

대용량 유도전동기의 부하 운전 시 자기 소음 특성 해석

논문
58-3-12

Analysis of the Magnetic Noise for Large Power Induction Motors at Loading Operation

권병훈* · 전태원† · 이홍희** · 김홍근***
(Gil-Dong Hong · Tae-Won Chun · Hong-Hee Lee · Heung-Gun Kim)

Abstract - When a squirrel cage induction motor is loaded, the magnetic noise can increase depending on the load current. It is due to the variation of air gap harmonic fluxes from the rotor current induced by loading. This unfavorable noise can be anticipated by analysing the radial force waves in the air gap, the mode shapes of them, and stator core natural frequencies at each mode. With the experimental tests with the different rotor slot numbers, the variation of magnetic noise depending on the load current is studied and the method to reduce the magnetic noise is suggested with the newly developed magnetic noise analysis program.

Key Words : Electromagnetic noise, Flux density, Induction motor, Rotor slot

1. 서론

현재 산업계에서는 대형 3상 유도전동기의 소음 기준으로 무부하 운전중 측정된 소음을 적용 하는 것이 일반적이다. 이것은 대형 전동기의 공장 출고 시험시 실부하 운전 시험이 일반적으로 불가능하고, 등가 부하 시험은 그 방법에 따라 발생 소음에 차이가 있으며, 시험 설비 자체의 소음과 분리 측정의 어려움도 있기 때문이다. 그러나 최근 국제적으로 소음에 대한 규제가 엄격해 지면서, 부하와 전동기를 하나의 단위로 허용 소음 크기를 규정하여 설비기준을 제시하는 사례가 증가함에 따라, 전동기의 부하 운전중 소음 변화 연구에 대한 필요성도 증가하게 되었다.

3상 유도전동기의 고주파 전자기음의 발생은 고정자 및 회전자의 슬롯 조합과 관계가 깊으며, 발생하는 자기 소음의 크기는 공극 자속 고조파의 크기, 자기력 파동의 모드 형태, 고정자 철심 고유진동수와와의 관계 등과 관련되어 있다 [1][2]. 유한요소법을 적용하여 고정자 내경에서의 자기력 파동의 분포를 구하고 이를 FFT 분석법으로 분석하여 자기력 파동의 모드, 소음 주파수 및 크기 등을 계산하는 방법이 발표되었다[3][4]. 소음의 크기에 영향을 미치는 고정자 철심의 모드별 고유 진동수는 전동기 구조가 복잡하므로, 수식적인 계산 보다는 구조 해석이나 임팩트 실험 등을 통하여 보다 정확한 자료를 얻을 수 있다 [4]. 자기 소음 감소에 영향을 주는 것으로 알려져 있는 회전자 스큐에 대해서는 그 효과에

대한 상반된 연구 결과가 나와 있기도 하다 [5],[6].

그동안의 자기 소음 연구는 대용량 전동기에 대한 부하 운전 실험 및 소음 측정의 어려움 때문에, 주로 소용량 전동기의 무부하 또는 부하 운전 실험 결과를 참조하여 왔다 [3-5],[7]. 그러나 소용량 전동기는 대용량 전동기에 비하여 기계적인 고유진동수가 자기력 파동의 주파수보다 일반적으로 상당히 높고, 크기도 작아서 소음 방사력이 작다. 따라서 무부하 운전시와 부하 운전시의 소음 차이가 크지 않을 수 있으므로, 그 결과를 대용량 전동기에 적용하기에는 상당히 무리가 있다. 또한 최근에 대용량 전동기도 점차 인버터로 구동하는 경우가 증가하고 있어, 인버터에 의해 공급되는 전원 고조파가 자기 소음에 미치는 영향에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다[8-10].

본 논문에서는 공극 고조파 분석법과 모드 비교 분석법을 응용하여 개발된 3상 농형 유도전동기의 자기소음 분석 프로그램을 소개한다. 공극 자속밀도 고조파의 각 차수별 크기 계산 수식은 유한 요소법으로 공극 자속밀도의 분포를 구하고 이를 FFT 분석법으로 분석한 결과와 비교 검증하였다. 대용량 전동기에 대한 무부하 및 부하 운전 실험, 회전자 슬롯 개수 변경 실험 등을 통해 개발된 자기소음 분석 프로그램의 정확성을 검증하고, 부하 운전 중 자기 소음 크기를 최소화 할 수 있는 설계 기법을 제시한다.

