

철손을 고려한 동기형 릴럭턴스 전동기의 유한요소해석

論 文
48B-4-7

Finite Element Analysis of Synchronous Reluctance Motor Considering Iron Core Loss

李重浩*·玄東石**
(Jung-Ho Lee, Dong-Seok Hyun)

Abstract - This study investigates the hysteresis phenomena of a Synchronous Reluctance Motor (SynRM) using coupled FEM and Preisach modelling. Preisach's model, which allows accurate prediction of hysteresis, is adopted in this procedure to provide a nonlinear solution. The computer simulation and experimental result for the $i-\lambda$ loci show the propriety of the proposed method.

Key Words : Synchronous Reluctance Motor (SynRM), Preisach Modelling, Finite Element Method(FEM), Iron Core Loss, Hysteresis

1. 서론

동기형 릴럭턴스 전동기는 적절한 설계에 의해 역률을 높일 수 있고, 단위부피당 토크가 유도 모터 보다 월등하다는 장점이 있어 현재 많은 연구가 이루어지고 있다[1][2].

동기형 릴럭턴스 전동기의 회전자 구조는 돌극 구조를 가지며, 토크는 d축, q축 인덕턴스의 차($L_d - L_q$)에 직접 관계되고, 최대역률은 두 인덕턴스의 비(L_d/L_q)에 크게 의존한다. 따라서 두 회로 정수는 전동기의 특성에 큰 영향을 주며, 특히 제어시 이들 회로정수의 정량적 해석은 필수적이라 하겠다. 립(rib)과 고정자 치부분에서 발생하는 자기적 포화 현상은 회로정수의 변화를 야기한다. 즉, 높은 돌극비에서 q축은 자기적 포화현상이 적은 반면, 정격운전시 높은 퍼미언스의 d축은 자기적 포화가 높게 된다. d축 기자력 여자시 자기적 포화현상은 고정자 요크, 치, 회전자의 립에서 야기되며, 모터의 토크, 효율, 역률에 영향을 주는 L_d 값은 심지어는 50%까지 떨어지게 되는 경우도 있다

따라서 동기형 릴럭턴스 전동기의 설계 및 제어시 비선형 해석에 의한 자기포화 현상의 고려는 필수적이라고 할 수 있다.

유한요소법과 같은 분포정수형 해석은 자기적 비선형성 및 복잡한 형상의 전동기를 비교적 정확하게 해석할 수 있는 장점을 지니고 있으며, 이미 동기형 릴럭턴스 전동기에 대한 정특성 해석연구는 많이 진행되어 있다.

고속영역에서 철손은 동기형 릴럭턴스 전동기의 주요 손실

의 원인이 된다. 따라서 동기형 릴럭턴스 전동기에 대한 철손 해석은 필수적이라 하겠다.

프라이자흐 모델(Preisach)은 히스테리시스에 대한 정확한 수치모사가 가능한 모델로서 세계적으로 많이 연구되고 있다 [3][4][5].

고전적인 프라이자흐 모델은 자화의 물리적 매커니즘을 고려한 몇가지 가정에 기초를 둔다.

이 모델은 주로 물리학계에서 소개되어 졌고, 여러해 동안 연구의 초점이 되어왔다. 이때 이후 프라이자흐 모델은 자성체에 있어 히스테리시스의 시뮬레이션을 위한 방법으로 알려져 왔다.

프라이자흐 모델에 기초를 둔 J. Everett의 첫번째 논문이어 Woodward 그리고 Della Torre, Rado, Folen, Benda에 의한 논문들이 뒤따랐다.

70년대에 Krasnoselskii, Pokrovskii 등의 수학자들은 프라이자흐 모델의 물리적 의미로 부터 분리한 후 모델의 수학적 일반화를 인식했고, 순수한 수학적 형태로 표현하였다.

결과적으로 새로운 수학적 기법이 물리적 본질인 히스테리시스를 수학적으로 묘사하기 위해서 개발되어 왔다.

