

구동 출력 토크 측정을 이용한 비틀림 진동 절연 성능 평가

Evaluation of Torsional Vibration Isolation Performance Using In-situ Driveline Output Torque Measurement

김기우† · 장재덕*

Gi-Woo Kim, Jae-Duk Jang, Sun-Suk Hong

Key Words: Torsional Vibration (비틀림 진동), Torsional Damper (비틀림 댐퍼), Torque Measurement (토크 측정), Vibration Isolation (진동 절연).

ABSTRACT

This paper presents a proof-of-concept study on the evaluation of torsional vibration isolation performance through in-situ output torque measurement by using a non-contacting magneto-elastic torque transducer installed in the vehicle driveline system. The de-trending processing is first conducted to extract the torsional vibration from the measured driveline output torque. In order to estimate the transmissibility, primary performance indicator of a vibration isolator, the magnitude of transmitted torsional vibration with different frequencies is compared. From the conservative estimation results, the torsional damper built in a lock-up clutch of a torque converter is identified to be a vibration isolator. The evaluation results show that the fluid damping by torque converter outperforms the vibration isolation function of a torsional damper, and the isolation performance needs to be enhanced.

1. 서 론

가솔린 및 디젤 엔진과 같은 자동차 내연 기관 (combustion engine)은 흡입, 배기 및 압축 과정에서 발생하는 가스 압력, 피스톤 왕복 운동의 불균형 등에 의해 엔진 토크의 불규칙한 변동 (fluctuation)이 발생된다. 이러한 엔진 토크 진동은 변속기 (transmission)의 입력 축 (input shaft) 및 구동계 (driveline system)를 가진(excitation) 하여 불필요한 NVH (noise, vibration, and harshness) 문제를 발생시키며 자동차 감성 품질에 영향을 미쳐 주요 소비자 불만 요인이 되고 있다. 특히 자동 변속기 (automatic transmission, AT) 장착 차량은 Fig. 1 에 나타난 바와 같이 연비 향상을

위해 특정 운전 조건에서 엔진과 변속기 입력 축을 직결시키는 역할을 하도록 토크 컨버터 (torque converter) 내부에 직결 클러치 (lock-up clutch)를 장착하고 있다. 이때 불규칙한 엔진 토크 변동은 진동 소음 문제뿐만 아니라 동력 전달 계통 부품의 내구성을 저하시키므로 기본적으로 직결 클러치에 이중 스프링으로 구성된 비틀림 댐퍼를 설치하여 전달되는 진동 폭을 감소시키고 있다.⁽¹⁾ 최근에 친환경 고연비 차량용 최신 기술로 각광받고 있는 병렬형 하이브리드 전기 자동차 (parallel type hybrid electric vehicle)에 탑재되는 6 속 AT, 듀얼 클러치 변속기 (dual-clutch transmission, DCT) 에도 연비 개선을 위해 비효율적인 토크 컨버터를 사용하지 않고 연결 클러치 (connecting clutch)를 사용하기 때문에 엔진 토크 진동 절연을 위한 비틀림 댐퍼의 역할 및 성능에 대한 관심이 더욱 커지고 있다.⁽²⁾ 또한 최근 직접 분사 (direct injection), 가변 압축 (variable compression)과 같은 엔진 신기술의 발달로 인한 엔진 토크 증대, 연비 개선을 위해 직결 클러치 직결 회전수가 더욱 낮아지고 있으며 디젤 엔진의 대중화에 따라 엔진

† 교신저자; 정희원, 경북대학교 자동차공학부

E-mail : gwkim2@knu.ac.kr

Tel : 054-530-1407, Fax : 054-530-1409

* 한국과워트레인㈜

토크 진동이 증대되고 있는 추세이기 때문에 진동 절연에 대한 필요성 및 성능 개선에 연구가 강조되고 있는 실정이다.

