

대용량 유도전동기의 부하 운전시 자기 소음 특성

권 병 훈

(현대중공업 회전기설계부/전기전자시스템사업부 차장)

1. 서론

현재 산업 규격에서 3상 유도전동기의 소음 측정 기준은 무부하 운전 기준이다. 그러나 국제적으로 소음에 대한 규제가 엄격해 지면서, 부하와 전동기를 하나의 단위로 해서 허용 소음값을 규정하는 설비기준을 제시하는 사례가 증가함에 따라, 전동기의 부하 운전시 소음 연구에 대한 필요성도 증가하고 있다.

3상 유도전동기의 고주파 전자기음은 주로 슬롯 주파수와 관련되어있으며, 발생하는 전자기 소음의 크기와 고정자의 고유진동수와 관계등 기본적인 이론은 이미 알려져있다⁽¹⁾⁽⁶⁾. 유효요소법을 적용하여 공극에서의 자속밀도를 구하고 이를 FFT 분석법으로 각 차수별 고조파를 구함으로 공극에서의 전자기력을 보다 정확하게 계산하는 방식이 소개 되었고⁽²⁾⁽³⁾, 정확한 고정자의 고유진동수 및 진동 모드를 찾기 위해 유효요소법으로 구조 해석을 하거나⁽³⁾, 실제 전동기에 임팩트 시험을 하여 그 값을 구하기도 한다⁽⁴⁾. 전자기소음 연구는 부하 운전 실험 및 소음 측정의 어려움 등을 이유로, 주로 소용량 전동기의 무부하 또는 부하 운전 실험 결과로 뒷받침 되어졌다^(2~4). 그러나 소용량 전동기는 기계적인 고유진동수가 전자기력의 주파수보다 일반적으로 상당히 높고, 크기도 작으므로 소음 방사력이 작다. 따라서 무부하 운전시와 부하 운전시의 소음 차이가 크지 않으므로, 대용량 전동기에 이 결과를

적용하기 힘들다⁽⁵⁾.

본 논문에서는 대용량 전동기에 대한 무부하 및 부하운전 실험, 회전자 슬롯 개수 변경 실험등 다양한 조건에서 수행된 실험들을 바탕으로 개발된 부하 운전시 자기소음 크기를 최소화 설계하는 방식을 소개하고 실제 실험 결과와 비교하였다.

2. 본론

2.1 고주파 전자기 소음

전동기의 고주파 전자기소음은 두 가지 영역으로 나눌 수 있다. 첫째는, 일정한 크기를 가지는 무부하 운전중 전자기 소음이며, 둘째는 부하 운전 중 부하전류의 크기에 영향을 받는 전자기 소음이다. 무부하 운전 전자기 소음은 고정자의 전자기장과 회전하는 회전자의 자성체 부분(슬롯부와 치부)과의 상호작용에 의해 발생되며, 그 크기는 부하 전류의 영향을 받지 않고 일정하다. 한편, 부하시 전자기 소음은 부하 전류의 증가와 함께 유기되는 회전자 전류가 자체적인 자계를 형성하게 되면서, 고정자 치부분에 흡인력을 유기시킨다. 이 힘은 고정자 치부에 시간적으로나 공간적으로나 균일하게 분포되지 않고, 고정자 치부와 회전자 치부의 상대적인 위치에 의해서 변하게 된다. 이러한 힘은 고정자 코어를 진동하게 만들며 또한 여러 가지 진동 모드 형태를 만들어 낸다.

2.1.1 반경방향 자기력

자기소음의 직접적인 원인인 반경 방향 자기력은 공극 자속 밀도의 제곱으로 나타낸다.⁽⁶⁾

$$p(x,t) = \frac{b^2(x,t)}{2\mu u_0} = \frac{1}{2\mu u_0} (b_{1p}^2 + \sum_v \sum_m b_v b_m) \quad (1)$$

식 (1)은 자기소음의 원인으로는 공극 자속밀도의 기본파 성분에 의한 것과, 공극 자속밀도 중 고정자와 회전자 고조파 성분에 의한 것이 있음을 보여 준다. 본 연구에서는 고정자 권선 고조파, 고정자 슬롯 고조파, 회전자 권선 고조파, 회전자 슬롯 고조파, 철심 포화 고조파, 공극 편심 고조파 등이 고려 대상이다.

