

전자기 및 구조 유한요소법을 이용한 브리시리스 전동기의 응력 해석

하경호, 강경호, 홍정표, 장기찬\*  
 창원대학교 전기공학과, \*한국전기연구소 Mechatronics 연구 그룹

Stress Analysis of Brushless Motor by Using  
 Structural and Electromagnetic Finite Element Method

Kyung-Ho Ha, Kyung-Ho Kang, Jung-Pyo Hong, \*Ki-Chan Chang  
 Dept. of Electrical Engineering, Changwon Nat'l Univ., \*KERI Mechatronics group

**Abstract** - This paper deals with the mechanical stress analysis caused by the electromagnetic radial force and the design considering the stress. The link in an Interior Permanent Magnet Brushless Motor(IPM) have influence on the mechanical and magnetic performance. Therefore, it is necessary to determine the appropriate link thickness. The optimal geometry link is designed by using the coupled with structural and electromagnetic Finite Element Method.

1. 서 론

전기기기의 전자기력은 구동 토크를 발생시킴과 동시에 반경방향의 힘은 외부 가진력이 되어 고정자와 회전자를 진동시킨다. 특히 외부가진력의 주파수가 기계 구조물의 고유진동수와 일치할 경우에는 공진이 발생하여 구조물이 매우 큰 진동 뿐만아니라 구조물에 변형을 일으켜 기계적 수명을 단축시키고 다른 시스템에 영향을 미치며, 진동에 의한 소음은 사람에게 불쾌감을 준다. 따라서, 전자 에너지 변환기기의 에너지 밀도의 증가에 따른 진동과 소음을 저감하고 전동기의 성능을 향상시키기 위해서는 전자기적 가진력에 기인한 전동기의 기계적 구조물에 미치는 해석이 연계되어야 한다 [1].

매입형 영구자석 브리시리스 전동기(Interior Permanent Magnet Type Brushless Motor, 이하 IPM이라고 한다)는 영구자석이 회전자의 내부 철심에 삽입되므로 원심력으로 인한 영구자석의 비산을 막고 약 계자 운전으로 고속운전이 가능하며 또한 구조적 돌극성으로 자기저항차에 의한 릴럭턴스 토크에 의하여 단위체적당 발생 토크가 큰 장점을 가지고 있다. 그러나 IPM 전동기의 링크부는 전동기의 특성을 결정짓는 매우 중요한 영향을 미치는 반면 기계적 강도가 취약한 구조를 가진다. 따라서, IPM전동기의 설계과정에서는 전동기의 특성을 만족하고 구조적으로 안정한 링크부의 치수를 결정하기 위하여 설계단계에서 기계적 응력에 관한 특성분석이 반영되어야 한다.

본 논문에서는 IPM 전동기의 링크부 표면 작용하는 전자기적 가진력을 산출하여 링크의 폭의 변화가 전동기의 발생 토크 및 기계적 응력에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 전자기 가진력과 결합된 2차원평면 구조 유한요소 해석을 사용하여 전동기의 구동 토크와 기계적으로도 안정한 강도를 동시에 만족시키는 최적 설계에 대하여 연구하고자 한다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

IPM에 사용된 영구자석은 그림 1에 나타난 것과 같이 회전자 내부에 삽입되어 있다. 그림 2는 그림 1의 A 영역을 확대한 것으로 링크부의 영역을 나타낸 것이다.

이 기계적 구조의 링크부는 전동기가 회전시 영구자석이 밖으로 비산되는 것을 막는 역할을 하며, 동시에 영구자석에 의해 발생된 누설 자속의 자로 역할도 하고 있다. 링크부의 두께가 감소할수록 링크부를 통한 자로는 포화되어 고정자로 쇄교하는 자속이 증가하게 된다. 그러므로 링크부 두께의 감소는 전동기 발생 토크를 증가시킨다. 한편, 기계 구조적인 관점에서 보면 고정자의 슬롯과 회전자의 표면사이에 발생하는 전자기력의 증가는 링크부의 스트레스와 진동을 증가시킨다. 고속회전에서 IPM의 링크부는 전자기력과 원심력에 의해 쉽게 파손될 수도 있다.

