

# 히스테리시스 전동기의 유한요소해석

°홍 선기\*, 원 종수\*\*

\* 호서대학교 제어계측공학과, \*\* 서울대학교 전기공학과

## Finite Element Analysis for Hysteresis Motors

° Sunki Hong\*, Jongsoo Won\*\*

\* Dep. of Control and instrument Eng., Hosco Univ., \*\* Dep. of Electric Eng., Seoul N'tl Univ.

### Abstract

Hysteresis motor is a synchronous machine which has simple structure and self-start characteristic but also has serious difficulties in numerical analysis. In this study, a finite element analysis for hysteresis motor considering the hysteresis characteristics is presented. The hysteresis model is the magnetization-dependent Preisach model which explains hysteresis phenomena very well. From this, we estimate the instantaneous torque, average torque and hysteresis loss of the rotor, considering slot and winding distribution.

### 1. 서 론

히스테리시스 모터는 강자성체의 히스테리시스 성질을 이용한 동기 모터로서, 자기동이 가능하고, 구조가 간단하며, 고속, 정속 회전에 적합하다. 그러나 이 모터는 권선 분포, 슬롯 퍼미언스 등에 의한 공간 고조파, 불평형 전류에 의한 시간 고조파 자계의 영향을 많이 받는다. 이에 대해 해석적 방법으로 石川[1], 湧井[2] 등은 시간 및 공간 고조파 자계가 히스테리시스 모터의 토크에 미치는 영향을 연구한 바 있다. 그러나 공간 고조파의 크기를 일정으로 놓고 계산하거나, 공간 고조파를 무시한 가정하에 시간 고조파에 대한 영향을 계산하며, 고조파의 크기, 차수가 바뀔 때마다 별개의 루프를 측정해야 하는 불합리함 등이 있다. 한편, 히스테리시스 링의 히스테리시스 특성을 프라이자흐 모델을 도입, 자기 쌍극자 분포 함수로 표시하고, 주어진 자계 또는 공극 자속 밀도에서 순시 히스테리시스 루프를 구하여 계산하는 방법이 제시된 바 있다[3].

모터 내부의 정확한 자장 분포, 부분적 포화 여부, 순시 발생 토크 등을 계산하려면 유한 요소법이 가장 타당하다. 그러나, 히스테리시스 모터는 반경질 재료로 구성된 회전자인 히스테리시스링의 히스테리시스 특성에 의해 그 특성이 결정되므로 히스테리시스 특성을 고려하지 못하는 기존의 유한 요소법으로는 해석이 불가능하다. 따라서, 이 모터의 유한 요소 해석을 위하여는 히스테리시스 특성을 고려한 유한 요소 해석이 필요하다. 본 연구에서는 히스테리시스 특성을 고려한 유한 요소 해석법

을 이용하여 히스테리시스 모터의 특성 해석 기법을 제안한다. 히스테리시스 특성은 자화의존 프라이자흐 모델 [4, 5]을 이용한다.

### 2. 자화의존 히스테리시스 모델

강자성체의 자화는 인가자계 뿐만 아니라 자신의 자화에도 의존한다 [4]. 즉, 자화에 영향을 미치는 전체자계  $H_t$ 는 인가자계  $H_a$ 와 자화의존 자계  $H_m$ 과의 합으로 표시된다.

$$H_t = H_a + H_m = H_a + \zeta M \quad (1)$$

여기서,  $H_m$  : 자화의존 자계,  $\zeta$  : 자화의존 상수

자화의존 모델은 전체 자계에 대하여는 동일 극값에 대하여 합동성을 가정하며, 따라서 인가자계  $H_a$ 에 대해 합동 마이너 루프는 그림 1처럼  $1 - 1/\zeta$ 의 기울기를 갖게 된다. 이로부터 인가자계가 동일 극값을 갖을 때는 그림 2와 같이 실제의 현상을 설명할 수 있게 된다.

