

## 3상 농형 유도전동기의 자기소음 해석에 관한 연구

### A Study on Analysis of Magnetic Noise in Three Phase Squirrel-Cage Induction Motor

신대철\* · 김한성\*\*  
(Dae Chul Shir, Han Sung Kim)

#### 요 약

3상농형유도전동기에서 발생하는 소음중 자기소음을 해석하였다. JEM-1313 규격과 반확산 음장법을 이용하여 전체의 소음을 측정하였으며,  $f_k = (K + \frac{Z_g}{P})(1-S) f$  [Hz]의 실험식을 도출하였다. 고정자 권선의 자기소음만을 도출하기 위해서 회전자를 제거하고 고정자권선에 정격전압, 정격주파수를 가한 상태에서 자기소음을 측정하여 비교, 검토하는 소음해석방법을 제시하였다. 이론치와 실험치는 1440[Hz], 1560[Hz]에서 근사하였고 가장 큰 자기고조파는 1560[Hz]에서 발생하는 것을 알 수 있다.

#### ABSTRACT

The Magnetic noise generated in three phase induction motor are investigated. Total noises measured by using JEM-1313 code and sound length method and the experimental formulae are derived of magnetic  $f_k = (K + \frac{Z_g}{P})(1-S) f$  [Hz] noise is measured in the stator of induction motor except rotor supplied from power source and their datum are analyzed and compared with one another. The experimental value of magnetic noises are equal to the theoretical value at 1440[Hz] and 1560[Hz]. The biggest magnetic harmonic is generated at 1560[Hz].

#### I. 서 론

요즘 산업의 발달로 인하여 기술혁신은 인간 생활에 편리한 점을 안겨준 반면 쾌적한 환경에서 건강한 생활을 저해하는 공해를 유발하였다. 이 중에서 소음공해로 인한 피해는 점점 사회문제로 심각해지

고 있다.

소음 공해는 다종다양하기 때문에 본문에서는 산업체의 각종 기계, 기구의 구동원으로 사용되고 있는 농형유동전동기 (이하 유도전동기라 칭함)의 소음에 관해서 국한하기로 한다. 유도전동기는 많은 종류의 전동기중 가장 간단한 원리로 제작되어 있어 그림 1과 같이 구조도 간단하여 엄격히 보면, 위와 몇 보수도 된다. 또한 기동특성이 일호하고 정용 전력으로, 구동할 수 있는 등의 장점이 있기 때문에 가장

\*호서대학교 전기공학과

\*\*전국대학교 전기공학과

용 및 산업용 전기기기에 널리 이용되고 있다.

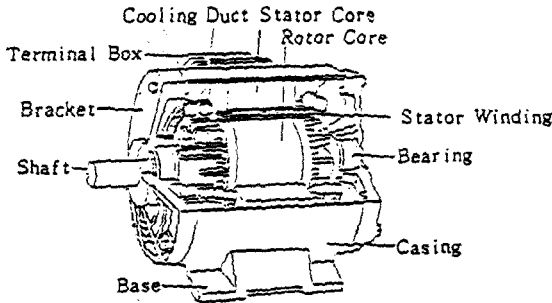


그림 1. 유도전동기의 구조  
Fig. 1. Structure of Squirrel cage Induction motor.

그러나, 최근 유도 전동기 설계는 단위 출력당 소형경량화의 경향이 심화되어 자기적인 부하가 증가하고 있기 때문에 두께가 얇은 프래임(Frame)을 사용하게 되며, 이에 따라 철심내의 자속밀도가 높게 보화되어 과도한 냉각을 필요로 하고 있다. 이러한 현상은 전동기 소음, 진동 발생의 큰 원인이 된다. 특히 요즘 생활환경의 개선점에서 공조기기 주택설비 기기용으로 사용되는 일반 소형전동기에 대해서도 소음 및 진동에 대한 이용자의 관심이 높아져 소음배출은 전동기의 상품가치를 결정하는데 중요한 요소중의 하나로 크게 취급되어 지고 있다.

1930년 L.E. Hilde Brand<sup>2)</sup>가 자기소음은 고정자 및 회전자에 공간 고조파에 의한 다각형 변형력에 의해서 발생한다고 보고하였으며, 1950년 Heine Jordan<sup>3)</sup> 및 P.L. Alger<sup>4)</sup>는 변형력에 의한 고정자의 변형량을 측정하였다. 그리고 1970년 關野博<sup>5)</sup>는 농형 유도 전동기의 스로트 조합과 skew가 자기소음에 미치는 영향에 관하여 보고하였고 1971년에 A.L. Ellison<sup>6)</sup>가 고정자의 고유진동수 및 회전자 편심에 따른 소음음을 발표하였다.

이와 같이 국외에서는 오래전부터 유도전동기의 소음 및 진동에 관한 연구가 진행되어 왔다. 국내에서는 1981년 위성성의 실업과 함께 전동기 소음에 관하여 언급하였으며, 발표된 논문은 조수원에 불과한 실정이다.

본 논문에서는 전기회로와 자기회로에서 발생하는 자기소음의 관계이론을 참고하여 실험 및 비교, 검토

함으로써 결론을 얻어 앞으로 저소음 전동기 설계에 이용하고자 한다.

## II. 자기소음

유도전동기에서 발생하는 소음은 전기회로와 자기회로에서 발생하는 자기소음과 전동기 자체에서 발생하는 열을 냉각하기 위해서 설치한 팬(fan)의 공기역학적인 통풍으로 인해서 발생하는 통풍소음이 있다.

그리고, 회전자(rotor)를 지지하고 회전을 원활히 하기 위하여 설치한 베어링(bearing)에서 발생하는 기계소음등으로 크게 분류할 수 있는데, 본문에서는 자기 소음에 국한하고 그 요인은 표 1과 같다.

