

## 2상 4/3 SRM의 구조적 특성에 관한 연구

(A Study on the Structure characteristics of two phase 4/3 SRM)

배강열\* · 오석규\*\*

(Kang-Yul Bae · Seok-Gyu Oh)

### Abstract

The intrinsic simplicity, ruggedness, and simple power electronic drive requirement of a Switched Reluctance Motor(SRM) make it possible to use in many commercial adjustable speed application. The simple magnetic circuit results in a high efficiency drive and low temperature rise, and the drive system provides a good drive characteristics.

This paper is provides two phase 4/3 SRM that is similar to two phase 6/3 SRM as aspect to magnetic structure. Although 6/3 SRM does not experience any flux reversal as the flux is in the same direction whether phase A or B is excited, but two phase 4/3 SRM experiences a flux reversal in small part of stator yoke. The flux reversal in two phase 4/3 SRM could be relieved by an adjustment of stator yoke structure. The magnetic analysis and design considerations of the two phase 4/3 SRM have been obtained by the finite element method analysis (FEM).

Key Words : Two Phase 4/3 SRM, Two Phase 6/3 SRM, Flux Reversal, FEM

### 1. 서 론

직류전동기는 제어성이 우수하고, 견고하여 오래전부터 많은 분야에 적용되어 왔다. 또한 직류전원과 결합성이 우수하여 직류전원을 필요로 하는 자동차 내

에 부착된 전동기, 전동지게차, 전동골프카, 전동공구 등에 널리 사용되고 있다. 그러나 브러쉬 사용에 대한 문제로 인하여 브러쉬리스 형의 다른 전동기로 점차적으로 대체되어 가는 실정이다. 직류전동기를 대체하는 대표적인 전동기는 영구자석형 동기전동기이다. 영구자석형 동기전동기는 효율이 높고 제어성이 우수하여 많은 부분에서 적용, 연구되고 있다. 그러나 최근에 영구자석의 원료인 희토류를 국제적으로 자원무기화 하는 경향이 나타나 수급에 어려움을 겪게 되어, 영구자석을 사용하지 않는 전동기의 필요성이 대두되고 있다.

SRM은 회전자에 영구자석과 어떤 형태의 권선도 사용하지 않아 구조가 간단하다. SRM은 릴럭턴스

\* 주저자 : 경남과학기술대학교 메카트로닉스공학과 교수  
\*\* 교신저자 : 경남과학기술대학교 메카트로닉스공학과 교수  
\* Main author : Professor, Department of  
Mechatronics Engineering, GNTECH

\*\* Corresponding author : Professor, Department of  
Mechatronics Engineering, GNTECH  
Tel : 055-751-3385, Fax : 055-751-3389

E-mail : sgoh@gntech.ac.kr

접수일자 : 2014년 4월 14일

1차심사 : 2014년 4월 16일, 2차심사 : 2014년 5월 10일

심사완료 : 2014년 5월 12일

토오크를 이용하는 구동방식으로 그 기원은 1842년으로 거슬러 올라가지만 여러 가지 문제로 크게 주목받지는 못하였다[1]. 1970년대 말에 Lawrenson 교수 등에 의해 일반적인 SRM의 설계기준과 전류 파형 및 정상상태의 특성이 제시되면서 활발히 연구가 진행되고 있다[2]. 최근에는 중소형 전동기구에 적용되는 2상 SRM의 개발이 활발히 진행되는데, 그 대표적인 전동기는 4/2, 6/3, C-core 4/3 SRM 등이 있다[3-5].

본 연구에서는 2상 6/3 SRM과 같은 회전자를 갖는 2상 4/3 SRM의 제안하였다. 2상 4/3 SRM의 동작특성을 해석하고, 또한 고정자의 구조 변경하였을 때에 동작특성을 비교 해석하였다. 자기 해석을 위해 유한요소법 프로그램인 FLUX2D를 이용하였다.