Mayergoyz, Benda, Visintin등의 논문에서 볼 수 있는 바와 같이 히스테리시스를 포함한 비선형 시뮬레이션과 연구에서 프라이자흐 모델의 현상론적 취급의 시기가 열렸다.

프라이자흐 모델에 대한 새로운 취급은 한편으로는 수학적 모델의 일반적 적용에 초점이 맞추어져 있고, 다른 한편으로는 실제적 비선형 히스테리시스의 표현을 중시하는 쪽으로 연구의 초점이 맞추어져 있다.

수학적 모델의 확장은 입력신호와 출력신호 사이의 관계와 히스테리시스 오퍼레이터를 표현하는 비선형 시스템의 완벽한 발달을 가져 왔다.

* 正 會 員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 博士課程

** 正 會 員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 1999년 2월 3일

最終完了 : 1999년 3월 2일

물리학적 연구에서 프라이어자흐 모델에 있어서의 기대되는 개발과 공학에 있어서의 적용은 자기 비선형성에 있어서의 동적 특성의 표현, 혼합적용 자기, 기계, 열의 시뮬레이션에 대한 히스테리시스 모델을 출현하게 하였다.

그러나 프라이어자흐 모델은 현재까지 전력변환기의 적용에 있어서 정지형 기기에 주로 적용되어 왔다. 현재 전력변환기기의 대부분을 이루고 있는 회전기에 대한 이론적 확장 모델링이 필요하다[6].

본 논문은 동기형 릴럭턴스 전동기의 유한요소해석에 있어서 비선형 해석부터 프라이어자흐 모델을 적용한 모델을 제시하고 그 특성을 분석하였다.

특성분석은 동기형 릴럭턴스 전동기의 최대효율 운전조건을 기반으로 하였으며, 제안된 기법의 효용성을 입증하기 위해 시작기에 탐색코일(search coil)을 부착하였다. 이를 이용해 자속을 검출하여, 전류-자속에 대한 시뮬레이션과 실험 결과를 비교 검토함으로써 본 해석기법의 타당성을 입증하였다.

2. 해석 모델

그림 1은 시작기의 회전자와 고정자의 단면이다.

고정자는 2층권, 분포권을 가진 4극, 400W급 유도기에서 사용되는 것이다.

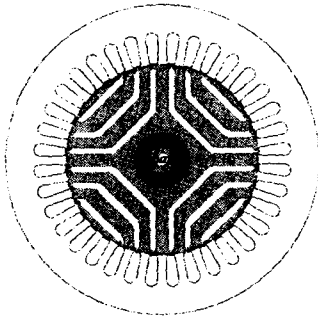


그림1.전동기구조
Fig.1 Motor structure

3. 프라이어자흐 모델이 결합된 2차원 유한요소법의 정식화

3-1. 지배방정식 유도 및 정식화

동기형 릴럭턴스 전동기의 지배방정식은 식(1)~식(3)의 Maxwell 방정식 및 보조방정식으로 부터 유도된다.

$$\nabla \times H = J_o \quad (1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2)$$

$$B = \mu_0 H + M \quad (3)$$

여기서 M 은 인가자계 H 에 관한 자화이고, 다른 기호는 일반적인 의미를 갖는다.

자기 벡터 포텐셜 A 와 등가자화전류 J_m 은 다음과 같이 표현된다.

$$B = \nabla \times A \quad (4)$$

$$J_m = \nu_0 (\nabla \times M) \quad (5)$$

(1)~(5)식으로 부터 유도된 지배방정식은 다음과 같다.

$$\nu_0 (\nabla \times \nabla \times A) = J_o + J_m \quad (6)$$

1차 시험함수를 사용하여 Galerkin법으로 (7)과 같은 행렬 방정식을 구할 수 있다.

$$[K]\{A\} + \{F\} + \{M\} = 0 \quad (7)$$

여기서, $\{K\}$ 는 계수 행렬이며, $\{F\}$, 프라이어자흐 모델에서 계산되는 자화 $\{M\}$ 은 구동 행렬이다.

