

부하에 따른 DC모터 소음 평가법

Noise evaluation method of DC motor according to change of load

차수호¹, 신성환^{1†}

(Su-Ho Cha¹ and Sung-Hwan Shin^{1†})

¹국민대학교 자동차공학과

(Received February 13, 2020; accepted March 16, 2020)

초 록: 자동차에서의 모터 사용 증가로 자동차 실내 음질(sound quality) 향상을 위해 모터 소음이 주요 관심사이다. 본 연구의 목적은 부하변화에 따른 모터 소음 성능을 나타낼 수 있는 인자를 제안하는 것이다. 이를 위하여, 파워스펙트럼과 라우드니스가 소음 성능을 나타내는데 적합하지 않음을 확인하였고, 브러쉬 마찰 성분과 관련된 부분라우드니스(PN_B)와 토크 리플 성분과 관련된 부분라우드니스(PN_R)가 소음 성능을 나타내는 인자로 파악되었다. 그리고 PN_B 와 PN_R 를 이용하여 부하에 따른 모터 소음의 변화 특성을 나타내기 위한 방법으로 모터 소음 성능 곡선을 제안하였다. 이 곡선은 소음 제어, 모터 선정 및 시스템 개선을 위한 가이드로 활용될 것으로 기대된다.

핵심용어: 모터소음, 소음평가, 부하, 음질, 라우드니스

ABSTRACT: Motor noise is a major concern in order to improve perceptual feeling of car interior sound due to increased motor usage in passenger cars. The purpose of this study is to propose factors that can represent the acoustic performance of motor noise according to the change of load. To this end, at first, it is shown that power spectrum and total loudness are not fit for noise performance, and then, PN_B , partial loudness related to the brush friction component, and PN_R , partial loudness related to the torque ripple component are investigated as factors representing motor noise. The performance curve of motor noise using PN_B and PN_R is proposed to identify trends of motor noise according to the loads. The curve could be a guide for the noise control, the selection of motor, and the improvement of a system.

Keywords: Motor noise, Noise evaluation, Load, Sound quality, Loudness

PACS numbers: 43.50.Yw, 43.64.Yp

1. 서 론

하이브리드 자동차나 전기 자동차에서는 주 구동력으로 모터를 사용하고, 자동차의 의전장품 작동을 위해 자동차에서 모터 사용이 증가하고 있다. 이러한 추세와 함께 자동차 엔진 소음의 저감으로 인하여 자동차 실내의 음질개선을 위해 모터소음이 주요 관심사로 주목받고 있다.^[1]

모터소음의 원인은 크게 기계적 마찰에 의한 소음과 전자기적 리플로 인한 소음으로 구분할 수 있다.

이 두 가지 소음의 주파수 성분은 모터의 회전수에 기인하는데, 모터의 분당 회전수(Revolution Per Minute, RPM)는 수천에서 수만 대역까지 사용하기 때문에 고주파 소음이 발생하게 된다. 고주파 소음은 인간의 청감특성으로 인하여 동일 음압레벨(Sound Pressure Level, SPL)일지라도 저주파 소음에 비하여 크게 인식 되므로 민감하게 느낀다.^[2]

모터 소음의 평가는 일반적으로 A청감보정 음압레벨을 사용하고 있으며, 최근 라우드니스(loudness), 샤프니스(sharpness), 변동강도(fluctuation strength), 러

†Corresponding author: Sung-Hwan Shin (soulshin@kookmin.ac.kr)

Department of Automotive Engineering, Kookmin University, 77 Jeongneung-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02707, Republic of Korea
(Tel: 82-2-910-5743, Fax: 82-2-910-4839)



프니스(roughness) 등의 음질인자(sound quality metric)를 추가적으로 사용하는 추세이다.^[1,3] 평가를 위한 부하 조건은 무부하 조건 또는 시스템 부하 조건에서 진행된다. 그런데 시스템 개선 등으로 인해 부하 조건이 변경될 경우 다른 특성의 소음이 발생한다.

따라서 본 연구에서는 자동차에서 사용되는 소형 DC 모터를 대상으로 라우드니스 기반의 모터 소음 분석법과 이를 이용하여 부하에 따른 모터 소음의 변화 특성을 나타내기 위한 방법으로 모터 소음 성능 곡선을 제안하고자 한다.