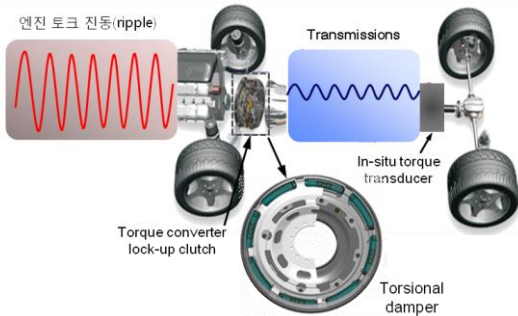


Fig. 1 Schematic of torsional damper built in lock-up clutch of a torque converter

그러나 비틀림 댐퍼가 기본적으로 진동 절연(vibration isolation)이 고유 기능임에도 불구하고 구동계 모달 특성(modal characteristics)에 의한 공진 소음 해석에 대한 연구가 대부분이고 토크 진동 절연 성능에 대한 고찰은 전무한 실정이며^{(3),(4)}, 실제 주행 차량의 고속 회전 환경으로 인해 스트레인 게이지(strain gage) 및 슬립링(slip ring)을 사용하여 토크를 측정하는 기존 방식으로는 구동계 출력축 토크 측정시 기술적 단점이 많기 때문에 각속도 센서로부터 추정된 각 가속도(angular acceleration) 정보를 사용하고 있는 실정이다.⁽⁵⁾ 최근 센서 기술의 발달로 이러한 기술적 문제를 해결하기 위해 자기 탄성(magneto-elastic) 재료를 이용한 비 접촉(non-contacting) 방식의 토크 변환기(또는 센서)에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.^{(6),(7)}

본 연구에서는 최신 비접촉 토크 변환기를 이용하여 실제 자동변속기가 장착된 차량의 직결 클러치 작동 전후의 구동계 출력축 토크를 차량 주행 상태에서 실시간으로 측정하여 직결 클러치에 장착된 비틀림 댐퍼의 엔진 토크 진동 절연 특성을 파악하고 절연 성능을 처음으로 평가하였다.

2. 구동 출력축 토크 측정

토크 컨버터 내부의 직결 클러치에 부착된 비틀림 댐퍼의 진동 절연 성능을 평가하기 위해 직결 클러치 작동 전후의 구동 출력 토크를 측정하였다. Fig. 2에 나타난 비접촉 토크 변환기의 작동 원리를 살펴보면 출력축에 작용하는 비틀림 토크

에 비례하여 자기 탄성 재료로 제조된 극성체에서 자기 선속(magnetic flux)의 변동이 발생되면 비 접촉 자기장 센서에서 감지 한 후 토크에 비례하는 전압 신호로 변환된다.

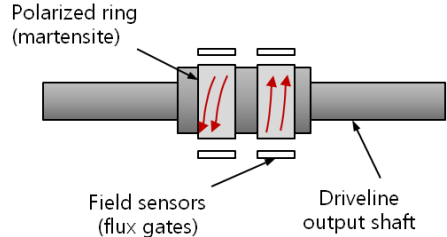


Fig. 2 Schematic of a magneto-elastic torque transducer

샘플링 주파수는 2 kHz로 설정하여 데이터를 수집하였으며 신호 처리 및 분석 도구로 MATLAB⁽¹⁰⁾을 사용하였다. Fig. 3에 나타낸 바와 같이 2속 상태에서 직결 클러치가 결합된 직후 엔진 및 터빈 회전수가 동기화 되어 속도가 같아지는 사실을 알 수 있으며, 측정된 출력 토크는 직결 직후에 과도 진동(transient vibration)이 발생하였다.

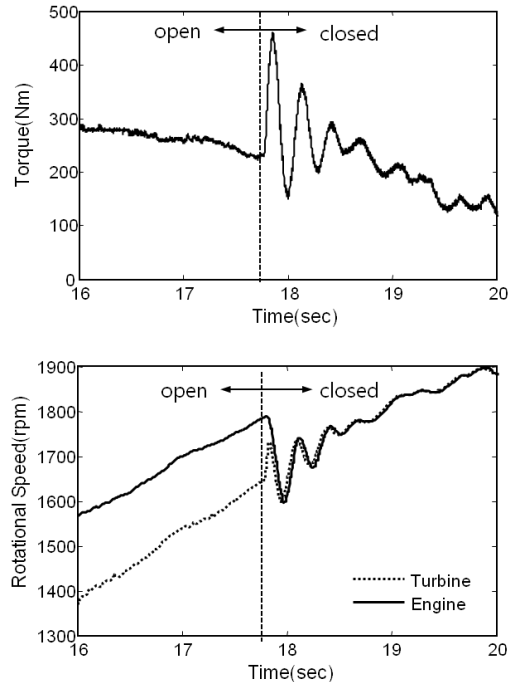


Fig. 3 Measured in-situ driveline output torque and rotational speed while engaging a lock-up clutch

