

# 진동 신호를 이용한 블로워 모터 틱/클릭과 톤 소음의 진단 지수 개발

## Development of diagnosis index for tick/click and tone noise of blower motor using vibration signals

이송준,<sup>1</sup> 정철웅,<sup>†</sup> 이인혁<sup>2</sup>

(Songjune Lee,<sup>1</sup> Cheolung Cheong,<sup>1†</sup> and In-Hyuk Lee<sup>2</sup>)

<sup>1</sup>부산대학교 기계공학부, <sup>2</sup>동진모터공업

(Received March 27, 2019; accepted May 13, 2019)

**초 록:** 복잡한 회전 기계의 소음 상태 진단을 위한 다양한 연구가 수행되고 있다. 본 연구에서는 진동신호를 이용하여 블로워 모터의 효율적이고 객관적인 소음 상태진단을 위한 지수를 개발하였다. 블로워 모터의 이상 시 가장 흔히 나타나는 소음으로 틱/클릭 소음과 톤 소음이 있다. 발생 원인과 소음 특성에 따라 틱/클릭 소음의 상태 진단에는 시간-주파수 분석법을 그리고 톤 소음 상태 진단에는 주파수 영역에서의 평활화 기법을 이용하였다. 개발한 지수를 이용하여 블로워 모터의 소음 상태 진단을 수행하고 이를 전문가에 의한 진단 결과와 비교하였다. 그 결과 약 95%의 일치율을 보였다.  
**핵심용어:** 블로워 모터, 소음상태진단, 시간-주파수 분석, 웨이브렛 변환

**ABSTRACT:** Various studies have been conducted for the diagnosis of noise condition of complex rotary machines. In this study, diagnosis index using vibration signal is developed for the efficient and objective assessment of noise condition of a blower motor. The noise most commonly caused by the abnormal blower motor are Tick/Click noise and Tone noise. According to cause and noise characteristics, time-frequency analysis is used to diagnose Tick/Click noise, and smoothing in frequency domain is used to diagnose tone noise condition. The noise condition of the blower motors were diagnosed using the developed index and these results are compared with the diagnostic results by the experts. As a result, the agreement rate was about 95%.

**Keywords:** Blower motor, Condition diagnosis, Time-frequency analysis, Wavelet transform

**PACS numbers:** 43.60.Hj, 43.60.Qv

### 1. 서 론

블로워 모터는 자동차의 내부 적정 온도유지 및 환기를 위한 공기조화(Heating, Ventilation and Air Conditioning, HVAC) 시스템에 사용된다. 모터의 동작 환경이나 상태에 따라 여러 유형의 진동 및 소음이 발생하게 되며, 자동차의 다른 진동/소음원과는 달리 운전자나 승객에게 직접 노출된다. 이러한 특

성으로 인하여 블로워 모터의 진동/소음은 중요한 성능 지표로 인식되고 있다.<sup>[1]</sup> 특히, 모터의 특성상 제품간의 편차가 존재하여 생산단계에서 블로워 모터 시스템의 진동/소음 상태를 빠르게 진단할 수 있는 객관적 지표의 개발이 요구되고 있다. 하지만 이러한 검사는 대부분 숙련된 작업자의 감각에 의존하고 있어 생산 공정의 자동화에 큰 걸림돌이 된다.<sup>[2]</sup>

블로워 모터에서 발생하는 소음의 종류와 그 원인에 따른 발생빈도는 Table 1과 같다.<sup>[3]</sup> 틱/클릭 소음(Tick/Click Noise, TCN)은 슬딩면(sliding surface)의 데미지나 이물질에 의해 주기적으로 발생하는 소음이

<sup>†</sup>Corresponding author: Cheolung Cheong (ccheong@pusan.ac.kr)  
School of Mechanical Engineering, Pusan National University, 2,  
Busandaehak-ro 63 beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Republic  
of Korea

(Tel: 82-51-510-2311, Fax: 82-51-514-7640)

Table 1. Noise types and occurrence frequency of blower motor system.

