

**Pole shoe의 영향을 고려한 스위치드 릴럭턴스 전동기의 특성 해석**

장석명, \*박병임, 이성호, 성소영, 이종호\*, 최상규\*\*  
 충남대 전기공학과, 충북 과학대 전기공학과\*, 한국 기계 연구원\*\*

**Performance Analysis of Switched Reluctance Motor with considering pole shoe**

S.M.Jang, \*P.I. Park, S.H. Lee, S.Y. Sung,  
 \*Chung-Nam National Univ.C'TECH\*, KIMM\*\*

**Abstract** - The paper presents design procedure and characteristics of Switched Reluctance Motor(SRM). SRM is capable of application to various field because of its constructional advantages. In design procedures, pole shoe will be considered. First step, overall design will be accomplished using PC-SRD. Then, inductance and torque characteristics is inspected with motor geometries by FEA.

**1. 서 론**

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor:이하 SRM)는 1838년 영국의 Glasgow - Edinburgh간의 기차에 사용된 이래, 간단한 구조와, 높은 효율, 냉각의 용이성, 초고속성, 낮은 제작비용 및 넓은 범위의 가변속 구동이 가능하다는 장점으로 인해 다양한 분야에 적용하기 위한 연구가 이루어져 왔다. 주 응용 분야로는 잠수함의 추진, 혹은 항공기 엔진의 연료 펌프용, 가스 터빈 엔진의 기동/발전용을 위한 특수한 목적 외에도 에어컨 세탁기 등의 가전기와 각종 산업용 기기용 등이 있다. 특히, 구조적인 장점으로 인해, 열악한 환경에서도 장시간 운전이 가능하여 초기 SRM들이 전기 자동차용으로 실제로 설계·제작되기도 하였다.

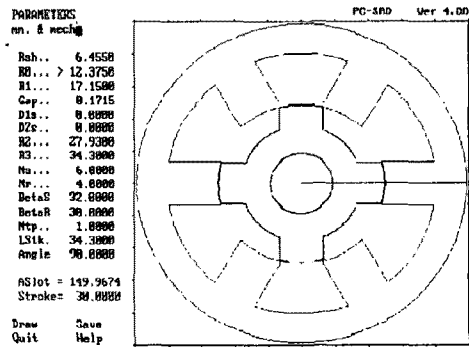
SRM은 동기형 릴럭턴스 전동기와 마찬가지로 전자기토크 보다는 릴럭턴스 토크를 이용하는 VR(Variable Reluctance Motor) 전동기로서, 1980년대 전력 전자 기술의 발달과 더불어 급속히 발전하였다. 1983년, 1984년에는 Grasby Control Co.와 French, Ray 의 의해 범용 Oulton SRM과 전인용 SRM이 개발되었고, 이후, Miller, Stephenson, Lipo등에 의해 고효율화, 인버터 회로 설계, 센서리스 구동, 고성능 저 소음화에 대한 연구가 이루어지고 있다. 특히, SRM의 주 단점인 소음 진동에 대한 분석과 이를 억제하기 위한 새로운 제어 방식 및 드라이브 설계 분야에 많은 진척이 있었다.

국내에서는 주로 전자기 가진력에 의한 고정자의 변위 해석이나, 소음 진동을 저감시키기 위한 새로운 여자 방식 및 제어 방법에 대한 연구가 이루어져 왔으나, 설계 관련 연구는 부족하다. 따라서 본 논문에서는 고속 회전용 SRM을 설계하고 설계된 모터의 특성 해석을 수행하여, 전류, 토크 등 제반 특성을 검토하였다. 설계과정에 필요한 기본 이론 식은 TJE MILLER가 제안한 방법을 참고하였다[1]. 또한 SRM 설계 프로그램인 PC-SRD를 이용하여 최적의 제어변수들을 찾아내었고, 설계 전동기의 정 특성을 얻기 위해 2D Finite Element Analysis(이하 FEA)를 수행하였다. 이때, pole shoe를 고려하여, 없는 경우와, 회전자극에만 있는 경우, 고정자와 회전자 극 양측에 모두 있는 경우 전동기 특성에 미치는 영향을 고찰하였다.