표 1. 유도전동기의 자기소음 요인  
Table 1. Primary factor of magnetic noise induction motor.

자기소음	전기적 불평형	<ul style="list-style-type: none"> <li>회전의 불평형</li> <li>고정자(stator) 권선의 불평형</li> <li>고정자(rotor)의 디캐스팅(die casting) 불량</li> <li>단선</li> </ul>
	기포와 자속	<ul style="list-style-type: none"> <li>공구의 불평형</li> <li>자기회로의 불평형</li> <li>고정자 코일단(coil end)의 진동</li> <li>고정자의 주자속 진동수의 동적 또는 강제진동</li> </ul>
	고조파 자속	<ul style="list-style-type: none"> <li>스롯(slot) 수 조합불량</li> <li>고정자 또는 회전자 권선의 전파각과 진동 및 공진</li> </ul>
슬립(slip) 에너지를	<ul style="list-style-type: none"> <li>스롯수 조합불량</li> <li>권선분포에 의한 고조파 자속</li> <li>상상부족의 편심</li> </ul>	

유도전동기는 구조상 고정자 및 회전자에 스롯(slot)이 설치되어 있어 공극자속에는 여러종류의 고조파가 포함되어 있다. 이 공극 고조파 자속에 의해서 발생하는 전자력하는 고정자 또는 회전자 권선을 다각형으로 진동을 발생케 하여 소음을 일으키며, 이를 일반적으로 자기소음이라 한다. 자기소음은 일반적으로 고조파 자속에 전선배치에 의한 스롯 고조파와 스롯의 開口에 의한 스롯 커미언스고조파 및 相帶공극의 편심에 의한 고조파음이 있다.

보통 유도전동기의 자기소음으로 문제가 되는 것은 스롯 고조파와 스롯 커미언스고조파이며 이에

의해서 주파수 범위가 결정되며, 고조파의 크기는 회전력의 진폭, 철심의 프레임(flame)등의 진동응답에 따라 좌우된다. 이에 관한 자기소음의 발생도는 그림 2와 같다.

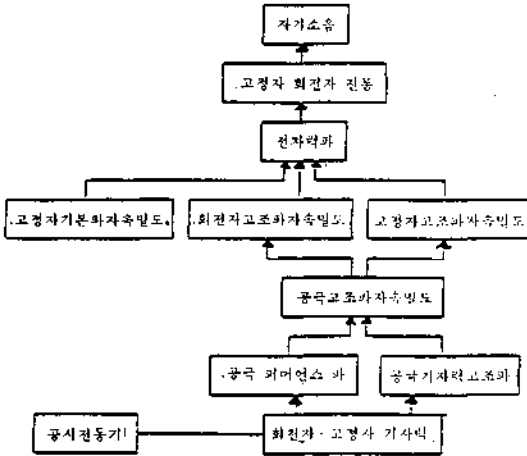


그림 2. 자기소음의 발생도  
Fig. 2. Occurrence diagram of magnetic noises.

한편 농형 유도전동기 공극내의 공간고조파에는 권선배치를 위한 起磁力자체에 포함된 고조파와 스톱이 존재하기 위한 공극 퍼미언스(air gap permeance)고조파 파가 같지 않아서 발생하는 고조파가 존재한다.

공극에서 발생하는  $S_b'$ 차의 고정자 고조파 자속을  $b_{sb}'$ 라고 하면

$$b_{sb}' = B_{sb}' \sin(\omega t - s_b' \frac{\pi}{P\tau} x_1) \quad (1)$$

단,  $x_1$ : 기계각

$b$ : 고조파 자속

$B$ : 고조파 자속의 진폭

$\omega$ : 전원의 각주파수

$P$ : 극 대수

$\tau$ : 극 간격

이 되며,  $S_b'$ 차의 고정자 고조파 자속에 의하여 회전자에서 발생하는  $r_a'$ 차의 회전자 고조파 자속을  $br_{a}'$ 라고 하면 다음과 같다.

$$br_{a}' = Br_{a}' \sin[\{1 + \frac{r_a' - S_b'}{P} (1-S)\} \omega t - \frac{r_a' \pi}{P\tau} x_1] \quad (2)$$

단,  $S$ : 유도전동기의 슬립(slip)

농형 유도전동기의 회전자 고조파의 차수는  $ra' = k_2 \cdot Z_R + S_b'$ 의 관계가 있다. 여기서  $Z_R$ 은 회전자의 스톱수이고  $k_2$ 는 정수이다. 그리고 공극 고조파 자속  $b$ 는 식(1)의  $S_b'$ 차의 고정자 고조파 자속  $b_{sb}'$ 와 식(2)의  $ra'$ 차의 회전자 고조파 자속  $br_{a}'$ 을 가산한 것이므로

$$b = \sum_s b_s + \sum_r b_r' \quad (3)$$

으로 된다. 따라서, 고정자와 회전자사이에 작용하는 반경방향의 電磁力  $F_M$ 은

$$F_M = \delta \frac{\delta}{2\mu_0} = \frac{\delta^2}{2\mu_0} = \frac{B^2}{2\mu_0} [N/m^2] = \frac{b^2}{8\pi} [\text{dyne/cm}^2] \quad (4)$$

단,  $\mu_0$ : 진공 투자율

$\delta$ : 공극의 자속밀도 [ $w_b/m^2$ ]

이며, 식(4)에 식(3)을 대입하면 다음과 같이 된다.

$$F_M = \frac{1}{8\pi} (\sum_s b_s^2 + r \sum_r b_r'^2 + 2 \sum_s \sum_r b_s b_r') \quad (5)$$

