

## Analysis of Magnetic Structure for Segmental Rotor Type 3-phase 6/4 SRM

Seok-Gyu Oh\*

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

(Received 9 December 2019, Received in final form 20 December 2019, Accepted 20 December 2019)

SRM (Switched Reluctance Motor) has a salient pole structure for both stator and rotor to maximize reluctance torque, while segmental rotor type SRM has cylindrical rotor and shorter magnetic flux path than conventional SRM, In this paper, the magnetic flux distribution, magnetic flux density, inductance, and torque were analyzed for segmental rotor type 3-phase 6/4 SRM. The torque of segmental rotor type 3-phase 6/4 SRM has more than twice than torque of conventional 3-phase 6/4 SRM, but magnetic saturation at the alignment position of stator and rotor results in big torque ripple. The alteration of the magnetic structure with carved segmental rotor is effective in reducing the torque ripple.

**Keywords** : segmental rotor type 3-phase 6/4 SRM, carved segmental rotor, torque ripple

### 분절 회전자를 갖는 3상 6/4 SRM의 자기구조 해석

오석규\*

경남과학기술대학교 메카트로닉스공학과, 경남 진주시 동진로 33, 52725

(2019년 12월 9일 받음, 2019년 12월 20일 최종수정본 받음, 2019년 12월 20일 게재확정)

릴럭턴스 토오크를 이용하는 SRM은 릴럭턴스 토오크를 극대화하기 위하여 고정자와 회전자 모두 돌극형 구조를 갖는다. 그러나 분절 회전자를 갖는 SRM(Switched Reluctance Motor)은 회전자가 원통형으로 되어 있어 풍손이 작고, 일반적인 SRM보다 자속통로가 짧은 특징을 가지고 있다. 따라서 일반적인 SRM과는 자기구조가 달라 이에 대한 해석이 필요하다. 본 논문에서는 분절 회전자를 갖는 3상 6/4 SRM에 대한 자속 분포, 인덕턴스, 자속 밀도, 토오크 등을 해석하였다. 토오크는 일반적인 3상 6/4 SRM의 토오크보다 분절 회전자를 갖는 3상 6/4 SRM의 토오크가 2배 이상 크지만 고정자와 회전자가 정렬위치에서의 자기포화로 인해 큰 토오크 리플이 발생한다. 회전자 분절에 홈을 파는 자기구조 변경하는 방식은 토오크 리플을 줄이는 데 효과적임을 알 수 있다.

**주제어** : 분절 회전자를 갖는 3상 6/4 SRM, 토오크 리플, 자기구조 변경

### I. 서 론

대부분의 전동기는 상호토오크를 사용하는 자기적 구조를 갖는 반면에 Leeds 대학의 P. J. Lawrenson 교수가 기본적인 설계 개념을 제안한 릴럭턴스(reluctance) 토오크를 이용하는 SRM(Switched Reluctance Motor)은 릴럭턴스 토오크를 극대화하기 위하여 고정자와 회전자 모두 돌극형 구조를 갖는다[1,2]. 그러나 최근 회전자가 원통형의 구조를 갖는 분절 회전자를 갖는 SRM에 대한 관심으로 많은 연구가 진행되고 있다[3-7]. 분절 회전자를 갖는 SRM은 일반적인 SRM보다

자속통로가 짧고 회전자가 원통형으로 되어 있어 풍손이 작은 특징을 가지고 있다. 또한 릴럭턴스 토오크를 이용하기 때문에 다양한 자기구조를 갖는 분절 회전자를 갖는 SRM이 연구되고 있다[3-7].

회전자 분절에 관한 연구는 P.J. Lawrenson 교수가 회전자 분절의 가능성을 제안하고[8], 분절 회전자를 갖는 SRM의 기본 개념을 Newcastle 대학의 B. C. Mecrow 교수가 제안한 이래 나가사키 대학, 경성대학 등 많은 연구팀에서 다양한 형태의 자기구조를 갖는 분절 회전자를 갖는 SRM을 연구하고 있다[3-7].