그러므로 IPM의 설계단계에서 안정된 기계적 강도를 가지는 링크부의 적절한 치수를 결정하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 발생 토크를 향상시키고 전자기력에 의해 발생하는 스트레스에 대해 강인한 링크부의 치수와 형상을 설계하는 것이다.

표 1은 해석 전동기의 기본 사양을 나타낸 것으로 IPM 전동기의 기본 모델의 링크부 길이와 두께가 각각 7.5(mm)와 1(mm)이다.

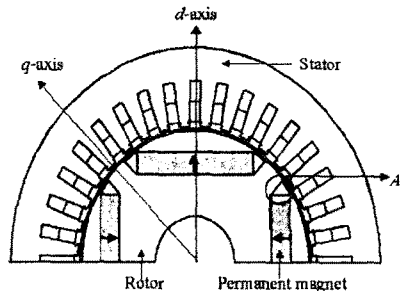


그림 1 IPM의 구조

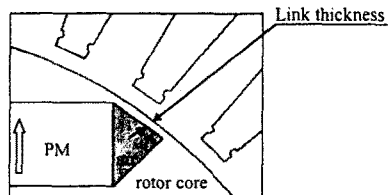


그림 2 링크부의 확대

표 1 해석모델의 기본사양

상/극	공극	슬롯 수	영구자석 잔류자속밀도
3/4	2[mm]	36	1.2

## 2.2 해석 과정

전자기 가진력에 기인한 응력 해석과정은 다음의 3가지 과정으로 나뉘어진다.

· Step I : 링크부의 표면에 작용하는 전자기 가진력의 계산. 본 논문에서는 로터 표면에 작용하는 전자기력을 구하기 위하여 등가자화전류(Equivalent Magnetizing Current, 이하 EMC)를 이용한 방법이 사용되었다.

· Step II : 링크부의 두께가 전동기의 토크 및 응력에 미치는 영향 분석. 해석을 단순화하기 위하여 응력에 대한 정해(exact solution)를 가진 양단이 지지된 보의 형태로 등가화하여 가진력에 대한 기계적 강도를 해석하고 전자장 수치해석으로 전동기의 토크를 해석하였다.

· Step III : 라운딩(fillet)을 가진 적절한 링크부의 두께를 설계. 전자기 가진력에 의한 응력을 줄이기 위하여 라운딩을 설계 파라메타로 설정하였으며 2차원 평면 구조해석으로부터 적절한 라우드의 치수를 결정하였다.

## 2.2 해석 방법

### 2.2.1 전자기력 계산

회전자 표면에 작용하는 전자기력은 EMC법에 의하여 계산된다. 이 방법은 그림 3에 나타난 것과 같이 자계해석으로부터 얻은 자성체 영역이 존재하는 요소의 자속의 분포를  $ij$  요소 선상의 등가자화전류의 분포로 대체하여 로렌츠 힘으로부터 요소의 변에 작용하는 힘을 구하는 것이다. 그림 3에 나타난 각 요소는 서로 다른 재질을 가진다. 이때 등가자화 전류는 요소의 경계선에 존재한다[2].

