

### 3상 SR Drive의 극수에 따른 특성 비교

황형진, 이동희\*, 안진우  
 경성대학교, OTIS-LG\*

### A Comparison of SRM Characteristics according to Pole Combination

Hyung-Jin Hwang, Dong-Hee Lee\*, Jin-Woo Ahn  
 Kyungsung Univ., \*OTIS-LG

ABSTRACT

This paper shows a characteristics analysis of Switched Reluctance Motor(SRM) for design optimization. The static and dynamic characteristics are analyzed by simulation case of 6/4 and 12/8 pole machine. The torque, efficiency and acoustic noise are tested to compare drive performances.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기 (Switched Reluctance Motor : SRM)는 전자 에너지 변환 기구에서 릴럭턴스 토크를 극대화시킨 전동기구로 전력용 스위칭 전원에 가장 적합한 형태의 전동기구이다<sup>[1]</sup>. 본 논문은 SRM의 적용에 앞서, 극수가 다른 전동기의 특성을 분석 비교함으로써 적절한 적용을 할 수 있는 방향을 제시함에 목적이 있다. SRM의 자극 구성은 다양한 극수비를 가진다. 6/2극, 6/4극, 6/8극, 6/12극, 12/10극, 12/8극 등의 전동기가 있지만, 6/4극과 12/8극을 제외한 전동기는 실제 적용에 있어서 인덕턴스 비가 낮고 스트로크 당 에너지변환의 점진적 감소 때문에 응용빈도가 낮다<sup>[2]</sup>. 8/6극 SRM의 경우 4상 구동을 필요로 하므로 제어기의 경제적 부담이 상대적으로 큰 단점이다<sup>[2]</sup>. 이에 본 논문에서는 3상 구동의 6/4극 SRM과 12/8극 SRM에 대하여 특성을 해석하고자한다. 전동기의 특성 해석을 위해 정격 3.5[kW]급의 6/4극 SRM과 12/8극 SRM을 설계하였으며, 시뮬레이션을 통해 두 전동기의 특성을 해석하였다. 6/4 SRM과 12/8 SRM의 토크, 출력 특성 및 손실에 대한 해석 및 소음 특성을 비교하였으며 해석을 위하여 유한 요소법(Finite Element Method : FEM)을 이용하였고, 이 결과를 바탕으로 각 전동기의 장·단점과 적용 대상에 대한 효용성을 시뮬레이션을 통해 검증하고

자 한다.

2. 본 론

2. 1 SRM의 설계사양

특성 해석을 위해 6/4극 SRM과 12/8극 SRM의 설계는 고정된 체적 내에서 효율이나 토크를 염두에 두고 극호각이나 극의 길이, 요크 두께 등을 조정하며, 최적의 결과를 도출하는 방향으로 수행되었다.

표 1. 전동기의 제원

Table 1. The specifications of SRM

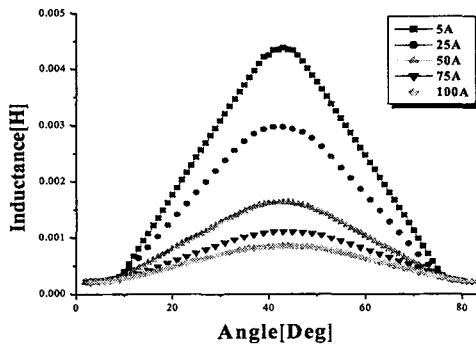
전동기	6/4극		12/8극	
	고정자	회전자	고정자	회전자
외경 [mm]	138	76	138	76
슬롯깊이 [mm]	14.75	11	16.75	11
요크두께 [mm]	16	11	14	11
극호각 [deg.]	34	36	14	16
극당턴수[turn]	20		11	
속도 [rpm]	6000			
축지름 [mm]	32			
공극 [mm]	0.25			
축방향길이[mm]	100			
철심재질	s18			

표 1은 SRM의 설계사양을 나타내었다. 두 전동기는 3상의 6/4극, 12/8극으로 정격출력 3.5[kW], 정격전압 72[V], 정격속도 6000[rpm]이며, 공극과 회전자 및 고정자의 외경은 동일하게 설계하였다.