Noise types	Occurrence frequency (%)
Tick/Click	10
Chirp	5
Squeal	80
Tone	5

며, 톤 소음(Tone Noise, TN)은 모터의 전기적 불균형이나 모터와 HVAC 모듈의 공명에 의해 발생하는 소음이다. 그리고 chirp 소음은 브러시 정류자 표면의 불안정한 미끌림으로 발생하며, squeal 소음은 샤프트와 베어링 등 금속 마찰에 의해 발생한다. 가장 발생 빈도가 높은 squeal 소음은 다른 소음원과 비교하여 그 크기도 크며 주파수 스펙트럼에서도 그 특성이 상대적으로 명확하게 관찰되어 검사 공정에서 간단히 불량 유·무를 쉽게 검출할 수 있다. 하지만 틱/클릭 소음과 톤 소음의 경우 발생 빈도도 많지만 그 크기가 작고 일반적인 신호처리 기법으로는 판별이 어렵다. 따라서 검사 공정에서 검출되지 못하여 최종 소비자에 의해 불만이 제기되는 경우가 빈번하다.

본 연구에서는 시간-주파수 분석법을 이용하여 블로워 모터 시스템의 틱/클릭 소음과 톤 소음 진단을 위한 지수를 개발하였다. 먼저 무작위 샘플모터에 대해 정상, 틱/클릭 소음 발생 그리고 톤 소음 발생 유·무를 판별하여 진동신호를 측정하였다. 측정된 진동 신호를 이용하여 소음/진동 발생 메커니즘에 따라 틱/클릭 소음에 대해서는 웨이브렛 신호처리 기법과 톤 소음에 대해서는 주파수 영역에서의 평활화 기법을 이용하여 상태진단 알고리즘을 개발하고, 대상 블로워 모터의 객관적 상태진단을 위한 지수를 제시하였다.

## II. 블로워 모터의 진동신호 측정

측정 대상은 Fig. 1과 같은 X-100 차량용 블로워 모터이다. 블로워 모터에서 발생하는 틱/클릭 소음과 톤 소음은 모터의 회전에 의한 기계적 진동에 의해 발생하는 소음이다. 하지만 소음 측정 장비나 시설을 갖추기 어려운 실 산업 현장의 여건을 고려하여 블로워 모터의 틱/클릭 소음, 톤 소음 상태 진단을 위

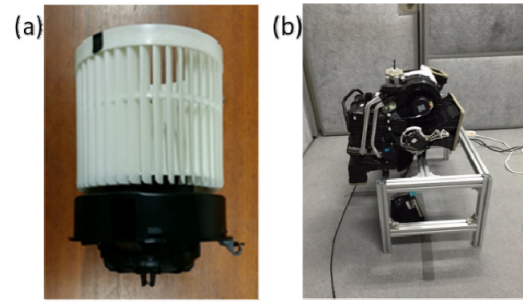


Fig. 1. Target (a) blower motor system and (b) HVAC module.

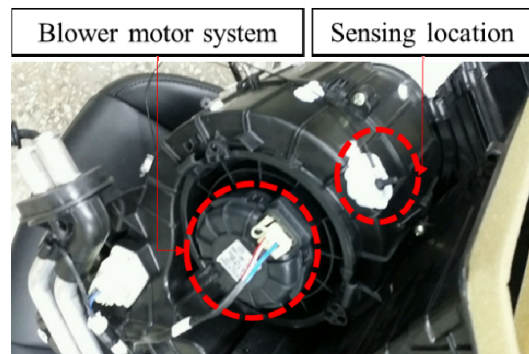


Fig. 2. Sensor location on HVAC module for measurement of vibration.

Table 2. Rotating speed of blower motor according to its operating stage.

Stage	1	2	3
RPM	1108	1576	1862
Hz	19.67	26.27	31.03

Table 3. The number of samples.

Stage	Normal	TCN	TN	Total
1 <sup>st</sup>	11	47	40	98
2 <sup>nd</sup>	11	1	9	21
3 <sup>rd</sup>	11	-	8	19
Total	33	48	57	138

한 분석 신호를 진동신호로 한정하였다. Fig. 2와 같이 블로워 모터 시스템을 HVAC 모듈에 장착하여 HVAC 모듈의 진동을 측정하였으며, 센서는 모터와 가까운 곳에 위치 시켰다.

