

## Magnetic Structure of Rotor Segment for Segmental Rotor Type Single-phase SRM

Seok-Gyu Oh\*

Dept. of Mechatronics Engineering, GNTECH, Jinju 52725, Korea

(Received 4 November 2018, Received in final form 6 December 2018, Accepted 7 December 2018)

In the case of single-phase SRM, values of minimum inductance are larger than that of the poly-phase SRM because the all stator poles of single-phase SRM are used as the magnetic flux path, while values of minimum inductance of the poly-phase SRM are almost unchanged. In addition, the segmental rotor type single-phase SRM has a cylindrical rotor, so that values of minimum inductance are larger than that of a conventional single-phase SRM with a salient rotor. This leads to a reduction in the generated torque. In this paper, This paper proposes a magnetic structure to minimize the variation of the minimum inductance by changing the shape of the rotor segment of segmental rotor type single-phase SRM and analyze it. This segmental rotor type single-phase SRM was analyzed by FLUX2D, a finite element analysis program.

**Keywords** : segmental rotor type single-phase SRM, rotor segment, values of minimum inductance

### 분절 회전자를 갖는 단상 SRM에서 회전자 분절의 자기 구조

오석규\*

경남과학기술대학교 메카트로닉스공학과, 경남 진주시 동진로 33, 52725

(2018년 11월 4일 받음, 2018년 12월 6일 최종수정본 받음, 2018년 12월 7일 게재확정)

다상 SRM의 최소 인덕턴스 값은 인가 전류가 달라져도 거의 변화가 없는 반면에 단상 SRM은 고정자 권선에 전류를 인가하였을 때 전 고정자극이 자속통로로 이용되기 때문에 최소 인덕턴스 값은 다상 SRM보다 큰 특징을 가지고 있다. 또한 분절 회전자를 갖는 단상 SRM은 원통형 회전자를 가짐으로 최소 인덕턴스 값이 상대적으로 돌극형 회전자를 갖는 일반적인 단상 SRM보다 크다. 이것은 발생 토크의 저감을 가져온다. 본 논문에서는 분절 회전자를 갖는 단상 SRM의 회전자 분절의 형상을 변형하여 최소 인덕턴스의 변화를 최소화 하는 방안을 제시하고 이를 해석하였다. 이 분절 회전자를 갖는 단상 SRM을 유한요소법 해석 프로그램인 FLUX2D를 사용하여 자기 해석을 하였다.

**주제어** : 분절 회전자를 갖는 단상 SRM, 회전자 분절, 최소 인덕턴스

### I. 서 론

가정용 혹은 산업용 장치나 기기들도 전력전자 기술의 발달에 따라 고효율, 자동화 그리고 다기능화를 위한 가변속 전동기기의 사용이 일반화되고 있다. 가변속 전동기에는 영구자석형 전동기(BLDC, PMSM), 인버터 구동 유도전동기, SRM 등이 주로 사용되고 있다[1-3]. 특히 SRM은 영구자석형 전동기가 영구자석을 사용함으로 발생하는 전동기 내 온도 제한, 약계자 운전으로 인한 탈자 문제, 희토류를 사용함으로써 발생하는 원료수급 및 가격 문제 등에서 자유로운 장

점을 가지고 있어 많은 분야에 꾸준히 적용되고 있다[1,3]. 또한 SRM은 릴럭턴스 토크(Reluctance torque)를 사용함에 따라 다양한 자기적 구조를 가질 수 있다[4-6]. 그리고 분절(segment) 회전자를 갖는 SRM에 대해서도 다양한 상수, 극수를 갖는 자기구조에 대한 연구가 진행되고 있다. 분절 회전자를 갖는 SRM은 회전자가 돌극형 구조를 가지고 있는 기존의 SRM 회전자와 달리 원통형 구조를 가짐으로써 공기의 저항을 줄일 수 있고 자속통로의 길이도 짧아 효율을 높일 수 있는 장점을 갖는다. 또한 회전자 분절만 철심으로 제작하고 나머지는 알루미늄 등과 같이 투자율이 공기와 비슷한 물질로 금형을 할 수 있어 제조원가를 줄일 수 있고 철심도 절감할 수 있어 특히 저가의 전동기기에 많이 사용되는 단상 SRM에 적합하다[7-11].