본 논문은 분절 회전자를 갖는 3상 6/4 SRM에 대한 자기 해석 및 토오크 해석을 하였다. 이 해석을 통해 자기포화를 완화하고 토오크 리플을 줄일 수 있는 자기구조를 변경하여

토오크 리플을 줄이는 연구를 하였다. 전동기의 자기구조 해석을 위해서 유한요소법 프로그램인 Altair사 FLUX를 사용하였다.

## II. 분절 회전자를 갖는 3상 6/4 SRM의 자속분포

분절 회전자를 갖는 SRM은 회전자가 원통형으로 되어 있어 풍손이 작고, 일반적인 SRM보다 자속통로가 짧은 특징을 가지고 있다. 또한 일반적인 SRM과는 자기구조가 달라 이에 대한 해석이 필요하다. 분절 회전자를 갖는 SRM의 특성해석을 위해 일반적인 SRM과 비교하였다. 이 비교를 위해 고정자는 동일한 설계를 하였고 고정자 요크(yoke)의 폭은 고정자극 폭의 절반으로 설계하였다. 이때 고정자 외경은 100 mm, 고정자 내경은 60 mm, 고정자 극호는 30°로 하였다.

Fig. 1은 대표적인 분절 회전자를 갖는 3상 6/4 SRM과

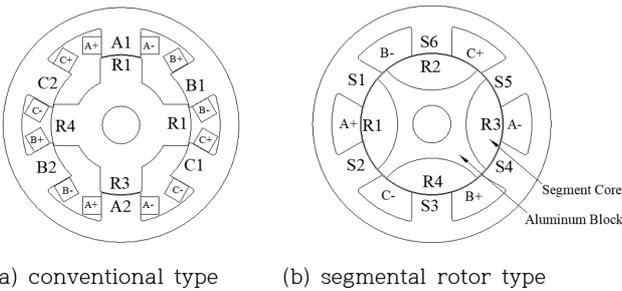
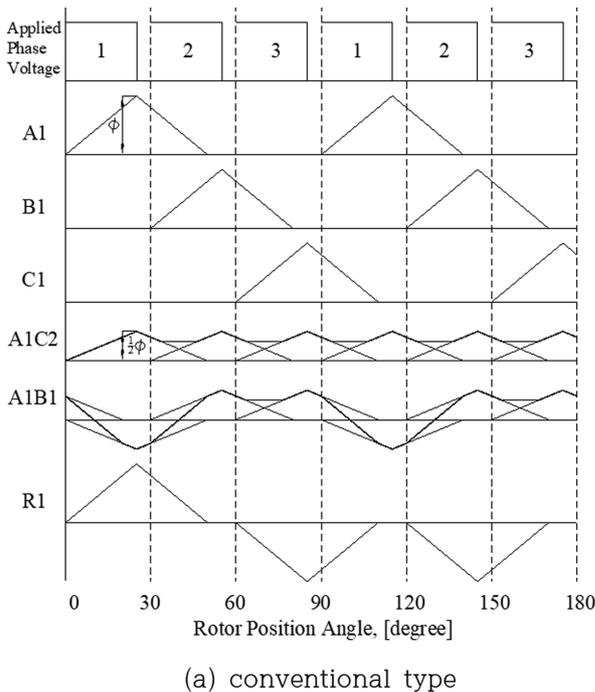


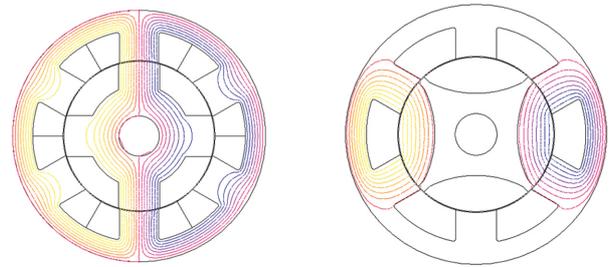
Fig. 1. Magnetic structures of 3-phase 6/4 SRMs.