측정에는 Soundbook\_MK2\_8L (LEMO7), B&K Accelerometer Type 4397을 이용하였다. 무작위 샘플 모터를 선정하여 모터의 작동 단수에 따라 청음 전문가의 판단에 의해 정상, 틱/클릭 소음 발생 그리고 톤 소음

발생 신호로 분류하여 138개의 샘플 신호를 획득하였다. 모터의 작동 단수에 따른 회전속도와 샘플 신호 분류 결과를 Tables 2와 3에 각각 나타내었다. 신호의 측정은 12,800 Hz의 sampling rate로 3 s 동안 측정하였다.

### III. 지수 개발을 위한 알고리즘

#### 3.1 Tick/Click 소음: 웨이브렛 신호처리 기법

블로워 모터 시스템의 틱/클릭 소음 발생 유무 판별을 위해 웨이브렛 신호처리 기법을 이용하였다. 웨이브렛 변환은 과도 신호의 시간-주파수 변환의 높은 효율성으로 모터 등의 상태 진단에 가장 널리 이용되고 있다. 웨이브렛 변환에서 기저함수(mother wavelet)가 되는 웨이브렛 함수의 일반적 표현은 다음과 같다.<sup>[4]</sup>

$$\psi_{(\alpha,\tau)} = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \psi\left(\frac{t-\tau}{\alpha}\right). \quad (1)$$

웨이브렛 함수는 웨이브렛의 크기를 결정하는 압축계수(scaling factor)  $\alpha$ 와 시간 축으로의 이동에 관계되는 전이계수(translation factor)  $\tau$ 로 구성된다. 기본적인 웨이브렛 변환식은 아래와 같다.

$$W(\alpha,\tau) = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \int_{-\infty}^{INF} x(t) \psi^*\left(\frac{t-\tau}{\alpha}\right) dt. \quad (2)$$

웨이브렛 변환은 입력신호를 특정 기저함수의 집합으로 분리하는 과정으로써, 임의의 함수를 시간-주파수 영역에서 동시에 국부성을 만족하는 기저함수의 선형결합으로 표현된다.  $\psi^*$ 는  $\psi$ 의 켈레 복소수이다. 웨이브렛 변환은 여러 개의 대역통과 필터를 통과한 신호로 생각할 수 있으며 이해를 위한 도식을 Fig. 3에 나타내었다. Eq. (2)의 웨이브렛 변환식은 입력신호  $x(t)$ 와 기저함수  $\psi^*$ 의 컨볼루션 적분의 형태으로써 효율적인 계산을 위해 아래의 식과 같이 주파수 영역에서의 내적 곱으로 나타낼 수 있다.<sup>[5]</sup>

$$W(\alpha,\tau) = \sqrt{\alpha} X(f) \psi^*(\alpha f). \quad (3)$$

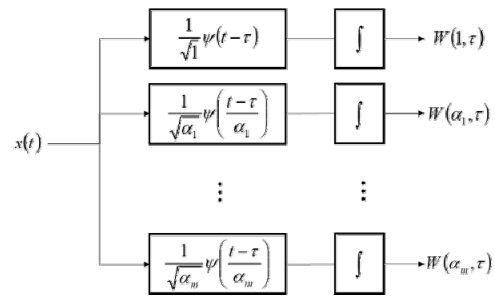


Fig. 3. Wavelet decomposition of time signal using inverse wavelet transform.

틱/클릭 소음은 주기적인 임펄스 신호와 같은 형태로 나타난다. 따라서 본 연구에서는 이러한 이상 신호의 특성을 고려하여 기저함수로서 몰렛(Morlet) 웨이브렛 함수를 이용하였다.<sup>[6,7]</sup> 몰렛 웨이브렛은 가우스 함수(Gaussian function)로 변조된 평면파의 형태를 가지며, 몰렛 웨이브렛 함수와 그 푸리에변환(Fourier transform)식은 다음과 같다.

