

새로운 요소를 이용한 SRM의 3차원 등가자기회로망 해석

김 와성, 전 연도, 김 윤현, 이 주, 김 석태, 이 철직
 한양대학교 전기공학과, 기술표준원, 대림대학

Analysis of Switched Reluctance Motor based on 3D Equivalent Magnetic Circuit Network Method of New Shape Element

Wa Sung Kim, Yon Do Chun, Youn Hyun Kim, Ju Lee, Suk Tae Kim, Chol Jik Lee
 Electrical Engineering, Hanyang University, Agency for Tech and Standard, Daelim College

Abstract - This paper presents the characteristics of Switched Reluctance Motor (SRM) based on 3D Equivalent Magnetic Circuit Network Method (3D EMCNM). 3D EMCNM supplements magnetic equivalent circuit by numerical technique using distributive magnetic circuit parameters. However, in case of SRM the previous 3D EMCNM which uses fan shape element is not proper for analysis. This paper solved this problem by developing the trapezoid element and verified the validity of the suggested element by comparing the results of 3D EMCNM with 2D FEM.

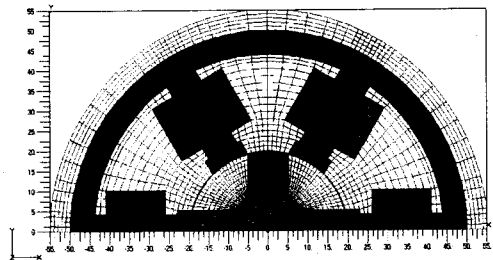


그림 1. 사다리꼴 요소를 이용한 SRM의 요소분할 단면도

1. 서 론

컴퓨터 성능의 비약적인 발전으로 인해 과거의 2차원 수치해석에 기댈던 노력으로 3차원 수치해석이 가능해졌다. 3차원 수치해석기법 중 3차원 등가자기회로망법은 3차원 유한요소법에 비해 회전자 또는 이동자의 이동시 요소 재분할이 필요 없어 해석시간이 현저히 단축되는 장점을 갖고 있으며 그 해의 정밀도 면에서도 신뢰할 수 있음이 이전 여러 논문에 의해 발표되었다.[5][6] 그러나 기존의 3차원 등가자기회로망법에서는 기기의 종류에 따라 선형기기에만 사각형 요소를 회전기기에만 부채꼴 요소를 사용하여 기기의 형상 표현에 제약이 따른다. 본 논문의 해석 대상인 SRM의 경우 부채꼴 요소를 이용해 표현하기에는 많은 한계를 따른다. 해석 대상인 내전형 이중 돌극 구조를 갖는 SRM을 부채꼴 요소로 모델링 할 경우 회전자와 고정자의 돌극 형상이 실제와는 판이하게 다르게 나타나므로 퍼미언스 계산시 많은 오차를 수반하게 된다.

따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 선형기와 회전기에 모두 적용 가능하며, 해석 대상인 SRM을 왜곡 없이 표현할 수 있는 사다리꼴 요소를 제안한다. 사다리꼴 요소의 특징은 SRM의 경우 자속의 주된 통로가 되는 회전자와 고정자의 치 형상을 왜곡 없이 표현할 수 있으며 기존의 사각형과 부채꼴 기본 요소의 계산과정을 모두 포함한다는 점이다.

사다리꼴 요소를 이용한 해석의 타당성을 제시하기 위해 특성을 2차원 유한요소 해석과 비교하였다.

2. 본 론

2.1 해석 대상

해석 모델인 SRM의 사양은 표 1과 같다. 회전자 극수와 고정자 극수가 모두 30°인 모델을 대상으로 하였다.

2.2 3차원 등가자기회로망법

3차원 등가자기회로망법은 기존에 사용되던 자기회로 유한요소법과 같은 수치해석 기법에 도입, 분포정수

표 1. 해석 대상의 사양

항 목	값	단위	항 목	값	단위
정격 출력	22	W	권선 저항	1.0	Ω
정격 전압	12	V	코일 선경	0.75	mm
동작 속도	500	rpm	코어 재질	S18	mm
정격 전류	6	A	회전자 지름	20×2	mm
상 수	3	Phase	Shaft 지름	4×2	mm
고정자 극수	6	Poles	고정자 지름	50×2	mm
회전자 극수	4	Poles	공극 길이	0.3	mm
턴 수	80	T/Pole	적층폭	40	mm

로 퍼미언스를, 계변수로 자기 스칼라 포텐셜을 택하여 기기의 분포 특성 구하는 해석 방법이다. 자속의 연속 조건을 이용하여 절점 방정식을 구성하여 다음과 같은 행렬 방정식을 얻을 수 있다.[2][5][6]

$$[P]\{U\} = \{F\}$$

여기서, $[P]$: 퍼미언스 계수행렬,
 $\{U\}$: 절점의 자위행렬,
 $\{F\}$: 구동 벡터

여기서 퍼미언스 계수행렬은 요소의 형상에 따라 계산된 퍼미언스로 구성된다. 따라서 요소의 형상과 이에 따르는 퍼미언스의 계산이 전체 해석에 미치는 영향이 크다.