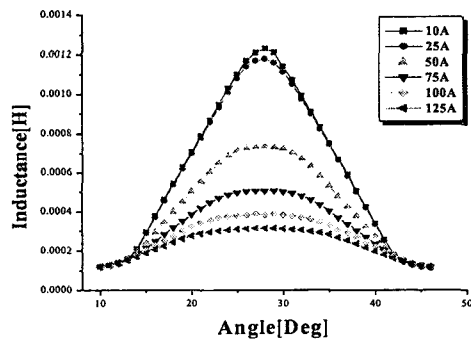
2. 2 SRM의 토크 및 출력 특성

그림 1은 두 해석 전동기의 인덕턴스 프로파일의

시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 측정된 인덕턴스는 한 상에 일정한 전류를 인가하고 회전자의 위치 변화에 따라 인덕턴스의 크기를 계산하여 구한 것이다. 그 결과 6/4극의 경우 비 정렬 시와 정렬 시의 인덕턴스 크기의 비는 1:10이고, 12/8극의 경우 1:11이었다. 상대적으로 12/8 SRM이 인덕턴스 변화율이 크다는 것을 의미하며, 이는 토크의 크기 등에 있어서 6/4 보다는 12/8 SRM이 유리하다는 것을 알 수 있게 해준다.



(a) 6/4 SRM



(b) 12/8 SRM

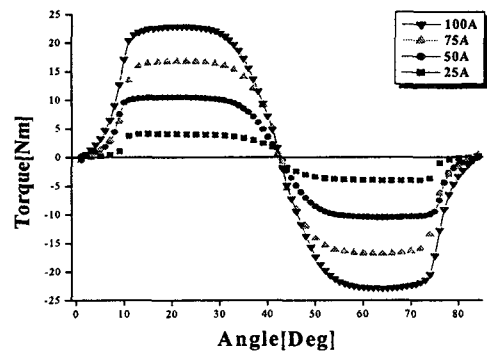
그림 1. 인덕턴스 프로파일  
Fig. 1 Inductance profiles

그림 2는 그림 1과 유사하게 한 상만을 여자시키고 각각 일정한 전류를 인가한 뒤 회전자의 위치에 따른 전동기의 정적 토크를 도출하여 나타내었다. 이 데이터를 통해 각 전동기의 토크 특성을 나타낼 수 있는 구간을 마련했다고 할 수 있으며, 그림 1을 통해 동일한 전류를 흘렸을 때 6/4 SRM이 12/8 SRM보다 정적 토크가 큰 것을 알 수 있다.

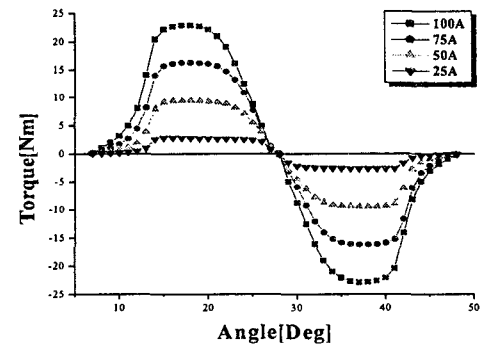
$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (1)$$

전동기의 토크 특성은 사용 분야와 목적에 따른 적용에 있어 아주 중요한 요소 중의 하나이다. 식

(1)은 SRM의 토크 방정식을 나타낸다. 이 식으로부터 SRM에서의 토크는 상 전류의 제곱과 회전자의 위치각에 따른 인덕턴스의 편미분 값에 비례함을 알 수 있다. 그리고 실제 발생하는 토크는 인덕턴스의 상승구간에 존재하며 인덕턴스의 하강구간에 이르기까지 전류의 소호가 이루어지지 않으면 토크가 발생하게 된다. 또한 토크 발생구간 내에서 토크리플이 크거나, 한 상에서 다른 상으로의 전류(commutation)작용이 원활하지 못하게 되면, 전동기의 속도-토크 특성의 안정도가 낮아지게 되며 진동발생에 의한 소음 특성도 저하된다.



