

## 스위치드 릴럭턴스 전동기의 권선 방식과 구동 방식에 따른 철손 비교

이지영, \*이병국, 손도, 홍정표, \*\*허진

창원대학교 전기공학과, 한국전기연구원\*, 전자부품연구원\*\*

### A Comparison of Core Losses according to Winding Methods and Switching Sequence in Switched Reluctance Motor

Ji-Young Lee, \*Byoung-Kuk Lee, Sun Tao, Jung-Pyo Hong, and \*\*Jin Hur

Changwon National University, Korea Electrotechnology Research Institute, Korea Electronics Technology Institute\*\*

**Abstract** - This paper presents a comparison of core losses for the four cases of Switched Reluctance Motors (SRM) with different winding method and switching sequence. With concentrated winding SRM, two kinds of switching sequence are considered for one-phase exciting and two-phase simultaneously exciting driving. With both distributed winding and toroidal winding, two-phase exciting driving is considered. The ratio of calculated core losses to input power is able to be used a guide or reference for deciding the winding method and switching sequence of in the initial design stage of SRM.

### 1. 서 론

영구자석을 사용하지 않고, 견고하고 간단한 구조로 인해 스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motors, 이하 SRM)는 산업 응용 분야에 많은 주목을 받고 있다. 치 슬롯 구조와 고정자 권선만으로 구성되는 SRM은 다른 전동기에 비해서 생산 비용이 저렴한 편이나, 기본 드라이버인 비대칭 컨버터는 상대적으로 드라이버 구성 가격이 높을 뿐만 아니라 전동기의 특성을 향상시키는 데 한계를 가진다. 따라서 드라이버 자체 생산 비용을 저감하면서 전동기의 특성을 향상시키기 위하여 드라이버뿐만 아니라 전동기 권선 방식을 바꾸어 운전 시퀀스를 조절하는 데 대한 연구가 진행되고 있다 [1-3]. 본 논문에서는 SRM에 대한 이러한 연구의 한 부분으로 전동기의 권선방식과 구동방식이 바뀌었을 때, 이에 따른 특성 변화 중 철손 변화에 대해서 비교 분석 하고자 한다. 전동기의 권선 방식과 구동방식에 대한 조합은 여러 가지가 있을 수 있겠으나, 본 논문에서는 다음의 4 가지 경우의 조합에 대해서 검토하였다: 1) 집중권을 한 상 씩 스위칭, 2) 집중권을 두 상 씩 스위칭, 3) 분포권에서 두 상 씩 스위칭, 4) 고정자 요크에 권선을 한 토로이달(Toroidal) 권선 방식에서 두 상 씩 스위칭.

해석적으로 철손을 산정하는 방법으로는 자속밀도 변화를 이상적으로 정형화된 형태로 고려하는 [4, 5]의 방법과, 철손데이터와 유한요소법(Finite Element Analysis Method)을 이용하여 고조파가 함유되어 왜곡되는 자속밀도 변화를 고려할 수 있는 [6, 7]의 해석 방법이 있는데, 여기에서는 후자의 방법을 이용하였다. 그러나, 전압원 구동과 전류원 구동으로 크게 구분되는 특성 해석 방법에 있어서는, 실제적인 운전 방법에서 사용되는 전압원 구동대신, 일정한 전류파형을 입력하는 전류원 구동 방식을 택했다. 즉, 간단한 상대적 비교를 위해서 이상적인 구형과 전류가 입력되는 경우에 대해서 그 자기적인 특성해석을 수행하였다.

