

1/4 차량 현가 장치의 강인 안정성을 보장하는 외란관측기 기반의 제어 시스템 설계

Design of a Disturbance Observer based Control System to Ensure Robust Stability of Quarter-Car Suspensions

소 상 균, 류 정 래, 도 태 용*
(Sang Gyun So¹, Jung Rae Ryoo², and Tae-Yong Doh^{1,*})

¹Department of Electronics and Control Engineering, Hanbat National University

²Department of Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology

Abstract: The vehicle suspension system plays a very important part related with vehicle ride and handling. To improve the vehicle ride and handling many researches have been progressed from various damping parameter tuning techniques to the development of the electronic controlled suspension systems. In this paper, as one of the ride performance improvement a disturbance observer(DOB) based control system is applied to the quarter car vehicle model in order to show that the DOB can obtain good vibration isolation characteristics. First, the robust stability criterion for the DOB is introduced in detail, and then how DOB is applied to the 1/4 car vehicle model is represented, and finally to confirm the effectiveness of the DOB in vehicle ride performance improvement a computer simulation is carried out for various driving conditions.

Keywords: quarter car, vibration isolation, disturbance observer, q filter, robust performance, robust stability, uncertainties, tracking errors

1. 서론

자동차의 역사와 함께 자동차 현가 장치의 성능 향상에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 현가 장치의 가장 중요한 기능은 차량의 승차감 향상이며 차량의 주행 안정성 확보를 위해서도 반드시 필요한 장치라 할 수 있다. 승차감 향상을 위해서는 노면으로부터 들어오는 불규칙적인 입력이 승객에게 전달되지 않도록 최대한 진동을 차단(vibration isolation)해야 하며, 주행 안정성 확보를 위해서는 제동 또는 코너링시 차량이 전복되지 않고 안정감을 유지할 수 있도록 적절한 전후좌우 힘의 배분이 필요하다. 이 두 기능들 사이에는 서로 상충되는 부분들이 자주 나타나기 때문에 적절한 타협(trade-off)의 필요성도 대두되기도 한다. 승차감 향상을 위한 연구가 활발하게 진행되고 있는데, 그중 중요한 사례를 소개하면 다음과 같다. D. Karnopp이 제안한 sky-hook 이론이 가장 널리 응용되고 있으며[1], 이 이론을 바탕으로 수많은 능동형 현가 장치(active suspension system)와 반능동형 현가 장치(semi-active suspension system)에 관한 연구들이 진행되어 왔다[2,3]. 또한, 응답성이 빠른 댐핑력을 얻기 위한 연구들이 활발히 진행되어 ER 유체(electro-

rheological fluid)와 MR 유체(magneto-rheological fluid)를 이용한 댐퍼에 관한 연구 개발도 많은 성과를 거두기도 했다 [4,5]. 그밖에도 진동 제어와 관련된 많은 이론들이 자동차 현가 장치의 승차감 향상을 위한 방안으로 지속적으로 제시되어 오고 있다[6,7]. 여기에서는 현가 장치의 기능 중 차량의 주행 안정성 향상 측면보다는 승차감 향상을 위한 방법의 하나로 외란 관측기(DOB: Disturbance Observer) 기반 제어 시스템에 대해 소개하고 이에 대한 이론적인 고찰 및 시뮬레이션을 통한 검증을 하고자 한다.

1/4 차량 현가 장치에 인가되는 외란을 억제하기 위하여 최적 제어, 가변 구조 제어, H_∞ 제어, H_2/H_∞ 제어, LMI (Linear Matrix Inequality), 피드백 선형화 제어 등과 같은 다양한 제어 알고리즘 등이 사용되고 있으나[8-13], 시스템의 불확실성 등으로 인해 원하는 성능을 만족하는 제어 시스템을 구현하는 것이 어렵다. 이러한 단점을 보완하기 위하여, 외란 억제에 효과적인 외란 관측기 알고리즘을 이용하고자 한다[14,15]. 본 논문에서 실제 플랫폼은 곱셈형 불확실성 모델로 표현되고 단위 궤환 제어 시스템의 강인 성능을 보장하는 궤환 제어기는 제어 설계 도구를 이용해서 설계될 수 있다고 가정한다. 먼저 일반적인 궤환 제어 시스템에서 잘 알려진 강인 성능 조건을 사용하여 외란 관측기가 포함된 궤환 제어 시스템의 강인 안정 조건을 제안하고 단위 궤환 제어 시스템 설계 시 사용한 성능 가중치 함수와 불확실성 가중치 함수를 이용하여 전체 제어 시스템을 강인 안정시키는 외란 관측기를 설계한다. 이상의 결과들로부터 외란 억제 능력을 향상시키고, 강인 안정 조건을 만족

* Corresponding Author

Manuscript received October 5, 2016 / revised October 25, 2016 / accepted November 2, 2016

소상균, 도태용: 한밭대학교 전자제어공학과

(sangso@hanbat.ac.kr/dolerite@hanbat.ac.kr)

류정래: 서울과학기술대학교 전기정보공학과(jryoo@seoultech.ac.kr)

※ 이 논문은 2015년도 한밭대학교 교내학술연구비의 지원을 받았음.

