

工學碩士 學位論文

**Rotor의 형상 변화에 의한
Switched Reluctance Motor의
Torque Ripple 저감 설계**

A Study on the Rotor Shape Design to Reduce
the Torque Ripple in Switched Reluctance Motor.

指導教授 朴 寬 秀

2 0 0 3 年 2 月

韓國海洋大學校 大學院

電氣工學科 金 東 錫

本 論文을 金東錫의 工學碩士學位論文으로 認准함

委員長：工學博士 全 泰 寅 ㉠

委 員：工學博士 李 成 根 ㉠

委 員：工學博士 朴 寬 秀 ㉠

2 0 0 3 年 2 月

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

電 氣 工 學 科

金 東 錫

목 차

Abstract

제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경	1
1.2 SRM의 구조와 동작	3
제 2 장 SRM의 전자기적 해석	5
2.1 전류의 상 변화에 따른 SRM의 torque	5
2.2 유한요소법을 이용한 해석	7
2.2.1 정자장 지배 방정식	7
2.2.2 Maxwell stress tensor와 유한요소법을 이용한 torque계산 ..	9
제 3 장 최적설계	13
3.1 설계 민감도 해석	13
3.2 최적화 기법과 형상변경	16
제 4 장 초기 형상 해석	19
4.1 초기 형상의 구조와 크기	19
4.2 입력전류와 해석결과	21
제 5 장 Simulation of the torque ripples	24
5.1 초기화면	24
5.2 Magnetic flux line 변화	26

5.3 Magnetic flux density 변화	28
5.4 Magnetic potential 변화	29
5.5 한 주기에서 세부적인 변화 모양 확대	30
제 6 장 형상설계 및 해석 결과	35
6.1 Rotor의 폭 변경에 따른 torque ripple의 특성변화	35
6.1.1 전류의 중첩 시 rotor의 위치를 변형전과 동일하게 한 경우	36
6.1.2 Rotor 극의 중심축 변동에 따른 전류의 중첩각 조정과 중첩지 점을 추가한 경우	39
6.1.3 중첩부분의 입력전류밀도 값을 증가시킬 경우	42
6.1.4 Rotor 극의 중심축 변동에 따른 중첩각을 조정할 경우	44
6.2 Rotor 극의 형상 변경에 따른 torque ripple 특성변화	46
6.2.1 Rotor 극의 회전방향 모서리 부분을 단절한 경우	46
6.2.2 Rotor 극의 모서리 단절 부분에 돌극을 형성한 경우	49
6.2.3 Rotor 극에 삼각형 형태의 홈을 준 경우	52
6.2.4 Rotor 극에 준 홈의 깊이를 줄이고 너비는 늘린 경우	55
6.2.5 Rotor 극의 원호길이를 줄인 경우	58
6.3 해석결과 비교	61
제 7 장 결론	63
참 고 문 헌	65

A Study on the Rotor Shape Design to Reduce the Torque Ripple in Switched Reluctance Motor

by Dong Sok Kim

Department of Electrical Engineering
The Graduate School of Korea Maritime University
Busan, Republic of Korea

Abstract

The switched reluctance motor(SRM) is widely used to the various fields of industry because of it's simple structure and synchronous operations. The main disadvantages of SRM are it's noises and vibrations during the operations which are caused by torque ripple. So, the main research of SRM in this thesis is focused on the reduction of the torque ripples. The conventional method to reduce the torque ripple is controlling the input current which needs the additional complex circuits inevitably.

In this thesis, the shapes of the SRM rotor are designed to reduce the torque ripples. The finite element methods are used to design the shapes of the rotor. The method to develop the rotor shape to reduce the torque ripples are presented and the effects of the rotor shapes along with driving currents are analysed.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

현대 정보사회에서 디지털 기술이 발달함에 따라 정보기기와 같이 전동기의 입력도 디지털화하고 있으며 디지털 신호에 의하여 작동하는 전동기가 늘어나고 있다. 디지털 신호에 의한 전동기는 고주파 전류 성분이 많아짐에 따라 전동기의 회전력 불균일이 커지고 이에 따른 소음, 진동, 효율저하 등의 문제가 발생하게 되었고 특히 정보기기 등과 같이 디지털 신호를 사용하는 정밀기기에서 이러한 소음, 진동, 저효율은 기기의 특성에 큰 영향을 미친다. 따라서 디지털 입력에 의한 전동기의 동작특성해석과 설계기법에 대한 연구가 필요하게 되었다.

일반적으로 가변속 운전 분야에서는 직류 전동기가 교류 전동기에 비하여 속도제어가 쉽다는 이유로 많이 사용되어져 왔다. 그러나 직류 전동기의 정류자편과 브러시를 사용함에 따라 구조가 복잡해 가격 및 유지비가 많이 들고, 인화성 지역에 사용할 수 없으며, 보수가 어렵다는 등의 많은 단점을 가지고 있다. 이에 따라 최근 대용량의 전력용 반도체 개발과 전력전자 기술의 발달에 따라 구조가 간단하고 효율이 양호한 교류전동기가 많이 적용되고 있으며 이중 스위치 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, 이하 SRM이라고 함)의 가변속 응용 분야에 대한 연구가 증가되고 있다.

SRM은 다른 어느 전동기보다도 구조가 간단하여 제작단가가 저렴하며, 기계적으로 견고하다. 그리고 고온 등의 환경에서도 신뢰성이 높고

브러시 등이 없어 유지비가 거의 들지 않는 장점을 지니고 있다. 또한 광범위한 속도제어 범위를 가지고 있어 초고속 운전이 용이하고, 단위체 적당 torque 및 효율면에서는 유도전동기보다도 우수하고 견고한 특성을 가지고 있다. 그리고 브러시리스형으로써도 제어가 간단하여 제어용 전동기로 적합하며, 전자구조 및 스위칭 드라이브 제작 면에도 유리하므로 타 전동기에 비해 제작 및 생산적 측면에서도 많은 장점을 가지고 있다.

그러나 SRM 드라이브는 torque 발생원리상 고정자 인덕턴스가 여자 전류의 크기 및 회전자와 고정자의 상대적 위치에 따라 매우 비선형적으로 변하는 특성을 가지고 있으며, torque는 인덕턴스의 시간적 변화에 비례하여 발생하므로 불균일 회전력이 발생한다. 이를 torque ripple이라고 하는데 이로 인해 소음, 진동이 심하고, 고열이 발생하여 효율을 저하시키고 있다. 이것이 SRM의 실용화에 제약을 주고 있다.

이를 개선하기 위하여 1990년대부터 신경망과 퍼지 이론에 의한 지능형 제어방식이나 가변구조 이론과 같은 현대 제어방식을 통해 SRM의 제어성능을 개선하고자 하는 연구가 진행되어왔다.[1]-[5] 특히 최근에는 정밀제어기법을 도입하는 방식, 전류원 인버터를 이용하여 기자력전류를 직접 제어하는 방식, 그리고 스위치 오프시의 스위칭패턴을 변화하는 방식 등을 이용하여 torque ripple을 저감하려는 연구가 많이 이루어지고 있다.[5]-[12] 그러나 이것은 전류 상 제어(phase control)회로 외에 다른 제어 회로 및 센서 등이 추가되므로 제어회로가 복잡해지고 전체적인 기기의 비용이 커지게 된다.

이에 본 연구에서는 외부제어기를 도입하는 대신 전동기의 회전자의 형상을 변경하여 전동기의 torque ripple을 줄이는 방법을 개발하고자 한다. 이를 위하여 SRM을 유한요소법으로 수치 해석하여 민감도를 계산하고 최적화 기법에 의하여 설계변수를 반복 계산하는 형상설계 기법으

로 고조파 전류성분에 의한 전동기의 회전특성을 해석하여, 이를 바탕으로 디지털 운전을 위한 전동기의 최적설계 조건을 도출하고자 하였다.

1.2 SRM의 구조와 동작

자기적 구조를 매개로 하는 전기-기계 에너지 변환기구에서 torque 발생원리는 상호 토오크(mutual torque)와 릴럭턴스 토오크(reluctance torque)가 있다. 상호 토오크는 고정자와 회전자에 각각 여자에너지를 인가할 때 극대화되는 torque로 일정 회전자계 여자특성에서 발생되고, SRM은 그림 1.1처럼 고정자와 회전자 모두 돌극이 있으며 회전자도 BLDC처럼 영구자석을 사용하지 않는 구조상 가장 단순한 전동기로서 고정자 또는 회전자 어느 한쪽에서만 여자에너지를 인가할 때 자기적 구조에 의존하여 발생하는 torque로서 자기회로의 릴럭턴스와 여자에너지의 변화로 유도되어진다. 다시 말해, SRM은 고정자극 권선에 전류가 흘러 여자될 때 고정자극이 고정자의 자속쇄교를 최대로 하기 위해 회전자극과 나란히 되려는 특성에 의해서 torque가 발생한다. 이로 인해 회전자가 회전하게 된다.[13]

SRM의 전력 컨버터 회로는 특정한 순간에 상권선을 여자하고 어떤 순간에는 여자를 하지 않으려는 정도에 따라 여러 종류의 컨버터 회로가 사용된다. 그림 1.1의 회로는 이러한 SRM의 컨버터중 하나이다. 두 개의 스위치 T_1 과 T_2 가 turn on 되면 상권선은 직류전원에 연결되고 전원으로부터 전류가 권선으로 흘러간다. 이 두 스위치가 turn off 되면 권선 전류는 D_1 과 D_2 를 통해 흐르게 되며 권선에 축적된 에너지는 전원으로

돌아가게 된다. 그렇지만 상권선에 스위칭 되는 전류는 기존 교류기에 비해 정현파형이 아니라서 시간 및 공간 고조파가 불가피하게 발생된다.

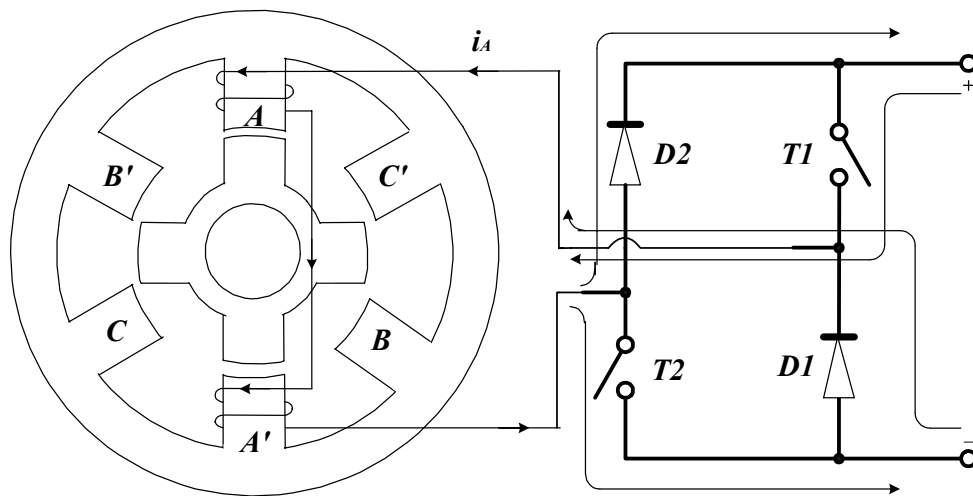


그림 1.1 SRM의 단면과 컨버터 회로

제 2 장 SRM의 전자기적 해석

2.1 전류의 상 변화에 따른 SRM의 torque

SRM의 구조와 동작특성상 인덕턴스를 한 상에 대하여 나타내면 그림 2.1(a)와 같이 rotor와 stator의 위치각에 대하여 증가(A)구간, 일정(B)구간, 감소(C)구간이 존재한다.

그림 2.1(b)와 같이 상권선에 일정한 여자전류를 흐르게 하면, 인덕턴스 증가(A)구간에서는 정 torque가 발생하고, 감소(C)구간에서는 역 torque가 발생하게 된다. 따라서 일정전류 공급하면 그림 2.1(c)와 같이 정 torque와 부 torque가 상쇄되어 전동기의 평균 torque는 0이 되므로 회전력이 발생하지 않는다.

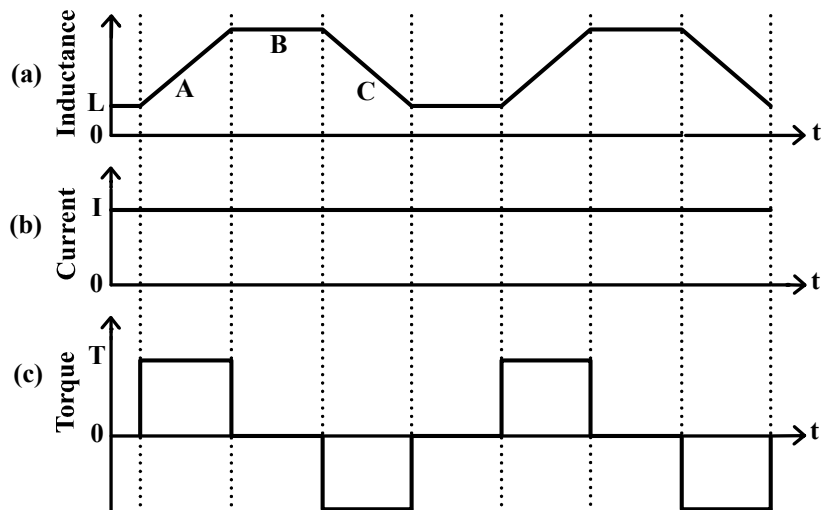


그림 2.1 SRM의 일정한 전류에서의 토오크 특성

따라서, 역 torque의 발생을 방지하고, 전동기의 회전력을 얻기 위해서는 반드시 rotor와 stator의 상위치 변화에 따라 연속적인 스위칭 여자를 해야한다.

이에 따른 수식을 살펴보면, K번째 상이 여자되었을 때 발생하는 torque는 시스템의 저장에너지를 각도로 미분함으로써 얻을 수 있는데 시스템의 저장에너지는

$$dW_k = i_k d\lambda_k \quad (1)$$

여기서 쇄교자속 λ 는

$$\lambda_k = L_k i_k \quad (2)$$

이며, 여기서 W_k 는

$$W_k = \frac{1}{2} L_k i_k^2 \quad (3)$$

Torque를 구하기 위해서 에너지를 각도로 미분하면, torque는

$$\frac{\partial W_k}{\partial \theta} = \frac{1}{2} i_k^2 \frac{\partial L_k(\theta_k)}{\partial \theta} + L_k i_k \frac{\partial i_k}{\partial \theta} \quad (4)$$

이다. 여기에 전류가 동일하므로

$$T_k = \frac{\partial W_k}{\partial \theta} = \frac{1}{2} i_k^2 \frac{\partial L_k(\theta_k)}{\partial \theta} \quad (5)$$

이다.

2.2 유한요소법을 이용한 해석

2.2.1 정자장 지배방정식

유한요소법으로 SRM을 해석하기 위한 정자장 지배방정식은 다음과 같다. Maxwell 방정식으로부터

$$\nabla \times H = J \quad (6)$$

이며, 매질을 고려하면

$$B = \mu H \quad (7)$$

벡터 자기포텐셜은

$$B \equiv \nabla \times A \quad (8)$$

로 나타낼수 있다. 식 (7)과 식 (8)을 식(6)에 대입하면

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J \quad (9)$$

벡터정리에서

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = \nabla \left(\frac{1}{\mu} \nabla \cdot A \right) - \left(\nabla \cdot \frac{1}{\mu} \nabla \right) A \quad (10)$$

이고

$$\nabla \left(\frac{1}{\mu} \nabla \cdot A \right) = 0 \quad (11)$$

이므로

$$-\left(\nabla \cdot \frac{1}{\mu} \nabla \right) A = J \quad (12)$$

이며 등방성 매질에서

$$-\nabla^2 A = \mu J \quad (13)$$

여기서 벡터 자기포텐셜 A 를 식 (8)처럼 벡터 회전 미분을 함으로써 자속밀도 B 를 구할 수 있다.