3-2. 프라이어자흐 모델이 적용된 해석모델

프라이어자흐 모델은 히스테리시스 현상에 대한 본질적이고 이론적인 접근을 지양하는 대신 나타나는 현상적인 양들을 데이터로 처리하는 수치 기법으로서 먼저 실측곡선으로부터 각 자성체 입자들간의 상호작용과 자기입자들의 보자력의 밀도분포를 입력데이터로 하고, 자기이력을 고려해 주기 위하여 입력의 변천과정을 기억시켜 처리하는 방법이다.

프라이어자흐 모델의 기본적 개념은 그림 2에서와 같이 각각의 자구가 유일하게 정의된 상승 하강 스위치계에 의해서 특성화되어 진다는 것이다. 따라서 자구는 그림 3에서와 같이 스위치계 $\mu(\alpha, \beta)$ 의 평면위에서 그들 분포의 가상 밀도 함수에 의해서 표현되어질 수 있다. 이러한 자기입자에 해당하는 히스테리시스 작용자들의 밀도를 적분함으로써 자화량을 구하는 방법이라 할 수 있다. 다시말해 자성체에 따른 프라이어자흐 모델에 따라서, 자화 $M(t)$ 는 여러 논문에서 언급된 것과 같이 스위치계 $\mu(\alpha, \beta)$ 위에서 그들의 단위 자화의 분포에 관한 분자 자화의 기대값으로서 정의되어 질 수 있다.

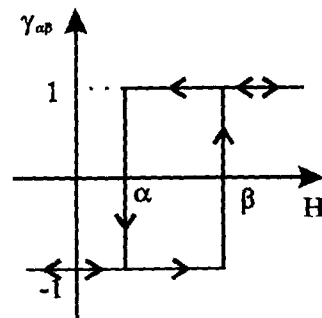


그림 2. 직사각 히스테리시스
Fig. 2 Rectangular hysteresis of dipole

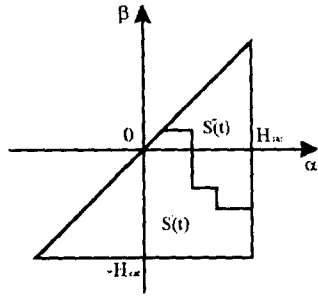


그림 3. 프라이자흐 루프 평면

Fig. 3 Preisach loop diagram

인가자계 H를 포함하고 있는 자화 M은 다음과 같이 표현되어진다.

$$M(t) = \left(\int_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta} |H(t)| \text{sgn}(\cos \varphi) d\alpha d\beta \right) \quad (8)$$

여기서 φ 는 그림 4에서 보는 바와 같이 인가자계와 자화 사이의 차이각이다.

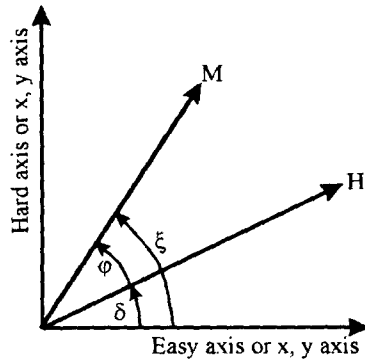


그림 4. 인가자계와 자화

Fig. 4 Applied field and magnetization

본 논문에서는 입력은 전류원이며, 입력형태는 다음과 같다.

$$i_d^e = x[A], \quad i_q^e = 0[A] \quad (9)$$

$$i_d^s = i_d^e \cdot \cos(\theta + \tau) + i_q^e \cdot \sin(\theta + \tau) \quad (10)$$

$$i_q^s = -i_d^e \cdot \sin(\theta + \tau) + i_q^e \cdot \cos(\theta + \tau) \quad (11)$$

$$i_a^s = i_d^s, \quad i_b^s = -i_d^s/2 - \sqrt{3}/2 \cdot i_q^s, \quad (12)$$

$$i_c^s = -i_d^s/2 + \sqrt{3}/2 \cdot i_q^s$$

여기서, i_d^e, i_q^e 는 d, q 회전좌표축 전류, i_d^s, i_q^s 는 텐서(tensor)변환 후의 d, q 고정좌표축 전류, i_a^s, i_b^s, i_c^s 는 2상-3상 변환 후의 3상 고정좌표축 전류이다.

