

# 퍼지회전자 위치평가 알고리즘을 이용한 SRM센서리스 속도제어에 관한 연구

崔 載 東, 金 甲 東, 安 載 晁, 成 世 鎭

## Sensorless speed control of a Switched Reluctance Motor using Fuzzy position estimation algorithm

Jae-Dong Choi, Kab-Dong Kim, Jae-Hwang Ahn, Se-Jin Seong

### 요 약

본 논문에서는 정렬과 비정렬된 회전자 위치들에서 자화곡선들을 기본으로 한 SRM의 회전자 위치평가 알고리즘을 제안한다. 자화곡선은 측정된 상 전압과 상 전류로부터 계산되어지고, 계산된 데이터는 회전자 위치검출을 위한 자화곡선의 입력으로 사용되어진다. 자화곡선은 비선형 특성해석에 적합한 퍼지 알고리즘으로 구성되어졌다. 종래의 지식기반 퍼지제어기를 이용한 퍼지 자속관측기가 SRM의 센서리스 제어를 얻기 위해 제시되었다. 최적 각을 선정하기 위한 방식이 회전자 위치검출을 위해 제시되었다. 제안된 알고리즘의 강인성이 시뮬레이션과 실험결과의 비교를 통해 입증되었다.

### ABSTRACT

This paper introduces a new rotor position estimation algorithm for the Switched Reluctance Motor, based on the magnetizing curves only at aligned and unaligned rotor positions. The flux linkage is calculated by measured data from phase voltage and phase current, and calculated data are used as the input of magnetizing profiles for rotor position detection.

The fuzzy flux observer using novel knowledge-based fuzzy controller are presented to achieve sensorless control of the SRM. The method for selecting optimal angle is proposed for the rotor position detection. The robustness of the proposed algorithm is proved through the comparison of the simulation and experimental results.

**Key Words** : Switched Reluctance Motor, Fuzzy flux observer, Sensorless control

### 1. 서 론

SRM은 단순성, 저 비용, 고속 동작을 위한 능력 그리고 안전한 동작 등에 의해 오늘날 상당한 주목을 받고 있고 제조업, 전기 자동차, 경전철, 항공우주, 자동화 시스템 및 응용 분야와 같은 폭넓은 영역들을 포함할 수 있게 되었다. 이중에서 SRM의 가장 주요한 장점은 그들의 단순성과 강인한 구조이다. SRM과 결합된 다양한 장점들이 상대적으로 값비싼 회전자 위치 검출기의 이용에 크게 의존하고 있다는 것이다<sup>[1]</sup>.

폭 넓은 속도 범위에 걸친 높은 효율의 SRM 시스템은 정확한 회전자 위치 검출의 사용을 통하여 도통각들의 선정이 가능하다. SRM들의 회전자 위치 정보에 대한 요구는 종래의 회전자 위치 센서들의 일부 형태의 사용에 의해 만족되어 졌다. 흔히, 축에 부착된 엔코더, 레졸버 혹은 홀 센서가 회전자 위치를 공급하기 위해 이용되어진다. 어쨌든 이러한 값비싼 센서들의 사용은 모터 그 자체보다도 열악한 환경에서 훨씬 더 적은 내구성을 갖게 될 것이다. 따라서 그들은 신

회도 문제를 불러일으키게 될 것이고, 구동의 응용범위에 제약을 노출하게 된다. 이러한 제약을 극복하기 위한 SRM 회전자 위치 센서리스 제어를 얻기 위한 다양한 형태의 방법이 제안되었다<sup>[2-5]</sup>. 이러한 방식들은 여자되지 않은 권선에 혹은 부하가 걸려있는 권선에 임의로 전류를 삽입하여 그 응답을 얻거나 전류 파형들로부터, 특히 전류 상승과 하강 시간에 전류 크기와 회전자 위치의 함수로부터 추출되어진 권선 인덕턴스에 관한 정보를 이용하는 방식이다<sup>[6-8]</sup>. 이 방식들은 추가적인 하드웨어나 그들의 일부가 SRM 모델에 대해 적절하게 모델링 되어있지 않다.

본 연구에서는 SRM 구동을 위해 높은 정밀도를 갖는 비간접 회전자 위치 센서리스 제어 알고리즘이 제시되었다. 쇄교자속은 상 전압과 상 전류로부터 측정된 데이터에 의해 계산되며, 계산된 데이터는 회전자 위치 검출을 위해 필요한 자화특성곡선의 입력으로 사용된다. 자화특성곡선은 비선형 특성 해석에 적합한 퍼지 자속관측기를 이용한 방식으로 구성하였으며, 회전자 위치 검출을 위한 최적의 상을 선정하기 위한 방법이 제안되었다. 제안된 알고리즘의 원리는 쇄교자속( $\lambda$ ), 전류( $i$ )와 회전자 위치( $\theta$ )의 관계로서 설명되어질 수 있다.

제안된 퍼지 자속관측기는 회전자 위치, 전류와 자속의 관계에 의한 룰 베이스를 생성하였으며, 퍼지화 와 비퍼지화를 통해 SRM의 자화특성곡선을 생성하였다. 퍼지 자속관측기로부터 생성된 SRM의 자화특성곡선은 실제 상 전압과 상 전류로부터 측정된 데이터로부터 생성된 룰-업 테이블(자화특성곡선)과 비교되어졌다. 또한 제안된 알고리즘을 이용한 계산된 각의 에러 오차가 각각 분석되었으며, 시뮬레이션과 실험 결과 비교를 통해 제안된 알고리즘의 신뢰성을 입증하였다.

