

방사음을 이용한 모터 결함 판정용 실시간 전문가 시스템 개발

°경용수*, 김상명**, 왕세명**

Development of a Real-time Fault Diagnosis System for Electric Motors using radiated sound signals

Yong-Soo Kyong, Sang-Myeong Kim, and Se-Myung Wang

Abstract

In order to distinguish fault electric motors automatically in real time, an intelligent diagnosis technique may be required. This paper presents an automatic fault detection system for electric motors by using their acoustic noises. Time signals of each candidate motor were measured in an anechoic chamber for further analysis. Spectral analysis was first carried out and they showed that two typical types of fault motors could be successfully distinguished in the frequency domain; bearing faults and scratches. Unlike the trend of normal motors that shows only a single dominant peak at around 2000 Hz, several peaks are bunched together in bearing fault motors. On the other hand, large frequency noises at around 6500 Hz are newly arisen in scratchy fault motors. However, the processing time for spectral analysis was rather long for a real time application in production lines. Thus, a number of band-pass filters were used in the time domain instead for a real time application. Before applying filters, the bands of filters were set from the information of spectral analysis. By applying a set of band-pass filters, the RMS values of each filtered signal were calculated, and thus the normal and damaged motors could be successfully distinguished.

1. 서론

현재 전기회전기계는 산업플랜트, 가정용 가전 제품, 놀이기구에 이르기까지 그 목적이 다양하다. 목적만큼이나 다양한 종류의 회전기계들 중에서도 유도전동기가 많이 쓰이는데, 유도전동기는 간단한 구조를 가지고 있기 때문에 보수도 용이할 뿐만 아니라 가격도 저렴하다는 장점을 가지고 있다. 그러나, 전동기가 고장을 일으켰을 때 나타날 피해 역시 다양할 것으로 예상되며, 고장의 정도에 따라 선 전체시스템에 심각한 영향을 줄 수도 있을 것이다. 따라서 전동기를 사용하고 있는 시스템의

안정성을 보장하기 위해서는, 전동기에서 발견될 가능성이 있는 결함을 제품화되기 이전에 예측하여 판별해 내는 것이 중요하다고 할 수 있다.

유도전동기에 결함이 발생하면 전동기를 구성하는 요소들이 영향을 받고, 진동이 발생할 가능성이 생기며, 그 진동은 특징적인 소음을 만들어내는 원인이 될 수 있다 [1,2].

유도전동기 진동소음의 원인은 크게 세 가지로 구분할 수 있다. 전자기적인 원인, 기계적인 원인, 그리고 공기 역학적인 원인이다 [3]. 물론, 각 원인들은 개별적으로 영향을 미치기도 하겠지만 서로 영향을 줄 수도 있을 것이다. 이에 몇몇 공학자들은 전자기적 가진력 성분이 시스템의 고유진동수와 공진을 일으키면 소음이 발생할 수 있다는 것을 실험적으로 확인한바 있다 [4-8].

* 정희원, 광주과학기술원 기전공학과 석사과정

** 정희원, 광주과학기술원 기전공학과 교수

결함을 감시하고 판별하는 방법들은 여러 가지가 있는데 [9], 본 논문에서는 그 방법 중 하나로서 전동기의 소음신호를 측정하고 후 해석하는 방법을 이용하였다. 우선, 특정한 위치에서 마이크로폰을 이용하여 음압의 시간데이터를 확보한다. 그 데이터를 주파수 분석 기법을 이용하여 분석한 후, 특정결함에 따른 신호의 특성들을 파악하였다. 그 다음, 모터의 특성에 부합하는 결함판별기준을 제시하고 이를 검증하였다. 또한, 이를 시간영역에서 구현함으로써 실시간 결함판별 시스템의 개발가능성을 살펴보았다.

2. Data base 확보

본 연구에서는 마이크로폰을 이용하여 모터에서 발생하는 소음의 음압 데이터를 측정, 저장하는 동시에 홀 센서의 데이터도 저장하여 이용한다. 대상모터는 (주)대우모터에서 에어컨 송풍기용으로 생산하는 4극 단상유도 모터로서 1770~1780 rpm으로 회전한다. 실험은 결함이 없는(normal) 모터 5개, 베어링 결함이 있는(bearing) 모터 6개, 그리고 스치는 음이 나는(scratchy) 모터 3개에 대하여 무향실에서 수행하였다.