$$\psi(t) = \frac{\sigma}{\sqrt{\pi}} e^{-\sigma^2 t^2} e^{j2\pi f_0 t}. \quad (4)$$

$$\Psi(f) = \psi^*(f) = e^{-(\pi^2/\sigma^2)(f-f_0)^2}. \quad (5)$$

Eq. (5)에서 웨이브렛의 형상계수와 관계되는  $\sigma$ 가 변화함에 따라 높기와 대역폭이 변화하며, 전이계수와 관계되는  $f_0$ 는 중심 주파수를 결정한다.  $\sigma$ 와  $f_0$ 는 다음의 식들로 재귀적으로 결정된다.<sup>[6,8]</sup>

$$\frac{1}{\sqrt{2}\sigma} f_0 = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma_i} f_i = \frac{1}{\sqrt{1\ln 2}}. \quad (6)$$

$$f_i = \frac{(1+\lambda)^{i-1}}{1-\lambda)^i} N f_1, \quad i = 1, 2, \dots, m-1. \quad (7)$$

$$f_i = \frac{1}{2} \left[ \frac{f_0}{2.56} + f_{i-1}(1+\lambda) \right], \quad i = m, \quad (8)$$

여기서  $\lambda = \ln 2 / (\sqrt{2}\pi)$ 로 상수,  $m$ 은 기저함수를 위치시킬 중심주파수의 개수로 7개를 이용하였으며,  $f_i$ 는 블로워 모터의 회전수이며,  $N$ 은 고려하고자 하는 모터시스템 조화성분의 차수이다.  $N$ 은 모터 시

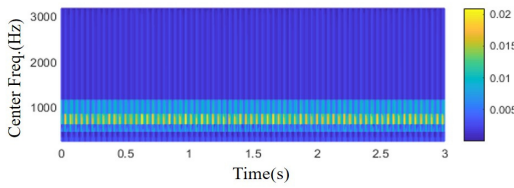


Fig. 4. Two-dimensional illustration of the wavelet coefficients magnitude matrix.

시스템의 조화성분으로 부터의 간섭을 최소화 하기 위해 충분히 커야 하며<sup>[6]</sup> 본 연구에서는 11을 선정하였다. Eqs. (1)~(8)을 통하여 Fig. 4와 같은  $W(f_i, \tau_k)$ 의 웨이블릿 계수를 구할 수 있으며, 시간과 중심주파수에 관한 2차원 행렬 형태로 나타난다. 틱/클릭 소음 판별을 위해 다음과 같이 웨이블릿 계수를 각 중심주파수에 대해 시간축으로 평균한 값 중 최대값을 지수(TCN index)로 선정하였다.  $l$ 은 데이터의 개수이다.  $C_{TCN}$ 은 크기보정을 위한 임의의 상수이다.

$$TCN\ index = C_{TCN} \max \left[ \frac{1}{l} \sum_{k=1}^l W(f_i, \tau_k) \right]. \quad (9)$$

본 알고리즘의 유효성을 검증하기 위해 웨이블릿 계수  $W(f_i, \tau_k)$ 를 다음의 식<sup>[9,10]</sup>으로 표현되는 새넨 엔트로피 함수(Shannon entropy function)을 적용하고,

$$\overline{W}(f_i, \tau_k) = \frac{|W(f_i, \tau_k)|}{\sigma_i}, \quad \sigma_i = |W(f_i, \tau)|. \quad (10)$$

$$\gamma_k = \frac{E[(|W(f_i, \tau)| - \mu_i)^3]}{\sigma_i^3}. \quad (11)$$

$$H(t_k) = \sum_{k=1}^l [\gamma_k \overline{W}(f_i, \tau_k) \log_2 \overline{W}(f_i, \tau_k)]. \quad (12)$$

마지막으로  $H(t_k)$ 의 자가상관 함수를 푸리에 변환하는 일련의 과정을 아래의 식과 같은 2차 선형 일반 감쇠진동 시스템의 임펄스 응답에 적용하였다.  $\gamma_k$ 는 중심주파수의 간격이 일정하지 않고 Eqs. (6)~(8)에 의해 결정되었던 중심주파수의 영향을 웨이블릿 계수의 확률분포함수에 대한 편포도로 특징짓고 반영