2.2.2 Maxwell stress tensor와 유한 요소법을 이용한 torque계산

전자력 밀도 f 는 전류밀도 J 와 자속밀도 B 에 의하여 다음과 같이 표시된다.

$$f = J \times B \quad (14)$$

Maxwell 방정식을 이용하면 식 (14)은

$$f = (\nabla \times H) \times B = \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times B) \times B \quad (15)$$

가 된다. 따라서 체적 V 인 물체에 작용하는 총 전자력은

$$F = \int_V f \, dv = \int_V \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times B) \times B \, dv \quad (16)$$

로 된다. 그런데 식 (16)은 surface stress P 에 의해 물체를 포함하는 임의의 표면에 대한 면적분으로 바꿀 수 있다. 벡터등식

$$(\nabla \times B) \times B = (B \cdot \nabla)B - \frac{1}{2} \nabla B^2 \quad (17)$$

를 이용하면

$$F = \frac{1}{\mu_o} \left[\int_V (B \cdot \nabla) B \, dv - \int_S \frac{1}{2} \nabla B^2 \hat{n} \, ds \right] \quad (18)$$

가 된다. 여기서 S는 체적 V의 표면적이고 \hat{n} 은 표면적 S의 단위의향벡터이다.

$$(B \cdot \nabla) B = (B \cdot \nabla) B_x \hat{x} + (B \cdot \nabla) B_y \hat{y} + (B \cdot \nabla) B_z \hat{z} \quad (19)$$

이다. 또

$$\nabla \cdot (B_x B) = (B \cdot \nabla) B_x + B_x (\nabla \cdot B) \quad (20)$$

이며, $\nabla \cdot B = 0$ 이기 때문에

$$\int_V (B \cdot \nabla) B_x \, dv = \int_V \nabla \cdot (B_x B) \, dv = \int_S B_x (B \cdot \hat{n}) \, ds \quad (21)$$

가 된다. 따라서 식 (18)은

$$F = \int_S \frac{1}{\mu_o} \left[(B \cdot \hat{n}) B - \frac{1}{2} \nabla B^2 \hat{n} \right] ds \quad (22)$$

가 된다. 식 (21)은

$$F = \int_S P \, ds \quad (23)$$

와 같이 쓸 수 있고, 여기서

$$P = \frac{1}{\mu_0} \left[(B \cdot \hat{n})B - \frac{1}{2} \nabla B^2 \hat{n} \right] \quad (24)$$

이며 Maxwell stress tensor로 부른다.

2차원 문제를 유한요소법으로 힘을 계산하기 위해서 m 개의 요소를 나누는 다음 요소의 면적을 S 라 하고, 각 요소에서의 힘을 F^e 라 하면

$$F = \sum_{e=1}^m F^e \quad (25)$$

이고, 여기서 m 은 표면 S 와 교차하는 요소의 수이다. 한 요소에서의 힘 F^e 는

$$F^e = \int_{\Delta S} P ds = P \Delta S = P \Delta C l \quad (26)$$

이고, 여기서 ΔC 는 표면 S 가 요소 e 를 자르는 길이이고, l 은 z 축 방향의 길이이다.

F^e 의 x 성분 및 y 성분 F_x^e 와 F_y^e 는

$$F_x^e = \frac{\Delta C l}{2\mu_0} \left[(B_x^2 - B_y^2)n_x + 2n_y B_x B_y \right] \quad (27)$$

$$F_y^e = \frac{\Delta Cl}{2\mu_o} [(B_x^2 - B_y^2)n_y + 2n_x B_x B_y] \quad (28)$$

이다. 여기서 torque는

$$\vec{T} = \vec{r} \times \vec{F} \quad (29)$$

로 구할 수 있다.

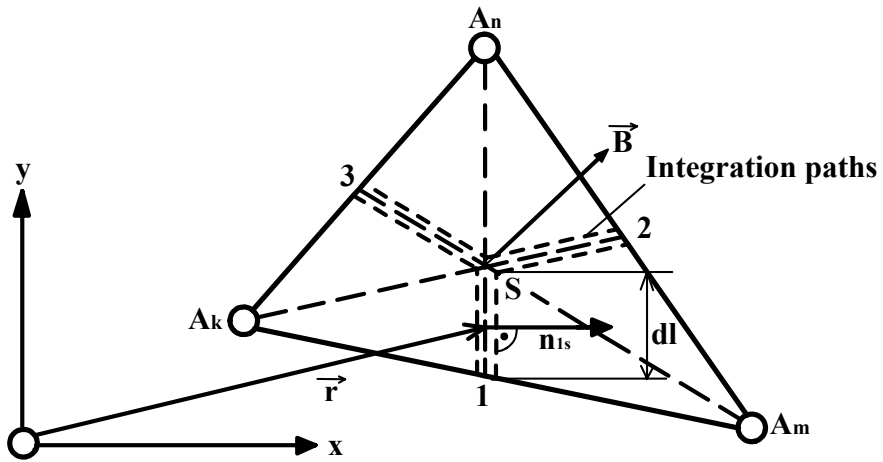


그림 2.2 적분경로와 단위벡터

제 3 장 최적설계

3.1 설계 민감도 해석

정자계를 표현하는 미분방정식은 식 (13)에 유한요소법을 적용하면 벡터 자기포텐셜 A에 대한 행렬식의 상대방정식

$$[K][A] = [Q] \quad (30)$$

을 얻을수 있다. 여기서 K는 요소를 행렬로 변환시킨 것이고 Q는 전류 source를 구동벡터로 표시한 것이다. 설계 민감도를 얻기 위하여 보조변수식

$$[K]^T[\lambda] = \frac{\partial F}{\partial [A]^T} \quad (31)$$

을 도입하면 민감도식은

$$\frac{dF}{d[p]} = \frac{\partial F}{\partial [p]} + [\lambda]^T \frac{\partial}{\partial [p]} [[Q] - [K][A]] \quad (32)$$

와 같이 된다.

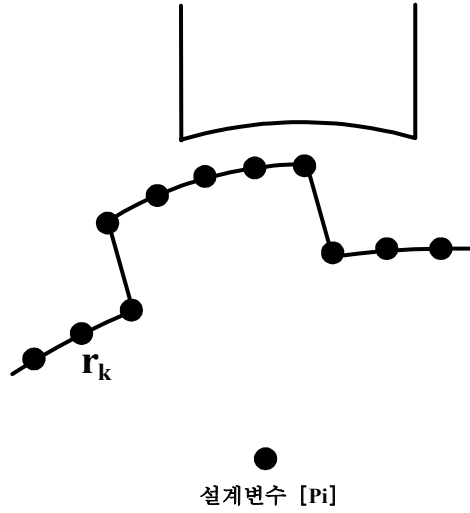


그림 3.1 설계변수 P_i 에 따른
rotor의 민감도

설계변수를 그림 3.1과 같이 도입하여 P_i 라 하고 관계되는 절점을 $[r_k]$ 라 가정하면 절점 $[r_k]$ 는

$$[r_k] = (x_k, y_k) \quad (33)$$

가 되고, 설계변수 P_i 에 대한 미분은

$$\frac{d}{dP_i} = \frac{d[r_k]}{dP_i} \frac{d}{d[r_k]} \quad (34)$$

가 된다. 식 (34)를 일반적으로

$$\frac{d[r_k]}{dP_i} = (\alpha, \beta) \quad (35)$$

로 쓸수 있고, 여기서 P_i 이 길이의 단위가 같은 양이면 식 (35)는 P_i 에 의하여 $[r_k]$ 가 움직이는 방향을 나타내며 이는 설계자가 주어야 하는 데이터이다. P_i 가 길이 단위가 아닌 다른 양일 경우는 그에 따라 식 (35)를 계산해 주어야 한다. 따라서 미분은 한 요소의 첫 번째 절점 (x_1, y_1) 으로 하여 식 (34)을 이용하여 설계변수와 연결한다. (x_1, y_1) 에 대한 미분은

$$\frac{dK_{ii}^e}{dx_1} = \int_{\Omega_e} \nu \left[\frac{\partial N_i}{\partial u} \quad \frac{\partial N_i}{\partial v} \right] [S] \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial u} \\ \frac{\partial N_i}{\partial v} \end{bmatrix} du dv \quad (36)$$

$$\frac{dK_{ii}^e}{dy_1} = \int_{\Omega_e} \nu \left[\frac{\partial N_i}{\partial u} \quad \frac{\partial N_i}{\partial v} \right] [T] \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial u} \\ \frac{\partial N_i}{\partial v} \end{bmatrix} du dv \quad (37)$$

$$\frac{dQ_i^e}{dx_1} = \int_{\Omega_e} J_s N_i (y_2 - y_3) du dv \quad (38)$$

$$\frac{dQ_i^e}{dy_1} = \int_{\Omega_e} J_s N_i (x_3 - x_2) dudv \quad (39)$$

이며 (u, v) 는 (x, y) 를 국부좌표계(Local coordinate)로 전환한 것이고, [S], [T]는 행렬을 국부좌표계로 전환한 것을 간단히 하기 위해서 정의한 값이다. 이상과 같이 얻어진 각 요소행렬에 대한 미분을 설계변수와 절점 위치의 관계식 (35)와 결합하여 전체요소에 대하여 조립하면 전체 민감도식은 식 (32)의 우변 둘째 항이 얻어진다.

3.2 최적화 기법과 형상변경

전기기기 설계의 최적설계 문제는 목적함수와 설계변수의 관계가 일반적으로 비선형성이 크기 때문에 수리계획법에 의한 탐색방법을 이용한 최적의 설계치를 찾아야 한다. 본 연구에서는 우선 얻고자 하는 설계변수, 설계의 목적을 정량화하여 표현하는 목적함수, 시스템이 만족시켜야 하는 제약조건을 나타내는 구속조건식, 주어진 조건하에서 시스템이 상태를 나타내는 상태방정식을 포함하는 최적설계 문제를 정의한 다음, 설계변수의 미소변화에 따라 목적함수가 어떻게 변하는가를 나타내는 설계민감도를 도출한 후, 이를 설계가 개선되도록 반복적으로 설계변수를 찾는 방법을 제시한다. 이에 그림 3.2와 같은 최적화 흐름도를 작성한 후 이를 토대로 연구 방향을 정하고, 최적설계를 하였다.[14]–[16]

이 최적화 흐름도를 살펴보면 먼저 형상변형을 하고자 하는 대상을 선정하여 유한요소법을 이용하여 해석한 후, 그 결과값을 목적함수값과 비교한다. 그 결과가 수렴하지 않는 경우, rotor와 stator의 위치각에 따른 자장의 변화를 자세히 분석하고, 위 민감도식에 따라 민감도를 계산한다. 이를 토대로 최적화 기법을 이용 정밀한 형상변경을 한다. 변형한

모델을 다시 유한요소법을 이용하여 전자장 해석을 하고, 결과값을 다시 목적함수값과 비교, 그 수렴여부를 판별한다. 여기서 목적함수값이 수렴하지 않을 경우, 위 최적화 흐름도에 따라 형상변형을 한다.[17]-[30] 이 과정은 목적인 결과값이 나올 때까지 반복한다. 이러한 무한반복을 통해 목적인 결과값이 나오면 계산을 종료한다.

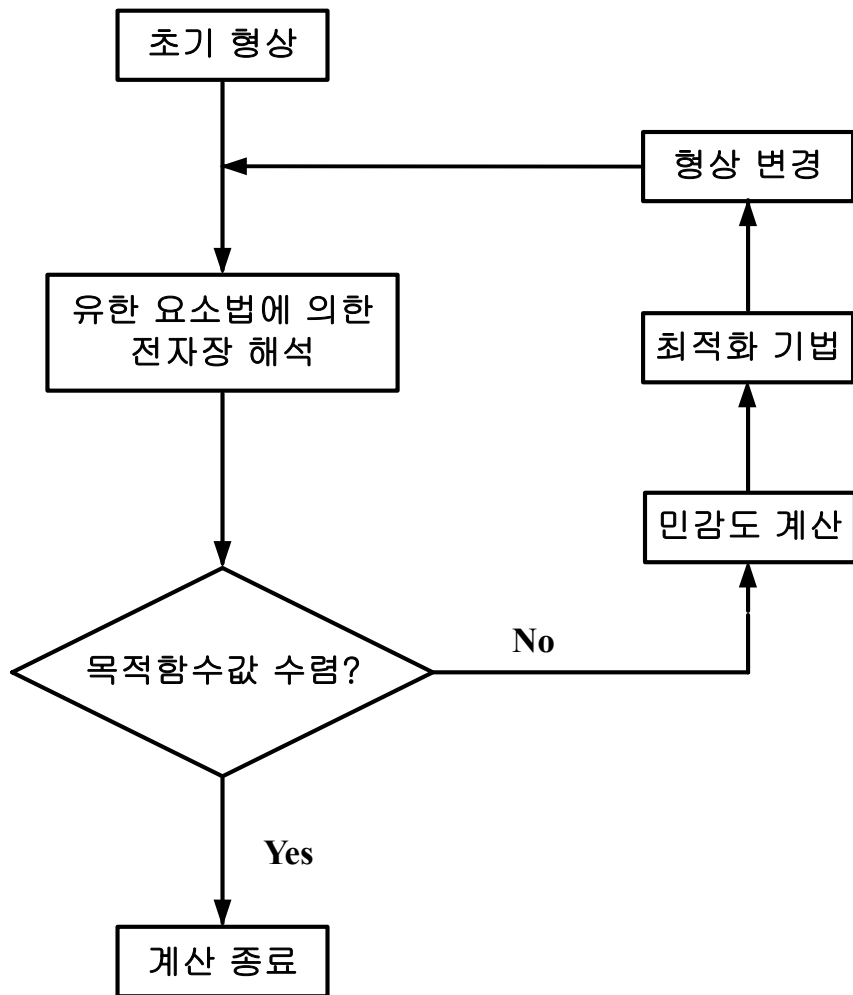
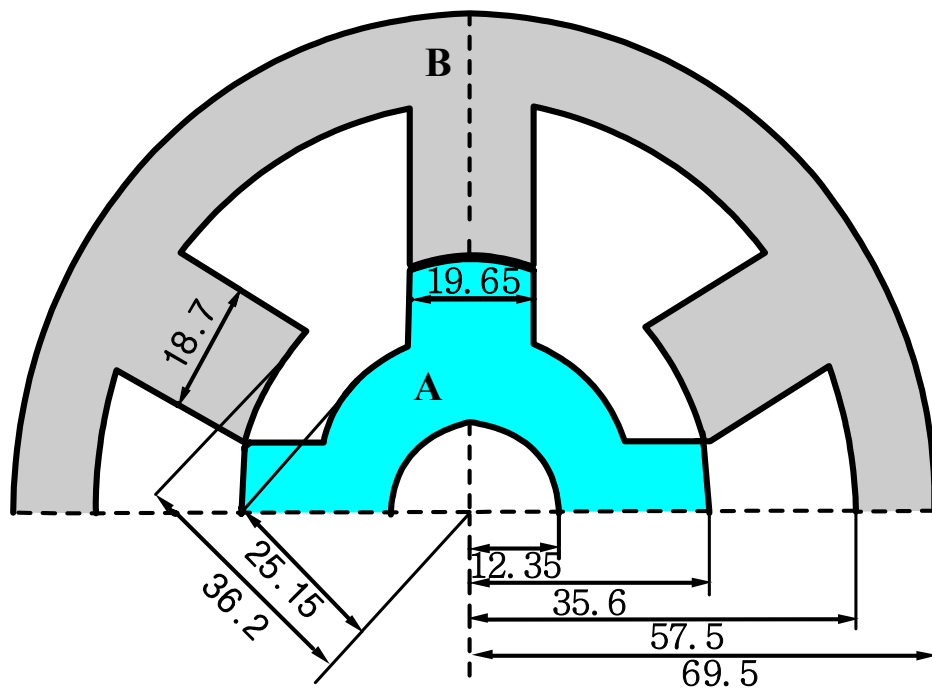


그림 3.2 형상설계 최적화의 흐름도

제 4 장 초기 형상 해석

4.1 초기 형상의 구조와 크기

해석한 SRM은 현재 사용중인 모델 중 하나를 선정하여 해석하였다. 이 SRM은 직경이 139[mm]이며, stator(B)와 rotor(A)가 각각 6극과 4극으로 이루어져 있다. rotor의 돌극폭(19.65[mm])이 stator의 돌극 폭(18.7[mm])보다 0.95[mm] 더 큰 구조로 되어있다. 한편, SRM의 torque에 가장 큰 영향을 주는 rotor극과 stator극 사이의 gap은 0.6[mm]로 하였다. Stator 돌극의 길이는 21.3[mm]이며, 돌극을 제외한 stator의 두께는 12[mm]이다. rotor 돌극의 길이는 10.45[mm]이며, 돌극을 제외한 rotor의 두께는 12.8[mm]이다. 그리고 rotor의 회전축 직경은 24.7[mm]이다. 그림 4.1은 SRM의 단면도와 치수를 나타낸 것이며, 그림에서 A는 rotor이며, B는 stator이다.