## 2. 2상 4/3 SRM의 구조적 특성

### 2.1 2상 4/3 SRM의 고정자

2상 6/3 SRM은 고정자에서 자속의 반전이 없는 자기적 특징을 가지고 있으며, 비대칭 회전자로 인하여 자기동이 가능한 전동기이다. 6/3 SRM은 한상이 구동할 때 고정자 3개의 극이 동작을 하며 자속은 고정자 주극을 통해 두 개의 보조극에 병렬로 흐르게 된다.

그림 1은 2상 6/3 SRM 과 4/3 SRM의 구조를 보여주고 있다. 4/3 SRM은 6/3 SRM과 동일한 회전자를 갖지만 고정자극(A2, B2)는 6/3 SRM의 고정자의 보조극(A1과 A2, B1과 B2)을 합해놓은 형상을 가지고 있다.

그림 2는 4/3 SRM이 각각 두상을 여자 하였을 때의 자속 모양을 보여주고 있다. 4/3 SRM은 그림에서 보는바와 같이 고정자극 두 개가 동작하여, 자로는 두 개이며 점선으로 표시된 자로는 실선으로 표시된 자로보다 길고, 자속밀도도 실선으로 표시된 자로보다 낮다.

그림 3은 4/3 SRM의 고정자 각 부분에서의 자속 분포를 보여주고 있다. 6/3 SRM의 경우는 자속의 반전이 없는데 비해 4/3 SRM은 고정자 요크의 일부구간

(A1B2, B1A2)에서 자속의 반전이 나타남을 알 수 있다. 그리고 A1A2구간에서 큰 자속은 A상이 여자 했을 때 자속이며, 작은 자속은 B상이 여자 했을 때의 자속을 각각 나타내고 있다.

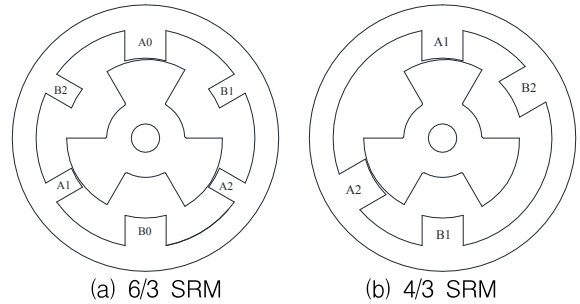


그림 1. 2상 6/3와 4/3 SRM의 구조  
Fig. 1. Structures of 2 phase 6/3 and 4/3 SRM

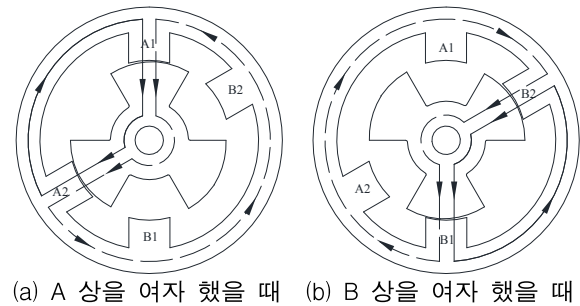


그림 2. 2상 4/3 SRM의 자속 모양  
Fig. 2. Flux patterns of 2 phase 4/3 SRM

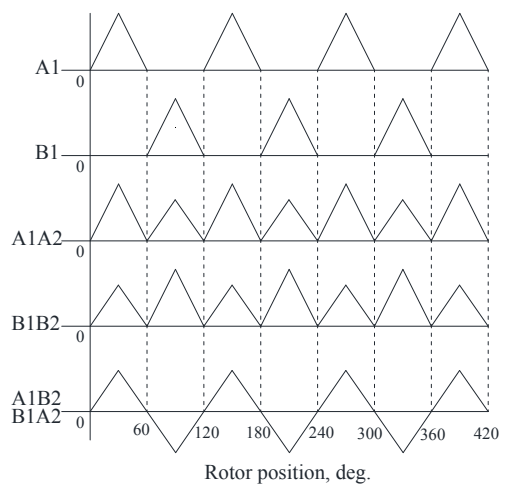


그림 3. 2상 4/3 SRM의 자속분포  
Fig. 3. Flux distributions for 2 phase 4/3 SRM

## 2.2 2상 4/3 SRM의 인덕턴스와 토오크

그림 4는 전류의 변화에 따른 2상 4/3 SRM의 인덕턴스와 토오크를 각각 보여주고 있다. 그림 4와 같은 인덕턴스와 토오크는 2상 6/3 SRM과 유사하다.