2.2.1 요소 및 퍼미언스

기존에 사용되던 요소인 사각형 요소 및 부채꼴 요소와 본 논문에서 제안하는 사다리꼴 요소의 형상 및 퍼미언스는 다음과 같다.

(1) 사각형 요소

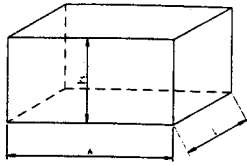


그림 2. 사각형 요소

자속이 직교좌표계상 x, y, z 방향으로 흐른다고 가정할 때, 각 자속 경로에서의 퍼미언스는 다음과 같다.

$$P_x = \mu \frac{lh}{w}, \quad P_y = \mu \frac{lw}{h}, \quad P_z = \mu \frac{wh}{l} \quad [2][5][6]$$

(여기서, μ : 투자율, w : 요소의 폭, h : 요소의 높이, l : 요소의 길이)

(2) 부채꼴 요소

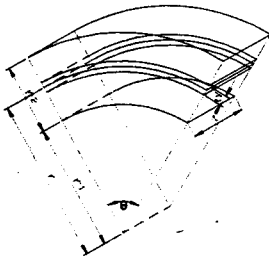


그림 3. 부채꼴 요소

부채꼴 요소에서의 자속의 흐름은 원통좌표계의 성분을 따르며, r, θ , z 경로에서의 퍼미언스는 다음과 같다.

$$P_r = \mu \frac{l\theta}{\ln(1 + \frac{r_2}{r_1})}, \quad P_\theta = \mu \frac{l}{\theta} \ln(1 + \frac{r_2}{r_1}),$$

$$P_z = \mu \frac{\theta}{2l} \{ (r_1 + r_2)^2 - r_1^2 \} \quad [2][5][6]$$

(여기서, μ : 투자율, w : 요소의 폭,
 r_1 : 요소 밀면까지의 거리,
 r_2 : 요소 윗면까지의 거리,
 θ : 옆면사이의 각도,
 l : 요소의 길이)

(3) 사다리꼴 요소

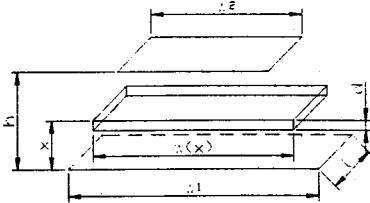


그림 4. 사다리꼴 요소

자속 경로를 직교좌표계상 x 방향으로 가정할 때 요소 내 미소 체적의 퍼미언스는

$$dP_x = \mu \frac{ldx}{w(x)} \quad (\text{여기서 } w(x) = w_1 + \frac{w_2 - w_1}{h} x,$$

μ : 투자율, w_1 : 밀면 길이, w_2 : 윗면 길이,
 x : 요소 내 임의 높이, dx : 미소체적소의 높이,
 h : 요소의 높이, l : 요소의 길이)

따라서 요소의 퍼미언스는 다음과 같다.

$$P_x = \int_0^h dP_x = \mu \frac{lh}{w_2 - w_1} \ln \frac{w_2}{w_1}$$

(단, $w_1 \neq w_2$. $w_1 = w_2$ 인 경우 사각형 요소와 동일) 같은 방법으로 자속 흐름이 각각 y, z 방향일 경우 사다리꼴 요소의 퍼미언스는

$$P_y = \mu \frac{l(w_2 - w_1)}{h \ln \frac{w_2}{w_1}}$$

$$P_z = \mu \frac{(w_1 + w_2)h}{2l}$$

(4) 사각형 요소와 사다리꼴 요소

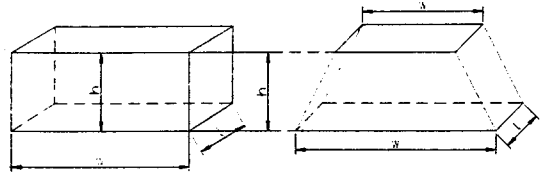


그림 5. 사각형 요소와 사다리꼴 요소

사각형 요소는 사다리꼴 요소에서 $w_1 = w_2$ 인 경우이다. ($(w_1 - w_2) \rightarrow 0$) 다음은 사다리꼴 요소의 퍼미언스 식에서 사각형 요소의 퍼미언스를 얻을 수 있음을 보여준다.

