

전동기의 진동 및 소음원에 대한 실험적 고찰

⁰조 준제*, 최 연선**

Experimental Investigations on the Noise and Vibration Sources of Electrical Motor

(Jun-Jea Cho, Yeon-Sun Choi)

1. 서론

기계의 진동·소음은 환경요인과 함께, 기계의 정밀도 향상 및 고장진단과 관련, 기계공학의 중요 분야이다. 특히, 전동기(motor)는 많은 기계의 동력원으로서 진동·소음의 1차적 원인을 제공하고 있어, 자체적으로도 저감되어야 함은 물론이며, 감속기등 전동기와 연결되어 사용되는 기계의 진동·소음 발생의 직접적인 원인을 제공하므로 전동기의 진동, 소음 특성은 보다 명확히 밝혀져야 한다.

전동기는 내부에 회전자와 고정자가 있는 회전 기계이면서, 전자기력에 의해 구동되는 전기기계이다. 따라서 축정렬불량(misalignment), 불평형(unbalance)등 기계적 요인과 함께, 고정자와 회전자 사이에 존재하는 공극(air-gap)에서 발생하는 전자기적 요인을 해석함으로써 전동기의 진동·소음의 원인을 밝혀볼 수 있다.^(1,2,3)

각 전동기에 따라 진동·소음의 크기 및 주파수 성분은 달라질 수 밖에 없으며, 특정 부위에 이상이 있는 경우, 전동기의 진동, 소음특성은 크게 달라지므로, 전동기의 진동, 소음에 관한 연구는 실험적 현상을 기초로 해야한다.⁽⁴⁾ 이에 본 연구에서는 전동기의 진동·소음을 규명하기 위해, 부하장치를 가진 전동기 구동 실험장치를 구성하여, 전동기 구동에 따른 진동·소음 신호를 획득, 분석함으로써 전동기에서 발생하는 진동·소음의 원인을 추정하였다.

2. 전동기의 진동

전동기에서 나타나는 진동의 종류는 Fig. 1과 같이 크게 전자기적 요인과 기계적 요인에 의한 진동으로 분류할 수 있다.

2.1 전자기적 요인에 의한 진동

전동기에서의 전자기적 특성은 진동·소음의 주요 요인으로 작용한다. 고정자와 회전자 사이의 간격 즉, 공극의 변화에 따라 고정자와 회전자 사이에 작용하는 힘은 회전자의 회전각에 따라 변화가 발생한다. 이러한 힘의 불평형은 회전자에 편심을 유발시키고, 전동기의 프레임에 전달되어 진동으로 나타나게 된다. 공극내의 불평형 힘에 영향을 주는 성분은 자속이다.

자속에 영향을 주는 인자는 전류에 의한 기자력(magneto motive force)과 자속이 통과하기 쉬운 정도를 나타내는 퍼미언스(permeance)가 있고, 이 두 인자의 곱에 의해 자속이 형성된다. 이렇게 형성된 자속의 제곱에 비례하여 전자기력이 생기게 된다.

이 전자기력(electromagnetic force)이 회전자에 편심을 유발시켜 프레임의 진동으로 나타나게 된다. 이러한 프레임 진동의 주파수 성분은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$f_f = \left\{ (n_1 R \pm n_2) \frac{(1-s)}{p} \pm 2n_3 \pm n_4 \right\} f_1 \quad (1)$$

여기서, R : 회전자 슬롯수, p : 극수, s : 슬립비
 n_1, n_2, n_3, n_4 : 임의의 정수(0, 1, 2, ...)

* 성균관대학교 대학원

** 성균관대학교 기계설계학과

2.2 기계적 요인에 의한 진동

기계적 요인에 의한 진동은 전동기를 이루고 있는 각각의 기계적 요소에 의한 것이다. 베어링, 축정렬 불량, 기계적 헐거위짐(mechanical looseness), 불균형 등이 주요한 기계적 진동요인이라 볼 수 있다.

베어링은 외륜, 내륜, 볼, 케이지(cage)등에 결함이 발생하였을 경우, 진동주파수 성분이 발생한다.