식(5)의 1항은 전원주파수의 2배인 주파수(2sf)로 소음은 문제가 되지 않고 제2항은 차수키 높기 때문에 철심의 진동, 진폭이 고정자의 기계적 강성보다 적어 소음의 세력은 대단히 적으니<sup>10)</sup> 자기소음은 주로 식(5)의 3항에 의해서 발생되고 고정자, 회전자 고조파 자속의 상호작용에 의하여 발생하는 전자력(electromagnetic force)은 식(1)과 식(2)를 식(5)의 3항에 대입하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$b_s', b_r' = \frac{1}{2} B_{sb}' \cdot B_{ra}' \left[ \cos \left\{ \frac{r_a' - s_a'}{P} (1-S)\omega t - \frac{r_a' - s_b'}{P} \pi x_1 \right\} - \cos \left\{ \left[ 2 + \frac{r_a' - s_a'}{P} (1-S) \right] \omega t - \frac{r_a' + s_b'}{P} \pi x_1 \right\} \right] \quad (6)$$

그리고 고정자 기본 고조파 자속 \$S\_a\$ 와 극대수 \$P\$ 에서 발생하는 회전자 전류도 인관 고정자 스롯 고조파 \$S\_a'\$ 와 회전자 스롯 고조파 \$r\_a'\$ 를

$$S_a' = \pm k_{1a} Z_s + P$$

$$r_a' = \pm k_{2a} Z_r + P$$

단, \$Z\_s\$ : 고정자 스롯수

\$Z\_r\$ : 회전자 스롯수

\$k\_1, k\_2\$ : (상수 1, 2, 3...)

라 가정하면 식(6)에서 力波의 차수 \$K=r\_a' \pm s\_b'\$ 의 가진 mode가 있음을 알 수 있다. 즉 \$K=r\_a' - s\_a\$ 인 경우의 정상분 力波는 식(7)과 같다.

$$K=r_a' - s_a = \pm(k_{2a} Z_r - k_{1a} Z_s) \quad (7)$$

그리고 \$K=r\_a' + s\_a\$ 인 경우의 역상분 力波는 식(8)과 같다.

$$K=r_a' + s_a = \pm(k_{2a} Z_s - k_{1a} Z_r) + 2P \quad (8)$$

여기서 고정자 스롯 고조파 \$S\_a\$ 를 \$S\_a' = k\_{1a} Z\_s + P\$ 로 가정할 경우의 회전자 스롯 고조파 \$r\_a\$ 는 \$r\_a' = \pm(k\_{2a} Z\_r - k\_{1a} Z\_s) + P\$ 로 되기 때문에 회전자 스롯 고조파 \$r\_a'\$ 와 고정자 기본 고조파 \$S\_b\$ 도 극대수 \$P\$ 와 같으므로 식(7), (8)과 같은 力波가 되므로 고정자 스롯고조파, 회전자 스롯 고조파의 1차만을 고려할 경우 力波의 차수(\$K\$) 및 力波의 주파수(\$f\_k\$)는 식(9), (10)과 같다.

$$K = Z_r \cdot Z_s \pm 2P \quad (9)$$

$$f_k = \left\{ \frac{Z_r(1-s)}{P} \pm 2 \right\} f \text{ [Hz]} \quad (10)$$

단, (+(역상분), -(정상분))

力波의 차수 \$K\$ 값에 따라 力波의 종류는 그림 3과 같다.

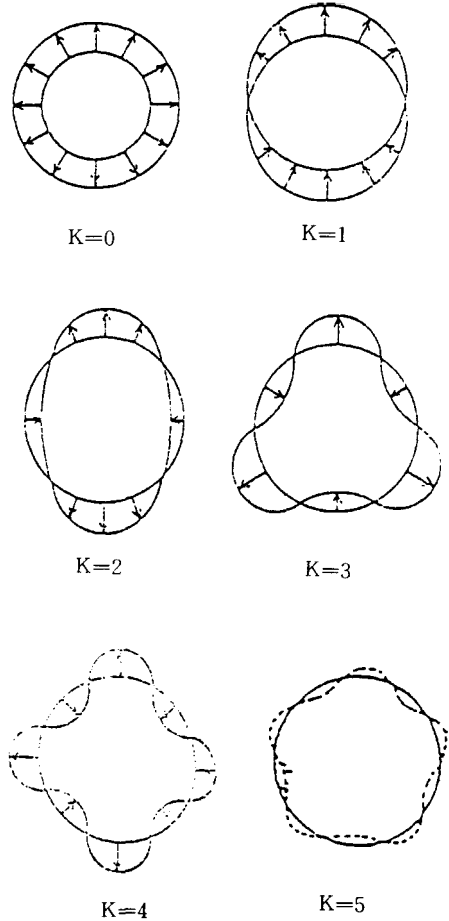


그림 3. 역파의 종류  
Fig. 3. Kinds of magnetic force Wave.

그림 3에서

\$K=0\$ : 원주상에 똑같은 반경방향의 전자력파가 작용하여 고정자 선체를 한번으로 확대, 축소되어 전자력파는 시간에 따라 정현적으로 증가, 감소하여 동기 그로링(Synchronous growing) 현상을 발생한다.

\$K=1\$ : 철심의 변형은 없고 직경방향에 변위를 주는

힘이 작용하여 고정자의 변위보다 회전자변위가 문제로 되어 기동시 큰 자기소음을 일으켜 기동 불가능으로 된다.

K=2: 고정자 철심, 외함(Yoke)등에 타원형으로 변형되는 전자력을 증가시켜 고정자 철심, 외함에 진동을 크게 발생시킨다.