측정된 토크 신호의 주파수 성분은 시간에 따라 천천히 변할 수 있으므로 Hamming 윈도우를 이용하여 short-term fast Fourier transform (SFFT) 분석을 실시하였다. Fig. 4에 나타난 분석 결과를 살펴 보면 직결 클러치 작동 전 (Fig. 4 (a))에는 토크 컨버터의 유체 댐핑에 의해 전 주파수 영역에 걸쳐 지배적인 가진 입력 주파수가 없지만 클러치가 작동시 (Fig. 4 (b)) 자유 진동 (free vibration)이 발생되어 3.5 Hz 근방에서 피크가 발생되었다. 결합이 완료된 후에는 다음식으로 정의되는 엔진 강제 진동 (forced vibration) 주파수에서 피크가 발생되어 120 Hz의 비틀림 진동이 변속기 및 구동계로 전달되고 있는 사실을 알 수 있다.

$$f_e = \frac{RPM_{Engine}}{(60 / f_{firing})} \quad (1)$$

여기서, f_{firing} 는 firing 주파수로 평가 대상 엔진이 8기통이므로 4이다. 따라서 120 Hz는 엔진 회전수 1800 RPM에 해당된다.

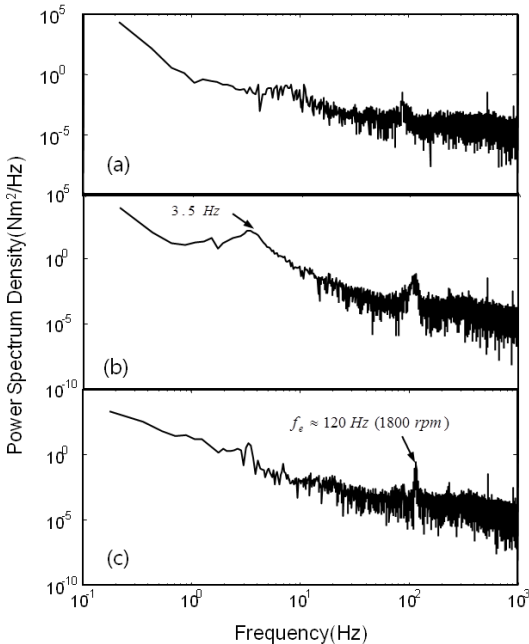


Fig. 4 Power spectral density estimated by short-term FFT analysis; (a) open stage; (b) engagement (transient) stage; (c) closed (steady-state) stage

3. 비틀림 진동 절연 성능 평가

먼저 엔진 토크 신호에 포함되어 출력축에 전달되는 비틀림 토크 진동을 평가하기 위해서 저주파수의 출력축 토크 성분을 제거하여 정상 신호 (stationary signal)을 생성하는 de-trending 절차를 수행하였다.

$$T(t) = \hat{T}(t) + e(t) \quad (2)$$

여기서 $T(t)$ 는 샘플링 시간 t 마다 측정된 토크 신호, $\hat{T}(t)$ 는 저주파수 토크 성분 (즉, 출력축 토크), $e(t)$ 는 잡음 (noise)으로 본 연구에서는 엔진 토크 변동에 의해 오염된 토크 진동에 해당된다. 따라서 측정된 토크 신호에서 저주파수 성분을 성공적으로 제거하면 토크 진동 정보를 구할 수 있다 (즉, $e(t) = T(t) - \hat{T}(t)$). 먼저 저주파수의 토크 신호는 다음 식과 같은 Autoregressive 모델로 표현할 수 있다.