(a) conventional type

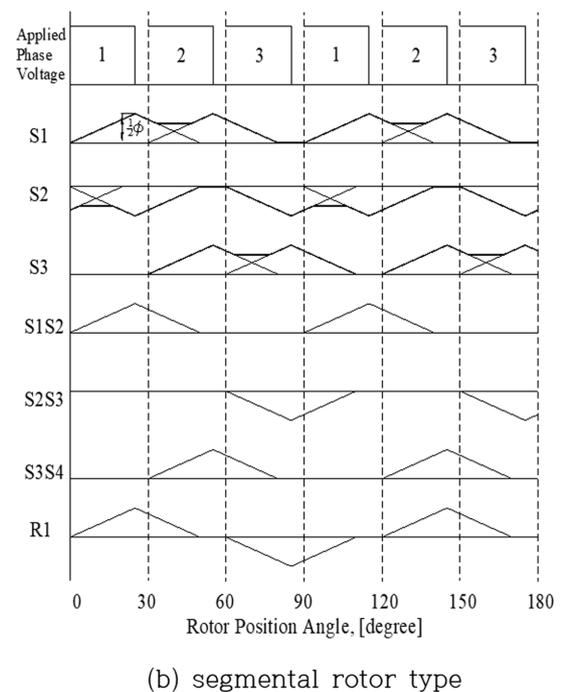
일반적인 3상 6/4 SRM을 각각 보여주고 있다. Fig. 1(a)는 일반적인 이중 돌극형의 6/4 SRM을 보여주고 있으며, Fig. 1(b)는 회전자가 원통형인 분절 회전자를 갖는 3상 6/4 SRM을 보여주고 있으며 고정자 권선이 전절권 방식으로 권선이 감겨 있다. 그리고 원통형 회전자에는 진공의 비투자율과 비슷한 비투자율을 갖는 알루미늄으로 둘러싸인 4개의 회전자 분절이 자속통로로 사용되고 있다[4-7].

Fig. 2는 Fig. 1의 SRM이 A상에 고정자와 회전자가 정렬했을 때의 자속 분포를 각각 보여주고 있다. Fig. 2(a)의 자속통로는 마주 보는 두 개의 고정자극, 두 개의 회전자극, 그리고 양쪽의 고정자 요크로 구성된 긴 자속통로를 가지고 있다. Fig. 2(b)의 자속통로는 전절권으로 권선이 있는 슬롯(slot)을 중심으로 인접 2개 고정자극과 하나의 회전자 분절로 구성된 2개의 자속통로가 만들어진다.



(a) conventional type (b) segmental rotor type

Fig. 2. (Color online) Flux distributions of 3-phase 6/4 SRMs.



(b) segmental rotor type

Fig. 3. Voltage and flux waveforms for 3-phase 6/4 SRMs.

Fig. 3은 Fig. 1에서 보여주는 SRM의 각 부분에서의 자속 분포를 보여주고 있다. Fig. 3(a)는 Fig. 1(a)의 일반적인 SRM의 각 부분의 자속 분포를 보여 있다[1]. 고정자 요크 일부분에서 자속 반전이 일어나고 있으며 회전자에서도 자속 반전이 있다. Fig. 3(b)는 Fig. 1(b)의 분절 회전자를 갖는 3상 6/4 SRM에서의 자속 분포를 보여주고 있다. 고정자 전 부분에서는 자속의 반전이 일어나지 않고 고정자 요크 부분의 경우 인근에 있는 상을 여자할 때만 자속이 흐른다. 또한 자속이 Fig. 2(b)에서 보는 바와 같이 발생한 총 자속은 2개의 자속통로를 가짐으로써 각 부분에 흐르는 자속은 전자속의 절반에 해당한다. 따라서 Fig. 1(b)의 분절 회전자를 갖는 SRM은 Fig. 1(a)의 일반적인 SRM의 고정자 각 부분보다 자속의 주파수도 작고 자속의 크기도 작은 특징이 있다.

### III. 분절 회전자를 갖는 3상 6/4 SRM의 특성해석

분절 회전자를 갖는 3상 6/4 SRM은 고정자 전체에서 자속의 교번이 일어나지 않고 또한 자속의 크기가 전자속의 절

반이어서 철손 면에서 유리한 조건을 가지고 있다.