그림 3에 나타난 요소  $e_1, e_2$ 를 구성하는 선상의 자화전류를  $I_m$ 이라고 하면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$I_m = \nu \int \nabla \times \mathbf{M} \cdot d\mathbf{S} = \nu(M_{1l} - M_{2l}) \quad (1)$$

위 방정식에서 자성체는 간단하게 등가자화전류  $I_m$ 으로 대체된다.  $i, j$ 번째 선상의 등가자화전류  $I_m$ 은 (2)식을 통하여 구할 수 있다.

$$I_m = \nu(B_{1l} - B_{2l})l_{ij} \quad (2)$$

로렌츠 법칙에 의하여 전류분포를 가진 길이  $l_{ij}$ 위에 작용하는 힘은 다음 방정식과 같이 나타난다.

$$f_{ij} = I_{ij} \times B_{ext} \quad (3)$$

여기서  $B_{ext}$ 는 전원전류에 의해 발생하는 외부자속의 합이다. 두 요소에서 경계선상의 수직성분의 자속밀도는 동일하며 접선 성분의 자속밀도값  $B_{ext}$ 는 두 요소내의 평균값을 취한다.

### 2.2.2 단순 지지보 의한 응력해석

양단이 고정된 보의 응력해석 모델이 그림 4에 나타나 있다. 전자기력은 분포하중  $F$ 로 링크부의 표면에 작용한다. 회전자 철심은 링크부를 포함하여 강체로 가정하며 재질은 균일하여 Hook의 법칙을 따른다. 하중에 기인한 굽힘응력의 정해는 뉴턴의 평형법칙과 중첩의 원리에 의해 얻어진다.  $x$ 축에 따른 굽힘응력은 식(4)와 같이 계산된다 [3].

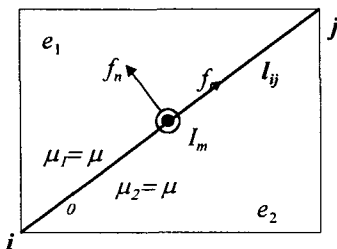


그림 3 두 재질간의 등가자화전류

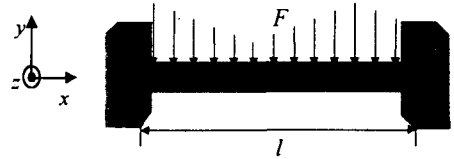


그림 4 링크부의 응력을 해석하기 위한 해석모델

$$\sigma_m = \frac{Fl^2\nu}{2I} \left( -\frac{1}{6} + \frac{x}{l} - \frac{x^2}{l^2} \right) \quad (4)$$

$F$ 는 전자기력에 의해 균일하게 분포한 분포하중,  $\sigma_m$ 은 굽힘응력,  $I$ 는 2차 면적 모멘트,  $E$ 는 영계수이다.

한편, 열응력을 고려하기 위한 식은 다음과 같다.

$$\sigma_t = aE\Delta t = aE(t_2 - t_1) \quad (5)$$

$a$ 는 열팽창 온도계수이고  $\Delta t$ 는 온도변화를 나타낸다. 링크부의 전체 응력은 열응력과 하중에 의한 굽힘응력의 합으로 식 (7)과 같다.

$$\sigma_{link} = \sigma_m + \sigma_t \quad (6)$$

링크부의 기계적 안정성은 구조강관의 허용 응력과 해석된 전체 응력의 비로 나타나는 안전계수로 표현된다.

### 2.2.3 구조 유한 요소해석을 이용한 최적설계

양단 지지보에 대한 응력의 정해는 라운딩을 고려할 수 없으므로 이를 고려하기 위하여 2차원 평면 응력 유한요소해석을 이용하였다. 변형율/변위, 응력/변형을 관계가 다음과 같다 [4].

$$\{\epsilon\} = [B]\{d\} \quad (7)$$

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon\} \quad (8)$$

여기서  $\{\epsilon\}$ 은 변형률,  $\{\sigma\}$ 는 응력,  $\{d\}$ 는 변위를 나타내는 행렬이다. 위의 식 (7), (8)을 이용하면 응력과 변위의 관계식이 다음과 같이 나타난다.

$$\{\sigma\} = [D][B]\{d\} \quad (9)$$

최소 에너지 원리에 의해 구조 전체의 강성 행렬과 관련 방정식이 다음과 같다.

$$\{F\} = [K]\{d\} \quad (10)$$

여기서  $\{F\}$ 는 전자기력에 의해 각 절점에 작용하는 하중이며  $[K]$ 는 구조물 전체의 강성행렬이다.