$$\hat{T}(t) = \sum_{i=0}^N b_i T(t-i) \quad (3)$$

여기서 b_i 는 적절히 선정해야 되는 필터 계수이며 저주파수 성분 제거에 효과적인 moving average 계수를 다음 식과 같이 결정하였다.

$$b_i = \frac{1}{N+1} \quad (4)$$

여기서 N 은 모델 차수이며 본 연구에서는 100으로 선정하여 절점 주파수 (cut-off frequency)가 약 10 Hz인 고주파수 통과 필터 (high-pass filter) 역할을 수행하는 FIR형 디지털 필터를 설계하였다.⁽⁶⁾

제안된 신호 처리 과정을 거쳐 추정된 대표적인 토크 진동 신호 (즉, $e(t)$)를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 저주파수의 출력축 토크가 제거되어 평균치가 0인 정상 신호임을 알 수 있다. 엔진 회전수가 약 1500 RPM인 상태에서 측정된 토크 신호를 사용하여 확대시킨 진동 주파수를 살펴보면 약 100 Hz (식 (1)로부터 $f_e = 1500/15$)의 주기로 진동하는 사실을 알 수 있다. 또한 직결 클러치 작동 전

(open)의 진동 폭 보다 작동 후(closed)의 진동 폭이 증대된 사실을 알 수 있다. 즉, 토크 컨버터의 유체 댐핑 성능보다 직결 클러치 댐퍼의 진동 절연 성능이 상대적으로 열세인 것을 알 수 있다. 이때 19초 근방 정상상태에서의 실효치 (RMS value)는 약 4.5 Nm이다. 엔진 회전수를 약간 증대시켜 추정된 엔진 토크 진동 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 엔진 회전수가 약 1800 RPM인 정상 상태에서 측정된 출력축 토크 신호를 사용하였으며 진동 주파수인 120 Hz (식 (1) 로 부터 $f_e = 1800/15$)와 양호하게 일치하여 성공적으로 토크 진동 성분이 추정된 것으로 나타났다. 이때 18.5초 근방 정상상태에서의 실효치는 약 2.3 Nm로 100 Hz로 가진되는 경우 (Fig. 5)와 비교해 보면 진폭이 감소하였다.

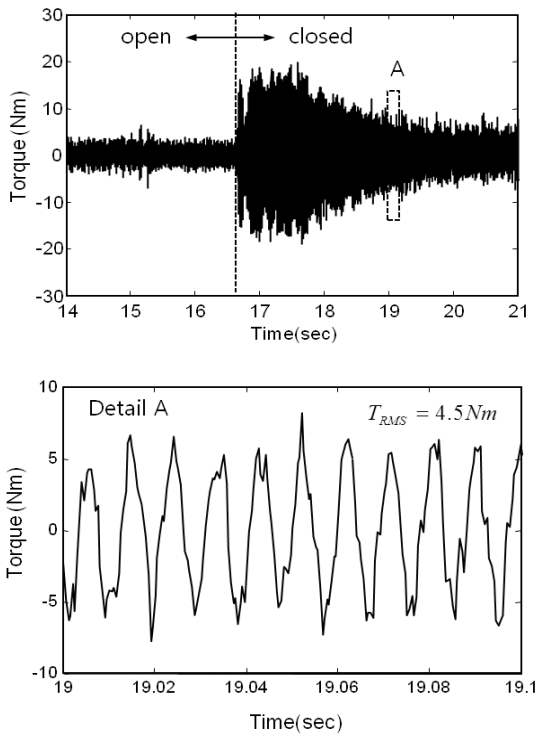


Fig. 5 Torsional vibration isolation performance for the excitation frequency of 100 Hz (1500 rpm)