K=3, 4, 5... 전자력파, 극대수의 증가와 함께 철심의 변형은 多角形인 전자력파가 발생되어 고정자의 변형, 변위 또는 회전자의 변위로 진동, 소음을 발생한다.

이상과 같이 스로트선정에 있어서 力波의 차수 K를 될 수 있으면 크게 하는 경우가 좋다. 소형 유도전동기는 고정자 지름이 적기 때문에 고정자의 다각형 변형력에 대하여 강성이 커 변형되지 않고 회전자에 작용하여도 각 방향에 작용하는 힘의 성분은 소멸된다. 그러나 전자력에 불평형이 있으면 그 원인

이 회전자의 어느 부분에도 존재하므로 합성력이 있는 방향에서 1차 Mode의 진동을 일으켜 소음을 유발한다.

式(2)를 회전자 좌표  $X_2$ 로 변환하면 式(11)과 같다.

$$X_2 = X + \frac{\tau}{\pi} (1-S)\omega t \tag{11}$$

따라서

$$b_{ra}' = B_{ra}' \cdot \sin\left[\left\{1 - \frac{S_a'}{P}\right\}(1-S)\omega t - r_a' \frac{\pi}{p\tau} X_2\right] \tag{12}$$

로 된다. 式(12)에서  $S_a'$ 가 기본파와 같은 방향인 경우는 +이고 역방향으로 회전하면 -로 된다. 그리고 式(6)의 전자력파를 회전자 좌표로 변환하면 式(13)과 같다.

$$b_s b_r' = \frac{1}{2} B_{sb}' \cdot B_{ra}' \left[ \cos\left\{ \frac{2ra' - S_a' - S_b'}{P} (1-S)\omega t - \frac{ra' - sb'}{P\tau} \pi x_2 \right\} - \cos\left\{ \left\{ 2 + \frac{2ra' - sa' + sb'}{P} \right\} (1-S)\omega t - \frac{ra' + sb'}{P\tau} \pi x_2 \right\} \right] \tag{13}$$

式(13)의 전자력파는  $(ra' - sb')$ 차 및  $(ra' + sb')$ 차로 전체를 합하면 영으로 된다. 그러나 불평형

때문에 1차만 존재한다. 즉 회전자는 式(14)의 전자력파로 진동한다.

$$b_s b_r' = \frac{1}{2} B_{sb}' \cdot B_{ra}' \left[ \cos\left\{ \frac{2ra' - S_a' - S_b'}{P} (1-S)\omega t - \frac{1}{P\tau} \pi x_2 \right\} - \cos\left\{ \left\{ 2 + \frac{2ra' - sa' + sb'}{P} \right\} (1-S)\omega t - \frac{1}{P\tau} \pi x_2 \right\} \right] \tag{14}$$

자기소음은 정지한 위치에서 측정하므로 式(13)을 고정자 좌표로 변환하면 式(15)와 같다.

$$b_s b_r' = \frac{1}{2} B_{sb}' \cdot B_{ra}' \left[ \cos\left\{ \frac{2ra - S_a - S_b - 1}{P} (1-S)\omega t - \frac{1}{P\tau} \pi x_1 \right\} - \cos\left\{ \left\{ 2 + \frac{2ra' - sa' + sb' - 1}{P} \right\} (1-S)\omega t - \frac{1}{P\tau} \pi x_1 \right\} \right]$$

따라서 1차 mode의 진동에 의하여 式(16), (17)과 같은 주파수의 자기소음을 발생한다.

$$f_k = \frac{\pm k (Z_s - 1)}{P} (1 - S) f \text{ [Hz]} \quad (16)$$

$$f_k = \left( 2 + \frac{\pm k (Z_s - 2Z_r)}{P} \frac{2P - 1}{P} \right) (1 - S) f \text{ [Hz]} \quad (17)$$

단, k : 상수(1, 2, 3, ...)

式(10)에 나타낸 주파수와 式(16), (17)에 표시한 力波의 주파수가 크게 다른 것은 式(10)의 力波의 주파수는 회전자 스로트수( $Z_r$ )에만 관계되었고, 式(16), (17)의 力波의 주파수는 고정자스로트수( $Z_s$ )에도 관계되었기 때문이다.

### Ⅲ. 실험방법

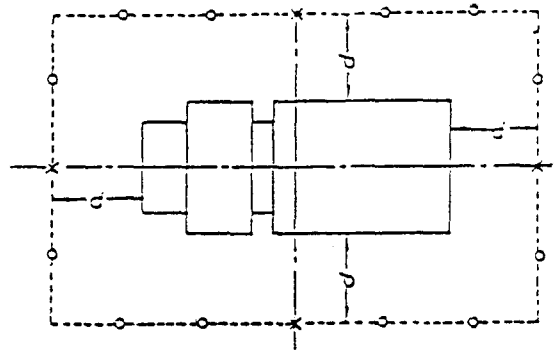
소음은 발생하는 상태나 종류가 광범위하여 이에 관련된 측정방법도 여러 종류가 있다. 각각의 목적에 따라 측정방법이나 측정기 종류가 다르지만 소음의 크기 및 수량적인 평가에 필요한 절대값의 제측과 防音, 遮音 등의 대책에 필요한 상대값 제측이 있다.

본 논문의 유도 전동기 소음은 절대값 측정법을 이용하였고 소음의 대소를 평가 하기 위해서 음압을 이용하였다. 그리고 진향실이냐 무향실이 없는 경우 또는 기계가 이동되지 않는 경우의 현장 측정법인 반 확산 음장법을 본 실험에 적용하였다. 그리고 측정 조건은 JEM-1313 규격으로 부록 1과 같고 실험에 이용한 전동기의 사양은 표 2와 같다.

