

유도형 모터 회전자의 기계적 불평형 특성해석

장석명\*, 이성래\*, 서진호\*, 정상섭\*, 김광준\*\*, 박윤식\*\*  
 \*충남대학교 전기공학과, \*\*KAIST 기계공학과

Analysis on the characteristics the induction motor under mechanical unbalance of a rotor

S.M.Jang\*, S.L.Lee\*, J.H.Seo\*, S.S.Jeong\*, K.J.Kim\*\*, Y.S.Park\*\*  
 \*hungnam Nat'l Univ, \*\*KAIST.

**Abstract** - The mechanical unbalance of the rotor in motors generate vibrations and make its shortened their life. therefore, it is important that search for a cause of the vibration in the point of economics. In this paper, to reduce the vibration we will analyse the unbalance magnetic pull in induction motor. Namely, the electromagnetically generated forces, the airgap flux density distribution in a single phase induction motor is calculated by analytical and numerical method.

1. 서 론

각종 산업자동화 설비로부터 선반, 밀링 등의 공작기계, 에어컨, 냉장고 등의 가전기기, 프린터, 복사기 등의 사무자동화 기기나, 각종 자동화 장비에는 구동장치로 모터의 사용이 필수적이다. 그런데 인간의 생활이 점점 양질화됨에 따라 안락함을 추구하려는 욕구가 날로 강해져 각종 장비의 안락운전을 피하게 된다. 따라서 그 핵심 구동시스템인 모터에 관한 저진동, 저소음에 관한 연구의 필요성은 더욱 커진다.

전체 발전량의 70%정도 이상을 소비하는 모터에 관한 고효율화, 컴팩트화, 경량화, 저진동, 저소음화의 연구는 어느 분야보다도 더욱 중요하다. 더구나 모터 중에서도 70~80% 에 달하는 유도형 모터를 대상으로 하는 연구의 필요성은 더욱 절실하다.

1957년대로부터 1967년까지는 30kW급의 비동기 농형모터의 경우 소음이 10dB이상의 수준이었으나, 공장이나 아파트, 가옥 등의 건물이 지금보다는 재질이 나 설계기술의 미비로 진동소음에 의한 주위환경조건이 오히려 더 심각하였기 때문에 모터의 소음진동문제는 상대적으로 지금보다 덜 중요하였다. 전기기기에서의 소음진동이 주목을 받기 시작한 것은 70여년전부터이다. 그 당시에는 전기기기들이 과도한 사이즈로 제작되었을 뿐 만 아니라 aerodynamic에 의한 소음은 고려되지 못하였다. 그 후 베어링에 의한 소음발생현상 등은 잘 알려지게 되었고 전자기력에 근원을 둔 진동소음의 저감 연구에 방향을 두게 되었다. 처음 15년 정도는 고정자와 회전자의 슬롯조합을 통한 진동소음의 문제해결에 관한 연구가 이루어지게 되었다.

그간 모터의 설계 및 제작기술의 발달로 모터자체의 소음진동문제가 많이 개선되었다고는 하지만, 최근 주위 환경의 쾌적성이나 안락성이 매우 좋아졌기 때문에 모터의 소음진동문제는 상대적으로 매우 중요하게 되었다. 1960년대 말에 전자기력에 기반을 둔 소음수준의 저감이 어느정도 이루어지며 재질, 반도체시스템, 시간간조파 등을 고려한 분야에까지 연구가 확산되었다.

실제로 진동 및 소음은 기기가 기형상태로 있음을 의미하기 때문에 기기의 질은 물론 입계속도의 저하는 물론 모터의 수명을 단축시키게 되는 결과를 가져온다. 더구나 시스템근처에서 작업을 하는 사람의 건강과 기능

에 심각한 영향을 주게 되므로 건강, 경제, 생산성, 제품의 고품질화 등의 면에서 가장 중요한 요인이 된다. 따라서 진동소음을 저감화시켜 쾌적한 모터로 만드는 연구개발은 매우 중요하다.

이제 진동소음의 원인을 들고, 각각을 세밀하게 분석·검토하여 진동 및 소음발생의 메카니즘을 밝혀 그 저감방안을 수립해야 할 것이다.

지금까지 파악하고 있는 전자기적 진동, 소음의 원인은 아래와 같이 정리할 수가 있다. 이를 분석검토하여 저감방안을 수립해야 할 것이다. 즉

- 회전자편심에 의한 공극자속밀도 및 전자기력의 왜형,
- 자성체의 자기왜형,
- 고전압,
- 회전자와 회전자의 면에 있는 슬롯모양, 칩수, 슬롯갯수의 조합,
- skew각도,
- 기동, 역회전, 정지 등의 과도상태

이들 원인을 각각 분석검토하기 위하여, 공극자속분포 및 전자기력을 해석하고 이를 검토한 후 유도형 모터의 진동, 소음의 발생원인을 분석하여 저감방안을 검토하기로 한다.