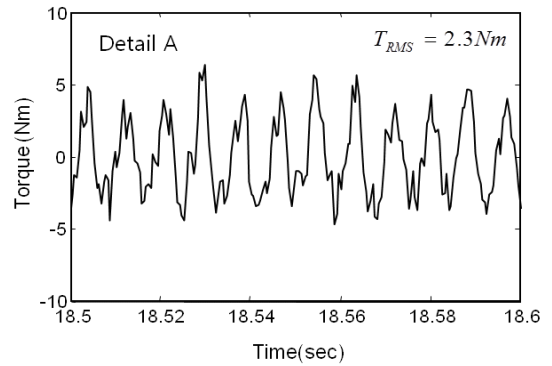
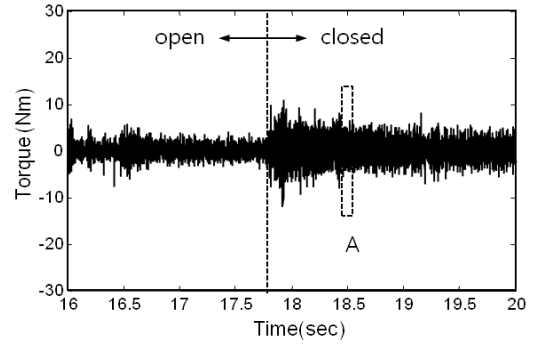


Fig. 6 Torsional vibration isolation performance for the excitation frequency of 120 Hz (1800 rpm)

주파수 변화에 따른 정상상태에서의 토크 진폭의 비교를 통해 진동절연기 (vibration isolator)의 주요 성능 지표인 전달률 (transmissibility)을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$Tr = \frac{T_{out}}{T_{in}} \quad (dB) \quad (5)$$

여기서 T_{in} 는 실제 엔진에서 발생하는 토크 진폭의 크기로 엔진과 토크 컨버터 사이에 위치한 드라이브 플레이트 (drive plate)에서 측정해야 하는 신호이지만 본 연구에서는 출력축 토크만 측정하였기 때문에 시험 자료 대신 참고 문헌 및 2단 기어비 (gear ratio)를 참조하여 Fig. 7과 같이 시뮬레이션한 후 약 50 Nm로 결정하였다.⁽⁸⁾ 그러나 일반적으로 엔진 토크 변동은 엔진 회전수가 커질수록 작아지기 때문에 보다 신뢰성 있는 분석을 위해서는 입력 토크 측정이 필요한 것으로 판단된다.⁽⁹⁾

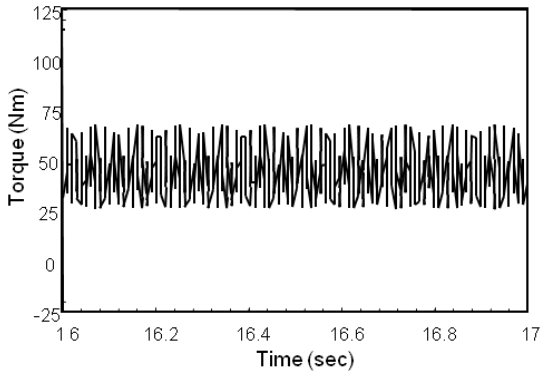


Fig. 7 Simulated engine torque vibration (fluctuation)

Fig. 8에 나타난 전달률 곡선을 살펴보면 자유 진동으로부터 비틀림 댐퍼의 고유 진동수를 3.5 Hz로 추정할 경우 엔진 작동 영역 (50 ~ 300 Hz 또는 750 ~ 4500 RPM) 에서 주파수가 증가함에 따라 전달률이 감소하는 전형적인 2차 선형 시스템의 동적 특성을 지닌 진동 절연기의 거동을 나타내었다. 차량 동력 전달계의 모달 특성 주파수에 의한 공진의 영향을 고려하지 않았기 때문에 보다 정확한 분석을 위해서는 차량 구동계의 모달 특성 해석 결과를 고려한 연구가 추가적으로 필요한 것으로 판단된다. 또한 절연 성능을 직결 클러치 작동 전 수준으로 개선하기 위해서는 비틀림 댐퍼의 고유 진동수를 낮추는 설계가 효과적임을 예상할 수 있으며 (Fig. 8의 점선) 고유 진동수를 낮추기 위한 연구를 추가로 수행할 필요가 있다고 판단된다.

