ISSN (Print) 1598-5385
ISSN (Online) 2233-6648
≪연구논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society 31(6), 328-334 (2021) https://doi.org/10.4283/JKMS.2021.31.6.328

A Improved Study of Magnetic Structure for 3-phase Cycloidal Reluctance Motor

Ui-Jin Kim and Seok-Gyu Oh*
Dept. of Mechatronics Engineering, GNU, Jinju 52725, Korea

(Received 17 November 2021, Received in final form 24 December 2021, Accepted 24 December 2021)

Cycloidal Reluctance Motor (CRM), called conventional wobble motor or cycloidal motor, shows a structure that can combine rotational and reciprocating motions such as a Crankshaft or Cam in the mechanical field. CRM differs from general motors in that the central axis of the motor and the central axis of the rotor are different, so the rotor is eccentric to the center of the stator. CRM has the advantage of having a large torque at low speed. This paper proposes a magnetic structure of a stator that can generate a larger torque in CRM. To verify the effectiveness of a given structure, the magnetic path was analyzed, the pole arc of the stator pole was changed or a flange was added to the stator pole. And the winding turns of stator were changed respectively. The efficacy of the magnetic analysis is validated using Altair FLUX, a finite element method program.

Keywords : Cycloidal Reluctance Motor (CRM), magnetic structure, stator windings, flange

3상 CRM의 자기 구조 개선에 관한 연구

김의진 · 오석규*
경상국립대학교 메카트로닉스공학부, 경남 진주시 동진로 33, 52725

(2021년 11월 17일 받음, 2021년 12월 24일 최종수정본 받음, 2021년 12월 24일 게재확정)

Cycloidal Reluctance Motor(CRM)는 기존의 Wobble motor 혹은 Cycloidal motor로 불리며 기계 분야에서 크랭크축(crankshaft)이나 캠(cam)과 같이 회전운동과 왕복운동을 병행할 수 있는 구조와 유사한 구조를 보여주고 있다. CRM은 일반적인 전동기와 달리 전동기의 중심축과 회전자의 중심축이 어긋나 있어 회전자가 고정자 중심에 편심 되어 있으며 저속에서 큰 토크를 갖는 장점이 있다. 본 논문은 CRM에서 더 큰 토크를 발생시킬 수 있는 고정자의 자기구조를 제안하였다. 이를 위해 자기통로를 분석하였고 이를 바탕으로 한 상분의 고정자 극호를 변경하거나, 고정자 극에 플랜지(flange)를 추가하였다. 그리고 고정자 권선을 각각 변화시켰다. 이를 증명하기 위해서 FEM 프로그램을 사용하였다.

주제어 : Cycloidal Reluctance Motor(CRM), 편심, 고정자 극호, 플랜지

I. 서 론

전동기 대부분은 고정자와 회전자 모두 대칭의 구조로 되어 있다. 현재 가장 많이 사용되는 유도기, 동기기, 직류기, BLDC, PMSM, SRM 등이 이에 해당한다[1,3]. 이 중 SRM은 상호토크를 이용한 회전자계에 의해 구동하는 형태가 아닌 자기저항(reluctance) 토크를 이용하는 상 펄스형태의 전원에 의해 구동되는 대표적인 전동기이며 고정자 회전자 모두 돌극형 구조로 되어 있으며, 축 중심에 대칭적인 구조로 되어 있다[1-3]. 그러나 cycloidal motor 혹은 wobble motor는 회전자가 크랭크축(crankshaft) 형태의 비대칭 회전자 구조로 되어 있다. 이 전동기는 낮은 속도에 고토크를 갖는 강점이 있다[4-11].

일반적으로 wobble motor는 편심 구조로 인해 감속과 단위 체적당 발생하는 토크가 크고 자기저항 토크를 사용하기 때문에 비교적 간단한 구조에 소형, 저속, 고토크 특성을 적용한 액츄에이터에 주로 사용되고 있으며, 공압제어용, 의료용으로도 연구되고 있다[4-7].

Alireza Fatemi와 Derek Lahr 팀이 cycloidal motor를 SRM과 비교 해석하면서 Cycloidal Reluctance Motor(CRM)를 제안하면서 기동원리, 구조, 토크, 효율 등 기본적인 특성을 해석하였다[10,11]. 본 논문은 Alireza Fatemi와 Derek Lahr 팀에서 제안한 고정자 극이 12개인 3상 CRM에서 고정자의 자극, 권선 수 등을 변경하여 토크를 증대시키는 방법

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.
*Corresponding author: Tel: +82-55-772-3385,
Fax: +82-55-772-3389, e-mail: sgoh@gnu.ac.kr

을 제안하였다. CRM에 대해 제안한 방법은 한 상에 해당하는 고정자 극의 넓이를 가변하는 방법, 고정자 권선수를 가변하는 방법, 그리고 고정자 극에 플랜지(flange)를 추가하는 방법이다. 이를 해석하기 위해 유한요소법 프로그램인 Altair 사 Flux를 사용하였다.