i_d^e 에 값을 주고, i_q^e 을 0으로 하면, d축에 기자력이 인가되며, i_q^e 에 값을 주고, i_d^e 을 0으로 하면, q축에 기자력이 인가된다.

다음과 같은 방법으로 전류를 인가하면, 각축의 회로정수가 기기의 특성을 결정짓는 돌극형 전력 변환기기의 전류원 해석이 편리해진다.

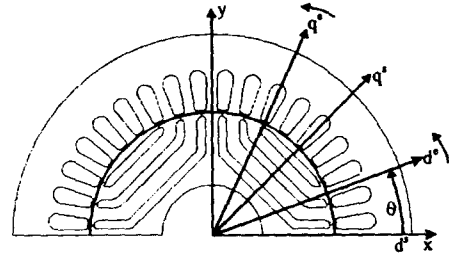


그림 5. 입력전류와 회전자와의 관계

Fig. 5 Relation of input current and rotor

여기서 τ 는 초기 얼라인(align)각이고, 회전자는 그림 5에서 보는 바와 같이 입력전류각 θ 에 따라서 동기적으로 회전한다. 따라서 고정자 영역은 x, y축위를 기준으로 보면 교번하는 field로 가정할 수 있다. 한편 회전자 영역의 B와 H는 일정한 값을 가지며 회전하지만, x, y 축을 기준으로 보면 이것 또한 교번하는 field로 가정할 수 있다. 따라서 x 축과 y 축 위에서의 φ 는 0 혹은 π 가 된다.

결과적으로 식(8)은 식(13)과 같이 벡터 프라이자흐 모델의 특별한 경우인 스칼라 프라이자흐 모델로 바꾸어 쓸수있다.

$$M(t) = \int \int_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta} (H(t)) d\alpha d\beta = \int \int_{S^+(t)} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta} (H(t)) d\alpha d\beta - \int \int_{S^-(t)} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta} (H(t)) d\alpha d\beta \quad (13)$$

여기서, S는 그림3과 같이 프라이자흐 (α, β) 평면위의 $H_{sat} \geq \alpha \geq \beta \geq -H_{sat}$ 인 삼각 영역이다. 그리고 $\gamma_{\alpha\beta} H(t)$ 는 단위 히스테리시스 작용자이고, 영역 $S^+(t)$ 위에서 $M_s = +1$ 의 값을 가고 반면에 $S^-(t)$ 위에서 $M_s = -1$ 의 값을 가지는 hysteron이다.

프라이자흐 평면위에서의 밀도 분포는 자기입자들의 보자력과 상호작용에 대한 많은 정보를 주지만 실측곡선으로부터 구한 밀도 값을 적분하는 과정이 복잡하고 미적분 과정에서 발생하는 오차로 인해 수치해석에 적용하기는 불편하다. 이에 보다 더 편리한 수치해석을 위해 프라이자흐 평면을 다음과 같은 에버렛 함수로 대체한다[7]. 실험으로부터 얻은 에버렛 분포함수는 그림 6과 같이 가우스 분포를 갖는다. 시착기에 사용된 자성체는 S40이다.

$$E(\alpha, \beta) = \int \int_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta} (H(t)) d\alpha d\beta \quad (14)$$

3. 시뮬레이션 및 결과 고찰

동기형 릴럭턴스 전동기의 고정자 철손은 일반적 유도 전동기의 철손과 유사하다. 반면 회전자의 자속은 회전자와 동기적으로 회전하기 때문에 철손은 거의 영에 가깝고 항상 일정한 값을 유지한다. 따라서 거의 모든 철손은 고정자에 국한된다.