(a) 6/4 SRM



(b) 12/8 SRM

그림 2. 정적 토크 프로파일  
Fig. 2 Static torque profiles

그림 3은 두 전동기의 속도-토크 특성을 나타내었다. 6/4 SRM의 경우 스위칭 온각을 41°, 스위칭 오프각을 78°로 하였으며, 12/8 SRM의 경우 스위칭 온각을 18°, 스위칭 오프각을 37°로 고정하여 속도 변화에 대한 시뮬레이션 파형이다. 두 전동기 모두 동일한 사용 목적과 정격 출력, 정격 속도로 설계하였으므로 정격에서의 속도-토크 특성은 시뮬레이션 결과는 비슷하다. 부하의 변동 시 즉, 속도의 변화에서 12/8 SRM의 가변 속도에 대한 토크 특성이 6/4 SRM보다 높은 것을 알 수 있었다. 그러므로 속도-토크 특성에서 도출할 수 있듯이

속도변화에 대한 출력 특성은 12/8 SRM이 우수한 것을 알 수 있다.

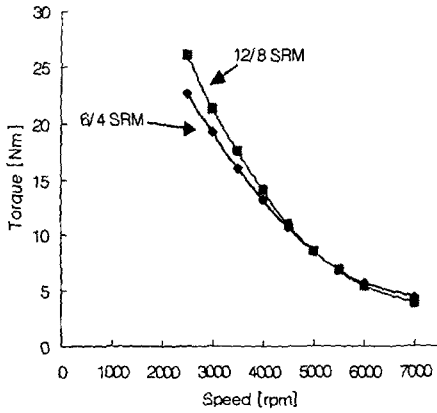
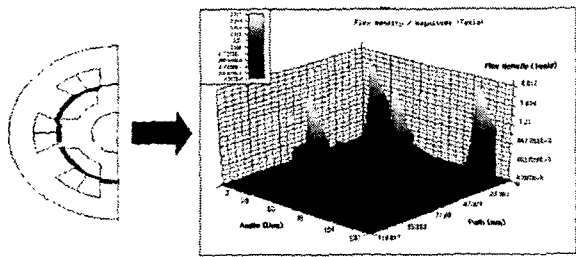


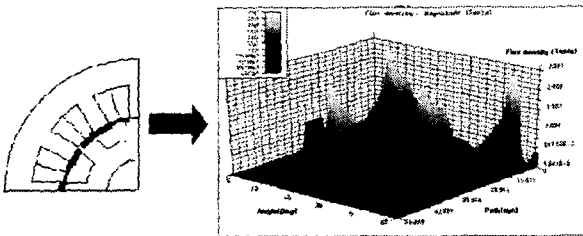
그림 3. 속도-토크 특성  
Fig. 3 Speed-torque characteristics

### 2. 3 손실 및 효율 특성

철손은 최대 자속밀도와 주파수의 함수가 되므로 철손을 분석하기 위하여 자속밀도는 중요한 요소가 된다. 전동기의 운전 시 철손을 알아보기 위해 두 전동기의 공극 자속 밀도를 그림 4에 나타내었다. X축은 회전자의 위치이고 Y축은 회전자의 이동거리를 나타내며, Z축은 공극 자속 밀도의 크기를 의미한다.



(a) 6/4 SRM



(b) 12/8 SRM

그림 4. 공극 자속 밀도 분포도  
Fig. 4 Airgap-flux density

철손 식은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (2)

에서 운전 시 전동기 손실은 최대 자속밀도의 크기와 주파수에 비례함을 알 수 있다<sup>[2]</sup>.

$$P_{Fe} = C_h f B_{pk}^{a+b} + C_e f^2 B_{pk}^2 \quad (2)$$

여기서  $C_h$ 는 히스테리시스손,  $C_e$ 는 와전류손이고,  $a$ 와  $b$ 는 계수이다. 고속 운전에서는 철손의 급격한 증가로 인하여 손실의 큰 부분을 차지할 수 있다.