불균형은 축정렬불량과 마모와 헐거위짐 등에 의해 발생하며, 이러한 불균형에 의해 기계계에는 식 (2)와 같은 회전주파수의 배수되는 성분으로 주파수가 나타나게 된다.

$$f_u = \frac{kN}{60} \quad (2)$$

여기서, $\begin{cases} k : \text{정수} (1, 2, 3, \dots) \\ N : \text{rpm} \end{cases}$

3. 전동기의 소음

전동기에서의 소음문제는 전자기적 요인에 의한 소음, 기계적 진동에 기인한 소음과 공기역학적 소음으로 나눌 수 있다.

전자기적 소음은 회전자와 고정자 사이에서 발생하는 주기적 가진력이 고정자 프레임(frame), 철심, 그 밖의 기계구조물에 영향을 주어 발생한다. 특히 인버터를 거쳐 전원이 공급되는 유도전동기는 인버터로부터 고주파 성분이 유도되어 인버터를 거치지 않은 전동기에 비해 소음이 증가하게 된다.

기계적 소음은 기계적 진동성분에 의해서 발생하게 된다. 따라서, 소음원과 진동원이 같게 된다.

공기역학적 소음은 냉각팬에 의한 소음과 통풍 덕트(duct)에 의한 소음으로 크게 나눌 수 있다. 냉각팬에 의한 소음은 팬의 날개수와 회전수에 따라 결정되고, 그 배수성분이 나타나게 된다. 식 (3)은 팬에 의해 나타나게 되는 소음의 주파수 성분을 나타낸 것이다.

$$f_f = k \cdot \frac{N_d N}{60} \quad (3)$$

여기서, $\begin{cases} k : \text{정수} (0, 1, 2, \dots) \\ N_d : \text{날개갯수} \\ N : \text{rpm} \end{cases}$

Duct에 의한 소음은 전동기의 통풍 덕트에 따라 발생하며, 비교적 고주파 성분이 나타난다. 식 (4)는 통풍덕트에 의해 나타나는 소음성분을 나타낸 것이다.

$$f_d = k \cdot \frac{Z_d N}{60} \quad (4)$$

여기서, $\begin{cases} k : \text{정수} (0, 1, 2, \dots) \\ Z_d : \text{고정자 또는 회전자} \text{의 간격편수} \\ N : \text{rpm} \end{cases}$

4. 전동기 구동실험

본 실험에서는 0.5 Hp의 직류전동기와 1 Hp의 유도전동기를 사용하여 진동·소음을 측정하였고, 그 특성을 분석하였다. 본 실험에서 사용된 전동기와 인버터의 사양은 각각 Table 1, 2와 같다.

4.1 실험장치 및 방법

전동기의 진동, 소음 특성을 알아보기 위하여 Fig. 2와 같은 실험장치를 설계·제작하여 회전자에 따른 진동·소음을 측정하였다. 인버터에 의해 구동되는 유도전동기를 구동부로 하여 커플링(coupling)을 이용하여 직류전동기와 연결시켰다.

직류전동기는 타여자 방식이므로 DC-Motor Controller를 이용하여 100V 전원을 계자에 공급하였다. 직류전동기가 회전하게 되면 직류 발전기의 역할을 하게 된다. 유도전동기와 직류전동기는 각각 하나의 철판에 고정시키고, 철판은 진동방지용 스프링을 써서 외부의 진동전달을 차단시켰다. 스프링의 정적처짐량은 0.83 cm로서 차단주파수는 5.5 Hz로 계산되었다. 본 실험은 회전성분 관련 저주파 성분도 있으나 전자기적 성분, 공진성분도 상당히 크므로 5.5 Hz정도면 진동절연이 된 것으로 볼 수 있다. 유도전동기는 부하, 무부하 상태에서, 직류전동기는 무부하 상태에서 실험하였다. 정속상태에서의 응답과 가감속(0~1800 rpm) 상태에서의 응답을 얻었다. 진동·소음을 측정하기 위해 가속도계 (accelerometer)와 마이크로폰(microphone)을 사용하고, 전류의 특성을 확인하기 위해 홀소자(Hall probe)를 사용하였다. 회전수는 광타입 근접 스위치를 이용하여 측정하였다. Fig. 2와 같이 센서를 설치하여, 신호를 획득하고, 그 신호는 Tape Recorder에 저장하였다. 분석시, Tape Recorder를 재생하여 그 신호를 AD-Converter를 거쳐 컴퓨터

에 Digital data로 저장하고 MATLAB을 이용하여 데이터를 분석하거나, FFT Analyzer를 이용하여 직접 신호를 분석하였다.