일반적으로 다상 SRM에서 최소 인덕턴스 값은 고정자권선에 흐르는 전류가 달라져도 거의 변화가 없는 반면에 단상 SRM은 전 고정자극이 지속통로로 이용되기 때문에 최소 인덕턴스 값은 다상 SRM보다 큰 특징을 가지고 있다. 분절 회전자를 갖는 단상 SRM의 최소 인덕턴스 값은 원통형 회전자 구조를 가짐으로써 일반적인 단상 SRM의 최소 인덕턴스 값보다 변화가 심하다. 이것은 발생토크의 저감을 가져온다.

본 논문에서는 분절 회전자를 갖는 단상 SRM의 회전자 분절의 자기 구조 형상을 변형하여 회전자 분절을 갖더라도 돌극형의 회전자를 갖는 일반적인 단상 SRM과 유사한 토크 특성을 갖는 방법을 제안하였다. 제안한 방법이 유효함을 증명하기 위하여 유한요소법 프로그램인 FLUX2D를 사용하였다.

## II. 단상 SRM 드라이브의 자기적 특성

릴럭턴스 토크는 상호 토크(mutual torque)에 비해 2배의 주파수 특성을 가지고 있어 일반적으로 릴럭턴스 토크와 상호 토크는 함께 사용하지 않는다[1,2]. SRM은 릴럭턴스 토크를 사용하는 대표적인 전동기이며 릴럭턴스 토크를 극대화 하기 위해서 일반적으로 고정자와 회전자 모두 돌극형 구조를 택하고 있다[1,2]. SRM은 다양한 상수와 극수를 가질 수 있어 자기구조에 대한 자유도가 다른 전동기보다는 높은 편이고, 단상 SRM은 전력스위치 수를 다상의 전동기보다 줄일 수 있어 저가의 전동기에 적합하다[6,7].

Fig. 1는 간단한 단상 SRM의 드라이브 시스템을 보여주고 있다. Fig. 1에서는 단상 SRM의 가장 일반적인 형태인 고정자극과 회전자극이 각각 8개인 자기구조를 보여주고 있으며, 인버터는 가장 안정적인 성능을 보여주는 비대칭 인버터(Asymmetric Inverter), 그리고 회전자 위치센서로 구성된 드라이브 시스템을 보여주고 있다[1,2]. SRM의 권선은 집중권으로 고정자에만 감겨져 있으며 고정자극의 권선은 전력변환 장치에 Fig. 1에서 보는 바와 같이 직렬로 연결되어 있어 교류전동기 전력변환장치에서 발생하는 단락사고(shoot through fault)가 발생하지 않는다[1,2].

Fig. 2는 Fig. 1의 단상 8/8 SRM의 전류와 회전자 위치각에 따른 자속, 인덕턴스 그리고 토크를 각각 보여주고 있다. Fig. 2(a)는 자속을 보여주고 있고 전류가 증가할수록 자기포화가 진행됨을 알 수 있다. Fig. 2(b)에서 회전자 위치각 0°는 인덕턴스가 최소인 위치를 나타내고 있고 최소 인덕턴스 값이 고정자 권선에 인가되는 전류에 따라 변하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 단상 SRM에서만 볼 수 있고 전압을 인가하였을 때 모든 고정자극이 지속통로로 이용되기 때문이다.

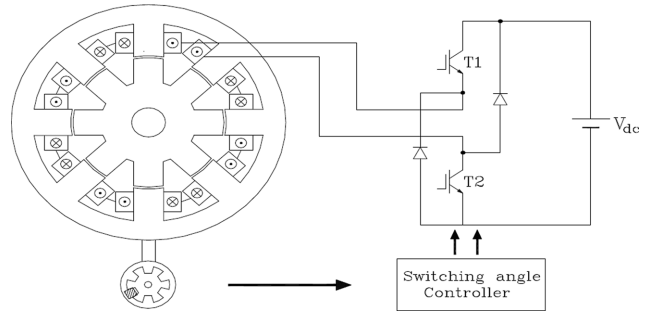
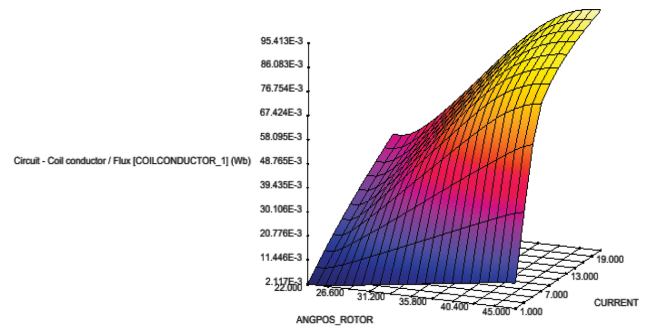
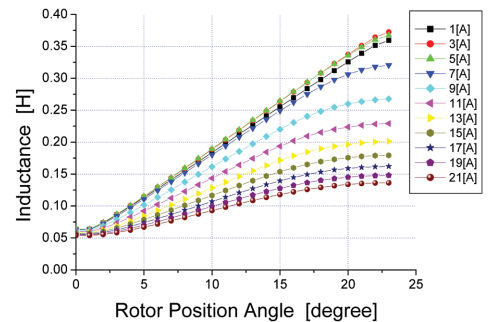