국내에서는 에어컨, 냉장고, 세탁기, 오디오등의 가전제품이나 컴퓨터, 복사기, 프린터 등의 저진동, 저소음화가 큰 관심을 갖으며 발전하고 있다. 그러나 기계적 원인에 의한 연구성과는 팔목할 만하나 전자기적 진동 및 소음에 관한 연구결과는 거의 없을 정도이다. 따라서 본 논문에서는 모터의 전자기적 특성에 관한 Timar, Yang, Belmans등의 해석기술을 바탕으로하여 전자기적 진동소음의 체계적인 분석검토와 발생원인 및 메카니즘의 규명을 위한 기본자료를 제시하고자 한다.

2. 회전자의 기계적 불평형

2.1 불평형 모델

모터에서 소음과 진동을 발생하는 주요원인으로 회전자의 기계적인 편심이다. 그림 1은 회전자가 기계적으로 불평형된 모양을 나타낸다

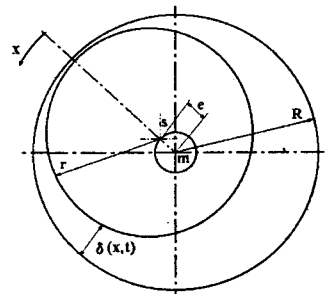


그림 1. 회전자 기계적 불평형모델

여기서 R : 고정자의 반지름, r : 회전자의 반지름, e : 편심의 크기, m : 고정자의 중심, s : 회전자의 중심이다.

편심에 따른 공극의 폭은 그림.1의 모델에서 축방향으로 펼친다고 볼 때에 그 크기가 불균일하게 되는데 다음과 같이 나타낼 수 있다. 단 x방향으로 전개한다고 본다.

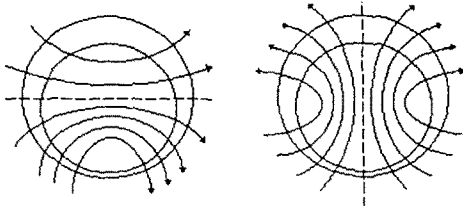
$$\delta(x, t) = \delta_m [1 - \epsilon \cos(x - \omega_e t - \phi_e)] \quad (1)$$

여기서,  $\delta_m$  : 최대공극,  $\epsilon = \frac{e}{\delta_m} = \frac{e}{R-r}$  : 편심율.

$\omega_e = (1-s)\omega_o$ ,  $\omega_o$  : 슬립 1에서의 진동이다.

## 2.2 진동특성

그림 2는 2극기 모터에서 회전자가 고정자내에서 편심 되었을 경우 자속의 분포를 나타내었다. 그림 2(a)와 같이 자계의 축이 정렬하는 경우에는 자기적 불평형 인력인 UMP(Unbalanced Magnetic Pull)가 가장 크게 작용하는 경우이고, 그림 2(b)는 UMP가 영인 상태를 나타낸다. 따라서 회전자와 자계가 계속 회전을 하게되면 이러한 UMP가 주기적으로 반복되어 진동소음으로 나타나게 된다.



(a) Maximum pull (b) Zero pull

그림 2. 편심된 모터의 자속분포와 힘

## 3. 특성해석

### 3.1 상용 설계프로그램에 의한 특성해석

그림3은 상용설계프로그램을 사용하여 모터의 설계 및 대칭특성을 계산하기 위한 과정을 나타내는 흐름도이다.

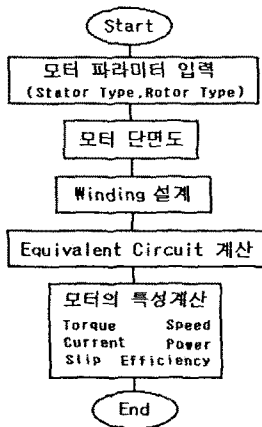


그림 3. 모터의 설계 및 특성 해석 프로그램의 흐름선도

### 3.2 해석법에 의한 특성

#### 3.2.1 해석법에 의한 자속밀도 특성

모터의 공극자속 분포 특성식을 유도하기 위하여 그림.4와 같이 축방향으로 전개한 모터의 단면에서 식(2)의 앙페르법칙을 적용한다.

$$\nabla \times B = \mu_0 a_m \quad (2)$$

여기서  $a_m = A_m e^{j(x - \omega t - \phi_m)}$  은 모터의 축방향으로 분포한 전류밀도분포식이다.