## 2. 쇄교자속 측정 및 회전자 위치 검출 동작원리

그림 1에서 보여지는 것처럼, 전형적인 SRM 자속 측정을 위한 시스템이 SRM, 전력 컨버터 그리고 전압, 전류 검출회로 및 DSP제어보드로 구성되어 있다. 제어 루프에서 요구되는 제환 신호들은 상 전압과 상 전류들이다. 필수적으로, SRM은 그들의 토크 방정식에 의해 모델 되어질 수 있다.

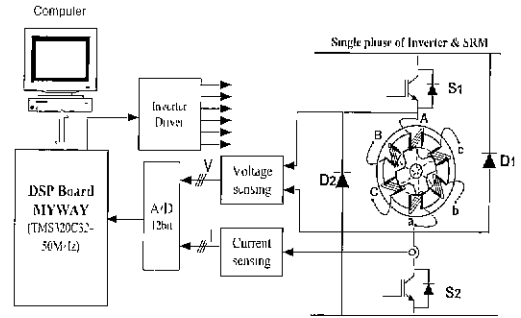


그림 1 지속 측정을 위한 시험 회로

Fig. 1 Test circuit for the flux linkage measurement

$$T_e = \frac{1}{2} [i] \frac{d[\lambda]}{d\theta} = \frac{1}{2} [i] \frac{d[L]}{d\theta} [i]^T \quad (1)$$

여기서, 6/4극 SRM의 경우엔,

$$\begin{aligned} [i] &= [i_a, i_b, i_c], \\ [\lambda] &= [\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c], \\ [L] &= \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

식 (1), (2)를 살펴보면, 상태변수로서 쇄교자속을 취하는 것은 권선 인덕턴스를 이용하는 것보다 SRM 모델링에 있어 좋은 접근방식이라 할 수 있다. 왜냐하면 변수의 수가 9개로부터 3개로 상당히 줄어들 뿐만 아니라, 8/6모터의 경우 16개에서 4개로 보다 많은 변수가 줄어들게 된다. 또한 권선 인덕턴스에 의한 SRM 모델링은 높은 비선형성을 갖는 수많은 권선 인덕턴스 수와, 상호 인덕턴스가 요구되어지는 것에 반해, 쇄교자속 계산 혹은 측정방식은 인덕턴스에 측정방식보다도 더욱 직접적이고 간단하다. 상세한 SRM 자화특성들을 얻기 위한 기본적인 방식으로 유한요소 해석 방식 혹은 실험에 의한 직접측정방식이 있다. 유한요소 해석은 다양한 해가 많은 회전자 위치와 전류레벨에서 요구되는 어려움이 있어 본 연구에서는 직류 전원에 의해 여자된 비선형 직렬 R-L회로의 단자 방정식을 이용한 실험방식이 사용되었다. 단자 방정식은 식(3)과 같다.

$$V_j = R \cdot i_j + \frac{d\lambda_j}{dt} \quad j = 1, 2, 3, \dots, q \quad (3)$$

식(3)로부터, 쇄교자속은 다음과 같다.

$$\lambda = \int_0^t (V - Ri) dt \quad (4)$$

여기서,  $I$ 는 정상상태 전류를 나타낸다. 전류( $i$ )와 전압( $V$ )의 과도상태는 마이크로 프로세서에 기록되고 네

이터는 PC로 전송되어진다. 얻어진 데이터는 식(4)를 이용하여 쇄교자속를 얻기 위해 계산되어진다. 그림 1의 전압-전류( $v-i$ ) 측정회로에 의해 그 특성들이  $\Delta\theta=2^\circ$ 에 대해 비정렬된 위치로부터 정렬된 회전자 위치까지  $\theta$ 에 대하여 측정되어졌다. 인덕턴스를 결정하기 위한 자속-전류( $\lambda-i$ ) 특성들이 실험에 의해 얻어졌고 결과는 그림 2와 같다. 특정한 회전자 위치  $\theta$ 에 대한  $\lambda-i$  곡선의 실험적인 데이터들은  $\lambda=f(i)$ 에 의해 전류( $i$ )의 함수로서 자속( $\lambda$ )을 얻기 위해 이용되어졌다. 이 함수의 미분은 요구되는 전류와 회전자 위치  $\theta$ 에 대한 인덕턴스의 값을 준다.

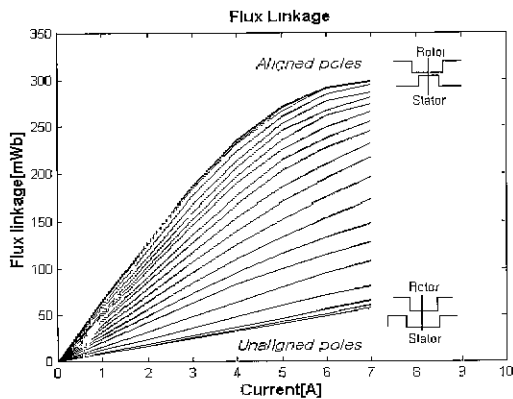


그림 2 측정된 자속-전류 곡선  
Fig. 2 Measured flux linkage-current profile.

제안된 6/4 구조의 SRM 비간접 회전자 위치의 검출원리를 살펴보면 다음과 같다. 각 상으로부터 측정된 상 전압과 상 전류로부터 쇄교자속이 계산되어지고 상 전류와 쇄교자속에 의해 이에 해당되는 회전자 위치가 결정되게 된다.