## 3 해석 결과 및 검토

### 3.1 링크부 두께의 영향

그림 5는 슬롯 피치가 일정할 때 슬롯 폭의 변화에 따른 링크부에 작용하는 전자기력의 변화를 보여준다. 이 때 전자기력은 EMC에 의하여 구해지며 치와 슬롯의 구조에 의해 전자기력은 정현적인 파형을 가진다. 슬롯 폭이 증가할수록 전자기력의 크기도 증가하며 이는 링크부의 응력을 증가시키므로 슬롯 폭은 가능한한 치폭보다 작게 설계되어야 한다.

그림 6은 링크부의 두께에 따른 자기저항과 전자기적 토크의 변화를 보여준다. 링크부 두께의 증가는 링크부를 통한 영구자석 누설자속을 증가시켜 약 2.5(Nm)의 전자기적 토크를 감소시킨다. 반면에 링크부 두께변화에 대해 거의 일정한 톨러턴스 토크에는 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

그림 7은 그림 5에 나타난 전자기력이 하중으로 작용한 굽힘응력 결과를 나타내고 있다. 이 결과는 양단이 고정된 보의 정해를 이용하여 얻어졌고 링크부의 두께는 0.5(mm)에서 1.5(mm)까지 변화한다.  $x$ 축에 따른 응력의 분포에서 보의 양단에 발생한 응력이 다른 곳의 응력보다 더 높게 나타난다. 한편, 결과에서 링크부 폭이 감소할수록 최대응력은 증가하는 양상으로 보이고 있다. 이는 그림 6에서 보인 전자기적 특성과는 반대의 양상

을 보이는 것으로 기계적 강도를 확보하면서 전동기의 토크를 향상하기 위한 적절한 치수의 선정이 필요하다.

표 2는 링크부 두께에 따른 응력 해석결과를 자세하게 정리한 것이다. 열에 의한 응력을 고려하기 위하여 모터의 운전시 내부 온도는 75[°C]로 고려하였다. 여기서 최대응력은 전자기 가진력에 기인한 기계적 응력이면 총응력은 열응력을 합산한 수치이다. 규소강판의 최대 허용 응력이 363[MPa]이므로 총응력과의 비율을 나타낸 안전율이 표에 제시되어 있다. 따라서, 본 결과로부터 최소한 안전율을 2이상 확보하기 위해서는 링크부 두께가 1[mm]이상으로 설계되어야 한다.