II. DC 모터의 특성

2.1 신호 취득을 위한 시험 조건

대상 모터는 자동차 윈도우 시스템에 사용되는 DC모터를 사용하였다. 모터에 정량적인 부하를 인가하기 위해서 부하장치와 부하를 측정할 수 있는 토크센서로 모터다이내모미터를 Fig. 1과 같이 구성하였다. 부하 조건은 0.25 N-m 간격으로 0 N-m ~ 2 N-m 범위를 사용하였으며, 각 부하 조건마다 소음, RPM, 전류 신호를 취득하였다.

소음은 마이크폰을 이용하여 모터 하우징에서 수직으로 300 mm 위치에서 측정하였고, RPM은 타코

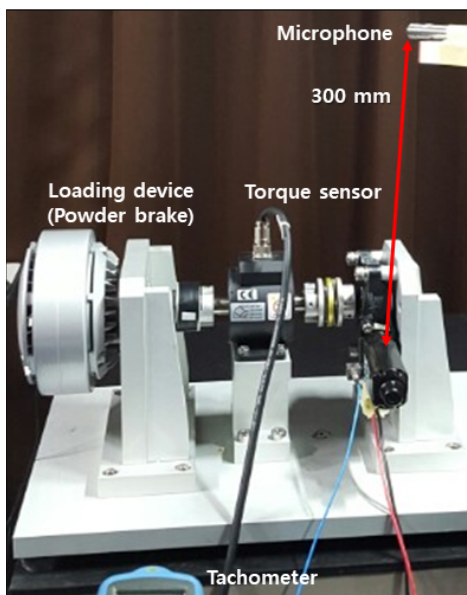


Fig. 1. (Color available online) Motor dynamometer and measurement set-up.

미터를 이용하여 모터다이내모미터 회전축의 RPM을 측정하여 기어비(보정상수)를 이용한 계산을 통해 회전자 RPM을 취득하였다. 전류는 전류프로브를 이용하여 DC 파워 케이블의 전류를 측정하였으며, 모터 구동을 위해 12 V 조건에서 전류를 인가하였다.

본 논문에서는 모터가 반시계 방향(Count Clock Wise, CCW)으로 회전하는 조건만 사용하였다. 그 이유는 모터의 구조(브러쉬, 고정자, 회전자, 기어 등)가 대칭 구조이기 때문에 시계 방향(Clock Wise, CW)과 물리적으로 동일한 특성을 갖는다고 볼 수 있기 때문이다.

2.2 DC 모터의 주요 소음 성분

DC모터의 주요 소음은 일반적으로 브러쉬 마찰 성분(B)과 토크 리플 성분(R)으로 구분한다. 브러쉬 마찰 성분은 정류를 위해 정류자와 브러쉬간의 접촉으로 인해 발생하는 기계적 마찰 소음으로 Eq. (1)^[4]과 같이 계산된다.

$$B = (RPM/60) \times C_n, \quad (1)$$

여기서 C_n 은 정류자 편수이다. 토크 리플 성분은 모터 구동을 위한 회전자와 고정자간의 전자기적 리플 소음으로 Eq. (2)^[4]와 같이 계산된다.

$$R = (RPM/60) \times R_n \times S_n, \quad (2)$$

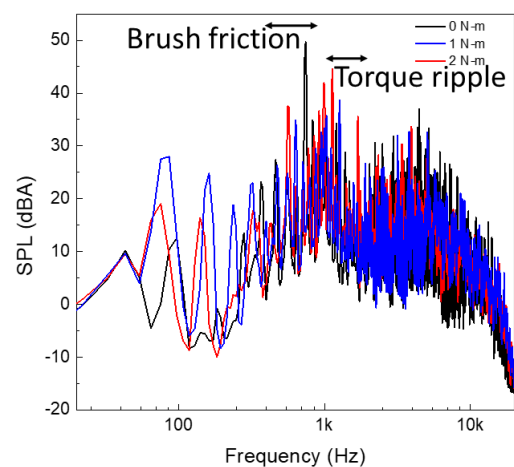


Fig. 2. (Color available online) Comparison of frequency spectra according to the change of load.