Fig. 1 Experimental Set-up

모터는 고무줄을 이용, 자유조건(free-free)으로 설치하였고, 마이크로폰은 생산라인에서의 판별관의 귀의 위치와 비슷하게 모터 우측 캡 방향으로 2.5cm 떨어진 곳에 설치하였다. 실험초기에는 마이크로폰 두 개를 사용하였으나 Mic 2로부터 얻어낸 신호에서는 특이할만한 점을 발견할 수 없었다. 따

라서, 마이크로폰은 한 개만 사용하였다. 또한, 본 실험에서는 B&K 마이크로폰 4134 type과 일반 AD 변환기를 이용하여, 3초 동안 64kHz의 샘플링 주파수로 시간 데이터를 받아냈다.

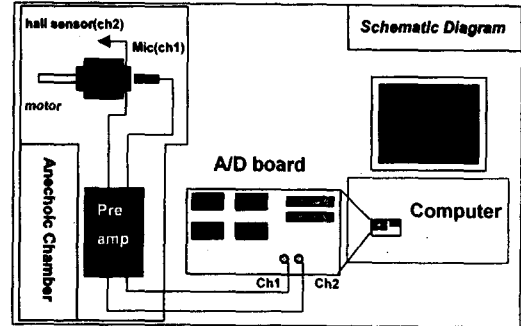


Fig. 2 Experimental Set-up (Schematic)

3. 주파수 영역 해석

3.1 파워 스펙트럼 해석

본 연구에서는 모터의 결함여부를 판단하는 기준을 설정하기 위하여 가장 기본적인 신호처리 기법인 파워스펙트럼만을 해석해보았다 [10,11]. 본 연구에서는 일반적으로 널리 쓰이는 추정방법인 Welch's method를 이용하였다.

실험에서는 64kHz로 샘플링하였으나 pre-test 결과 대부분의 주파수 성분이 10kHz 미만에 나타나는 것을 확인하였고, 따라서 16kHz, 즉, 1/4로 데이터를 다시 샘플링하여 신호처리를 수행하였다. Fig. 3에 대표적인 정상모터, 베어링결함이 있는 모터, 그리고 스치는 음이 나는 모터의 파워스펙트럼을 나타내었다. (단, 중심주파수와 크기의 비율로 평가를 하기 위해 파워스펙트럼은 중심주파수의 값을 1로 정규화하여 나타내었다. 그리고 중심주파수성분은 그림에 표시된 영역 중 첫 번째 영역에 존재한다.)

Fig. 3에서 쉽게 볼 수 있듯이 베어링 결함이 있는 모터의 경우는 2kHz 부근에 정상모터와 비교 시, 더 많은 주파수성분이 군집해 있음을 볼 수 있었다. 그리고 스치는 음이 나는 모터(scratchy motor)에서는 7kHz 부근에서 주파수 성분이 많이 나타났다.

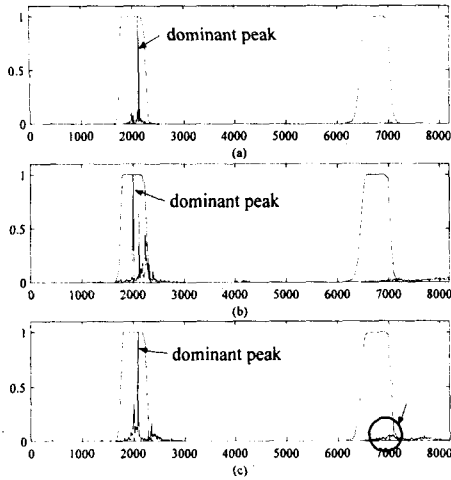


Fig. 3 Power Spectrums of motors
 (a) normal motor case
 (b) bearing motor case
 (c) scratchy motor case