먼저 초기 전류 상승구간과 프리휠링 동작에서의 하강영역의 끝 부분에서는  $[\frac{\partial \lambda}{\partial \theta}]_{i=0}$ 의 작은 변화율에 기인하여 전류와 쇄교자속에 의한 회전자 위치의 검출이 어렵다. 따라서 그림 3에서 A상을 기준으로 A1의 영역을 살펴보면, 이 영역은 스위치 온 이후 전류 확립과 정상상태 전류구간으로 초기 전류 확립구간에서  $0^\circ \sim 7^\circ$  범위 내에서는 회전자 위치를 정확히 감지하기 어렵기 때문에 이 구간을 제외한 구간으로부터 시작하여 스위치 오프구간 까지를 나타낸다. 또한 A2 영역은 스위치 오프 이후 프리휠링 구간으로 음의 전압이 인가되고 전류는 서서히 소거되는 영역이다. 따라서 이 영역에서는 A1에서 검출된 회전자 위치에 대해

부족한 부분을 보상에 주는 구간 역할을 하게 된다. 따라서 한 상에서 발생될 수 있는 영역  $30^\circ$ 는 A1과 A2를 합한 영역이 된다. B상과 C상에서도 A상과 마찬가지로 동일한 검출원리가 적용되어지고 각 상으로부터  $30^\circ$ 의 주기를 갖는 회전자 각을 얻게 된다.

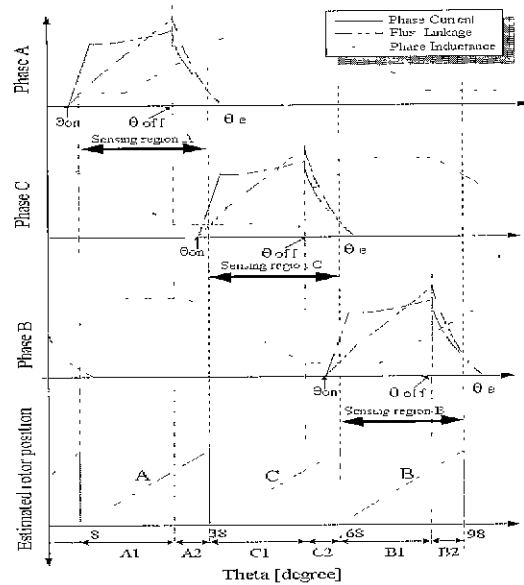


그림 3 회전자 위치에 따른 최적 검출 영역  
Fig. 3 Optimal sensing region according to rotor position

6/4구조의 SR모터의 경우 45도의 기계적 각도를 갖기 때문에 전체  $360^\circ$  구간에서 각 상에서 네 번의 전류 펄스가 발생한다. 따라서 각 상으로부터 얻어진 회전자 각을 모두 합하면 전체 주기가 된다.

### 3. 퍼지 회전자 위치평가 알고리즘

#### 3.1 퍼지 논리 기반 자화모델 설정

비록 해석적으로 인덕턴스에 의해 SRM을 고려하는 것은 어려울지라도, 권선 쇄교자속 특성을 그래프적으로 SRM을 설명하는 것은 상대적으로 쉬운 접근 방식이다. 예를 들면, 그림 2는 6/4극 SRM의 측정된 자화곡선을 설명한다. 그 속에서 모든 요소들은, 회전자 위치들, 전류 레벨들, 포화 그리고 상호 커플링이 고려되어졌다. 이 설득력 있는 자화모델이 측정결과로부터 최소 입력을 기반으로 제안된 퍼지 알고리즘에 의해 편리하게 설정되어질 수 있다. 그림 4는 일반화된 퍼지 입력 멤버쉽 함수를 보여주고 있다. 그림에서, 전류는 포화레벨에 의해 일반화되어진다. 마찬가지로, 회전자

자 위치는 정렬 그리고 비정렬된 레벨에 의하여 일반화되어지고, 회전자 위치 기반은 8/6극 SRM에 대하여 30도의 기계적 각도를 갖고, 6/4극 SRM에 대하여 45도의 기계적 각도를 갖는다.

퍼지 영역을 결정하기 위해, 그림 4에서 보여지는 것처럼 입·출력 멤버쉽 함수가 각각 정의되어졌다. 먼저 자속  $\lambda$ 는 실제 측정된 자속 값을 기본으로 0에서 300mWb까지 10mWb의 단위로 31영역으로 할당되어졌고, 전류  $i$ 는 0에서 7.5A까지 0.5A의 단위로 16영역으로 나누어졌다. 그리고 회전자 위치각  $\theta$ 는 0에서 45도 까지 36영역으로 각각 선정되어졌다. 다음 단계에서, 각 영역은 퍼지 멤버쉽 함수로 할당되어졌다.

본 연구에서, 전류와 자속에 관한 퍼지 셀들은 이등변 삼각형이 되도록 선정되어졌으며 출력값으로 선정된 회전각은 5°이하와 40°이상에서 회전자 위치 검출 오차가 크게 발생하므로 사다리꼴 형태가 되도록 선정하였다. 모든 멤버쉽 함수들은 각 삼각형의 최대점이 퍼지 영역의 중심점에 놓여지도록 선정되어졌고 '1'의 멤버쉽 값이 주어졌다.