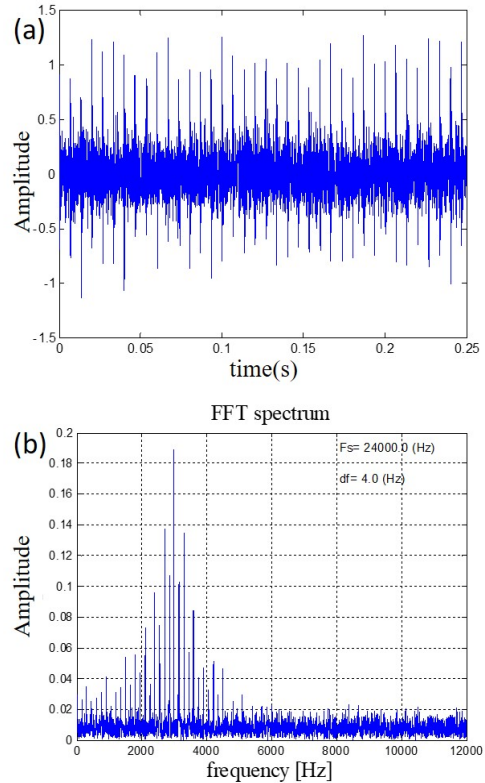


Fig. 5. Impulse response of a linear underdamped second system: (a) time domain, (b) frequency domain.

하기 위함이다.

$$h(t) = \frac{1}{m\omega_d} e^{-\left(\frac{\zeta\omega_d}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)t} \sin(\omega_d t). \quad (13)$$

시스템의 고유 주파수는 3000 Hz, 주기적인 임펄스 신호로 대별되는 결함 주파수는 150 Hz로 설정하였다.

Fig. 5(a)와 같이 Eq. (13)의 임펄스 응답과 가우스 분포를 따르는 백색소음을 중첩하여 시간 신호를 생성하였다. 여기서  $m=4.5742 \times 10^5$ ,  $\zeta=0.1$ 을 이용하였다. Fig. 5(a)의 시간 신호를 푸리에 변환하면 Fig. 5(b)에 나타내었다. 3000 Hz의 시스템의 공명주파수와 그 사이드 로브로 인해 150 Hz의 결함 주파수 검출이 어려움을 알 수 있다. 이에 반해 Eqs. (1)~(12)의 알고리즘을 적용한 결과는 Fig. 6과 같으며, 150 Hz의 결함 주파수의 신호를 잘 나타내고 있다.

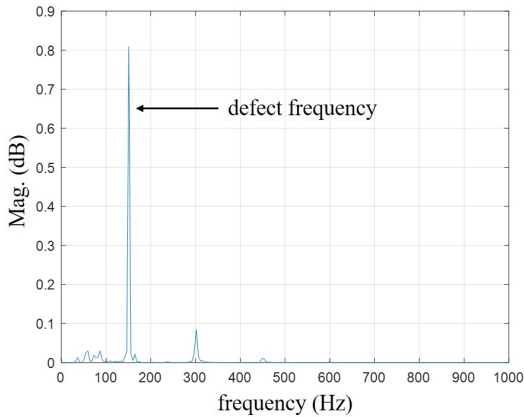


Fig. 6. Auto-correlation spectrum of time-frequency algorithm.

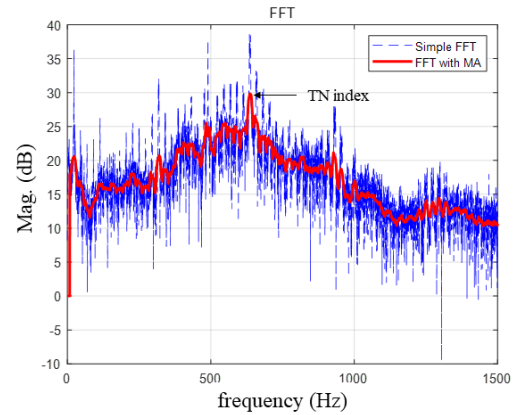


Fig. 8. Frequency spectrum and its smoothed result on frequency domain.

