편하게 전동기의 특성을 얻을 수 있어야 한다. 본 논문에서는 SRM은 각상이 독립적으로 여자 되며, 회전자와 권선전류에 의해서만 자속이 쇄교되는 기본 원리를 이용하여 고정자와 회전자가 겹쳐질 때의 인덕턴스를 계산하여 보다 간편하게 전동기의 특성을 얻을 수 있었다. 또한 구해진 결과를 검증하기 위하여 1[Hp], 3,000[rpm], 6/4극 전동기를 모델로 하여 FEM 해석과 인덕턴스 측정 및 실험을 통하여 그 결과의 타당성을 검증하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] D.A. Torrey and J.H lang, "Modeling a nonlinear variable reluctance motor drive," Proc. Inst. Elect. Eng., pt. B, vol. 137, pp. 414-326, 1990
- [2] T.J.E Miler and McGilp, "Nonlinear theory of the switched reluctance motor for rapid computer-aided design," proc. Inst. Elect. Eng., pt. B. vol. 137, pp. 337-347, 1990
- [3] D,A, Torrey, "An experimentally verified variable -reluctance machine model implemented in the saber circuit simulator", Electric Machines Power Syst., vol. 24, No.2, pp.199-209, Mar. 1996
- [4] Arthur. Radun, "Analytically Computation the Flux Linked by a Switched Reluctance Motor Phase When the Stator and Rotor Poles Overlap". IEEE, vol., 36, No. 4, pp.1996-2003, July. 2000
- [5] Arthur Radun "Design Considerations for the Switched Reluctance Motor", IEEE, vol., 31, No. 5, September /October 1995
- [6] G. E. Dawson, A.R. Eastham and J. Mizia " Switched Reluctance Motor Torque Characteristics : Finite Element Analysis and Test Results" IEEE Transactions, Vol. IA-23, No. 3, May/June 1987, pp 532-537
- [7] 장도현, 문진형 "SRM 컨버터에서 자기동조 방식에 의한 토크오프 각의 결정", 전력전자학회 논문지 vol. 3, no. 4, Dec. 1998, pp. 418-425
- [8] 황영문, 공관식, "SRM의 고효율구동을 위한 가변 스위칭 각도 조정방식에 관한 연구", 전기학회 논문지 vol. 44, No. June, 1995. 1. pp. 25-33
- [9] 차현록 외 5, "최대 토크/효율 및 최소 토크맥동을 위한 스위칭각/전압에 의한 SRM운전", 전력전자학회 논문지, vol. 5, No.4, Austst, 2000, pp309-317