다른 두 절점은 두 개의 주변 퍼지 영역들의 중심에 놓이도록 선정되어졌고 멤버쉽 값들은 이러한 두 점에서 영으로 만들어졌다. 각 퍼지 셀은 표 1에 보여지는 것처럼 설정된 전류  $i$ 에 대해 S8로부터 B7, 자속  $\lambda$ 에 대해, S15로부터 B15, 회전자 각  $\theta$ 에 대해 T4로부터 T40까지 퍼지 언어항에 의해 표시되었다.

입력과 출력 영역의 각각에서 퍼지 멤버쉽 함수가 정의된 후에, 측정된 학습 데이터는 퍼지 룰 베이스 모델을 창출하기 위하여 이용될 수 있다. 학습 동안, 각 입력-출력 데이터 쌍, 이것은 측정된 쇄교자속, 전류, 각의 크리쉬(crisp) 수 값으로 구성되어 있으며 시스템 모델인 퍼지 룰들을 생성하기 위해 이용되어지고 있다. 각 입출력 데이터 쌍으로부터 퍼지 룰을 결정하기 위해, 첫 번째 단계는 그들의 일치하는 퍼지 영역의 모든 멤버쉽에 각 데이터 값(자속, 전류, 각)의 정도를 찾아내는 것이다. 변수는 이때 최대값을 갖는 영역에 할당되어진다. 각 새로운 룰이 입-출력 데이터 쌍으로부터 발생되어질 때, 룰 크기 혹은 진리표가 그 룰에 할당되어진다. 여기서 이 룰 정도는 예측 각에 대한 쇄교자속과 전류에 관련된 함수로 관련되어진다.

위의 결과로부터, 모든 학습 데이터 셋은 일치하는 퍼지 룰들을 만들고 이것은 퍼지 룰 베이스에 저장된다. 그러므로, 각 입-출력 데이터 쌍으로부터 2차원 형태의 룰-업 테이블이 형성되어질 수 있다. 이때 전류와 쇄교자속 퍼지 셀, 이것은 입력들이고 2차원 룰업

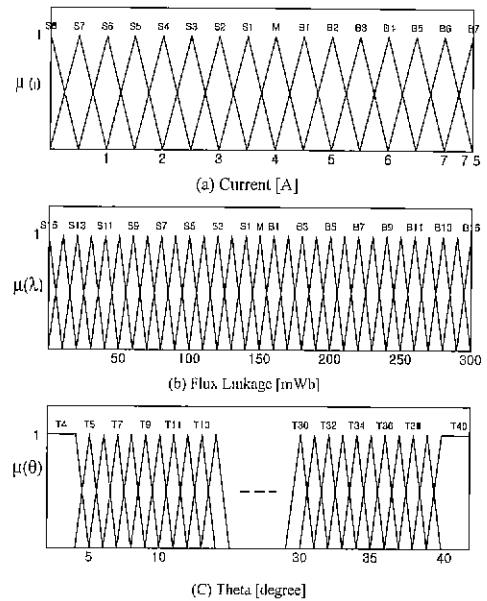


그림 4 퍼지 입 출력 멤버쉽 함수들  
Fig. 4 Fuzzy input output membership functions

테이블의 축이고, 저장된 테이블 값들은 회전자 위치 출력 셋이다. 그림 5는 위와 같은 학습결과로부터 형성된 퍼지 자화특성 곡선이다.

실제 SRM의 구동환경들은 전자기적 노이즈로서 누설 인덕턴스와 커플링 커패시턴스들은 측정회로에 포함된 노이즈 전압을 만들 수 있다. 이러한 노이즈는 전압과 전류측정에 오차를 발생시킨다.

본 연구에서는 SRM 구동에 있어 노이즈 혹은 에러에 강인성을 제공하는 퍼지로지 기반 예측기가 센서리스 방식을 위해 제안되어졌다. 일반적인 룰-업 테이블을 사용하는 경우 오차값이 그대로 예측각에 적용되어 실제 회전자 위치측정에 큰 오차를 발생하게 된다. 그

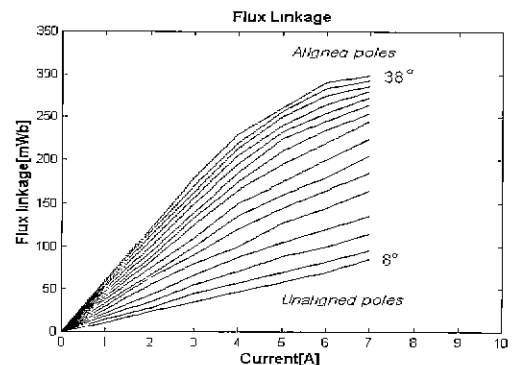


그림 5 퍼지 관측기에 의해 계산된 자화특성 곡선  
Fig. 5 Magnetization profile estimated by fuzzy observer

러나 퍼지로지적 관측기는 발생오차 값을 갖는 전류와 자속값에 대해 퍼지로지적에서 무게중심법을 이용하여 평균값을 취하게 되므로 이 값을 이용하여 계산된 예측각에서는 거의 오차가 없게 된다.

### 3.2 퍼지 회전자 위치평가 알고리즘

그림 6에서 제안된 알고리즘의 원리를 살펴보면 다음과 같다. 모터가 회전하는 동안, 3상들의 각각에 상 전류들과 상 전압이 측정되어지고 쇄교자속은 모터 방정식을 이용한 적분에 의해 계산되어 진다.

$$\lambda(n) = \lambda(n) + \Delta\lambda \quad (5)$$

$$\lambda(0) = 0$$

여기서  $n$ 은 샘플링 수이다. 식(5)에 의해 계산된 쇄교자속  $\lambda$ 와 전류  $i$ 값은, 그림 5에서 생성된 퍼지논리 기반 자화곡선을 통해 쇄교자속과 전류값에 유일하게 일치하는 회전자 위치를 찾을 수 있다.