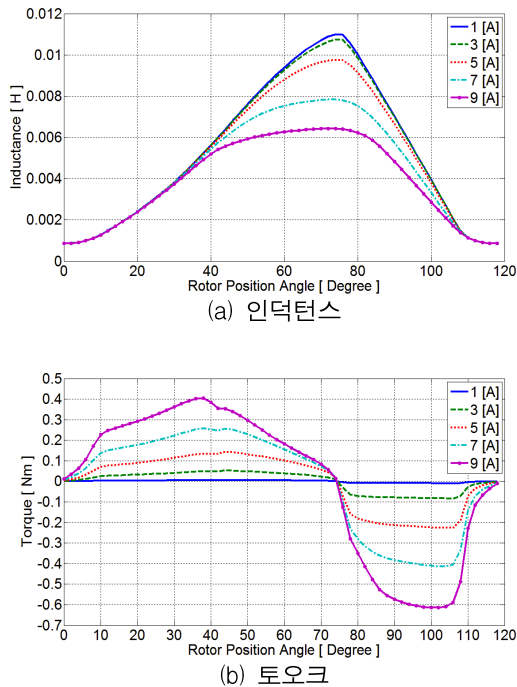


그림 4. 전류에 따른 인덕턴스와 토오크  
Fig. 4. Inductance and torque according to currents

## 3. 2상 4/3 SRM의 특성 해석

### 3.1 2상 4/3 SRM의 특성 해석

2상 4/3 SRM은 2상 6/3 SRM과 같은 회전자 형상을 가짐으로써 스위칭 주파수 특성은 같다. 또한 인덕턴스와 토오크 특성도 거의 유사하다. 2상 4/3 SRM의 특성 해석을 위해 FEM 해석을 하였다.

우선 그림 4에서와 같이 인덕턴스,  $L(\theta)$ 는 회전자 위치에 따라 변함으로 회전자 위치각,  $\theta$ 의 함수로 주어진다. 한상을 여자 하였을 때 전압방정식은 식 (1)과 같다.

$$v = R i(t) + \frac{d\lambda}{dt} \quad (1)$$

여기서  $v$ 는 전압,  $R$ 은 저항을 나타내며, 자속쇄교수,  $\lambda = L(\theta)i(t)$  이다. 이를 전개하면 식 (2)와 같다.

$$v = \left[ R + \frac{dL(\theta)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \right] i(t) + L(\theta) \frac{di(t)}{dt} \quad (2)$$

여기서  $\frac{dL(\theta)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} i(t)$ 는 속도 역기전력에 해당한다. 그리고 그림 4 (a)의 인덕턴스 최대, 최소값을 대입하고 인덕턴스 상승구간을  $60^\circ$ 라 할 때 인덕턴스,  $L(\theta)$ 는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} L(\theta) &= L_{\min} + \left[ \frac{(L_{\max} - L_{\min})}{\pi/3} \right] \theta \\ &= 0.001 + \frac{(0.011 - 0.001)}{\pi/3} \theta \\ &= 0.001 + 0.0095 \theta \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 인덕턴스를 회전자 위치각에 대해 미분하면 식 (4)와 같다.

$$\frac{dL(\theta)}{d\theta} = 0.0095 \frac{H}{rad} \quad (4)$$

그리고 회전자 속도가 3,000rpm일 때 각속도  $\omega = d\theta/dt$ 는 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$\frac{d\theta}{dt} = 3,000r/min \times \frac{2\pi rad/s}{60r/min} = 100\pi \frac{rad}{s} \quad (5)$$

따라서

$$\frac{dL(\theta)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = 3 \frac{H}{s} \quad (6)$$

와 같이 구할 수 있다. 이때 상저항은  $1.5\Omega$ 이다. 따라서 식 (2)에서  $R + \frac{dL(\theta)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt}$  항은  $4.5\Omega$ 의 저항으로 계산할 수 있다. 그리고 식 (2)의  $L(\theta) \frac{di(t)}{dt} = 0$ , 즉 평활전류라 가정할 때 적정 인가전압은 20V로 하여 2상 4/3 SRM의 시뮬레이션 하였다.