유도전동기는 무부하 상태에서 측정 위치점을 그림 4와 같이 측과 직각방향으로 고정자 외피로부터 0.64[m] 이격된 점에 마이크로폰을 설치하여

표 2 유도전동기의 사양  
Table 2. Specification of induction motor

출 력 : 0.75[KW]	정 격 : 연속(40°C)
전 압 : 220 [V]	회 전 자 : 농형
전 류 : 3.8[A]	결 연 : E(중)
회 전 자 : 1700 [rpm]	통 풍 방식 : 전채형
극 수 : 4[극]	중 량 : 18 [Kg]
효 율 : 72 %	전동기직경 : 0.16[m]
상 수 : 3 [상]	외 함 길이 : 0.16[m]
주 파 수 : 60[Hz]	배 어 링 : 부하측(6204 zz)
고정자스롯 : 36[개]	반부하측(6203 zz)
회전자스롯 : 44[개]	



x : 측정점  
o : x점에서 l[m] 이격된 위치 (대형기인 경우)  
d : 유도전동기와 측정점간의 거리

그림 4. 횡축형 유도전동기의 소음 측정법  
Fig. 4. Noise measurement method for the horizontal type of induction motor.

측정하였다. 그리고 유도전동기의 자체 진동으로 인한 소음을 억제하기 위해서 유도전동기의 베이스(base) 밑에 가로 0.45(m), 세로 0.25(m), 높이 0.13(m) 되는 강판(강판두께 2(mm))에 동판와셔(washer)를 끼우고 볼트너트로 지지한 다음 그 밑에 가로 0.5(m), 세로 0.3(m), 높이 0.15(m)인 빙전고무판을 설치하였다. 유도전동기에서 발생하는 전체

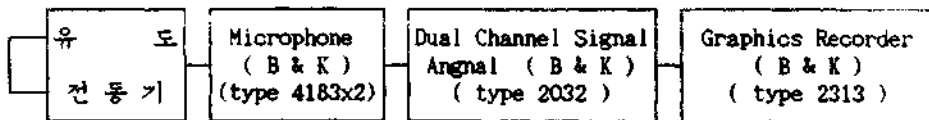


그림 5. 제측 블록선도  
Fig. 5. Block diagram of measurement system.

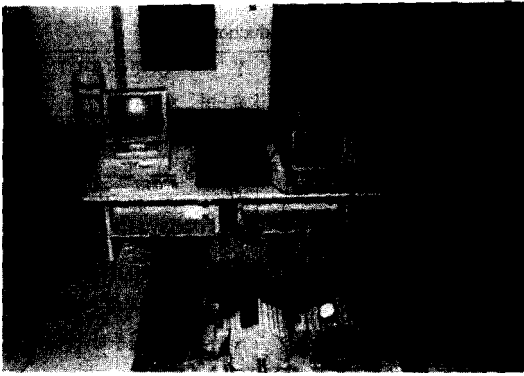
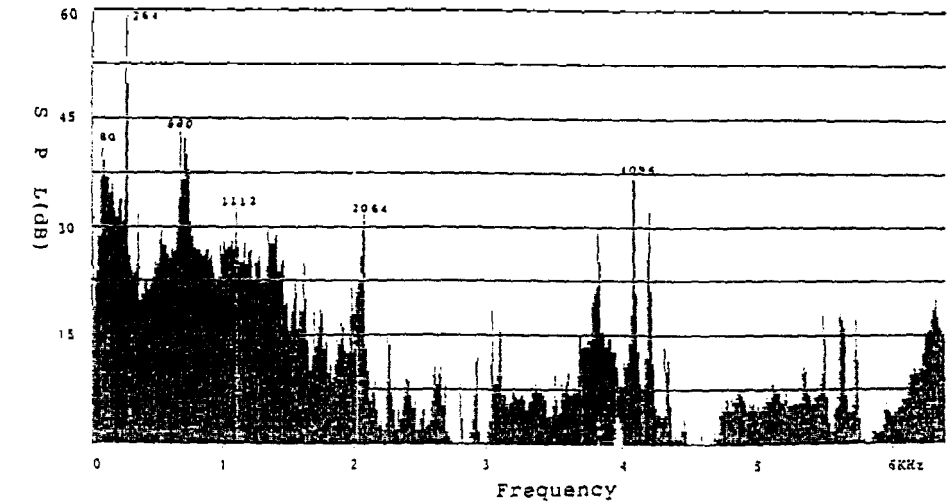


그림 6. 소음측정의 전경  
Fig. 6. Photograph of noise measurement.

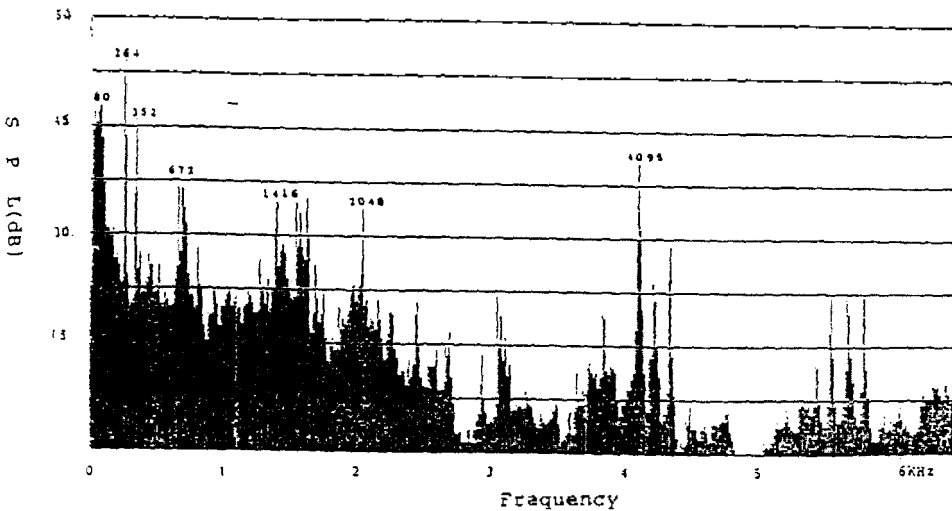
소음을 측정한 후 회전자를 제거하여 자기소음을 측정하였다. 그림 5는 실험에 이용한 계측의 블록(Block)선도며, 그림 6은 소음측정의 전경이다.