초기 예측된  $\theta_e(k-1)$ 는 회전자 위치를 결정하기 위한 초기 값으로 이용되어질 것이다. 이때 퍼지 회전자 위치 예측 알고리즘을 통해 관측된 회전자 위치는 자속-각 룩업 테이블을 통해 자속  $\lambda^*(\theta_e(k-1), i)$ 를 생성한다. 다음 레펠에서, 실제 초기 회전자 위치는 짧은 순간 전류펄스를 인가하여 자속  $\lambda$ 와 룩-업 테이블을 이용해 얻어진 자속  $\lambda^*(\theta_e(k-1), i)$ 와 비교하여 수정된  $\lambda_e$ 값이 출력되어 진다. 마지막으로 최적 상 선정기를 통해 최적의 상을 결정하게 된다. 이때 위치 계산은 그림 5에 보여는 것처럼 비정렬된 위치와 정렬된

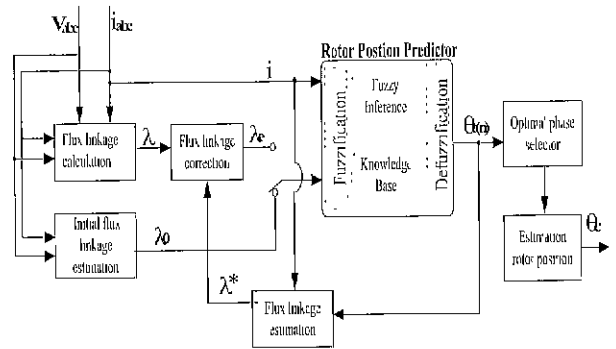


그림 6 제안된 퍼지 회전자 위치 측정 알고리즘  
Fig. 6 Proposed fuzzy algorithm for rotor position sensing.

위치에 가까운 영역에서  $[\frac{\partial \lambda}{\partial \theta}]_{i, \theta}$ 의 작은 변화율이 기인하여 정확성이 떨어진다. 따라서 본 연구에서는 모든 도통 상들 사이에 최적 상으로부터 위치를 계산하기 위해 각 상에서  $[\frac{\partial \lambda}{\partial \theta}]_{i, \theta}$ 가 최대가 되는 최적 영역( $8^\circ \sim 38^\circ$ )을 선정하여 최적 위치 평가기로 사용하였다. 제어기는 선정된 상으로부터 전압과 전류의 측정에 기반을 둔 퍼지 제어알고리즘을 이용하여 정확하고 정밀한 회전자 위치를 찾기 위해 연속적으로 진행된다.

## 4. 시뮬레이션 결과

본 연구에 사용된 모터는 6/4구조를 갖는 1Hp용량

표 3.1 룩-업 테이블  
Table 3.1 Look-up table

	S15	S14	S13	S12	S11		S5	S4	S3	S2	S1	M	B1	B2	B3	B4	B5		B11	B12	B13	B14	B15
S7	T7	T13	T20	T30	T40		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		Y	X	X	X	X
S6	T6	T10	T13	T18	T23		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X
S5	X	T7	T10	T13	T17		T40	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	...	X	X	X	X	X
S4	X	T6	T8	T10	T13		T30	T33	T37	T42	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X
S3	X	X	T5	T8	T11		T23	T25	T28	T31	T35	T38	T40	X	X	X	X		X	X	X	X	X
S2	X	X	X	T7	T9		T20	T22	T23	T25	T28	T30	T33	T36	T38	T40	X		X	X	X	X	X
S1	X	X	X	T5	T9		T17	T19	T21	T22	T24	T26	T28	T30	T32	T34	T37	..	X	X	X	X	X
M	X	X	X	X	T8		T16	T17	T18	T19	T21	T23	T24	T26	T27	T29	T31		Y	X	X	X	X
B1	X	X	X	X	T8		T14	T16	T17	T18	T19	T21	T22	T23	T24	T26	T28		X	X	X	X	X
B2	X	X	X	X	T5		T13	T14	T15	T16	T17	T19	T20	T22	T23	T24	T25		T37	T40	X	X	X
B3	Y	X	X	X	X		T12	T13	T14	T16	T17	T18	T19	T20	T21	T22	T23		T33	T36	T40	X	X
B4	X	Y	X	X	X	...	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T20	T21	T22		T31	T33	T35	T38	X
B5	X	X	X	X	X		T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T20	T21		T29	T31	T34	T36	X
B6	X	X	X	X	X		T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T19		T27	T29	T32	T35	T40

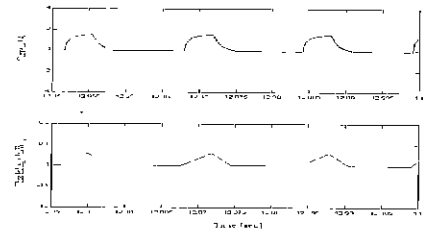
의 SRM이다. 시뮬레이션에 사용된 자화곡선은 퍼지 자속 회전자 위치예측기에 의해 모델링 되어졌다. 모든 각들과  $\Delta\theta$ 는 기계적인 각들이다. 비정렬된 그리고 정렬된 위치는 각각  $0^\circ$  와  $45^\circ$  이다. 모터는  $\theta_{on}=0^\circ$  와  $\theta_{off}=25^\circ$  의 스위치 온, 오프 각을 갖는 1000rpm과 2000rpm에서 각각 동작되어진다. PI제어기를 이용한 단일 펄스 모드에서 정상 상태 속도에 대하여 실행되어졌다. 따라서 단일 펄스 모드에서, 전류 파형은 모터가 1000rpm 및 2000rpm의 안정상태에 도달할 때 일정 값을 갖게 되고 자속은 삼각파 모양의 파형을 갖는다.