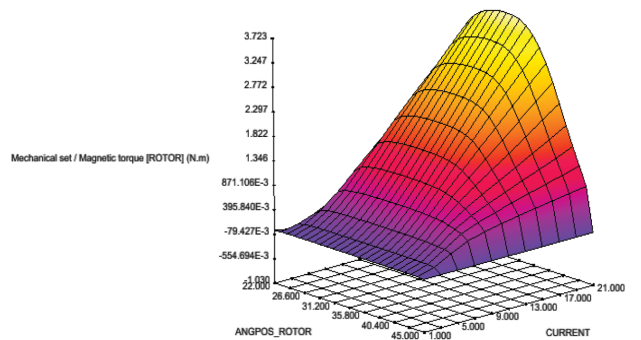
Fig. 1. Single-phase 8/8 SRM drive system.



(a) Flux



(b) Inductance



(c) Torque

Fig. 2. (Color online) Conventional single-phase 8/8 SRM.

분절 회전자를 갖는 단상 SRM에서 고정자극은 회전자 분절의 2배를 갖고 있으며 따라서 분절 회전자를 갖는 단상 SRM의 고정자극/회전자 분절은 각각 6/3, 8/4, 10/5, 12/6

등을 가질 수 있다.

Fig. 3은 분절 회전자를 갖는 단상 8/4 SRM의 자기구조와 자속분포를 각각 보여주고 있다.

Fig. 4는 Fig. 3의 분절 회전자를 갖는 단상 8/4 SRM의

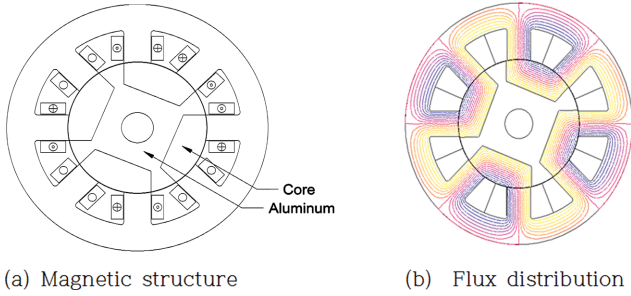


Fig. 3. (Color online) Segmental rotor type single-phase 8/4 SRM.

