

차량 클러치 스프링 댐퍼의 진동 전달률 해석 및 측정

Vibration Transmissibility Analysis and Measurement of Automotive Clutch Spring Dampers

장 재 덕* · 김 기 우† · 김 원 진**
Jae-Duk Jang, Gi-Woo Kim and Won-Jin Kim

(Received August 22, 2013 ; Revised October 8, 2013 ; Accepted October 8, 2013)

Key Words : Torsional Torque Vibration(비틀림 토크 진동), Vibration Isolation(진동 절연), Vibration Transmissibility(진동 전달률), Clutch Spring Damper(클러치 스프링 댐퍼)

ABSTRACT

The input torque ripple induced by combustion engines is a significant source of NVH(noise, vibration and harshness) problem in automotive transmissions. Because this torque fluctuation is primarily transmitted to the input shaft of automotive powertrains(e.g., automatic transmissions) when the lock-up clutches are closed, a torsional damper with helical springs is generally inserted between engine and transmissions to isolate the input vibratory energy, which is essential for the passenger comfort. The torsional vibration isolator exhibits frequency ranges in which there is low vibration transmissibility. However, the isolation performance is currently evaluated through the static torsional spring characteristics. In this study, the transmissibility of torsional spring dampers, essential dynamic performance index for vibration isolator, is first experimentally evaluated.

1. 서 론

최근 전기 자동차와 같은 친환경 자동차에 대한 연구 및 개발이 활발하게 이루어짐에도 불구하고 대부분의 자동차에서 현재까지 주 동력원으로 사용하는 내연기관(internal-combustion engine)은 흡입, 압축, 팽창 및 배기 행정 과정에서 발생하는 혼합 가스 압력, 피스톤 왕복 운동의 불균형 등에 의해 엔진 토크의 변동(fluctuation, ripple)이 필연적으로 발생하는 단점이 존재한다.

이러한 엔진 토크 진동은 동력전달 계(powertrain system)로 전달되어 불필요한 NVH(noise, vibration, and harshness) 문제를 발생시키며 자동차 감성 품질을 악화시켜 주요 소비자 불만 요인이 되고 있다. 특히 자동변속기(automatic transmission, AT) 장착 차량은 연비를 개선하기 위해 토크 컨버터(torque converter) 내부에 특정 운전 조건에서 엔진과 변속기 입력 축을 수동변속기와 같이 체결시키는 직결 클러치(lock-up clutch)를 장착하고 있기 때문에 엔진으로부터 유입되는 엔진 토크 진동은 소음진동 문제를 발생 시킬 뿐만 아니라 진폭이 큰 비틀림 진동에 장시간 노출될 경우 동력 전달 계통 부품의 내구

† Corresponding Author ; Member, School of Automotive Engineering, Kyungpook National University
E-mail : gwkim2@knu.ac.kr
Tel : +82-54-530-1407, Fax : +82-54-530-1409

* Korea Powertrain Co., LTD.

** Member, Department of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung University

A part of this paper is presented at the KSNVE 2013 Annual Autumn Conference

† Recommended by Editor Don Chool Lee

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

성을 저하시킨다.

따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 클러치에 스프링 댐퍼(spring damper)를 설치하여 전달되는 토크 진동 폭을 감소시키고 있다⁽¹⁾. AT이외에도 최근 친환경 자동차의 선두 주자로 각광받고 있는 병렬형 하이브리드 전기 자동차(parallel type hybrid electric vehicle)에 탑재되는 다단 AT, 듀얼 클러치 변속기(dual-clutch transmission, DCT)에도 연비 개선을 위해 비효율적인 토크 컨버터 대신 엔진 클러치(engine clutch)를 사용하므로 토크 진동 저감을 위한 비틀림 댐퍼의 진동 절연 성능에 대한 관심이 더욱 커지고 있다. 또한 다양한 엔진 신기술의 발달과 디젤 엔진의 대중화로 인해 엔진 토크 진동의 진폭이 지속적으로 증대되고 있는 추세이기 때문에 비틀림 진동 절연 성능 개선 및 성능 평가에 대한 연구가 반드시 필요하다⁽²⁾.