정상상태에서 전류는 감소된 가속 토크에 기인하여 초기 상태의 전류보다 낮게 된다. 그림 7과 그림 8은 전류, 자속, 실제 각, 예측 각이 보여지고 있다. 계산된 각 오차는 1000[rpm]에서 최대  $\pm 1.8^\circ$  를 가지며, 2000[rpm]에서는 최대  $\pm 1.5^\circ$  의 오차를 갖는다. 각상의 정렬된 위치에 가까울수록  $[\frac{\partial \lambda}{\partial \theta}]_{i=1,2,3}$ 의 값이 작아져 점차 오차가 커지게 된다.

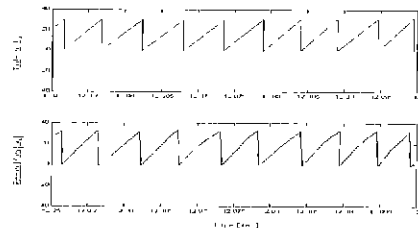
### 5. 실험 결과

퍼지 자속관측기를 이용한 회전자 측정알고리즘의 특성을 실험하기 위해 구성되어졌다. 측정된 전류와 전압으로부터 자속이 계산되며, 계산된 자속과 측정된 전류는 퍼지 논리 기반 자화모델 곡선에 의해 예측이 발생되어진다. 스위치 온, 오프 각은 각각  $0^\circ$  와  $25^\circ$  이며 속도제어를 위해 PI제어기가 사용되어졌다. 또한 입력전원은 단일펄스 가변 전압원 제어방식이 사용되어 속도 증가 시에도 전류상승이 아주 적게 나타나고 있다. 퍼지 자속관측기 알고리즘방식도 앞 절과 마찬가지로 최적 검출영역으로부터 각 상에서  $30^\circ$ 의 각을 검출하여 최종 예측 각으로 계산되어졌다.

그림 9와 그림 10은 각각 1000rpm일때와 2000rpm일 때 얻어진 전류, 자속 실제 측정값 및 예측각에 대한 실험결과를 각각 보여주고 있다. 이 실험결과에서도 마찬가지로 오히려 속도가 증가할 때 전류값과 자속값의 증가로 인해 보다 더 정확한 각을 예측하고 있음을 보여주고 있다. 또한 실험결과로부터 오프 신경 회로망을 이용한 각 측정 알고리즘보다 오차 각이 훨씬 더 적음을 알 수 있다. 이것은 퍼지 룩업테이블에서 해당되는 값이 4개의 값을 읽게 되며 이 값들의 무게 중심값을 이용하기 때문에 어떠한 노이즈나 외란 발생 시에도 측정에 있어 큰 오차가 발생하지 않아 실제 측정각과 거의 같은 각을 예측할 수가 있다.



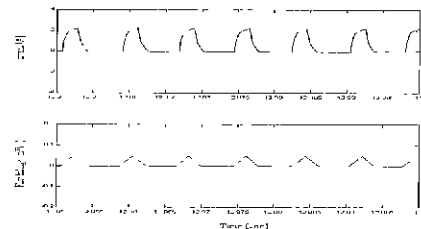
(a) Current and flux linkage waveform



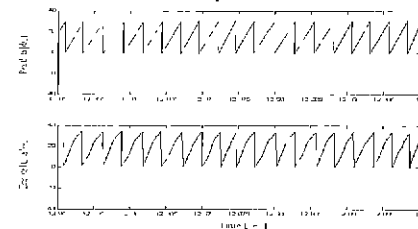
(b) The real angle and estimated angle

그림 7 무 부하, 1000[rpm]에서 퍼지 알고리즘을 이용한 예측각 시뮬레이션 결과

Fig 7 Simulated results of estimated angle using fuzzy algorithm at no load, 1000[rpm]



(a) Current and flux linkage waveform



(b) The real angle and estimated angle

그림 8 무 부하 2000[rpm]에서 퍼지 알고리즘을 이용한 예측각 시뮬레이션 결과

Fig 8 Simulated results of estimated angle using fuzzy algorithm at no load, 2000[rpm].

그림 11는 정격부하인가 조건에서 PI제어기에 대한 초기 응답 특성 변화이다. 그림 11(a)의 속도 응답 특성에서 정격부하인가로 인해 1.6[sec]까지 속도 응답은 상당히 완만하게 나타나고 이에 따라 회전자 위치각 또한 9주기만이 보여지고 있다. 가변 전압원 단일 펄

스 모드에서 무부하 기동 조건과 달리 부하인가 조건에서 기동시 전압 확립이 늦어져 그림 11(b)에서 보여지는 것처럼 초기 자속값이 작게 나타나고 있다. 이때 발생할 수 있는 문제점은 초기 기동시 너무 낮은 전압이 인가되면 계산된 자속값이 너무 작게 나타나 초기 회전자 위치를 검출하는데 어려움이 발생할 수 있다. 따라서 초기인가 전압은 자속을 충분히 계산할 수 있도록 입력전압이 설정되어야만 한다.