3.2 판별기준 설정 및 적용

각각 모터의 지배적인 주파수 성분의 크기를 기준으로 하면, 베어링 결함이 있는 모터는 중심주파수 주변 대역에서 주변 주파수들의 크기를 비교하면 구별이 가능하다. 또한, 스치는 음이 나는 모터의 경우, 고주파 영역에서 구별이 가능하다. 이를 간단하게 표현하면 다음과 같다.

$$\left(\frac{S_2}{S_1}\right)_{\text{베어링 결함이 있는 모터}} \gg \left(\frac{S_2}{S_1}\right)_{\text{정상 모터}} \quad (1)$$

$$\left(\frac{S_3}{S_1}\right)_{\text{스치는 음이 나는 모터}} \gg \left(\frac{S_3}{S_1}\right)_{\text{정상 모터}} \quad (2)$$

단,

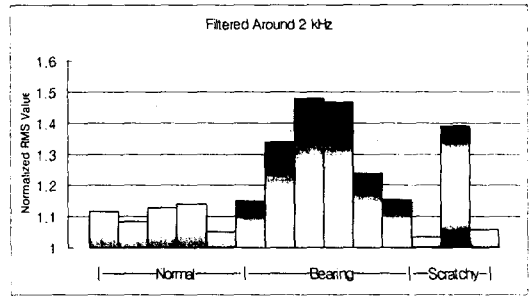
S_1 : 중심 주파수 성분

S_2 : 2kHz 주변 성분

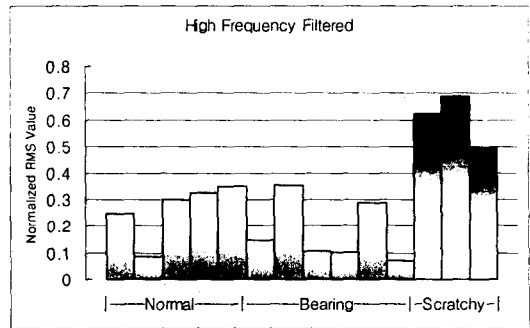
S_3 : 7kHz 근처의 고주파 성분

앞에서 설정한 기준에 따라서 모터의 소음 신호를 분석한 후, 각각의 모터에 대해서 voltage의 RMS값을 구해 Fig. 4에 나타내었다. 이때, 실험

시의 측정거리(2.5 cm) 오차가 소음신호의 RMS값에 직접 영향을 미치므로 이를 배제하기 위해 각 신호에 대하여 정규화(normalization)를 수행해야 한다. 또한 정규화를 수행하기 위해 각 소음의 지배적인 주파수성분만을 필터링한 신호(S_1)를 기준으로 삼는다.



(a) Filtered around 2 kHz (S_2/S_1)



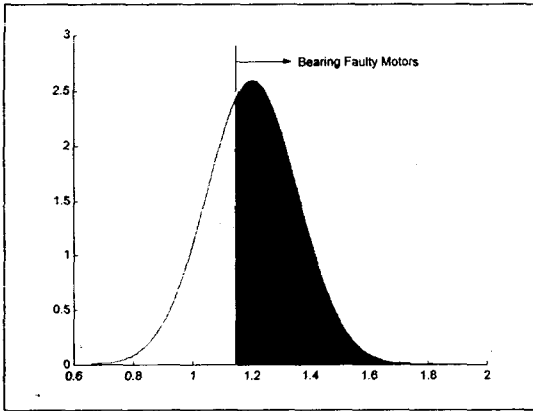
(b) High frequency filtered (S_3/S_1)

