

차량 출력 토크 측정 시스템의 시스템 식별

김기우*

경북대학교 자동차공학부

System Identification of In-situ Vehicle Output Torque Measurement System

Gi-Woo Kim*

School of Automotive Engineering, Kyungpook National University, Gyeongsbuk 742-711, Korea

(Received 14 July 2011 / Revised 25 August 2011 / Accepted 26 August 2011)

Abstract : This paper presents a study on the system identification of the in-situ output shaft torque measurement system using a non-contacting magneto-elastic torque transducer installed in a vehicle driveline. The frequency response (transfer) function (FRF) analysis is conducted to interpret the dynamic interaction between the output shaft torque and road side excitation due to the road roughness. In order to identify the frequency response function of vehicle driveline system, two power spectral density (PSD) functions of two random signals: the road roughness profile synthesized from the road roughness index equation and the stationary noise torque extracted from the original torque signal, are first estimated. System identification results show that the output torque signal can be affected by the dynamic characteristics of vehicle driveline systems, as well as the road roughness.

Key words : Road roughness(도로 표면조도), Output torque measurement(출력 토크 측정), Frequency response function(주파수 응답 함수), Vehicle driveline systems(차량 구동 장치), System identification(시스템 식별)

Nomenclature

- A : gain
- C : empirical constant
- R : resistance
- $S(\Omega)$: power spectral density of the random input
- W : dimensionless constant
- x : total road distance (m)
- Ω : spatial frequency (cycles/m)

1. 서론

최근 차량 센서 기술의 발달 및 지능형 자동차 개발 추세로 인해 자동차 제어 시스템에도 토크 센서(torque sensor)가 점진적으로 도입되고 있다. 현재

차량의 엔진 토크 및 자동변속기 장착 차량의 입력(터빈) 토크 등은 정상 상태(steady-state)에서 구한 특성 곡선, 맵, 또는 Look-up 테이블 등을 이용하여 계산하지만 출력 토크는 다양한 주행 조건에 의해 과도(transient) 토크가 발생하며 부정확한 단점이 있다. 따라서 실제 엔진, 변속기(transmission) 입력 및 출력 토크를 실차 상태에서 고성능 토크 변환기(또는 센서)로 측정할 수 있으면 변속 제어(shift control), 엔진 아이들(engine idle) 제어, 또는 하이브리드 전기차(Hybrid electric vehicle, in short HEV)의 회생 제동(regenerative brake)과 같은 동력 전달계(powertrain)의 귀환 제어(feedback control)가 가능하여 보다 강인한 동력전달 시스템 제어(powertrain control)가 가능해진다. 또한 엔진 및 변속기의 내구 상태를 실시간(real time)으로 감시할 수 있다.¹⁾ 그러

*Corresponding author, E-mail: gwkim2@knu.ac.kr

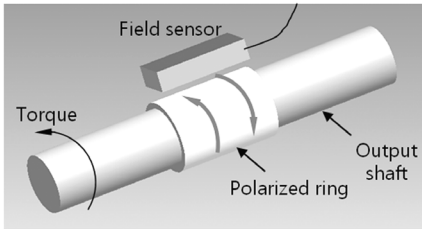


Fig. 1 Schematic of in-situ magneto-elastic torque transducer

나 이러한 장점에도 불구하고 기존 토크 변환기가 비교적 고가이며 고속 회전 환경을 극복해야 하는 기술적 단점 때문에 그동안 실제 차량에 직접 적용하지 못하고 있는 실정이다.²⁾ 최근 이러한 기술적 문제를 해결하기 위해 Magneto-elastic 재료를 이용한 비접촉 방식 토크 변환기(또는 센서)의 적용 가능성에 대한 연구가 최근 활발히 진행 중이다.^{3,4)} Fig. 1에 도시한 토크 센서의 작동 원리를 살펴보면 출력축(output shaft)에 작용하는 비틀림 토크에 비례하여 Magneto-elastic 재료로 제조된 극성체(polarized ring)에서 자기장의 변동이 발생되면 출력축에서 일정한 간격을 두고 설치된 필드 센서에서 자기장 변동을 감지 한 후 미리 결정된 감도(sensitivity)에 의해 토크 신호로 변환한다.