하기 위한 외란 관측기의 설계 규칙을 제안한다. 이를 기반으로 설계된 외란 관측기를 다양한 노면 환경과 실제 도로 노면 환경과 유사하게 모델링된 파워 스펙트럼 밀도(power spectral density, PSD) 기반의 도로 노면 환경에 적용한 시뮬레이션을 수행한 후, 단위 궤환 제어 시스템의 시뮬레이션 결과와 비교한다.

본 논문의 전체 구성은 II장에서 1/4 차량에 대한 모델링을 완성하고, III장에서 외란 관측기 기반 제어 시스템의 강인 안정 조건을 고찰한 후에, 1/4 차량 모델의 진동 절연 제어를 위한 설계 기법을 소개한다. IV장에서는 제안한 기법이 이론적으로 타당함을 검증하기 위해 다양한 입력 조건에 따른 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한 후, V장에서 결론을 제시한다.

II. 1/4 차량 모델링

본 논문에서 제어 대상으로 하는 1 자유도의 1/4 차량 현가 장치는 그림 1과 같다. 이 모델에서, 스프링상 질량(sprung mass)은 m , 현가 스프링 강도(suspension stiffness)는 k , 댐핑 계수(damping coefficient)는 b 로 각각 표현된다. 각 매개변수들의 값은 [16,17]에서 사용한 것과 동일하며, 표 1과 같다.

노면으로부터 입력이 상방향으로 주어지는 경우, 뉴턴 제 2 법칙에 의해, 운동 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= -b(\dot{x} - \dot{x}_i) - k(x - x_i) \\ m\ddot{x} + b\dot{x} + kx &= b\dot{x}_i + kx_i \end{aligned} \tag{1}$$

여기서, x 는 스프링상 질량의 변위, x_i 는 노면으로부터 타이어에 들어오는 입력 변위이고, 문제를 단순화시키기 위해 타이어 모델을 고려하지 않았다. 식 (1)을 라플라스 변환하면, 1/4 차량 현가 장치의 공칭 전달 함수는 식 (2)와 같다.

$$G_n(s) = \frac{X(s)}{X_i(s)} = \frac{bs + k}{ms^2 + bs + k} \tag{2}$$

식 (2)에 곱셈형 불확실성이 포함되어, 실제 플랜트

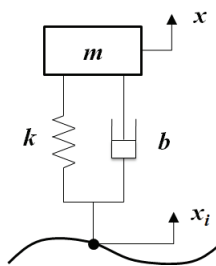


그림 1. 1/4 차량 모델.
Fig. 1. The quarter-car model of the vehicle.

표 1. 1/4 차량 모델의 매개 변수들.
Table 1. The parameters for the quarter-car model.

| | | |
|-----------|-----|------------|
| 스프링상 질량 | m | 240 kg |
| 현가 스프링 강도 | k | 16,000 N/m |
| 댐핑 계수 | b | 980 Ns/m |

$G(s)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$G(s) = (1 + \Delta(s)W_u(s))G_n(s) \tag{3}$$

여기서 $\Delta(s)$ 는 $\|\Delta\|_\infty \leq 1$ 을 만족하는 알 수 없는 안정적 인 함수이고, $W_u(s)$ 는 알려진 안정한 불확실성 가중치 함수로 여기서는 다음과 같이 주어진다.

$$W_u(s) = \frac{0.75s + 10}{s + 100} \tag{4}$$

III. 외란 관측기 기반 제어 시스템의 강인 안정 조건

외란 관측기를 포함한 궤환 제어 시스템의 강인 안정성을 논하기 전에, 그림 2와 같은 단위 궤환 제어 시스템의 강인 성능 조건을 먼저 소개한다. 여기서 $d(t)$ 는 외란, $y(t)$ 는 출력, $e(t)$ 는 추종 오차, $C(s)$ 는 궤환 제어 시스템을 안정시키고 강인 성능을 보장하는 궤환 제어기다.

보조 정리 1 [18]: 그림 1의 궤환 제어 시스템을 고려할 때, 강인 성능을 위한 필요 충분 조건은

$$\|W_p S_n| + |W_u T_n\|_\infty = \gamma < 1 \tag{5}$$

이다. 여기서 $W_p(s)$ 는 알려진 안정한 성능 가중치 함수로 가정하고, $S_n(s) = 1/(1 + G_n(s)C(s))$ 는 공칭 감도 함수이고 $T_n(s) = 1 - S_n(s)$ 는 공칭 상보 감도 함수이다. 본 논문에서 노면 프로파일의 파워 스펙트럼 밀도의 주파수 영역이 2cycle/m 이하라고 가정하여 식 (6)과 같은 $W_p(s)$ 을 사용한다.

$$W_p(s) = \frac{10}{(s/1.5 + 1)(s/40 + 1)} \tag{6}$$

$W_u(s)$ 와 $W_p(s)$ 가 식 (4)와 식 (6)으로 주어졌을 때, MATLAB의 Robust Control Toolbox [19]를 이용하여 제어기를 구하면, 식 (7)과 같이 구해진다.

$$C(s) = \frac{42264(s + z_1)(s + z_2)(s^2 + 8.19s + 71.72)}{(s + p_1)(s + p_2)(s + p_3)(s + p_4)(s + p_5)} \tag{7}$$

여기서 z_1 과 z_2 는 각각 100, 42.06이고, $p_i, i = 1, \dots, 5$ 는 $3.27 \times 10^4, 50, 27.78, 17.04, 1.5$ 이다. $|W_p S_n| + |W_u T_n|$ 은 그림 3과 같고, γ 는 0.9692로, 식 (5)의 부등식을 만족한다. 따라서 $C(s)$ 는 강인 성능을 보장한다.