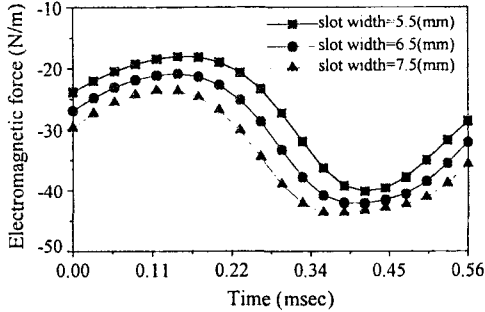


그림 5 링크표면에 분포하는 전자기력

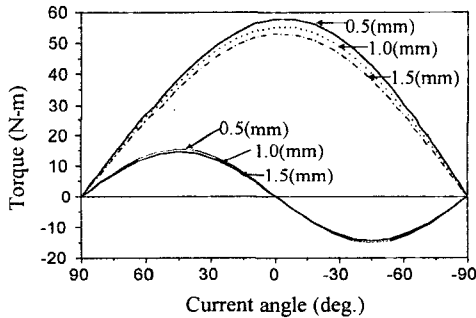


그림 6 링크 폭 변화에 따른 토크 변화

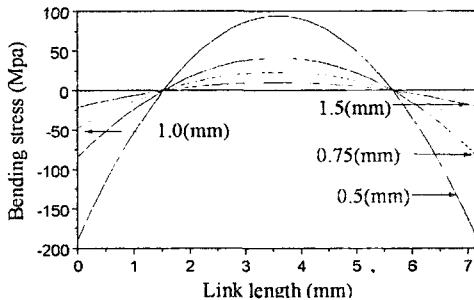


그림 7 링크부의 굽힘응력 분포

표 2 링크부 두께에 따른 응력 해석 결과

링크부 두께 [mm]	최대 응력 [MPa]	총 응력 [MPa]	안전율
0.50	187.97	303.22	1.20
0.75	83.54	198.79	1.83
1.00	46.99	162.24	2.24
1.50	20.89	127.00	2.67

### 3.2 토크 및 기계적 강도의 증가

링크부 두께가 0.5[mm]인 경우 다른 치수보다 토크 특성은 좋으나 기계적 강도는 나쁘다. 그러므로 토크 특성은 그대로 유지하면서 기계적 강도를 얻기 위해 모따기 반지름을 변화시켰을 때의 최대응력을 해석하여 안전율 2이상을 만족시키는 반지름의 치수를 구하고자 한다. 이때 모따기 반지름의 효과를 고려하기 위해 2차원 평면 응력 유한요소법을 이용하였다.

그림 9는 모따기 반지름이 12[mm]의 링크부 두께가 0.5[mm]인 경우의 요소분할을 나타내고 있다. 그림 10은 전자기력이 하중으로 작용하여 링크부가 변형을 일으킨 정도를 나타내고 있다. 표 3은 모따기 반지름의 변화에 따른 응력 해석결과를 나타내고 있다. 표 3의 결과에 따르면 모따기 반지름이 12[mm]이상일 때 안전율이 2이상 되어 기계적 강도를 확보할 수 있음을 알 수 있다.

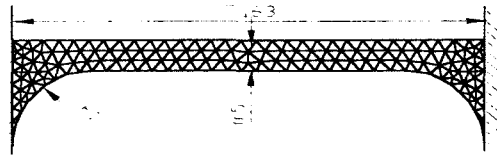


그림 8 모따기를 가진 링크부의 치수 및 요소분할도

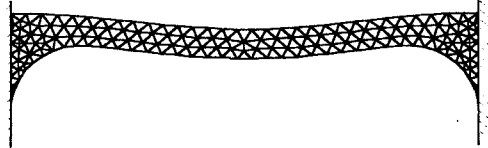


그림 9 전자기력에 의한 링크부의 변형

표 3 링크부의 모따기 변화에 따른 응력 및 안전율

모따기 반지름 [mm]	총 최대응력 [MPa]	안전율
6	210.24	1.72
8	200.34	1.81
10	189.74	1.91
12	179.84	2.01
13	170.94	2.12

## 4. 결 론

본 논문에서는 링크부의 두께가 전자기력에 의해 발생하는 기계적 응력과 전동기의 발생 토크에 미치는 영향을 분석하였다. 링크부의 두께가 증가하면 기계적 강도를 높일 수 있으나 반면에 전동기 발생 토크는 감소한다.

기존 모델보다 기계적 안정하고 높은 전자기적 토크를 발생하는 링크부를 설계하였다.

### (참 고 문 헌)

- [1] C.G.C. Neves et al., "Vibrational behavior of switched reluctance motors by simulation and experimental procedures," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 32, pp. 3158-3159, 1998.
- [2] G. Henneberger, K. Sattler, D. Shen, "Nature of the equivalent magnetizing current for the force calculation," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 28, pp. 1068-1072, 1992.
- [3] Gere & Timoshenko, *Mechanics of materials*, International Thomson Publishing, Asia, 1995.
- [4] Logan, Daryl L., *A first course in the finite element method*, PWS-KENT Publishing Company, Boston, 1992.