여기서 R_n , S_n 은 회전자 공극수, 고정자 극수이다. 대상 모터는 정류자 편수 8개, 회전자 공극수 8개, 고정자 극수 2개를 가지는 모터이다. Fig. 2는 모터 소음 신호의 A청감보정 협대역 주파수 분석 결과이며, Eqs. (1)~(2) 계산을 통하여 브러쉬 마찰 성분과 토크 리플 성분이 모터 소음에서 주요하게 발생함을 확인하였다.

2.3 부하에 따른 RPM 및 전류 신호의 특성

Fig. 3은 부하에 따른 RPM 및 전류 신호의 평균값을 나타낸 것이다. 부하와 RPM은 음의 상관관계를 가지며 부하와 전류는 양의 상관관계를 가지는 특성이 있음을 파악하였다. 이러한 특성의 원인은 Eqs. (3)~(4)⁵⁾를 이용하여 수식적으로 설명할 수 있다.

$$RPM \times \frac{2\pi}{60} = \frac{V_a}{k\Phi} - \frac{R_a T}{(k\Phi)^2}, \quad (3)$$

$$T = k \times I \times \Phi, \quad (4)$$

여기서 V_a , R_a , Φ 는 회전자 전압, 회전자 권선 저항, 고정자 자속이고 k 는 토크상수이다. 본 연구에서는 전압이 12V로 일정한 조건이며, 고정자는 자속이 일정한 영구자석을 사용하였다. 그러므로 부하에 따른 DC 모터의 특성이 이론적인 값과 정확히 일치한다. 이러한 특성은 부하에 따라 변하는 모터 소음의 원인 규명에 활용하고자 한다.

III. DC 모터의 소음 평가법

3.1 DC 모터의 소음 분석법

3.1.1 라우드니스(Loudness, N) 분석

모터 소음을 분석하기 위해 협대역 주파수 분석 시, 주파수 해상도에 따라 특성 표현에 영향이 발생하며 인간의 청감특성을 반영하지 못하는 문제가 있다. 이를 해결하기 위해 광대역 소음 분석법 중 하나인 라우드니스 분석^{6,7)}을 활용하고자 한다.

라우드니스의 단위는 sone이며, 음의 크기에 대한 인간의 지각량과 선형 관계를 갖는다. 이 분석은 비라우드니스(specific loudness) 계산을 통하여 인간의 청감특성을 반영한다. 비라우드니스는 가청 주파수 대역에서 일반적으로 24개의 임계대역 필터를 이용하여 각 임계대역을 통과한 신호의 주 라우드니스(main loudness)를 계산한다. 하지만 본 연구에서는 47개의 임계대역 필터를 이용하여 주라우드니스를 계산⁸⁾하였다. 그 이유는 Fig. 2와 같이 나타나는 모터 소음의 토널 성분이 임계대역 필터의 경계 주파수에 위치할 경우 라우드니스 지각량과 극단적으로 다르게 나타나는 경우가 발생할 수도 있기 때문이다. 이렇게 계산된 주라우드니스에 스펙트럴 마스킹이 적용되어 슬롭 라우드니스가 발생한다. 즉, 비라우드니스는 인간의 청감특성이 반영된 소음의 크기 분포이다. 임계대역과 주파수의 관계는 Eq. (5)와 같이 주어진다.