2. 자기 소음의 발생원인

전동기의 자기 소음은 발생 주파수와 전압 및 전류의 영향을 기준으로 구분될 수 있다. 먼저 발생하는 주파수에 따라 저주파 자기소음과 고주파 자기소음으로 구분할 수 있다. 저주파 자기 소음은 공극 자속의 기본파 성분에서 발생하며, 주로 전원 주파수 또는 전원 주파수의 2배 주파수를 가지는 진동과 함께 발생된다. 고주파 자기 소음은 공극

* 정 회 원 : 현대중공업 전기전자시스템사업부 차장
† 교신저자, 정회원 : 울산대 전기전자정보시스템공학부 교수
E-mail : twchun@mail.ulsan.ac.kr
** 정 회 원 : 울산대 전기전자정보시스템공학부 교수
*** 시니어회원 : 경북대 전기전자공학부 교수
접수일자 : 2008년 11월 24일
최종완료 : 2009년 2월 13일

자속의 고조파 성분에 의해 발생하며, 그 발생 주파수는 회전자 슬롯 개수와 회전 속도에 관련되어있다. 다음 전압의 크기에 영향을 받는 소음은 주로 부하 운전 중 발생하는 자기 소음으로, 공극의 퍼미언스 고조파가 주요 원인이다. 그리고 전류의 크기에 영향을 받는 소음은 부하 운전 중 전류의 크기에 비례하여 발생하는 자기 소음으로 여자 고조파가 주요 원인이다

본 논문에서는 위에서 기술한 자기 소음 중 약 600Hz - 2000Hz 주파수 범위에 부하 전류의 크기에 영향을 받는 자기 소음을 연구하고 이 소음발생을 제한 할 수 있는 전동기 설계 방법을 제시한다. 자기 소음을 분석하기 위하여 공극 내에서 원주 방향으로 회전하는 자기력 파동을 분석한 후, 이 파동의 모드 형태를 구분하고 동일 모드 형태로 변형되는 고정자 철심의 고유 진동수와 비교하여 증폭 계수를 산정한 후 발생 소음을 예측하는 과정을 거친다.

2.1 자기력 파동

공극에서 생성되는 자기력 파동은 식 (1)과 같이, 공극 자속 밀도의 제곱으로 나타낼 수 있으며, 개별 자속 밀도 고조파들 간의 무수한 조합으로 이루어져있다 [1].

$$p(x,t) = \frac{b^2(x,t)}{2u_0} = \frac{1}{2u_0} [b_{1p}^2 + 2(\sum_v b_{1p}b_v + \sum_m b_{1p}b_m) + \sum_v b_v^2 + \sum_m b_m^2 + 2(\sum_{v1 < v2} b_{v1}b_{v2} + \sum_{m1 < m2} b_{m1}b_{m2}) + \sum_v \sum_m b_v b_m] \quad (1)$$

여기서, b_{1p} : 공극 자속밀도의 기본파 성분
 b_v, b_m : 고정자 및 회전자 고조파 성분

식 (1)은 크게 세 가지 항목으로 구분되어질 수 있다. 먼저 공극 자속 밀도의 기본파 성분과의 조합으로 나타나는 자기력 파동들로 0-120Hz의 주파수 범위를 가지며, 이것은 소음 보다 주로 진동에 더 큰 영향을 주는 것이다. 다음 항목은 고정자 고조파들 사이의 또는 회전자 고조파들 사이의 조합으로 생성되는 자기력 파동들로서, 그 크기는 작고 모드 번호는 상대적으로 크므로 소음이나 진동을 크게 발생시키지 않는다. 마지막으로 고정자 고조파와 회전자 고조파 성분들 사이의 조합으로 발생하는 자기력 파동들로서, 자기소음을 유발할 가능성이 상당히 높다.

따라서 첫 번째와 두 번째 항목의 자기력 파동에 의한 소음 발생의 영향이 미미하고 마지막 항목의 자기력 파동이 자기소음을 유발할 가능성이 높으므로, 식(1)에서 두 개 항목은 무시하고 마지막 항만으로 자기력 파동을 표현하면 식 (2)와 같다. 이 식과 같이, 공극에서의 자기력 파동은 사인파 형태의 시간적, 공간적 분포를 가지며, 그 크기는 고정자 고조파의 크기 및 회전자 고조파의 크기의 곱에 비례한다.

$$p(x,t) = \sum_v \sum_m b_v b_m = P_r \cos(rx - \omega_r t - \phi_r) \quad (2)$$

여기서 $P_r = \frac{B_v B_m}{2u_0}$

$$\omega_r = \omega_v \pm \omega_m, \quad \phi_r = \phi_v \pm \phi_m$$

B_v, B_m : 공극자속밀도 고정자 및 회전자 고조파 크기
 ω_r, ω_m : 공극자속밀도 고정자 및 회전자 고조파 각속도
 ϕ_r, ϕ_m : 공극 자속밀도 고정자 및 회전자 고조파 위상

자기 소음의 주파수는 그 자기력 파동을 생성시키는데 개입된 특정 고정자 및 회전자 고조파의 각속도 차이에 의해 결정된다. 여기서 자기력 파동이 특정 시간에 보이는 파동의 공간적 분포의 형태를 모드 형태라고 표현하고, r 을 모드 번호로 정의한다.