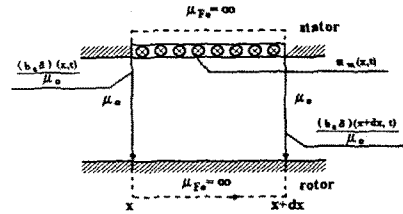


그림 4. 축방향 평면에서의 앙페르법칙 적용

따라서 식(2)를 전개하면

$$\frac{db_A \delta(x, t)}{dx} = \mu_0 R a_m(x, t) \quad (3)$$

로 정의할수 있다.

그런데 모터의 회전자가 고정자에 대칭으로 위치하는 경우는 모터의 원주방향으로 만 회전자계가 존재하여 구동된다. 그러나 기계적인 불평형을 이루는 경우는 원주방향 뿐만 아니라 축과 평행한 방향으로 자기회로가 만들어지는데 이때의 자속을 'Homo-polar flux'라고 하며 진동 및 소음의 주원인이 된다. 그림.5는 회전자의 진동에 영향을 미치게 되는 자속을 고려한 경우이다. 이때의 자속은 그림.5와 같이 공극을 지나 회전자와 축을 거쳐 모터의 프레임 및 축을 따라 흐르는 자속이 된다.

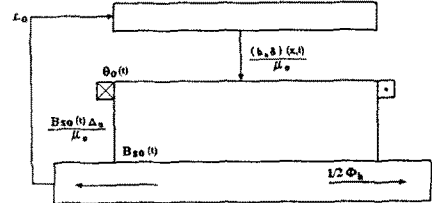


그림 5. 축방향에 직각인 평면에서의 자기회로

2극 유도형모터의 회전자가 편심인 경우의 공극자속 밀도는 식(3)으로부터 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$b_A(x, t) = \frac{\mu_0 F}{\delta_m} \left\{ \cos(\alpha - \omega_0 t - \phi_m) + \frac{\epsilon}{2} [a_2 \cos[2\alpha - (\omega_0 + \omega_e)t - (\phi_m + \phi_e)] + \delta_2 \sin[2\alpha - (\omega_0 + \omega_e)t - (\phi_m + \phi_e)] + a_0 \cos[(\omega_0 - \omega_e)t + (\phi_m - \phi_e)] + \delta_0 \sin[(\omega_0 - \omega_e)t + (\phi_m - \phi_e)]] \right\} \quad (4)$$

여기서  $F = \sqrt{2 \frac{3z_1 I_o k_{wl}}{2\pi}}$  : 기자력 기본파진폭,  $z_1$  : 배상 매극당 고정자 직렬도체수,  $I_o$  : 자화전류,  $k_{wl}$  : 고정자 권선계수이다.

#### 3.2.2 불평형에 의한 편심력

식(4)의 모터 공극자속에 의한 전자기력의 밀도는 식(5)와 같다. 즉

$$\alpha(x, t) = \frac{b_A^2(x, t)}{2\mu_0} \quad (5)$$

그런데 이 힘은 그림.6에서 보는 바와 같이 모터의 축방에서 직각 평면인 y-z평면에 있게 된다.

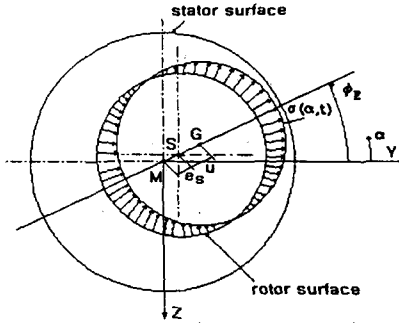


그림 6. 기계적 불평형 회전자에 작용하는 전자기력분포

따라서 \$y\$와 \$z\$방향에 대한 힘은 식(6), 식(7)과 같다.

$$F_y = \int_0^{2\pi} \frac{b_A^2(\alpha, t)}{2\mu_0} \sin \alpha R l d\alpha$$

$$= \frac{F^2 \pi R l \mu_0 e_s}{4\delta_m^3} \{ (a_0 + a_2) \sin(\omega_e t + \phi_e) + (\delta_0 + \delta_2) \cos(\omega_e t + \phi_e) + a_0 \sin(\omega_e t + \phi_e + 2\beta) - \delta_0 \cos(\omega_e t + \phi_e + 2\beta) \} \quad (6)$$

$$F_z = \int_0^{2\pi} \frac{b_A^2(\alpha, t)}{2\mu_0} \cos \alpha R l d\alpha$$

$$= \frac{F^2 \pi R l \mu_0 e_s}{4\delta_m^3} \{ (a_0 + a_2) \cos(\omega_e t + \phi_e) - (\delta_0 + \delta_2) \sin(\omega_e t + \phi_e) + a_0 \cos(\omega_e t + \phi_e + 2\beta) + \delta_0 \sin(\omega_e t + \phi_e + 2\beta) \} \quad (7)$$

$$\text{단 } \beta = (\omega_o - \omega_e)t + (\phi_m - \phi_e) = s\omega_o t + (\phi_m - \phi_e)$$

$$\alpha_o = \frac{1}{V_o + 1} \sin^2 \phi_{Ro}, \quad \delta_o = \frac{1}{2} \frac{1}{V_o + 1} \sin 2\phi_{Ro}$$

여기서 \$V\_o\$: 편심이 아닐때의 공극의 자기저항과 축과 엔드링부분과의 자기저항 비이다.