2.1.2 자기력 파동의 모드 형태

반경방향의 자기력의 파동은 여러 가지 형태의 진동 모드 형태를 발생시키며, 이것은 고정자 철심의 변형 모드 형태가 된다. 모드 형태 번호(r)는 자기력 파동의 극수이며, 고정자 철심에 대한 자기력의 작용 방향이기도 하다. 그림 1은 자기력 파동의 모드 형태별 고정자 철심의 변형 형태를 도식화 한 것이다.

자기력 파동의 모드 형태 번호는 고정자 및 회전자의 고조파 극수의 합 또는 차로 만들어 지며, 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$r = vx - mx \quad (2)$$

여기서, vx : 공극 고조파의 고정자 고조파 극수
 mx : 공극 고조파의 회전자 고조파 극수

고정자 철심의 변형량은 이 모드 번호가 증가할수록 급격히 작아지므로, 자기 소음의 발생 가능성도 낮다. 철심 변형량과 모드 번호와의 관계는 식 (3)과 같이 나타 낼 수 있다.

$$Deformation = k \frac{1}{r^4} \quad (3)$$

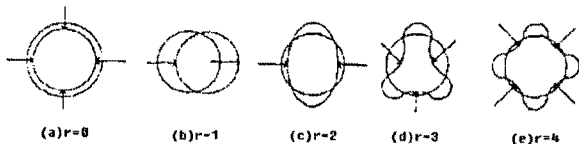


그림 1 자기력 파동의 모드 형태

2.1.3 고정자 철심의 고유 진동수

자기력의 파동 모드 형태에 따라 진동하는 고정자 철심은 그 진동 모드 형태 마다 각각 고유진동수를 가지고 있어서, 특정 진동 모드에서, 자기력의 주파수와 고정자 철심의 고유진동수가 가까이 존재할 경우, 자기소음이 증폭된다. 따라서 고정자 철심의 각 모드 형태별 고유진동수를 계산하고, 이것을 동일 모드 자기력의 주파수와 비교하는 것은 자기 소음의 크기를 예측하는데 중요한 요소이다.

2.2 실험 결과

실험에 사용된 전동기의 사양은 아래와 같다. 하나의 고정자에 2가지 종류의 회전자를(슬롯개수 42개 및 70개) 적용하였다. 무부하 운전 중에는 전압을 변동시키며 소음을 측정하였고, 부하 운전 중에는 부하 전류의 크기 및 전압을 변경하면서 소음을 측정하였다.

2.2.1 실험 전동기의 자기소음 설계 분석

실험에 앞서, 실험 대상의 전동기에 대해 자기 소음 측면에서 설계 분석을 하였다.

그림 2는 회전자 슬롯개수가 42개인 전동기에 대한 공극 자속밀도의 고조파 성분을 분석한 것으로, 고정자 및 회전자 고조파의 크기를 고조파 극수별로 나타내고 있다. 반경방향 자기력의 크기는 고정자 고조파 배열과 회전자 고조파 배열의 곱으로 구할 수 있으며, 그중 모드 번호가 기본파 성분의 극수보다 큰 조합의 결과는 자기소음 발생 가능성이 낮기에 무시하였다. 고정자의 모드 형태별 고유진동수도 각각 계산

표 1 실험용 전동기 사양

용량	420kW	
극수	6극	
전압	6600V	
주파수	50Hz	
고정자 슬롯 개수	54	
회전자 슬롯 개수	42	70
스큐(회전자)	유	

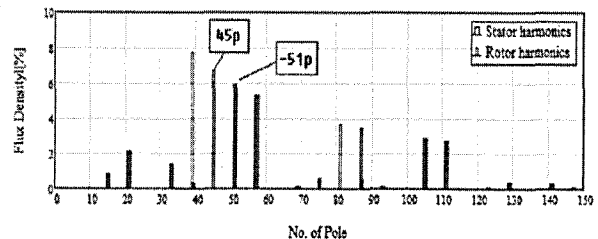


그림 2 공극 자속밀도 고조파 분석 (회전자 슬롯 : 42개)

하여 동일한 모드를 가지는 자기력의 주파수와 비교하였다.