II. CRM의 자기 구조 해석

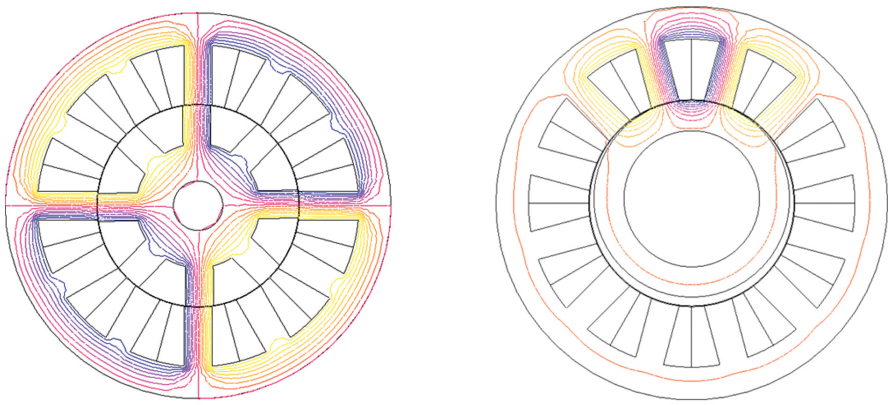
Alireza Fatemi와 Derek Lahr 팀에서 제안한 CRM은 SRM과 같이 자기저항(reluctance) 토크를 이용하는 단방향 여자 전동기(single excited motor)이나 그 자기 구조는 매우 다르다[10,11]. 아래는 일반적인 SRM과 비교한 CRM의 특징을 보여주고 있다.

1. 기계적으로나 자속 면에서도 중심축에 비대칭 구조를 가진다.
2. 최소공극이 같을 경우도 평균 공극이 크기 때문에 자기저항이 크다.
3. 최소 인덕턴스가 SRM에 비해 커 중고속에서 충분한 상전류를 확립하기 어렵다. 그리고 최대 인덕턴스는 큰 평균 공극으로 인해 낮으며 높은 전류가 흐르면 상대적으로 자기포화가 적다. 따라서 저속에 적합하다.
4. 경부하에서는 SRM에 비해 상대적으로 인덕턴스 기울기($dL/d\theta$)가 작아 발생 토크가 적다. 그리고 경부하 이상에서는 SRM에 비해 상대적으로 자기포화가 적어 높은 토크가 발생한다.
5. 구동 범위가 넓은 SRM에 비해 CRM은 저속에만 특화된 운전특성을 가지고 있으며, SRM에 비해 상당히 큰 토크 리플을 가진다.
6. 저속에서 비교적 높은 철손에도 불구하고 높은 토크 발생으로 SRM에 비해 높은 효율을 가지고 있다.

CRM은 SRM과 마찬가지로 강자성체의 철심으로 고정자와 회전자 모두 적층하여 조립하고 있다. Fig. 1은 회전자가 고정자에 정렬되었을 때의 12개의 고정자 극을 갖는 3상 SRM과 CRM을 보여주고 있다. Fig. 1(a)의 SRM은 회전자가 중심축에 대칭 구조로 되어 있으며, CRM은 일반적인 전동기와 달리 전동기의 중심축과 회전자의 중심축이 다르고, 회전자에 가해지는 힘이 비대칭으로 전달된다. 한 상에 해당하는 고정자 극은 Fig. 1(a)에서 보는 바와 같이 마주 보는 4개의 고정자 극으로 구성된 SRM과 달리 CRM의 1상의 고정자 극은 인근의 4개의 고정자 극으로 구성되어 있다. 그리고 대칭이고 돌극형 구조를 갖는 SRM의 회전자와는 달리 CRM의 회전자는 회전자의 중심축과 전동기의 중심축이 다른 도넛 형태를 하고 있다[4-11]. 이 때 시뮬레이션에 사용된 CRM의 고정자 외경은 156 mm, 내경은 78 mm, 최소 공극은 0.25 mm, 적층두께는 120 mm이며 각 고정자권선에 각각 100회 권선수로 감겨져 있다.

SRM의 권선은 각 고정자 극에 집중권으로 감겨 있고 CRM의 권선도 각 고정자 극에 집중권으로 감겨 있지만 한 상의 고정자 극의 극성을 결정하는 권선전류의 방향은 Fig. 2에서 각각 볼 수 있다[1,3,10,11]. Alireza Fatemi와 Derek Lahr 팀에서 제안한 권선 방식과 이 권선 방식에 의해 만들어진 자속 형태는 Fig. 2(a)에서 보여주고 있다[10,11]. 이 그림에서 보여주는 자속 형태는 3개의 자속통로를 가지고 있다. Fig. 2(b)는 다른 권선전류 방향을 가지며 이때 만들어지는 자속 형태를 보여주고 있다. 이때의 자속 형태는 두 개의 자속통로로 이루어져 있다.

Fig. 2의 두 가지 권선 방식에 의해 만들어지는 자속은 다르게 나타나고 있다. 여기서 공극이 일정하다면 두 가지 방식에 따른 차이는 거의 없을 것이나 CRM은 공극이 일정하지 않아 자속의 차이를 발생시킨다. 회전자가 고정자 극에 정



(a) SRM (b) CRM

Fig. 1. (Color online) The magnetic structure.