#### IV. 실험결과 및 검토

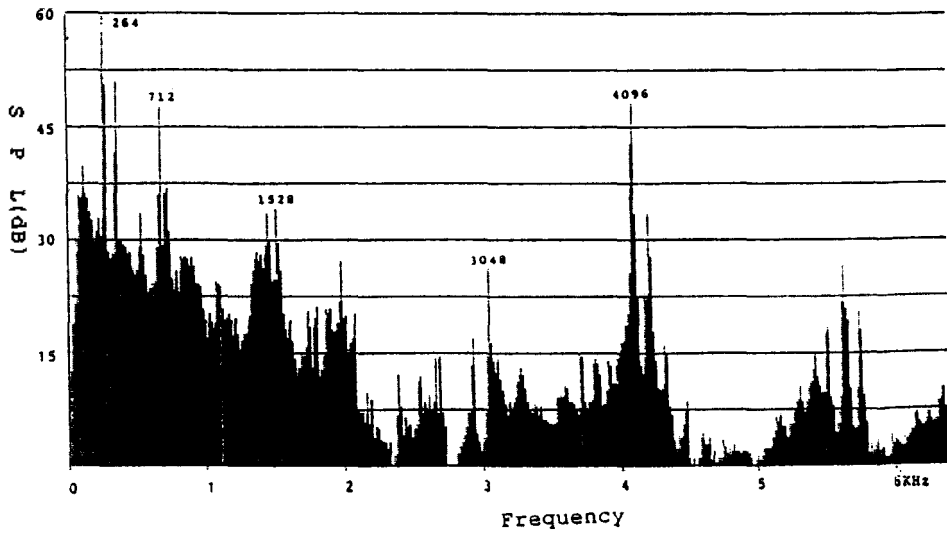
Ⅲ장의 실험방법에 의하여 전체의 소음, 고정자 권선소음 등을 측정하기 위해서 각수 4, 출력 1[HP]인 시험용 전동기를 두부하 상태에서 운전하여 그림 4와 길이 0.64[m] 이격된 4 지점 즉, 전원 반대측, 전원측, 브리 반대측, 브리측에서 소음을 측정함



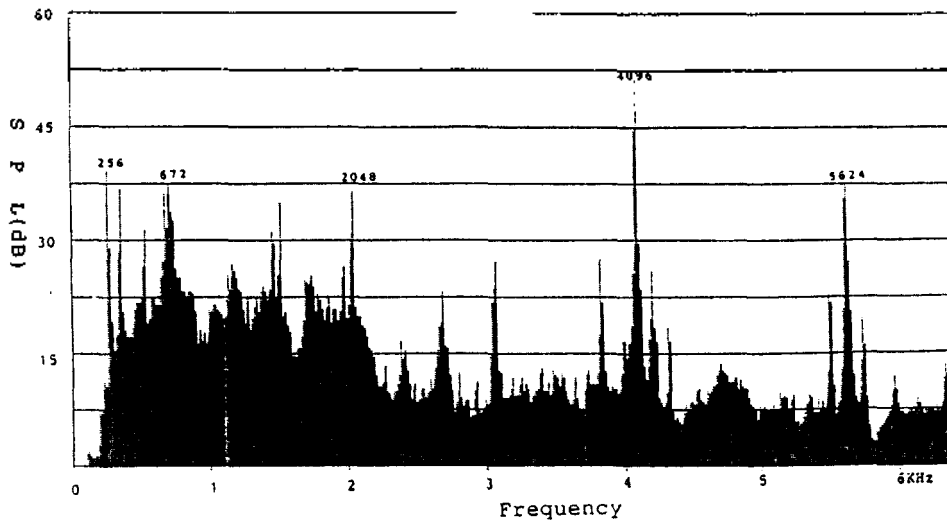
a) 전원 반대측



b) 전원측



c) 프리 반대측



d) 프리측

그림 7. 유도전동기의 전체 유압스펙트럼  
 Fig. 7. Spectrum of total sound pressure of Induction Motor.  
 a) opposite side at power source,  
 b) front side at power source,  
 c) opposite side at free,  
 d) free side.

후 순수한 고정자 권선의 소음을 측정하기 위해서 회전자를 제거하고, 고정자 권선에 정격전압 정격 주파수분 가한 상태에서 실험하였는데, 실험결과를 스펙트럼의 형태로 분석, 검토하였다.

### 1. 전체 소음

일반적으로 유도전동기에서 발생하는 소음은 전동기의 구조, 형식 및 내부 설계등에 따라 여러 종류의

주파수로 분포하고 있다.

그림 7 a)는 전동기의 전원 반대측을 그림 5의 계측분류 다이어그램을 사용하여 분석한 결과 주파수 분포는 가장 주파수의 범위에 있다. 이것을 알 수 있다. 이와 같이 분포된 주파수 중에 사람의 청각에 직접 영향을 미치는 것은 피크 주파수이다. 따라서 이러한 피크 주파수의 소음레벨(Sound level)을 중심으로 저감대책을 강구하여야만 저소음화의 유도



전동기를 실현할 수 있다.