강인 제어에서 제어 시스템의 성능은 기준 입력이 분포하는 주파수 대역에서의 $W_p(s)$ 의 이득을 증가시키고, 고주파에 대한 처리 능력을 높이기 위하여 $W_p(s)$ 의 주파수

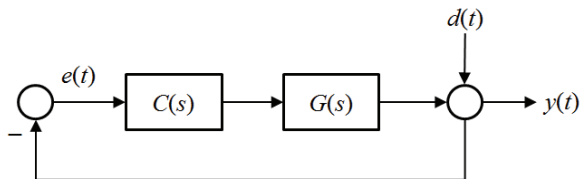


그림 2. 단위 궤환 제어 시스템.
Fig. 2. A unity feedback control system.

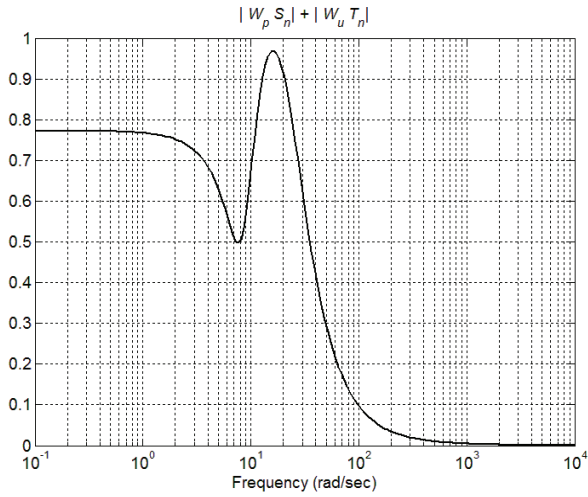


그림 3. $|W_p(j\omega)S_n(j\omega)| + |W_u(j\omega)T_n(j\omega)|$.
 Fig. 3. $|W_p(j\omega)S_n(j\omega)| + |W_u(j\omega)T_n(j\omega)|$.

대역을 넓힐수록 향상된다. 그 대신 γ 가 증가하여 식 (5)의 강인 성능 조건을 만족하기가 점점 어려워진다.

본 논문에서는 1/4 차량의 현가 장치의 강인 제어가 충분한 성능을 발휘하지 못할 경우에도, 즉, $W_p(s)$ 의 추가적인 조정없이 외란을 효과적으로 억제하기 위해서, 그림 4와 같이 기존의 궤환 제어 시스템에 외란 관측기를 추가한 제어 시스템을 제안한다. 여기서 “q 필터”로 알려진 $Q(s)$ 는 시스템의 안정도와 외란 억제 성능을 결정하는 저역 통과 필터로, 외란 관측기 설계 문제는 $Q(s)$ 의 차수와 차단 주파수를 정하는 문제로 귀결된다. 먼저 외란 관측기 기반의 제어 시스템의 강인 안정성은 정리 1과 같이 요약된다.

정리 1: 그림 4와 같은 외란 관측기 기반 제어 시스템이 $G(s) \in \Xi = \{(1 + \Delta(s)W_u(s))G_n(s) : \|\Delta\|_\infty \leq 1\}$ 에 대해서 내부 안정(internally stable)하기 위한 필요 충분 조건은 식 (8)과 같다.

$$\left\| \frac{W_u L_{n,dob}}{1 + L_{n,dob}} \right\|_\infty < 1 \quad (8)$$

여기서 $L_{n,dob}(s)$ 는 외란 관측기 기반 제어 시스템의 공칭 루프 이득으로, 그림 2의 단위 궤환 제어 시스템의 공칭 루프 이득 $L_n(s) = C(s)G_n(s)$ 와 $Q(s)$ 의 조합으로 식 (9)와 같이 표현된다.

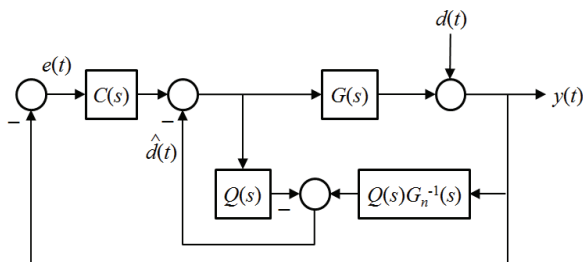


그림 4. 외란 관측기 기반의 제어 시스템.
 Fig. 4. A disturbance observer based control system.

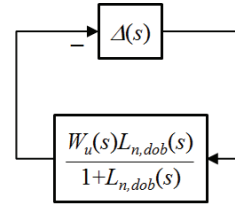


그림 5. 동등 시스템.
 Fig. 5. An equivalent system.

$$L_{n,dob}(s) = \frac{L_n(s) + Q(s)}{1 - Q(s)} \quad (9)$$

증명: [14]와 [18]을 참조하여, 외란 관측기 기반 제어 시스템의 강인 안정성을 증명하기 위하여, 그림 5와 같이, 외부 입력을 무시하고, $\Delta(s)$ 의 출력으로부터 $\Delta(s)$ 의 입력까지의 전달 함수 $M(s)$ 를 구하면 $W_u(s)L_{n,dob}(s)/(1 + L_{n,dob}(s))$ 이다. 허용 가능한 모든 $\Delta(s)$ 에 대해, $\|-\Delta M\|_\infty < 1$ 가 되기 위한 필요 충분 조건은 소 이득 (small-gain) 조건 $\|M\|_\infty < 1$ 을 만족하는 것이다. ■