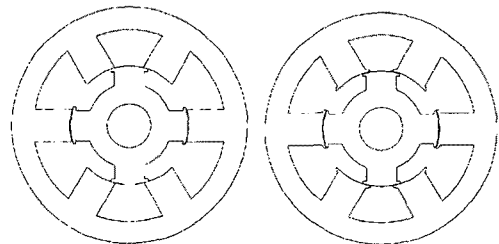
**2. SRM 설계 및 해석**

**2.1 설계 모델 및 사양**

그림 1과 표 1에 각각 pole shoe를 고려하지 않은 경우와, 회전자와 고정자에 pole shoe를 고려한 해석 모델 및 설계 사양을 나타내었다. High performance servo 전동기의 TRV(Torque per Rotor Volume: 회전자 체적당 토크)는 15~50 {kNm/m<sup>3</sup>}의 값을 갖는데, 설계 모델에서는 15로 선정하였다. TRV는 냉각이 좋지 않은 소형 전동기의 경우에는 1~5, 항공기와 같이 고성능을 요구하고, 강제 냉각 방식을 채택하는 경우 30이상의 값을 가진다. 권선의 전류 밀도는 7.8~10.9(A/mm<sup>2</sup>)범위의 팬 냉각 방식을 채택한다. TJE Miller가 제안한 방법에 따라 설계한 결과를 표 2에 제시하였다. 동손을 줄이기 위해서는 슬롯이 커야 하는데, 슬롯 폭을 늘리기 위해, 고정자의 치폭이 회전자의 치폭 보다 작아야 한다. 밀러가 제안한 방식에 따라 설계한 결과가 표 2에 정리되어 있다.



(a)



(b)

(c)

그림 1. 해석 모델 단면도

- (a) Pole shoe를 고려하지 않은 설계 모델
- (b) 회전자에만 pole shoe를 고려한 경우
- (c) 고정자와 회전자에 pole shoe가 있는 경우

표 1. 설계 모델의 사양

파라미터	기호	값	단위
출력	$P$	1	Hp
회전자 체적당 토크	$TRV$	15	kNm/m <sup>3</sup>
회전자 직경에 대한 stack 길이의 비	$L_{stk} / D_r$	1	
회전자 극수	$N_r$	4	No.
고정자 극수	$N_s$	6	No.
DC 공급 전압	$V_s$	240	V
상수	$m$	3	No.
정격 회전속도	$n$	15,000	rpm
전류밀도	$J_{rms}$	6-8	A/mm <sup>2</sup>
코일 직경	$D_w$	0.8	mm

표 2. 3상 6/4 SRM 설계 파라미터

파라미터	심벌	값	단위
고정자 지름	$D_s$	68.6	mm
회전자 지름	$D_r$	34.3	mm
stack 길이	$L_{stk}$	34.3	mm
overhall 길이	$L_e$	57.22	mm
공극	$g$	0.172	mm
고정자 극호	$\beta_s$	32	°
회전자 극호	$\beta_r$	30	°
고정자 치폭	$t_s$	9.55	mm
회전자 치폭	$t_r$	8.88	mm
고정자 슬롯 깊이	$d_s$	10.609	mm
회전자 슬롯 깊이	$d_r$	4.775	mm
고정자 요크 두께	$y_s$	6.37	mm
회전자 요크 두께	$y_r$	5.92	mm
축 지름	$D_{sh}$	12.91	mm

2.2 PC-SRD를 이용한 설계 모델의 해석 결과

표 2의 파라미터들을 이용하여 설계 모델의 토크, 전류 파형 및 인덕턴스 및 효율 등의 특성 해석에 사용된 PC-SRD는 이용해 대략적인 설계 및 설계 모델의 제반 특성을 알아볼 수 있도록 개발된 프로그램이다.

본 설계 모델은 고속용 회전기기로서, 스위칭 주파수가 높아 철손이 급격히 증가하므로, 가공비를 고려하여 가장 얇은 성층 철심을 사용해야 한다. 일반적인 철심 재료로서 cobalt-iron(0.15243mm), silicon steel(0.3556mm)를 사용하는데, 특히 cobalt-iron은 400Hz로 운전하는 항공 발전기에 이용되기도 한다. 효율, 손실 등의 특성은 철심 재료에 따라, 크게 변화하는데, 본 논문에서는 3mm Silicon Steel의 B-H data를 입력하여 시뮬레이션을 수행하였다. PC-SRD의 주 변수는  $S_{fill}$ ,  $N_p$ ,  $V_s$ ,  $DuCy$ , RPM, iHi, ThO, ThC, Bm으로서, 각각 점적률, 상당 권선수, DC 입력전압, 듀티 사이클, 속도, 제한 전류치, 턴온각, 최대 자속 밀도를 나타낸다. 점적률은 권선 직경을 결정하고, 다른 변수들은 상 전류 및 토크 파형, 효율, 토크 리플 등의 특성에 영향을 미친다. ThO-ThC를 Dwell angle이라 하고, 이 값은 dead points의 발생을 막기 위해, stroke angle(6-4 모델의 경우 30°)이상이 되어야 한다. 그림 2에 시뮬레이션 결과로 얻은 전류, 토크 파형을 나타내었다.

