

프로니 분석을 이용한 주행 환경에서의 브레이크 래틀 소음 발생 특성 분석

Signal Processing for MoC Brake Rattle Noise of Moving Vehicles Using Prony Analysis

이재철*, 곽윤상*, 박준홍*†

Jaecheol Lee*, Yunsang Kwak* and Junhong Park*†

초 록 MoC(motor on caliper)를 이용한 자동차 브레이크 시스템이 장착되었을 때 도로 조건에 의해 발생하는 진동으로 래틀 소음 발생 가능성을 검증하기 위하여, 무향실에서 가진기(quiet shaker)를 이용하여 차량상태와 동일한 진동을 인가하면서 소음을 동시에 측정하여 실제 운행 중에 발생하는 MoC 래틀 소음을 재현하였다. 소음 발생 조건 및 원인을 파악하는 신호 처리 방법을 제안하였다. 원리 시험을 통해서 충돌되는 두 부품 간의 고유 진동수를 확인하고, 소음이 발생할 때의 음압/진동 신호의 임팩트성 소음에 대해 주파수 성분을 분석하여 소음 발생 빈도에 영향을 줄 수 있는 인자를 찾는 방법을 제안하였다. 더불어 래틀 소음을 분석하기 위한 FFT 주파수 분석을 실시하고 장단점을 분석하였으며, 단점을 보완하기 위한 프로니 분석 방법에 대해서 실제 두 가지 다른 브레이크 시스템의 내구 테스트 결과에 적용하여 효율성을 입증하였다.

주요용어: MoC 브레이크, 래틀 소음, 프로니 분석, 푸리에 변환

Abstract To verify the possibility of generating rattling noise from a motor on caliper brake system, a test was conducted using a caliper excited with vibrations similar to that in a vehicle running on actual roads; this test was conducted using a quiet shaker installed in an anechoic room. After several hours of external excitation, the test assembly was loosened, and the frequency of rattling noise generation increased. A microphone was used to record the generated noise. The measured signals were analyzed by conventional spectrum analysis. Since the noise is generated as an impact response, the advantages of employing Prony analysis was discussed, and the results were compared to those obtained using conventional fast Fourier transforms. The accuracy of Prony analysis was through endurance tests on different brake systems.

Keywords: MoC Brake, Rattle Noise, Prony Analysis, Fourier Transform

1. 서 론

차량이 과속방지턱이나 비포장도로 등을 지나갈 때 발생할 수 있는 브레이크 래틀 소음은 운전 중 고객의 성가심을 유발할 수 있는 요소로써 반드시 개선이 되어야 하는 항목이다. 따라서 래틀 소음 개선을 통한 신뢰성 확보를 위하여 많은 연구가 진행되었으며, 실제 차량이 아닌 대상 시험 조건에서 소음을 재현하기 위한 평가 방법이

개발되고 있다[1-3]. 브레이크에서 발생하는 래틀 소음의 경우 특정한 발생 주기를 갖지 않고, 외부 가진에 의해 발생하는 부품간 충돌에 의해 임펄스 형태의 소음 특성을 가지고 있다. 충돌에 의해 발생하는 구조물 소음의 경우 부품 각각의 모드 특성으로 인한 소음이 발생하기 때문에 구조물의 결합 평가 및 개선을 위해서 주파수 분석이 필수적이다. 그러나 브레이크 래틀 소음의 경우 많은 소음 발생 원인부품들에 의해 다발적으

[Received: March 2, 2015, Revised: May 8, 2015, June 25, 2015, Accepted: July 2, 2015] *한양대학교 융합기계공학부, †Corresponding Author: Department of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea (E-mail: parkj@hanyang.ac.kr)

로 충돌이 발생하고, 그로 인해 발생하는 소음의 분석이 정확히 이루어지기 어렵다. 이로 인해 브레이크에서 발생하는 래틀 소음의 특성을 정량화하고 정확히 분석하기 위해서는 개선된 분석법 적용이 필요하다[3-4].