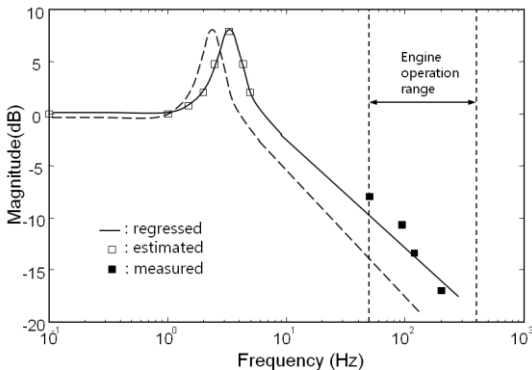


Fig. 8 Evaluated transmissibility of torsional damper for estimated resonant frequency (3.5 Hz); ---: proposed design by lowering the natural frequency

4. 결 론

본 연구는 비접촉 방식의 최신 토크 센서 기술을 이용하여 자동변속기 탑재 차량의 비틀림 댐퍼 성능을 실차 상태에서 직접 평가한 연구로 시험 결과로부터 다음과 같은 중요한 결과를 도출하였다.

- (1) 일반적으로 파워트레인 제어 (powertrain control)를 위해 사용되는 토크 변환기를 진동 시험용으로 사용하여 차량 출력축 토크만을 측정할 결과 성공적으로 비틀림 댐퍼의 기본적인 동특성 (고유 진동수) 및 진동 절연 성능을 평가할 수 있었으며 토크 변환기의 추가적인 용도를 제시하였다.
- (2) 간단한 de-trending 방법에 의해 구동계로 전달된 토크 진동이 측정된 출력축 토크 신호로부터 추정되었다.
- (3) 시험 결과로부터 이중 스프링으로 구성된 현재 비틀림 댐퍼의 진동 절연 기능이 양호하게 작동되는 것으로 나타났지만 여전히 토크 컨버터 작동 (유체 커플링)시보다 성능이 열세이기 때문에 직결 클러치 작동 전(open) 수준으로 감소시키는 추가적인 성능 개선이 필요하다.

후 기

본 연구는 한국파워트레인의 연구비 지원으로 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) Park, T. J., Kim, M. S., Jang, J. D., Joo, I. S., 2007, Vibration Analysis of Damper System in Torque Converter, Proceedings of KSNVE Spring Conference KSNVE07S-08-26.
- (2) Park, J. Y., Sim H. S., 2011, Drive-train Jerk Reduction Control for Parallel Hybrid Electric Vehicles, Transactions of KSAE, Vol. 19, No. 1, pp. 17~24
- (3) Kim, Gi-Woo, Jang, J. D., 2002, Analysis of Torsional Vibration of Torque Converter Lock-Up Clutch with Damper, KSAE Spring Conference Vol. II, pp.819~824.
- (4) Lee, D. H., Chung, T. Y., Kim, Y. C., and Kim,

H. S., 2011, Design and Performance Evaluation of Spring-viscous Damper for Torsional Vibration, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 12, pp. 1192 ~ 1198.

(5) Klaus Steinel, Gerhard Tebbe, 2004, New Torsional Damper Concepts to Reduce Idle Rattle in Truck Transmission, SAE World Congress No. 2004-01-2722.

(6) Kim, Gi-Woo, Kucharski, J., Pietron, G., Yanakiev, D., Fujii, Y., Wang, K. W., 2011, Effect of Road Excitation on Driveline Output Torque Measurement, SAE 2011 Noise and Vibration Conference and Exhibition, Paper No. 2011-01-1538.

(7) Kim, Gi-Woo, 2012, System Identification of In-situ Vehicle Output Torque Measurement System, Transactions of KSAE, Vol. 20, No. 2, pp.85-89.

(8) Shim, Y., Kauh, S. K., Ha, K. P. , 2011, Evaluation of idle stability through in-situ torque measurement in automatic transmission vehicles, International Journal of Automotive Technology, Vol. 12, No. 3, pp. 315 ~ 320.

(9) SAE, 1997, Manual Transmission Clutch Systems; Chapter 8 Torsional Vibration and Tuning Capacity.

(10) MATLAB/Signal Processing Toolbox™ V7.6 *User's guide*, The Mathworks, 2011.