6/4 SRM의 최대 자속밀도는 전반적으로 12/8 SRM에 비해 크기가 작음을 볼 수 있으므로 운전 시 발생하는 철손은 6/4 SRM이 작다는 것을 확인할 수 있다.

본 비교 대상 전동기의 동손은 시뮬레이션 결과, 6/4 SRM이 출력에 대하여 163[W], 12/8 SRM이 227.7[W]로 12/8극이 다소 크게 나타났다. 그리고 손실에 대한 특성으로부터 두 전동기의 효율 또한 유추해 낼 수 있다.

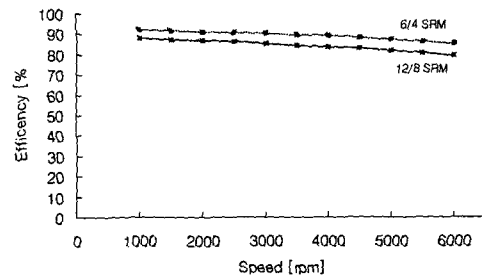


그림 5. 효율 특성 비교  
Fig. 5 Comparison of efficiency

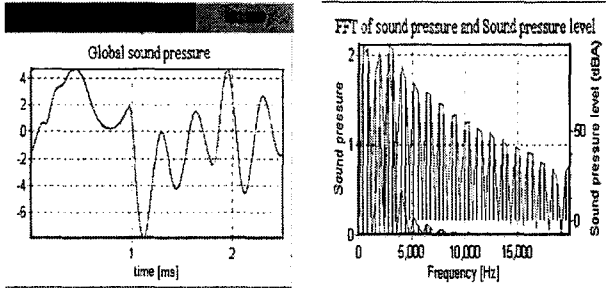
그림 5는 두 전동기의 효율을 나타내고 있으며 시뮬레이션 결과로부터 6/4 SRM의 효율이 상대적으로 우수하다는 것을 알 수 있다.

### 2. 4 소음 특성의 비교 및 실험 결과

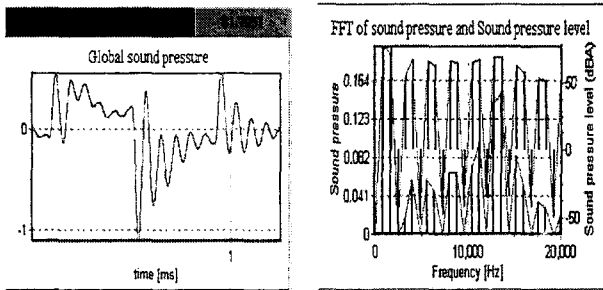
현재까지 SRM의 극수비에 따른 소음의 정도 및 해석은 그 연구 결과가 활발히 진행되지 않고 있는 실정이다. 6/4 SRM은 12/8 SRM과 동일한 3상 전동기로서, 12/8 SRM이 6/4 SRM보다 2배의 스위칭 횟수를 가지지만 이에 따른 서로의 소음정도와 상관관계는 잘 알려져 있지 않다.

그림 6은 6/4, 12/8 SRM의 소음 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 앞서 기술한 바와 같이 SRM에서 각 상의 전류(commutation)시 일어나는 토크 리플은 소음-진동과 직접적인 연관이 있다고 알려져 있다. 두 비교 전동기의 토크 리플은 12/8극 전동기가 6/4극 전동기에 비해 낮으며, 이에 따른 시

물레이션 결과도 두 전동기 중에서 6/4 SRM이 12/8 SRM에 비해 더 큰 소음이 발생하는 것을 알 수 있다. 이것은 12/8 SRM은 소음을 고려한 적용에 유리한 이점을 가진다고 할 수 있겠다.