기존의 주파수 분석 방법으로 널리 사용되는 푸리에 변환은 주기적인 신호를 정현파의 조합으로 표현하기 때문에 아주 짧은 시간에 발생하는 비주기적인 임펄스 신호에 대한 정확한 특성을 확인하기 어렵다. 따라서 이러한 단점을 보완하고 시스템의 특성을 도출하기 위해서 프로니 분석을 적용한 연구가 진행되었다. 지수적으로 감쇠하는 신호의 특성이나 신호의 왜곡 정도를 도출하는 방법에 대한 연구가 진행되었으며[5-7], 분석하고자 하는 시스템의 특성에 따라 프로니 분석 적용 및 수정을 통해 발생 신호를 분석하는 연구가 진행되었다[6-8]

본 논문에서는 새롭게 개발된 MoC 브레이크에서 발생하는 비주기적인 임펄스 소음의 특성을 분석하는 방법을 제안하고자 한다. 가진기를 이용하여 브레이크의 래틀 소음을 재현하고, 소음 발생 조건 및 원인에 대하여 기본적인 연구를 검토하였다. 그리고 시험을 통해서 두 부품 간의 고유 진동수를 확인하고, 소음이 발생할 때의 소음/진동 신호를 주파수 분석하여 소음에 영향을 줄 수 있는 인자를 찾아내는 방법을 검토하였다. 더불어 향후 프로니 분석 방법을 이용하여 내구 시험 시간에 따른 래틀 소음의 특성 변화에 대해서도 검토해 보고자 한다.

2. 브레이크 MoC 래틀 소음의 재현 및 분석

2.1. 브레이크 MoC 래틀 소음 재현 방법

Fig. 1과 같이 실차 상태에서 래틀 소음을 재현하기 위해 특수하게 제작된 래틀로를 주행하여 소음 발생 유무를 확인한다. 하지만 재현 평가 및 개선 효과를 검증하는 시험을 진행하기 위해서는 많은 시간과 재원이 소요된다. 따라서 시험의 용이성 및 정확성 향상을 위해서는 대상 시험의 검토 및 선정이 반드시 필요하다. 따라서 본 논문에서는 가진기를 이용한 재현평가를 적용하여 평가를 진행하였다.



Fig. 1 Vehicle tests on the actual rattle road

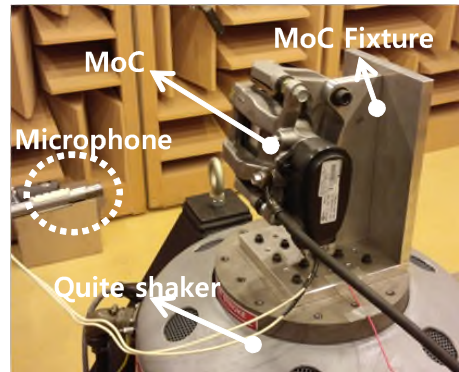


Fig. 2 Test condition implemented in an anechoic room to measure rattle noise generation

보다 정확한 래틀 소음을 재현하기 위해서는 시험 조건 설정이 무엇보다 중요하다. 가진기를 이용한 시험을 위해 MoC 장착 각도 등 동일한 너클 장착 조건이 적용된 실차 상당 fixture를 제작하였다. 가진기 가진 방향은 주된 진동이 전달되는 상하(vertical) 방향을 채택하였다. 또한 기타 잡음 등 외란의 영향을 최소화하기 위하여 평가 장소는 반무향실에서 시험을 진행하였다. 최종적으로 상기 조건을 적용하여 래틀 소음을 재현하고, 마이크로폰을 이용하여 계측된 음압 신호를 통해 주파수 분석을 진행하였다(Fig. 2). 또한, 실제 차량에서 래틀로 주행시 발생하는 진동을 계측하기 위해서 가속도계를 부착하고, 계측된 신호를 PSD(power spectral density) 변환하여 가진기의 입력가진신호로 사용하였다. 이때 가진 진동의 크기는 변환된 각 주파수별 PSD값으로 결정된다.