따라서, 본 논문의 구성은 다음과 같다. 앞서 제시한 4 가지 경우를 4개의 해석 모델로 구분하여, 각각의 운전 방식의 차이를 보이고, 이상적인 구형과 전류가 인가되었을 때 회전자의 이동에 따른 특정 요소에서의 자속밀

도 변화와 그에 대한 주파수 분석 결과를 먼저 비교하였다. 자속밀도의 시간적 변화가 모든 요소에서 동일한 주기로 나타나는 브러시리스 전동기[6]와는 달리, 권선방식이나 구동 방식에 따라서 자기회로 부분별 자속밀도의 변화 주기가 다른 SRM[4, 5]의 경우를 고려하여 철손량을 산정하고, 이를 입력에 대한 값으로 환산하여 비교함으로서, 권선방식과 구동방식의 차이가 철손량에 미치는 영향을 비교, 분석하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 해석 모델

그림 1과 그림 2는 본 논문에서 비교하고자 하는 SRM의 권선방식과 구동방식에 대해 조합된 4가지 경우에 대한 것이다. SRM의 기본적인 드라이버인 비대칭 컨버터를 사용하는 경우가 그림 1(a)로서 집중권 구조에 한 상씩 턴-온 되는 그림 2(a)와 같은 시퀀스를 가진다. 그림 1(b) 또한 집중권 구조를 가지나, 그림 2(b)와 같은 여자 시퀀스를 고려하여 기자력 여자 시 자로가 일정하게 형성되도록 권선의 방향이 그림 1(a)에 비해서 바뀌었다. 그림 1(c)와 (d)는 집중권과 토로이달 권선을 나타낸 것으로서, 이는 각각 그림 2(c), 2(d)와 같은 시퀀스로 구동된다.

이상의 권선 방식과 구동방식의 조합에 의한 4가지 경우를 4개의 해석 모델로 구분했을 때, 사양 및 해석 조건을 정리하면 표 1과 같다.

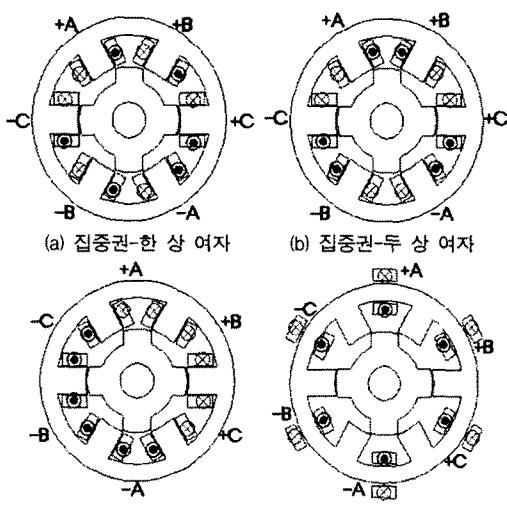


그림 1. 권선 방식과 구동방식에 따른 4가지의 모델

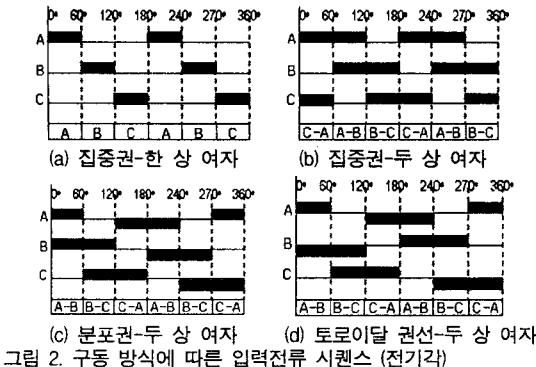


그림 2. 구동 방식에 따른 입력전류 시퀀스 (전기자)

표 1 SRM 해석 모델의 사양

모델 명	CSRM1	CSRM2	DSRM	TSRM
고정자/회전자 극수		6/4		
입력전류		1A		
자성재질		S18		
권선방식	집중권	집중권	분포권	토로이달
구동방식 (입력전류 시퀀스)	한상여자, 그림2(a)	두상여자, 그림2(b)	두상여자, 그림2(c)	두상여자, 그림2(d)

## 2.2 해석 이론

유한요소법과 철손데이터를 이용하여 철손을 산정하는 경우의 해석 순서는 그림 3과 같고, 이에 대한 설명과 이를 자기회로로 각 영역별로 자속밀도 변화 주기가 다른 SRM에 적용하는 경우에 대한 자세한 사항은 다음과 같다.