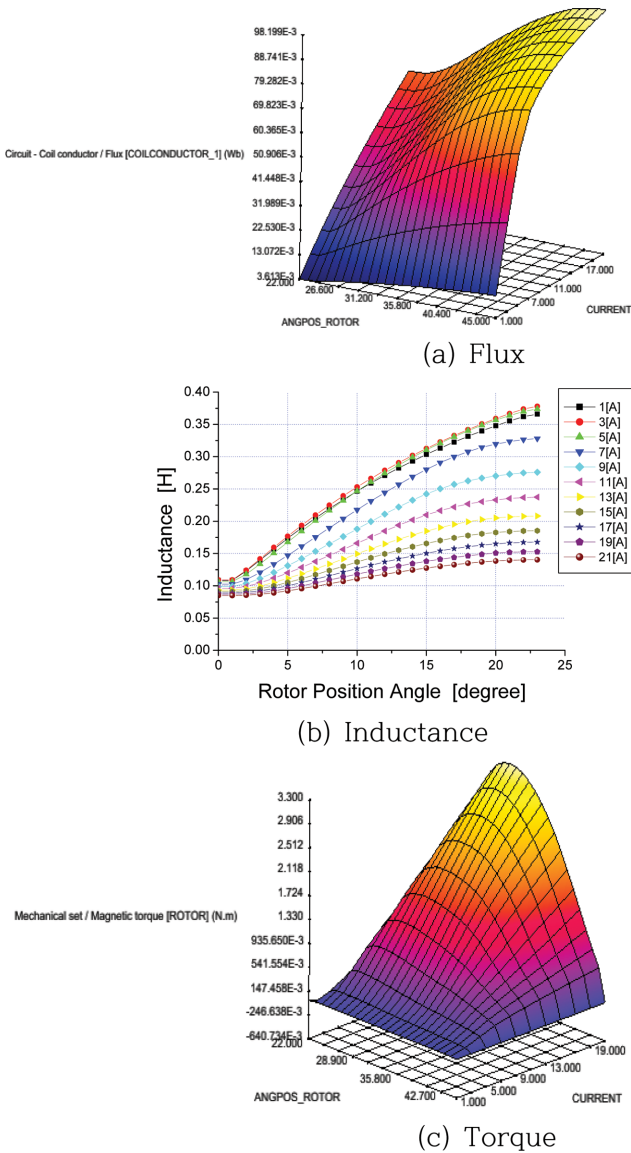


Fig. 4. (Color online) Segmental rotor type single-phase 8/4 SRM.

전류와 회전자 위치각에 따른 자속, 인덕턴스 그리고 토크를 각각 보여주고 있다. 일반적으로 2상 이상의 다상 SRM은 고정자권선에 인가하는 전류가 커져도 최소 인덕턴스 값의 변화가 없는 반면에 단상 SRM은 모든 고정자극에 자속이 흐름으로 자속의 변화가 커 다상 SRM보다 최소 인덕턴스의 변화가 큼을 알 수 있다. 또한 회전자가 원통형의 구조로 되어 최소 인덕턴스 값을 갖는 회전자 위치에서 Fig. 2(a)에서 보여주는 일반적인 단상 8/8 SRM의 자속과 비교하면 자속이 더 많이 흐름을 알 수 있다. Fig. 4(b)에서 보는 바와 같이 최소 인덕턴스는 Fig. 2(b)의 최소 인덕턴스 값보다 더 크고 그 변화도 크다. 이러한 영향으로 Fig. 2(c)에서 보여주는 일반적인 단상 8/8 SRM의 토크는 토크 발생 구간에서 대체적으로 평평한 형태를 취하고 있어 토크 변화가 비교적 적다. 그러나 Fig. 4(c)에서 보듯이 분절 회전자를 갖는 단상 8/4 SRM의 토크의 변화가 상대적으로 큼을 알 수 있다.

### III. 제안한 회전자 분절의 형상

분절 회전자를 갖는 3상 SRM은 각 고정자극이 1/3주기로 자속통로로 이용되기 때문에 최소 인덕턴스 값이 다른 일반적인 3상 SRM과 큰 차이를 보이지 않고 있으나 분절 회전자를 갖는 단상 SRM은 상이 여자할 때 모든 고정자극이 자속통로가 됨으로 자속이 상대적으로 커 최소 인덕턴스 값의 변화가 크다. 반면에 최대 인덕턴스 경우 분절 회전자를 갖는 단상 SRM과 일반적인 단상 SRM과의 차이는 거의 없다. 이것은 토크 발생에 영향을 미쳐 일반적인 단상 SRM의 토크보다 분절 회전자를 갖는 단상 SRM의 토크가 작다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 회전자 분절에 홈을 파 일반적인 단상 SRM과 동일한 인덕턴스, 토크 특성을 갖도록 하였다.

단상 SRM의 경우 고정자극호(pole arc)는 일반적으로 고정자극절(pole pitch)의 1/2 이하로 설계한다. 만약 1/2 이상으로 설계를 하면 회전자가 비정렬위치에서 고정자와 회전자가 겹치는 부분이 많아져 최소 인덕턴스의 값이 커져 발생토크 크가 작아진다. 따라서 본 논문에서는 고정자극호를 고정자극절의 1/2 이하의 범위로 제한하였다. 분절 회전자를 갖는 단상 SRM의 회전자 분절의 각은 식(1)과 같은 범위를 가진다. 회전자 분절의 각은 식(1)에서 보는 바와 같이 최소 고정자극절과 고정자극호의 합 이상이 되어야 한다.

$$\theta_{pp} + \theta_{pa} \leq \theta_{rs} < 2\theta_{pp} \quad (1)$$

여기서  $\theta_{pp}$ 는 고정자극절,  $\theta_{pa}$ 는 고정자극호,  $\theta_{rs}$ 는 회전자 분절의 각을 각각 나타내고 있다. 이 때 제안한 회전자 분절