Fig. 4는 고정자 권선에 인가되는 전류와 회전자 위치에 따른 자속을 각각 보여주고 있다. Fig. 4에서 분절 회전자를 갖는 3상 SRM이 자속의 포화가 먼저 나타나고 있고 자기포화가 되기 이전에는 같은 권선전류에서도 일반적인 SRM에 비해 더 많은 자속이 발생함을 알 수 있다. Fig. 5는 Fig. 2와 같이 고정자와 회전자가 정렬했을 때 고정자 극과 요크 부분에서의 자속밀도를 각각 보여주고 있다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 분절 회전자를 갖는 3상 SRM에서 자속통로는 2개이고 각 자속은 전 발생 자속의 절반이다. 따라서 Fig. 5(b)에서 보듯이 직렬로 된 자기 통로 내에서 고정자 요크 단면적이 고정자 극 단면적의 절반이 되기 때문에 고정자 요크 부분이 자속밀도가 커 고정자 요크 부분이 자속을 제한하는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 권선에 흐르는 전류가 1-10[A]일 때의 인덕턴스를 각각 보여주고 있다. Fig. 6(a)는 최소 인덕턴스 회전자 위치에서 최대 인덕턴스 회전자 위치까지 기울기가 거의 변화가 없지만 Fig. 6(b)는 일반적인 SRM과는 달리 기울기의 변화

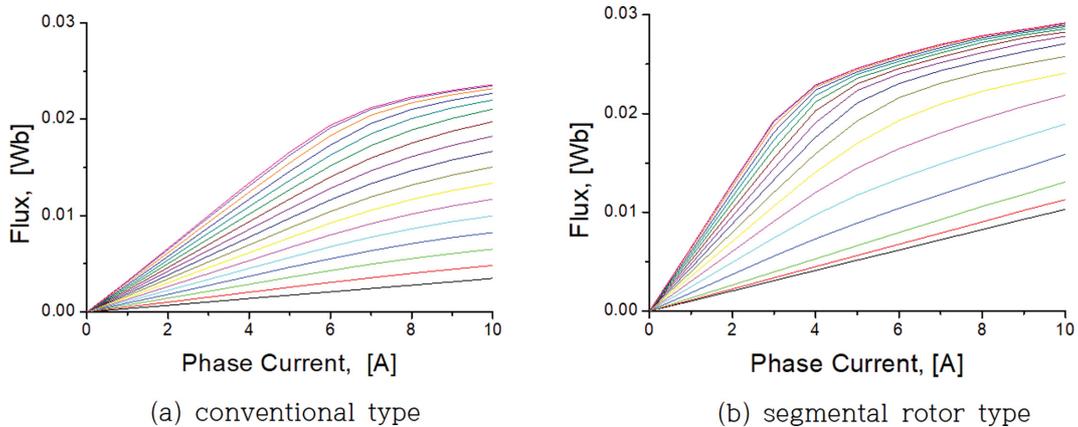


Fig. 4. (Color online) Flux vs. phase currents for rotor position angle of 3-phase 6/4 SRMs.

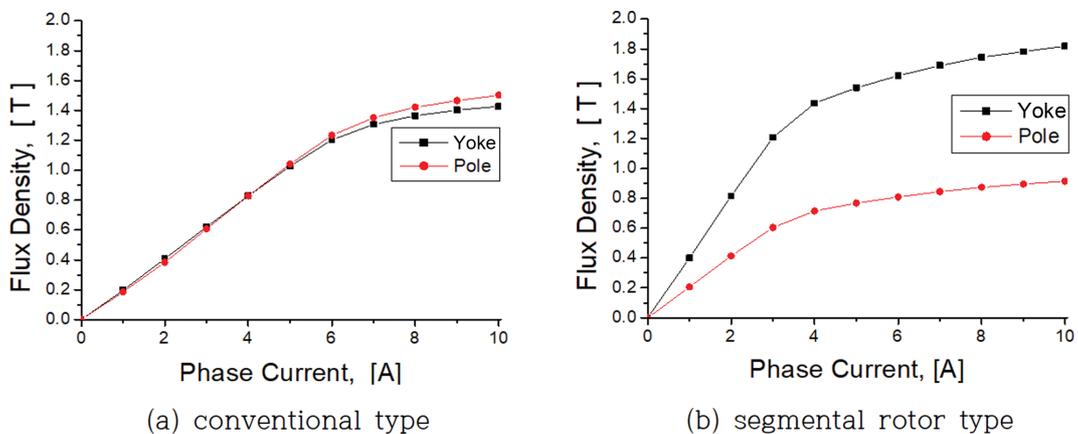


Fig. 5. (Color online) Flux density of 3-phase 6/4 SRMs according to phase currents.