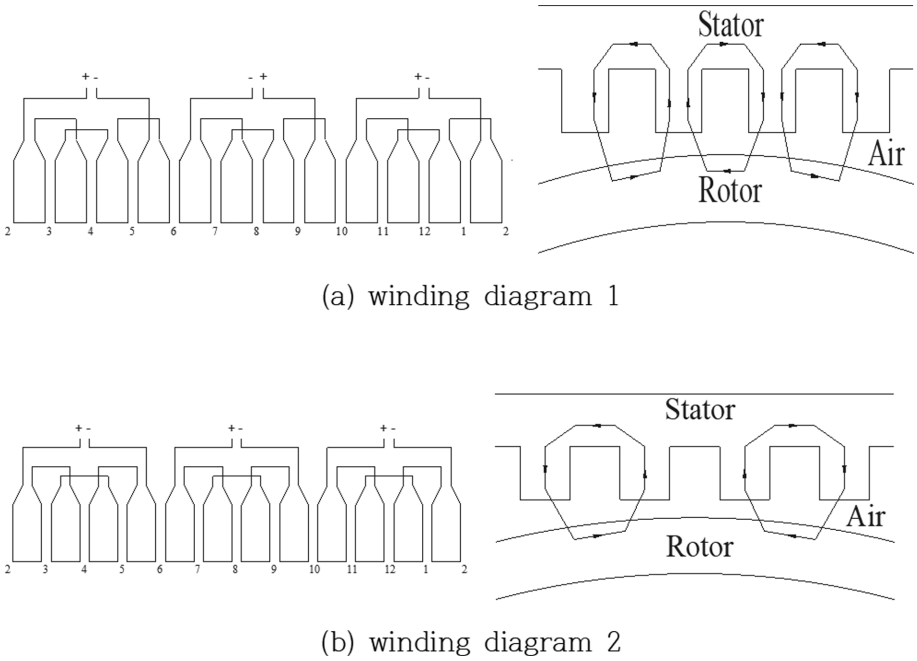


Fig. 2. Winding diagram and flux pattern of the 3-phase CRM.

렬했을 때를 기준으로 공극은 한 상분의 고정자 극 중 가운데 두 개의 고정자 극에서는 가장 짧고 나머지 두 개의 고정자 극에서는 길다. 따라서 Fig. 2(b)는 상대적으로 자기저항이 커 본 논문에서는 Fig. 2(a)의 권선방식을 사용한다.

Fig. 3은 Fig. 2의 자속통로에 대한 간단한 자기회로를 보여주고 있다. 각각 고정자, 회전자, 그리고 2개의 공극에서의 자기저항으로 구성되어 있다.

자기저항($\Re$)은 식(1)에서 보여주고 있으며

$$\Re = \frac{1}{\mu_r \mu_0 A} \tag{1}$$

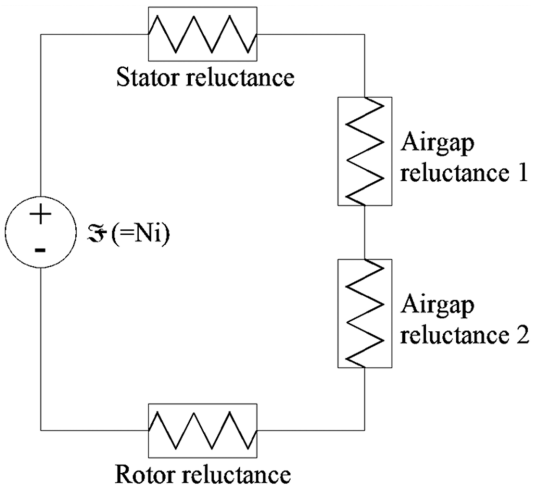


Fig. 3. The simple magnetic circuit analog to magnetic path of Fig. 2.

여기서 μ_r은 비투자율, μ_0는 공기의 투자율, A는 단면적, 그리고 l은 자속통로 평균길이를 각각 나타내고 있다. 이때 공기에 대한 μ_r은 1이며 철심에 대한 μ_r은 수천의 값을 가진다. 따라서 이 자기회로에서 고정자나 회전자의 철심의 자기저항은 공극의 자기저항에 비해 현저히 작아서 이때 만들어지는 자속은 공극에 의해 결정되어 진다[1,3].