단위 : [mm]

그림 4.1 해석한 SRM의 단면도와 치수

4.2 입력전류와 해석결과

권선에 여자한 전류밀도는 $5 \times 10^7 [\text{J}/\text{m}^2]$ 로 가정하였다. 그림 1.1의 코일 전류 B, B'와 C, C'에 전류를 흘려서 최적의 torque를 해석하였다. 또한, 입력전류를 그림 4.2와 같이 5° (1주기: $25^\circ \sim 29^\circ$) 중첩하여 주었다. 이렇게 해석한 결과 평균 torque는 $10.75[\text{Nm}]$ 이며, torque ripple은 $32.9[\%]$ 였다. 그림 4.3은 이때의 torque 특성이다. 그림 1.1과 같은 rotor와 stator의 위치에 B'와 B상에 전류를 인가하면 그림 4.3의 torque 특성에서와 같이 처음에는 torque 값이 증가하다가 어느 지점을 지나면서 torque 값이 급격히 감소함을 알 수 있다. 그러다가 중첩되는 부분에서 소폭 증가함을 볼 수 있다. 즉, 심한 torque ripple이 발생함을 볼 수 있다. 따라서 이 torque ripple을 저감하기 위한 형상변경이 필요하다.[17]-[24]

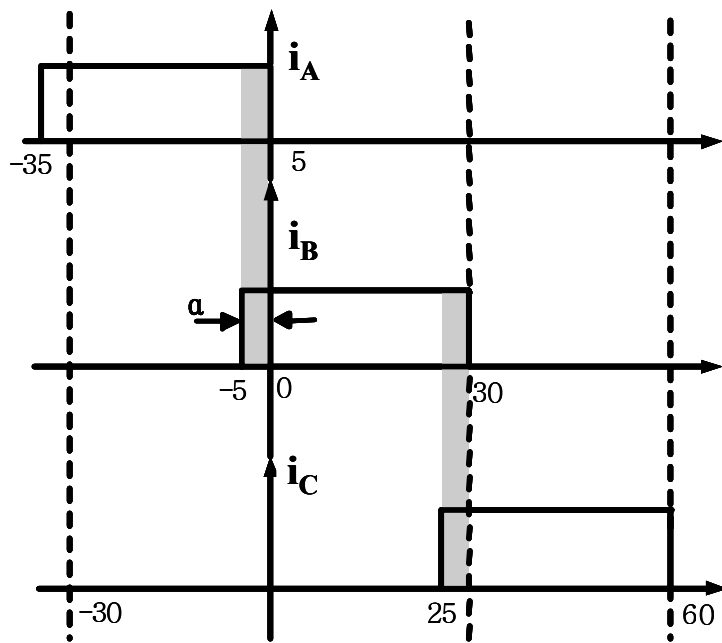


그림 4.2 초기형상의 입력전류 및 중첩정도
 (a : 중첩구간, Torque의 주기 : $0 \sim 30^\circ$)

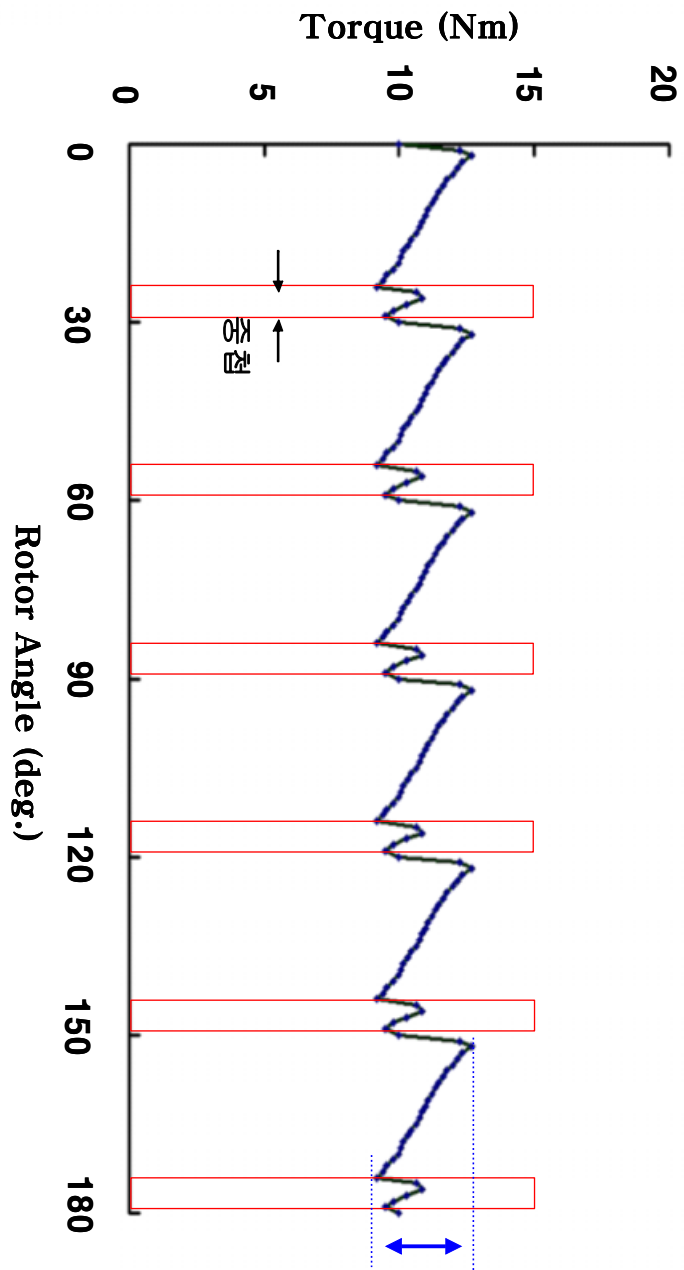


그림 4.3 유한요소법을 이용하여 해석한 초기형상의 토크특성

제 5 장 Simulation of the torque ripples

5.1 초기화면

SRM은 rotor의 돌극과 stator의 돌극의 위치 변화에 따라 torque의 값이 큰 차이를 보이기 때문에 rotor의 회전각도에 따른 자속의 변화과정과 rotor의 회전에 따른 자속밀도를 정밀하게 볼 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 SRM의 동작 특성을 쉽게 알 수 있도록 코일에 여자되는 전류의 변화에 따라 SRM의 회전자가 동작하는 모습과 회전자의 위치에 따른 torque의 변화를 'Flash 5.0' 프로그램을 이용하여 simulation 해보았다. 그리고 이를 최적설계에 활용하였다.

그림 5.1은 simulation의 초기 메뉴화면이며, 화면상에 보이는 SRM을 클릭하면 SRM의 내부 단면도를 볼 수 있다. 그리고 화면의 우측상단은 화면에 보이는 모터의 종류를 나타내며, 그림 5.2화면으로 넘어가는 방법을 설명하고 있다.

그림 5.2는 SRM의 단면도와 각부 명칭을 보여준다. 그리고 화면의 우측상단에는 magnetic flux line, magnetic flux density, magnetic potential의 회전에 따른 변화를 볼 수 있는 선택버튼이 있다.

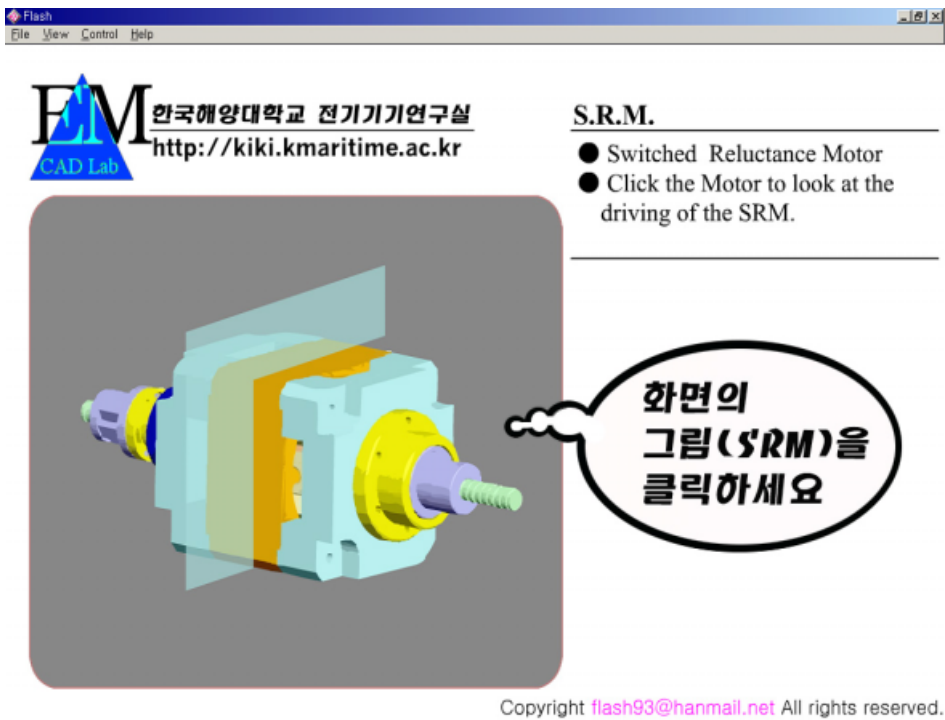


그림 5.1 Simulation 초기 화면

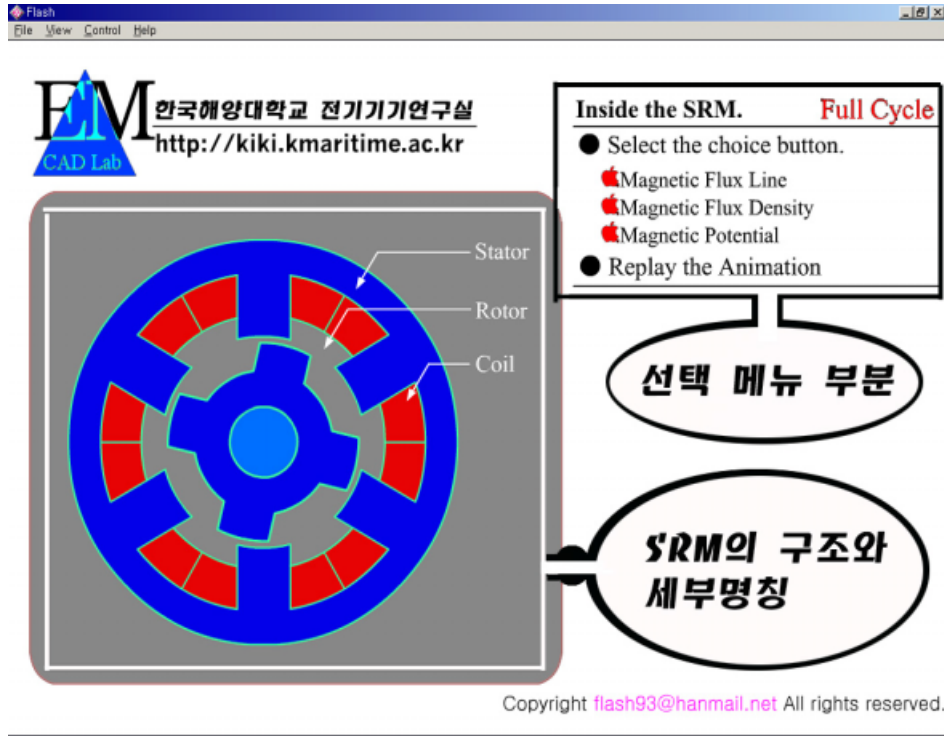


그림 5.2 SRM의 내부단면도와 동작화면

5.2 Magnetic Flux Line 변화

5.2화면의 선택메뉴에서 'Magnetic Flux Line' 버튼을 클릭 하면 그림 5.3과 같은 화면이 나온다. 이 화면에서는 rotor가 한바퀴 회전하는 동안의 전류의 상변화에 따른 magnetic flux line이 변화는 모양과 torque특성 그래프가 보여진다. 이 화면의 우측상단에는 앞에서와 같은 선택 메뉴가 있으며, 우측하단에는 전류의 상변화 과정에 따른 torque특

성 변화가 simulation 되고 있다. 그리고 중앙 하단 즉, 모터 오른쪽하단에는 일시정지, play 버튼이 있어 flux line의 정지화면을 볼 수 있다. 이로부터 rotor와 stator의 위치각에 따른 torque의 증가, 감소 구간을 알 수 있고, 이를 통해 형상변형 시 torque의 특성 변화를 가늠할 수 있게 해준다.

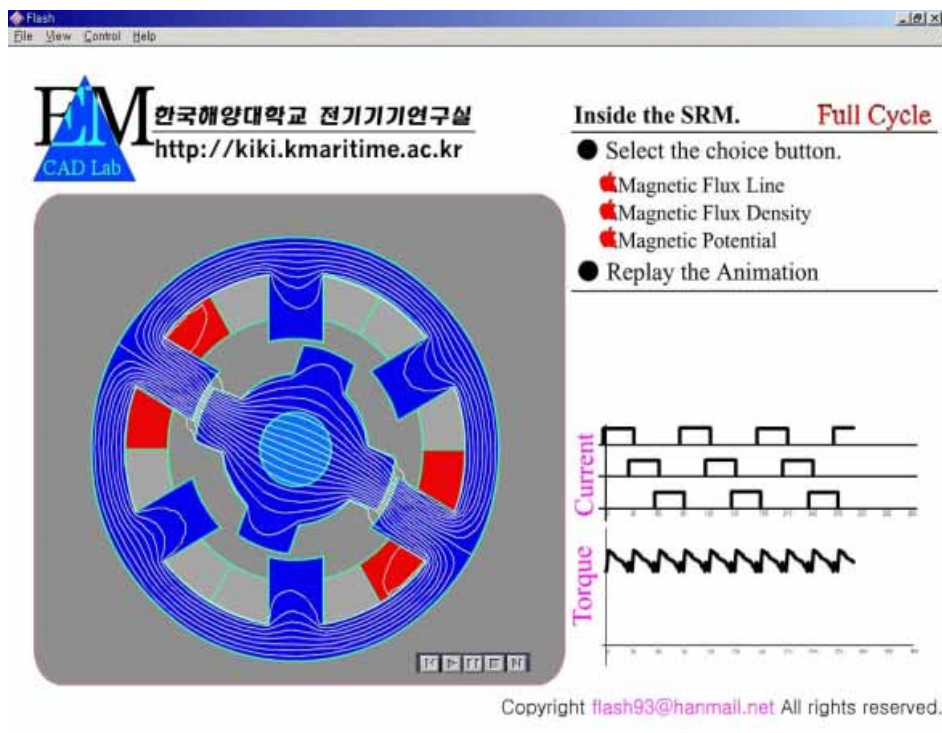


그림 5.3 Flux Line과 Torque 특성변화 Simulation 화면

5.3 Magnetic Flux Density 변화

화면의 우측상단에 있는 메뉴에서 'Magnetic Flux Density' 버튼을 클릭 하면 그림 5.4와 같은 화면이 나온다. 이 화면에서는 rotor가 한바퀴 회전하는 동안의 전류의 상 변화에 따른 magnetic flux density의 특성 변화와 torque 특성 변화 그래프가 보여 진다.