$$P_x = \lim_{w_1 \rightarrow w_2} \mu \frac{lh}{w_2 - w_1} \ln(1 - \frac{w_0}{w_1}) = \mu \frac{lh}{w_1} \quad (w_0 = w_1 - w_2)$$

$$P_y = \lim_{w_1 \rightarrow w_2} \mu \frac{-lw_0}{h \ln(1 - \frac{w_0}{w_1})} = \mu \frac{lw_1}{h}$$

$$P_z = \mu \frac{(w_1 + w_2)h}{2l} = \mu \frac{w_1 h}{l}$$

(5) 부채꼴 요소와 사다리꼴 요소

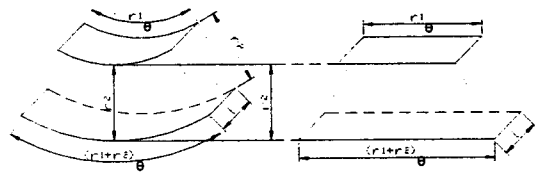


그림 6. 부채꼴 요소와 사다리꼴 요소

사각형 요소의 비교와 같이 치수만 바꿔 사다리꼴 요소를 부채꼴 요소로 만들 방법은 없다. 따라서 그림 6과 같이 형태를 변형시켜 각 변에 대응되는 길이를 얻는다.

$$P_x = \mu \frac{lh}{w_2 - w_1} \ln \frac{w_2}{w_1} = \mu \frac{l}{\theta} \ln(1 + \frac{r_2}{r_1}) = P_\theta$$

$$P_y = \mu \frac{l(w_2 - w_1)}{h \ln \frac{w_2}{w_1}} = \mu \frac{l\theta}{\ln(1 + \frac{r_2}{r_1})} = P_r$$

$$P_z = \mu \frac{(w_1 + w_2)h}{2l} = \mu \frac{\theta}{2l} \{ (r_1 + r_2)^2 - r_1^2 \} = P_z$$

위 비교 결과로부터 사다리꼴 요소는 기존의 요소를 모두 포함함을 알 수 있다. 다음은 사다리꼴 요소를 이용한 SRM의 3차원 등가자기회로망 해석 결과이다.

2.3 해석 결과

그림 7은 해석 대상의 요소분할도이다. 총 90,720개의 사다리꼴 요소가 사용되었고, 효율적인 해석을 위하여 1/2 모델로 구성, 주기조건을 사용하여 해석하였다.

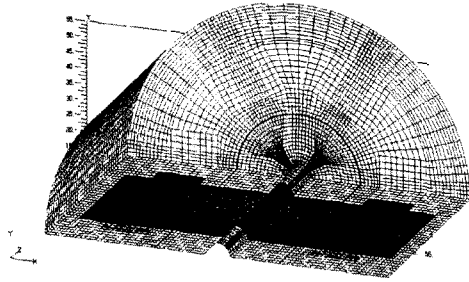


그림 7. 요소분할도



그림 8. 치 정렬시 자속밀도 분포도 (z=19mm, 기기 내부)

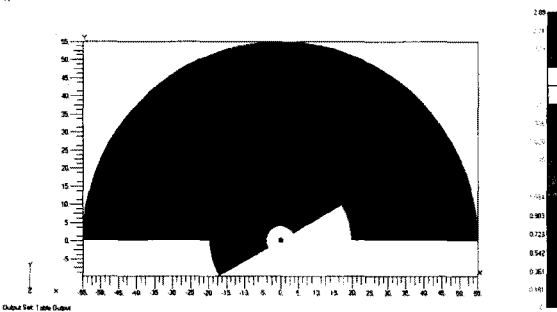


그림 9. 치 정렬시 자속밀도 분포도 (z=21.5mm, 기기 표면)

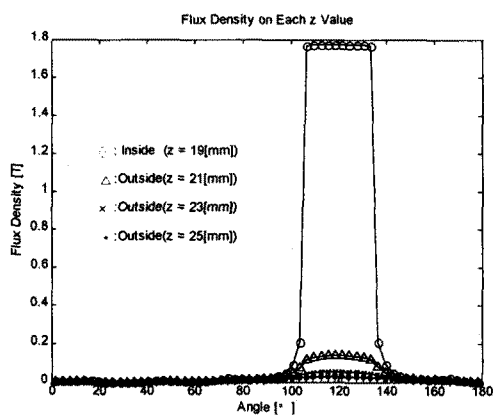


그림 10. 치 정렬시 z값에 따른 공극 자속밀도

또한 회전자의 이동은 요소의 재분할이 없이 자기회로의 연결만을 바꾸는 방법을 사용하여 실용적인 이동해석을 수행하였다. 요소 분할은 토오크 계산의 기준이 되는 공극을 중심으로 이루어졌으며, 공극을 3층으로 나누고 매 3°마다 하나의 요소를 생성하였다.