Fig. 4 Normalized RMS values

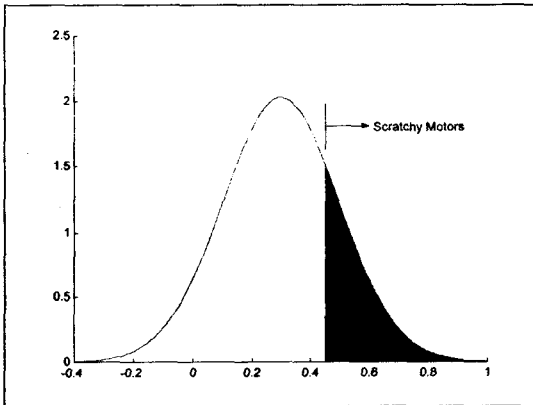
우선 2kHz부근을 필터링한 신호들을 비교해보면, 베어링결함이 있는 모터의 소음신호로부터 계산된 RMS값들이 더 큼을 알 수 있다. 동시에 고주파영역만을 필터링한 신호들을 비교하면 정상 및 베어링결함이 있는 모터의 RMS값들보다 스치는 음이 나는 모터에서의 RMS값들이 훨씬 큼을 알 수 있다. 한편, Fig. 4의 (a)에서 스치는 음이 나는 모터의 두 번째 계산값을 보면, 베어링결함이 있는 경우의 RMS값과 그 크기가 비슷함을 발견할 수 있는데, 이 경우는 스치는 음이 나는 모터에 베어링결함이 함께 존재하는 것으로 보여진다.

위의 결과를 정규분포도로 표현하면 다음 Fig. 5와 같다. 즉, 임의로 추출한 모터들의 결함이 정규분포를 따른다고 가정하면, 베어링 결함이 있을

확률은 정규분포곡선의 빗금 친 아랫부분의 넓이인 0.645(64.5%)이고, 스키는 음이 날 확률은 0.22(22%)이다.



(a) bearing damaged motor case (S_2/S_1)



(b) scratchy motor case (S_3/S_1)

Fig. 5 Normal Distributions of motors

$$P = \frac{R-X}{R} \times 100 \quad \text{when } r < x \quad (3)$$

$$P = \frac{X-R}{1-R} \times 100 \quad \text{when } r > x$$

where, r is the critical value of criterion ($r_{bearing} = 1.145$, $r_{scratchy} = 0.45$)

x is the normalized RMS values of each motor

실험에 사용된 모터가 결함을 가질 각각의 확률 P 는 위의 식 (3)을 이용하여 계산하였다. 단, 식 (3)에서 R 과 X 는 각각 critical value r 과 x 로부터 무한대까지의 넓이이다. 계산한 값들을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Probabilities of each fault of motors

	candidate	bearing fault (probability)	scratchy fault (probability)
normal	1	no (18.35%)	no (49.64%)
	2	no (38.23%)	no (81.79%)
	3	no (11.32%)	no (35.75%)
	4	no (2.71%)	no (29.25%)
	5	no (53.66%)	no (23.12%)
bearing	1	yes (1.51%)	no (71.36%)
	2	yes (70.74%)	no (22.36%)
	3	yes (94.34%)	no (79.02%)
	4	yes (93.30%)	no (79.66%)
	5	yes (36.75%)	no (38.61%)
	6	yes (3.80%)	no (84.30%)
scratchy	1	no (60.95%)	yes (77.84%)
	2	yes (82.96%)	yes (89.61%)
	3	no (50.41%)	yes (28.00%)

앞에서 살펴본 바와 같이, 주파수영역에서 해석하는 방법은 그 결과를 이해하기 쉽다는 장점이 있지만, 시간영역과 비교해 볼 때 해석시간이 상대적으로 오래 걸린다는 단점을 가지고 있다. 따라서 판별시간을 최소화하고, 실시간 결함 진단 시스템으로 발전시키기 위해서는 시간영역에서 판별하는 것이 불가피하다.

4. 시간 영역 해석

앞서 언급하였듯이 추정위치에 따른 정규화 수행을 위하여 band-pass filtering을 구성하였다. $2048 \times \Delta t (= 2048 \times \frac{1}{\text{sampling frequency}})$ 동안의 음압 신호를 FFT하여 중심주파수를 추정하고, 추정된 주파수(\hat{f}_0)와 160Hz의 band를 사용하였다. 베어링 결함 모터의 판별을 위해서는 \hat{f}_0 와 400Hz의 band를, 스키는 음이 나는 모터의 판별을 위해서는 6.5kHz~7.5kHz의 band를 사용하였다. 위의 세 가지 필터에는 공히 체비셰프 필터(Chevyshev type II)를 사용하였다.

연구 초기에는 중심주파수를 추정하기 위해 모터에 부착된 홀 센서의 신호를 이용하여 보았으나 중심주파수를 정확히 계산해내는 것이 힘들었다. 이에 관한 설명을 부록에 추가하였다.