그림 12는 부하인가 조건에서 각각 1000[rpm]으로부터 1500[rpm]으로 지령속도 가변시 PI제어기의 속도 응답 특성에 대한 실험결과이다. 그림 12(a)의 PI제어기를 이용한 속도제어에서 지령속도 가변시 2.5[sec] 후에 정상 상태에 도달하는 것이 보여지고 있다. 이때 예측 각의 변화가 그림 12(a)의 하단에 보여지고 있다. 초기 1000[rpm]일 때 나타나는 회전각이 1500[rpm]으로 변경시 보다 조밀하게 보여지고 있어 속도 변화에 따른 회전각의 변화를 쉽게 알 수 있다. 그림 12(b)에서 지령속도 가변시 가변 전압원 모드에 의해 전압 변화는 발생하지만 전류는 일정하게 나타나고, 속도 추정을 위한 가변전압에 기인하여 자속값에서의 변화만 보여지고 있다. 그림 12(b)에서 초기 자속값은 120[mWb]로부터 속도 가변 후 210[mWb]로 변화하였다.

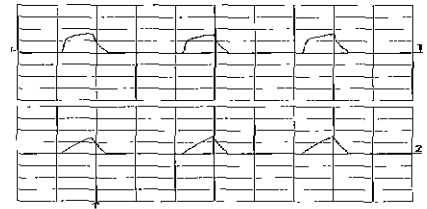
그림 13(a)의 퍼지 제어기를 이용한 1500[rpm]정속도제어에서 외란 인가 시 기준속도보다 200[rpm]정도가 하강되며 약 1.2[sec]후에 정상 상태에 도달되어짐을 알 수 있다. 그림 13(b)에서 외란 인가 후 자속값은 140[mWb]로 변화하였다.

## 6. 결 론

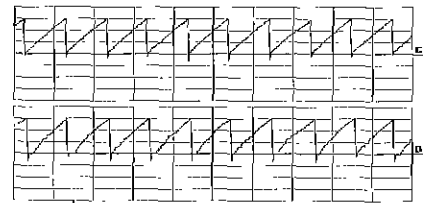
SRM센서리스 제어를 위한 회전자 위치 검출 알고리즘으로 노이즈나 외란에 강인한 특성을 갖는 퍼지 제어알고리즘이 제안되었다. 회전자 위치 검출 알고리즘은 PI 속도제어기와 결합하여 무부하 조건으로부터 정격 부하까지, 1000[rpm]에서 속도 응답, 예측각, 전류 및 자속 변화에 대한 실험을 수행하였다.

SRM 구동을 위한 상태방정식 유도로부터 SRM의 기본적인 특성을 분석하였고, 전류-자속 방식을 갖는 회전자 위치 검출 알고리즘의 단순성 및 우수성을 고찰하였다. 이러한 전류-자속 방식의 보다 쉬운 접근을 위해 퍼지 자속관측기를 이용한 방식이 제시되었으며, 시뮬레이션 및 실험결과 비교를 통해 비관접 회전자 위치 검출 알고리즘이 노이즈 및 외란에 강인함을 입

증하였다.



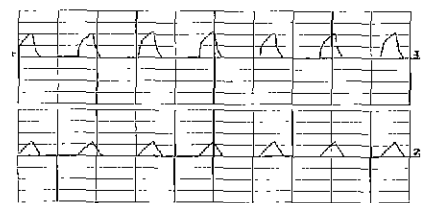
[1 1A/div, 5ms/div]  
[2 50mWb/div, 5ms/div]  
(a) Current and flux linkage waveform



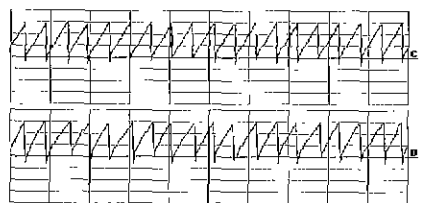
[C 10deg/div, 5ms/div]  
[D 10deg/div, 5ms/div]  
(b) The real angle and estimated angle

그림 9 무 부하 1000[rpm]에서 퍼지 알고리즘을 이용한 예측 각 실험 결과

Fig 9 Experimental results of estimated angle using fuzzy algorithm at no load, 1000[rpm].



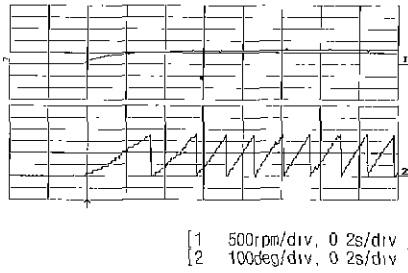
[1 1A/div, 5ms/div]  
[2 50mWb/div, 5ms/div]  
(a) Current and flux linkage waveform



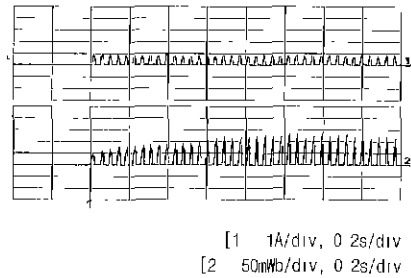
[C 10deg/div, 5ms/div]  
[D 10deg/div, 5ms/div]  
(b) The real angle and estimated angle

그림 10 무부하, 2000[rpm]에서 퍼지 알고리즘을 이용한 예측 각 실험 결과

Fig. 10 Experimental results of estimated angle using fuzzy algorithm at no load, 2000[rpm]