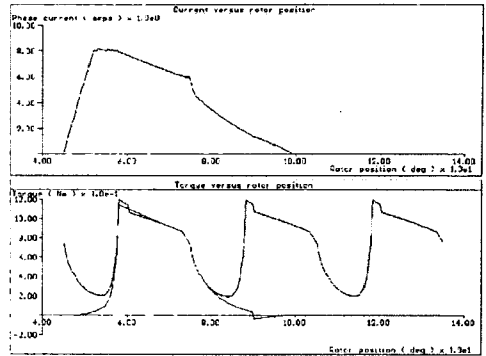
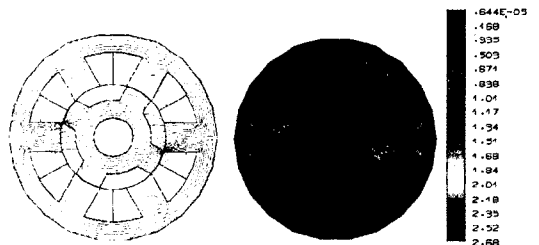


그림 2. 전류 및 토크 파형

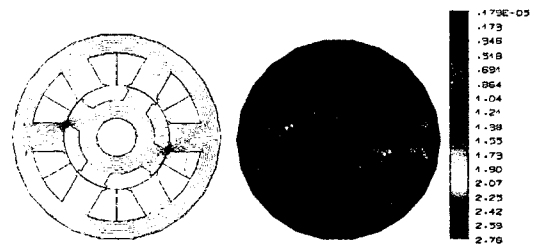
2.3 유한요소법의 의한 설계 모델 해석

PC-SRD 시뮬레이션 결과를 FEA 결과와 비교하여 타당성을 입증하였다. 해석 시 인가한 전류는 피크 치가 8A인 펄스 전류이다. 전류 펄스는 각 상에 연속적으로 공급되고 전동기 동작을 위해 각 펄스는 가장 인접한 회전자극이 여자된 고정자극을 향해 정렬되도록 한다.

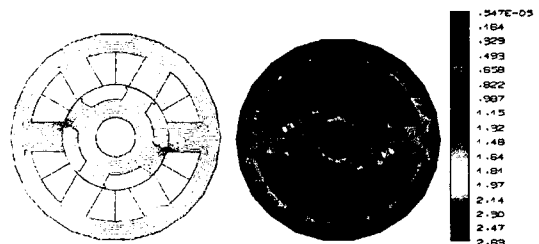
그림 1의 세 가지 해석 모델의 자속 분포 및 자속 밀도 분포는 그림 3에 제시하였다. PC-SRD와 FEA 결과로 얻은 회전자 위치에 따른 토크 변화를 그림 4에 나타내었다. 다소 값에 차이를 보이는데, PC-SRD의



(a) pole shoe를 고려하지 않은 경우



(b) 회전자에만 pole shoe를 고려한 경우



(c) 고정자, 회전자에 pole shoe를 고려한 경우

그림 3. pole shoe 여부에 따른 자속 및 자속밀도분포

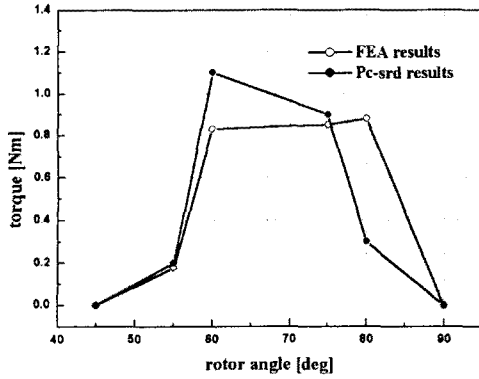


그림 4. PC-SRD와 FEA 해석 결과

입력 파라미터 중 ThO, ThC에 따라 토크 값에 다소 차이를 보인다.

#### 2.4 Pole Shoe의 영향 고려

Pole shoe는 회전자극이 고정자극에 오버랩 되기 시작할 때 포화되면서 토크 임펄스를 완화시키는 역할을 하는데, 이 Pole shoe가 토크 특성에 미치는 영향을 그림 1의 세 모델을 기준으로, FEA를 이용해 알아보았다. 그림 5와 6에 회전자 위치에 따른 인덕턴스 및 토크 특성을 나타내었다. 그림 5의 회전자극이 고정자극에 정렬되는 90° 위치로 갈수록 인덕턴스는 증가한다. 그림 6의 45°, 90°의 반정렬 상태와 정렬 상태에서는 힘이 균형을 이루어 거의 토크가 발생하지 않는다. 그림 5, 6의 noshoe, rotorshoe, allshoe는 그림 1의 세 가지 경우를 의미한다. 그림의 오버랩 위치에서 토크는 pole shoe가 없는 경우가 가장 크고, pole shoe를 고려한 경우에는 그리 큰 차이가 없다. 정렬/비정렬 인덕턴스의 비는 큰 차이는 없으나 pole shoe가 없는 경우 비정렬 인덕턴스가 작으므로 세 경우 중 가장 크다. 회전자극의 pole shoe 폭의 변화에 따른 특성 변화는 그림 7, 8에 나타내었다.