3차원 해석은 z축 방향에 따른 자속의 흐름을 관찰하여, 이에 의한 기기 특성을 고찰함에 그 목적이 있다. SRM의 회전자와 고정자의 치가 완전 정렬되었을 시 z축 방향의 위치에 따른 자속의 양을 확인하여 z축 방향의 프린징과 누설성분을 알아보았다.

해석 대상은 적층폭이 40mm이며 z축 -20mm에서 20mm에 위치한다. 그림 8은 z가 19mm인 위치(기기 내부)에서, 그림 9는 z가 21.5mm인 위치(기기 표면)에서의 자속밀도 분포도이다. 이 그림에서 자속의 프린징 현상을 알 수 있으며 이를 수치로 표현한 것이 그림 10이다. 그림 10의 비교로부터 SRM은 프린징과 누설 성분이 그리 크지 않은 기기임을 알 수 있다.

따라서 새로운 요소의 3차원 등가자기회로방법에 의한 SRM의 해석 결과는 2차원 유한요소법의 해석 결과와의 비교를 통해 그 정확성을 살펴보아도 될 것이다.

2.4 유한요소법과의 비교

3차원 등가자기회로방법과 비교를 위해 2차원 유한요소 모델은 공극을 3층 3°로 분할하여 구성 되었다.(참고로 공극을 동일 각도로 나눌 경우 공극상의 2차원 삼각형 요소의 개수는 z축 한 층의 3차원 사다리꼴 요소 개수의 2배이다.)

두 해석 결과의 비교는 자속밀도와 토오크의 비교를 통하여 시행되었다. 먼저 회전자의 위치가 15°인 경우, 즉 회전자와 고정자의 치가 15° 정렬된 상태에서의 자속 밀도를 비교해 보았다. 그림 11은 3차원 등가자기회로방법에 의한 자속밀도 분포도이며, 그림 12는 자속밀도 벡터도이다. 그림 13은 두 해석법에 의한 자속밀도 값을 비교한 것이며, 그림 14와 15는 각각 자속밀도의 r성분과 θ성분을 비교한 그림이다. 세 그림의 비교를 통해 두 해석 결과의 차이는 거의 없음을 알 수 있으며, 사다리꼴 요소를 적용한 등가자기회로방법의 결과를 충분히 인정할 수 있다.

두 번째로 a상만 전류를 인가하여 회전자와 고정자 치가 정렬되지 않은 상태에서 완전 정렬되는 상태까지 30°동안 매 3°마다의 토오크를 계산하여 비교하였다. 그림 16에서와 같이 두 해석법의 결과는 거의 일치하며 그 평균 오차는 약 1.1%인 것으로 나타났다.

3. 결 론

본 연구에서는 3차원 등가자기회로방법을 이용한 SRM의 특성 해석을 위하여 새로운 요소형태인 사다리꼴 요소를 제안하였다. 사다리꼴 요소는 기존의 선형기기 해석 시 사용되었던 사각형 요소와 회전기기 해석 시 사용되었던 부채꼴 요소를 모두 포함한다. 형상의 명확한 표현이 기기의 해석을 정확하게 함은 의심할 바 없으며 제안된 사다리꼴 요소는 이러한 의미에서 충분히 가치가 있다고 생각된다.

3차원 수치해석 기법으로서의 등가자기회로방법은 유한요소법에 비해 시간적 이득은 컸으나 형상 표현의 한계로 인해 그 적용이 쉽지 않았다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 사다리꼴기둥 요소를 사용하였으며 이 요소가 이중 돌극 구조인 SRM을 왜곡 없이 표현하여 해석할 수 있음을 보여 주었다.

(후 기)

이 연구는 한국과학기술연구원 지정 국제공동연구(과제번호:1-00-047)의 지원에 의해 수행되었습니다.