클러치 스프링 댐퍼는 Fig. 1에 나타난 형상과 같이 클러치 원주상에 헬리컬 코일 스프링(helical coil spring)을 배치한 구조로 구성되어 있으며 운전 영역에서 작동하는 1단 스프링과 최대 입력 토크를

감당하는 2단 스프링으로 구성된 다수의 이중 스프링(dual springs)을 일반적으로 사용한다. 이때 스프링 사이의 마찰 등으로 인해 이력(hysteresis) 현상이 발생되어 진동 감쇠(damping)가 가능하지만 기본적으로 우수한 진동 절연 성능을 위하여 최대한 낮은 고유진동수를 나타내도록 1단 스프링 상수를 설계한다. 이러한 정적 스프링 특성은 구동계(driveline system) 진동 모드 및 차량 NVH 해석에 사용되고 있다. 그러나 자동차용 비틀림 댐퍼가 기본적으로 진동 절연(vibration isolation)이 기본 기능임에도 불구하고 시험 방법 및 진동 절연 원리에 대한 이해 부족으로 인해 공진 외(off-resonance) 영역에서의 진동 절연 성능에 대한 해석 및 실험적 고찰은 병진 진동 절연기(translational vibration isolator)에 비해 거의 전무한 실정이다⁽²⁻⁴⁾. 또한 비틀림 댐퍼가 동적인 운전 조건에서 작동하는 상황임에도 불구하고 정적 비틀림 스프링 특성으로 동적 성능을 간접적으로 평가하고 있는 실정이다.

이 연구에서는 차량용 클러치 스프링 댐퍼의 동적 성능을 평가하기 위해 진동 절연 성능을 이론적으로 해석한 후, 진동 절연 성능을 평가하는 대표적인 성능 지표인 진동 전달률(vibration transmissibility)을 실험적으로 측정하여 상호 결과를 비교하였다. 클러치 스프링 댐퍼의 진동 전달률을 실험적으로 측정하기 위한 전용 시험기가 없기 때문에 이 연구에서 사용한 방법은 클러치 스프링 댐퍼의 내구 성능 평가를 위해 사용하는 저관성 다이내모 시험기(lower inertia dynamometer)를 대신 사용하여 실용성 및 타당성을 입증하였다. 실제 차량의 운전 조건을 최대한 상사한 상태에서 내구 시험이 가능하도록 개발된 시험 장비로 다양한 형태의 가진(excitation) 입력이 가능하기 때문에 전달률 측정에 활용하였다. 파워 스펙트럼 밀도(power spectrum density, PSD) 함수를 사용한 신호 처리 방법으로 전달률을 추정 한 후 직접 시험한 결과와 비교하여 전달률 측정 방법의 타당성을 검증하였다.

2. 비틀림 진동 전달률 해석

현재 승용차에 적용중인 대부분의 비틀림 스프링 댐퍼는 주 운전 영역에서는 1단계 스프링이 대부분 작동하여 진동 절연기 역할을 담당하므로 Fig. 2와

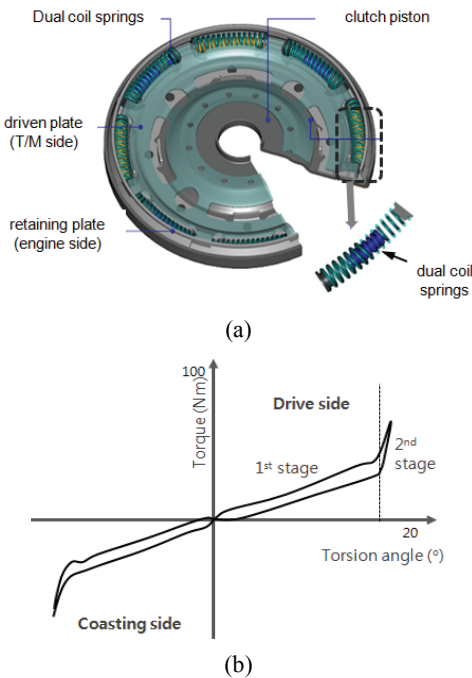


Fig. 1 Torsional vibration isolator for automotive clutch damper (a) schematic (b) its torsional spring characteristics

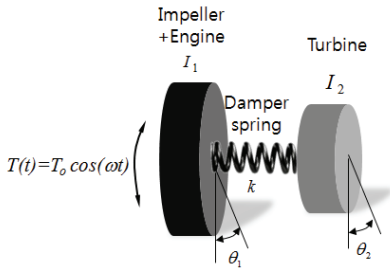


Fig. 2 Torsional vibration isolation system(2-DOF)

같이 2자유도(two degree of freedom)를 가진 진동 절연기로 모델링 할 수 있다.