이런 최신 센서 기술을 실제 차량에 적용하기 위해서는 몇 가지 필수 연구가 선행되어야 한다. 대표적인 기술적 문제는 Fig. 2에 나타낸바와 같이 토크 변환기가 장착되는 출력축(output shaft)이 구동축(driveline) 시스템을 통해 도로면과 연결되어 있어서 도로로부터 유입되는 외란에 취약하며⁵⁾ 동특성(dynamic characteristic)에 영향을 받는다. 따라서 이러한 영향에 대한 해석 및 구동계에 대한 시스템 식별(system identification)이 반드시 필요하며 귀환 제어기 설계 시에도 보상해 주어야 한다. 본 연구에서는 최신 비접촉 토크 변환기를 동력 전달계 제어에 적용할 경우 신뢰성 있는 출력축 토크 정보를 사용하기 위해 측정 시스템의 동특성을 식별하였다. 주파수 전달 함수(frequency transfer function)를 구하기 위해 시뮬레이션을 통해 구한 랜덤 도로 표면조도(road roughness) 및 측정된 토크 변환기 신호에서 추출한 잡음 신호를 이용하여 시스템 식별을 수행하였다.

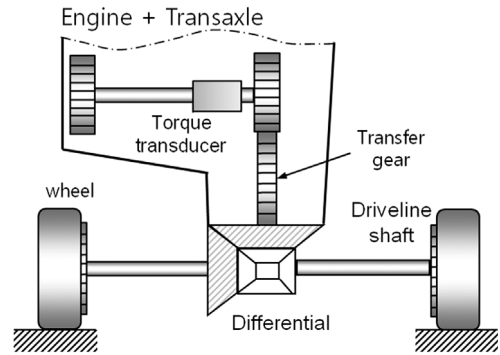


Fig. 2 Schematic of driveline system with torque transducer

2. 파워 스펙트럴 밀도 함수

2.1 도로 표면조도 가진(Excitation)

차량 출력축에 토크 변환기를 설치한 경우 발생하는 도로 표면조도에 의한 외부 가진을 먼저 이해하기 위해 도로 탐측 장비(road profiler)로 측정된 대표적인 도로 표면조도 형상을 Fig. 3에 나타내었다.⁷⁾ 도로 상태 및 명칭에 따라 다른 표면조도 형상을 정량적으로 평가하기 위해 다양한 방법이 개발되어 있으며, 가장 대표적으로 사용되는 것이 파워 스펙트럴 밀도(power spectral density, in short PSD) 함수를 계산하기 위해 푸리에 변환(Fourier transform)을 적용한 ISO 방법이다.⁸⁾ Fig. 3에 나타낸 표면조도 형상은 랜덤 잡음 신호(random noise signal)의 일종이지만 편평한 PSD 함수를 나타내는 백색 가우시안(white Gaussian) 랜덤 잡음과 달리 Fig. 4에 나타낸바와 같이 로그-로그 스케일에서 도로 상태에 따라 y축 절편이 다르지만 비슷한 기울기를 가진 직선 함수로 표현된다.

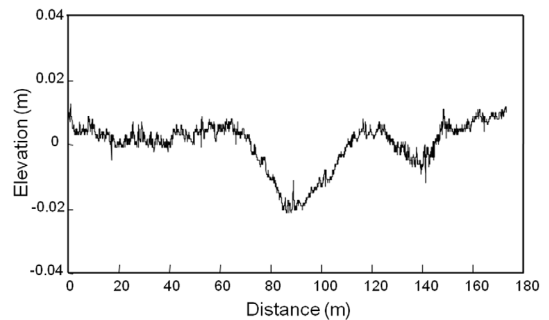


Fig. 3 Typical road roughness profile⁷⁾

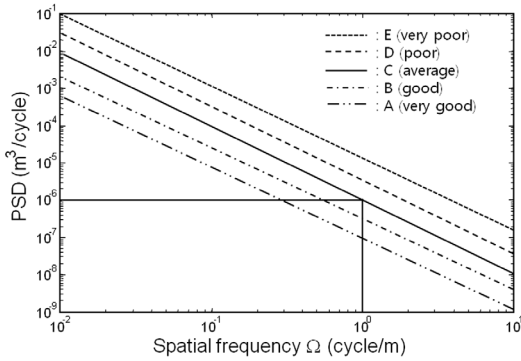


Fig. 4 Classification of road roughness defined by ISO

Fig. 4에 도시한 PSD 함수를 ISO 기준에 의해 간단하게 식 (1)과 같은 멱(power) 함수로 표현할 수 있다.⁸⁾

$$S_H(\Omega) = C\Omega^{-W} \quad (1)$$

where, Ω : the spatial frequency (cycles/m), W : dimensionless constant, $C = S_H(1)$: empirical constant. 보통 기울기를 나타내는 W 값은 비교적 일정하지만 (1.9 ~ 2.1) C 는 도로 표면조도 상태 및 W 값에 의해 변한다. 따라서 측정된 표면조도 형상의 PSD 함수를 도로 표면 조도의 정도를 나타내는 지수로 사용할 수 있다. 본 연구에서는 이미 광범위한 시험 데이터를 바탕으로 식 (1)에 대한 검증이 충분히 이루어져 있기 때문에 Fig. 3과 같은 시험 데이터 대신 식 (1)를 모사(simulation)하여 발생시킨 랜덤 신호를 사용하였다.⁶⁾