본 해석 기법의 효율성을 확인하기 위해 동기형 릴럭턴스 전동기의 최적 효율조건을 가지고 시뮬레이션을 행하였다.

동기형 릴럭턴스 전동기의 최대 효율 조건은 다음과 같다 [9].

$$\sqrt{\frac{L_d}{L_q}} = \frac{i_{qs}}{i_{ds}} \quad (17)$$

그림 9~11은 동일 토크 2.17[Nm]에서의 각각의 전류 비가 철손에 미치는 영향을 알아본 것이다. 그림 9-11의 데이터는 고정자 치의 임의의 동일요소에 관한 것이다.

최대효율 조건인 d축전류 1.6 q축 전류 2.5에서 손실이 가장 적음을 해석 결과로부터 알 수 있었다.

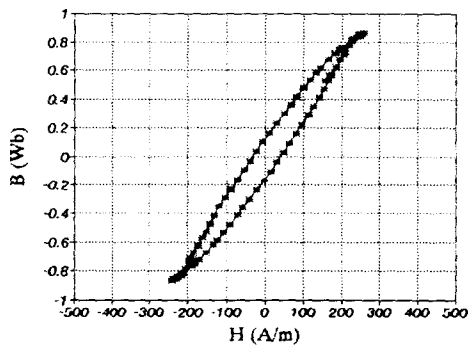


그림 9. d축 전류 1.6A, q축 전류 2.5A 시의 B-H 곡선
Fig. 9 B-H Curve in d-axis current 1.6A and q-axis current 2.5A

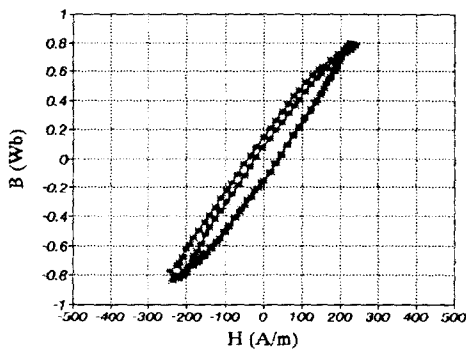


그림 10. d축 전류 2A q축 전류 2A 시의 B-H 곡선
Fig. 10 B-H Curve in d-axis current 2A and q-axis current 2A

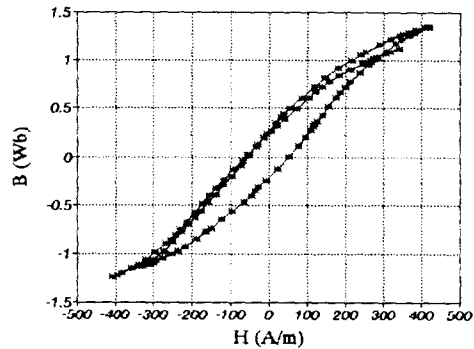


그림 11. d축 전류 0.8A q축 전류 5A 시의 B-H 곡선
Fig. 11 B-H Curve in d-axis current 2A and q-axis current 2A

본 해석 기법의 효율성을 실험적으로 증명하기 위해 시스템 전체에 관한 전류-자속 궤적을 관찰하였다. 시작기의 자속을 검출하기 위하여 시작기에 탐색코일(Search coil)을 부착하였다.

시작기의 전류-자속 궤적은 시작기 전체의 B-H곡선에 상당하며, 시작기의 손실을 계산하는데 중요한 요소가 된다.

그림12와 13은 d축 전류 2A, q축 전류 2A시의 전류-자속 시뮬레이션과 실험궤적을 그림14와 15는 d축 전류 0.5A, q축 전류 8A시의 전류-자속 시뮬레이션과 실험궤적을 나타낸다.