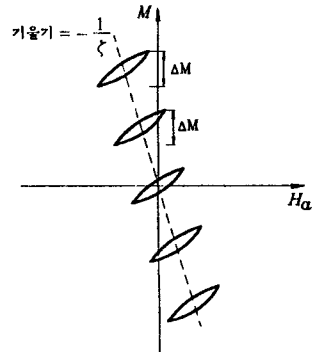


그림 1. 자화의존 모델에서의 마이너 루프 합동성

### 3. 히스테리시스 모터

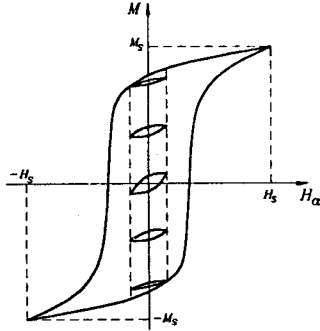


그림 2. 동일 극값에 대한 마이너 루프

히스테리시스 모터의 고정자 구조는 일반 다상 유도기의 구조와 같이나, 회전자가 반경질 재료인 히스테리시스 링으로 구성되어 있다. 고정자에 의해 회전 자계가 발생하면, 히스테리시스 링은 전영역에 걸쳐 극 짝수 만큼 히스테리시스 루프를 그리며, 이 면적이 모터의 출력으로 작용한다. 기존 모터 특성 해석은 히스테리시스 링 전체에서의 투자율을 일정으로 두고 해석적 방법에 의해 해를 구하여 왔다. 그러나, 실제로 각 위치에서의 비투자율은 위치에 따라 다르며, 이를 고려하여야 명확한 해를 구할 수 있지만, 해석적 방법에서 위치에 따라 투자율을 다르게 고려하여 계산한다는 것은 곤란하다. 기존의 유한 요소법에 의한 해석은 히스테리시스를 고려하지 못하므로, 히스테리시스 모터는 해석 대상에서 제외될 수 밖에 없었다.

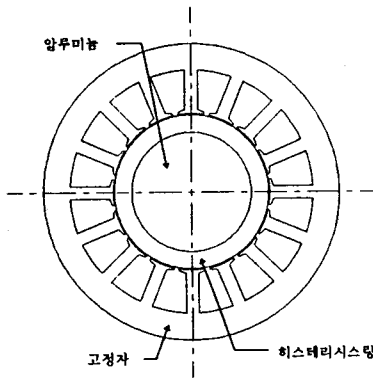


그림 3. 히스테리시스 모터 구조

#### 4. 제안된 알고리즘

히스테리시스 링 각 부분의 자기적 상태는 고정자 구조, 권선의 전류의 상태에 따라 달라진다. 즉, 전류의 크기, 구동방법, 고정자 슬롯형상에 영향을 받는다. 이에 따라 회전자 각 부분의 투자율, 자화 상태도 달라진다. 따라서, 각 부분의 비투자율은 실제 자기적 상태에 맞게 각각 입력될 필요가 있다. 제안된 알고리즘은 다음과 같다.

Step 1: 초기 투자율 입력

Step 2: 유한 요소법에 의한 해석

Step 3: 히스테리시스 모델을 이용하여 최대 자속 밀도값에 해당되는 요소에 대한 자계값을 구하고, 이에 대응하는 히스테리시스 루프를 링에 대응시킨다. 또한, 각 위치에서 비투자율을 히스테리시스 루프상에서 구하여 다시 입력한다.

Step 4: 현재 포텐셜과 전스텝 포텐셜의 상대오차가 수렴 범위에 들어오면 종료, 아니면 스텝 2

위에서 제시된 알고리즘은 어떤 시간  $t_1$ 에서의 계산 알고리즘에 해당한다. 실제로, 이상적인 회전자계가 가해진다면, 임의 시간에서 히스테리시스 루프는 일정하고, 따라서 토크도 일정할 것이나, 히스테리시스 모터는 슬롯에 의한 공간 고조파, 권선에 의한 시간고조파의 영향을 무시할 수 없다 [1]. 따라서, 입력 전류의 크기를 시간에 따라 변화시켜가면서 다시 문제를 풀 필요가 있다. 시간을 한 주기에 대해서 풀면, 모터의 1회전에 대한 토크 변화도 계산할 수 있다.

#### 5. 계산 결과

히스테리시스 링은 그림 4와 같이 80개의 영역으로 나눈다. 동일 영역에서의 투자율은 일정으로 보고, 주어진 전류에 대하여 문제를 푼다.

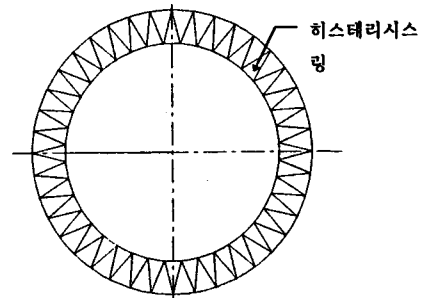


그림 4. 히스테리시스 링 영역 분할도 (80 영역)

히스테리시스 모터의 사양은 다음과 같다.