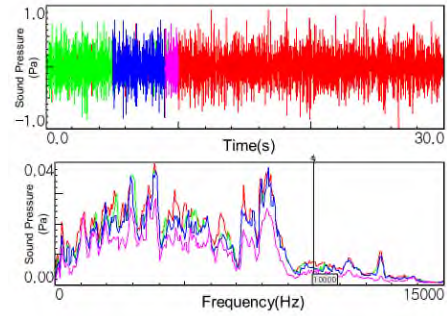
2.2. 푸리에 변환을 활용한 주파수 분석 결과

MoC 브레이크는 종래의 캘리퍼에 추가로 전자식 파킹 브레이크가 결합된 새로운 시스템이다. 그래서 기어와 모터류 부품 등의 복잡한 구조에서 래틀 소음이 더 자주 발생한다. 따라서 소음 발생 원인을 찾기 위해, 소음 유발 원인부품간의 연관성을 분석할 필요가 있다. 발생원인 분석을 위해서 발생 소음의 주파수 성분 분석이 중요하다. 우선 재현된 소음 발생을 마이크로폰을 이용하여 음압신호로 계측하고, 이 신호들을 주파수 분석을 진행하였다(Fig. 3). 하지만 전체 시간 구간 또는 부분적 시간 구간에 대한 주파수 분석 결과, 가진기의 가진 주파수 대역인 300 Hz 이하 대역을 제외하면 래틀 소음은 주로 300 Hz ~ 10 kHz 대역에서 발생한다는 사실을 알 수 있다. 하지만 소음에 직접적으로 영향을 미치는 지배적인 주파수 모드를 분석할 수 없었다. 충돌 소음에 영향을 주는 모드 및 댐핑 특성을 더 명확하게 추론할 수 있도록 기존의 FFT방법에서 신호 처리 방법의 영향성을 검토하였다. Fig. 4에서 나타낸 것과 같이 음압 신호의 시간을 더 작게 확대하여, 주파수 분석 시 사용되는 윈도우함수의 크기를 조정하여 평균에 의한 영향을 감소시킨 뒤 각 충격신호 별로 주파수 분석을 진행하였다. 그 결과, 추가 분석에서도 소음에 직접적인 영향을 주는 주된 주파수 모드를 별도로 분리하여 판단하는 것이 쉽지 않다. 내구시험의 정확도를 향상시키기 위해 충돌 소음 유무와 빈도 분석이 필요하며 이를 더 용이하게 하는 프로니 방법을 사용하였다.

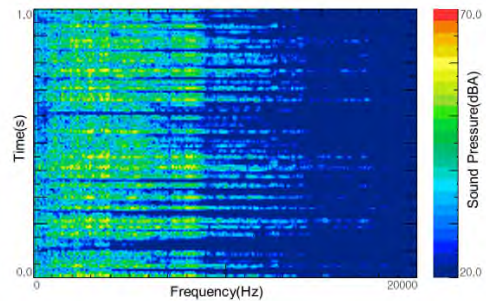
3. 프로니 분석을 이용한 신호 특성 도출

프로니 분석은 시간 데이터에서 지수적으로 감쇠하는 정현파 신호의 합으로 표현하는 신호 처리 방법이다. 이를 통해 신호를 구성하고 있는 성분들의 주파수, 진폭, 위상 등을 해석할 수 있다. 원신호를 $\hat{y}(t)$ 라고 한다면 프로니 분석을 통해 다음과 같은 신호의 선형 합으로 표현할 수 있다.

$$\hat{y}(t) = \sum_{i=1}^n A_i e^{\sigma_i t} \cos(2\pi f_i + \phi_i) \quad (1)$$



(a)



(b)

Fig. 3 (a) Rattle noise frequency analysis results (b) STFT analysis results

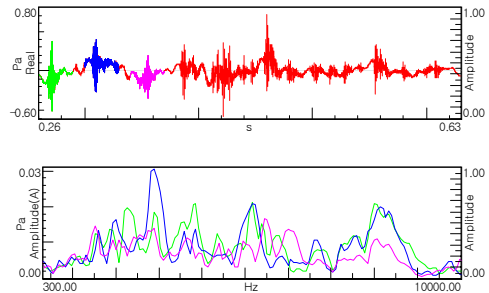


Fig. 4 Additional rattle noise frequency analysis

n 은 원신호를 표현하기 위해 사용된 항들의 개수를 의미하며, A_i 는 i 번째 항의 신호의 크기, σ_i 는 감쇠계수, f_i 와 ϕ_i 는 주파수와 위상을 의미한다. 또한, 신호는 연속적이지 않기 때문에, 데이터 샘플의 개수를 N 개라고 할 때 식을 이산적인 형태로 표현하고, 오일러 공식을 사용하여 exponential함수로 표현하면 다음과 같다.

$$y[k] = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{2} e^{j\theta_i} e^{j(\sigma_i + j2\pi f_i)k\Delta t}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

$$= \sum_{i=1}^n B_i \lambda_i^k \quad (2)$$

이 때, Δt 는 샘플간의 시간 간격이며 $y[k]$ 는 $k\Delta t$ 시간의 샘플을 의미한다. 따라서 B_i 와 λ_i 를 구하기 위해서 다음과 같은 3단계 해석을 진행한다.