이때 스프링의 마찰, ATF(automatic transmission fluid)의 점성 등에 의해 발생하는 댐핑력(damping force)이 무시할 수 있을 정도로 아주 작다고 가정 하면 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 I_1 \ddot{\theta}_1 + k(\theta_1 - \theta_2) &= T_o \cos \omega t \\
 I_2 \ddot{\theta}_2 + k(\theta_2 - \theta_1) &= 0
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서 k 는 1단 스프링 상수(1950 Nm/rad), I_1 는 구동(엔진)측 등가 관성모멘트(추정치: 0.36 kgm²), I_2 는 출력(터빈) 측 관성모멘트(추정치: 0.2 kgm²), ω 는 가진진동수(excitation frequency)를 나타내며 한 개의 강체 운동 모드가 존재하는 반한정(semi-definite) 시스템이다. 이때 운동방정식의 해가 조화 함수(harmonic function, $\theta = \Theta \cos \omega t$)라고 가정하여 운동방정식에 대입하면 식 (2)와 같이 유도되어 크기에 대한 해를 식 (3), (4)와 같이 풀 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \Theta_1(k - I_1\omega^2) - \Theta_2k &= T_o \\
 -\Theta_1k + \Theta_2(k - I_2\omega^2) &= 0
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

$$\Theta_1 = \frac{(k - I_2\omega^2)T_o}{[(k - I_1\omega^2)(k - I_2\omega^2) - k^2]}
 \tag{3}$$

$$\Theta_2 = \frac{kT_o}{[(k - I_1\omega^2)(k - I_2\omega^2) - k^2]}
 \tag{4}$$

이때 댐퍼 스프링(절연기)를 통해 전달되는 출력 토크의 진폭은 식 (4)를 이용하여 다음과 같이 유도 할 수 있다.

$$T_i = -I_2\omega^2\Theta_2 = \frac{-I_2k\omega^2T_o}{[(k - I_1\omega^2)(k - I_2\omega^2) - k^2]}
 \tag{5}$$

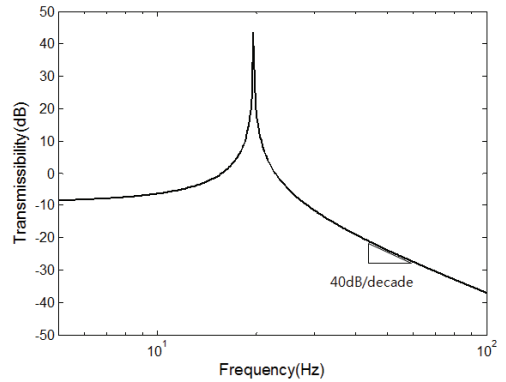


Fig. 3 Simulated vibration transmissibility

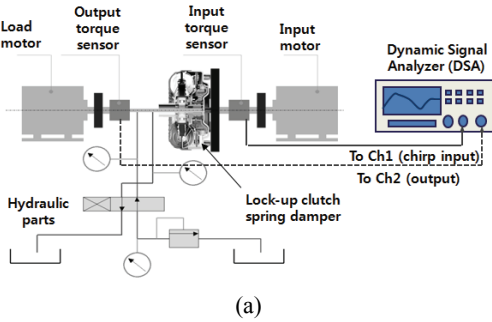
따라서 진동 전달률을 회전 변위를 사용하는 대신 입력 토크와 전달된 출력 토크 크기의 비를 나타 내는 다음 식과 같이 정의할 수 있다⁽⁷⁾.

$$T_r = \frac{|T_i|}{|T_o|} = \left| \frac{-I_2k\omega^2}{[(k - I_1\omega^2)(k - I_2\omega^2) - k^2]} \right|
 \tag{6}$$

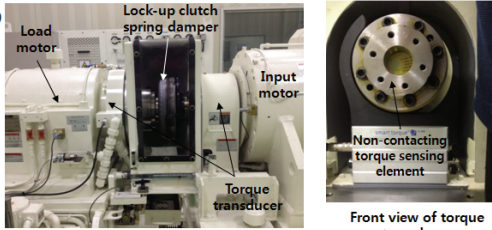
식 (6)을 가진주파수를 변경시키면서 Fig. 3과 같 은 진동 전달률을 시뮬레이션 한 결과 단일 공진주 파수(19.6 Hz) 이후에서 전달률이 40 dB/decade (roll-off rate)로 감소하는 전형적인 진동 절연기(2차 선형 시스템)의 특성을 나타낸다.