2.2 모드 형태

그림 1은 자기력 파동의 모드 번호별 모드 형태를 나타내고 있다. 식 (2)와 같이 표현되는 자기력 파동의 모드 번호(r)는 고정자 및 회전자의 고조파 쌍극수의 합 또는 차로 만들어지며, 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$r = |v \pm m|p \quad (3)$$

여기서, p : 공극 자속의 기본파 성분의 쌍극수,
 v, m : 고정자 및 회전자 고조파 차수 이다.

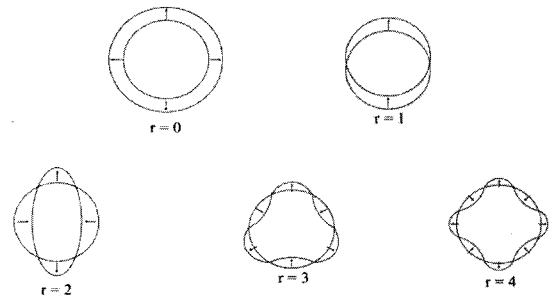


그림 1 자기력 파동의 모드 형태들
 Fig. 1 Mode shapes of magnetic force wave

그림 1에서 $r=0$ 인 모드 형태는 자기력 파동이 공극 내에서 정지되어 있으면서 반경 방향으로 균일하게 진동하는 모드이며, $r=1$ 인 모드 형태는 한쪽 방향으로 편중되어 진동하는 모드로서, 상대적으로 고정자 보다 지지력이 약한 회전자가 진동하게 된다. 모드번호 $r=2$ 이상인 모드의 경우에는 공극 내에서 특정한 공간적인 분포 형태를 가지며 원주 방향으로 회전하는 자기력 파동들이다.

공극에서의 발생되는 $r=1$ 인 경우를 제외한 여러 가지 모드 형태의 자기력 파동들은 모두 고정자 철심의 변형을 가져온다. 고정자 철심의 변형량은 모드 번호의 4승에 반비례하므로, 자기력 파동의 모드 번호가 클수록 고정자 철심의 변화량이 급격히 작아지며 자기 소음 발생 가능성도 줄어든다. 따라서 공극 고조파 성분들 중에 가장 큰 크기를 가지는 고정자 및 회전자의 슬롯 고조파 성분들이 발생시키는 자기력 파동들의 모드 번호가 크게 되도록 전동기를 설계하면 자기 소음 발생을 상당히 억제시킬 수 있다.

2.3 고정자 철심의 고유 진동수

특정 모드 형태에서 고정자 철심을 변형시키는 자기력 파동의 주파수와 고정자 철심의 고유 진동수가 가까이 존재할 경우에는, 고정자 철심의 진동이 증폭될 수 있으므로 자기 소음이 증가할 것이다. 따라서 각 모드 형태별로 고정자 철심의 고유진동수를 계산하여 자기력 파동의 주파수와 비교하는 것은 자기 소음 크기를 예측하는데 중요하다. 모드 번호 $r=1$ 인 경우를 제외하면, 공극에서의 자기력 파동에 의한 진동은 주로 상대적 강성이 약한 고정자에서 나타난다.

모드번호 $r=4$ 일 경우 공극 내 원주 방향으로 회전하고 있는 자기력 파동에 의한 고정자 철심의 변형 모드 형태는 그림 2에서와 같이 사인파 형태의 공간적 분포 주기를 가지고 있다.

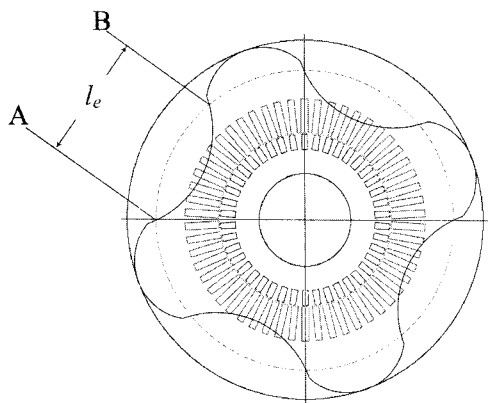


그림 2 고정자 철심의 변형 모드 형태 ($r = 4$)
 Fig. 2 Deformation mode shape of stator core ($r = 4$)

고정자 철심의 고유 진동수는 사인파형의 반주기에 해당하는 철심의 원주 방향 길이(l_e)를 하나의 진동 단위로 하여, 양 끝(A와 B)이 고정되어있는 등가의 보(beam)로 간주한다. 이 등가보가 가지고 있는 반경 방향 진동에 대한 고유 진동수를 구하면, 그 모드 번호에서의 고유 진동수를 구할 수 있다. 보의 진동이론에 따르면, 반경 방향 변형량은 보의 길이의 3승에 비례하며, 따라서 모드 번호가 작아서 등가보의 길이가 길면, 동일한 자기력에 대해 그 만큼 철심의 반경방향 변형량도 커지게 된다. 따라서 크기가 큰 자기력 파동이 비교적 큰 모드 번호를 가지도록 설계한다면, 그 자기력 파동에 의해 발생하는 자기 소음의 크기를 제한 할 수 있다. 일반적으로, 자기력 파동의 모드 번호가 기본과 극수 보다 클 경우에는 자기 소음 발생 가능성이 낮은 것으로 본다.