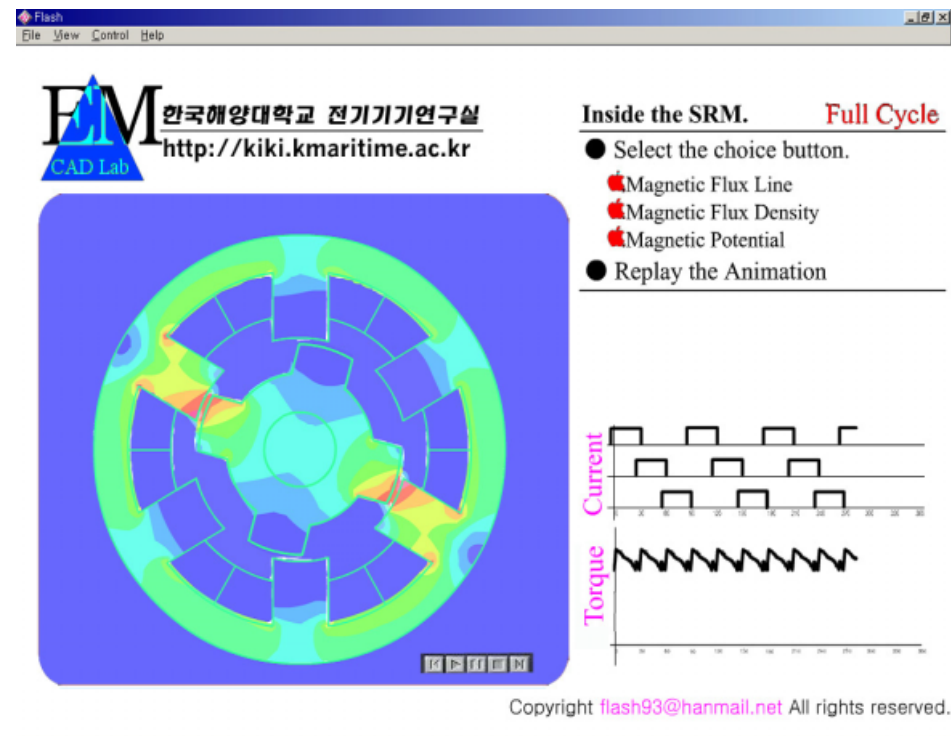


그림 5.4 전류의 상 변화에 따른 Flux Density와
Torque 특성 변화 Simulation 화면

이 화면의 우측상단에는 앞서와 같은 선택 메뉴가 있으며, 우측하단에는 전류의 상 변화과정에 따른 torque특성 변화가 simulation 되고 있다. 그리고 이 화면에서도 일시정지, play 버튼이 있어 magnetic flux density의 정지화면을 볼 수 있다.

이 화면에서는 rotor와 stator의 위치에 따른 rotor와 stator 돌극 각 부분에서의 자속밀도 변화를 볼 수 있다. 이는 바탕으로 rotor가 회전함에 따라 torque값이 큰 차이를 보이는 이유를 가늠하게 해준다.

5.4 Magnetic Potential 변화

화면의 우측상단 메뉴에서 'Magnetic Potential' 버튼을 클릭 하면 그림 5.5와 같은 화면이 나온다. 이 화면에서는 rotor가 한바퀴 회전하는 동안의 전류의 상 변화에 따른 magnetic potential이 변화는 모양과 torque 특성 그래프가 보여진다. 이 화면의 우측상단에는 앞서와 같은 선택 메뉴가 있으며, 우측하단에는 전류의 상 변화 과정에 따른 torque 특성 변화가 simulation 되고 있다. 그리고 이 화면에서도 일시정지, play 버튼이 있어 magnetic potential의 정지화면을 볼 수 있다. 이 화면에서는 SRM 내부의 자속 흐름을 알 수 있다. 또한, 해석상의 문제점 유무판별을 할 수 있다.

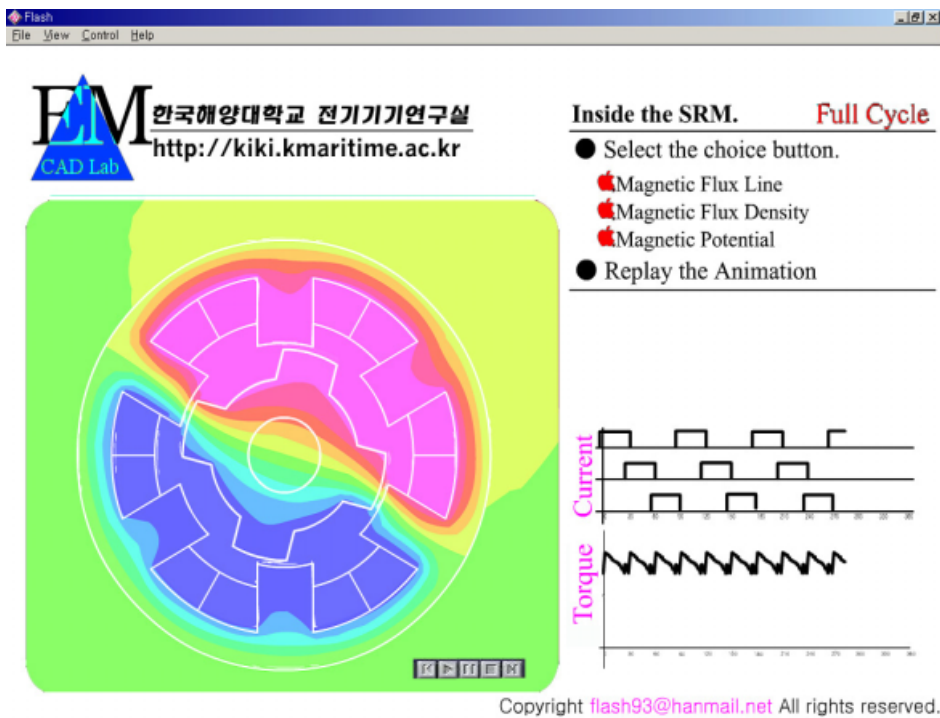


그림 5.5 전류의 상 변화에 따른 Magnetic Potential과 Torque 변화 simulation 화면

5.5 한 주기에서 세부적인 변화 모양 확대

우측 메뉴 상단에 있는 'Full Cycle' 버튼을 클릭한 후, 메뉴에 있는 버튼들을 클릭 하면, rotor가 한 주기동안 회전 시, rotor와 stator 돌극 사이의 torque 특성 변화가 확대되어 보여 진다. 이 화면의 우측상단에도 'Magnetic Flux Line, Magnetic Flux Density, Magnetic Potential'의 선택메뉴가 있으며, 우측하단에는 일정한 전류밀도의 여자에 따른 한 주기의 torque 값 변화과정을 볼 수 있다. 이 화면에도 일시정지, Play버튼이 있어 미세한 rotor의 위치각 변화에 따른 세밀한 자속의 변화를 볼 수 있다.

메뉴의 'Magnetic Flux Line'버튼을 누르면, 그림 5.6과 같은 화면이 나오는데, 여기서는 한 주기동안의 미세한 rotor의 위치변화에 따른 flux line의 변화형태를 볼 수 있다. 그리고 'Magnetic Flux Density'버튼을 누르면, 그림 5.7과 같은 화면이 나오며, 여기서는 한 주기동안의 flux density의 미세한 변화를 볼 수 있다. 또한, 'Magnetic Potential'버튼을 클릭 하면, 그림 5.8과 같은 화면이 나온다. 이들 화면을 통해, rotor와 stator의 미세한 위치변화에 따른, torque값의 변화를 정확히 알 수 있어, torque의 최대치와 최소치 차이를 저감하기 위한 형상변경 방향을 정함에 있어 큰 영향을 미쳤다. 이에 simulation 연구시간을 크게 단축할 수 있었으며, 형상 변경된 모델의 torque 특성 분석 시 큰 자료가 되었다.

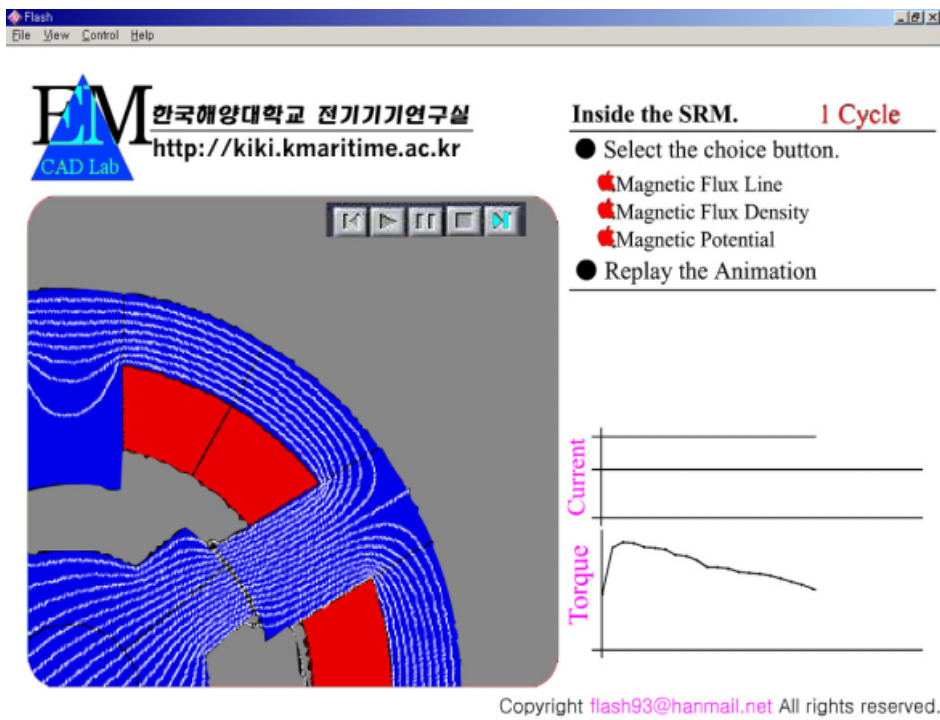


그림 5.6 확대된 한 주기에서 Magnetic Flux Line과 Torque 특성변화 Simulation화면

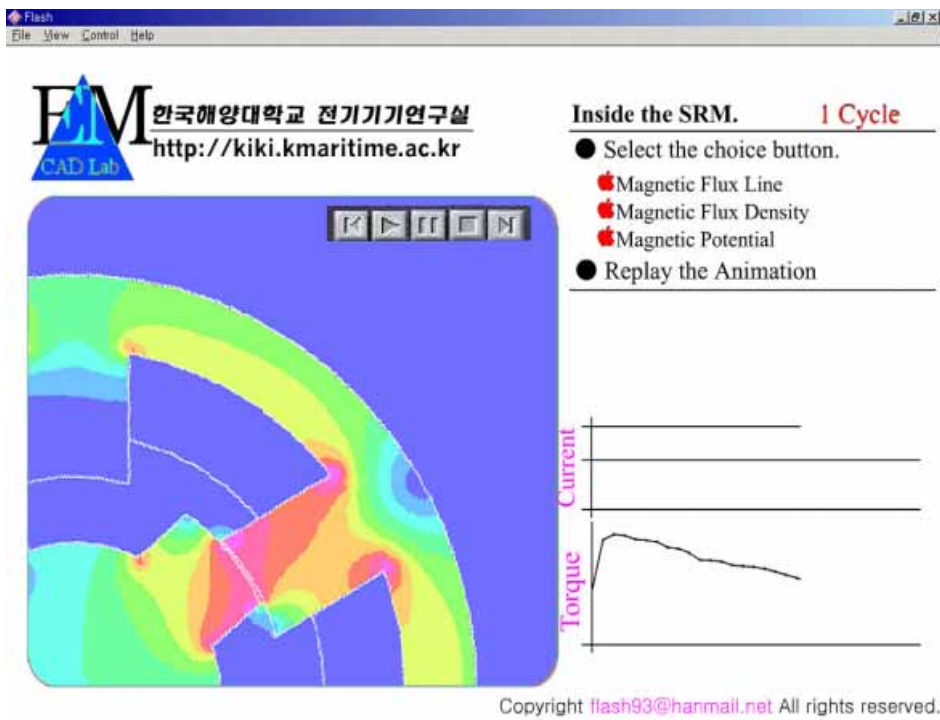


그림 5.7 확대된 한 주기에서의 Flux Density와 Torque특성 변화
Simulation화면

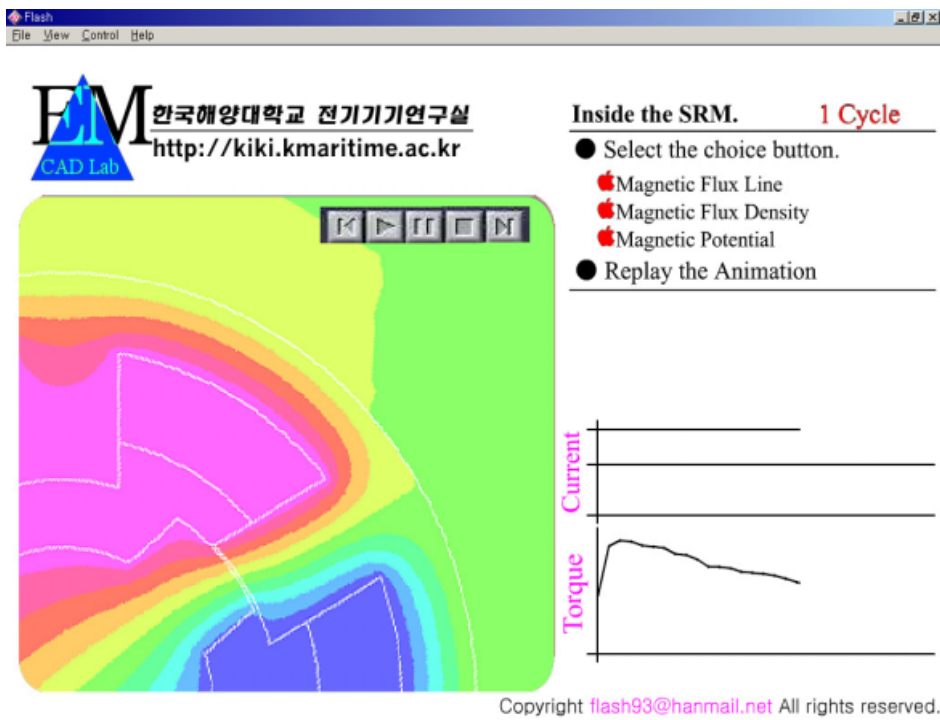


그림 5.8 확대된 한 주기에서의 Magnetic Potential 변화와 Torque 특성 변화 Simulation 화면

제 6 장 형상설계 및 해석 결과

6.1 Rotor의 폭 변경에 따른 torque ripple의 특성변화

먼저 rotor의 극 폭을 회전방향 쪽(이 연구에서는 회전방향을 시계방향으로 정함)으로 그림 6.1과 같이 6.722[mm] 증가시켜 보았다. 그리고 이 변경된 모델에 다음과 같은 조건들을 주고 해석해보았다.

- ① 전류밀도의 크기, 중첩위치, 중첩정도를 변형전과 동일하게 했을 경우
- ② 중첩위치와 중첩정도를 변경했을 경우
- ③ 전류밀도를 변경했을 경우
- ④ 중첩위치만 변경하고 중첩정도 및 전류밀도는 변형전과 동일하게 준 경우

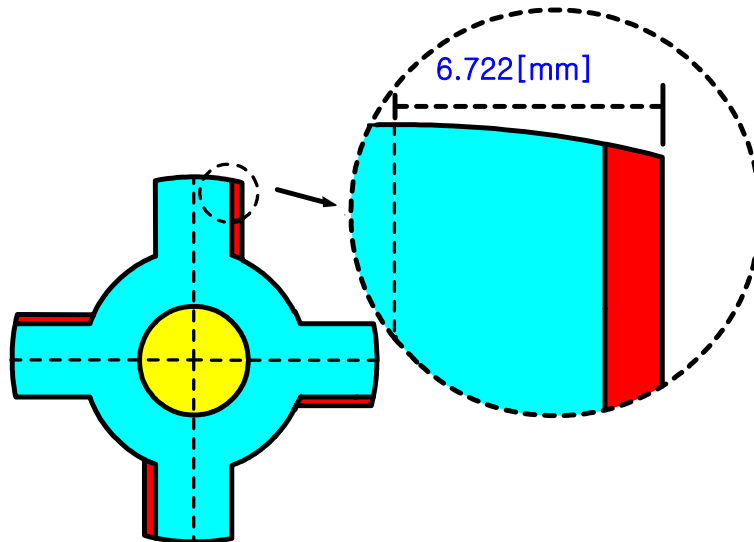


그림 6.1 Rotor의 폭이 변경된 형상

6.1.1 전류의 중첩 시 rotor의 위치를 변형전과 동일하게 한 경우

Rotor 극의 폭을 회전방향 쪽만 그림 6.1과 같이 확장하고, 입력전류의 크기, 중첩정도($5^{\circ} : 25^{\circ} \sim 29^{\circ}$), rotor의 중심축 위치는 변형 전(그림 6.2)과 동일하게 주었다. 그 결과, 평균 torque는 10.00[Nm]이며, torque ripple은 98.94[%]였다. 그림 6.3의 이때의 torque 특성변화이다.

그림 6.3의 torque 특성 변화 그림을 보면 중첩되기 전 과정에서 torque 값이 크게 감소됨을 볼 수 있다. 이로 인해 torque ripple이 증가하게 되었다. 이렇게 torque 값이 급격히 감소하는 구간이 발생한 이유는 그림 6.3과 같이 주기 중첩되기 직전 즉, rotor 극의 회전방향 시작점이 stator 극의 회전방향끝점과 일치하는 구간을 넘어서면서부터 극의 역 torque(B)가 발생하게 된다. 이로 인해 torque값이 급격히 감소하게 되며 중첩부분에서 정 torque의 합이 역 torque의 합보다 커지면서 torque값이 상승하게 된다.