설계 규칙 1: ($Q(s)$ 의 크기) 식 (9)에서 알 수 있듯이, 외란 관측기 기반 제어 시스템이 무한대의 루프 이득을 가지기 위해서는 $Q(s)$ 의 크기가 1이 되어야 한다. □

설계 규칙 2: ($Q(s)$ 의 properness) 그림 4의 외란 관측기 기반 제어 시스템을 안정하게 구현하기 위해서, $Q(s)$ 는 $Q(s)G_n^{-1}(s)$ 의 properness를 보장하여야 한다. □

정리 1의 강인 안정성을 이용하여 $Q(s)$ 의 설계 규칙을 구하는 것을 좀 더 쉽게 하기 위하여, 다음의 따름 정리를 제시한다.

따름 정리 1: 그림 4와 같은 외란 관측기 기반 제어 시스템에서, 식 (5)의 강인 성능 조건을 만족하는 궤환 제어기 $C(s)$ 가 존재한다고 가정하자. 그러면

$$|Q(j\omega)| \leq \left| \frac{W_p(j\omega)}{W_u(j\omega)} \right|, \quad \forall \omega \quad (10)$$

을 만족하는 $Q(s)$ 가 존재한다면, 외란 관측기 기반 제어 시스템은 강인 안정하다.

증명: 보조 정리 1과 식 (10)에 의해, 다음 부등식을 얻을 수 있다.

$$|QW_uS_n| + |W_uT_n| \leq |W_pS_n| + |W_uT_n| < 1, \quad \forall \omega \quad (11)$$

식 (11)의 좌변은 식 (8)과 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\left| \frac{W_u L_{n,dob}}{1 + L_{n,dob}} \right| = |W_u(QS_n + T_n)| \leq |QW_uS_n| + |W_uT_n|, \quad \forall \omega$$

따라서 식 (8)을 자동으로 만족하여, 외란 관측기 기반 제어 시스템의 강인 안정성이 보장된다. ■

설계 규칙 3: (강인 안정성) 외란 관측기 기반 제어 시스템의 강인 안정성을 보장하기 위하여, $Q(s)$ 는 식 (11)의 조건을 만족하여야 한다. □

설계 규칙 1로부터 $Q(s)$ 의 DC 이득이 1임을 알 수 있다. 설계 규칙 2와 설계 규칙 3으로부터, $Q(s)$ 의 차수와

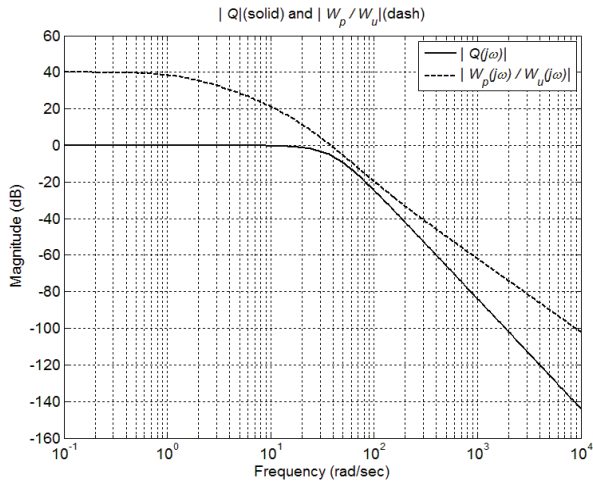


그림 6. $|Q(j\omega)|$ (실선)와 $|W_p(j\omega)/W_u(j\omega)|$ (대쉬선).

Fig. 6. $|Q(j\omega)|$ (solid line) and $|W_p(j\omega)/W_u(j\omega)|$ (dash line).

분자/분모간 상대 차수, 차단 주파수 등을 정할 수 있다. 구해진 $Q(s)$ 는 40rad/sec의 차단 주파수와 3차 저역 통과 필터로, 식 (12)와 같이 표현되며, 그림 6에서 제시한 바와 같이, 식 (10)의 강인 안정 조건을 만족한다.

$$Q(s) = \frac{64000}{(s^2 + 40\sqrt{2}s + 1600)(s + 40)} \quad (12)$$

IV. 시뮬레이션

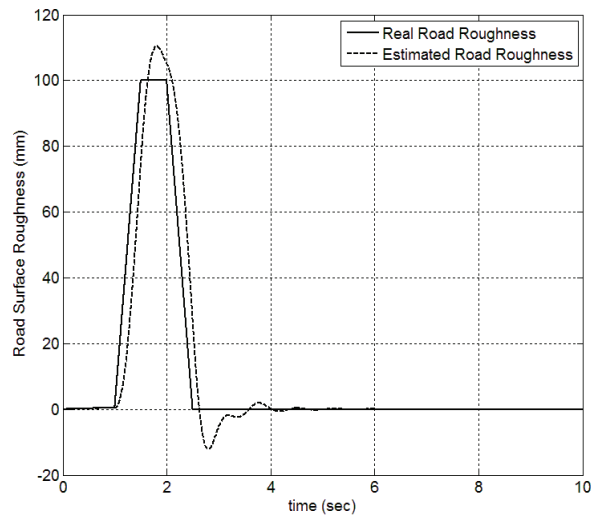
1/4 차량의 현가장치를 위한 외란 관측기 기반 제어 시스템의 성능을 평가하기 위한 시뮬레이션을 수행한다. 실제 플랜트는 공칭 모델의 m, b, k 와 10% 오차가 발생하도록 설정하였다. 기준단위 궤환 제어 시스템의 시뮬레이션 결과와의 비교를 통해, 제시한 제어 구조의 유용성을 보인다.