앞에서 설명한 바와 같이, 자기 소음을 예측하기 위해서는 자기력 파동의 크기를 결정하는 개별 고조파 성분들의 크기와 차수를 분석하여야 하며, 또한 자기력 파동이 만들어 내는 모드 형태에 따른 고정자 철심의 고유진동수와 그 자기력 파동의 주파수를 비교하여 소음의 증폭 정도를 분석해야 한다. 다음은 이러한 분석 방법을 적용하여 개발된 자기 소음 분석 프로그램으로 실험용 전동기를 분석한 내용이다.

3. 자기 소음 분석

실험에 사용된 전동기의 사양은 표 1과 같다. 실험용으로 고정자는 54개 슬롯을 가지며, 42개 및 70개의 회전자 슬롯을 가지는 두개의 회전자를 각각 제작하였다. 두개의 회전자 모두 스쿠가 적용되었다.

표 1 실험용 전동기 사양

Table 1 Specifications of sample motor

용량	420kW	
극수	6극	
전압	6600V	
주파수	50Hz	
고정자 슬롯 개수	54	
회전자 슬롯 개수	42	70
회전자 스쿠	있음	

자기 소음 분석 프로그램에서 고려되는 공극 자속 밀도 고조파 성분들은 고정자의 권선 및 슬롯 고조파 성분, 회전자의 권선 및 슬롯 고조파 성분 등으로 구성된다. 여기서 회전자 포화 고조파 성분은 이 성분크기를 계산하기가 상당히 어려운 관계로 고려 대상에서 제외하였다.

3.1 1차 실험용 전동기 분석 (회전자 슬롯 : 42개)

그림 3과 그림 4는 회전자 슬롯 개수가 42개인 전동기를 무부하로 동작 시 전자장 유한 요소법으로 해석한 공극 자속 밀도 반경 방향 성분 분포도 및 FFT 분석 결과이다.

그림 3(a)는 무부하 운전중 전기각에 대한 반경 방향 공극 자속 밀도 분포도이며, 그림 3(b)는 이 자속밀도를 FFT 분석하여 나타낸 것이다. 실험용 전동기가 6극이므로, 그림 3(a)에서의 기본파 성분이 FFT 결과에서는 쌍극수 3의 위치에 표시된다. 3(b)에서 넓은 막대로 표시된 쌍극수 39, 45, 81, 87의 성분은 회전자 슬롯 고조파들이다. 좁은 막대로 표시된 쌍극수 9의 성분은 고정자 포화 고조파, 쌍극수 51, 57의 성분은 고정자 슬롯 고조파, 그리고 나머지 쌍극수의 성분은 고정자 권선 고조파 등이다.

그림 4는 전부하 운전 중의 반경 방향 공극 자속 밀도 분포도와 FFT 분석도를 각각 보인 것이다. 그림 4(b)의 FFT 분포도를 그림 3(b)와 비교하면 회전자 고조파 성분이 상당히 증가한 것을 알 수 있다. 표 2는 무부하 운전 시와 전부하 운전 시 쌍극수 39와 45에 나타나는 회전자 고조파 성분의 값을 보인 것이다. 전부하로 동작 시 쌍극수 39와 45에서의 고조파 성분은 무부하시에 비하여 각각 3.9배, 2.9배 증가됨을 알 수 있다. 이러한 현상은 부하 운전으로 인한 회전자 전류가 증가됨으로 회전자 슬롯 고조파 성분과 동일한 차수를 가지는 회전자 권선 고조파 성분이 추가적으로 발생하였기 때문이며, 이것이 무부하 운전중에는 작았던 자기 소음이 부하 운전 중에는 상당한 크기로 증가하는 한 원인이 된다.

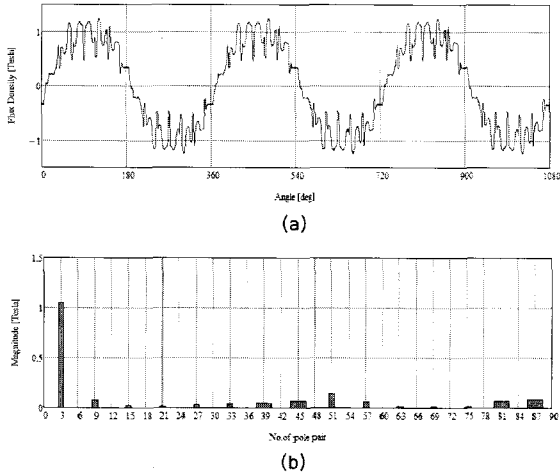


그림 3 회전자 슬롯 개수 42개 전동기 무부하 시 특성 : (a) 공극 자속 밀도 분포도, (b) FFT 분석 결과

Fig. 3 Characteristics of motor with 42 rotor slots at no load condition : (a) air gap flux density distribution (b) FFT result