### 2.2.1 철손 산정 방법

#### 가. 유한요소 해석 (Finite Element Analysis)

자계 해석의 대표적 방법인 등가자기회로법과 유한요소 해석법 중, 유한요소 해석법을 이용하는 경우가 해석 모델의 각 요소에서 시간에 따른 자속밀도 분포를 보다 정확하게 산정할 수 있다. 이 때, 자속밀도는 반경 (radial) 방향과 접선(tangential) 방향 성분의 각각에 대한 분포를 구한다.

#### 나. 이산 푸리에 변환

각 요소에서의 자속밀도 분포를 구한 후, 각 요소 별 자속밀도 분포를 이산 푸리에 변환(DFT)을 통해서 각 고조파 성분에 따른 자속밀도의 크기를 측정(1)과 같이 구한다.

$$B_{pv} = \sum_{n=0}^N B_p(n) e^{j2\pi nv/N} \quad (1)$$

여기서,  $v$ 는 고조파 차수,  $B_{pv}$ 는  $v$ 번째 고조파에 대한 자속밀도의 최대값,  $B_p$ 는 각 시간에 따른 요소에서의 자속밀도 값을 각각 나타낸다.

다. 각 요소에서 자속밀도분포의 주파수에 따른 철손 합 각 고조파 주파수에 따른 자속밀도의 크기를 구한 후 주파수에 따른 자속밀도-철손 데이터로부터 각 요소에서 고조파 성분에 따른 철손의 합을 구한다. 여기서,  $W_{ne}$ 는  $i$ -번째 요소,  $v$ -차 고조파 성분의 철손을 나타내며,  $W_{me}$ 는  $i$ -번째 요소에서 고조파를 고려한 철손 성분을 나타낸다. 본 논문에서 SRM에 적용한 자속밀도-철손 데이터는 S18재질의 철손데이터로서 그림 4와 같다. 자속밀도와 주파수의 함수로 나타나 있는 제한된 데이터를 스플라인 보간을 이용하여 보정해서 사용한다.

라. 전 요소에 대한 철손의 합으로부터 전체 철손 계산 각 요소에서 고조파 성분을 고려한 철손을  $m$ -개의 전 요소에 대한 합을 통하여 SRM의 전체 철손  $W_t$ 를 구할 수 있다.

### 2.2.2 SRM 철손 산정

앞서 언급한 바와 같이 SRM은 각 부분별 자속밀도의 변화 주기가 다르다. 자속밀도의 양상은 대표적으로 고정자 요크와 극, 회전자 요크와 극의 4개 부분으로 나누어 볼 수 있는데 [4, 5], 서로 다른 자속밀도 변화의 주기는 고정자와 회전자의 두 부분으로 구분된다. 따라서, 고정자와 회전자 각각에 대해서 철손을 산정하고 동일 속도에 대해서 합산하여 속도 변화에 따른 철손변화 양상을 보았다.

SRM의 출력특성은 스위칭 턴-온(turn-on) 각에 의해서도 많은 차이를 가진다. 철손에 대한 특성도 [5]에서 보이는 바와 같이 달라지므로, 본 논문에서는 각 모델의 운전 시점을 그림 5에 정리한 각각의 인덕턴스 프로파일을 기준으로 0도 되는 지점에서 스위칭을 턴 온하여, 6/4 SRM의 기본적인 도통각인 30도(기계각) 구간동안을 유지하였다.

스위칭 구간을 비교할 수 있는 각각의 인덕턴스 프로파일은 4개 모델의 고정자와 회전자의 상대위치가 그림 1과 같을 때를 0도로 하고, 전동기의 자기회로가 포화되지 않도록 입력 전류가 1A에 대해서 본 것이다 (5A까지 각 모델의 인덕턴스의 크기는 동일하다). 동일한 SRM에서 권선 방식에 따라서 인덕턴스 프로파일이 달라진 것을 확인 할 수 있으며, 이는 자기회로의 변화를 의미하고, 따라서 철손 또한 달라질 것을 예측할 수 있다.