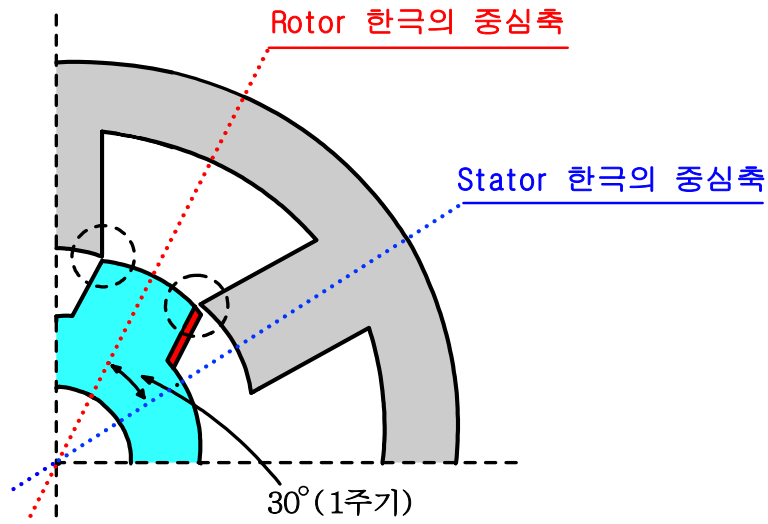


그림 6.2 Rotor 극과 Stator 극의 중심축

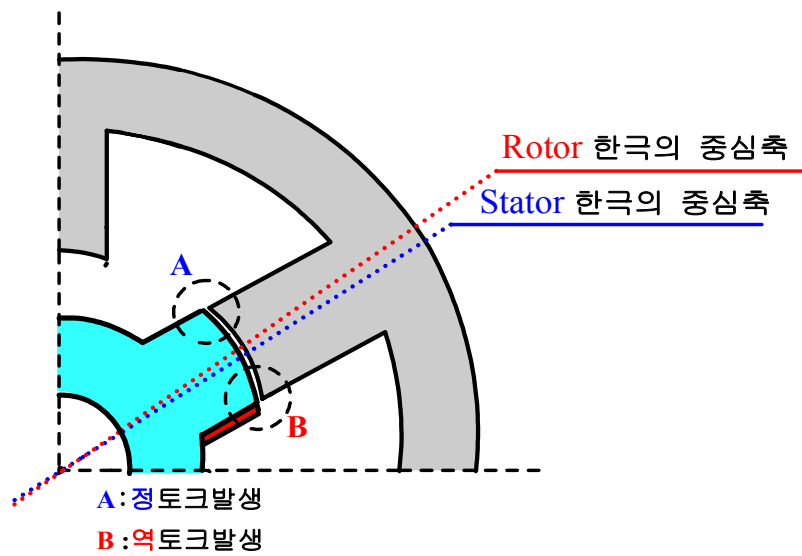


그림 6.3 역 Torque 발생으로 Torque 저감

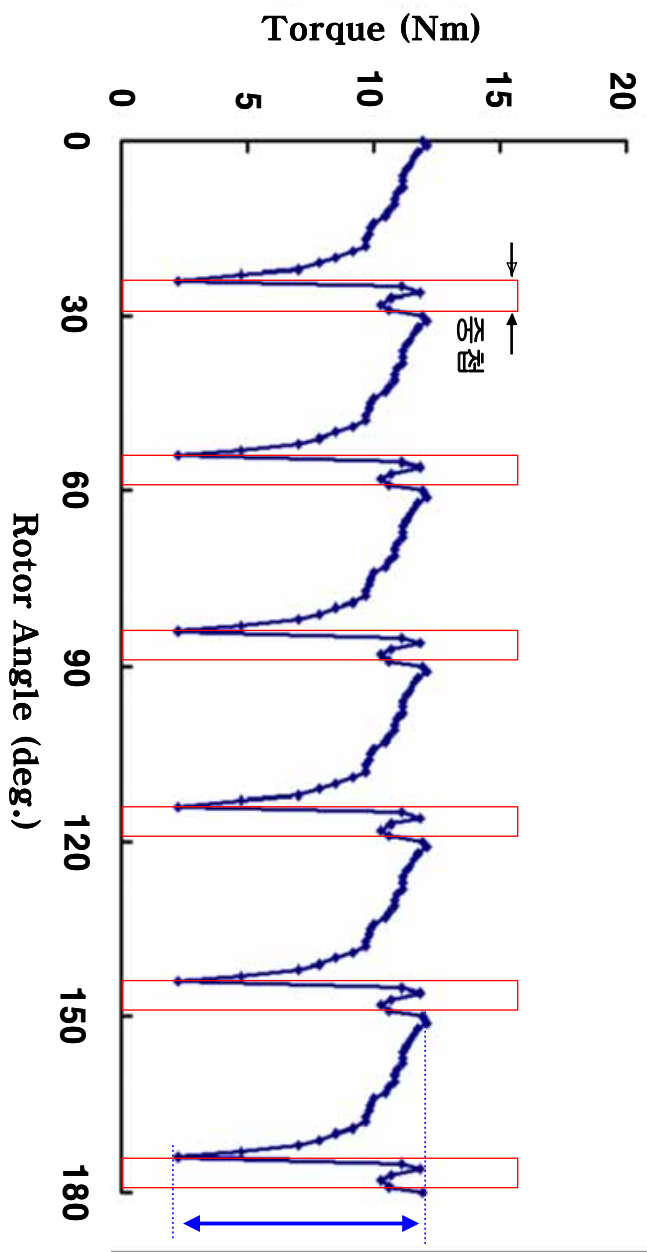


그림 6.4 전류 중첩 시 Rotor 의 위치를 변형전과 동일하게
 준 경우의 Torque Ripple 특성

6.1.2 Rotor 극의 중심축 변동에 따른 전류의 중첩각 조정과 중첩지점을 추가한 경우

각 주기의 시작점과 끝점을 그림 6.5와 같이 변형전보다 5° 앞당겼다 (회전자극의 중심축 변동). 그리고 각주기(한주기:0°~29°)에 있어서 rotor 극의 폭이 증가함으로 인해 주기가 시작되는 위치(그림 6.5)에서도 rotor 극과 stator 극이 중첩되는 부분이 생기게 된다. 이에 그 극 중첩각도에 전류중첩부분(0°~5°:추가부분, 25°~29°)을 5° 추가하였다. 입력전류밀도는 변형전과 동일한 $5 \times 10^7 [\text{J}/\text{m}^2]$ 을 주었다.

그 결과, 평균 torque는 10.73[Nm]이며, torque ripple은 28.72[%]였다. 그림 6.6은 중첩각이 추가된 입력전류이며, 그림 6.7은 이때의 torque 특성 변화이다.

중첩지점과 중첩각도를 추가한 경우 torque ripple이 형상변형전보다 4.18[%] 저감되었다. 이는 6.1.1의 경우에 생기는 역 torque를 방지하기 위해 주기의 시작점을 5° 앞당김으로써 주기가 끝나는 지점까지 역 torque가 발생되지 않고, 오히려 회전방향 반대쪽의 극 폭이 증가된 것과 같은 구조를 줌으로써 주기가 끝나는 지점까지 정 torque가 발생하게 하였다. 또한 주기의 시작지점의 torque값이 적은 것을 감안하여, 0°~5° 지점에도 전류를 중첩하였다. 이에 torque ripple을 소폭 저감 할 수 있었다. 그러나 그림 6.7의 torque ripple 특성에서 보는 것과 같이 주기의 시작부분에서 크기는 작지만 많은 ripple이 발생하고 있다. 이는 정 torque의 크기를 증가시키기 위해 준 추가된 전류중첩각 사이에서 6.1.1의 역 torque(B)보다는 작은 역 torque가 발생하였기 때문이다.

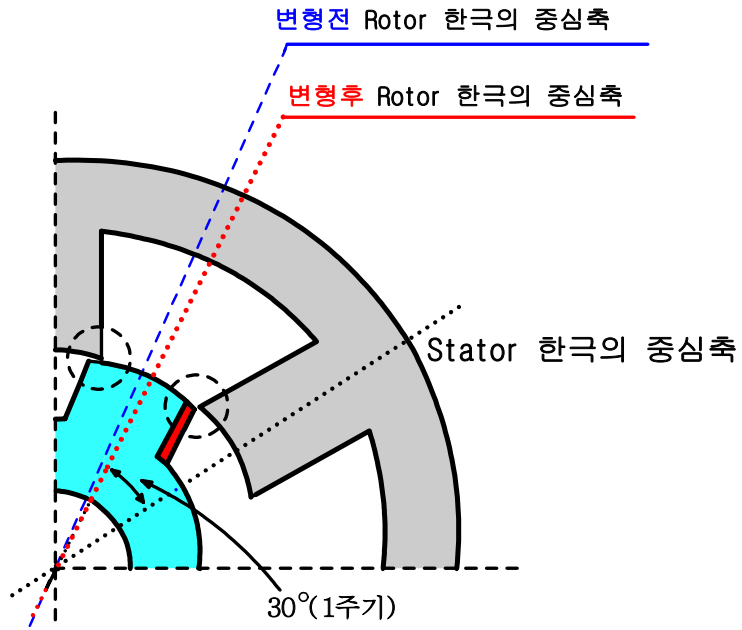


그림 6.5 Rotor의 중심축을 이동함으로써
전류중첩각을 조정할 경우

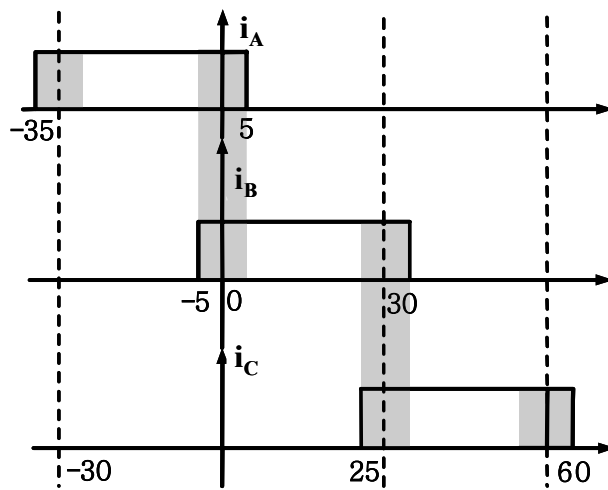


그림 6.6 중첩각 조정과 중첩구간이 추가된
경우의 입력전류

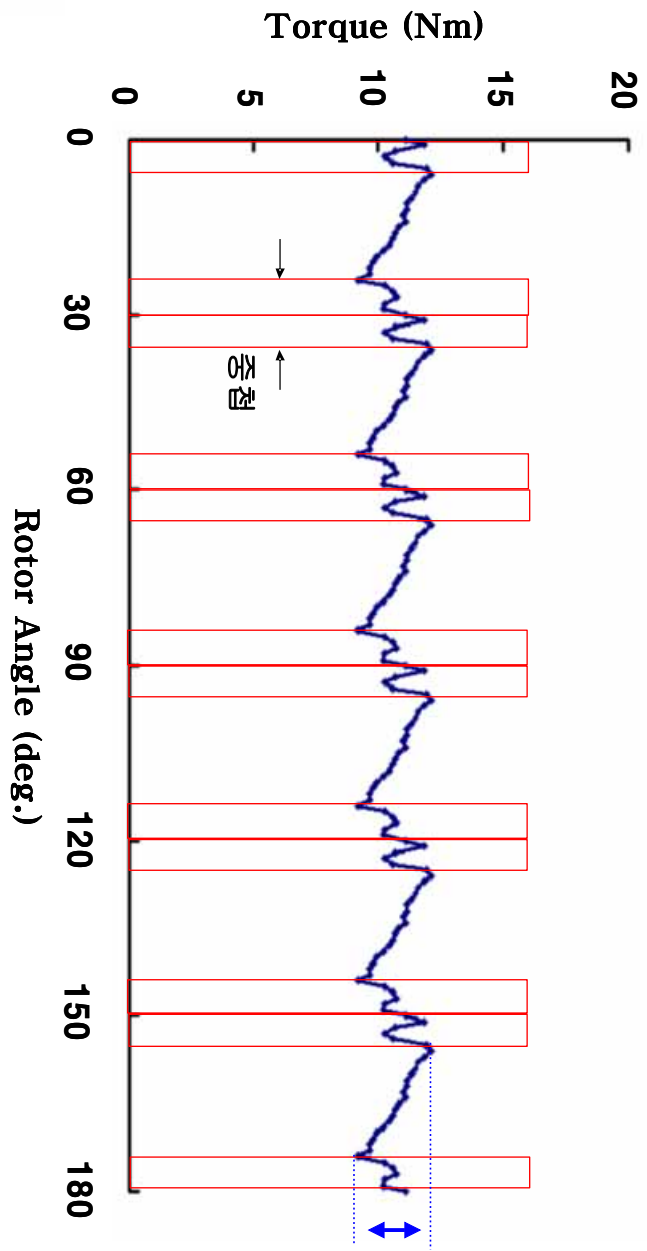


그림 6.7 Rotor 의 중심축 이동에 따른 전류 중첩각 조정과 중첩지점을 추가한 경우의 Torque Ripple 특성변화

6.1.3 중첩부분의 입력전류밀도 값을 증가시킬 경우

6.1.2와 같은 조건하에서 중첩되는 부분의 입력전류밀도값을 그림 6.8과 같이 소폭 증가 시켰다. 증가된 입력전류밀도 값은 $5.5 \times 10^7 [\text{J}/\text{m}^2]$ 이다. 그 결과, 평균 torque는 $11.32[\text{Nm}]$ 이고 torque ripple은 $34.07[\%]$ 이다. 그림 6.9의 torque 특성변화에서 보는 것과 같이 torque 값이 큰 부분에서 소폭 torque 값이 상승하였을 뿐 torque 값이 작은 부분에서는 큰 변화가 없었다. 이로 인해 평균 torque는 상승하였지만, torque ripple은 오히려 나빠졌다.