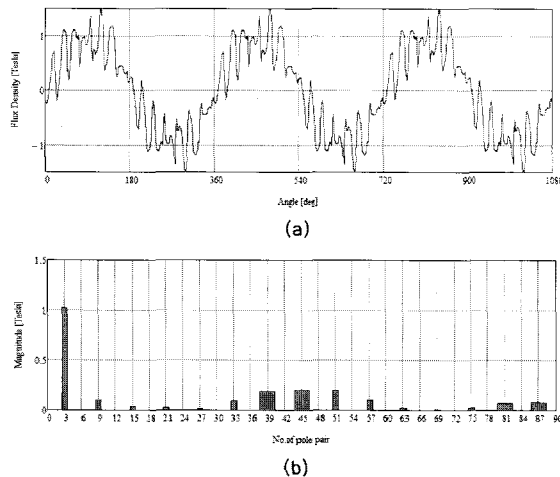


그림 4 회전자 슬롯 개수 42개 전동기 전 부하 시 특성 : (a) 공극 자속 밀도 분포도, (b) FFT 분석 결과

Fig. 4 Characteristics of motor with 42 rotor slots at full load condition : (a) air gap flux density distribution (b) FFT result

전 부하 운전 시 증가한 또 다른 성분들은 쌍극수 33 및 51의 고조파 성분들이다. 이 성분들은 부하 운전 중 회전자 권선에 전류가 유기됨으로 인해 회전자 슬롯 개구부 주변에 자기 포화현상이 심화되어 증가된 회전자 포화 고조파 성분이다. 이것은 부하 운전 중 자기 소음이 증가하는 또 하나의 원인이 된다.

그림 5는 자기 소음 분석 프로그램으로 회전자 슬롯 개수가 42개인 전동기의 부하 운전 중 자기 소음을 분석한 결과이다. 여기서 모드 번호가 기본과 극수보다 큰 자기력 파동들은 계산에서 제외되었다.

표 2 회전자 고조파 증가 비율

Table 2 Increment ratio of rotor harmonics

쌍극수	무 부하 운전	전 부하 운전	증가비율
39	0.05 Tesla	0.19 Tesla	380 %
45	0.07 Tesla	0.20 Tesla	286 %

자기 소음 분석 결과 가장 큰 자기 소음은 51쌍극수의 고정자 슬롯 고조파와 45쌍극수의 회전자 권선 고조파가 생성하는 모드 번호 6의 자기력 파동에 의한 자기 소음이다. 소음의 주파수는 791Hz이며 고정자 철심의 주파수 3630Hz와 차이가 커서 증폭비는 작지만, 약 93dB의 자기 소음 발생이 예상된다.

MAGNETIC NOISE CALCULATION PROGRAM

** OUTPUT DATA **

VX	MX	R	FR	FRR	KR	PR	dB
39.0	-39.0	0	591	2379	1.07	0.417	65
-33.0	-39.0	6	691	3630	1.04	1.773	79
39.0	45.0	6	691	3630	1.04	0.362	65
-51.0	45.0	6	791	3630	1.05	6.601	93
75.0	-81.0	6	1282	3630	1.14	0.376	72
-87.0	-81.0	6	1382	3630	1.17	0.324	71
93.0	87.0	6	1382	3630	1.17	0.078	58
-87.0	87.0	0	1482	2379	1.63	0.302	74

여기서, VX, MX : 고정자 및 회전자 고조파 쌍극수
 R : 모드번호
 FR, FRR : 소음 및 철심주파수
 KR, PR : 증폭비 및 자기력크기

그림 5 자기 소음 분석 결과 (회전자 슬롯: 42개)

Fig. 5 Magnetic noise analysis result (rotor slot: 42EA)

42개 회전자 슬롯을 가진 실험용 전동기가 비교적 큰 자기 소음을 유발시키는 것으로 분석되는 2가지 이유가 있다. 첫째로, 자기 소음을 발생하는 고조파 성분들이 공극 고조파들 중에서 가장 큰 크기를 가지는 고정자 및 회전자 슬롯 고조파와 권선 고조파가 중첩된 성분들이며 따라서 가장 큰 크기의 자기력을 생성한다. 둘째로, 생성된 자기력 파동의 모드가 기본과 극수 보다 크지 않아, 비교적 큰 고정자 철심의 변형을 유발시키기 때문이다. 결론적으로 자기 소음 발생을 억제하기 위하여 고정자 슬롯 개수와 회전자 슬롯 개수의 차이가 기본과 극수의 2배보다 크게 하여 고정자 및 회전자 슬롯 고조파들 사이에서 생성되는 자기력 파동의 모드 번호가 기본과 성분의 극수 보다 크게 해야 한다. 이러한 것들을 고려하여 자기 소음 크기를 최소화 할 수 있는 회전자 슬롯 개수로 70개를 선정하고 2번째 회전자를 제작하였다.