(1) 부하 장치

유도전동기에 직류전동기를 직결시켜 직류전동기가 발전기(generator)로 작동하게 하고 발전된 전기는 100W 전구 8개를 병렬로 연결한 부하장치에 연결하여, 유도전동기에 부하를 주었다. Table 3은 각 경우의 부하토크를 나타낸 것이다. 참고로, 부하 1은 전구를 4개, 부하 2는 전구를 8개 켜올 때이다.

(2) 고유 진동수

Impact Hammer Test를 통해 얻어진 결과를 SMS를 이용하여 고유진동수를 구하여 공진에 의한 영향을 조사하였다. 고유진동수는 Table 4와 같다.

(3) 공명주파수

전동기의 공명에 의한 소음을 알아보기 위해, Fig. 3과 같이 고정자와 회전자의 관계를 동심 2중 원통으로 보면, 원통내의 공명주파수를 식 (5)에 의해 계산할 수 있다. 예측 공명주파수 성분은 Table 5와 같다.⁽⁴⁾

$$f_{m,n,s} = \frac{C}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a-b}\right)^2 + \left(\frac{2n}{a+b}\right)^2 + \left(\frac{S\pi}{l}\right)^2} \quad (5)$$

여기서, C : 음속 (334 m/s)

m : 반경방향의 Mode (1, 2, . . .)

n : 원주방향의 Mode (1, 2, . . .)

S : 절선수 (1, 2, . . .)

4.2 실험결과 및 분석

4.2.1 유도전동기

Fig. 4 ~ Fig. 6은 전동기 각각의 위치에 가속도계를 부착한 후의 실험결과이다. 진동레벨의 크기는 A₁(전동기 앞), A₂(전동기 앞 상단), A₄(전동기 몸체 중간)의 순서로 나타났다. 그리고, 부하와 속도의 증가에 따라 진동레벨이 커지는 것을 볼 수 있다. Fig. 7은 마이크로폰 신호로써 속도의 증가에 따라 소음레벨이 증가하는 것을 볼 수 있고, 부하 증가에 대해서는 그다지 큰 영향이 없는 것을 볼 수 있다. Fig. 8은 고주파 영역에서의 진동 성분과 인버터를 거친 전기적 가진성분을 보기 위한 그림으로서, 전원선에 의한 주파수성분(1300,

2600, 3900, 5200 Hz)은 홀소자에 의해 확인되었고, 각각의 전원주파수 성분은 가속도계 신호에서 큰 가진성분으로 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 1782, 2873 Hz에서 비교적 높은 크기의 주파수 성분은 공진에 의한 것이고, 그 외에 상대적으로 작게 나타나는 성분(292, 515, 821 Hz)은 회전자 편심에 의한 프레임 가진성분이다. Fig. 9는 마이크로폰 신호로써 50, 200, 300 Hz의 팬 성분과 2600, 5000 Hz 부근에 공명주파수 성분을 볼 수 있다. 이 성분은 전기적 가진성분과 일치하여 큰 소음레벨을 갖게 된다. 또한 전체적으로 속도증가에 따라 소음레벨이 증가하는 것을 볼 수 있다. Fig. 10, 11은 신호의 경향을 보기 위한 3차원 Waterfall Diagram이다. Fig. 10에서는 회전주파수와 그 배수 성분을 볼 수 있다. Fig. 11에서는 전기적 가진 성분과 그 Sideband가 나타나고, 또한 200~300 Hz 부근에서 프레임 가진성분을 볼 수 있다.