이 실험에서 측정시간은 125[ms], 횡축(X)의 주파수범위는 0~6.4[KHz]이고 종축(Y)의 음압레벨(SPL)은 0~60[dB]로 취했다.

그림 7 b)는 전원측에서 측정한 것으로 피크값은 264[Hz]에서 55.3[dB]로써 그림 7 a)의 전원 반대측에 비하여 5.1[dB] 감소 하였지만, 80 [Hz]의 주파수에서는 47.7[dB]로 전원 반대측에 비하여 9.2[dB] 증가하였다. 이는 회전자 동적 불균형 때문에 발생되어 냉각팬의 유무나 축수의 종류에 관계가 없다고 추측된다.

일반적으로  $S_a'$  차의 고정자 고조파 자속으로 인하여 발생하는  $r_a'$  차의 회전자 고조파는 식(2)와 같이 된다. 이를 회전자 좌표  $x_2$ 로 변환하면  $\frac{x_1+z(1-S)\omega t}{\pi}$ 로 된다. 이를 정리하면

$$bra' = Bra' \sin \left\{ \left( 1 - \frac{S a'}{P} (1-S) \right) \omega t - r_a' \frac{\pi}{P_T} x_2 \right\} \quad (16)$$

보 되므로  $S_a'$ 가 기본파와 같은 방향으로 회전하는 경우에는 正(+)이고 역방향으로 회전하는 경우에는 負(-)로 된다. 672[Hz]의 주파수 성분은 고정자, 회전자의 피어먼스 변동 및 기저력중에 포함된 공간 고조파가 진동하여 소음이 발생한 것으로 자기소음이라 한다. 회전자가 672[Hz] ( $11.2\omega t$ )로 진동할 경우 회전자의 진동은 아래와 같이 된다.

$$D_r = d_{max} \cos \left\{ 11.2 \omega t \pm \frac{\pi}{P_T} x_2 \right\} \quad (17)$$

단,  $D_r$ : 회전자의 진동 주파수[Hz]

$d_{max}$ : 진폭

보통 자기음은 정지점에서 측정하므로 식(17)을 고정자 좌표로 변환하면  $x_2 = x_1 + \tau(1-S) \omega t / \pi$ 의 관계에서 회전자의 진폭 주파수  $D_r$ 은 다음과 같다.

$$D_r = d_{max} \cos \left\{ \left( 11.2 \pm \frac{1}{P} (1-S) \right) \omega t \pm \frac{\pi}{P_T} x_2 \right\} \quad (18)$$

무부하( $S=0$ )의 경우는 672[Hz]의 회전자 진동을 고정자로 생각하여 계산하면  $(11.2 \pm 1/P) \omega t = -642$ [Hz] 또는 702[Hz]가 된다. 여기서 642[Hz]는 고정자 권선의 자속 방향이 기본파와 역방향인 경우이며 702[Hz]는 정방향인 경우로써 계산값과 실측값이 +30[Hz]차가 있다. 이는 전동기의 스롯 고조파로 인한 자기음외에 고정자의 자속에 의해서 회전자가 진동하여 발생하는 자기음이 높게 된 때문이다. 그림 7 c)를 분석하면 그림 7 b)와 거의 같은 피크의 자기소음을 발생하고 있다. 그리고 그림 7 d)는 무리축이 밀폐되어 있어서 베어링의 음압이 밀접하게 관계된다. 4096[Hz]에서 51.4[dB]의 소음은 Ball Bearing, slip Bearing에서 모두 발생하지만 Ball Bearing 을 사용하는 경우가 높고 672[Hz], 680[Hz], 712[Hz]등의 소음은 회전속도가 변화하여도 거의 일정한 주파수로 유지한다. 즉 전원을 차단하여도 급히 소멸되지 않고 회전이 중지할 때까지 발생한다. 이소음은 전원측과 가까운 통풍측에서 강하게 발생하는 자기소음이다.

## 2. 고정자 권선의 소음

고정자권선 자체의 소음만을 분석하기 위해서 회전자 부분을 분리한 후 고정자권선에 정직선압을 공급한 경우는 유도 전압조정기의 1차 권선과 같다. 따라서, 발생하는 소음의 진동원은 권선과 철심으로 코일사이에 움직이는 전자력, 고정자 철심의 자기 왜응력 및 성층 철심 사이의 자기 흡인력 들을 들 수 있다.

그림 8의 성분중 80[Hz]는 기본파 자속에 의한 역파이며, 기타는 스롯 고조파에 의한 역파로 672[Hz], 704[Hz]는 고정자권선의 피어먼스 변동 및 기저력 중에 포함된 공간 고조파가 진동하여 소음을 일으키고, 1440[Hz], 1560[Hz]의 역파는 각각 48.8[dB], 52.5[dB]의 소음을 발생하고 있다. 식(16)에 의하면 역파의 차수 K는 36이고 加振주파수는 1440[Hz]이다. 그리고 가장 큰 역파의 차수 ( $K = Z_s - (0 + 2P)K$ ;  $K = 40$ )이고 기진주파수 ( $f_k = 18 + \frac{Z_s}{P} (1-S)$ ) [Hz]는 1560[Hz]이다.