3.1. 최소자승해를 통한 상미분방정식 풀이

먼저 식(2)에서 주어진 식은 다음과 같이 n 차 상미분방정식의 해로 가정할 수 있다. 또한 이산적으로 측정된 신호가 같은 시간 간격으로 존재할 경우 n 차 상미분방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sum_{i=0}^n a_{(n-i)} y[k+i] = 0, \quad k = 0, 1, \dots, N-n-1 \quad (3)$$

최고차항의 계수를 1로 하여, 이를 행렬 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} y[n] \\ y[n+2] \\ \vdots \\ y[N-1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y[n-1] & y[n-2] & \cdots & y[0] \\ y[n] & y[n-1] & \cdots & y[1] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y[N-2] & y[N-3] & \cdots & y[N-n-1] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[d] = [Y][a] \quad (5)$$

식(4)를 식(5)와 같이 표현할 수 있으며, 계수행렬 $[a]$ 를 구하기 위해서는 다음과 같은 최소자승해를 구하는 과정을 통해 도출된다.

$$[a] = ([Y]^T [Y])^{-1} [Y]^T [d] \quad (6)$$

3.2. 특성 방정식 풀이

3.1절에서 얻어진 상미분방정식(식(3))에 대한 특성방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\lambda^n - (a_1 \lambda^{n-1} + a_2 \lambda^{n-2} + a_3 \lambda^{n-3} + \cdots + a_n \lambda^0) = 0 \quad (7)$$

이 때 계수행렬 $[a]$ 는 3.1절에서 계산되었기 때문에, 식(7)의 근을 구하면 λ_i 를 얻어낼 수 있다.

3.3. 원신호의 특성 도출

앞선 3.2절에서 구한 λ_i 를 식(8)에 대입하여 행렬 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} y[0] \\ y[1] \\ \vdots \\ y[N-1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1^0 & \lambda_2^0 & \cdots & \lambda_n^0 \\ \lambda_1^1 & \lambda_2^1 & \cdots & \lambda_n^1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_1^{N-1} & \lambda_2^{N-1} & \cdots & \lambda_n^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$[U] = [A][B] \quad (9)$$

3.2절에서와 마찬가지로, 식(8)을 식(9)과 같이 표현할 수 있으며 다음과 같은 최소자승해를 통해 $[B]$ 행렬을 구할 수 있다.

$$[B] = ([A]^T [A])^{-1} [A]^T [U] \quad (10)$$

위와 같은 3단계 프로시니 분석을 통해 식(2)의 형태로 원신호를 표현이 가능하며, 각 항에 대한 주파수, 감쇠계수, 크기, 위상정보를 도출 할 수 있다.

4. MoC 브레이크의 래틀 소음 분석

4.1. MoC 브레이크 래틀 소음 측정 실험

MoC 브레이크의 상태에 따른 래틀 소음 발생 빈도를 파악하기 위해, full pad 상태와 half pad 상태의 브레이크에서 발생하는 소음을 측정하였다. Full pad는 사용이 되지 않은 브레이크를 의미하며, half pad는 차량 주행에 의한 마모로 인해 pad의 마찰면이 반으로 줄어 든 상황을 모사한 조건이다. 두 pad 조건의 차이는 Fig. 5에 나타내었다. 가진기를 이용하여 노면 진동을 브레이크에 가하고, 발생하는 래틀 소음을 측정하고