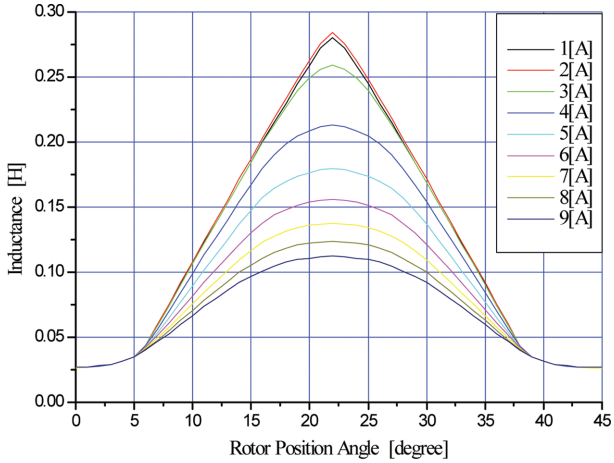
Fig. 2(a)는 3개의 자속통로로 되어 있으며 가운데 자속통로는 상대적으로 다른 두 개의 자속통로보다는 공극이 작음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 2(b)는 두 개의 자속통로로 이루어져 있으며 두 개의 자속통로는 Fig. 2(a)의 양옆의 자속통로와 같다. 따라서 총 자기저항은 Fig. 2(a)가 Fig. 2(b)보다 작음을 알 수 있다. 따라서 가운데 자속통로로 자속을 더 많이 흐르게 하도록 자기 구조를 적절히 조정하면 더 많은 자속이 발생하고 토크도 커질 것이다.

이때의 인덕턴스(L)는 자기저항의 역수로서 식(2)와 같다[3].

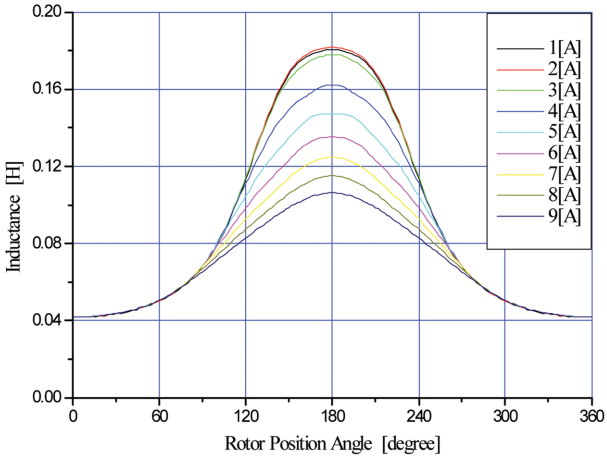
$$L = \frac{\lambda}{i} = \frac{N\Phi}{i} = \frac{N^2}{\Re} \tag{2}$$

여기서 λ는 자속쇄교수, i는 상전류, N은 권선수, 그리고 Φ는 자속을 각각 나타내고 있다.

Fig. 4는 상전류가 1[A]에서 1[A] 간격으로 9[A]까지 흘렀을 때의 인덕턴스를 각각 보여주고 있다. 최소 인덕턴스는 Fig. 4에서 보듯이 CRM의 인덕턴스가 SRM의 인덕턴스보다 크다. 이것은 토크 발생 구간에서 충분한 상전류를 만드는 데 어려움이 있다. 그리고 최대 인덕턴스는 경부하에서는 CRM



(a) SRM



(b) CRM

Fig. 4. (Color online) Inductance profiles over full cycle.

의 인덕턴스가 SRM의 인덕턴스보다 작고 중부하에서는 비슷함을 알 수 있다.

CRM은 자기저항을 이용하여 구동하는 전동기로써 이때 발생하는 토크(τ)는 코에너지(W')를 미분한 값으로 구할 수 있다[3].

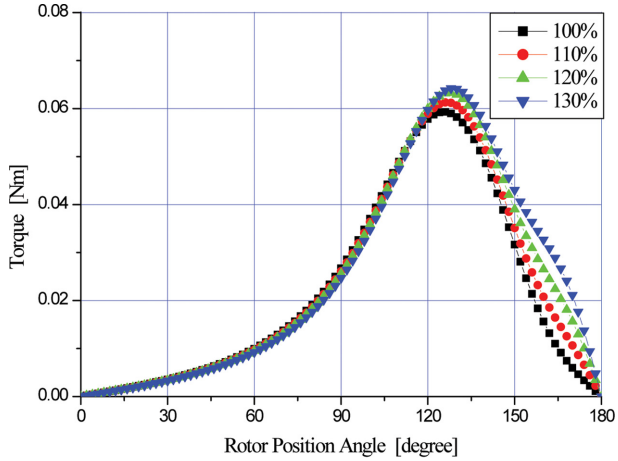
$$W' = \frac{1}{2}L(\theta)i^2 \tag{3}$$

$$\tau = \frac{\partial W'(i,\theta)}{\partial \theta} = \frac{1}{2}i^2\frac{dL(\theta)}{d\theta} \tag{4}$$

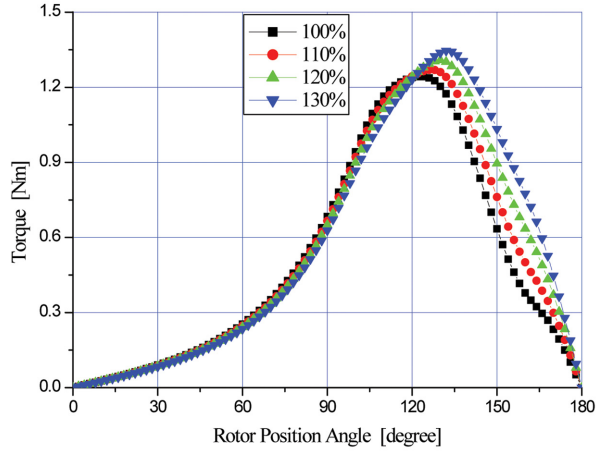
여기서 i는 상전류, θ는 회전자 위치각을 각각 나타낸다.