주파수 분석 결과, 인버터에 의해 구동되는 유도전동기는, 직접 구동되는 전동기에 비해 전기적 고주파 성분을 많이 포함한다. 이러한 전기적 가진성분이 전동기의 고유진동수와 일치해서 큰 레벨의 주파수 성분이 나타났다. 저주파 영역에서 회전주파수와 입력전원주파수 성분이 확인되었고, 베어링에 의해 예측된 주파수성분(Table 6)은 발견되지 않은 것으로 보아 베어링에는 문제가 없는 것으로 판단된다. 편심에 의해 나타나는 예측 프레임가진 성분은 식 (1)을 이용하여 Table 7로 계산되었고, 실험을 통해 확인할 수 있었다. 또한 가속도계의 측정위치, 속도, 부하에 따라 그 진동과 소음 레벨에 차이가 생긴다는 사실도 확인할 수 있었다.

4.2.2 직류전동기

Fig. 12에서 보면 A₂의 위치에서 가속도계 신호의 진동레벨이 가장 큼을 볼 수 있다. Fig. 13은 정속(300 rpm)에서의 가속도계와 마이크로폰 신호이다. 371, 1032, 3376, 4500 Hz의 비교적 큰 성분은 공진에 의한 성분이고, 1500~3000 Hz에서는 전원주파수의 배수성분들이 진동에 많은 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 480, 1000, 2000 Hz대에서 나타나는 성분은 편심에 의한 프레임가진 성분들이다. 전원에 의한 가진성분이 소음의 형태로 전달되어 마이크로폰 신호에서도 나타남을 볼 수 있다. 120, 430 Hz 등의 성분은 팬에 의한 소음성분이고, 900, 2300 Hz는 공명에 의한 성분이다.

Fig. 14, 15는 신호 경향을 보기 위한 3차원 Waterfall Diagram이다. Fig. 14는 속도 증가에 따른 회전주파수와 그 배수성분을 볼 수 있다. Fig. 15는 400~800 Hz 부근에서 편심에 의한 프레임 가진성분과 전원주파수 성분을 볼 수 있다.

주파수 분석 결과, DC-Motor controller에 의해 구동되는 직류전동기는 진동신호에 전원주파수(60 Hz)와 그 배수성분이 다수 포함되었다. 3번 위치의 가속도계에서 획득한 신호는 거의 60 Hz의 배수되는 전기적 성분으로 이루어져 있다. 그 외에 편심에 의한 프레임 가진성분도 확인할 수 있었다. 예측 프레임 가진성분은 Table 8과 같다. 속도증가에 따라 진동과 소음레벨에 차이가 있었으며, 신호획득 위치에 따라서도 그 신호레벨에 차이가 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 직류전동기와 유도전동기를 부하 혹은 무부하 상태에서 정속, 가감속 실험을 하였다. 실험을 통해 얻어진 결과와 이론적으로 예측한 결과와의 비교·분석을 통해 다음과 같은 결론은 얻을 수 있었다.

(1) 전동기에서 발생하는 진동은 주로 기계적 성분에 의한 것이고, 전자기적 성분은 기계적 요인을 배가시키는 역할을 하게 된다. 전자기적 성분이 전동기의 고유진동수와 일치하거나, 내부 자속밀도의 불균형에 의해 회전자에 편심을 유발시킬때, 전동기에는 큰 레벨의 진동이 발생하게 된다.

(2) 소음신호는 팬과 공명에 많은 영향을 받고 있으므로, 소음을 줄이기 위해 내부구조에 대한 재설계가 필요하다.

(3) 전동기는 속도, 부하증가에 따라 진동레벨이 커지나, 특히 부하증가에 민감하다.

(4) 베어링 지지부의 진동은 다른 위치보다 진동레벨이 크므로 전동기의 이상 진동을 측정하기에 좋은 위치이다.

앞으로 이러한 실험결과를 축적함으로써 주파수 성분만으로도 전동기의 고장을 진단할 수 있는 토대를 세울 수 있을 것이다.

6. 참고문헌

1. H. Bate, "Vibration Diagnostics for industrial

Electric Motor Drives", B. Sc., M. Sc., Dip. UCL. Bruel & Kjaer, pp. 148-157.

2. J. R. Cameron, "Vibration and Current Monitoring for Detecting Airgap eccentricity in large Induction Motors", IEE Proceedings, Vol. 133, Pt. B, No. 3, May 1986.
3. S. P. Verma, "Measurement Techniques for Vibration and Acoustic Noise of Electrical Machines", IEE 'Electrical Machines and Drives' Conference Pub. No. 376, Sixth International Conference on 8-10, Sep. 1993.
4. 이선희, "The study of the cause on vibration and noise of squirrel-cage induction motor", 韓國産業技術院, 機械振動 및 騒音對策講習會, pp. 319-347, 1989.