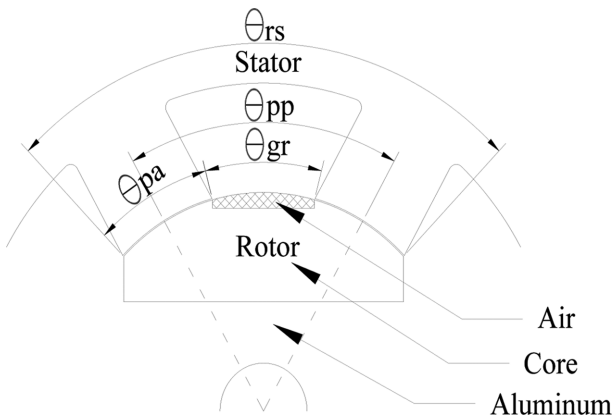


Fig. 5. Proposed rotor segment as align position.

의 홈의 각( $\theta_{gr}$ )은 다음과 같다.

$$\theta_{pa} \leq \theta_{gr} \leq \theta_{pp} - \theta_{pa} \quad (2)$$

Fig. 5는 일반적인 돌극형 회전자와 유사한 특성을 가지기 위한 변형한 회전자 분절의 형상을 보여주고 있다. 이때 고정자극호(pole arc)는 고정자극질(pole pitch)의 1/2인 경우이다. 제안한 회전자 분절은 Fig. 5에서 보듯이 회전자 분절의 가운데에 고정자극호 만큼 홈을 판 형상이며 회전자 분절이 고정자극에 정렬되어 있는 위치, 즉 최대 인덕턴스가 발생하는 회전자 위치를 보여주고 있다. 이때 회전자 분절의 가운데에 홈이 있던지 없던지 간에 자속통로는 거의 변함이 없어 최대 인덕턴스 값은 유사하다. 또한 이것은 일반적인 돌극형 회전자 갖는 단상 SRM의 최대 인덕턴스 값과도 유사하다.

Fig. 6는 회전자 분절이 고정자극과 정렬이 안 되었을 때, 즉 최소 인덕턴스 값을 갖는 회전자 위치각을 보여주고 있다. Fig. 6에서 보듯이 고정자극(a)는 회전자 분절의 홈이 있는 부분과 맞붙어 있어 홈이 없는 회전자 분절에 비해 자기저항(Reluctance)이 커 돌극형 회전자와 같은 효과를 낼 수 있다.

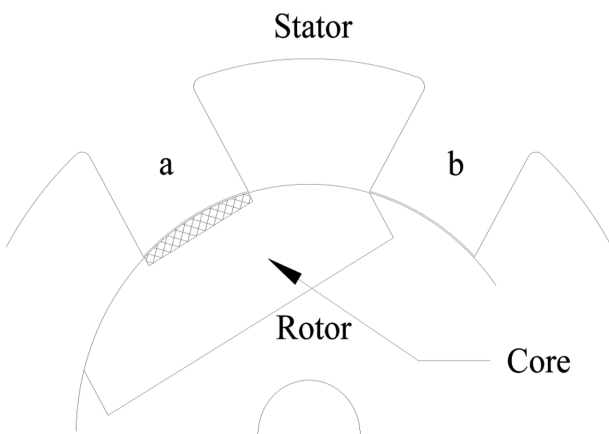
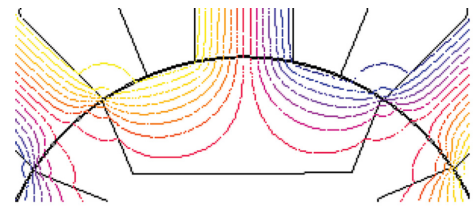
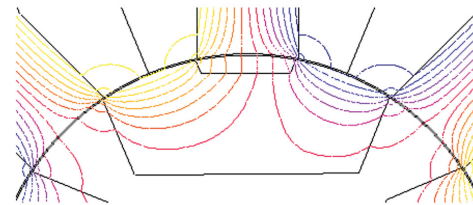


Fig. 6. Proposed rotor segment as unalign position.



(a) Conventional rotor segment



(b) Proposed rotor segment

Fig. 7. (Color online) Flux distribution as unalign position.