2상 4/3 SRM의 구조적 특성에 관한 연구

표 1은 전동기 사양을 보여주고 있다. 사용한 인버터는 각상이 독립 제어할 수 있는 Classic Inverter를 사용하였다.

표 1. 전동기 사양  
Table 1. Spec. of motor

|        |       |        |         |
|--------|-------|--------|---------|
| 고정자 극수 | 4     | 회전자 극수 | 3       |
| 고정자 외경 | 100mm | 회전자 외경 | 59mm    |
| 상당 권선수 | 200   | 회전자 속도 | 3000rpm |
| 인가전압   | 20V   | 상저항    | 1.5Ω    |
| 정격토크   | 0.2Nm | 출력     | 80W     |

그림 5는 2상 4/3 SRM의 FEM 해석에 의한 자속분포를 보여주고 있다. 두 개의 자로 중 짧은 자로에서의 자속밀도가 높음을 알 수 있다. 이는 두 자로가 자

로의 길이에 따른 자기저항이 달라 발생한다.

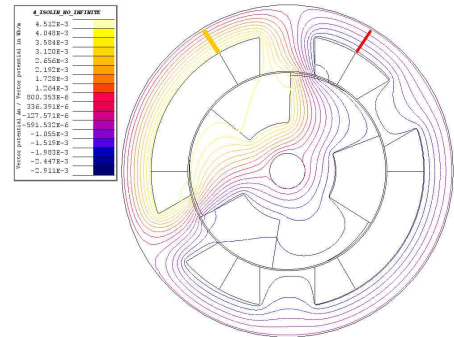


그림 5. FEM 해석에 의한 자속분포  
Fig. 5. Flux distribution by FEM analysis

그림 6은 두 상을 여자 하였을 때의 상전류와 고정자에서 발생하는 철손을 보여주고 있다. 그림 6에서의

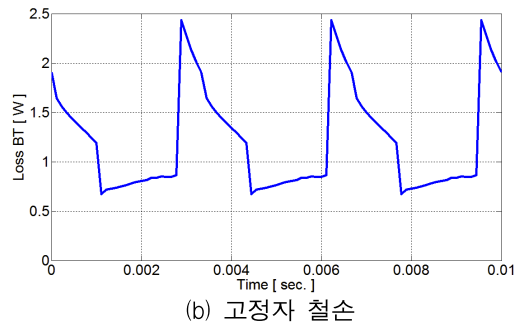
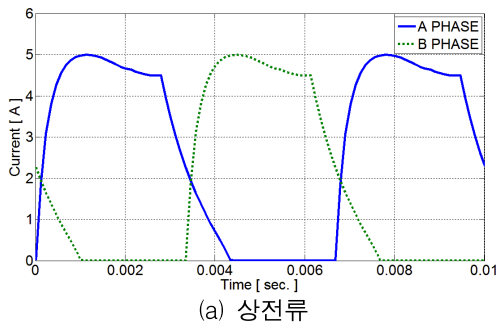


그림 6. 상전류와 고정자 철손  
Fig. 6. Phase currents and iron loss in stator

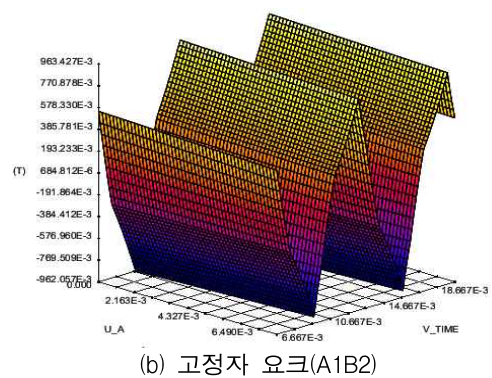
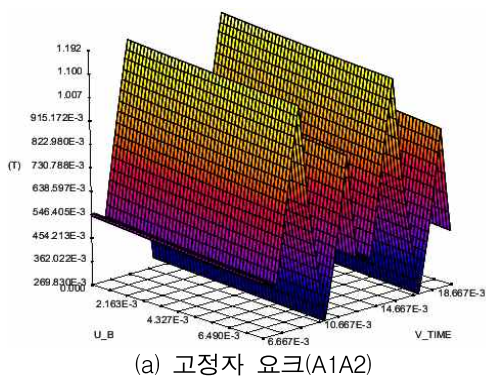