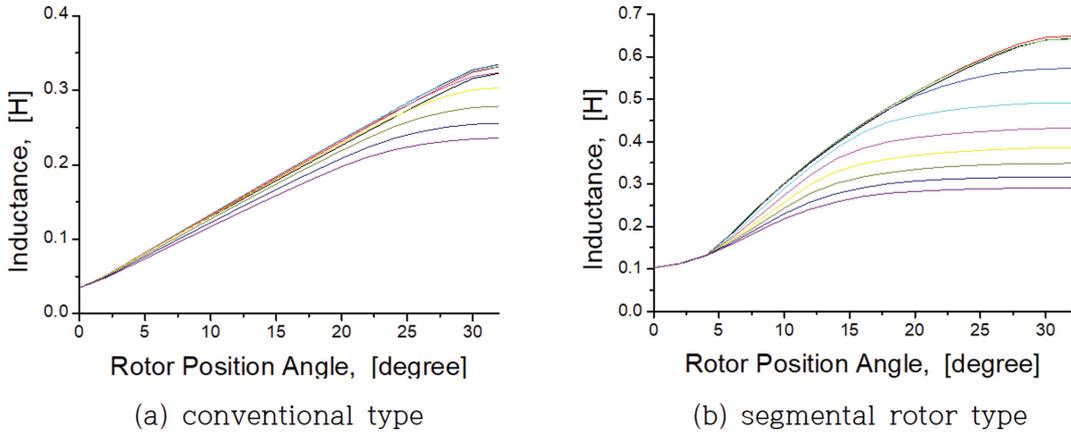


Fig. 6. (Color online) Inductance vs. rotor position angle for phase current of 6/4 3-phase SRMs.

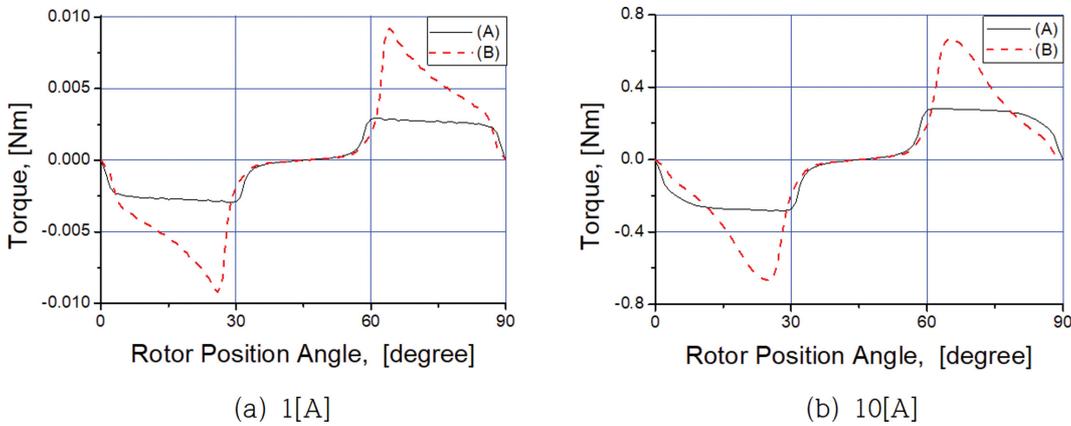


Fig. 7. (Color online) Torques of 3-phase 6/4 SRMs.

가 많고 최대 인덕턴스 회전자 위치에서는 자기포화가 심하게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 7은 고정자 권선에 일정한 전류를 1, 10[A]를 각각 흘렸을 때 발생하는 토오르크를 각각 보여주고 있다. 이때 Fig. 7에서 (A)는 Fig. 1(a)의 일반적인 SRM을, (B)는 분절 회전자를 갖는 SRM을 각각 나타내고 있다.