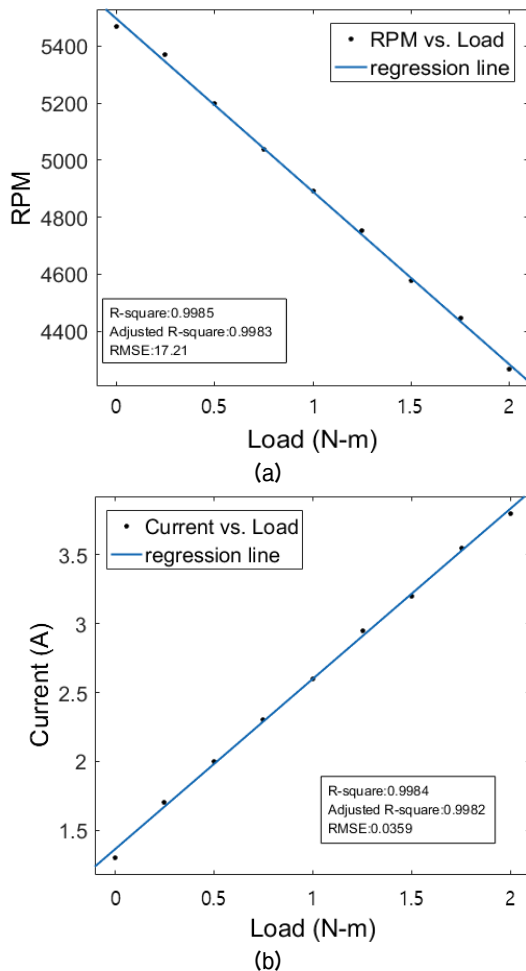


Fig. 3. (Color available online) DC Motor characteristics according to the change of load. (a) RPM, (b) current.

$$z = 13 \tan^{-1}(0.76f) + 3.5 \tan^{-1}\left(\left(\frac{f}{7.5}\right)^2\right), \quad (5)$$

여기서 z 는 임계대역이고 f 는 주파수이다. 비라우드니스의 패턴을 모든 임계대역에 대하여 적분하면 라우드니스를 구할 수 있고, 수식적으로는 Eq. (6)과 같이 나타낸다.

$$N = \int_{0 \text{ Bark}}^{24 \text{ Bark}} N'(z) dz, \quad (6)$$

여기서 N 는 라우드니스이고 N' 는 비라우드니스이다. Fig. 4는 무부하 조건에서 모터 소음의 비라우드니스와 라우드니스를 구하기 위한 적분 영역을 표시

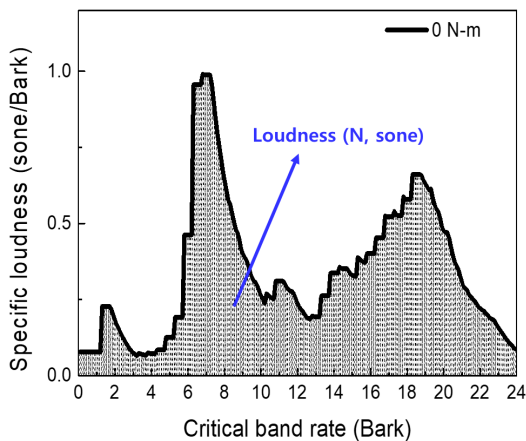


Fig. 4. (Color available online) Specific loudness of the motor noise in the no-load condition.

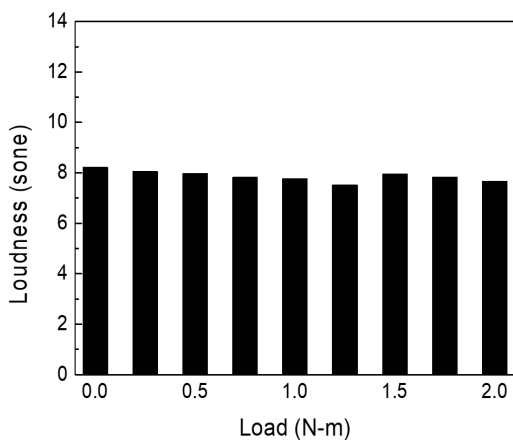


Fig. 5. Comparison of total loudness according to the change load.

한 것이다. 즉, 라우드니스는 인간의 청감특성이 반영된 전체 소음의 크기이다.

Fig. 5는 모든 부하조건에 대하여 라우드니스를 비교하여 나타낸 것이다. 모든 부하조건에 대한 라우드니스의 평균은 7.9 sone이며, 표준편차는 0.2 sone이다. 즉, 부하에 따른 라우드니스의 차이는 미미하다고 볼 수 있다. 3.1.2에서는 부하에 따른 모터 소음의 변화 특성을 파악하고자 비라우드니스 패턴의 변화를 파악하고, 그 원인을 분석하고자 한다.