그림 7. 고정자 요크에서의 자속 분포  
Fig. 7. Flux distribution in stator yoke

고정자에서 발생하는 철손 평균값은 1.24w을 보여주고 있다.

그림 6의 상전류가 인가되어 흐를 때 그림 5에서 고정자 요크(A1B2와 A1A2)부분에 표시된 위치를 통과하는 자속밀도의 분포는 그림 7에서 보여주고 있다. 이는 그림 3과 같음을 알 수 있다. 그림 7 (a)에서 보여주는 고정자 요크(A1A2)부분에서는 A상을 여자 하였을 때에는 최대 자속밀도가 1.14T이고, B상을 여자 하였을 때에는 최대 자속밀도가 0.81T으로 차이를 보이고 있다. 그림 7 (b)에서 보여주는 고정자 요크(A1B2)부분에서만 자속밀도가  $\pm 0.96T$ 으로 자속이 반전하고 있다.

### 3.2 2상 4/3 SRM의 고정자 구조 조정

2상 4/3 SRM은 그림 2와 3에서 보듯이 두 개의 자로를 가지며 긴 자로를 갖는 쪽의 자속은 낮출수록 교번되는 자속의 최대크기도 줄일 수 있고, 고정자 요크 부분(A1A2, B1B2)에서 작은 자속을 더 작게 하여 철손을 줄일 수 있다.

그림 8은 한상을 여자할 때 발생하는 두 개의 자로 중 짧은 자로가 지나는 고정자 요크부분(A1A2, B1B2)을 넓히고, 자속이 반전하는 고정자 요크부분(A1B2, B1A2)은 그림 5에서 보듯이 포화레벨이 낮기 때문에 요크부분을 좁게 설계한 4/3 SRM을 보여주고 있다. 그림 8 (b) B type은 고정자극을 짧은 자로를 더 짧게 하고, 비교적 좁은 A1과 B2, B1과 A2사이를 넓혀 권선이 들어가는 공간을 넓히는 고정자 설계를 한 것이다.

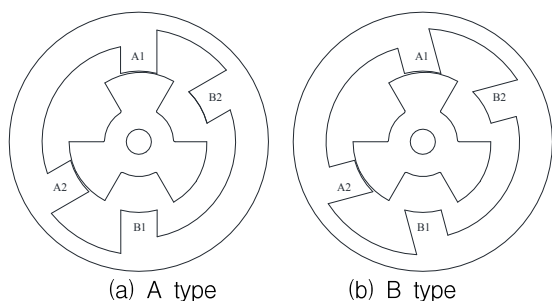


그림 8. 4/3 SRM의 고정자 설계  
Fig. 8. Stator designs of 4/3 SRM

그림 9는 그림 8의 A type의 2상 4/3 SRM의 FEM 해석에 의한 자속분포를 보여주고 있다. A type의 전동기는 그림 5의 전동기와 비교하여 고정자의 요크, A1A2부분의 넓이를 1.5배로 넓히고, 고정자 요크, A1B2부분의 넓이는 0.5배로 하여 자속이 통과하는 단면적을 같게 하는 조건으로 설계하여 비교 해석하였다.

그림 10은 두 상을 여자 하였을 때의 상전류와 고정자에서 발생하는 철손을 보여주고 있다. 그림 10에서의 고정자에서 발생하는 철손 평균값은 1.20w을 보여주고 있다.