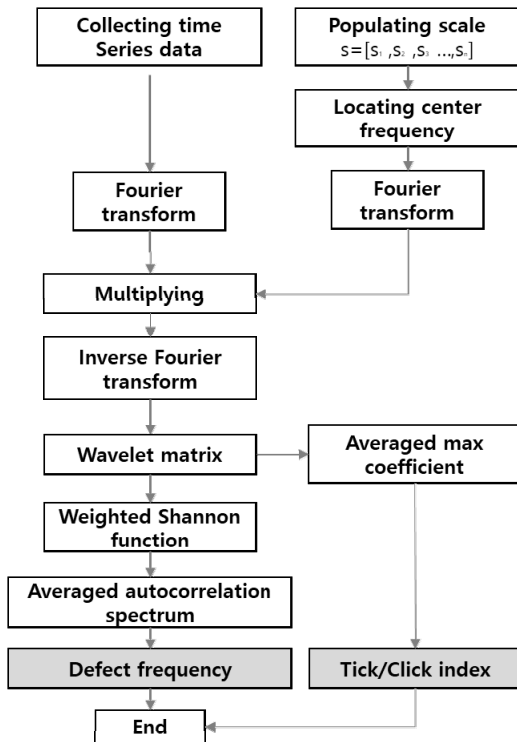


Fig. 7. The steps of the procedure for Tick/Click noise diagnosis of blower motor.

블로워 모터의 틱/클릭 소음 진단을 위한 알고리즘을 정리하여 Fig. 7에 나타내었다.

### 3.2 Tone 소음: 주파수 영역에서의 평활화 기법

블로워 모터의 톤소음은 모터의 전기적불균형이나 모터와 HVAC 모듈의 공명이 주 원인으로 모듈의 공진주파수 대역의 신호가 정상일 때보다 커지게 된

다. 따라서 톤 소음의 판별을 위해 다음의 식과같이 시간 신호를 주파수 영역에서 평활화한 값 중 최대 값을 지수(TN index)로 선정하였다.

$$TN\ index = C_{TN} \max \left[ \frac{1}{2l+1} \sum_{j=l}^l X(l+j) \right]. \quad (14)$$

$C_{TN}$ 은 크기 보정을 위한 임의의 상수. Eq. (14)와 같이 시간 신호를 푸리에 변환하여 주파수 영역에서 평활화 하면 Fig. 8과 같다.

### 3.3 소음 상태진단 결과

블로워 모터 시스템의 틱/클릭 소음과 톤 소음 발생 진단을 위해 3.1, 3.2절에 제시한 알고리즘을 적용한 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

먼저 Fig. 9의 마커의 색에 따라 검정색은 정상 모터, 파란색은 틱/클릭 발생모터 그리고 빨간색은 톤 소음 발생 모터를 나타낸다. 그리고 마커의 형상에 따라 모터의 작동 단수를 나타낸다(○: 1단, ■: 2단, ×: 3단). 정상, 틱/클릭 소음 그리고 톤소음 발생 모터의 영역이 구분됨을 볼 수 있다. 모터 샘플에 대한 전체 결과에 따라 틱/클릭 소음 발생과 톤 소음 발생 모터의 판별을 위한 지수를 다음과 같이 결정하였다.

- TCN index: 475
- TN index: 580

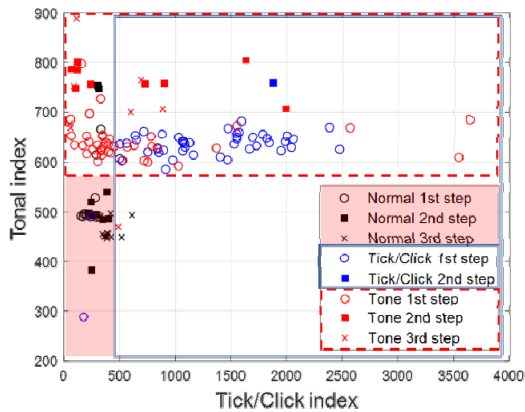


Fig. 9. Result of tick/click noise and tone noise diagnosis using time-frequency algorithms.

Table 4. The number of samples of diagnosed results.

	Expert	Index	
Normal	33	29	
TCN	48	3	
TCN & TN	-	from TCN	46
		from TN	21
TN	57	39	
Total	138	138	