그림 7은 다양한 노면 프로파일에 대한 시뮬레이션 결과이다. 노면 입력의 크기는 100mm로 동일한 반면, 노면 입력의 지속 시간은 각각 1.5초, 3초, 4.5초로 다르게 하여 시뮬레이션을 수행한다. 그림 7(a), (c), (d)에서는 주어진 노면 입력에 대해, 외란 관측기를 이용한 추정 신호 $\hat{d}(t)$ 를 함께 보여준다.

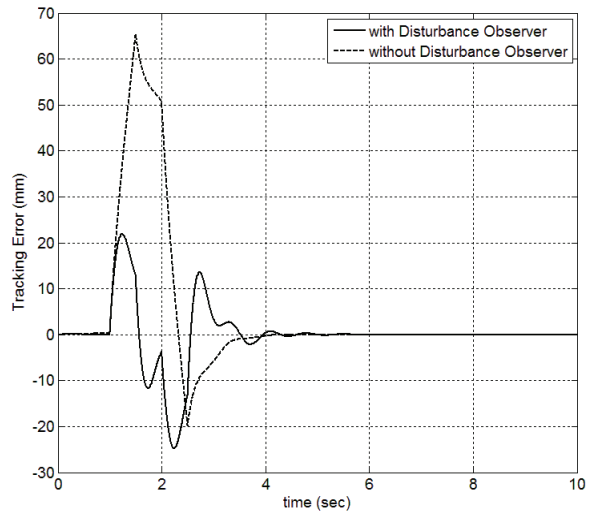
노면 입력에 대한 추종 오차는 외란 관측기를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우에 따라 큰 차이가 발생하는 것을 그림 7(b), (d), (f)에서 확인할 수 있다. 이에 대한 정확한 정보를 얻기 위해, 추종 오차의 RMS 값과 최대 크기를 표 2에 나타낸다.

표 2에서 보여지는 바와 같이, 외란 관측기를 사용한 경우, 추종 오차의 RMS 값과 최대값이 외란 관측기를 사용하지 않는 경우에 비해 훨씬 작다. 외란 관측기를 사용한 경우, 노면 입력의 발생 시간이 증가함에 따라, 추종 오차의 RMS 값과 최대 크기가 급격하게 감소하지만, 외란 관측기가 없는 경우에는 RMS 값이 증가하고, 최대 크기는 거의 감소하지 않는다.

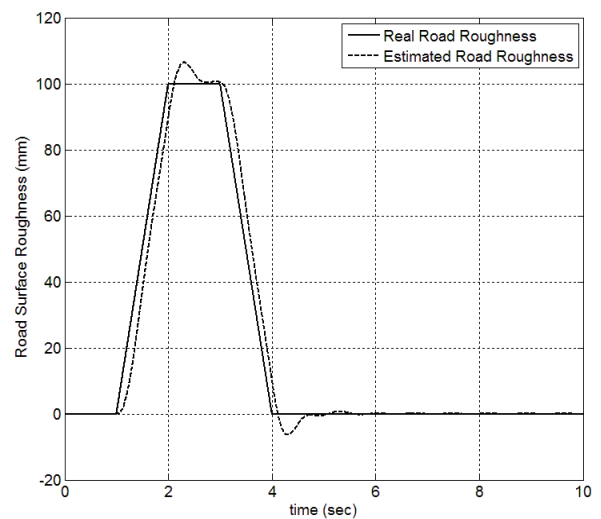
이와 같은 현상은 단위 궤환 제어 시스템에서 루프 이득은 저주파 대역에서 거의 일정하지만, 외란 관측기 기반 제



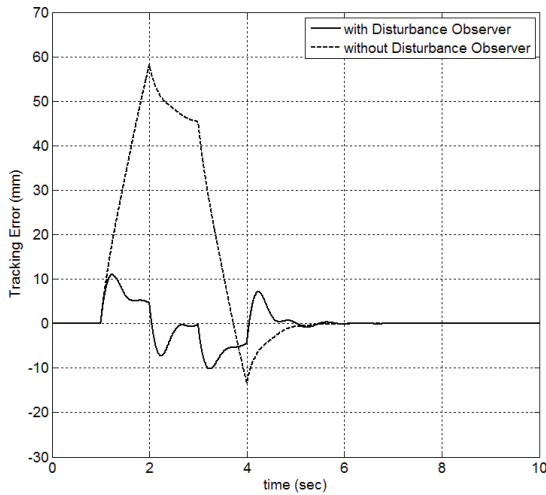
(a) The real road roughness(solid line) and the estimated road roughness(dash line).