Table 1. Specifications of Motor

	직류 전동기	3상유도 전동기
출력	0.5 HP(0.4 kw)	1 HP(0.75 kw)
최대회전수	1800 rpm	1656 rpm
전압	90 V	220/380 V
전류	6 A	3.6/2.1 A
공급주파수	60 Hz	60 Hz
베어링(부하측)	# 6204 ZZ	# 6203 ZZ
베어링(반부하측)	# 6203 ZZ	# 6204 ZZ

Table 2. Specifications of Inverter

Model	SV 015 GS-2	정격출력 주파수	360 Hz
최대 출력	1.5 kw	출력주파수	0.5~360 Hz
정격 용량	3 kVA	제어 방식	PWM 제어
정격 출력 전압	200~230 V	정격 출력 전류	3 A

Table 3. Load Torques for each Velocity

속도(rpm)	부하 1 토크(N·m)	부하 2 토크(N·m)
300	0.25	0.4
1200	1.15	2.0
1800	1.71	3.0

Table 4. Natural Frequencies

Mode	유도전동기	직류전동기
1	1370	
2	1810	248
3	2930	702
4	3220	1346
5	3390	2177
6	4200	3193
7	4664	4396

Table 5. Predicted Resonance Frequencies

n	m	S	공명주파수 (유도, Hz)	n	m	S	공명주파수 (직류, Hz)
1	1	1	3122	0	1	0	958
1	1	2	3805	0	1	1	1282
1	1	3	4730	0	2	2	2565
3	1	1	3378	0	3	1	2999
3	1	2	4018	0	3	2	3342

Table 6. Predicted Frequencies of Defected Bearing

발생 원인	주파수(Hz)
Outer race defect	92
Inner race defect	148
Ball defect	119
Cage defect	11

Table 7. Predicted Frequencies of Frame Vibration of Induction Motor

n_{rl}	n_a	n_{sa}	n_w	이론치(Hz)
0	3	0	4	285
0	1	0	5	315
0	2	4	0	510
0	3	4	4	765
1	0	0	3	839
1	4	1	1	898
1	4	3	1	1139
3	3	1	2	2261
3	3	5	4	2861
4	2	3	5	3325

Table 8. Predicted Frequencies of Frame Vibration of DC-Motor

n_{rl}	n_a	n_{sa}	n_w	이론치(Hz)
0	1	1	4	375
0	0	3	2	480
0	0	4	2	600
0	2	4	3	690
0	3	1	0	1245
2	0	0	1	2220
2	3	2	2	2565

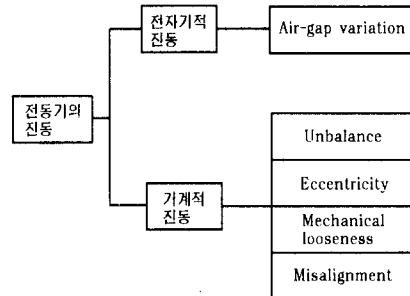


Fig. 1 Vibrations of Motor

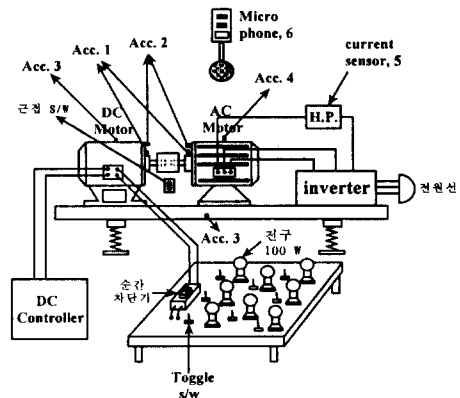


Fig. 2 Experimental Apparatus of Motor Drive System

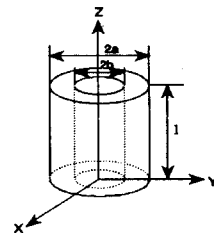


Fig. 3 Double Concentric Cylinder