3.2 2차 실험용 전동기 분석 (회전자 슬롯 : 70개)

2차 실험용 전동기는 1차 실험용 전동기와 고정자는 동일하고 회전자 슬롯 개수만 70개로 변경 제작하였다. 그림 6(a)와 (b)는 회전자 슬롯을 70개로 수정한 전동기로 무부하 동작 시와 전부하 동작 시에 각각 반경방향 공극 자속 밀도 분포를 FFT 분석한 결과들이다. 두 그림에서 보면 쌍극수 67과 73에서 회전자 슬롯 고조파 성분이 나타나며, 무 부하

동작시에 비해 전 부하 동작 시에 이 두 고조파 성분들이 역시 증가되었다. 그러나 고정자 슬롯 고조파와 회전자 슬롯 고조파가 만들어내는 자기력 파동 중 가장 작은 모드 번호는 10으로써 기본파 극수 6보다 크기 때문에 자기 소음을 발생할 가능성이 낮은 것으로 분석된다.

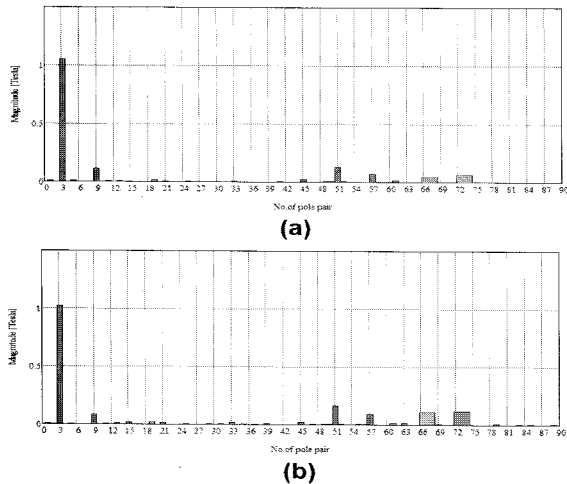


그림 6 회전자 슬롯 개수 70개 전동기의 공극자속 밀도 FFT 분석 : (a) 무부하 운전 시 (b) 전부하 운전 시
 Fig. 6 FFT analysis of air gap flux density harmonics of motor with 70 rotor slots : (a) at no load condition, (b) at full load condition

그림 7은 자기 소음 분석 프로그램으로 회전자 슬롯 개수 70개인 전동기의 부하 운전 중 자기 소음을 분석한 결과이다. 이 그림에서 가장 큰 크기의 자기력 파동은 쌍극수 75의 고정자 고조파와 쌍극수 73의 회전자 고조파가 만드는 자기력 파동이나, 그 크기는 42개 슬롯 회전자의 최대 자기력 파동의 크기에 비해 약 1/18로 감소하였다. 반면, 쌍극수 69인 고정자 고조파와 쌍극수 73인 회전자 고조파가 발생시키는 자기력은 그 크기는 작지만 자기력 파동의 주파수와 고정자 철심의 고유진동수가 가까이 있어서, 소음이 다소 증폭되어 발생할 가능성이 있는 것으로 분석되었다.

MAGNETIC NOISE CALCULATION PROGRAM

** OUTPUT DATA **

VX	MX	R	FR	FRF	KR	PR	dB
-69.0	-67.0	2.0	1152	326	0.09	0.117	36
75.0	73.0	2.0	1152	326	0.09	0.354	47
-69.0	73.0	4.0	1252	1666	2.30	0.107	66
-141.0	-137.0	4.0	2305	1666	1.09	0.100	65
147.0	143.0	4.0	2305	1666	1.09	0.026	52
-141.0	143.0	2.0	2405	326	0.02	0.096	27

그림 7 자기 소음 분석 결과 (회전자 슬롯 : 70)
 Fig. 7 Magnetic noise analysis result (rotor slot : 70EA)

4. 실험 결과

두 실험용 전동기에 대한 실험은 무부하 운전 조건 및 전 부하 운전 조건에서 각각 실시하였다. 무부하 운전 실험에

서는 전압의 크기 변화에 따른 자기 소음의 변화를 측정하였고, 부하 운전 실험에서는 부하 전류의 변화에 따른 자기 소음의 변화를 측정하였다. 소음 측정은 1/3 옥타브 밴드 소음 분석기로 측정하였다.

그림 8는 회전자 슬롯이 42개인 전동기의 무부하 운전 중 자기 소음을 측정된 값이다. 정격전압 인가 시에는 1/3 옥타브 밴드 중심주파수 800Hz와 1000Hz에서 가장 큰 값이 측정되었으며, 전압을 감소시켰을 경우에 자기소음이 현저히 감소하는 것을 알 수 있다.