(a) 6/4극 SRM



(b) 12/8극 SRM

그림 6. 전동기 운전 시 음압  
Fig. 6 Global sound pressure

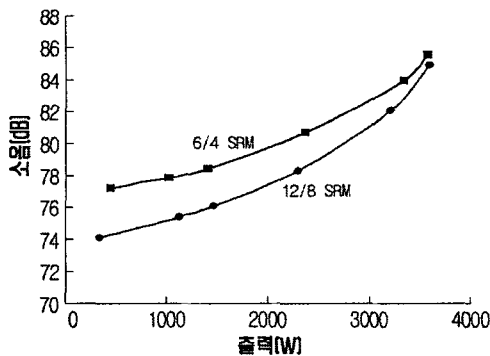


그림 7. 소음 측정 특성  
Fig. 7 Noise Characteristics

그림 7은 6/4, 12/8 SRM의 소음 측정을 수행한 결과이다. 그래프에서 알 수 있듯이 12/8 SRM이 6/4 SRM에 비하여 소음레벨이 낮으며 이는 시물레이션 결과와 일치한다.

### 3. 결 론

본 논문은 SRM의 적용에 있어서 극수비가 서로 다른 전동기를 비교하여 분석하였으며, 그 특성을 알아보기 위해 6/4 SRM과 12/8 SRM의 토크와

손실, 그리고 소음 특성에 대한 비교를 시물레이션 및 실험을 통해 확인하였다. 6/4 SRM은 상대적으로 토크 특성을 가지는 반면에 토크 리플이 크고, 이에 반해 12/8 SRM은 낮은 진동-소음이 고려되는 적용에는 6/4극에 비해 유리하다고 하겠다.

본 논문에서는 SRM의 극수 변화에 대한 소음 발생 정도 또한 시물레이션을 통해 해석하였으며, 소음 발생이 적은 전동기를 선정하도록 하였다. 본 논문은 두 SRM의 특성을 비교함으로써 앞으로 활발히 적용될 SRM의 견인용 응용, 실내용 수송수단, 전기자동차등의 여러 응용분야에서의 전동기 선정에 참고가 될 것이다.

이 연구는 BB 21 Project 지원에 의하여 수행되었음

### 참 고 문 헌

- [1] 안진우 저, “스위치드 릴럭턴스 전동기”, 오성미디어, pp.1-454, 2004
- [2] P. H. Miller, T. J. E. Miller, S. Yamamura, “Switched Reluctance Motors and their control”, Magna physics publishing and clarendon press, 1993
- [3] D. E. Cameron, J. H. Lang and S. D. Umans ; “The Origin and Reduction of Acoustic Noise in Doubly Salient Variable-Reluctance Motors,” IEEE Trans, on IA, Vol.28, No.6, pp.1250-1255, 1992.
- [4] C. Pollock, C. Y. Wu, “Acoustic Noise Cancellation Techniques for Switched Reluctance Drives”, IEEE IAS. Annual Meeting, Vol.1, pp.448-455, 1995
- [5] C. Pollock, C. Y. Wu, “Analysis Noise Reduction of Acoustic Noise in the Switched Reluctance Drive”, IEEE Trans. on IA, Vol.31, No.1, pp.91-98, 1995.
- [6] Chi-Yao, C. Y. Wu, C. Pollock ; “Analysis and Reduction of Vibration and Acoustic Noise in the Switched Reluctance Drive,” IEEE Trans. on IA, Vol.31, No.1, pp.91-98, 1995
- [7] R. S. Colby, F. M. Mottier, T. J. E. Miller, “Vibration Modes and Acoustic Noise in a Four-Phase Switched Reluctance Motor”, IEEE trans. on IA, Vol.32, No.6, pp.1357-1364, 1996
- [8] B. C. Mecrow, “New Winding Configurations for Doubly Salient Reluctance Machines”, IEEE trans. on IA, Vol.32, No.6, pp.1348-1356, 1996