### 3.2.3 불평형 토크

모터의 회전자 불평형에 의한 힘인 식(6)과 식(7)에 의한 불평형토크는 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = \frac{\partial W_m}{\partial(\omega_e t + \phi_e)}$$

$$= (A_m R)^2 \frac{\pi R l \mu_0}{2} \frac{1}{\sqrt{1-\epsilon^2}} \left( \frac{1-\sqrt{1-\epsilon^2}}{\epsilon} \right)^2 \left( \frac{1}{V+1} \right) \sin[2(\omega - \omega_e)t + 2(\phi_m - \phi_e)]$$

$$= (A_m R)^2 \frac{\pi R l \mu_0}{2} T' \quad (8)$$

여기서 \$V\$: 편심인 경우의 공극의 자기저항과 축과 엔드링부분과의 자기저항 비이다.

### 3.3 FEM해석을 위한 지배 방정식과 해석모델

유한 요소법에 의한 공극 자속분포를 해석하기 위해서 다음과 같은 전자기 이론식들이 적용된다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{d\vec{D}}{dt}, \quad \vec{B} = \mu \vec{H}, \quad \vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (9)$$

식(9)는 준 정상장계에서 \$\frac{d\vec{D}}{dt} = 0\$ 이므로

$$\nabla \times \left[ \frac{1}{\mu} (\nabla \times \vec{A}) \right] = \vec{J} \quad (10)$$

따라서 벡터포텐셜에 관한 지배방정식은

$$\nabla \times \left[ \frac{1}{\mu} (\nabla \times \vec{A}) \right] + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{V} \times (\nabla \times \vec{A}) = \vec{J} \quad (11)$$

그림(7)은 표.1과 같은 사양을 갖는 모터의 고정자와 회전자의 단면도이다. 이를 FEM해석모델로 한다. 그림.1에서 보는 바와 같이 편심인 경우는 좌우대칭이므로 1/2모델, 그러나 회전자가 대칭인 경우는 1/4모델만 해석을 하였다.

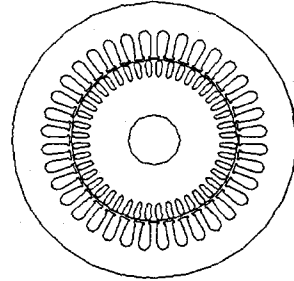


그림 7. 모터의 회전자와 고정자, 슬롯모델

## 4. 회전자 평형 및 불평형 특성해석

### 4.1 해석모델링 및 설계파라미터

불평형특성을 해석하기 위한 모터는 국내 S사 제품의 콘덴서 기동형 단상 유도전동기로 용량 1마력의 모터이다. 주요사양은 표.1과 같다.

표.1. 콘덴서 기동형 단상모터의 주요사양

정격 출력	0.75kW	공 극	0.9mm
정격 전압	220V	고정자슬롯수	36
정격 전류	7.5A	회전자슬롯수	44
상 수	단상	Winding	집중권
극 수	4극	코일 피치	8
고정자 외경	80.5mm	고정자 슬롯깊이	16mm
고정자 내경	48mm	회전자 슬롯깊이	10mm
회전자 외경	47.1mm	고정자 슬롯개방폭	2.5mm
주 파 수	60Hz	회전자 슬롯개방폭	0mm

## 5. 결 론

콘덴서형 4극 단상 유도모터의 회전자가 기계적으로 불평형된 경우의 자속밀도, 힘, 토크특성을 해석하여 검토하였다. 이를 위하여 상용설계프로그램을 사용하여 평형된 경우의 설계 및 특성해석을 하였고, 전자기이론을 적용하여 지배방정식을 유도한 후 해석법, 유한요소법의 각각에 의하여 평형, 불평형조건에서의 특성을 해석하였다. 이로써 전기적, 기계적방법에 의하여 소음진동의 저감을 위한 자료를 얻었다.

### (참 고 문 헌)

- [1] BELMANS, R., GEYSEN, W., JORDAN, H., and VANDENPUT, A. : 'Unbalanced magnetic pull in three phase two pole induction motors with eccentric rotors'. IEE conf. publ. 213, 1982, pp.65-69
- [2] P.L.Timar et al "Noise and Vibration of Electrical Machines" Elsevier Book Co. 1989