Fig. 7은 회전자가 비정렬되었을 때 일반적인 회전자 분절과 제안한 회전자 분절에 홈을 판 경우에 각각 자속의 흐름을 보여주고 있다. Fig. 7(a)의 일반적인 회전자 분절의 경우 가운데 고정자극에서 자속이 나와 인근의 고정자극으로 자속이 흐르고 있음을 알 수 있다. Fig. 7(b)의 제안한 방식의 경우 홈으로 인해 자기저항이 증가하여 홈이 없는 경우보다 자속의 흐름이 방해받아 자속이 작아짐을 알 수 있다. 제안한 방식에서 회전자 분절의 홈은 돌극형 회전자와 같은 역할을 하여 최소 인덕턴스 값을 낮추는 효과를 갖는다.

#### IV. 회전자 분절의 형상 변화에 따른 특성 해석

분절 회전자를 갖는 단상 SRM의 인덕턴스는 회전자 분절이 정렬위치에 있을 때 돌극형 회전자를 갖는 단상 SRM의 최대 인덕턴스와 거의 일치하고 비정렬위치에 있을 때에는 모든 고정자극이 자속통로로 되어 최소 인덕턴스가 돌극형 회전자를 갖는 단상 SRM의 최소 인덕턴스보다 높다. 따라서 발생토크는 최대, 최소 인덕턴스 값의 차이에 비례하므로 분절 회전자를 갖는 단상 SRM의 발생토크는 일반적인 단상 SRM보다 토크가 작은 특성을 보여주고 있다. 제안한 Fig. 5의 회전자 분절 가운데 홈을 만듦으로써 최소 인덕턴스 값을 돌극형 회전자와 같은 수준의 인덕턴스 값을 얻을 수 있어 발생토크의 작아지는 것을 방지할 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 5의 회전자 분절에 홈을 판 형상을 바꾸었을 때의 분절 회전자를 갖는 단상 8/4 SRM에서 발생하는 인덕턴스와 토크를 보여주고 있다.

Fig. 9, 10, 11은 각 전동기의 권선에 각각 1[A], 11[A], 21[A]를 인가하였을 때 발생하는 인덕턴스와 토크를 비교

한 것으로 각 그림에서 일반적인 단상 8/8 SRM(8/8), 일반적인 분절 회전자를 갖는 단상 8/4 SRM(Old), 그리고 제안한 분절 회전자를 갖는 단상 8/4 SRM(New)에 대해 비교하였다.

Fig. 9, 10, 그리고 11의 최소 인덕턴스 값을 비교하면 일반적인 분절 회전자를 갖는 단상 8/4 SRM은 인가 전류가 커질수록 인덕턴스 값이 커짐을 알 수 있고 이것은 발생토오

크의 저감으로 나타나고 있다. 그리고 각 전류에 따른 인덕턴스를 살펴보면 전류의 크기와는 상관없이 일반적인 분절 회전자를 갖는 단상 8/4 SRM은 최소 인덕턴스 값이 다른 두 전동기, 일반적인 8/8 SRM과 제안한 분절 회전자를 갖는 단상 8/4 SRM보다 높음을 알 수 있고, 일반적인 8/8 SRM과 제안한 분절 회전자를 갖는 단상 8/4 SRM의 인덕턴스는 거

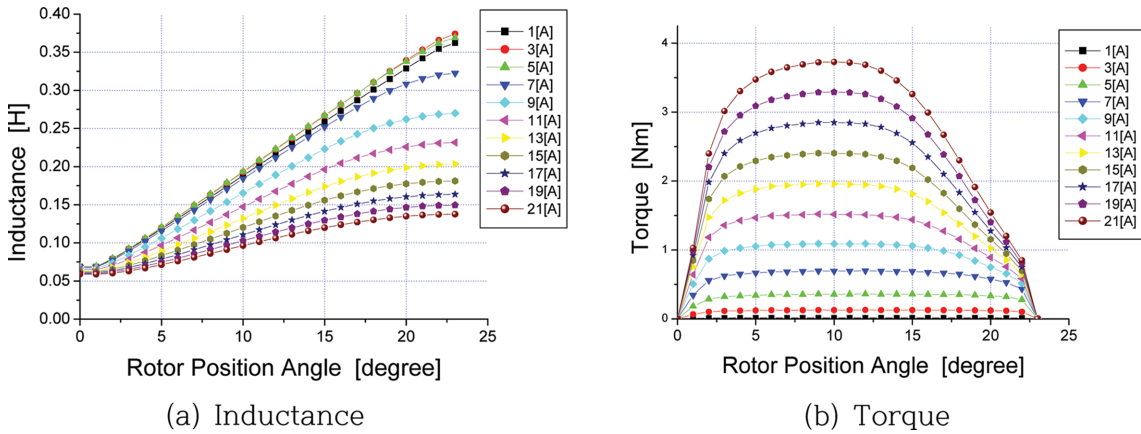


Fig. 8. (Color online) Proposed segmental rotor type single-phase 8/4 SRM.