III. 개선된 자기 구조를 갖는 CRM의 특성 해석

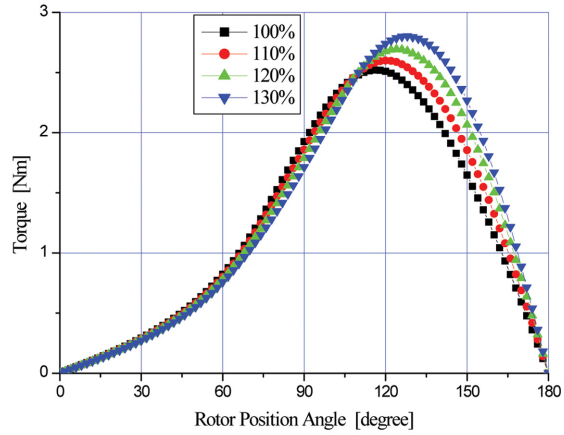
Cycloidal motor는 일반적으로 저속, 고토크 운전에 강점이 있다. 이와 유사한 Alireza Fatemi와 Derek Lahr 팀이 제안



(a) 1[A]



(b) 5[A]



(c) 9[A]

Fig. 5. (Color online) Torques according to variation of stator pole at 1, 5, 9 [A] excitation.

한 CRM은 극단적으로 저속, 중부하 조건에서 기존의 SRM보다 토크, 효율 등이 우위에 있는 전동기이다[10,11]. 본 논문에서는 CRM에 고정자 극을 가변하여 더 많은 토크를 만

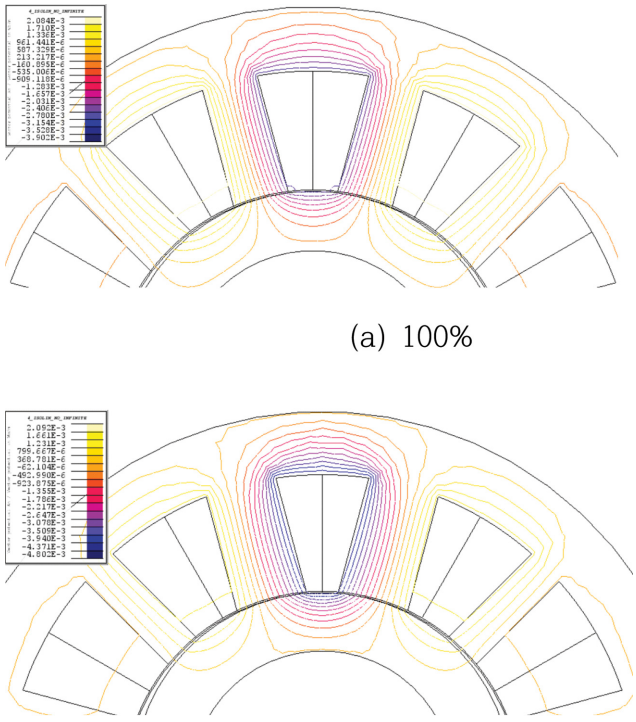
들 수 있는 자기 구조를 제안하고 있다.

Fig. 2(a)에서 3개의 자속통로 중 가운데 자속통로가 가장 공극이 작아 이 자속통로를 넓힐 수 있다면 회전자가 정렬했을 때의 인덕턴스를 높일 수 있고 큰 토크를 발생시킬 수 있다.

Fig. 5는 다양한 여자 전류 조건에서 Fig. 2(a)의 한 상분의 고정자 극에서 가운데 두 고정자 극의 크기를 각각 100%, 110%, 120%, 130%로 했을 때의 토크를 보여주고 있다. 이때 가운데 두 개의 고정자 극이 커진 만큼 나머지 두 개의 고정자 극의 단면적은 작아지게 하여 한 상분의 고정자 극의 총 단면적은 같게 하였다. Fig. 5에서 Fig. 2(a)의 자기저항이 적은 가운데 자속통로의 두 고정자 극호를 늘이며 자기포화가 많이 이루어지는 중부하에서도 토크가 커짐을 알 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 5의 고정자 극의 크기가 100%와 130%일때의 고정자 형상과 자속분포를 보여주고 있다. 그림에서 볼수 있듯이 Fig. 6(b)일 때 자기저항이 적은 가운데 두 고정자 극을 통해 더 많은 자속이 흐를 수 있다.