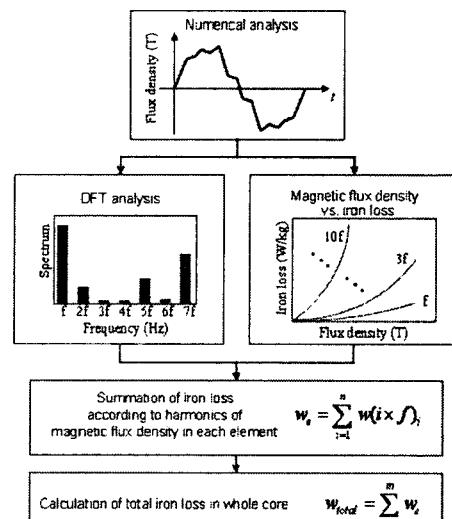


그림 3. 철손 산정 순서

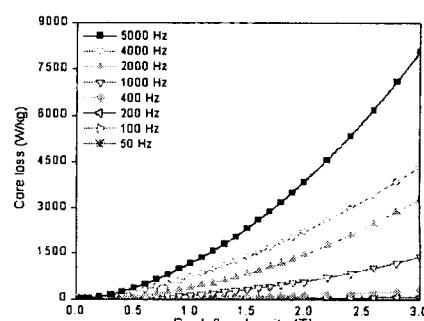


그림 4. 자성 재질 S18의 철손 데이터

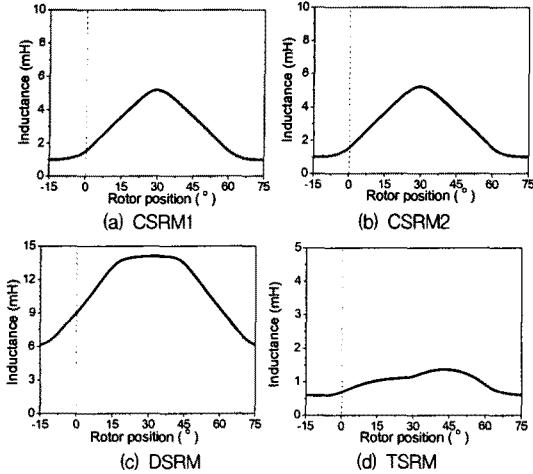


그림 5. 각 모델별 인덕턴스 프로파일

### 2.3 요소의 자속밀도 변화

4개 모델에 대해서 각각의 기계적 치수와 상의 직렬 턴수는 동일하나 권선과 여자 방식이 다르므로, 동일한 입력전류를 인가하더라도 기자력과 전체 자속의 변화 양상은 달라지게된다. 따라서, 철손을 산정하기에 앞서, 각 모델을 고정자 요크와 국, 회전자 요크와 국의 4개 부분으로 나누어, 그림 6과 같이 4개의 대표 요소에서의 자속밀도 변화를 보았다.

그림 7은 1A의 입력 전류에 대해서 회전자의 이동에 따른 대표 요소에서의 자속밀도 변화를 본 것으로, 각 요소에서의 자속밀도는 포화가 되지 않을 정도의 기자력이 인가된 상태이므로 아주 적은 값을 가진다. 따라서 상대 비교를 편리하게 하기위해서 그림 7은 가장 높은 자속밀도 값을 가지는 DSRM의 최대값을 1로 보고 정리한 것이다.

회전자 1회전당 자속밀도의 변화주기는 표 2에서 비교해 볼 수 있는데, 자속밀도 주기가 부분별, 그리고 모델별로 달라지는 것을 확인 할 수 있다. [5]에서는 이러한 자속밀도의 변화 주기를 예측하기 위하여 영역별 자속변화에 대한 주파수를 공식화 하였으나, 이는 본 논문에서의 CSRM1에만 국한된다. 최근에는 유한요소 해석을 통해서 요소별 자속밀도 변화양상을 직접적으로 산정하여 예측할 수 있으므로, 이러한 주파수 산정에 대한 이론적인 설명은 생략하고, 각 모델별 서로 다른 주파수를 가진다는 것만을 비교하였다.