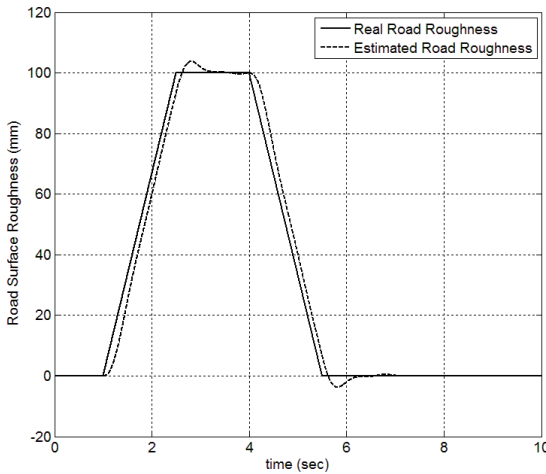
(b) The tracking error to the real road roughness of (a) : with/without DOB(solid/dash line).



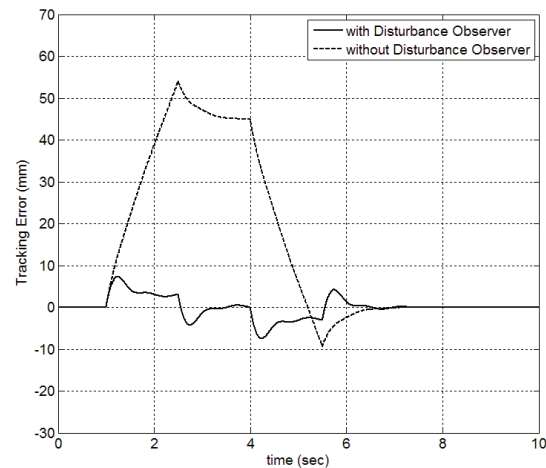
(c) The real road roughness(solid line) and the estimated road roughness(dash line).



(d) The tracking error to the real road roughness of (c) : with/without DOB(solid/dash line).



(e) The real road roughness(solid line) and the estimated road roughness(dash line).



(f) The tracking error to the real road roughness of (e) : with/without DOB(solid/dash line).

그림 7. 다양한 노면 프로파일에서 외란 추정과 추종 오차.
Fig. 7. Disturbance estimations and tracking errors for various road roughness profiles.

표 2. 추종 오차의 RMS 값과 최대 크기.

Table 2. RMS values and maximum magnitudes of tracking errors.

(a) RMS values of tracking errors. (단위 : mm)

| | 그림 7(b) | 그림 7(d) | 그림 7(f) |
|---------|---------|---------|---------|
| DOB 사용 | 6.887 | 3.744 | 2.656 |
| DOB 미사용 | 17.31 | 21.52 | 25.06 |

(b) Maximum magnitudes of tracking errors. (단위 : mm)

| | 그림 7(b) | 그림 7(d) | 그림 7(f) |
|---------|---------|---------|---------|
| DOB 사용 | 24.73 | 11.02 | 7.45 |
| DOB 미사용 | 65.50 | 58.12 | 54.06 |

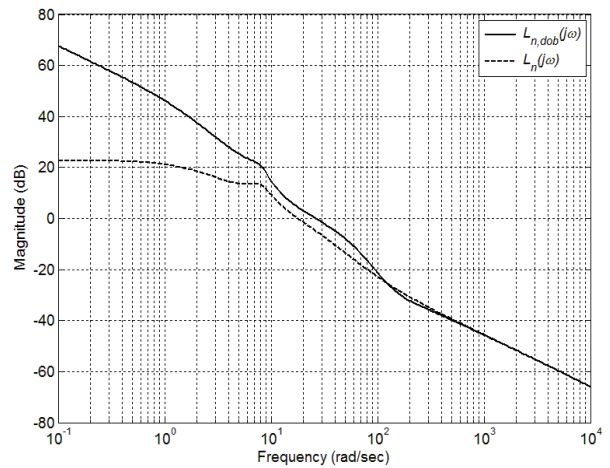


그림 8. 외란 관측기를 포함한 공칭 루프 이득 $L_{n,dob}(j\omega)$ (실선)과 그렇지 않은 경우의 공칭 루프 이득 $L_n(j\omega)$ (대쉬선).

Fig. 8. Loop gains with/without(solid/dash line) disturbance observer.

어 시스템의 루프 이득은 고주파수 대역에서 저주파수 대역으로 갈수록 급격하게 증가하기 때문에 발생한다. 즉, $Q(s)$ 가 저역 통과 필터일 경우, 식 (9)의 $L_{n,dob}(s)$ 에 있는 $1/(1-Q(s))$ 가 적분기 특성을 가지기 때문에 나타나는 현상이다. 앞에서 설명한 외란 관측기 기반 제어 시스템의 루프 특성을 보여주기 위해, 그림 8에서는 단위 게환 제어 시스템과 외란 관측기 기반 제어 시스템의 공칭 루프 이득을 비교해서 보여준다.

보다 더 실제 도로와 유사한 환경에서, 제시한 외란 관측기 기반 제어 시스템의 유용성을 보이기 위해, 그림 9와 같은 도로 노면 거칠기(road surface roughness)의 파워 스펙트럼 밀도를 가지는 노면 입력에 대해서 시뮬레이션을 수행한다.