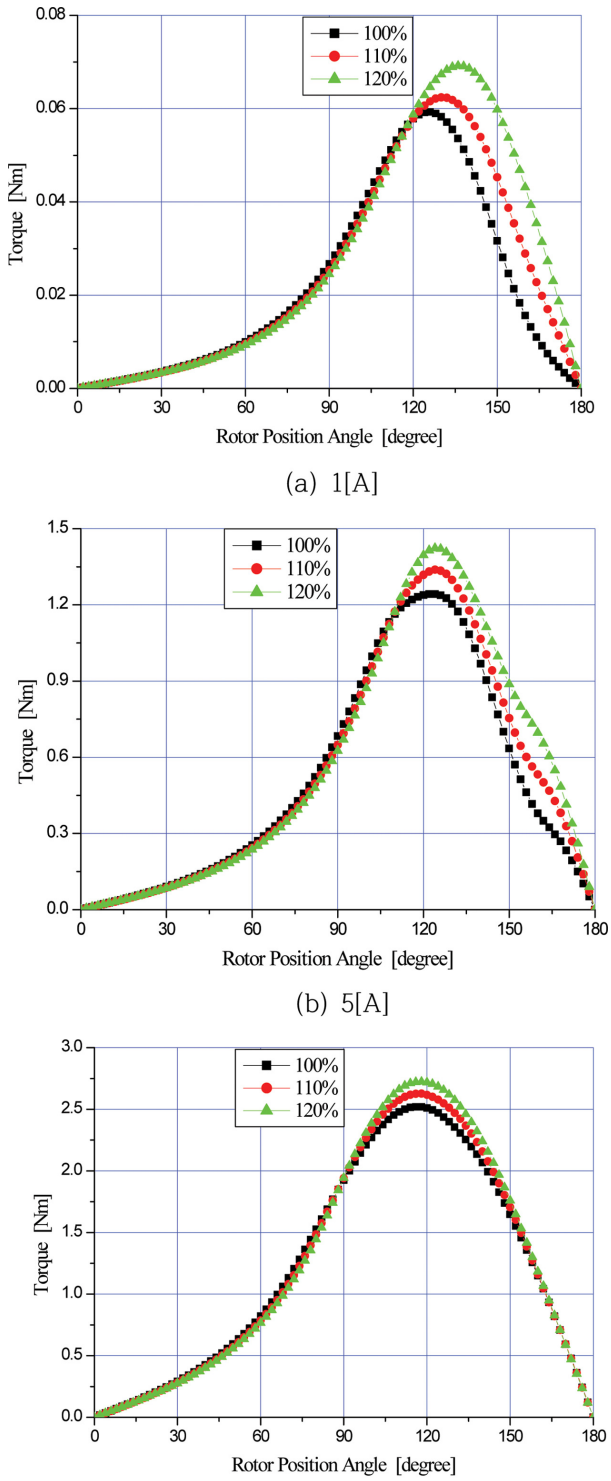
Fig. 7은 다양한 여자 전류 조건에서 고정자 권선의 권선수를 조정하였을 때의 토크를 보여주고 있다. Fig. 2에서 가운데 자속통로를 좀 더 활용하기 위해서 한 상분의 고정자 극의 가운데 두 개의 고정자 극 권선수를 각각 100%, 110%, 120%로 하고 나머지 두 개의 고정자 극 권선수를 각각 100%, 90%, 80%으로 하여 총 권선수를 같게 하였을 때의 토크를 보여주고 있다.



(a) 100%

(b) 130%

Fig. 6. (Color online) Shape of stator and flux patterns at 100% and 130% pole arc of stator pole.



(a) 1[A]

(b) 5[A]

(c) 9[A]

Fig. 7. (Color online) Torques according to variation of stator winding at 1, 5, 9 [A] excitation.

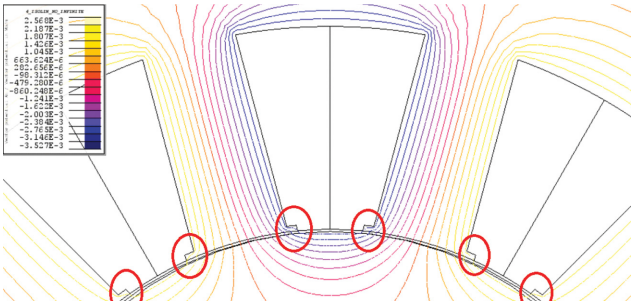


Fig. 8. (Color online) Stator pole with flange.

Fig. 7의 결과에서 보듯이 한 상의 고정자 극의 가운데 있는 두 개의 권선 수를 가변하였을 때 가운데 자속통로에 자속이 많이 흘러 전체적으로 자속이 증가하여 토크가 상승함을 알 수 있다.

Fig. 8은 고정자 극 양 끝에 플랜지를 추가하였을 때의 모양을 보여주고 있다. Fig. 9는 Fig. 8의 플랜지를 크기를 다양한 여자 전류하에서 고정자 극호로 각각 100%, 110%, 120%로 하였을 때 토크의 변화를 보여주고 있다.