단일 B-H 루프로 해석을 행할 경우 이 궤적은 왜곡이 없는 타원형을 이루지만 본 기법을 통한 해석 결과에서 볼 수 있는바와 같이 자속의 왜곡으로 인해 파형이 왜곡됨을 볼 수 있으며, 실험결과가 이를 증명해준다.

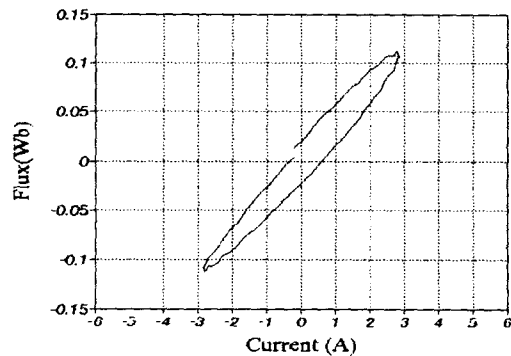


그림 12. d축 전류 2A q축 전류 2A 시의 전류-자속 시뮬레이션 궤적

Fig. 12 Simulation i-l loci in d-axis current 2A and q-axis current 2A

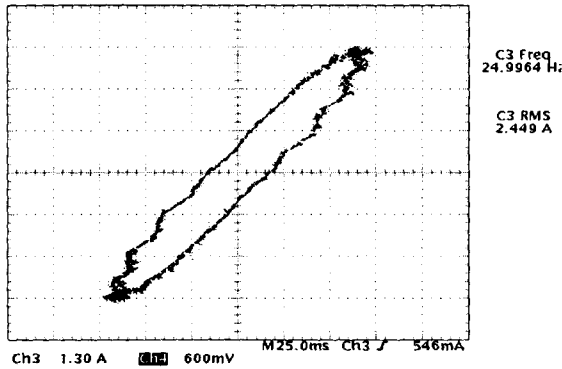


그림 13. d축 전류 2A q축 전류 2A 시의 전류-자속 실험 궤적

Fig. 13 Experimental $i-\lambda$ loci in d-axis current 2A and q-axis current 2A

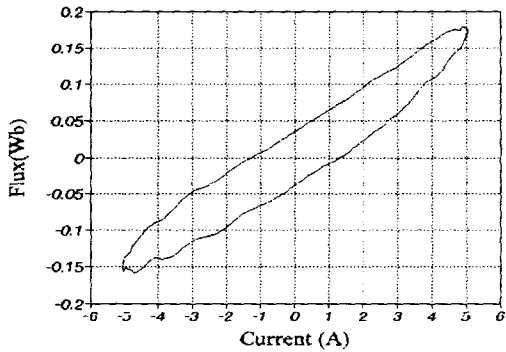


그림 14. d축 전류 0.5A q축 전류 8A 시의 전류-자속 시뮬레이션 궤적

Fig. 14 Simulation $i-\lambda$ loci in d-axis current 0.5A and q-axis current 8A

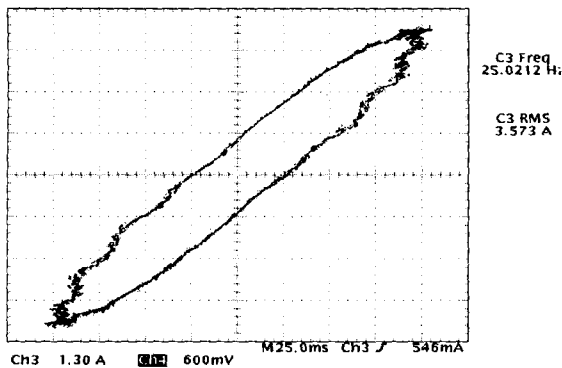


그림 15. d축 전류 0.5A q축 전류 8A 시의 전류-자속 실험 궤적

Fig. 15 Experimental $i-\lambda$ loci in d-axis current 0.5A and q-axis current 8A