3.1.2 부하에 따른 비라우드니스의 패턴 변화

부하에 따른 비라우드니스 패턴의 변화를 파악하기 위해 Fig. 6과 같이 0 N-m, 1 N-m, 2 N-m 부하 조건에서 비라우드니스 패턴을 비교하였다. 그 결과 5 Bark ~ 12 Bark 대역에서 차이가 주요하게 발생하였는데, 이 대역은 모터의 주요 소음원인 브러쉬 마찰 소음과 토크 리플 소음이 발생하는 대역이다. 따라서 이 패턴의 경향을 정량적으로 파악하기 위해서 브러쉬 마찰 성분에 대한 부분라우드니스(Partial Loudness, PN)인 PN_B 와 토크 리플 성분에 대한 부분라우드니스인 PN_R 를 제안하였다.

PN_B 와 PN_R 의 계산방법은 다음과 같다. 먼저 Eqs. (1)~(2)를 이용하여 모터 주요 소음 성분이 발생하는 주파수를 추출한 후, Eq. (5)를 이용하여 주파수를 임계대역으로 변환한다. 그리고 변환된 임계대역으로

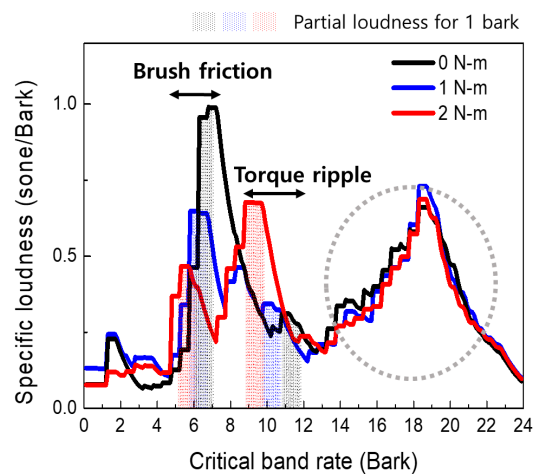


Fig. 6. (Color available online) Patterns of specific loudness for the main noise components of DC motor in the load conditions: 0 N-m, 1 N-m, 2 N-m.

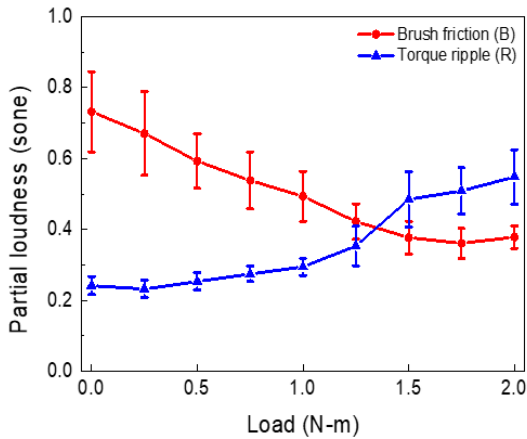


Fig. 7. (Color available online) Partial loudness, PN_B and PN_R related to brush friction and torque ripple according to the change of load.

부터 각 소음 성분 별 1 Bark에 해당하는 임계대역으로 비라우드니스 패턴을 적분하여 PN_B 와 PN_R 을 계산하였다. 한편 14 Bark ~ 22 Bark(2000 Hz ~ 9500 Hz)에 해당하는 광대역 소음도 주요하게 발생한다. 이 광대역 소음은 모터 가진 성분들의 모드중첩과 기어 마찰 가진으로 부품공진 등에 의한 구조기인 소음으로 판단된다. 하지만 소음원을 특정하기 어렵고 부하 변화에 대한 영향이 미미하여 본 연구에서는 다루지 않겠다.

Fig. 7은 전 부하조건에서 PN_B 와 PN_R 의 경향을 비교하여 나타낸 것이다. 부하 증가 시 PN_B 는 감소하고 PN_R 은 증가하는 경향성을 파악할 수 있다.

3.1.3 부하에 따른 모터 소음의 변화 원인

3.1.2에서 파악한 모터 소음 변화의 원인을 규명하기 위해 모터 구동 시 발생하는 물리적 특성을 이용하고자 한다. 먼저, 부하 증가 시 PN_B 이 감소하는 원인에 대하여 브러쉬와 정류자 간의 파워 손실(power loss)을 나타내는 Eq. (7)^[9]를 통하여 살펴보았다.