표 2는 고정자 고조파와 회전자 고조파의 조합계산 결과 중, 모드번호(r)가 기본파의 극수(6극) 이하인 것을 도식화 것이다. 자기 소음 발생 가능성이 가장 높은 부분은 -17차 고정자 고조파(-51극=-17차*6/2극)와 +15차 회전자 고조파(45극=15차*6/2극)의 곱으로 발생되는 진동 모드 번호가 6(=|-51극+45극|)인 반경방향의 자기력이며, 그 크기는 192.7kPa이다. 이것은 그림 2에서 보는 바와 같이, 모드 번호 6이하를 가지는 조합에서는 -51극 고정자 고조파와 45극 회전자 고조파의 조합이 가장 큰 공극 자속밀도 고조파 크기를 가지는 조합이기 때문이다. 이 회전하는 자기력 파동의 주파수(n-fr)는 790Hz이며, 이것이 자기소음의 주파수로 나타난다. 공극 편심이 존재할 경우 890Hz에서도 자기소음이 발생한다. 모드 번호 6에 해당하는 고정자 철심의 고유진동수는 3621Hz이므로 자기력 주파수와 공진 가능성은 없는 것

표 2 자기력 분석(회전자 슬롯 : 42개)

v	m	vx	mx	r	n-fr	c-fr	k	p
13	-13	39	-39	0	590	2379	1.066	12.2
-11	-13	-33	-39	6	690	3621	1.038	51.8
13	15	39	45	6	690	3621	1.038	10.6
-17	15	-51	45	6	790	3621	1.050	192.7
25	-27	75	-81	6	1280	3621	1.143	11.0
-29	-27	-87	-81	6	1380	3621	1.170	9.5
31	29	93	87	6	1380	3621	1.170	2.3
-29	29	-87	87	0	1480	2379	1.256	8.8

- (비고) v : 공극 자속밀도의 고정자 고조파 차수
 m : 공극 자속밀도의 회전자 고조파 차수
 vx : 공극 자속밀도의 고정자 고조파 극수
 mx : 공극 자속밀도의 회전자 고조파 극수
 r : 진동 모드(ishp-rhp)
 n-fr : 소음 주파수, Hz
 c-fr : 고정자 코어 주파수, Hz
 k : 증폭계수, pu
 p : 반경방향 자기 흡입력, kPa

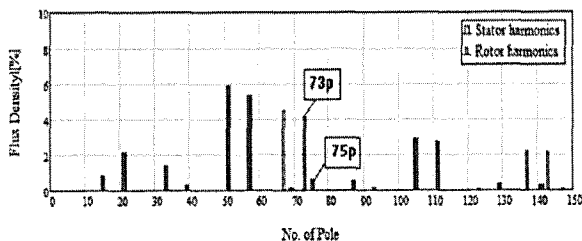


그림 3 공극 자속밀도 고조파 분석(회전자 슬롯:70개)

로 분석되었다.

그림 3은 회전자 슬롯개수가 70개인 전동기에 대한 공극 자속밀도의 고조파 성분을 분석한 것이다.

그림 3에서 보는 바와 같이, 모드 번호 6이하의 값을 가지는 고정자 및 회전자 조합 중에 가장 큰 고조파 크기를 가지는 것은 75극 고정자 고조파 및 73극 회전자 고조파 조합이다. 그러나 회전자 슬롯 42개 전동기를 분석한 그림 2에서와는 달리, 해당 고정자 고조파의 크기가 매우 작은 것을 알 수 있으며, 이것은 자기력의 대폭적인 감소로 나타 내질 것으로 예상된다.

표 3은 회전자 슬롯 70개 전동기에 대한 자기력을 분석한 결과 중 일부이다.

표 3에서 가장 큰 자기력을 가지는 고조파 극수는 75극 고정자 고조파 및 73극 회전자 고조파로써, 모드 번호는 2이고, 자기력의 주파수, 즉 자기소음 주파수는 1151Hz이며, 공극 편심 고려시 1251Hz에서도 발생가능성이 있다. 회전자 슬롯 개수 70개인 전동기 최대 자기력의 크기가 10.1kPa로써 회전자 슬롯 개수 42개인 전동기의 최대 자기력의 크기인 192.7kPa보다 매우 작으므로, 회전자 슬롯개수 70개인 전동기의 자기소음 크기는 회전자 슬롯개수 42개 전동기에 비해 매우 작을 것으로 예상된다.