Fig. 9에서 경부하에서는 플랜지의 영향으로 토크의 크기가 커지나 중부하에서는 자기포화로 인해 그 효과가 작다. 그러나 앞서 제시한 고정자 극과 권선수를 가변하면 토크의 크기가 유의미하게 커질 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 일반적인 고정자 극과 권선수를 가진 CRM, Fig. 5의 고정자 극만을 130%로 한 CRM, 그리고 Fig. 7의 일반적인 고정자 극과 120% 권선수를 가진 CRM에서의 동특성을 보여주고 있다. 이때 240 rpm에서 7[A]로 전류쵸핑을 하는 동일한 스위칭 조건에서 발생한 토크를 보여주고 있다. 고정자 극을 130%로 한 경우(Fig. 10(b))가 고정자 극을 100%로 한 경우(Fig. 10(a))보다 약 10% 정도의 토크가 더 발생했고 고정자 권선수를 120% 한 경우(Fig. 10(c))는 Fig. 10(a) 경우보다 약 6% 정도의 토크가 더 발생함을 확인할 수 있다. 그러나 Fig. 10에서 볼 수 있듯이 토크 편차가 평균토크에 50% 정도로 과도한 토크 리플은 여전히 CRM의 근본적인 문제로 남아있다.

IV. 결 론

Alireza Fatemi와 Derek Lahr 팀이 제안한 CRM은 기존의 Wobble motor 혹은 Cycloidal motor로 불리며 기계 분야에서 크랭크축이나 캠과 같이 회전운동과 왕복운동을 병행할 수 있는 구조와 유사한 구조를 보여주고 있다[10,11]. CRM은 일반적인 전동기와 달리 전동기의 중심축과 회전자의 중심축이 달라 회전자가 고정자 중심에 편심 되어 있으며 저속에서 큰 토크를 갖는 장점을 가지고 있어 소형 액츄에이터 등에 사용되고 있다.

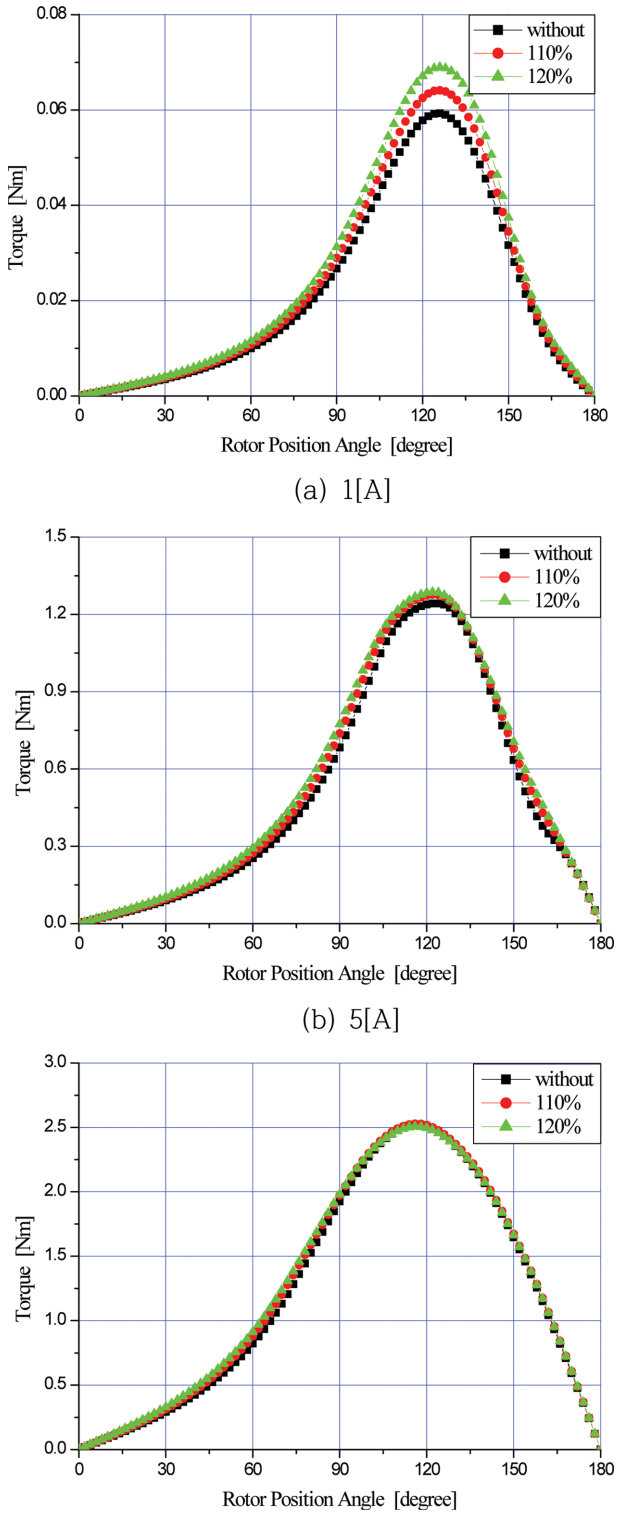
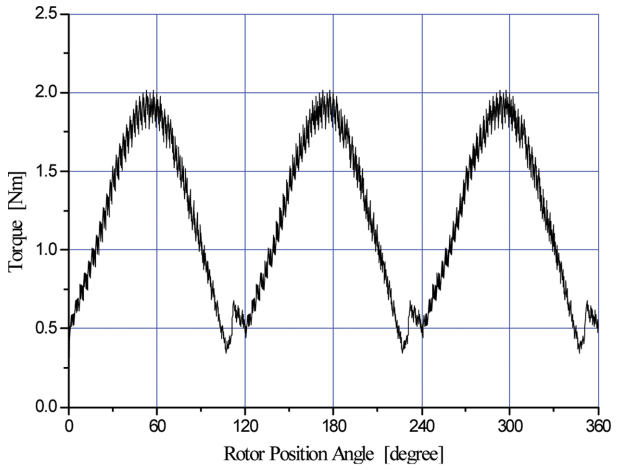
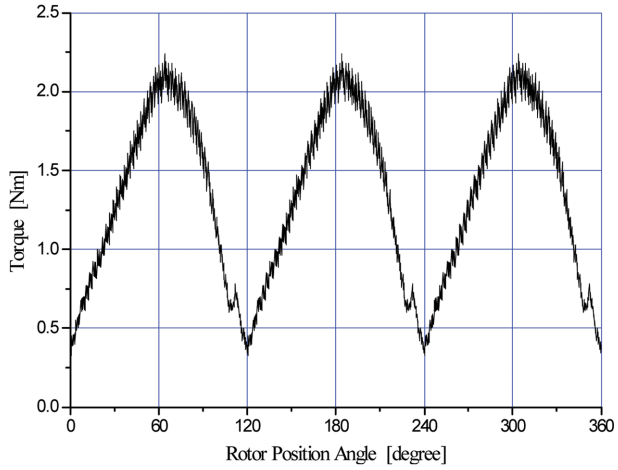