SRM의 토오르크(T)는 식(1)과 같이 인덕턴스(L(θ)) 변화에 비례하고 전류(i(θ))의 제곱에 비례하여 전류 방향과 무관하다[1,2].

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

Fig. 7에서 보듯이 일반적인 SRM 경우 거의 일정한 토오르크가 발생하는 데 비해 분절 회전자를 갖는 3상 6/4 SRM은 토오르크의 크기는 거의 2배 이상이지만 토오르크의 변화가 심하다. 그리고 10[A]를 흘렸을 경우, Fig. 2에서와 같이 고정자 극과 회전자 극이 정렬하는 최대 인덕턴스를 갖는 회전자 위치각으로 가까워질수록 분절 회전자를 갖는 SRM의 토오르크

는 Fig. 5에서 분석했듯이 상대적으로 자기포화가 심해 Fig. 7(b)와 같이 급격히 토오르크가 낮아지고 있다.

#### IV. 분절 회전자를 갖는 3상 6/4 SRM의 자기구조

분절 회전자를 갖는 3상 6/4 SRM은 회전자가 갖는 기구적인 특성뿐만 아니라 권선 방식, 자속통로, 고정자에서의 반전이 없는 자속 등에서 기존의 일반적인 SRM과 차이를 보여 이를 반영한 자기구조를 가져야 한다.

분절 회전자를 갖는 3상 6/4 SRM은 일반적인 SRM에 비해 높은 인가전류에서 자기포화가 심하게 나타나는 이유는 자속 통로 내의 고정자 요크 넓이가 다른 부위보다 상대적으로 작아 이 부분에서 높은 상전류시에 자기포화가 일어나기 때문임을 알 수 있다. 따라서 분절 회전자를 갖는 3상 6/4 SRM 설계 시에 기존의 일반적인 SRM과는 달리 고정자 요크를 더 키워야 한다.

Fig. 8은 고정자 요크 폭을 고정자 극의 1/2을 갖는 Fig. 1(b)의 분절 회전자를 갖는 SRM(S1)과 고정자 요크 폭을 고

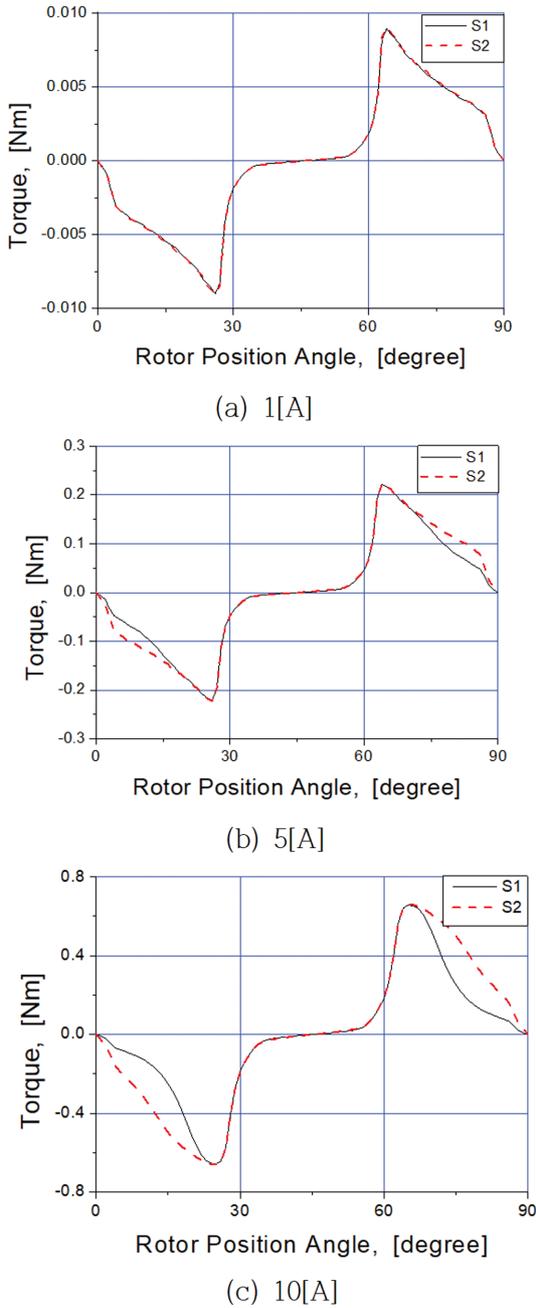


Fig. 8. (Color online) Torques of segmental rotor type 3-phase 6/4 SRMs.