블로워 모터의 발생 소음에 따라 청음 전문가가 분류한 결과와 개발 지수에 의해 분류한 결과를 Table 4에 정리하였다. 지수에 의한 분류 결과 틱/클릭 소음발생 모터와 톤 소음발생 모터의 경우 많은 샘플에서 한 가지의 소음만 발생하는 것이 아니라 틱/클릭 소음과 톤 소음이 함께 발생하는 것으로 나타났다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 블로워 모터 시스템의 시간-주파수 분석법을 이용하여 소음 신호로부터 틱/클릭 소음과 톤 소음 진단을 위한 지수를 개발하였다. 틱/클릭 소음 진단에는 웨이블릿 기법을, 톤 소음 진단에는 주파수 영역에서의 평활화 기법을 이용하였다. 개발한 지수를 이용하여 블로워 모터의 소음 발생을 판별하고 청음 전문가에 의해 판별된 결과와 비교하였다. 두 결과가 매우 잘 일치함을 보였다. 틱/클릭 소음과 톤 소음이 함께 발생하는 영역의 경우 분석의

여지가 남아있지만, 틱/클릭 소음과 톤 소음을 분리하여 본다면 약 95%의 일치율을 보임으로써 본 연구에 사용된 블로워 모터 시스템뿐 만 아니라 다양한 복잡한 회전 기계에 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 2016 년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 에너지인력양성사업 「육해상 풍력터빈 신뢰성 및 발전량 향상을 위한 O&M 기술 고급트랙」으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입(No. 20164030201230).

#### References

1. M. Lee, K. Ih, D. Hwang, and H. Lee, "Durability study of blower motor noise," (in Korean), Proc. of KSNVE Spring Conf. 1109-1113 (2007).
2. S. Kim, *Noise and vibration pattern classification for inspection system of blower motor malfunction* (in Korean), (Master thesis, 1998).
3. S. Park, "Reliability improvement of blower motor for automobiles based on analysis and reproduction of failure" (in Korean), Hyoseong Electric Ltd., Tech. Rep., 2008.
4. N. G. Nikolaou and I. A. Antoniadis, "Demodulation of vibration signals generated by defects in rolling element bearings using complex shifted morlet wavelets," *Mech. Syst. Signal Process.* **16**, 677-694 (2002).
5. W. J. Staszewski, "Identification of damping in MDOF systems using time-scale decomposition," *J. Sound Vib.* **203**, 283-305 (1997).
6. J. Liu, W. Wang, F. Golnaraghi, and K. Liu, "Wavelet spectrum analysis for bearing fault diagnostics," *Meas. Sci. Technol.* **19** (2008).
7. W. Su, F. Wang, H. zhu, Z. Zhang, and Z. Guo, "Rolling element bearing faults diagnosis based on optimal Morlet wavelet filter and autocorrelation enhancement," *Mech. Syst. Signal Process.* **24**, 1458-1472 (2010).
8. G. Y. Luo, D. Osypiw, and M. Irle, "On-line vibration analysis with fast continuous wavelet algorithm for condition monitoring of bearing," *J. Vib. Control* **9**, 931-947 (2003).
9. B. S. Kim, S.H. Lee, M. G. Lee, J. Ni, J. Y. Song, and

C. W. Lee, "A comparative study on damage detection in speed-up and coasr-down process of grinding spindle-typed rotor-bearing system," J. Master. Process. Technol. **187**, 30-36 (2007).

10. N. Baydar and A. Ball, "A comparative study of acoustic and vibration signals in detection of gear failures using wigner-ville distribution," Mech. Syst. Signal Process. **15**, 1091-1107 (2001).

## 저자 약력

### ▶ 이 송 준 (Songjune Lee)



2010년 2월: 부산대학교 기계공학부 학사  
2016년 2월: 부산대학교 기계공학부 석사  
2016년 3월 ~ 현재: 부산대학교 기계공학부 박사과정

### ▶ 정 철 응 (Cheolung Cheong)



1997년 2월: 서울대학교 항공우주 학사  
1999년 2월: 서울대학교 항공우주 석사  
2003년 2월: 서울대학교 기계항공 박사  
2003년 3월 ~ 2004년 8월: 서울대학교 기계항공 BK21 박사후연구원  
2004년 9월 ~ 2005년 5월: University of Southampton, ISVR, Post-Doctoral Research Associate  
2005년 6월 ~ 2006년 2월: 한국표준과학연구원 선임연구원  
2006년 3월 ~ 현재: 부산대학교 기계공학부 교수

### ▶ 이 인 혁 (In-Hyuk Lee)



1997년 2월: 서울대학교 화학공학 학사  
1999년 2월: 서울대학교 화학공학 석사  
2009년 1월 ~ 현재: 동진모타공업 대표이사