$$P_b = \mu_f \times p_c \times A_c \times (rw), \tag{7}$$

여기서 μ_f 는 마찰계수, p_c 는 접촉압력, A_c 는 접촉면적, rw 는 접선속도이다. 대상 모터는 μ_f, p_c, A_c 항은 일정하지만, rw 항은 Fig. 3(a)에서 나타났던 것처럼 부하 증가 시 감소한다. 수식 관계에 따라 부하 증가

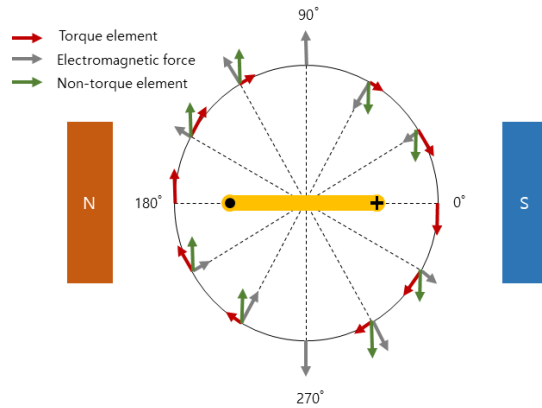


Fig. 8. (Color available online) Schematic diagram of DC motor torque ripple generation.

시 P_b 가 감소하게 되는데 P_b 는 소음 또는 열에 해당한다고 볼 수 있다. 따라서 부하 증가 시 브러쉬 마찰 소음의 감소 경향이 규명된다. 다음으로, 부하 증가 시 PN_R 이 증가하는 원인에 대하여 모터 회전에 따른 토크의 특성을 통하여 살펴보았다. Fig. 8은 DC 모터에서 전류 인가 시 발생하는 전자기력과 토크를 모식화한 것으로, 회전자 1회전 시 전자기력과 토크의 변화를 순차적으로 설명하면 다음과 같다. 시계 방향으로 0°에서 270°로 향할수록 전자기력은 점차 증가하고 토크는 점차 감소하며, 270°에서 180°를 향할수록 전자기력은 점차 감소하고 토크는 점차 증가한다. 그리고 180°에서 90°를 향할수록 전자기력은 점차 증가하고 토크가 점차 감소하며, 90°에서 0°를 향할수록 전자기력은 점차 감소하고 토크는 점차 증가한다. 즉, 모터 구동 시 토크 리플이 발생하며, 전자기력 리플과 역 위상의 관계를 가진다. 모터의 최종 토크는 회전자 공극수와 고정자 극수에 따른 토크들의 합과 같으며, 부하 증가 시 토크 리플 정도의 증가로 인하여 토크 리플 소음이 증가한다고 볼 수 있다.

3.2 DC 모터의 소음 성능 곡선

앞서 제안한 PN_B 와 PN_R 를 이용하여 부하에 따른 모터 소음의 변화 특성을 나타내기 위한 방법으로 소음 성능 곡선을 제안한다. 첫 번째 곡선은 부하별로 라우드니스 대비 PN_B 와 PN_R 각각의 기여도를 제시하는 곡선으로 Fig. 9과 같이 나타낸다. 이 곡선

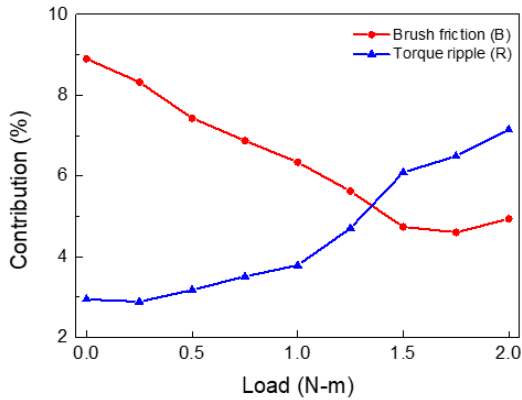


Fig. 9. (Color available online) Contribution of PN_B and PN_R to total loudness according to the change of load, respectively.