$$r(x) = \sum_{i=1}^N \sqrt{G_H(\Omega_i)} \Delta\Omega \cos(2\pi\Omega_i x + \theta_i) \quad (2)$$

where x : the total road distance, N : the total number of waves, $\Delta\Omega$: the frequency interval, θ_i : random phase angle uniformly distributed within $[0, 2\pi]$. Ω_i 는 식 (3)으로 정의된 공간 주파수(spatial frequency)이다.

$$\Omega_i = \Omega_{\min} + (i - 0.5)\Delta\Omega, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (3)$$

Fig. 3에 나타난 도로 등급중 C (average)에 해당하는 PSD 함수를 이용하여 생성시킨 도로 표면조도 형상을 Fig. 5에 나타내었다($C = 2 \times 10^{-6}$, $W = 2$, $\Omega_{\min} = 0.02$, $\Omega_{\max} = 1$, $N = 30$, $\Delta\Omega = (\Omega_{\max} - \Omega_{\min})/N$).

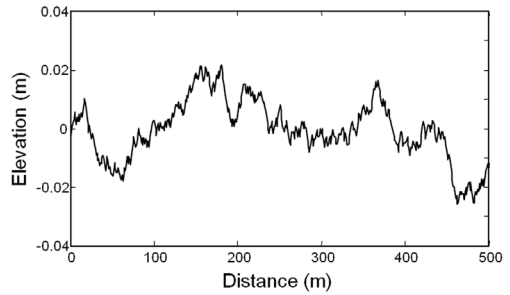


Fig. 5 Generation of random road roughness profile

생성된 도로 표면 조도 형상의 PSD 함수를 추정하기 위해 이산 푸리에 변환(discrete Fourier transform, DFT) 알고리즘과 Non-parametric 방법 중의 일종인 Welch's averaged periodogram 방법을 사용하여 유사함을 비교함으로써 도로 표면조도 형상의 타당성을 검증하였다. Fig. 6에 나타난 두 변환 결과를 보면 생성된 도로 표면조도 형상이 4000개의 데이터로 구성되어 500m 거리의 경우 0.002 ~ 4 cycles/m의 공간 주파수(spatial frequency or wave number) 영역에서 -2 (즉 식 (1)의 W)의 기울기를 갖는 멱함수로 회귀되고 있는 것을 알 수 있다.

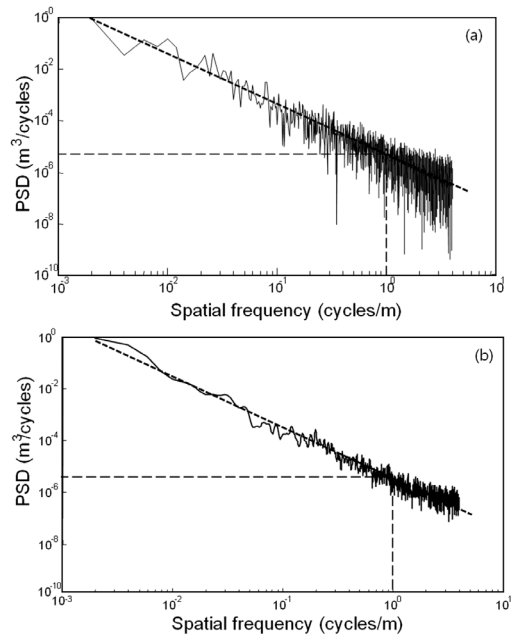


Fig. 6 Power spectral density function of random road roughness profile (—: original, ···: regressed); (a) using DFT (b) using Welch's method

2.2 잡음 출력 토크

도로 표면조도 형상에 의한 램덤 가진에 의해 발생된 잡음 출력은 토크 변환기로 측정된 출력 토크로부터 Fig. 7에 나타난 신호 처리 절차를 수행하여 추출한 결과를 사용하였다.⁵⁾ Fig. 8에 나타난 것 같이 시험 차량이 20m/s의 일정한 속도로 부드러운 도로를 주행하여 25 초 동안 데이터를 수집할 경우 약 500 m의 거리에 해당되는 시험 데이터가 사용되었다. 신호 처리 절차를 통해 추출된 잡음 토크가 트렌드인 엔진 입력 토크가 제거된 정상 랜덤 신호(stationary random signal)임을 알 수 있다.