반면, -69극 고정자 고조파 및 73극 회전자 고조파가 발생시키는 자기력은 그 크기는 작지만, 자기력 파동의 주파수(1251Hz, 공극 편심 고려 시 1351Hz에서도 발생)와 고정자 철심의 고유진동수(1661Hz)가 가까이 있어, 소음이 증폭되어 발생할 가능성이 있다.

2.2.2 42개 슬롯 회전자 실험 결과

무부하 운전 실험에서는 정격전압 및 감전압 운전 소음을 측정하였고, 부하 운전 실험에서는 부하전류의 크기별로 소음이 측정되었다. 소음 측정은 1/3 옥타브 밴드 중심 주파수 값을 측정하였다.

그림 4는 회전자 슬롯 42개 적용한 전동기의 무부하 운전 중 소음 측정값을 도식화 한 것이다. 정격전압 인가시에는 중심주파수 800Hz와 1000Hz에서 가장 큰 값이 측정되었으

표 3 자기력 분석(회전자 슬롯 : 70개)

v	m	vx	mx	r	n-fr	c-fr	k	p
-22	-22.3	-69	-67	2	1151	324	1.086	3.3
25	24.3	75	73	2	1151	324	1.086	10.1
-23	24.3	-69	73	4	1251	1661	2.311	3.0
-47	-45.7	-141	-137	4	2302	1661	2.086	2.9
49	47.7	147	143	4	2302	1661	2.086	0.7
-47	47.7	-141	143	2	2402	324	1.019	2.7

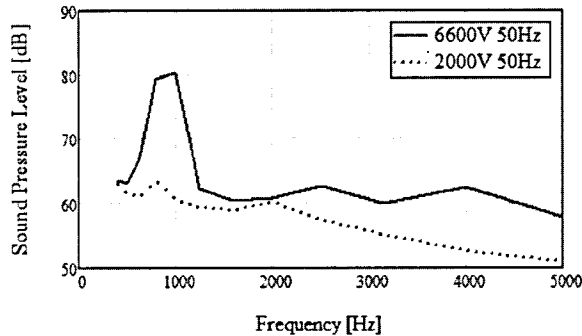


그림 4 무부하 운전 소음 (회전자 슬롯 : 42개)

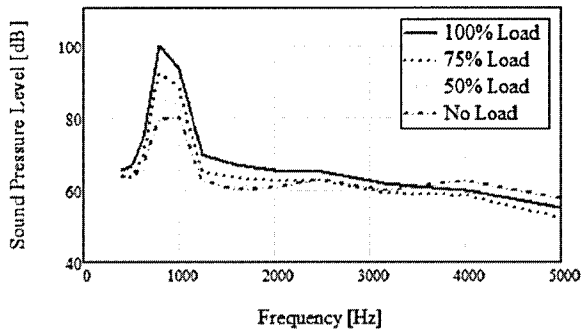


그림 5 부하 운전 소음 (회전자 슬롯 : 42개)

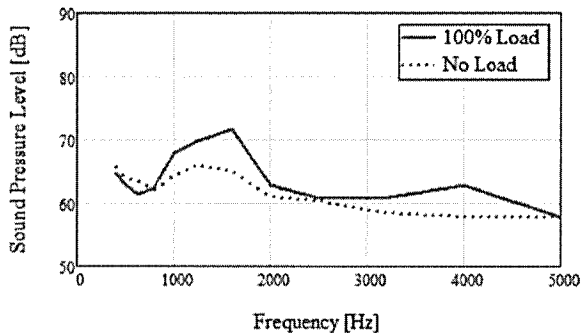


그림 6 부하 운전 소음 (회전자 슬롯 : 70개)

며, 전압을 감소시켰을 경우에 자기소음이 현저히 감소하는 것을 알 수 있다. 회전자에 스쿠가 적용되었으나, 회전자 슬롯 고조파에 의한 자기소음이 완전히 제거되지는 않았다.