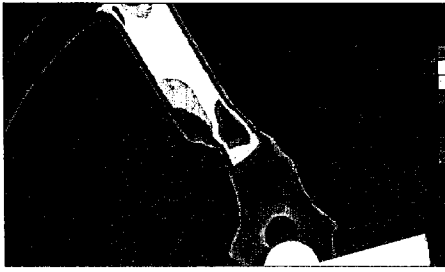


그림 11. 15° 정렬시 자속밀도 분포도 ($z=0\text{mm}$)

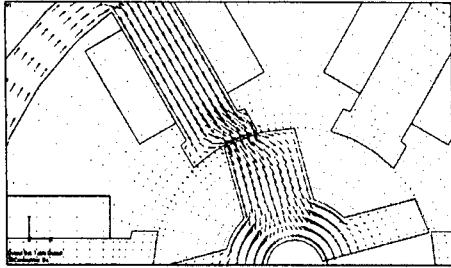


그림 12. 15° 정렬시 자속밀도 벡터도 ($z=0\text{mm}$)

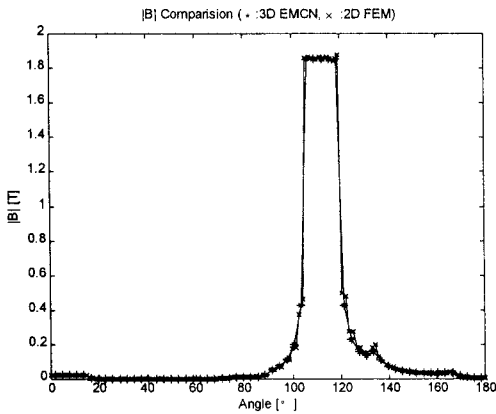


그림 13. 자속밀도의 비교

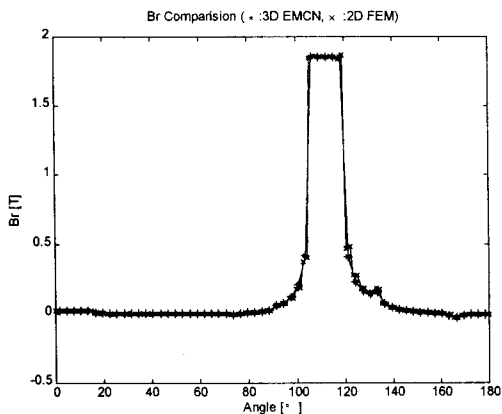


그림 14. r 성분 자속밀도의 비교

- [참 고 문 헌]
- [1] Vlado Ostovic, "Dynamics of Saturated Electric Machines", Springer-Verlag, 1989.
 - [2] 임 달호, 홍 정표, "3차원 등가자기회로방법에 의한 영구 자석모터의 자계해석", 전기학회 논문지, 43권 9호, pp.1432-1439, 1994년 9월.
 - [3] T.J.E Miller, "Switched Reluctance Motors and Their Control", Oxford Magna Physics Publishing and Clarendon Press, 1993.
 - [5] 허 진, "3차원 정자계 해석을 위한 등가자기회로방법에 관한 연구", 한양대학교 대학원 박사학위논문, 1998년 12월.
 - [6] 전 연도, "3차원 등가자기회로방법을 이용한 Brushless DC Motor의 특성 해석", 한양대학교 대학원 석사학위 논문, 1997년 12월.
 - [7] S. J. Salon, "Finite Element Analysis of Electrical Machines", Kluwer Academic Publishers, 1995.

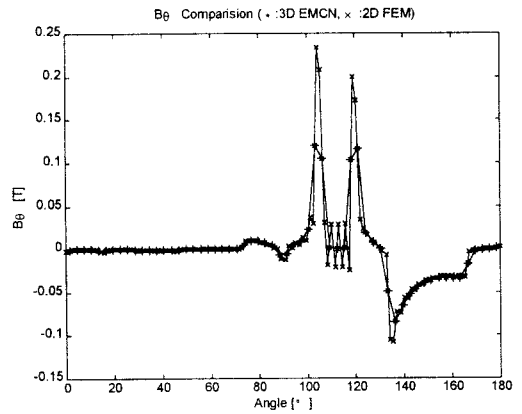


그림 15. θ 성분 자속밀도의 비교

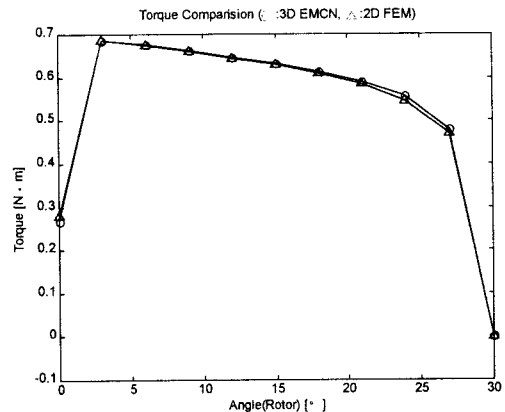


그림 16. 토크의 비교