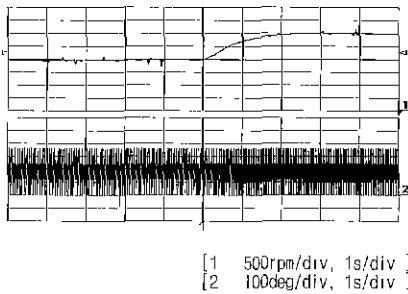
(a) Initial speed and estimated angle at 1000[rpm]



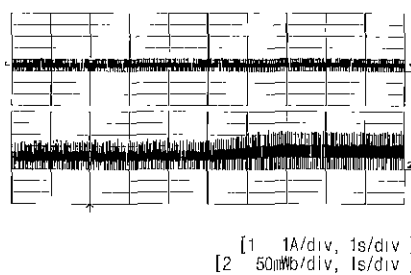
(b) Current and flux linkage for phase A at 1000[rpm]

그림 11 1000[rpm], 정격부하 인가 조건에서 PI제어기를 이용한 초기 기동시 속도 응답, 예측각, 전류 및 자속 특성

Fig. 11 Initial speed response, estimated angle, current and flux linkage using PI control at rated load condition at 1000[rpm].



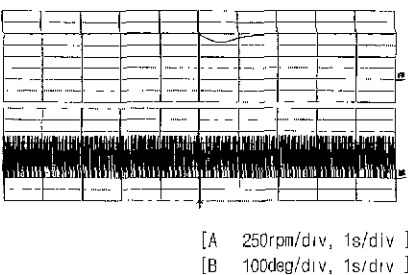
(a) Speed response characteristic and estimated angle



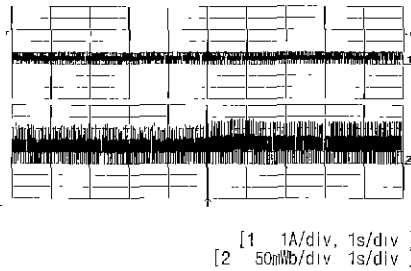
(b) Current and flux linkage of phase A for speed variation

그림 12 PI제어기를 이용한 부하인가 조건에서 1000[rpm]으로부터 1500[rpm]으로의 속도 지령 가변시 속도 응답 특성

Fig. 12 Speed response characteristic for change of reference speed from 1000[rpm] to 1500[rpm] with load condition using PI controller



(a) Speed response characteristic and estimated angle for load variation



(b) Current and flux linkage of phase A for load variation

그림 13 1000[rpm]에서 30% 부하인가 시 퍼지 제어기의 속도응답 특성

Fig. 13 Speed response characteristic of fuzzy controller for 30% of rated load injection at 1000[rpm]

참 고 문 헌

[1] P. J. Lawrenson, J. M. Stephenson, P. T. Blenkinsop,

J. Corda and N.N. Fulton, "Variable-speed switched reluctance motors", Proc. IEE, Vol.127, Pt-B, No.4, pp.253-219, 1980.



[2] P.J. Lawrenson et al., "Discussion on variable-speed switched reluctance motor systems", Proc. IEE, Vol.128, Pt. B, No.5, pp.260-268, 1981.

[3] Y. Tang and L. Xu, "Vector control and fuzzy logic control of doubly fed variable speed drives with DSP implementation", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.10, No.4, pp.661-668, 1995.

[4] M. N. AbdulKadir, "Maximum efficiency operation of switched reluctance motor by controlling switching angles", International Conference on Power Electronics and Drive Systems Proceedings, pp.199-204, 1997

[5] 최계동, 성세진, "지능 제어를 이용한 SRM 센서리스 속도 제어에 관한 연구", 전력전자학술대회 논문집, pp.179-183, 1999

[6] J. P. Lyons, S. R. MacMinn, and M. A. Preston, "Flux/current methods for SRM rotor position estimation," IEEE Industrial Applications Society Annual Meeting, pp.482-487, 1991

[7] P. Laurent, M. Gabsi, B. Multon, "Sensorless rotor position analysis using resonant method for switched reluctance motor," IEEE, Industrial Applications Society Annual Meeting, pp.687-694, 1993.

[8] A. H. Lumsdaine and J. H. Lang, "State observers for variable-reluctance motors." IEEE Trans. on Industrial Applications, Vol.37, No.2, pp.133-142, 1990



**안재황(安載晃)**

1968년 4월 10일생, 1990년 충남대학교 전기공학교육학과 졸업(학사), 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1999년 동 대학원 박사과정 수료, 현재 동 호공고 전기과 교사.



**성세진(成世鎭)**

1948년 7월 15일생, 1973년 서울대공대 공업교육과 졸업(학사), 1975년 동 대학원 졸업(석사), 1988년 일본 동경공업대 대학원 졸업(박사), 현재 충남대 공대 전기공학과 교수, 당 학회 부회장.

**저 자 소 개**



**최재동(崔載東)**

1967년 11월 25일생, 1993년 충남대학교 전기공학과 졸업(학사), 1995년 동 대학원 졸업(석사), 2000년 동 대학원 졸업(박사), 1995~1996년 한국과학기술원 인공위성 연구센터 연구원, 현재 한

국항공우주연구소 선임연구원



**김갑동(金甲東)**

1970년 6월 17일생, 1996년 충남대학교 전기공학과 졸업(학사), 1999년~현재 충남대학교 대학원 석사과정.