Fig. 5 Comparison between Full and half pad conditions

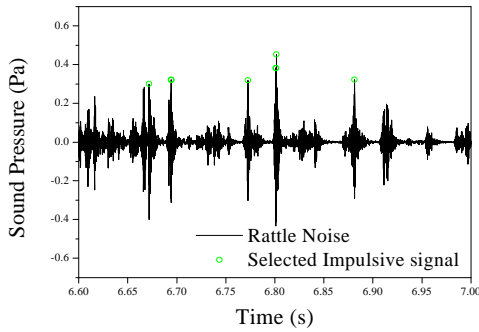


Fig. 6 Measurements of MoC brake rattle noise on the half pad condition

조건에 따른 차이를 비교하였다. 노면 진동에 의해 브레이크 모듈에서 충돌이 발생하였으며, 충돌에 의한 래틀 소음을 측정하고 프로니 분석을 통해 특성을 도출 및 비교하였다. 이때, 프로니 분석을 위해서는 래틀 소음 발생 시 신호의 선택 및 분석 구간이 중요한 요소이다. 따라서 분석을 위해 각 pad에서 발생하는 소음을 30초 동안 측정하고, 측정 데이터에서 충격에 의해 발생하는 임펄스 신호를 구별하여 각각의 임펄스 신호에 대한 프로니 분석을 적용하였다. 이때 30초 동안 발생하는 임펄스 신호의 개수는 full, half pad 각각 39개, 135개였으며 이는 마모상태를 재현한 half pad에서 래틀 소음이 더 많이 발생하는 것을 의미한다.

4.2. MoC 래틀 소음 측정 신호 분석

브레이크에서 발생하는 래틀 소음의 경우 부품 간 충돌에 의해 발생하는 소음이기 때문에 특정

한 모드 특성 주파수를 가지고 있을 것으로 예상된다. 프로니 분석을 위해 측정 소음 신호를 각각 임펄스로 분리하고 각각 분리된 신호에 대한 특성을 도출하였다. 이때 측정된 소음 신호를 Fig. 6에 나타내었으며, 발생한 임펄스 신호 중 노이즈와 확연히 구분 가능한 신호들을 선택하였다. 신호의 최대 크기가 0.3 Pa 이상이며, 최대 크기 전후로 발생하는 신호 기울기의 부호가 변화하는 지점을 검출하여 임펄스 신호로 선택하고 해당 신호에 프로니 분석을 적용하였다. 프로니 분석을 통해 각각 도출된 결과들은 합산되어 평균값으로 비교되어졌다. 이때, 분리된 하나의 임펄스 신호는 약 0.0005 ~ 0.0007초 정도로서 매우 짧은 시간에 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 푸리에 변환을 이용하여 래틀 소음의 특성을 도출한다면 약 1000 ~ 2000 Hz의 주파수 간격으로 분석이 되기 때문에 래틀 소음의 특성을 정확히 분석하기 어렵다. 또한 주파수 분석 해상도를 높이기 위해 임펄스 신호를 각각 분리하여 zero-padding을 적용하여 분석한 결과를 Fig. 7(a)에 나타내었으며, 푸리에 변환은 임의의 신호를 정현파의 선형 결합으로 표현하기 때문에 그래프에 나타낸 것과 같이 래틀 소음에 대한 단일 수치화 하는 것은 별도의 신호 처리가 필요하다.

Fig. 7(c)에 나타낸 것과 같이 프로니 분석을 이용할 경우 MoC 래틀 소음에 대한 정확한 주파수 특성을 도출함과 동시에 주파수별 감쇠계수를 얻어내는 것이 가능하다. 프로니 분석을 이용하여 각각의 래틀 소음의 특성을 도출하기 위해 order는 10으로 설정하여 5개의 기저함수를 이용하여 래틀 소음 신호를 재현하였다. 프로니를 이용한 소음신호의 재현 결과 결정계수(R²) 값은

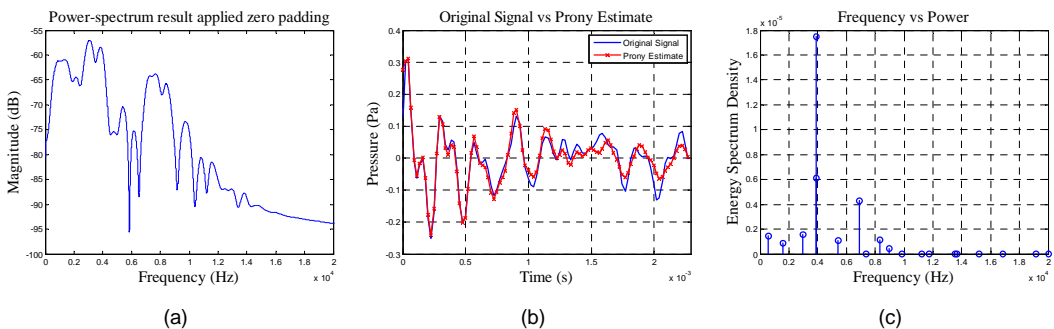


Fig. 7 (a) Power-spectrum results applied zero padding(df=2.6 Hz) (b) Comparison between original signal and Prony analysis result (c) Frequency results of Prony analysis for full pad MoC rattle noise