그림 10은 그림 9의 파워 스펙트럼 밀도를 갖는 노면 프로파일과 이를 외란 관측기가 추정한 값 $\hat{d}(t)$ 를 함께 나타내고 있다. 외란 관측기가 노면 프로파일의 저주파 성분을 약간의 시간 지연을 가지면서 추종하고 있다. 그림 11은 외란 관측기를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우의 제어 시스템의 추종 오차이다. 앞의 다양한 노면 프로파일을 이용

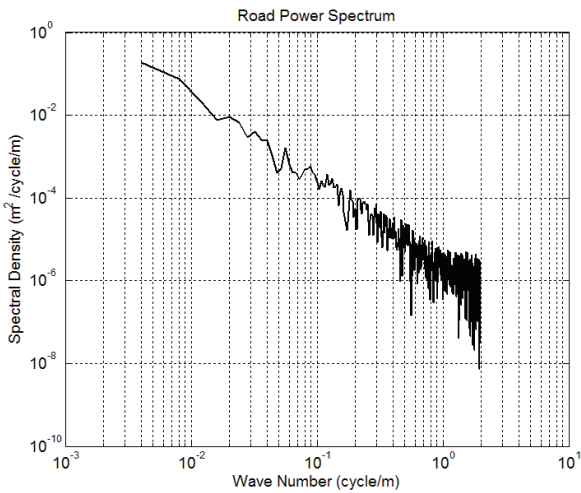


그림 9. 도로 노면 거칠기의 파워 스펙트럼 밀도.
Fig. 9. Power spectral density of road surface roughness.

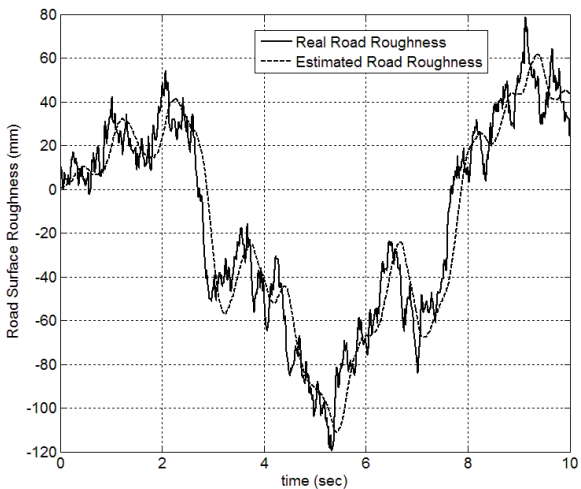


그림 10. 노면 프로파일과 외란 관측기에 의해 추정된 노면 프로파일.
Fig. 10. Road roughness profile and its estimation by the disturbance observer.

하여 실험한 결과와 유사하게, 외란 관측기를 사용한 경우 월등하게 우수한 성능을 발휘한다. 외란 관측기를 사용하지 않은 경우, 추종 오차는 -60mm에서 60mm 사이에 대부분 분포하지만, 외란 관측기를 사용한 경우, 추종 오차는 -20mm에서 20mm 사이에 주로 분포한다. 보다 정확한 실험 결과를 확인하기 위해, 표 3에서 RMS 값과 오차의 최대 크기와 같은 정량적인 수치를 비교한다.

표 3에서 확인할 수 있듯이, 외란 관측기 기반 제어 시스템이 추종 오차의 RMS 값과 최대 크기가 단위 궤환 제어 시스템보다 훨씬 적다. RMS 값을 비교하였을 때, 외란 관측기 기반 제어 시스템의 성능이 월등히 우수함을 확인할 수 있다. 즉, 단위 궤환 제어 시스템의 추종 오차는 0을 중심으로 크게 변하는 것에 반해, 외란 관측기 기반 제어 시스템의 추종 오차는 최대 크기도 작지만, 0을 중심으로 크게 변하지 않음을 의미한다.

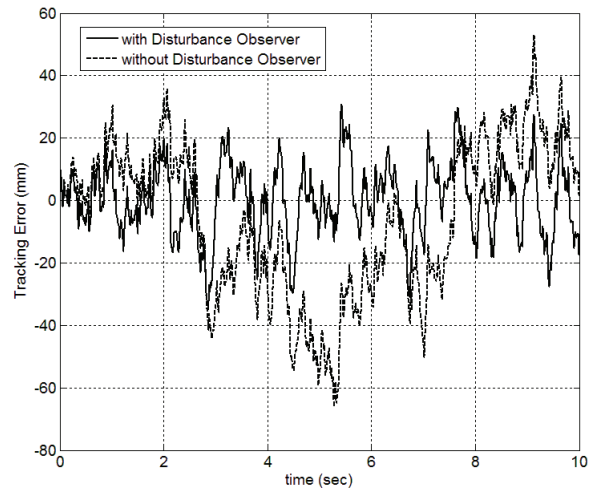


그림 11. 추종 오차 : 외란 관측기를 사용한 경우(실선)와 그렇지 않은 경우(대쉬선).

Fig. 11. Tracking errors : with/without disturbance observer(solid line/dash line).

표 3. 그림 11의 추종 오차의 RMS 값과 최대 크기.

Table 3. RMS values and maximum magnitudes of tracking errors in Fig. 11.

| | (단위 : mm) | |
|-------|-------------|------------|
| | DOB를 사용한 경우 | DOB가 없는 경우 |
| RMS 값 | 11.59 | 25.42 |
| 최대 크기 | 34.90 | 65.90 |

V. 결론

본 논문에서는 1/4 차량 현가 장치에 인가되는 노면 입력력을 억제하기 위한 외란 관측기 기반 제어 시스템을 설계하는 방법을 제시하고 그 성능을 보였다. 기존 단위 궤환 제어 시스템의 강인 성능 조건을 만족하는 제어기와 이를 설계할 때 사용한 성능 가중 함수, 불확실성 가중 함수를 이용하여 외란 관측기 기반 제어 시스템의 강인 안정 조건을 구하고, 이를 기반으로 외란 관측기를 설계하였다. 사다리꼴 모양의 노면 프로파일과 파워 스펙트럼 밀도 기반의 노면 프로파일을 1/4 차량 현가 장치의 노면 입력으로 사용하여 설계된 외란 관측기의 유용성을 보였다.