3. 비틀림 진동 전달률 측정

이 연구에서는 클러치 스프링 댐퍼의 진동 전달 률을 실험적으로 측정하기 위해 정밀 모터 제어가 가능한 저관성 내구 시험기(Meidensha Co. 제작, 최대 입력 토크 3 kNm, 최대 회전수 7000 RPM) 및 최신 토크 측정 기술을 사용하였다. 입력 토크 센서 (model: HBM T12, 3 kNm) 및 출력 토크 센서 (model: HBM T10F, 2 kNm)는 회전 변압기(rotary transformer)를 사용하여 비접촉(non-contacting) 방 식으로 축 토크를 측정하여 잡음(noise)을 최소화시 키는 장점을 가지고 있다⁽⁸⁾. 입력 토크 센서는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 입력 모터와 클러치 스프링 댐퍼의 리테이닝 플레이트(Fig. 1)를 연결하는 전달 축(transmission shaft)에 설치하였으며, 출력 토크 센서는 부하(load) 모터와 클러치 스프링 댐퍼의 드 리븐 플레이트(Fig. 1)를 연결한 전달 축에 설치하였



(a)

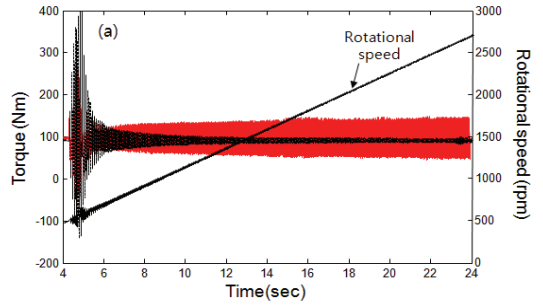


(b)

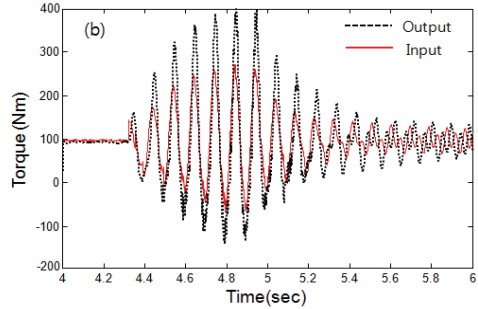
Fig. 4 Test facility (a) overview (b) low inertia dynamo-meter with torque transducers

다. 입출력 토크 신호는 샘플링 주파수(sampling frequency)를 1 kHz로 설정 하여 데이터 수집 장비(model: keyence NR-500)를 사용하여 측정하였다. 신호의 왜곡을 방지하지 위해 아날로그 저역 통과 필터(analog low-pass filter)를 사용하지 않고 차단 주파수(cut-off frequency)가 200 Hz로 설정된 버터워스(Butterworth) 디지털 저역 통과 필터를 사용하여 주파수 분석을 통해 영향을 미치는 신호 잡음(noise)과 스프링 상수가 변하는 영역에서 작동시 발생하는 비선형 진동 성분을 제거하였다. 식 (6)에 나타난 진동 전달률은 입출력 신호의 동적 특성을 나타내는 주파수응답함수(frequency response functions, FRFs)과 동일하므로 2개의 채널을 가진 동적 신호 분석기(dynamic signal analyzer, DSA, model: HP 35670A)를 사용할 경우 내장된 고속 푸리에 변환(fast Fourier transform, FFT) 알고리즘에 의해 직접 실시간으로 측정할 수 있다.