약 0.85 이상으로 MoC 래틀 소음을 비교적 정확하게 근사화가 가능하였다. 이는 MoC 래틀 소음에 영향을 미치는 주요한 모드는 5개 이하로 가정하는 것이 무방함을 의미한다. 각각의 임펄스 신호에서 도출된 결과를 평균하고 도출된 성분 중 주요한 두 성분을 비교하였다. Full pad 상태의 소음 특성 주파수는 3427 Hz와 3777 Hz, 감쇠계수는 각각 0.341, 0.209로 도출되었다. 그러나, half pad 상태의 경우 2966 Hz와 3882 Hz, 감쇠계수는 각각 0.270, 0.230으로 도출되었다. 따라서 프로니 분석을 통해 브레이크 상태에 따른 래틀 소음주파수 특성의 차이를 정량화하여 분석하는 것이 가능하며, 이 결과를 통해 full pad와 half pad 상태에서의 래틀 소음을 일으키는 주요한 부품이 다르다는 것을 나타낸다. 결과적으로, 프로니 분석을 통해 MoC 래틀 소음의 주파수 특성을 정확히 분석함으로써 이를 통해 상태에 따라 래틀 소음 발생 원인을 찾는 것이 가능할 것이다.

5. 결론

이 논문에서 MoC 래틀 소음 발생인자를 찾는 신뢰성 분석 방법을 제안하였다. 시험의 용이성 및 정확성 향상을 위해 가진기를 이용한 래틀 소음 평가를 진행하였다. MoC 래틀 소음은 주로 2000 Hz ~ 3000 Hz 대역에서 발생하며, 기존 푸리에 변환 방법으로는 주요 주파수 특성을 파악하기 어려웠다. 이를 보완하기 위해 프로니 분석을 적용하였다. 래틀 소음 원리 평가를 통해 프로니 분석의 유효성 확인 및 소음 발생시 충돌이 되는 두 부품 간의 고유진동수 및 감쇠 특성이 나타내었다. 래틀 충격 신호를 프로니 분석을 이용하여 분석할 경우, 5개의 주파수로 약 0.85 이상의 결정계수로 근사화되어 래틀 소음은 5개 이하의 모드가 영향을 준다는 것을 알 수 있었다. 프로니 분석을 통해 충돌에 의해 발생하는 래틀 소음의 주파수 특성과 감쇠특성을 도출할 수 있었으며, 패드의 마모상태에 따라 다른 특성을 나타내는 것을 알 수 있었다. 이는 MoC 부품의 모드 주파수 비교를 통해 래틀 소음의 원인을 찾는 데 활용될 수 있고 신뢰성을 검증하는 테스트 방법으로 적용되었다.

후 기

본 연구는 국토교통부 철도기술연구개발사업의 연구비지원(15RTRP-B072484-03)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] K. Krishnapur, J. Luo, I. Malinow and A. Lock, "Brake rattle: Vibration and noise testing," SAE Technical Paper, No. 2002-01-2608 (2002)
- [2] K. Xu, "Test technique and objective rating method to quantify automotive brake rattle," SAE Technical Paper, No. 2009-01-3025 (2009)
- [3] S. Hamdi, S. Moore, A. Papinniemi and D. Stanef, "Quantification of brake pad rattle noise-correlating accelerometer measurements with subjective ratings," SAE Technical Paper, No. 2007-01-3962 (2007)
- [4] Young H, Kim, "Impact-resonance testing of concrete structures," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 23, No. 5, pp. 526-530 (2003)
- [5] R. Kumaresan and D. W. Tufts, "Estimation the parameters of exponentially damped sinusoids and pole-zero modeling in noise," *Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Vol. 30, No. 6, pp. 123-123 (1982)
- [6] R. Carriere and R. L. Moses, "High resolution radar target modeling using a modified prony estimator," *Antennas and Propagation*, Vol. 40, No. 1, pp. 123-123 (1992)
- [7] A. Bracale, P. Caramia and G. Carpinelli, "Adaptive Prony method for waveform distortion detection in power systems," *Electrical Power and Energy System*, Vol. 29, No. 1, pp. 371- 379 (2007)
- [8] J. Xiao, X. Xie, Y. Han and J. Wu, "Dynamic tracking of low-frequency oscillations with improved Prony method in wide-area measurement system," *Power Engineering Society General Meeting*, Vol. 1, pp. 1104-1109 (2004)