REFERENCES

[1] D. C. Karnopp, "Vibration control using a semi-active force generator," *Trans. ASME Journal of Engineering for Industry*, vol. 96, 1974.

[2] L. H. Nguyen, K.-S. Hong, and S.-H. Park, "Road-frequency adaptive control for semi-active suspension systems," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 8, no. 5, pp. 1029-1038, 2010.

[3] J.-H. Park, "A study on active suspension control system in vehicle bouncing and pitching vibration for improving ride comfort," *Journal of the Korea Society of Computer and Information*, vol. 12, no. 2, pp. 325-331, 2007.

- [4] W. K. Baek, "1/4 car vibration simulation using an empirical MR damper model," *The Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, vol. 15, pp. 1016-1022, 2005.
- [5] T.-S. Kim, "Modified sensitivity control of a semi-active suspension system with MR-damper for ride comfort improvement," *The Korean Society of Mechanical Engineers*, vol. 31, pp. 129-138, 2007.
- [6] G. Lee, K. H. Lee, and S. Im, "The development and application of the analysis method for the ride comfort improvement," *Proc. of the Korean society of automotive engineers*, vol. 2, pp. 741-745, 2004.
- [7] S. So and K. Cho, "A study on the variable damping characteristics of the continuous controlled semi-active suspension system and the effect analysis of the vehicle motion performance," *Journal of KSAE*, vol. 7, no. 8, pp. 190-198, 1999.
- [8] A. Alleyne and J. K. Hedrick, "Nonlinear control of a quarter car active suspension," *Proc. of the American Control Conference*, pp. 21-25, 1992.
- [9] E. Abdellahi, D. Mehdi, and M. M'saad, "On the design of active suspension system by H_∞ and mixed H_2/H_∞ : An LMI approach," *Proc. of the American Control Conference*, pp. 4041-4045, 2000.
- [10] C. Lauwerys, J. Swevers, and P. Sas, "Robust linear control of an active suspension on a quarter car test-rig," *Control Engineering Practice*, vol. 13, pp. 577-586, 2005.
- [11] S. M. Badran, "Robust LMI-based controller design using H_∞ and mixed H_2/H_∞ for semi active suspension system," *International Journal of Computational Engineering Research*, vol. 2, no. 8, pp. 172-180, 2012.
- [12] A. Agharkakli, G. S. Sabet, and A. Barouz, "Simulation and analysis of passive and active suspension system using quarter car model for different road profile," *International Journal of Engineering Trends and Technology*, vol. 3, no. 5, pp. 636-644, 2012.
- [13] T. H. Kim and I. Y. Lee, "Position control of a 1/4 car suspension simulator using a feedback linearization controller," *Journal of Drive and Control (in Korean)*, vol. 9, no. 3, pp. 8-15, 2012.
- [14] J. R. Ryoo, T.-Y. Doh, and M. J. Chung, "Robust disturbance observer for the track-following control system of an optical disk drive," *Control Engineering Practice*, vol. 12, pp. 577-585, 2004.
- [15] K. Lee, W. Ha, and J. Back, "Overview of disturbance observation techniques for linear and nonlinear systems," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 22, no. 5, pp. 332-338, 2016.
- [16] S. Türkay and H. Akçay, "A study of random vibration

characteristics of the quarter-car model," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 282, pp. 111-124, 2005.

- [17] S. Türkay and H. Akçay, "Aspects of achievable performance for quarter-car active suspensions," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 311, pp. 440-460, 2008.
- [18] J. C. Doyle, B. A. Francis, and A. R. Tannenbaum, *Feedback Control Theory*, Macmillan Publishing Company, 1992.
- [19] G. Balas, R. Chiang, A. Packard, and M. Safonov, *Robust Control Toolbox User's Guide*, The MathWorks, Inc., 2016.



소 상 군

1982년 전북대학교 기계공학과 졸업. 1992년 Oregon State Univ. 기계공학과 석사. 1996년 Univ. of California at Davis 기계공학과 박사. 1996년~1998년 삼성전기 부장. 1982년~1989년 국방기술품질원 연구원. 1998년~현재 국립한밭대학교 전자제어공학과 교수. 관심분야는 차량동역학 및 제어.



류 정 래

1996년 한국과학기술대학 전기 및 전자공학과 졸업. 1998년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사 및 2004년 박사. 2004년~2005년 9월 삼성전자 Sys. LSI 책임연구원. 2005년 10월~현재 국립서울과학기술대학교 전기정보공학과 교수. 관심분야는 강인 동작 제어, 광디스크 드라이브 서보 제어, DSP 기반 디지털 제어 시스템 설계.



도 태 용

1992년 경북대학교 전자공학과 졸업. 1994년, 1999년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사 및 박사. 1997년~2001년 삼성전자 책임연구원. 2002년~현재 국립한밭대학교 전자제어공학과 교수. 관심분야는 반복 제어, 강인 제어, 외란 관측기, 센서 신호 처리, DSP 기반 임베디드 제어 시스템.