FRF를 추정하여 공진주파수를 확인하고 전달률을 측정하기 위해서는 사인 파형의 가진주파수를 증분시켜 가면서 수 차례 반복 시험한 후 진폭비를 계산하여 추정 할 수 있지만 시험 장비의 특성상 반복 시험할 경우 시험기 냉각 및 추가적인 후처리 계산이



(a)



(b)

Fig. 5 (a) Two measured torque responses (b) zoomed responses(4~6 second)

반복 시험 마다 필요하여 측정 시간이 많이 소요되는 단점이 발생한다. 또한 랜덤 가진(random excitation)이 FRF 추정에 가장 이상적이지만 저관성 내구 시험 장비의 대역폭(bandwidth) 한계로 인하여 연구에서는 사인 파형(sinusoidal waveform)의 순간주파수(instantaneous frequency)가 시간에 따라 선형적으로 증가하도록 주파수 변조(frequency modulation)를 시킨 첩(chirp or sweep) 신호를 대신 사용하였다.

$$f(t) = f_0 + Kt \tag{7}$$

여기서 f_0 는 시작주파수($t=0$), K 는 첩 속도(chirp rate)이다. 저관성 내구 시험기의 입력 회전수를 선형적으로 증가시키면서 동시에 입력 토크(평균 토크 100 Nm)의 순간 가진주파수를 비례적으로 증가시키면서 동시에 출력측 토크를 측정한 시험 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 입력 토크의 진폭(약 100 Nm)은 거의 일정하게 제어되고 있지만 클러치 스프링 댐퍼를 통해 전달된 출력 토크의 진폭은 초기

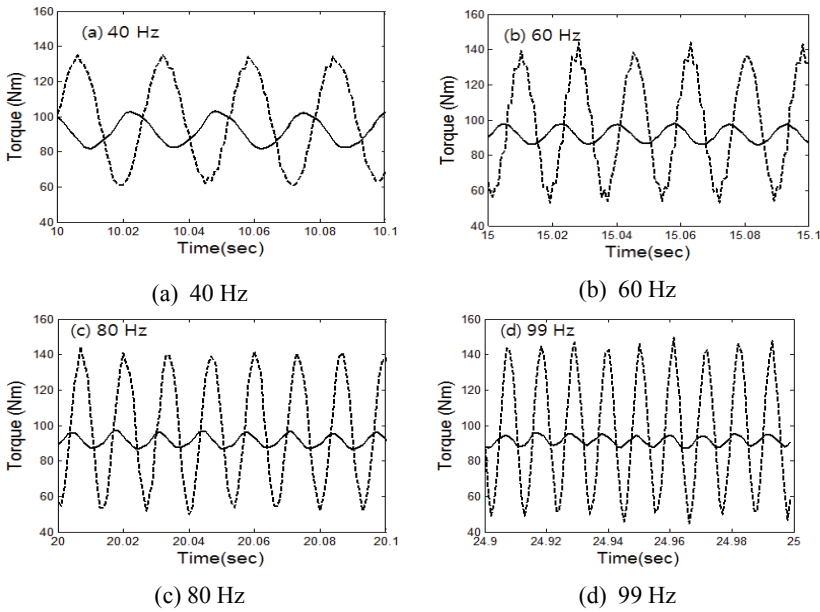


Fig. 6 Torque waveforms showing vibration isolation(---: input torque, —: output torque)

공진 영역(Fig. 5(b))에서 크게 증가하다가 공진 이후 대폭 감소하는 비틀림 토크 진동 절연 특성을 확인할 수 있다.

주파수 변경에 따른 진동 절연 특성을 확인하기 위해 시간대별 입출력 토크를 확대하여 Fig. 6에 자세하게 나타내었다. 이때 저관성 시험기의 입력 모터가 내연기관에서 발생하는 토크 진동을 재현하도록 설계되었기 때문에 다음 식을 사용하여 서서히 증가되는 입력 회전수로부터 순간주파수를 대략적으로 계산 할 수 있다.

$$f = \frac{f_{firing} \cdot RPM}{60} \tag{8}$$

여기서, f_{firing} 는 발화(firing or engine order) 주파수로 적용 엔진을 4기통으로 설정하였으므로 2 이다. 따라서, 2,400 rpm은 80 Hz의 주파수에 대응되며 Fig. 6(c)에 나타낸 시험 결과를 살펴보면 진동 주파수가 약 80 Hz에 근접한 사실을 알 수 있다. 초기 공진주파수 이외의 주파수 영역(off-resonance)에서는 출력축 토크 진동 진폭(peak-to-peak amplitude)이 입력 토크에 비해 대폭 감소하고 위상(phase)이 지연되는 전형적인 진동 절연 특성이 관찰되었다.