\* 고정자 (대칭 2상 4극)

상 수	2 상	극 수	4 극
1 상 권수	2280 회	권선계수	0.8536
슬롯수	16 슬롯	내 경	30 [mm]
유효적층두께	28 [mm]		

\* 회전자

외 경	29.6 [mm]	두께	3.5 [mm]
축방향 길이	28.1 [mm]	공극 길이	0.2 [mm]

그림 5는 한 순간에서의 히스테리시스 모터의 유한 요소 해석에 의한 등포텐셜을 나타내고 있다. 이러한 해

석 결과는 시간(권선에서의 전류상태) 및 공간(슬롯 형상 등) 고조파에 따라 다르게 되며, 권선에 인입되는 전류값에 따라 공극 자속분포는 일정하지 않고, 변화를 갖게 된다. 그림 6은 권선전류가 9차 고조파까지 포함하여 변화하는 경우의 히스테리시스 모터의 시간 고조파에 따른 순시루프를 보이고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 히스테리시스 모터는 고조파의 영향을 무시할 수 없음을 알 수 있다. 그림 7은 평균 토크의 실험과의 비교치이며, 등가회로법에 의한 계산보다는 매우 근사한 해를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 실제 실험치와의 약간의 오차는 마찰손 등의 자체부하 고려에 대한 부족으로 생각된다.

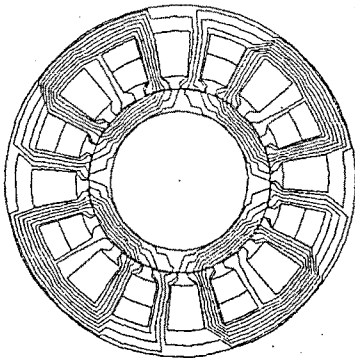


그림 5. 히스테리시스 모터의 등포텐셜

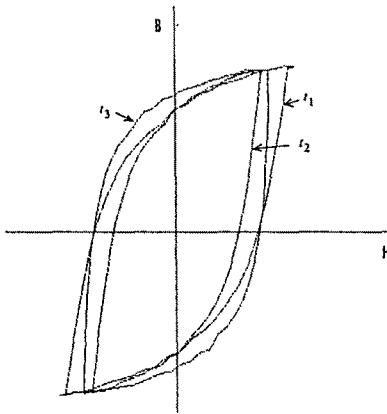


그림 6. 회전자 링의 시간에 따른 히스테리시스 루프

## 6. 결 론

히스테리시스 모터는 다른 영구자석 모터와 다르게 회전자의 상태가 기동때마다 달라질 뿐만 아니라, 회전자의 위치에 따라 히스테리시스 루프에 대응하여 그 자기적 성질이 다르게 나타난다. 따라서 기존 유한요소법으로는 이러한 히스테리시스를 고려할 수 없기 때문에 유한요소법에 의한 해석은 곤란하였다. 본 연구에서는 제시한 간단한 알고리즘을 이용하여 히스테리시스 모터의

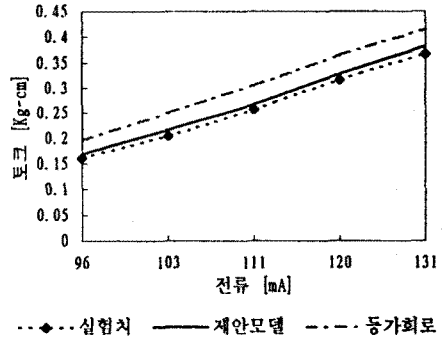


그림 7. 평균 토크

회전자 링의 자기적 상태를 고려하면서 모터의 유한요소 해석이 가능함을 보였고, 이로부터 모터의 시간 및 공간 고조파에 대한 해석을 가능하게 하였고, 실험적 검증을 통해 그 타당성을 보였다.

## 참고 문헌

- [1] 石川, 片岡 : “전압형 인버터 구동형 히스테리시스 전동기의 특성해석”, 日本電學誌 B 103, 311(昭58-1)
- [2] 湧井, 富田 : “히스테리시스 전동기의 특성에 미치는 고조파 자속밀도의 영향”, 日本電學誌 B 102, 25(昭57-1)
- [3] 홍선기, 정훈, 원중수, “Preisach 모델을 이용한 히스테리시스 모터 고조파 특성 시뮬레이션”, 대한전기학회 추계 학술대회 pp.5 - 8, 1988.
- [4] 홍선기, 원중수, “일반화된 히스테리시스 모델의 정량적 해석”, 대한전기학회 논문지 41 권 12 호, pp. 1369-1378, 1992.
- [5] 홍선기, 이상훈, 원중수, “자화의존 모델의 특성시뮬레이션”, 대한전기학회 논문지 제 42 권 6 호, pp. 9-17, 1993.

본 연구는 자동제어 특화 연구센터의 연구비 지원하에 이루어진 연구임