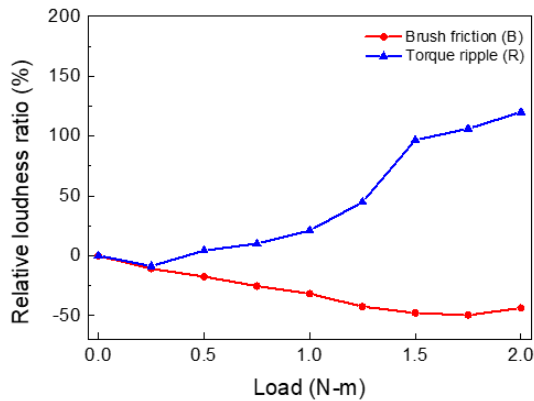


Fig. 10. (Color available online) Relative loudness ratio of PN_B and PN_R at the specific load condition to PN_B and PN_R under the no-load condition, respectively.

은 무부하 또는 시스템 부하 조건에서 모터의 라우드니스를 저감하기 위한 타겟 설정의 가이드 자료로 활용될 수 있다. 두 번째 곡선은 무부하 대비 부하 조건에서 PN_B 와 PN_R 각각의 변화도를 제시하는 곡선으로 Fig. 10과 같이 나타낸다. 이 곡선은 모터 선정 또는 시스템 개선 과정에서 모터 소음의 추세를 파악하기 위한 가이드 자료로 활용될 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 DC모터를 대상으로 부하에 따른 소음 변화를 파악할 수 있는 인자로 PN_B 와 PN_R 을 제안하였으며, 부하 증가에 따라 PN_B 는 감소하고

PN_R 은 증가하는 경향을 확인하였다. 이렇게 나타나는 경향의 원인에 대해서는 모터 구동시 발생하는 물리적 특징을 이용하여 규명하였다.

그리고 PN_B 와 PN_R 을 이용하여 부하에 따른 모터 소음의 변화 특성을 나타내기 위한 방법으로 모터 소음 성능 곡선들을 제안하였다. 이 곡선들은 모터 소음의 제어, 모터 선정, 시스템 개선 등을 위한 가이드 자료로 활용될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 산업통상자원부 “산업 전문 인력 역량 강화 사업”의 재원으로 한국산업기술진흥원(KIAT)의 지원을 받아 수행되었습니다(N0002428).

References

1. S. H. Kim, D. C. Park, H. H. Jo, W. C. Sung, and Y. J. Kang, “The development and application of sound quality index for the improving luxury sound quality of road vehicle power window system” (in Korean), *Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng.* **24**, 108-116 (2014).
2. ISO 226, *Acoustics - Normal Equal Loudness Level Contours*, 2003.
3. F. Lin, S. Zuo, W. Deng, and S. Wu, “Noise prediction and sound quality analysis of variable-speed permanent synchronous motor,” *IEEE Trans. Energy Convers.* **32**, 698-706 (2017).
4. Y. T. Cho, “Characterizing sources of small DC motor noise and vibration,” *Micromachines*, **9**, 698-706 (2018).
5. H. A. Toliyat and G. B. Kliman, *Handbook of Electric Motors* (CRC Press, New York, 2004), pp. 327-364.
6. ISO 532-1, *Acoustics - Methods for Calculating Loudness - Part1: Zwicker Method*, 2017.
7. H. Fastl and E. Zwicker, *Psychophysics - Facts and Models, 3rd Ed.* (Springer-Verlag, Berlin, 2006), Chap. 8.
8. H. Jeong, *Sound quality analysis of nonstationary acoustic signals* (in Korean), (Ph.D. thesis, KAIST, 1999).
9. W. Tong, *Mechanical Design of Electric Motors* (CRC Press, New York, 2014), pp. 385.

저자 약력

▶ 차 수 호 (Su-Ho Cha)



2014년 2월 : 국민대학교 나노전자물리학과 학사
2016년 2월 : 국민대학교 보안-스마트전기자동차공학과 석사
2017년 3월 ~ 현재 : 국민대학교 보안-스마트전기자동차공학과 박사과정

▶ 신 성 환 (Sung-Hwan Shin)



1997년 2월 : KAIST 기계공학과 학사
1999년 2월 : KAIST 기계공학과 석사
2004년 8월 : KAIST 기계공학과 박사
2004년 9월 ~ 2005년 8월 : KAIST 기계기술연구소 BK21 연수연구원
2005년 9월 ~ 2008년 12월 : 일본 Seikei University Post Doc.
2008년 12월 ~ 2013년 1월 : 한국원자력연구원 선임연구원
2013년 3월 ~ 현재 : 국민대학교 자동차공학과 부교수