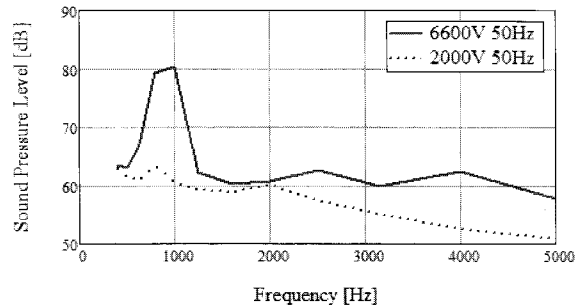


그림 8 무부하 운전 소음 (회전자 슬롯 : 42개)
 Fig. 8 Sound level at no load condition (rotor slot : 42EA)

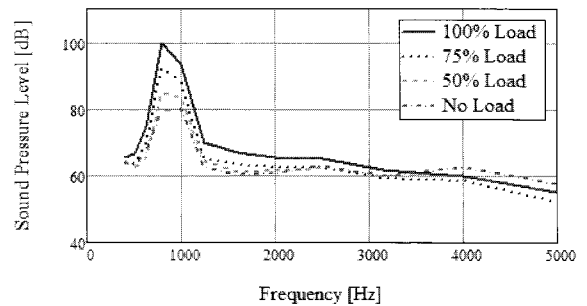


그림 9 무부하 및 전부하 운전 시 소음 (회전자 슬롯 : 42개)
 Fig. 9 Sound level at no load & full load (rotor slot : 42EA)

그림 9는 회전자 슬롯이 42개인 전동기의 무부하 운전 중 측정 소음과 전부하 운전 중 측정 소음을 비교한 것이다. 전 부하 운전 중에 중심주파수 800Hz 및 1000Hz 대역의 소음이 무부하 운전 중 측정된 소음값 대비 약 20dB 증가하였다. 그림 5에서 분석된 바와 같이 회전자 권선 고조파가 생성하는 모드 번호 6의 자기력 파동에 의하여 791Hz 성분의 자기 소음이 발생한 것이며, 여기서 고려되지 않은 회전자 포화 고조파 성분에 의해 891Hz의 자기 소음도 발생된 결과로 보인다. 부하 운전 중 부하 전류의 크기를 변화시키면, 자기 소음은 부하 전류의 크기에 비례하여 증감하는 것을 볼 수 있었으며, 부하 운전 중 전류의 크기는 일정하게 유지하면서 전압을 감소시켜 보았으나, 자기 소음은 거의 변하지 않았다. 회전자에 스류가 적용되었으나, 회전자 권선 고조파에 의한 자기소음을 감소시키는 데는 큰 영향이 없었다.

그림 10은 동일한 고정자에 슬롯 개수가 70개인 회전자를 적용한 전동기의 무부하 및 전부하 운전 중 소음을 측정한

값이다. 이 그림에서 주요 자기소음 주파수는 1/3 옥타브 밴드 중심 주파수인 1000Hz, 1250Hz, 1600Hz에서 비교적 크게 나타났다. 중심주파수 1000Hz 및 1250Hz 성분은 그림 7에서 분석된 1152Hz 및 1252Hz 성분의 소음으로 판단되며, 중심주파수 1600Hz 성분은 그림 7에서 고려되지 않은 회전자 포화 고조파 성분에 의한 1352Hz의 자기력 파동이 고정자 철심의 고유진동수 성분과 가까이 있어 다소 증폭되어 나타난 것으로 판단된다. 회전자 슬롯 개수가 70개인 전동기의 무부하 자기 소음 대비 부하 자기 소음의 증가는 약 7dB로써 회전자 슬롯 42개 전동기 경우의 약 20dB 보다 대폭 감소하였다. 따라서 앞서 제시된 방법으로 회전자 슬롯 개수를 선정할 경우, 부하 운전 중 자기소음의 증가를 대폭 억제할 수 있음을 알 수 있다.

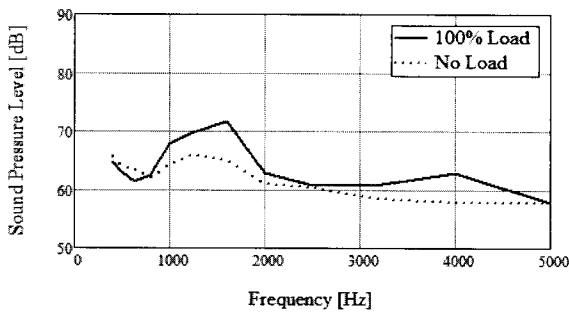


그림 10 무부하 및 전부하 운전 시 소음 (회전자 슬롯 : 70개)
 Fig. 10 Sound level at no load and full load (rotor slot : 70EA)

5. 결 론

본 논문에서는 대용량 3상 농형 유도전동기가 무부하 운전시 자기 소음 대비 전부하 운전시 자기 소음이 증가하는 원인으로 부하 운전중 회전자 권선에 유기된 전류에 의해 공극 자속에 회전자 슬롯 고조파와 동일한 차수의 회전자 권선 고조파가 추가적으로 생성되기 때문으로 분석하였다. 회전자 슬롯 개수가 42개인 전동기는 회전자 권선 고조파가 공극 자속 고조파 중 가장 큰 크기를 가지는 고정자 슬롯 고조파와 기본파 극수와 동일한 모드 번호($r=6$)의 자기력 파동을 생성하게 되어서, 큰 자기 소음이 발생되었다. 회전자 슬롯 개수를 70개로 변경하였을 경우, 회전자 권선 고조파와 고정자 슬롯 고조파가 생성하는 자기력 파동의 모드 번호는 10으로 전동기의 기본파 극수보다 크다. 따라서 자기력 파동의 크기가 1/18로 대폭 감소되면서 소음을 30% 이상 감소시킬 수 있었다. 따라서, 부하 운전중 자기소음 증가를 억제하기 위해서는 고정자 슬롯 개수와 회전자 슬롯 개수의 차이를 적어도 기본파 극수의 2배 이상이 되도록 설계하여야 한다.