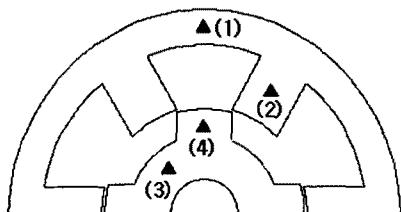


그림 6. 4개의 대표 요소: (1)고정자 요크, (2)고정자 국, (3)회전자 요크, (4)회전자 국

표 2. 1회전 당 자속밀도 변화 주기

	요소(1): 고정자요크	요소(2): 고정자극	요소(3): 회전자요크	요소(4): 회전자극
CSRM1	4	4	1	1
CSRM2	4	4	3	3
DSRM	2	2	3	3
TSRM	2	2	6	6

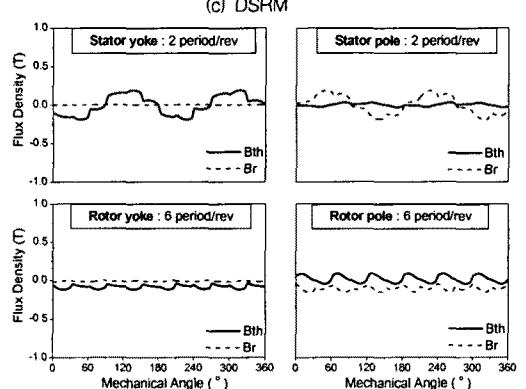
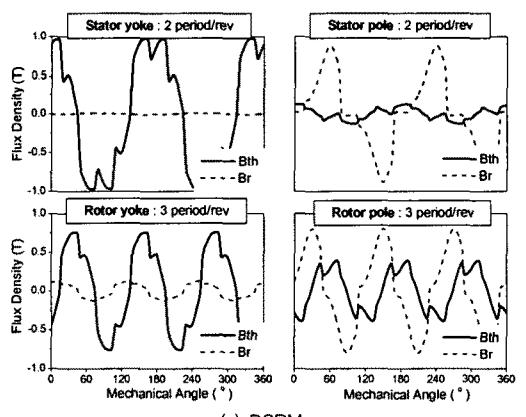
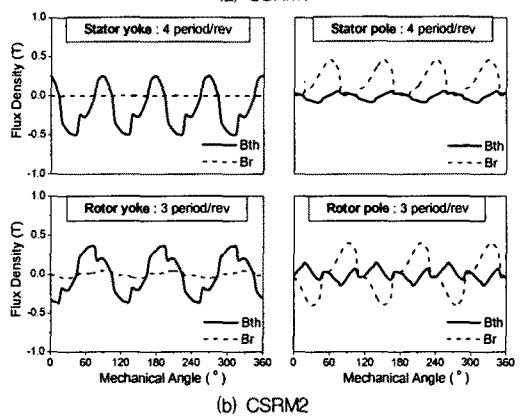
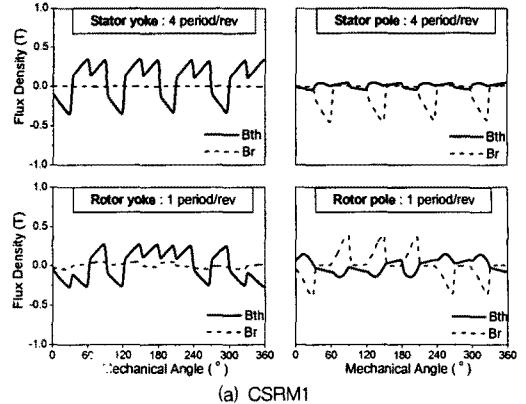