5. 결론

본 연구에서는 모터로부터 방사되는 소음을 이용하여 모터의 결함여부를 판별하는 기준을 설정하였다. 우선, 주파수 영역에서 각 모터에 대한 파워스펙트럼을 조사하였다. 주파수 영역에서 해석한 결과를 이용하여 베어링 결함이 있는 모터의 경우 2kHz 부근을 band-pass filtering하여 RMS값을 계산해본 결과, 정상모터와 비교 시 상당히 큰 값을 보였다. 또한 스치는 음이 발생하는 모터의 경우 6.5kHz 와 7.5kHz 부근을 band-pass filtering하였고 RMS값의 크기가 정상모터의 그것보다 크기가 상당히 크음을 확인할 수 있었다. 다시 말해, 시간영역에서의 데이터처리만으로 3초의 시간 안에 정상모터와, 다른 두 가지의 결함이 있는 모터들을 구별할 수 있는 판정시스템을 개발하였다.

Appendix

모터의 회전주파수와 소음의 중심주파수와와의 상관관계를 알아보기 위해 몇 가지를 비교하였다. 모터에 부착된 홀 센서의 출력신호를 이용하여 회전 주파수를 계산하였고, 그것을 이용하여 중심주파수를 추정하고 FFT로부터 얻은 dominant peak 과의 오차를 비교하였다.

A.1 홀 센서 신호를 이용한 회전주파수 및 중심주파수계산

홀 센서는 “전류가 흐르고 있는 저항체에 수직으로 자속을 가하면 플레밍의 왼손 법칙에 의해 힘이 발생하고 동시에 전위차가 발생한다”는 홀(Hall) 효과를 이용한 센서이다. 연속적으로 S → N → S → N으로 변화하는 자계에서 동작하는 홀 IC를 교번자계동작의 홀 IC라고 하며 간단한 작동 원리는 다음 Fig. a1과 같다.

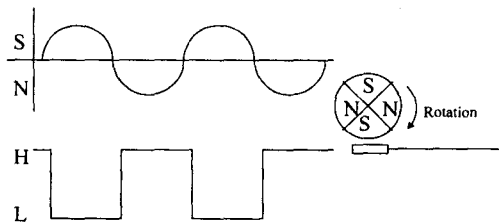


Fig. a1 Principle of a Hall IC

본 연구에 사용된 모터의 회전축 끝 부분에는 12극 자석이 부착되어있다. 따라서 Fig. a2에서 각 리플이 있는 부분의 시간은 모터가 12분의 1회전 하는데 걸리는 시간 (T_i)임을 알 수 있다.

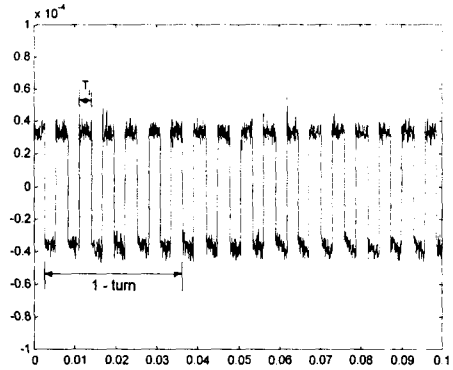


Fig. a2 Time data from a hall sensor (normal #3, x-axis: seconds, y-axis: voltages)

이러한 시간 데이터를 이용하여 모터의 회전주파수성분을 계산하였는데, T_i 를 계산하기 위해 인접한 두 데이터의 곱을 구하여 신호가 반전되는 시간을 이용하였다.