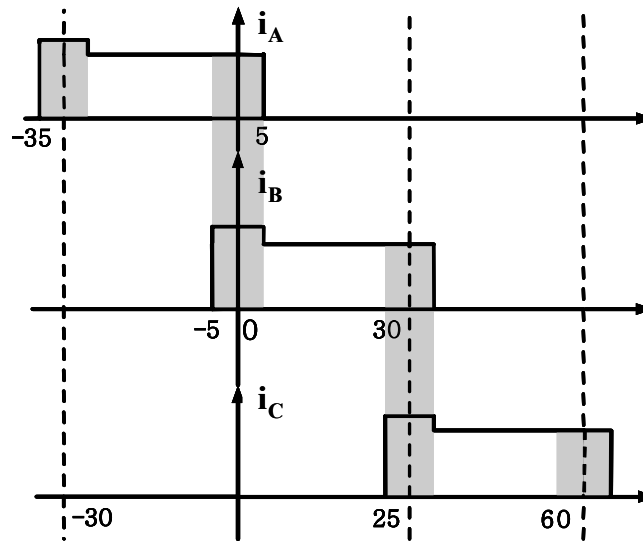


그림 6.8 중첩부분의 전류밀도 값을 변경

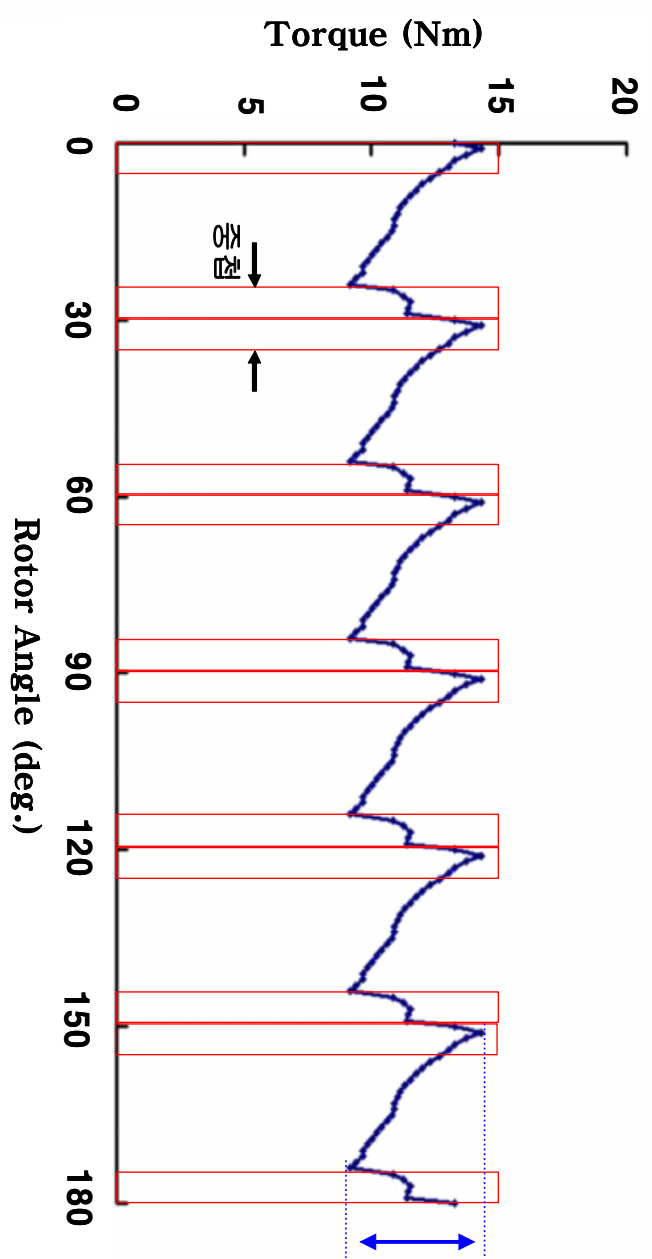


그림 6.9 중점부분의 전류밀도 값을 증가 시킬 경우의
Torque Ripple 특성 변화

6.1.4 Rotor의 중심축 변동에 따른 중첩각 조정하는 경우

그림 6.5와 같이 rotor의 중심축을 5° 정도 이동하여 각주기의 시작점과 끝점에 변화를 주고(전류중첩각이 변형전보다 5° 앞당겨짐), 전류의 크기는 변형전과 동일하게 $5 \times 10^7 [\text{J}/\text{m}^3]$ 주었다. 단, 6.1.2의 조건과 달리 중첩되는 부분을 변경된 rotor축과 stator축이 만나기 전 5° 부터 만나기 직전까지만 중첩(1주기: $25^\circ \sim 29^\circ$)을 하였다. 그 결과, 평균 torque는 $10.89 [\text{Nm}]$ 이며, torque ripple은 $25.49 [\%]$ 였다. 그림 6.10은 이때의 torque 특성변화이다.

이 경우, 변형전보다 torque ripple이 $7.41 [\%]$ 저감되었다. 이는 6.1.1의 경우에서 생기는 역 torque 발생문제를 rotor의 중심축을 5° 이동하여, 전류중첩위치를 조정하여 해결하고, 6.1.2에서 생기는 추가된 중첩부분에서의 역 torque 문제는 중첩부분을 추가하지 않음으로써 역 torque에 의한 부분적인 torque의 급 저감을 줄인 결과이다.

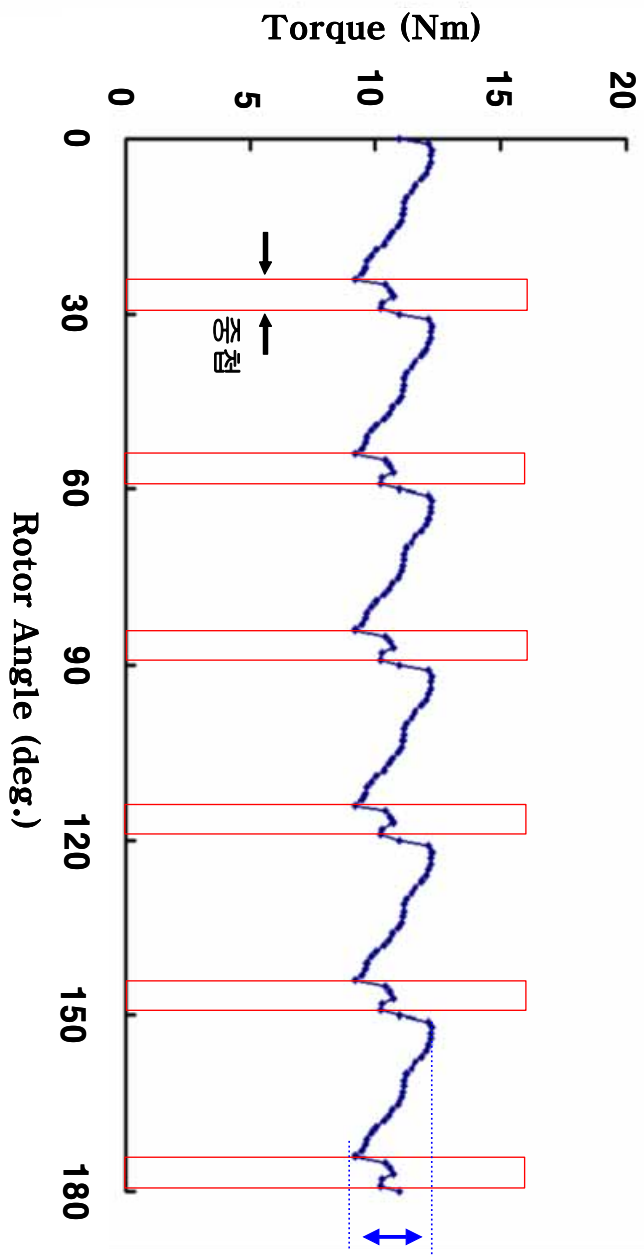


그림 6.10 유한요소법을 이용하여 해석한 초기형상의 토크특성

6.2 Rotor 극의 형상 변경에 따른 torque ripple 특성변화

6.2.1 Rotor 극의 회전방향 모서리 부분을 단절한 경우

Rotor극의 우측모서리(회전방향)를 그림 6.11과 같이 조금 잘라 줌으로써 torque ripple을 줄이고자 하였다. 이는 변형전의 torque ripple 특성변화 그래프에서 보여지는 것과 같이 주기의 시작 부분에서 높은 torque가 발생하는 것을 저감함으로써 전체 torque ripple을 줄이고자함에 있다. 그리고 전류의 크기나 전류의 중첩정도는 모두 변형전의 모델과 같은 조건하에서 해석하였다. 그 결과 평균토크는 8.72[Nm]이며, torque ripple은 125.3[%]였다. 그림 6.11은 이때의 torque ripple 특성변화이다. 그러나 기대와 달리 평균토크는 떨어지고, torque ripple은 92.7[%] 증가하였다. 단절 부위는 한 주기에 있어서 최고 torque 값에 이르기 전 과정에 자속이 흐르는 부분이다. 따라서 이곳을 잘라줌으로써 rotor 극과 stator 극 사이가 멀어지게 되고, 자속의 일부는 gap의 공기층으로 퍼져가게 된다(누설자속). 이로 인해 그림 6.11에서와 같이 주기의 시작부분(A)에서 매우 낮은 torque가 발생한다. 그리고 rotor가 회전하여 rotor극의 단절부위가 끝나는 부위에서 자속밀도가 증가하여 처음에 예상한 것과 같이 torque 값이 감소하는 구간(B)의 torque 값을 증가시켰다. 그러나 절단 부위를 지나는 동안의 torque값이 너무 작은 관계로 감소 구간의 기울기 감소로는 torque ripple 저감이 되지 않았다.

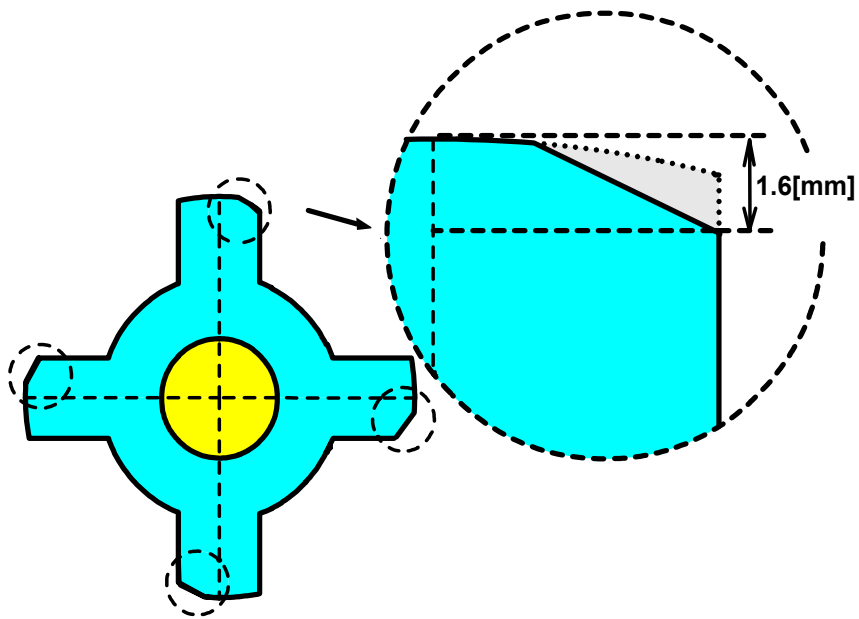


그림 6.11 Rotor 극의 우측모서리 부분을 단절한 형상

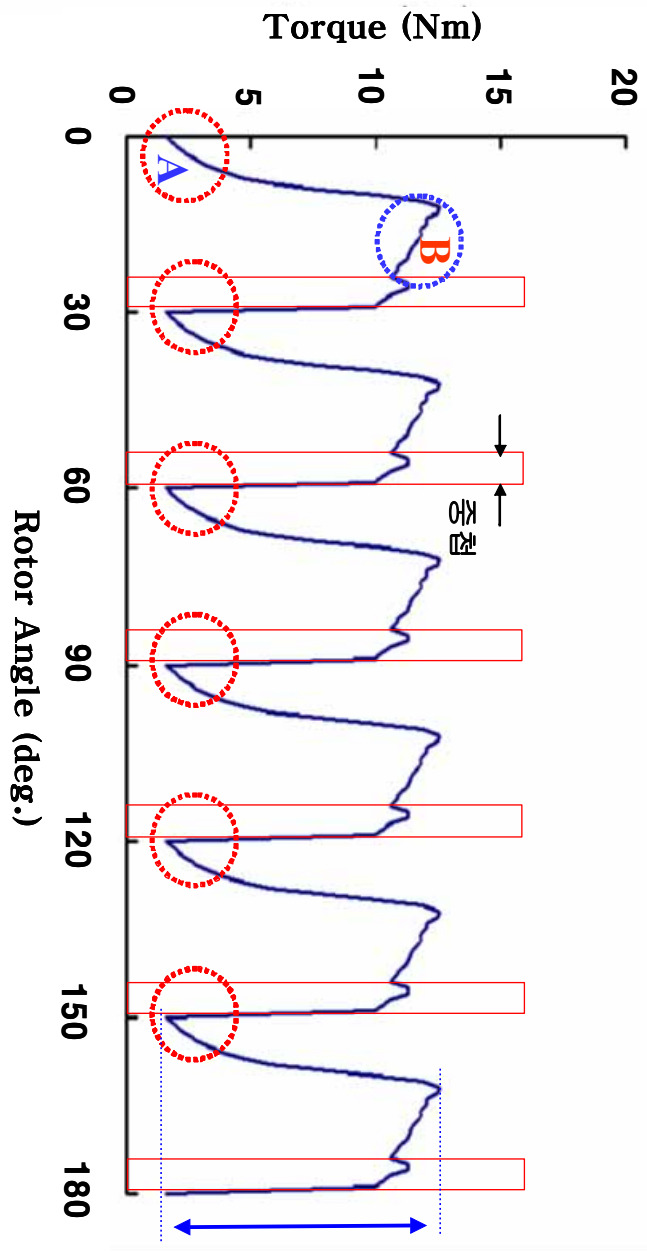


그림 6.12 Rotor 극의 우측모서리 부분을 단절한 경우의 Torque Ripple 특성 변화

6.2.2 Rotor 극의 모서리 단절 부분에 돌극 형성한 경우

Rotor 극의 중심축을 기준으로 우측모서리(회전방향)부분에 그림 6.13과 같이 돌극을 만들었다. 즉, 그림 6.11의 형상의 단절부분에 돌극을 만들어 그림 6.12의 A부분에서와 같은 매우 낮은 torque 발생을 방지하고자 하였다. 전류크기와 중첩정도는 변형전과 동일하게 주었다. 그 결과 평균 torque는 9.64[Nm]이며, torque ripple은 90.91[%]였다. 그림 6.13은 이때의 torque ripple 특성 그래프이다.

결과에서 보는 것과 같이 평균 torque와 torque ripple이 6.2.1 극 모서리를 단절한 모델보다 좋아졌음을 볼 수 있다. 이는 단절 부분에 돌극이 있음으로 해서 gap으로 자기장이 퍼져가는 것을 방지해 주어, 자속이 돌극으로 해서 stator 극으로 흐르게 했기 때문이다. 그러나 단절부분의 돌극이 stator 극을 지나가면 다시 gap의 범위가 커지게 되어 torque 값이 급격히 떨어짐(그림 6.14 : A)을 볼 수 있다. 이는 홈의 깊이를 줄임으로써 어느 정도 torque 값을 회복할 수 있지만 변형전보다 torque ripple을 저감하지 못했다.

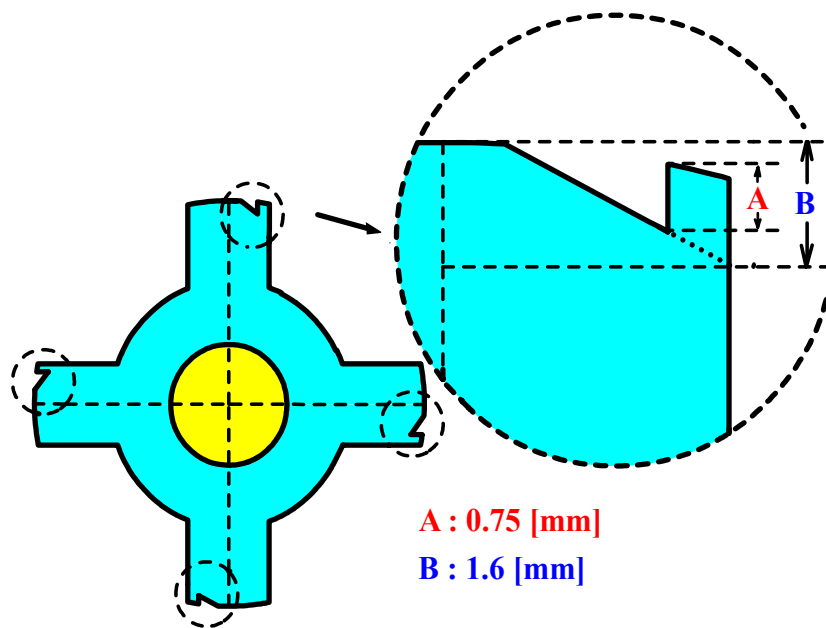


그림 6.13 Rotor 극의 모서리 단절 부분에 돌극이 있는 형상

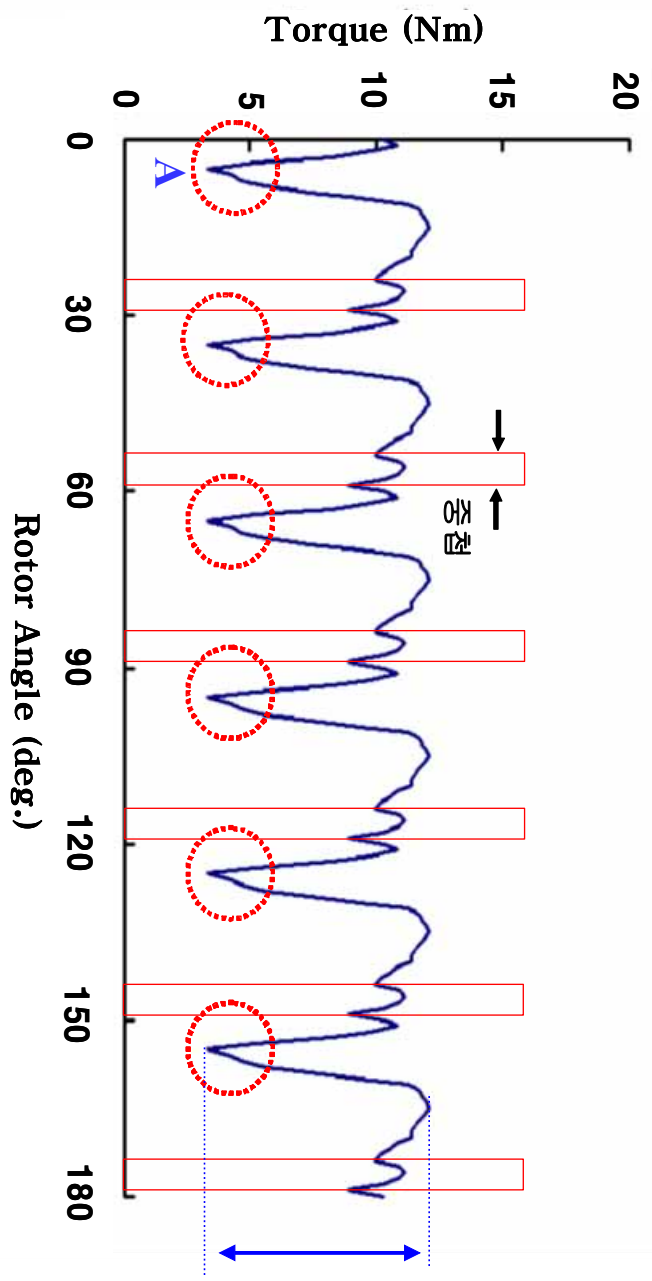


그림 6.14 Rotor 극의 모서리 단절 부분에 돌극 있는 경우
의 Torque Ripple 특성 변화

6.2.3 Rotor 극에 삼각형 형태의 홈을 준 경우

Rotor극의 중심선을 기준으로 우측모서리 부분에 회전방향과 반대방향으로 그림 6.14와 같이 홈을 뚫었다. 홈의 형태는 rotor 극의 중심선 끝에서부터 수평으로 3.1[mm]인 지점에서 수직으로 0.75[mm] 깊이로 들어간 후, 이 지점에서 극 회전방향 모서리 끝으로 직선을 낸 형태이다. 그 결과 평균 torque는 8.9[Nm]이며, torque ripple은 77.38[%]였다. 그림 6.15는 이때의 torque ripple 특성 변화이다.