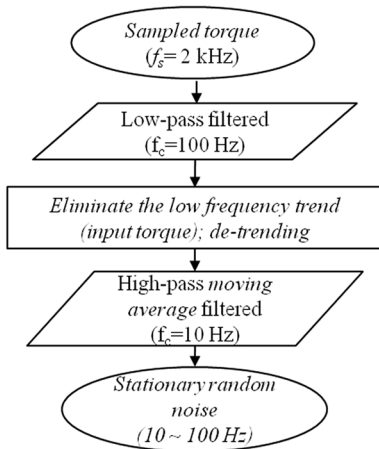


Fig. 7 Flow chart for random noise torque estimation

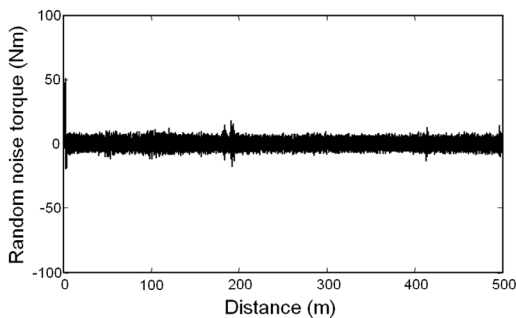


Fig. 8 Estimated stationary random noise torque

Fig. 8에서 추출한 잡음 토크에 대한 PSD 함수를 구하기 위해 이산 푸리에 변환 대신 Welch 방법을 사용하여 Fig. 9와 같이 고주파수 영역에서 부드러운 PSD 함수를 구하였다.

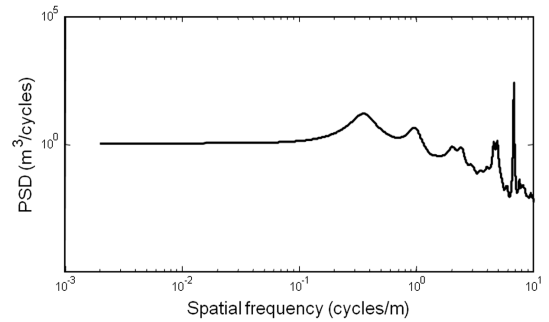


Fig. 9 PSD function of estimated random noise torque

3. 시스템 식별(System Identification)

3.1 주파수 응답 함수

본 연구에서는 출력측에 위치한 토크 변환기에 나타나는 기계적 잡음 토크를 발생시키는 주원인이 도로 표면조도에 의한 랜덤 가진으로 가정하여 구동계의 전달 함수를 구하여 토크 변환기 성능에 미치는 영향을 고찰하였다. 우선 전달 함수를 구하기 위해 2장에서 예측된 두 PSD 함수를 사용하여 주파수 응답 함수(frequency response function, in sort, FRF)를 계산하였다. 일반적으로 랜덤 입력 및 출력 신호의 PSD 함수가 주어질 경우 주파수 분석이론에 의해 식(4)와 같은 코히런스(coherence)함수를 정의할 수 있다.⁹⁾

$$\gamma^2(\Omega) = \frac{|H(\Omega)|^2 A S_{yy}(\Omega)}{S_{xx}(\Omega)} \quad (4)$$

where $H(\Omega)$: the frequency response function (in short, FRF), $S_{yy}(\Omega)$: the lower spectral density of the random input, $S_{xx}(\Omega)$ is the power spectrum of the output response, A : a gain. 이때, 추정 잡음이 없고 ($\gamma^2(\Omega) = 1$) 주어진 계측 시스템이 선형시스템이라는 가정을 도입하면 다음과 같은 식을 이용하여 FRF를 추정할 수 있다.