정자 극의 2/3으로 키운 SRM(S2)과 비교한 토오크를 각각 보여주고 있다. Fig. 8에서 보듯이 고정자 요크를 키운 회전자 분절을 갖는 SRM(S2)가 자기포화가 완화되어 고정자와 회전자가 정렬하는 회전자 위치 부근에서 토오크가 커짐을 알 수 있다. 따라서 자속 통로 내의 직렬로 연결된 부위의 단면적을 균일하게 함으로써 자기포화를 완화할 수 있다. 그러나 Fig. 8에서 보여주는 토오크는 여전히 토오크 리플이 큼을 알 수 있다. 이러한 토오크 리플을 줄이기 위해 회전자 분절의

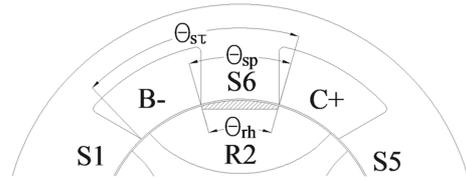


Fig. 9. Proposed rotor segment.

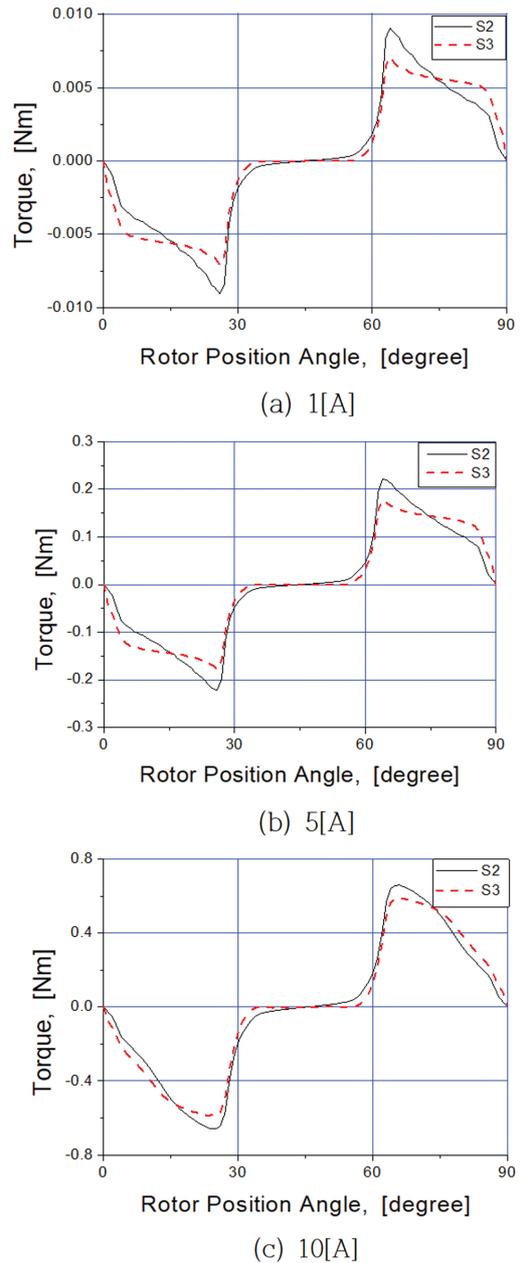


Fig. 10. (Color online) Torques of segmental rotor type 3-phase 6/4 SRMs.

구조를 Fig. 9와 같이 빗금 친 부분을 올려낸 홈을 파낸 형태를 하고 있다[7].