When $data(k) \times data(k+1) < 1$

for $k=1, 2, \dots, N$
(N is the number of data)

then

a sign changes
store the time

T_i is the time difference

위에서 구한 T_i 를 이용하면, 회전주파수 f_i 는

$$f_i = \frac{1}{T_i \times 12} \quad (a-1)$$

이고, 계산된 회전주파수를 이용하여 중심주파수성분을 계산하기 위해, 식(a-2)를 사용하였다.

$$f_{dom1} = \alpha \times \text{mean}(f_i) \quad (a-2)$$

where, α_1 is compensation constants

A.2 전자기적 가진력을 고려한 중심주파수 계산

서론에서 언급한 바와 같이, 전자기적 가진력 성분은 시스템의 고유진동수와 공진을 일으켜 소음을 발생시키는 원인이 될 수 있다. 전자기적 가진을 일으키는 요인에는 기자력(magneto motive force)과 퍼미언스(permeance)가 있는데, 이 두 원인으로부터 전자기력(electromagnetic force)이 생성되며, 다음과 같은 주기적인 성분을 가진다.

$$f_{dom 2} = N_{rs} \times \omega_r \pm 2n \times \omega_{supply} \quad (a-3)$$

where, $N_{rs} = 24$; a number of rotor slots

$n = 0, 1, 2, \dots$

$\omega_{supply} = 60\text{Hz}$; supplying frequency

플센서를 이용하여 구한 회전주파수(ω_r)와 식(a-3)를 이용해, 전자기적 가진력 성분을 계산하였고, 전자기적 가진력이 중심주파수와 일치한다고 가정하였다.

전체 음압신호를 FFT하여 구한 중심주파수 성분을 기준으로 하여, $2048 \times \Delta t$ 동안의 신호를 FFT하여 추정된 값과 부록의 식(a-2,3)을 이용하여 계산한 중심주파수들의 오차를 살펴보면, 다음 Table A1 과 같다. 단, 정상모터의 경우만 살펴보았다.

Table A1. Errors of each case(%)

E1; Errors between f_0 and \hat{f}_0

E2; Errors between f_0 and $f_{dom 1}$

E3; Errors between f_0 and $f_{dom 2}$

E1	E2	E3
0.4	0.3	1.3
0	0.6	1.2
0	0.3	1.5
0	1.8	1.1
0.4	2.0	0

- (1) P. L. Timar, A. Fazekas, J. Kiss, A. Miklos, and S. J. Yang, 1989, Noise and Vibration of Electrical Machines, Elsevier, chap. 8.
- (2) 양보석, 김남철, 장우교, 신광재, 1994, "이상진동에 의한 유도전동기의 진단," 한국소음진동공학회 1994년도 춘계학술대회논문집, pp. 122~127.
- (3) Nau, S.L., Mello, H.G.G., 2000, "Acoustic noise in induction motors: causes and solutions," Petroleum and Chemical Industry Conference, 2000. Record of Conference Papers. Industry Applications Society 47th Annual, pp. 253~263.
- (4) 조준제, 최연선, 1996, "전동기의 진동 및 소음원에 대한 실험적 고찰," 한국소음진동공학회 1996년도 추계학술대회논문집, pp. 37~42.
- (5) Kim, K.J., Park, Y.S., Cho, D.H., and Lee, H., 1995, "Experimental analysis of noise and vibration on integral horsepower induction motors," Inter-noise 95, pp. 105~108.
- (6) Belmans, R.J.M., Verdyck, D., and Geysen, W., Findlay, R.D., 1991, "Electro-Mechanical Analysis of the Audible Noise of an Inverter-Fed Squirrel-Cage Induction Motor," Industry Applications, IEEE Transactions on , Vol. 27, Issue 3, pp. 539~544.
- (7) Blaabjerg, F., Pedersen, J.K., Ritchie, E., and Nielsen, P., 1995, "Determination of Mechanical Resonances in Induction Motors by Random Modulation and Acoustic Measurement," IEEE Transactions on industry applications, Vol. 31, No. 4, pp. 823~829.
- (8) 조대현, 김광준, 1997, "유도 전동기 진동/소음 해석을 위한 전자기적 가진력 모델링," 대한기계학회 1997년도 춘계학술대회논문집 A, pp. 372~377.
- (9) Subhasis Nandi, Hamid A. Toliyat, 1999, "Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Machines - A Review," Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 1999 IEEE, Vol. 1, pp. 197~204.
- (10) Leland B. Jackson, 1996, Digital Filters and Signal Processing, 3rd edition, Kluwer Academic Publishers, chap. 7.
- (11) Signal Processing Toolbox, User's Guide Version 4, The MathWorks, Inc. (1999)