칩 신호를 사용하여 측정된 입출력 토크 신호를 샘플링(sampling)하여 저장한 내구 시험 데이터를 이용할 경우 고가의 DSA 장비를 사용하지 않고 추정(off-line)이 가능하다. 입출력 토크 신호를 MATLAB®에 내장된 이산 푸리에 변환(discrete Fourier transform, DFT) 및 Hann 윈도우(window) 함수를 사용하여 PSD 함수를 연산 할 수 있다⁹⁾. 이때, 주어진 계측 시스템이 선형 시스템이라면 다음과 같이 주파수응답함수를 추정할 수 있다.

$$|H(\omega)|^2 = \frac{S_{yy}(\omega)}{S_{xx}(\omega)} \tag{9}$$

$H(\omega)$ 는 주파수응답함수(FRFs), $S_{xx}(\omega)$ 는 입력 신호의 PSD 함수, $S_{yy}(\omega)$ 는 출력 신호의 PSD 함수를 나타낸다.

4. 결과 및 고찰

제안된 방법을 이용하여 대표적인 승용차용 비틀림 스프링 댐퍼의 진동 전달률을 측정하였다. 이때 사용된 입출력 토크 신호는 Fig. 5에 나타낸 신호를 사용하였다. 식(9)를 이용하여 계산 한 진동 전달률을 Fig. 7에 나타내었다. 단일 공진주파수가 약 19 Hz에서 발생

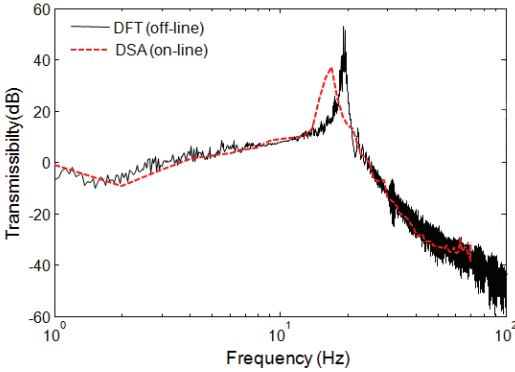


Fig. 7 Measured transmissibility using DFT

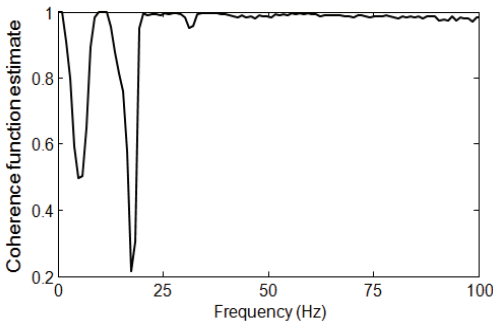


Fig. 8 Estimated coherence function

하는 전형적인 2차 선형 시스템의 특성을 나타내었으며 이와 같은 주파수응답함수(FRFs)는 진동 절연기의 성능 지표인 진동 전달률을 나타낸다. 두 가지 방법 모두 근본적으로 동일한 고속 푸리에 변환(fast Fourier transform, FFT) 알고리즘을 사용하기 때문에 진동 전달률이 관심주파수 영역(1~100 Hz)에서 양호하게 일치하였으며 Fig. 3에 나타난 시뮬레이션 결과와도 양호하게 일치하였다. 따라서 고가의 DSA 장비 없이 기존 내구 시험기의 데이터 수집 장비를 사용한 간단한 신호처리 방법만으로도 비틀림 스프링 댐퍼의 진동 전달률을 정확하게 측정할 수 있었다.