그림 10의 상전류가 인가되어 흐를 때 그림 5에 고정자 요크(A1B2와 A1A2)부분에 표시된 위치를 통과하는 자속의 분포는 그림 11에서 보여주고 있다. 그림 11 (a)에서 보여주는 고정자 요크(A1A2)부분에서는 A상을 여자 하였을 때에는 최대 자속밀도가 1.02T이고, B상을 여자 하였을 때에는 최대 자속밀도가 0.48T으로 차이를 보이고 있다. 그림 11 (b)에서 보여주는 고정자 요크(A1B2)부분에서는 자속밀도가  $\pm 0.84T$ 으로 자속이 반전하고 있다. 이 결과는 고정자 요크(A1B2)부분이 좁아져 긴 자로의 자기저항이 증가하여 넓어진 고정자 요크(A1A2)쪽으로 자속이 많이 흐르기 때문이다.

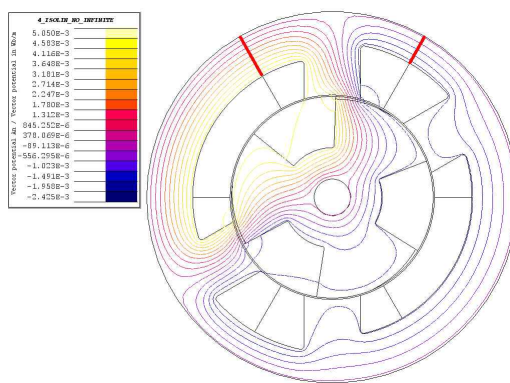


그림 9. FEM 해석에 의한 자속분포  
Fig. 9. Flux distribution by FEM analysis

고정자 구조를 변경하였을 때의 효과는 긴 자로로 가는 자속을 제한하여 자속의 대부분을 짧은 자로로 가게 만들어 그림 7과 비교하여 작은 자속이 더욱 작