$$|H(\Omega)|^2 = \frac{S_{xx}(\Omega)}{A S_{yy}(\Omega)} \quad (5)$$

3.2 결과 및 고찰

Fig. 10에 식(5)와 두 PSD 함수(즉 Fig. 6(a)와 Fig. 9)를 이용하여 예측된 FRF를 나타내었다. 부드럽게

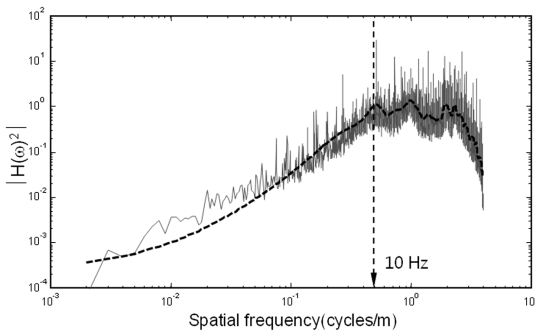


Fig. 10 Transfer function identification (—: original, ---: smoothed)

곡선 맞춤(curve fitting) 처리한 FRF를 살펴보면 공간 주파수 0.5 cycles/m(시간 주파수로 변환할 경우 차량이 시속 20m/s로 정속 주행시 10 Hz에 해당)를 절점으로 다른 주파수 응답 특성을 보여주고 있으며, 10 Hz의 분리(cut-off) 주파수를 가진 고주파수 통과 필터(high-pass filter)의 특성을 나타내었다. 이러한 식별 결과로부터 출력축 토크를 주행 상태에서 직접 측정시 도로 표면조도 형상에 의한 랜덤 외부 가진이 구동계를 통해 전달되는 과정에서 공진과 같은 구동계의 동특성에 영향을 받는 것으로 밝혀졌다.

4. 결론

본 연구는 Magneto-elastic 재료를 이용한 비접촉 방식의 최신 토크 변환기를 차량 동력전달계 제어에 적용하기 위한 기초 선행 연구의 일환으로 다음과 같은 중요한 결론을 도출하였다.

- 1) 차량 구동 시스템 시험기 및 가속도계등을 사용하지 않고 직접 실차 상태에서 도로 표면 조도 형상에 의한 랜덤 가진 입력 및 차량 출력축 토크 변환기에서 추출한 잡음 토크 출력을 이용하여 주파수 응답 함수 추정이 가능하였다.
- 2) 출력축 토크를 실차에서 측정시 도로 표면조도 형상에 의한 랜덤 외부 가진이 전달되는 과정에서 구동계의 동특성에 영향을 받는 것으로 밝혀졌다.
- 3) 따라서 향후 차량 및 동력전달계 제어를 위해 출력축 토크를 측정할 경우 구동계를 포함한 출력축 토크 측정 시스템의 동특성을 고려하여 보상하거나 적절한 신호 처리 기법이 필요하다고 판단된다.

후 기

이 논문은 2011년도 경북대학교 학술연구비에 의해 연구되었음.

References

- 1) Y. Shim, S. K. Kauh and K. P. Ha, "Evaluation of Idle Stability Through In-situ Torque Measurement in Automatic Transmission Vehicles," *Int. J. Automotive Technology*, Vol.12, No.3, pp.315-320, 2011.
- 2) W. J. Fleming, "New automotive Sensors-A Review," *IEEE Sensors Journal*, Vol.8, No.11, pp.1900-1921, 2008.
- 3) I. J. Garshelis, J. A. Alexsonis, C. A. Jones and R. M. Rotay, "Development of a Magnetoelastic Torque Transducer for Automotive Transmission Applications," SAE 970605, 1997.
- 4) Y. Fujii, R. Hogirala and T. Greene, "Magnetoelastic Torque Sensor for Automotive Transmissions," *Proceedings of CTI Transmission Symposium*, Ann Arbor, MI, 2010.
- 5) G.-W. Kim, J. Kucharski, G. Pietron, D. Yanakiev, Y. Fujii and K. W. Wang, "Effect of Road Excitation on Driveline Output Torque Measurements," SAE 2011 Noise and Vibration Conference and Exhibition, Paper No.2011-01-15, 2011.
- 6) A. Gonzalez, E. J. O'Brien, Y. Y. Li and K. Cashell, "The Use of Vehicle Acceleration Measurements to Estimate Road Roughness," *Vehicle System Dynamics*, Vol.46, No.6, pp.483-499, June, 2008.
- 7) S. J. Kawale, *Implication of Terrain Topology Modelling on Ground Vehicle Reliability*, Master's Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2011.
- 8) ISO8608, *Mechanical Vibration - Road Surface profiles-Reporting of Measured Data*, International Standards Organization, 1995.
- 9) J. S. Bendat and A. G. Piersol, *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*, John Wiley, 3rd Edn., 2000.