이 형상은 변형전의 torque 특성에서 보이는 것과 같이 rotor 극이 stator극과 약 1/5정도 중첩될 때까지는 torque 값이 증가하다가 이 후부터는 서서히 감소하게 되므로, 이 증가 구간의 증가 기울기를 줄이면, torque ripple을 저감 할 수 있다. 이에 torque 값 증가구간에서만 rotor 극과 stator 극의 gap이 서서히 커지게 하는 형상을 제작하였다. 그러나 작은 gap의 변화에 torque 값이 매우 크게 변동하는 것(그림 6.16 : A)을 볼 수 있었다. 이로 인해 변형전보다 평균 torque는 소폭 감소하고, torque ripple은 상승하였다.

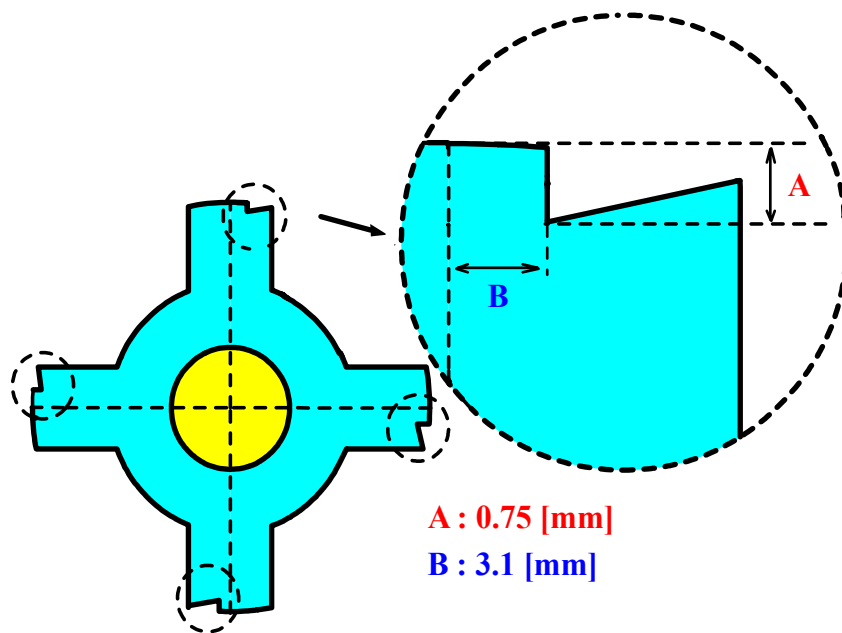


그림 6.15 Rotor 극에 삼각형 형태의 홈을 낸 형상

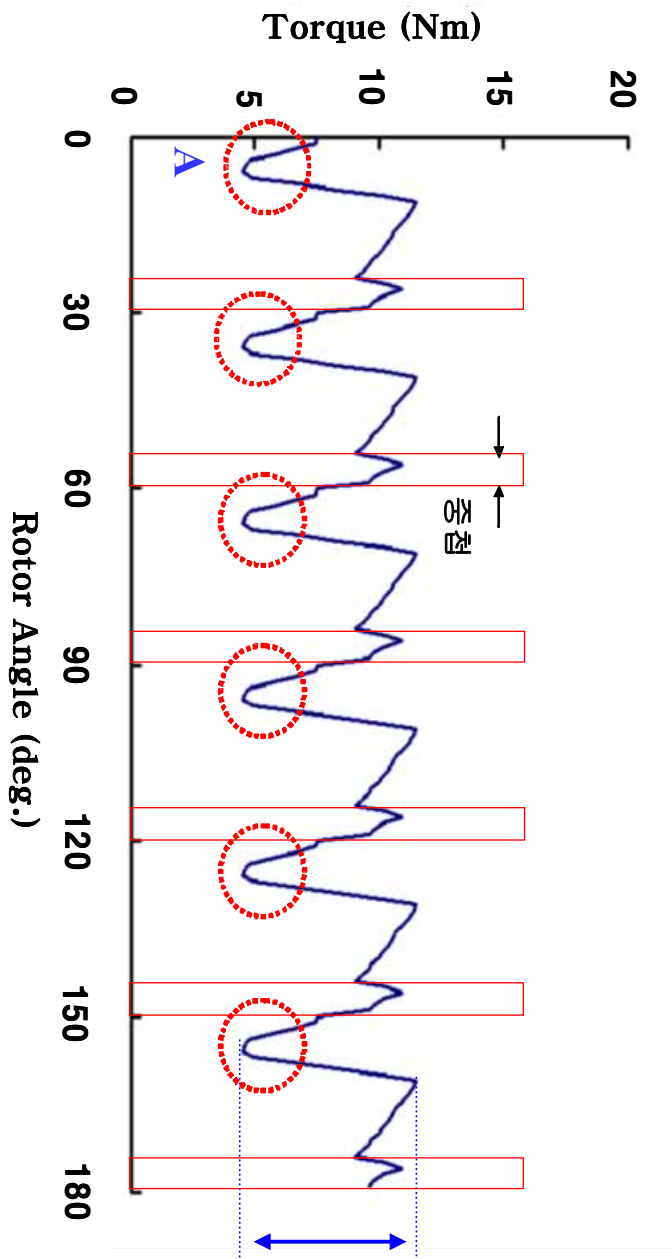


그림 6.16 Rotor 극에 삼각형 형태의 홈을 극 안쪽이 깊은 형태로 주었을 경우의 Torque Ripple 특성 변화

6.2.4 Rotor 극에 준 홈의 깊이를 줄이고 너비는 늘린 경우

6.2.3의 형상을 해석한 결과 그림 6.16에서의 A부분과 같이 급격히 torque 값이 떨어지는 것을 볼 수 있다. 이는 gap 공간이 너무 큼을 의미한다. 이에 rotor 극의 홈을 그림 6.15의 홈보다 깊이는 줄이고 너비는 늘렸다. 그 형태는 그림 6.17과 같이 중심선에서 수평으로 1.55[mm]인 부분에서 수직으로 0.375[mm] 깊이 들어간 지점에서 극의 모서리까지 자른 형상이다. 그리고 전류크기와 중첩정도를 변형전과 동일하게 준 후, 해석하였다. 그 결과 평균 torque는 9.42[Nm]이며, torque ripple은 65.38[%]였다. 그림 6.16은 이때의 torque ripple 특성변화이다.

결과에서 보는 것과 같이 홈의 깊이가 크고 너비가 작을 때보다는 평균 torque와 torque ripple에서 소폭 향상되었다. 그러나 변형전의 모델에 비교하면 여전히 큰 torque ripple이 발생하고 있다. 이는 SRM이 아주 미세한 형상변화에도 torque 특성이 크게 변함을 의미한다. 따라서 더욱 더 정밀하고 세밀한 형상변경이 필요하다.

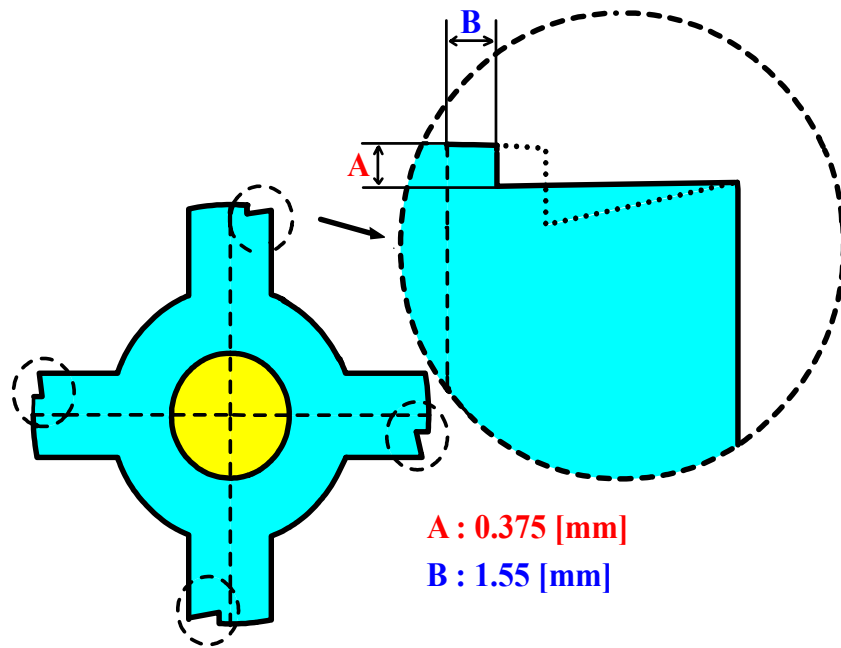


그림 6.17 Rotor 극에 준 홈의 깊이를 줄이고 너비는 늘린 형상

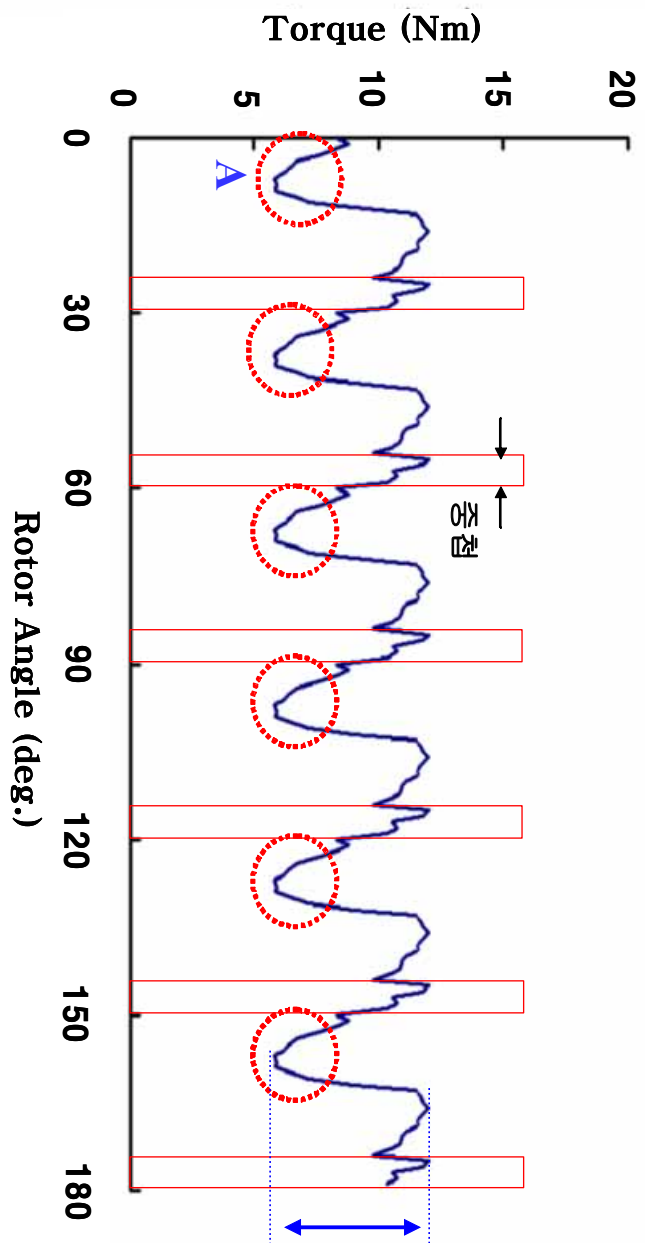


그림 6.18 Rotor 극에 준 홈의 깊이를 줄이고, 너비를 늘렸을 경우의 Torque Ripple 특성변화

6.2.5 Rotor 극의 원호길이를 줄인 경우

지금까지의 형상변경들을 종합해 볼 때 SRM은 rotor 극의 미세한 변화에도 torque 특성이 크게 변함을 알 수 있다. 따라서 지금까지의 형상변경과는 달리 rotor 극의 표면에 눈에 띄지 않는 작은 변화를 주었다.

Rotor극의 중심선을 기준으로 오른쪽(회전방향)부분의 원호길이를 그림 6.19와 같이 줄였다. 그리고 전류의 크기 및 중첩정도는 변형전과 동일하게 주었다. 그 결과 평균 torque는 10.12[Nm]이며, torque ripple은 15.8[%]로 크게 향상되었다. 그림 6.20은 이때의 torque ripple 특성변화 그래프이다.

이는 변형전의 형상과 거의 흡사한 형상을 가지면서, torque 값이 증가하는 부분의 gap 크기를 다소 증가시킴으로써, torque의 최대값과 증가치를 줄였기 때문이다. 또한, rotor 극의 중심선을 기준으로 회전방향의 한 부분만을 형상변경 함으로써 torque 값이 감소하는 부분의 자속밀도가 소폭 증가되었기 때문이다. 이에 torque ripple은 15.8[%]로 크게 저감되면서도, 평균 torque는 크게 변하지 않았다.