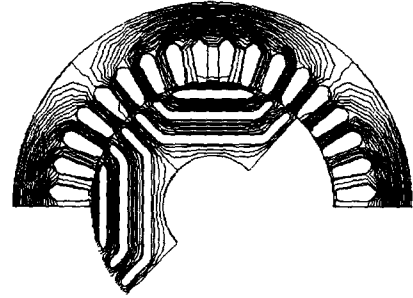


그림 16 자속선도

Fig. 16 Flux plot

그림 16은 25HZ, d축전류 1.6[A], q축 전류 2.5[A]하에서 동기적으로 회전하고 있는 동기형 릴럭턴스 전동기의 자속선도를 보여준다

4. 결론

본 연구에서는 유한요소법과 프라이자흐 모델이 혼합 적용된 회전기 해석기법을 동기형 릴럭턴스 전동기를 대상으로 하여 제안하였다.

동기형 릴럭턴스 전동기의 최대 효율 조건을 해석 사례로 제안된 기법의 효용성을 입증하였다.

본 연구에서 제안된 해석기법은 전동기의 설계 및 제어 알고리즘 개발에 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

전압원으로서의 적용, 특히 PWM입력에 따르는 히스테리시스 모델링은 다양한 전력변환기기의 효율, 역률 등의 정확한 해석에 유용할 것이며, 이에 대한 연구가 진행중이다.

참고 문헌

- [1] 이중호, 김정철, 현동석, "단편형 회전자구조 동기형 릴럭턴스전동기와 유도전동기의 특성비교에 관한 연구", 대한전기학회논문지, 제47권, 제9호, pp1343-1350,1998. 9
- [2] J. H. Lee, J. C. Kim, I. S. Jung, D. S. Hyun, "Vector Control Scheme of Synchronous Reluctance Motor Considering Iron Core Loss", *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 34, No. 5, pp3522-3525, September, 1998.
- [3] J. H. Lee, J. C. Kim, D. S. Hyun, "Dynamic Characteristic Analysis of Synchronous Reluctance Motor Considering Saturation and Iron Loss by FEM", *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 34, No. 5, pp2629-2632, September, 1998.
- [4] 홍선기 "등방성 자성재료에서의 일반화된 벡터 히스테리시스 모델링", 공학박사학위 논문, 서울대학교, 1993
- [5] A. Ivanyi, Hysteresis Models in Electromagnetic

Computation, ACADEMIAI KIADO, BUDAPEST.

- [6] J. H. Lee, D. S. Hyun, "Hysteresis Analysis for the Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor By Coupled FEM & Preisach Modelling", *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 35 No. 3, in press.
- [7] Everett, D. H. : A general approach to hysteresis, Part III., "A formal treatment of the independent domain model of hysteresis", *Trans. on Faraday Soc.*, Vol. 50 pp1077-1096, 1954.
- [8] 이중호, 현동석, " 유한요소법을 이용한 단편형 회전자구조 동기형 릴럭턴스 전동기의 특성해석", *대한전기학회논문지*, 제47권, 8호, pp1116-1122, 1998. 8
- [9] J. H. Lee, D. M. Lee, J. C. Kim, D. S. Hyun, "Iron Core Loss Minimization Scheme on Vector Control for Synchronous Reluctance Motor ", *IEEE-IAS Annual Meeting 1998*, St. Louis, Missouri, USA, Oct. 1998, Vol. 1, pp 677-684.

저 자 소 개



이 중 호(李 重 浩)

1968년 8월 21일생. 1993년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정 수료.

Tel : (02) 2290-0342

E-mail : limotor@unitel.co.kr

limotor@hymail.hanyang.ac.kr



현 동 석(玄 東 石)

1950년 4월 8일생. 1973년 한양대학교 공대 전기공학과 졸업. 1978년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1984년~1985년 미국 토론토 대학 객원교수. 1988~1989년 뮌헨 공과대학 객원교수. 현재 한양대학교 공대 전기전자공학부 교수.

현 공과대학 객원교수. 현재 한양대학교 공대 전기전자공학부 교수.

Tel : (02) 2290-0345

E-mail : dshyun@email.hanyang.ac.kr