실선적 1440[Hz], 1560[Hz]는 회전자와 권선 사이

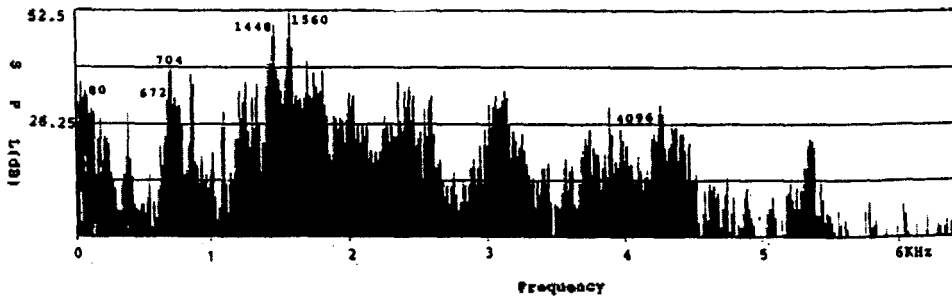


그림 8. 유도전동기의 고정자 권선만의 음압스펙트럼  
 Fig. 8. Spectrum of sound pressure of the stator winding at induction motor.

고 1560[Hz]에서 가장 큰 전자 고주파가 발생되는 것을 알 수 있다. 이외에 유도전동기의 스롯수와 사구(skew)의 간격으로 자기소음이 발생되는 경우가 있어 사구계수(skew effience)의 식,  $\eta = \frac{Z_R}{Z_s \pm P}$  을 이용하여 계산한 값은 1.16~1.29이었다.

여기서  $\eta$ 는 사구계수이다. 자기소음 제거시  $\eta$ 값은 1.0~1.5로 유도전동기의 스롯과 사구의 배열은 양호하다고 볼 수 있다.

### V. 결 론

유도 전동기의 소음은 통풍소음, 자기소음, 기계소음등이 동시에 존재하기 때문에 전동기의 크기, 구조 및 기종 그리고 특성의 영향을 받고 있다. 저소음 전동기를 사용할 경우 저소음화의 필요 한계를 종합적인 면에서 신중히 검토하여 설치하여야 하며 소음의 저감에 관한 문제는 소음의 영향조사, 기술개발에 의한 저감 및 법적인 규제가 있어야 해결될 것으로 생각되고 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 120[Hz]이하의 加振주파수는 회전속도와 회전자의 동적 불균형에 비례하여 발생하였다.
- 2) 통풍 소음은 팬, 덕트음으로 팬의 풍량, 풍압에 따라 변하고 300~400[Hz]의 加振주파수는 불평형 전자력이 회전자를 진동시켜 팬에 전해져 팬의 고유진동수가 불평형 전자력의 주파수와 거의 같을 때 발생하는 소음으로 이론값과 측정값이 거의 일치하였다.
- 3) 672[Hz]의 加振주파수에서 발생하는 소음은 주로 고정자, 회전자의 퍼미언스 변동 및 기자력

중에 포함된 공간 고조파의 진동으로 인한 소음이다.

4) 고정자 권선만의 자기 가진 주파수는 1440[Hz], 1560[Hz]로써 이론값과 실측값이 근사하였고, 1560[Hz]에서 52.5[dB]의 순수한 자기소음이 발생되었다.

5) Skew Coefficient의 값이 1.16~1.29로 스롯과 Skew pitch에서는 자기소음이 발생된다고 볼수 없고 회전자의 동강성 및 스롯수 조합의 영향을 받고 있다.

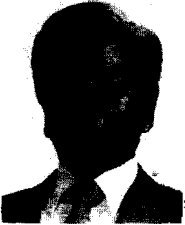
### 참 고 문 헌

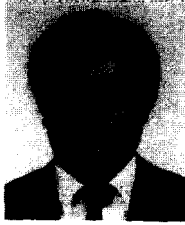
1. 糸見和信外, "低壓 三相誘導電動機의 小形化의 限界考察に 對する-解析法", 電氣學會 論文集(D), Vol.10 8, No. 12, 1988.
2. L.E. Hilde Brand, "Quiet Induction motors", AIEE Trans 49, pp. 848-852, 1930.
3. Heinz. Jordan, "Angenaherte berchnung des magnetischen gerausches Von Kafiglauffer motoren" ETZ 71, pp.491, 1950.
4. P.L Alger, "The magnetic noise of polyphase Induction motors", AIEE Trans. 73, pp. 118-, 1954.
5. 關野博, "かご形 誘導電動機의 滴數 組合せと スキュ가 磁氣騒音に 及ぼす 影響", 三菱 電機技報, No.4, pp. 272-277. 1970.
6. A.J. Ellison, "National Frequencies of stator of small Electric Machnes", PIEE 118, pp. 185-190. 1971.
7. A.J. Ellison, et al, "Effects of rotor eccentricity on acoustic noise from induction machines", PROC. IEE, vol. 118, No.1, pp.174-183. 1971.
8. 秋山勇治, "誘導電動機의 2sf振動現象に ついて", 平成 2年 電氣學會, 全國大會, Vol.7, No.688, pp. 7-11, 19

90.

9. JEM 1313. “一般用 低壓三相 かご形 誘導電動機の  
騒音 レベル(回56), 日本機械工業會規格, 1983.

筆者紹介

▲김 한 성(정회원) 1931년 8월 20일생  

 1955년 : 서울대학교 공과대학 전기공학과  
 1973년 : 명지대학교 대학원 전기공학과  
 1979년 : 숭전대학교 대학원 (공학박사)  
 1985.8~1986.8 : 일본 나고야 대학 전기공학 과 객원교수  
 1969년~1971.2 : 광운공과대학 전기공학과 조교수  
 1972년~현재 : 건국대학교 공과대학 전기공학과 교수

▲신 대 철 1952년 3월 2일생  

 1974년 : 건국대학교 공과대학 전기공학과  
 1976년 : 건국대학교 대학원 전기공학과  
 1986년 : 건국대학교대학원 전기공학과 수료  
 1989.8~1990.8 : 일본 나가사키 대학 전기정보 공학과 객원교수  
 1976.3~1979.2 : 전주공업전문대학 전기과 전임강사  
 1979.3~현재 : 호서대학교 이공대학 전기공학과 부교