극의 pole shoe 존재 여부 및 그 폭의 변화에 따른 해석 결과, 극에 pole shoe가 없는 경우 정렬 인덕턴스 값에는 거의 차이가 없으나, 비정렬 인덕턴스의 값이 더 작으므로, 근소한 차이로 인덕턴스의 비와 토크가 크다. Pole shoe의 폭에 따른 해석 시, 폭이 가장 좁은 경우의 인덕턴스의 비와 토크가 크다. 그러나, pole shoe의 여부나 폭에 따른 인덕턴스 및 토크 특성은 각 경우 모두 매우 근소한 차이를 보인다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 기본 특성 식과 설계 지침에 의해 SRM을 설계하였고, 이를 FEA 결과와 비교 검토하였다. 고정자극과 회전자극에 pole shoe의 존재 여부 및 그 폭에 따른 전동기 특성의 변화를 알아보았다. 해석 결과 pole shoe가 없는 경우 인덕턴스의 비와 토크가 약간 크나, 세 경우 모두 근소한 차이를 보이므로 스위칭 시 토크 임펄스에 의한 소음 진동 저감 측면에서의 역할을 기대할 때 pole shoe를 고려하는 것도 한 방법이라 사료된다.

#### (참고 문헌)

- [1] TJE MILLER, "Switched Reluctance Motors and Their control", Magna Physics Publishing and Clarendon Press · Oxford, 161-180, 1993년
- [2] 장석명 외 4명, "스위치드 릴럭턴스 모터의 설계와 특성 시뮬레이션", 하계학술대회 논문집, A권, 297-299, 1997년

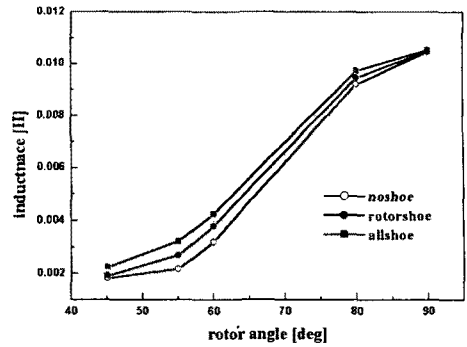


그림 5. Pole shoe가 인덕턴스에 미치는 영향

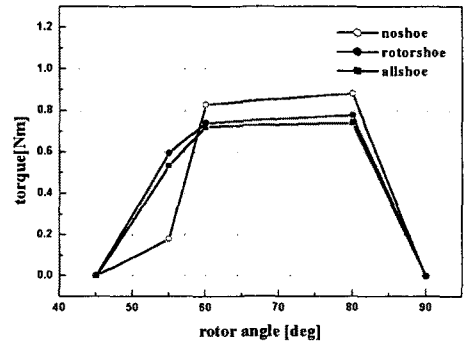


그림 6. Pole shoe가 토크 특성에 미치는 영향

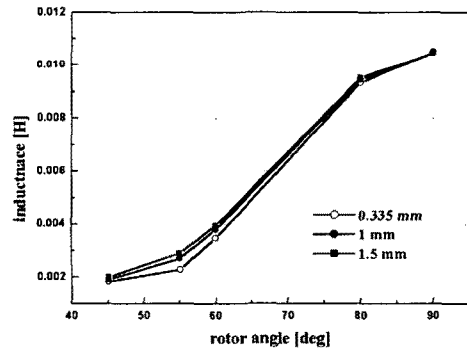


그림 7. Pole shoe의 폭에 따른 인덕턴스 변화

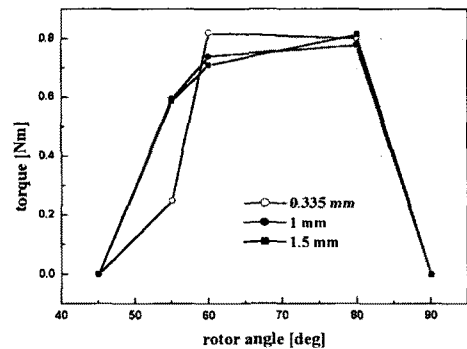


그림 8. Pole shoe의 폭에 따른 토크 변화