클러치 스프링 댐퍼 시스템의 전달률을 측정하기 위해 사용한 식 (9)는 선형 측정 시스템에 유효하기 때문에 다음 식으로 정의된 기여도(coherence) 함수를 사용하여 가정의 타당성을 검토하였다⁽⁵⁾.

$$\gamma^2(\omega) = \frac{|S_{xy}(\omega)|^2}{S_{xx}(\omega)S_{yy}(\omega)} \quad (10)$$

여기서, $S_{xy}(\omega)$ 는 입출력 신호의 교차(cross) PSD함수를 나타낸다. Fig. 8에 나타난 기여도 함수는 관심주파수(20~100 Hz) 영역에서 1에 가까운 수치를 나타내어 선형 시스템의 특성을 나타내었지만 저주파수 영역에서는(20 Hz 이하) 가진이 힘든 시험기 특성이 반영되어 기여도 함수가 일정하지 않았다.

5. 결 론

이 연구는 전용 전달률 측정 시험기 대신 최신 토크 센서 기술이 적용된 저관성 내구 시험기를 사용하여 승용차 비틀림 스프링 댐퍼의 진동 절연 성능을 처음으로 평가하여 다음과 같은 중요한 결과를 도출하였다.

(1) 중형급 승용차에 사용하는 직결 클러치용 비틀림 댐퍼의 진동 전달률을 전용 측정 장비 대신 기존 내구 시험기를 통해 측정한 후 시뮬레이션 결과와 비교한 결과 약 20 Hz의 공진주파수 이후에서 전달률이 40 dB/decade(roll-off rate)로 감소하는 전형적인 진동 절연기(2차 선형 시스템)의 특성을 나타내었다.

(2) 기여도 분석 등을 통해 본 측정 방법의 타당성이 확인되어 저비용으로 효과적인 진동 전달률 측정이 가능하며 기존 정적 비틀림 스프링 특성 시험의 단점을 보완 할 수 있는 가능성을 제시하였다.

(3) 향후 비틀림 댐퍼의 진동 전달률 측정용 전용 시험 장비 제작에 필요한 기초 연구 자료를 제공하였다.

References

(1) SAE, 1997, Manual Transmission Clutch Systems; Chapter 8 Torsional Vibration and Tuning Capacity.
 (2) Gu, Y., 1996, A Vibration Transmissibility Measurement Using a Mass Dummy, SAE Technical Paper 960475.
 (3) Kim, G.-W. and Jang, J.-D., 2012, Evaluation of Torsional Vibration Isolation Damper in Automotive Transmissions Based on In-situ Torque Measurement, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 22, No. 4, pp. 378~383.

(4) Lee, D.-O. and Han, J.-H., 2012, A Comparison of Vibration Isolation Characteristics of Various Forms of Passive Vibration Isolator, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 22, No. 9, pp. 817~824.

(5) Bendat, J. S. and Allan, G. P., 2010, Random Data - Analysis and Measurement Procedures, Wiley, New York.

(6) Rivin, E. I., 2003, Passive Vibration Isolation, ASME Press, New York.

(7) Rao, S. S., 2004, Mechanical Vibrations, Prentice Hall, New Jersey.

(8) Schicker, R. and Wegener, G., 2002, Measuring Torque Correctly, Hottinger Baldwin Messtechnik(HBM) GmbH.

(9) MATLAB/Signal Processing Toolbox V.7.6 User's guide, 2011, The Mathworks.



Won-Jin Kim received his Ph.D. from Dept. of Mechanical Engineering at KAIST in 1993. He has been working for Dept. of Mechanical and Automotive Engineering as a professor since 1997. His research interest includes source and system identification, mechanical system design to reduce noise and vibration.



Jae-Duk Jang received his M.S. Degree in Mechanical Engineering Department from the Yonsei University in 1991. He had worked for the Hyundai Motor Company Powertrain R&D Center from 1991 to 2002. He has been working for the Korea Powertrain Co. as a vice president since 2001, and pursuing Ph.D. degree from the Keimyung University since 2012. His research interest includes torque converter, torsional vibration damper etc.



Gi-Woo Kim received his Ph.D. degree in Mechanical Engineering Department from the Pennsylvania State University in 2009. He had worked for the Hyundai Motor Company Powertrain R&D Center from 1996 to 2004, and Mechanical Engineering Department at University of Michigan from 2009 to 2011, respectively. He has been working for the Kyungpook National University as an assistant professor since 2011. His research area of expertise includes a smart material-based sensor and actuator, automotive electronic control, torsional vibration control, vibration based energy harvesting etc.