회전자 슬롯 개수 선정 시에 자기력 파동과 동일 모드 번호를 가지는 고정자 철심 고유 진동수와 공진 여부도 고려하여야 한다. 만약 회전자 슬롯 개수를 고정자 슬롯 개수보다 클 경우, 추가적인 고주파 손실의 발생 가능성이 있다. 회전자에 스큐를 주는 것은 부하 운전중 자기소음 저감에는 큰 효과가 없었다.

공극 고조파 분석법과 모드 비교 분석법을 바탕으로 개발된 자기소음 분석 프로그램의 적용 결과는 실험 결과와 상당부분 일치하였다. 따라서 본 논문에서 사용한 자기 소음 분석 프로그램으로 자기 소음 발생을 최소화하는 적절한 슬롯조합을 선정할 수 있고, 고조파의 크기를 최소로 할 수 있는 권선 피치를 선택할 수 있으며, 슬롯 크기 등 철심의 치수 조정으로 고유 진동수를 변경함으로써 자기 소음 최소화시키는 설계 환경을 구현할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력 연구원(R-2005-7-067) 주관으로 수행된 과제임

참 고 문 헌

- [1] P.L.Timar, *Noise and Vibration of Electric Machines*, Amsterdam: Elsevier Science, 1989.
- [2] Paul L. Cochran, *Polyphase Induction Motors, Analysis, Design, and Application*, New York: Marcel Dekker, Inc. 1989.
- [3] Takashi Kobayashi, Fumio Tajima, Motoya Ito, and Suetaro Shibukawa "Effects of Slot Combination on Acoustic Noise from Induction Motors," *IEEE Trans. on magnetics*, vol.33, no.2, pp.2101-2104, March 1997.
- [4] Fuminori Ishibashi, Katsumi Kamimoto, Shinichi Noda, and Kazunobu Itomi, "Small Induction Motor Noise Calculation," *IEEE Trans. on energy conversion*, vol.18, no.3, pp.357-361, Sept. 2003.
- [5] S. L. Nau, "The Influence of the Skewed Rotor Slots on the Magnetic Noise of Three-phase Induction Motors," *EMD Conf. Publ. no.444*, pp.396-399, Sept. 1997.
- [6] F. Kako, T. Tsuruta, K. Nagaishi, and H. Kohmo, "Experimental Study on Magnetic Noise of Large Induction Motors," *IEEE Trans. vol. PAS-102*, pp.2805-2810, Aug. 1987.
- [7] Kazuo Tsuboi, Isao Hirotsuka, and Fuminori Ishibashi "Causes and Characteristics of the Electromagnetic Vibration of a Squirrel Cage Induction Motor under Load," *IEEJ vol.120*, no.4, pp81-89, 1997.
- [8] Stephen D. D, "Discussion on Acoustic Noise and Vibration of Rotating Electrical Machines," *Proc. IEE vol.117*, no.1, pp.127-129, 1970.
- [9] Shoji Iida, Yasuhiro Okuma, Shigeo Masukawa, Shota Miyairi, and Bimal K. Bose, "Study on Magnetic Noise caused by Harmonics in Output Voltages of PWM Inverter," *IEEE Trans. vol. 38*, pp.180-186, June 1991.
- [10] Kaku Bin, Miyashita Ichiro, and Sone Storū "Novel Prediction Method of Acoustic Magnetic Noise Emitted by Inverter-fed Induction Motor System," *Proc. PCC, vol. 2*, pp.567-572, Aug. 1997.

저 자 소 개



권 병 훈 (權 炳 勳)

1970년 12월 15일생. 1993년 연세대학교 전기공학과 졸업(학사). 2009년 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 졸업(석사). 현재 현대중공업 전기전자시스템 회전기사업부 근무



진 태 원 (全 泰 園)

1959년 1월 30일생. 1981년 부산대 전기공학과 졸업(학사). 1983년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사), 1995~1996년 버지니아공대 방문교수, 현재 울산대 전기전자정보시스템공학부 교수



이 홍 희 (李 弘 熙)

1957년 10월 15일생. 1980년 서울대 전기공학과 졸업(학사). 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1994~1995년 Texas A&M 방문교수. 현재 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 교수



김 흥 근 (金 興 根)

1956년 4월 24일생, 1980년 서울대 공대 전기공학과 졸업, 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사), 현재 경북대 전자전기공학부 교수