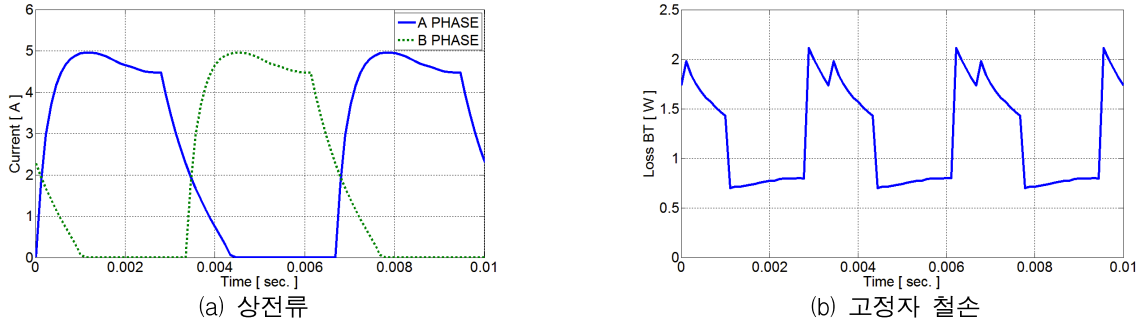


그림 10. 상전류와 고정자 철손  
Fig. 10. Phase currents and iron loss in stator

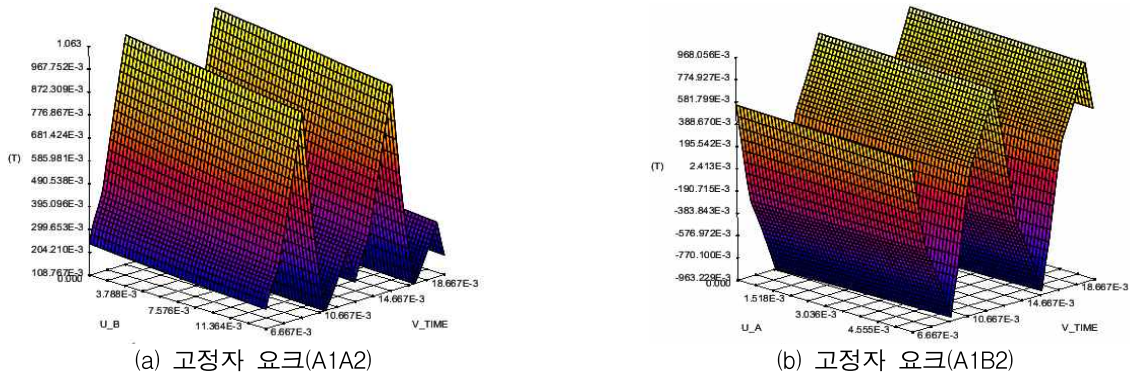


그림 11. 고정자 요크에서의 자속 분포  
Fig. 11. Flux distribution in stator yoke

아지고 반전되는 자속의 크기도 작아져 전체적으로 철손도 줄어드는 효과를 보여주고 있다. 따라서 그림 8과 같이 고정자 구조를 적절히 조정하면 운전효율을 높일 수 있다. 또한 이 효과를 극대화한 것이 고정자 요크(A1B2, B1A2) 부분을 제거한 C-core 4/3 SRM이다[5]. 그러나 이러한 C-core 4/3 SRM은 고정자가 분리되어 조립이 복잡하여 조립에 주의가 필요하다.

#### 4. 결 론

SRM은 고정자와 회전자 구조가 간단하고 견고하며, 스위칭 드라이브인 인버터가 단순하여 운전 효율 및 온도특성이 우수하고, 운전 사고에 대한 신뢰성이 큰 전동력기구이다. 또한 저가의 소형전동기에 적용

에 있어서 인버터가 간단한 것이 유리하여 단상 혹은 2상 SRM이 선호되고 있다.

본 논문은 2상 6/3 SRM과 같은 회전자를 갖는 2상 4/3 SRM의 동작특성 및 고정자 구조설계를 제시하였다. 2상 4/3 SRM을 자기적 구조가 유사한 2상 6/3 SRM과 비교하면, 동작특성은 서로 유사하다. 다만 고정자에서 자속이 반전하는 일부구간이 존재하지만 이를 최소화하는 고정자 변경 설계를 제시하였고, 고정자 권선을 감을 수 있는 슬롯 면적도 6/3 SRM 보다 넓은 장점을 가지고 있다. 그러나 요크의 두께가 비대칭이고 요크의 두께가 좁은 부분을 더 좁게 할수록 소음, 진동에 취약한 단점이 있다. 또한 2상 6/3 SRM과 같이 회전자에 방사방향 힘이 비대칭으로 가해지는 문제는 여전히 남아 있다.

감사의 글

본 논문은 2012년 경남과학기술대학교 기성회 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

- [1] Krishnan R., "Switched Reluctance Motor Drives", CRC press, pp.1, 2001.
- [2] 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.253-265, 1980.
- [3] Seok-Gyu Oh, Chee-Woo Lee, "A Study on Comparison of Two phase SRMs", JIEE, Vol.25, No.1, pp.59-63, 2011.
- [4] Seok-Gyu Oh, Krishnan, R., "Two-Phase SRM with Flux-Reversal-Free Stator : Concept, Analysis, Design, and Experimental Verification", IEEE Trans. on IA, Vol.43, No.5, pp.1247-1257, Sep./Oct. 2007.
- [5] Jin-Woo Ahn, "Characteristics Analysis of Short Flux-path 4/3 SRM", JICEMS, Vol. 2, No. 1, pp.40-44, 2013.

◇ 저자소개 ◇



**배강열**(裵康悅)

1962년 11월 13일생. 1984년 부산대학교 기계공학과 졸업. 1986년 한국과학기술원 생산공학과 졸업(석사). 1990년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(박사). 1986년 ~1998년 현대중공업(주) 산업기술연구소 책임연구원. 1998년~현재 경남과학기술대학교 메카트로닉스공학과 교수.



**오석규**(吳錫奎)

1967년 6월 2일생. 1991년 부산대 전기공학과 졸업. 1993년 동대학 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동대학 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2004년 8월~2006년 2월 미국 Virginia Tech. 방문교수. 1998년~현재 경남과학기술대학교 메카트로닉스공학과 교수.