Fig. 9. (Color online) Torques according to variation of stator pole with flange at 1, 5, 9 [A] excitation.

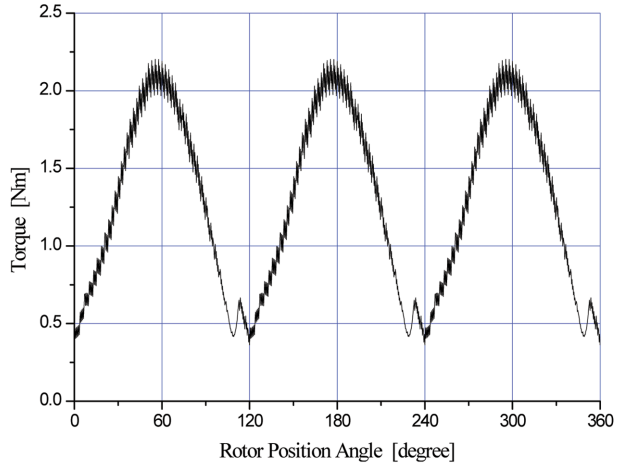
본 논문은 Alireza Fatemi와 Derek Lahr 팀이 제안한



(a) normal pole



(b) 130% pole arc



(c) 120% winding turns

Fig. 10. (Color online) Torque according to normal pole, 130% pole arc, and 120% winding turns.

CRM에서 자기 구조를 변경하여 더 큰 토크를 발생시킬 수 있는 자기 구조를 제안하였다. 이 연구는 최대 인덕턴스가 발생하는 회전자 위치에서 자기저항이 적은 쪽의 자속통로를 적극적으로 활용할 수 있도록 자기통로를 분석을 통하여 자기 구조를 변경함으로써 최대 인덕턴스를 증가시켜 전체적인 토크를 크게 하는 연구이다. 제안한 자기 구조 변경에는 고정자 극을 변경, 고정자 권선의 변경, 그리고 고정자 극에 플랜지를 추가 등이 있으며 이를 증명하기 위해 FEM 프로그램을 이용하여 그 효용성을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2020~2021년도 경상국립대학교 대학회계 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

[1] R. Krishnan, Switched Reluctance Motor Drives, CRC Press, 2001.
[2] S.-G. Oh and K. Ramu, IEEE Trans. on IA, **43**, 1247 (2007).
[3] S. Umans, A. Fitzgerald, and C. Kingsley, Electric Machinery. 6th ed. McGraw-Hill (2003).
[4] S. Woo, E. Lee, Y. Oh, S. Yun, and J. Choi, Trans on KIEE **49B**, 110 (2000).
[5] M. Miyake, K. Suzumori, and K. Uzuka, Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Biomimetics, 2523 (2011).
[6] D. Stoianovici, A. Patriciu, D. Petrisor, D. Mazilu, and L. Kavoussi, IEEE/ASME Trans. on Mechatronics **12**, 98 (2007).
[7] Y. Kadota, K. Inoue, K. Uzuka, H. Suenaga, and T. Morita, IEEE/ASME Trans. Mechatron. **18**, 1563 (2013).
[8] K. Li, J. Bird, J. Kadel, and W. Williams, IEEE Trans. Magn. **51**, 1 (2015).
[9] D. Hwang, Y. S. Ihn, and K. Kim, IEEE Trans. Ind. Electron. **65**, 4028 (2018).
[10] A. Fatemi and D. Lahr, Proc. Int. Conf. Elect. Mach. 626 (2020).
[11] A. Fatemi and D. Lahr, IEEE Trans. Energy Conversion **36**, 1852 (2021).