그림 7. 회전자 이동에 따른 대표 요소에서의 자속밀도 변화

## 2.4 철손 산정 결과

그림 8은 각 모델별 모든 요소에 대해서 자속밀도의 반경(radial) 방향 성분  $B_{rth}$ 과 접선(tangential) 방향 성분  $B_{tth}$ 에 대해서 고조파 분석을 한 것 중에서 고정자 요크의  $B_{tth}$ 에 대해서 모델별로 비교한 것이다. 기본파의 크기를 100%로 보았을 때 고조파들의 상대적인 크기를 보고, 모델별 비교를 위해서 기본파 성분에 대해 전 고조파 왜율을 나타내는 THD(total harmonic distortion)[8]를 산정하였다.

각 모델에 대한 철손을 산정하여 속도 변화에 따라 그림 9에서 비교하였다. 각 모델에 따라, 그리고 고정자와 회전자자의 자속밀도 파형의 주파수가 다르므로 속도 변화에 따른 철손량의 증가가 다르게 나타난다. 특히 CSRM1에서는 고정자에서의 철손량이 절대적으로 크나, TSRM에서는 오히려 회전자에서의 철손량이 더 크게 나타나고 속도에 따라 그 비중이 달라진다. 그러나, 그림 9의 철손량은 동일 입력이 아닌, 동일 전류량에 대해서만 평가한 것이므로 동일 입력에 대한 평가를 위해서 입력 계산이 필요하다. 여기서 입력은 출력과 손실의 합으로 산정하였다. 그림 10은 전류 1A에 대해 각 모델의 토크를 본 것으로, 특히 그림 10 (b)에서는 CSRM1의 토크를 100%로 보고 각 모델의 평균토크를 비교하였다.

속도가 2000rpm일 때, 그림 10에서 산정한 평균토크를 고려하여 출력을 계산하고, 철손은 그림 9에서의 동일 속도 값을 취하였으며 (그림 11(a)), 저항손은 입력 전류 1A에 대해 CSRM1에 대해서는 상 저항을, 나머지 모델에 대해서는 선간 저항을 이용하여 저항과 전류 제곱의 곱으로 동손을 산정하였다. 이렇게 산정한 출력, 철손, 동손의 합을 입력으로 하여, 입력에 대한 철손량을 본 것이 그림 11과 같다.

## 3. 결 론

표 3은 그림 8, 9, 10, 11에서 비교한 내용을 요약한 것이다. 동일 전류에 대해 철손을 비교했을 때의 철손은 CSRM1이 가장 크고, CSRM2가 가장 적은 값을 가지나, 동일 입력에 대해서 철손을 비교하게 되면, DSRM의 철손량이 가장 적은 것으로 평가된다.

이상의 비교 결과는 SRM 설계 시 시스템에 효과적인 권선방식과 구동방식을 결정하는데 하나의 지표로 사용될 수 있을 것이다.

표 3. 모델별 조건에 따른 크기 순서

	CSRM1	CSRM2	DSRM	TSRM
고정자요크 $B_{tth}$ 의 THD	1	2	3	4
속도별 평균토크	2	3	1	4
철손 / 저항손	1 / 2	4 / 1	2 / 1	3 / 1
입력 당 철손	1	3	4	2

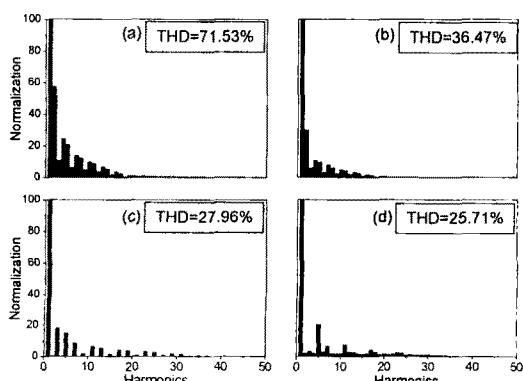


그림 8. 고정자 요크에서의  $B_{tth}$  변화 파형에 대한 고주파 분석  
(그래프 레이블 : (a)CSRM1, (b)CSRM2, (c)DSRM, (d)TSRM)