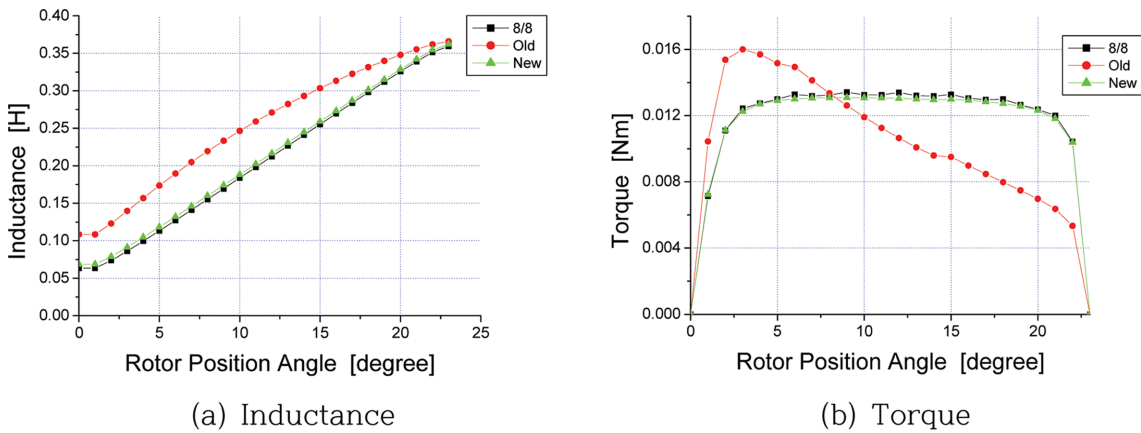


Fig. 9. (Color online) Comparison of single-phase SRMs when excited current is 1 [A].

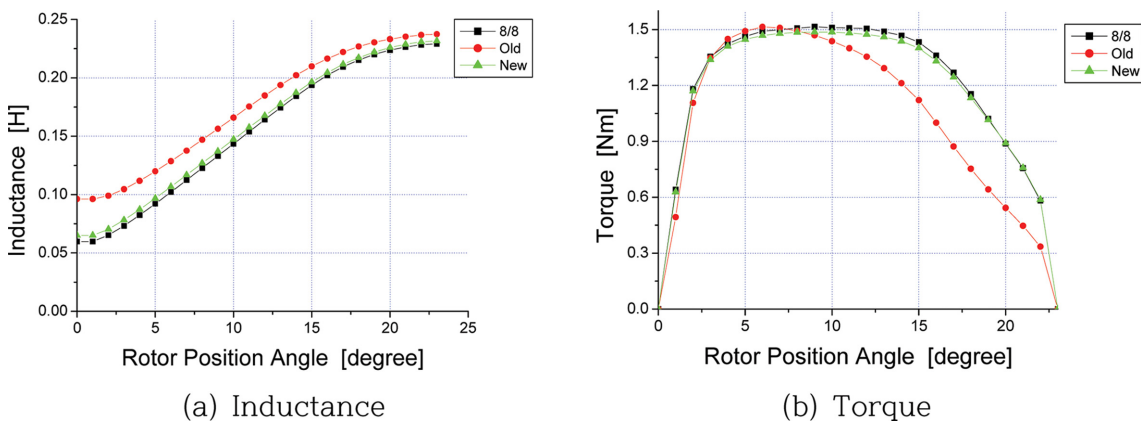


Fig. 10. (Color online) Comparison of single-phase SRMs when excited current is 11 [A].