그림 5는 회전자 슬롯 42개 적용한 전동기의 부하 운전중 소음 측정값을 도식화 한 것이다. 부하 운전시에는 중심주파수 800Hz 및 1000Hz의 소음이 무부하 운전시 대비 약 20dB 증가 하였다. 이것은 앞서 설계 분석에서 예상한 바와 같이, 790Hz 성분과 890Hz 성분의 소음이 증가한 결과로 보인다. 부하 운전중 부하 전류의 크기를 변화시키면, 자기소

음은 부하 전류의 크기에 비례하여 증감하는 것을 볼 수 있다. 또한, 부하 실험 중 동일한 전 부하 전류 공급을 유지하면서 전압을 감소시켰으나, 소음은 거의 변하지 않았다.

2.2.3 70개 슬롯 회전자 실험 결과

그림 6은 동일한 고정자에 회전자 슬롯 70개 적용한 전동기의 무부하 및 부하 운전중 소음 측정값을 도식화 한 것이다.

주요 자기소음 주파수는 중심 주파수 1000Hz, 1250Hz, 1600Hz에서 가장 크게 나타났다. 중심주파수 1000Hz 및 1250Hz 성분은 1151Hz 및 1251Hz 성분의 자기력에 의한 소음으로 판단되며, 측정된 중심주파수 1600Hz 성분은 1251Hz 및 1351Hz 자기력 파동이 고정자 철심의 고유진동수 성분과 가까이 있어 다소 증폭되어 나타난 것으로 판단된다. 무부하 소음 대비 부하 소음의 증가는 약 7dB정도로서 42개 슬롯 회전자 보다 대폭 감소하였다.

3. 결론

3상 농형 유도전동기의 운전 중 자기소음이 증가하는 원인은 부하 운전 시 회전자 권선에 유기된 전류의 고조파 성분이 추가적으로 고정자 치부분에 시간 및 공간적으로 불균일한 자기력을 발생시키기 때문이다. 이러한 자기소음은 적절한 슬롯조합 선정, 권선 피치의 선택, 철심의 치수 조정 등으로 제어할 수 있다. 자기 소음을 설계 단계에서 제어하기 위해 공극 고조파 조합별로 발생하는 공극 자기력 및 진동 모드를 계산하고, 고정자의 진동 모드별 고유 진동수를 계산하여 상호 비교함으로써, 자기소음을 감소시킬 수 있는 적절한 설계변수를 도출해 내는 방안을 제시하였다. 실험 결과로 제시된 자기소음 계산법으로 예측된 바와 같이 부하전류의 크기에 민감하게 소음이 증가하는 슬롯 조합과 그렇지 않는 슬롯 조합이 있음을 확인하였다. ■

참고 문헌

- [1] P.L.Alger, "The magnetic noise of polyphase induction motor", AIEE Trans. on vol. 73, pp. 118-124, April 1954.
- [2] T. Kobayash, "Effects of slot combination on acoustic noise from induction motors", IEEE Trans. on magnetics, vol. 33, no. 2, pp. 2101-2104, March 1997.
- [3] F. Ishibashi, "Small induction motor noise calculation", IEEE Trans. on energy conversion, vol. 18, no. 3, pp. 357-361, Sept. 2003.

- [4] K. Tsuboi, "Causes and characteristics of the electromagnetic vibration of a squirrel cage induction motor under load", Electrical Engineering in Japan, vol. 120, no. 4, pp. 81-89, 1997.
- [5] Stephen, D.D, "Discussion on acoustic noise and vibration of rotating electrical machines", Proc IEE, vol. 117, no. 1, pp. 127-129, 1970.
- [6] P.L.Timar, A.Fazekas, J.Kiss, A.Miklos, S.J.Yang, Noise and Vibration of Electrical Machines, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1989.

〈 필 자 소 개 〉



권병훈(權炳勳)

1993년 2월 연세대 전기공학과 졸업. 2009년 2월 울산대 전기전자정보시스템공학과 졸업(석사). 1996년 8월~현재 현대중공업 회전기설계부/전기전자시스템사업부 차장.