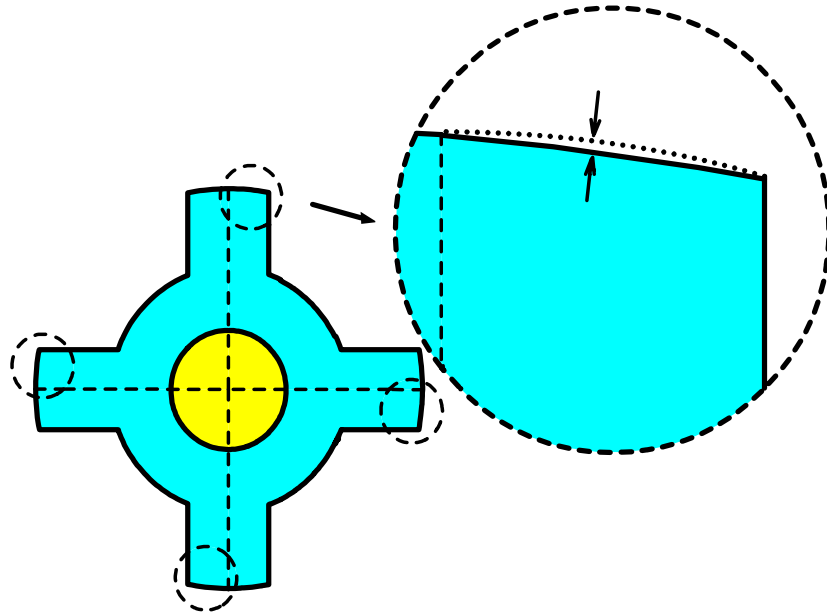


그림 6.19 Rotor 극의 중심선을 기준으로 회전방향 부분의 원호길이를 줄인 형상

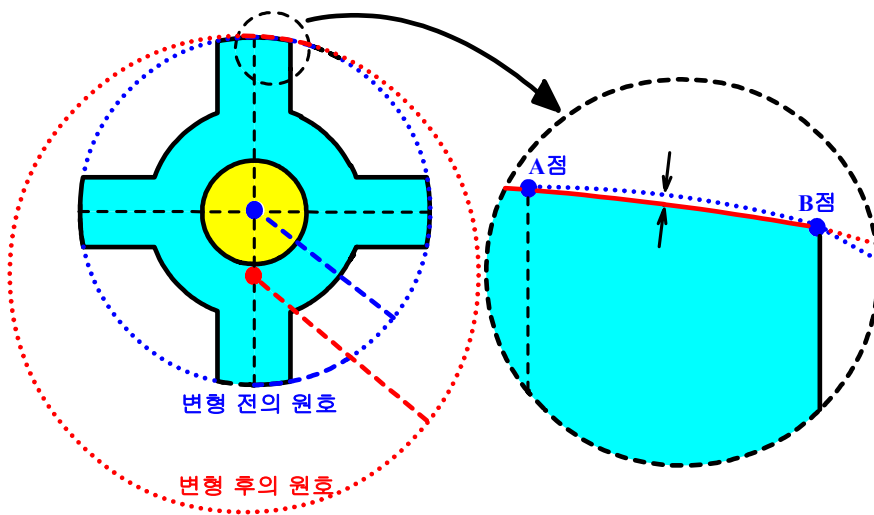


그림 6.20 원호의 길이 변화방법

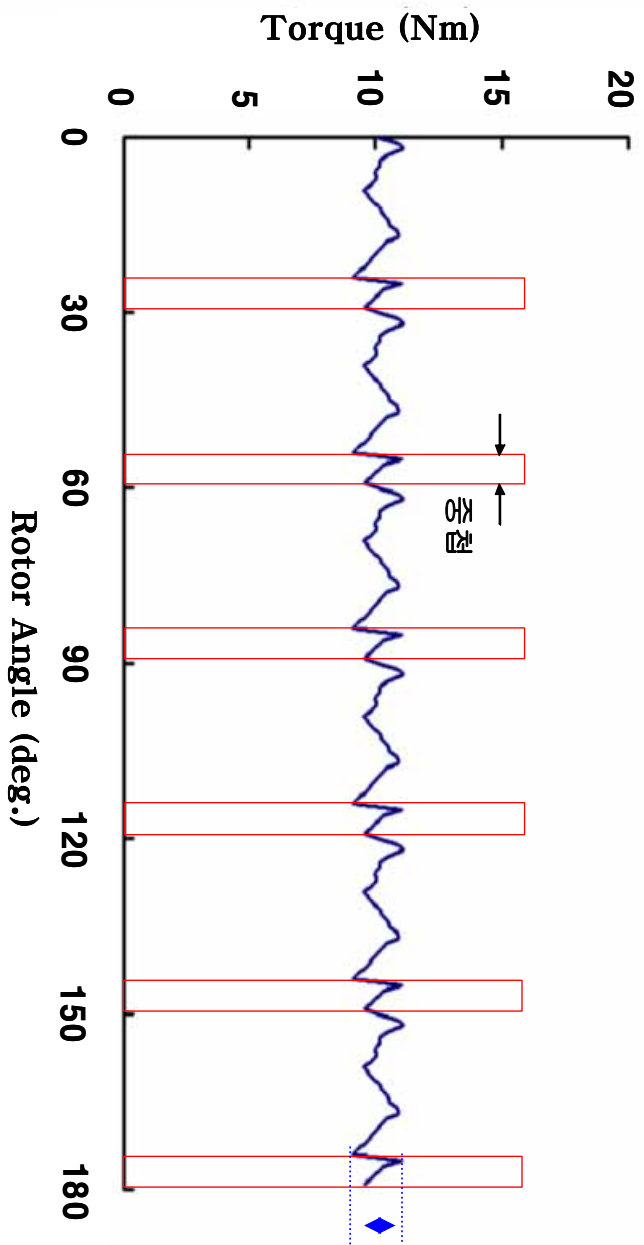


그림 6.21 Rotor 극의 중심선을 기준으로 회전방향 부분의 원호 길이를 줄인 경우의 Torque Ripple 특성 변화

6.3 해석결과 비교

본 연구에서는 기존의 제어회로에 의한 torque ripple저감 연구가 아닌 여러 가지 종류의 형상변경을 통해 torque ripple이 최대한 저감되는 최적설계를 하고자 하였다. 표 6.1은 여러 종류의 형상변형과 그 해석결과를 종합한 도표이다.

표 6.1에서 torque ripple이 저감된 형상은 rotor 극의 회전방향 폭을 증가시킨 후 중첩위치와 중첩도를 변경한 경우, rotor 극의 회전방향 폭을 증가시킨 후 중첩위치만 변경한 경우, rotor 극에서 중심선을 기준으로 오른쪽부분(회전방향)의 원호 길이를 변경한 경우이다. 그리고 평균 torque가 증가한 형상은 rotor 극의 회전방향 폭을 증가시킨 후 중첩위치만 변경한 경우이다. 평균 torque와 torque ripple 모두 향상된 형상은 rotor 극의 회전방향 폭을 증가시킨 후 중첩위치만 변경한 경우이다. torque ripple이 가장 많이 저감된 경우는 rotor 극의 중심선을 기준으로 회전방향부분의 원호길이를 줄인 형상이다. 이들 해석결과를 비교한 결과 원호길이를 줄인 형상이 비록 평균토크는 소폭 감소하였지만 그 크기가 작으면서 torque ripple은 크게 저감되었으므로 가장 이상적인 최적설계이다.

표 6.1 초기모델과 여러 형상변경에 의한 Torque의 변화 결과

최적설계			해석결과		
Rotor 극의 형상	입력전류		평균 Torque [Nm]	Torque Ripple [%]	
	중첩도 [°]	전류밀도 [J/m ²]			
초기모델(변형 전)			10.75	32.90	
Rotor 극의 폭 증가	조건 동일	25~29	5×10 ⁷	10.00	98.94
	중첩위치, 중첩도 변경	0~5 25~29	5×10 ⁷	10.73	28.72
	중첩위치, 중첩도, 전류밀도 변경	0~5 25~29	5.5×10 ⁷	11.32	34.07
	중첩위치변경	25~29	5×10 ⁷	10.89	25.49
모서리 단절			8.72	125.3	
단절부위에 돌극형성			9.64	90.91	
홈			8.90	77.38	
홈의 깊이와 너비 변경			9.42	65.38	
원호 길이 변경			10.14	15.81	

※ 「동일」: 초기모델(변형 전)과 같음을 의미함.

제 7장 결론

본 연구에서는 SRM이 간단한 구조와 높은 회전력을 가지고 있음에도 불구하고 실용성에 있어서 제약을 주고 있는 SRM의 소음과 진동, 고열 등의 발생 원인이 되는 torque ripple을 저감하고자 하였다. 이에 지금까지는 SRM 자체보다는 제어회로 상에서 해결책을 찾아왔다. 그러나 이들 방법은 약간의 torque ripple 저감을 이루었지만 실용성에 있어서 다른 문제를 낳고 있다. 즉, 이들 방법은 모두 SRM의 torque ripple 저감을 위해 다른 제어시스템을 부착하거나 전류제어회로에 센서와 같은 다른 장치를 부착하게 된다. 이렇다 보니 SRM의 비용은 그 만큼 커지게 된다. 이런 이유로 본 연구에서는 SRM의 회전자 형상을 변형함으로써 torque ripple를 저감하는 체적 설계 연구를 하였다.

먼저, 기존에 나와있는 여러 SRM 중에서 하나를 골라 유한요소법을 이용하여 해석한 후 SRM의 동작특성과 형상변형의 방향을 잡고자 Flash program을 이용한 simulation을 하였다. 이를 토대로, rotor 극의 폭을 늘린 경우, rotor 극에 홈을 낸 경우, rotor 극의 모서리를 깎은 경우, rotor 극의 원호길이를 줄인 경우 등의 형상변형을 하였고 여기에 전류의 크기나 중첩도 등을 변화 시켜줌으로서 torque ripple 저감 여부를 해석하였다. 이에 본 연구에서는 rotor 극의 반쪽 원호길이를 줄여줌으로써 torque ripple을 변형 전 32.9[%]에서 15.81[%]로 크게 줄일 수 있었다.

향후에는 본 연구의 최적설계에 따라 SRM을 제작하고 실험을 통해 해석결과와 실험결과를 비교할 것입니다.

참 고 문 헌

- [1] "Torque-ripple minimization in switched reluctance motors using adaptive fuzzy control", Mir, S IEEE Trans. 1999.
- [2] Seok Gyu Oh, Tae Uk Jung, Han Wong Park, Jin Woo Ahn, Young Moon Hwang, "PLL Control Scheme for Robust Driving of SRM Drive", Trans. KIEE. Vol. 48B, No. 9, SEP. 1999.
- [3] Sayeed Mir, Malik E. Elbuluk, Iqbal Husain, "Torque-Ripple Minimization in Switched Reluctance Motors Using Adaptive Fuzzy Control", IEEE Transactions on Industry applications, Vol. 35, No. 2, pp. 461-468, Mar/Apr. 1999.
- [4] 오석규, 정태구, 박한웅, 안진우, 황영문, "SRM 드라이브의 강인한 운전을 위한 PLL 제어방식", 전기학회 논문지, 48권, pp. 461-466, 1. 1999.
- [5] M. Moallem, B. Mirzaeian, "Intelligent Automated Optimal Design of Switched Reluctance Motor Using Genetic-Fuzzy Algorithms", Record of the 13th COMPUMAG Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, Jul. 2001.
- [6] "Study on the Reduction Strategy of Vibration, Acoustic Noise of SRM by DC Excitation Commutation Method", Young-Moon Hwang Trans. KIEE. Vol. 49B, No. 1, Jan. 2000.
- [7] 황영문, 정태구, 오석규, 추영배, "SRM 직류여자 전류방식에 의한 진동, 소음의 저감 대책에 관한 연구", 전기학회 논문지, 49권, pp. 1-8, 1. 2000.
- [8] Andrzej Sikorski and Tadeusz Citko, "Current Controller Reduced

- Switching Frequency for VS-PWM Inverter Used with AC Motor Drive Applications“, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 45, No. 5, pp. 792-801, Oct. 1998.
- [9] 김창섭, 오석규, 안진우, “하이브리드 여자방식을 이용한 SRM의 진동 소음 저감 특성”, Trans, KIEE. Vol. 50B, No. 9. 2001.
- [10] Seok Myeong Jang, In Ki Yoon, Sung Ho Lee, “The Reduction of Detent force in a permanent Magnet Linear Synchronous motor”, 전기학회, 전기기기, Jan. 2001.
- [11] A. Ghosh, S. Devadas, K. Keutzer and J. White, “Estimation of Average Switching Activity in Combinational and Sequential Circuits”, ACM/IEE Design Automation Conf., pp. 253-259, 1992.
- [12] J. Monteiro, S. Devadas, and B. Lin, “A Methodology for Efficient Estimation of Switching Activity in Sequential Logic Circuits”, ACM/IEEE Design Automation Conf., pp. 12-17, 1994.
- [13] 하경호, 홍정표, 김규탁, “스위칭에 따른 전자기 가진력에 의한 스위치드 릴럭턴스 전동기의 고정자 변위해석“, 전기학회 논문지, 49권, pp. 20-26, 1. 2000.
- [14] M. E. Zaim, K. Dakhouche, M. Bounekhla, “Design for Torque Ripple Reduction of a Three Phase Switched Reluctance Machine”, Record of the 13th COMPUMAG Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, Jul. 2001.
- [15] Mauricio Caldora Costa, Stefan Giurgea, Jean-Louis Coulomb, Yves Marechal, “Application of Experimental Design Method in the Screening of Electromagnetic Devices Parameters”, Record of the 13th COMPUMAG Conference on the Computation of

- Electromagnetic Fields, Jul. 2001.
- [16] Jung-Pyo Hong, Kyung-Ho Ha, Ju Lee, "Stator Pole and Yoke Design for Vibration Reduction of Switched Reluctance Motor", Record of the 13th COMPUMAG Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, Jul. 2001.
- [17] Eun-Woong Lee, Su-Saeng Lim, Jung-Ho lee, Jun-Ho Kim, Hyun-Kil Cho, "The Time Domain Analysis of Salient Pole Rotor Type SRM ", Record of the 13th COMPUMAG Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, Jul. 2001.
- [18] 이종한, 오영웅, 임수생, 이은웅, "3차원 FEM 해석에 의한 디스크형 단상 SRM의 시작기 제작과 특성 해석", 전기학회 논문지, 48권, pp. 316-321, 6. 1999.
- [19] 이종한, 오영웅, 이은웅, 이민명, "디스크형 단상 SRM의 구동드라이브 제작과 성능 측정" 전기학회 논문지, 49권, pp. 15-19, 1. 2000.
- [20] Ciro Attanese, Vito Nardi, Aldo Perfetto, and Giuseppe Tomasso, "Vectorial Torque Control: A Novel Approach to Torque and Flux Control of Induction Motor Drives", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 35, No. 6, pp. 1399-1405, Nov/Dec. 1999.
- [21] 김창섭, 오석규, 안진우, 황영문, "LSEV용 SRM의 설계 및 구동특성", 전기학회 논문지, 871-873, 7. 2001.
- [22] 손익진, 이상훈, 홍정표, 박성준, 안진우, "단상 SRM의 설계 및 구동 특성", 전기학회 논문지, 874-876. 7. 2001.
- [23] Wataru Kitagawa, Yoshiyuki Ishihara, Toshiyuki Todaka, Katsuhiko Hirata, "Optimization Technique of Modified Genetic

- Algorithm Using the Finite Element Method", Record of the 13th COMPUMAG Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, Jul. 2001.
- [24] H. Sahraoui, H. Zeroung, "Analysis of Torque in a Switched Reluctance Motor Drive", Record of the 13th COMPUMAG Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, Jul. 2001.
- [25] C.Breto'n, J.Bartolome', J.A.Benito, G.Tassinario, I.Flotats, C.W.Lu, and B.J.Chalmers, Fellow, "Influence of Machine Symmetry on Reduciton of Cogging Torque in Permanent-Magnet Brushless Motors", IEEE, Vol.36, No.5, Sep. 2000.
- [26] Jong Sun Ko, Jung Hoon Lee, Se Kyo Chung, "A Robust Digital Position Control of Brushless DC Motor with Dead Beat Load Torque Observer", IEEE Proceedings, Electric power applications,A Vol. 141, No. 2, pp. 63-70, 1994.
- [27] F.N. Najm, "A Survey of Power Estimation Techniques in VLSI Circuits", IEEE Trans. on VLSI Systems, pp. 446-455, Dec. 1994.
- [28] R. Burch, F. N. Najm, P. Yang, and T. N. Trick, "A Monte Carlo Approach for Power Estimation", IEEE Trans. on VLSI systems, vol. 1, No. 1, pp.63-71, Mar. 1993.
- [29] A. Papoulis, Probability, Random Variables, and Stochastic Processes, 3rd Edition, New York: McGraw-Hill, 1991.
- [30] A. Benchaib, M. Tadjine, A. Rachid, "Sliding mode control of an induction motor with unknown load: application on a digital-signal-processor-based system", International Journal of

Systems Science, Vol. 30, No. 8, pp. 849-863, 1999.

- [33] 김동석, 박관수 , “전동기의 불균일 회전력 저감을 위한 회전자의 형상 설계에 관한 연구”, 대한 전기 학회 부산지부 2001년도 춘계학술대회 논문집, pp. 117-125, 5. 26. 2001.
- [34] 김동석, 박관수 , “ 회전자의 형상 변화에 의한 SRM의 Cogging Torque 저감 설계 ” , 대한 전기 학회 2001년도 하계 학술 대회 논문집, pp. 780-782, , 7. 18. 2001.
- [35] 김동석, 박관수 , “ 디지털 신호에 의한 고조파 전류가 전동기의 회전력에 미치는 영향 ” , 8. 2001.
- [36] 김동석, 박관수, 오정민, 최형식, “Impulse 형태의 외력을 이용한 초소형 발전기 개발에 관한 연구” , 대한 전기 학회 부산지회 2002년도 춘계 학술 대회 논문집, pp.98 - 102, 5. 11. 2002.