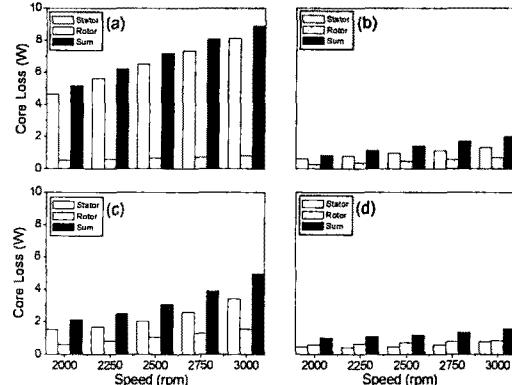


그림 9. 속도에 따른 모델별 철손 변화  
(그래프 레이블 : (a)CSRM1, (b)CSRM2, (c)DSRM, (d)TSRM)

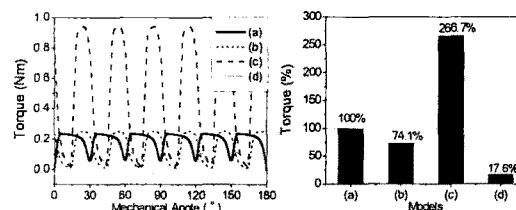


그림 10. 모델에 따른 토크 특성:(좌)회전자 이동에 따른 토크 변화, (우)모델에 따른 평균토크  
(그래프 레이블 : (a)CSRM1, (b)CSRM2, (c)DSRM, (d)TSRM)

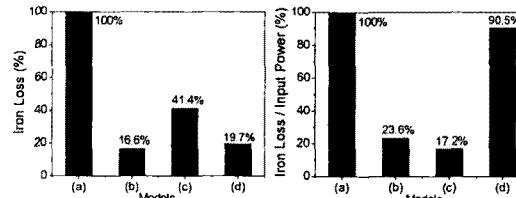


그림 11. 철손 비교: (좌)산정된 철손량, (우)입력에 대한 철손량  
(그래프 레이블 : (a)CSRM1, (b)CSRM2, (c)DSRM, (d)TSRM)

## [참 고 문 헌]

- [1] TJE Miller, *Switched Reluctance Motors and Their Control*, Magna Physics Publishing and Clarendon Press, OXFORD, 1993
- [2] 안진우, 스위치드 릴럭턴스 전동기, 오성미디어, 2001
- [3] Ji-Young Lee, Byoung-Kub Lee, Jung-Pyo Hong, "A Comparative Study of Switched Reluctance Motors with Conventional and Toroidal Winding," IEMDC2005 in CD, 2005
- [4] Yoichi Hayashi and Timothy J.E.Miller, "A New Approach to Calculating Core Losses in the SRM," IEEE Trans. on Industry Applications, vol.31, No. 5, pp1039-1046, September/October 1995
- [5] Peter N.Materu and Ramu Krishnan, "Estimation of Switched Reluctance Motor Losses," IEEE Trans. on Industry Applications, vol.28, No. 3, pp668-679, May/June 1992
- [6] Sang-Ho Lee, Ji-Young Lee, Jung-Pyo Hong, Jin-Hur, Ha-geyeong Sung, "3D Core Loss Calculation in BLDC Motor made of SMC Material," International Conference on Electrical Machines and System, in CD, 2004
- [7] Hyuk Nam, Kyung-Ho Ha, Jeong-Jong Lee, Jung-Pyo Hong, and Gyu-Hong Kang, "A Study on Iron Loss Analysis Method Considering the Harmonic of the Flux Density Waveform Using Iron Loss Curves Tested on Epstein Samples," IEEE Trans. on Magnetic, pp1472-1475, May, 2003
- [8] 박송배, 제3판 신회로이론, 문운당