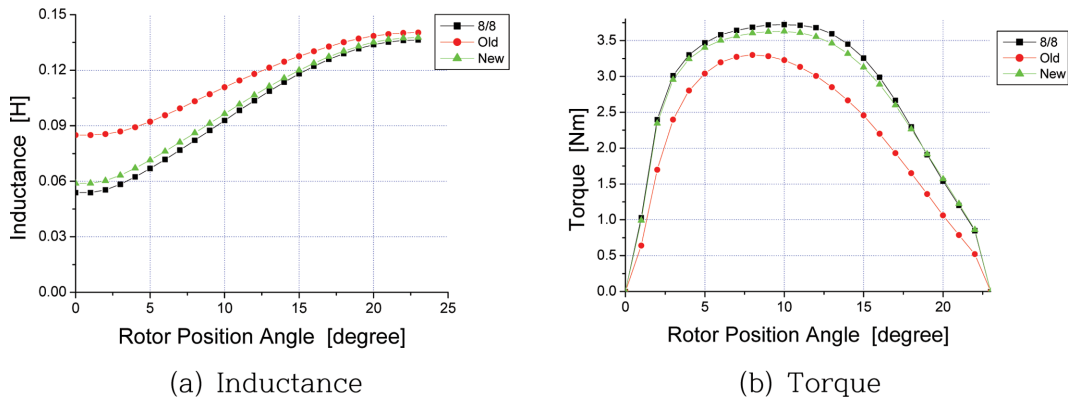


Fig. 11. (Color online) Comparison of single-phase SRMs when excited current is 21 [A].

의 차이가 없다. 이것으로 제안한 회전자 분절이 일반적인 8/8 SRM의 회전자의 돌극형 특성과 동일한 역할을 함을 알 수 있다. 이와 같은 효과에 의해 일반적인 8/8 SRM과 제안한 분절 회전자를 갖는 단상 8/4 SRM의 발생 토크도 거의 차이가 없고, 일반적인 분절 회전자를 갖는 단상 8/4 SRM에 비해 높음을 알 수 있다.

## V. 결 론

단상 SRM은 다상 SRM과 달리 고정자권선에 여자할 때마다 전 고정자극에 자속이 흘러 최소 인덕턴스 값도 전류가 커짐에 따라 커지는 특성을 가지고 있다. 회전자 분절을 갖는 다상 SRM도 고정자권선에 한상을 여자할 때마다 인근 고정자극으로 자속이 안 흘러 최소 인덕턴스 값의 변화가 거의 없으나, 분절 회전자를 갖는 단상 SRM은 모든 고정자극이 자속통로로 이용되기 때문에 최소 인덕턴스 값의 변화가 심하게 나타난다.

본 논문에서 회전자 분절에 홈을 만들어 돌극형 회전자의 효과를 낼 수 있도록 회전자 분절 형상을 제안하였다. 제안한 분절 회전자를 갖는 단상 SRM이 일반적인 돌극형 회전자를 갖는 일반적인 단상 SRM과 유사한 특성을 가짐을 시뮬레이션을 통해 알 수 있었다. 따라서 제안한 방식은 일반적인 분절 회전자를 갖는 단상 SRM가 가지고 있는 풍손이 적고, 자속통로가 짧아지는 장점과 돌극형 회전자가 갖는 장점을 가지고 있음을 알 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 2017년 경남과학기술대학교 기성희 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

## References

- [1] R. Krishnan, Switched Reluctance Motor Drives, CRC Press (2001).
- [2] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, and Stephen D. Umans, Electric Machinery, 7th edition, Chapter 8, McGraw-Hill Education (2013).
- [3] J. R. Herdershot and T. J. E. Miller, Design of Brushless Permanent-Magnet Machines, MotorDesignBooksLLC (2001).
- [4] C. Lee, R. Krishnan, and N. S. Lobo, IEEE Trans. on IA **45**, 703 (2009).
- [5] J.-W. Ahn, Proc. 2013 ICEMS(International Conference on Electrical Machines and Systems) 582 (2013).
- [6] S.-g. Oh, J. Korea Inst. Inf. Commun. Eng. **20**, 1 (2016).
- [7] S.-g. Oh, J. Korean Magn. Soc. **28**, 17 (2018).
- [8] Vandana R and G Fernandes, IEEE Trans. on EC **30**, 11 (2015).
- [9] J. D. Widmer, R. Martin, and B. C. Mecrow, IEEE Trans. on IA **51**, 2990 (2015).
- [10] J. Oyama, T. Higuchi, T. Abe, and K. Tanaka, J. Electrical Eng. Technol. **1**, 58 (2006).
- [11] K.-I. Jeong, Z. Xu, D.-H. Lee, and J.-W. Ahn, J. Electrical Eng. Technol. **13**, 1138 (2018).