Fig. 9의 회전자 분절에서의 홈각( $\theta_{rh}$ )은 고정자 극절(pole

pitch)에 해당하는 각도( $\theta_{sr}$ )가 식(2)와 같을 때, 식(3)과 같은 조건으로 제한된다.

$$\theta_{sr} = \frac{2\pi}{2p} \tag{2}$$

$$\theta_{rh} \leq \theta_{sr} - \theta_{sp} \tag{3}$$

여기서  $p$ 는 상수,  $\theta_{sp}$ 는 고정자 극호를 각각 나타내고 있다. 식(3)과 같은 조건은 고정자와 회전자 분절이 정렬하였을 때 자속의 흐름을 방해하지 않고 최대 인덕턴스 값을 만들기 위한 것이다.

Fig. 9의 회전자 분절에 빗금 친 만큼 공극이 만들어져 B 상이 여자하고 회전자가 반시계방향으로 회전할 때 인덕턴스 상승 구간에서 이 공극이 자속을 제한하게 되어 Fig. 8에서 보듯이 급격한 토오크의 변화를 완화하는 효과가 발생한다.

Fig. 10은 고정자 요크 부분이 수정된 SRM(S2)와 Fig. 9의 SRM(S3)의 토오크를 보여주고 있다. Fig. 10에서 보듯이 Fig. 9와 같은 흡을 판 회전자 분절을 사용함으로써 발생 토오크 변화가 전반적으로 고정자 요크를 키운 SRM(S2)보다 적음을 알 수 있다. 따라서 흡을 판 회전자 분절은 토오크 리플을 줄이는데 효과적인 방법임을 알 수 있다.

### V. 결 론

SRM은 릴럭턴스 토오크를 사용함으로써 다양한 자기구조를 가질 수 있고 이에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. 최근에는 회전자가 원통형이고 회전자 자로는 비투자율이 진공과 유사한 알루미늄 등과 같은 물질로 둘러싸인 회전자 분절을 이용하는 SRM도 연구되고 있으며 이 또한 다양한 상수와 자기구조를 가진다. 분절 회전자를 갖는 SRM은 릴럭턴스 토오크를 사용하는 것은 같으나 자속분포, 권선방식, 자기구조 등이 달라 이에 관한 연구가 진행되어야 한다.

본 논문은 분절 회전자를 갖는 3상 6/4 SRM에 대한 자기 분포, 인덕턴스, 각 부위에서 자속밀도, 토오크 등을 해석하였다. 토오크는 기존의 일반적인 3상 6/4 SRM의 토오크보다 분절 회전자를 갖는 3상 6/4 SRM의 토오크가 2배 이상 크지만, 고정자와 회전자가 정렬 위치에서의 자기포화로 인해 토오크 리플이 큰 단점이 있다. 고정자와 회전자가 정렬 위치에서의 자기포화를 완화하기 위해 자속통로를 이루는 각 부위의 단면적을 되도록 같도록 설계를 하였으며, 또한 회전자 분절에 흡을 판 자기구조 변경하는 방식은 토오크 리플을 줄이는 데 효과적임을 알 수 있다.

### 감사의 글

이 논문은 2018~2019년 경남과학기술대학교 대학회계 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

### References

- [1] P. J. Lawrenson, J. M. Stephenson, P. T. Blenkinsop, J. Corda, and N. N. Fulton, Proc. IEE **127**, 253 (1980).
- [2] R. Krishnan, Switched Reluctance Motor Drives, CRC Press (2001).
- [3] B. C. Mecrow, J. W. Finch, E. A. El-Kharashi, and A. G. Jack, IEE Proceedings of Electric Power Applications **149**, 245 (2002).
- [4] J. Oyama, T. Higuchi, T. Abe, and K. Tanaka, J. Electrical Eng. Technol. **1**, 58 (2006).
- [5] Z. Xu, D.-H. Lee, and J.-W. Ahn, Trans. KIPE **21**, 1 (2016).
- [6] Z. Xu, D. H. Lee, and J. W. Ahn, IEEE Transactions on IA **52**, 2564 (2016).
- [7] S.-G. Oh, J. Korean Magn. Soc. **28**, 17 (2018).
- [8] P. J. Lawrenson and S. K. Gupta, Proc. IEE **114**, 645 (1967).