

고이득 관측기를 이용한 서스펜션 상대속도 추정

김병준*¹⁾, 정기철¹⁾, 최세범*¹⁾

한국과학기술원 기계공학과¹⁾

Suspension Relative velocity estimation using High gain observer

Byungjun Kim*¹⁾ · Kicheol Jeong¹⁾ · Seibum Choi*¹⁾

¹⁾ Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology,

291 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34141, Republic of Korea

Abstract: 본 논문은 차량의 용수철 상질량에 장착된 가속도 센서를 기반으로 한 서스펜션 상대속도 추정 관측기를 다루었다. 서스펜션의 상대속도의 경우 차량의 승차감 개선을 위해 필요한 감쇠력 제어에 필수적으로 필요한 정보이다. 대부분의 기존 논문들은 뒷바퀴의 로드 입력이 앞바퀴에서 들어오는 노면 입력과 같은 입력이 들어온다고 가정하여 추정하는 알고리즘에 대해 다루었다. 하지만, 이는 뒷바퀴에서 들어오는 입력이 앞바퀴와 일정 시간 이후에 들어오기 때문에 차량의 속도를 정확하게 추정하지 못할 경우 오차가 크다. 그렇기에 본 논문에서는 상질량에 장착된 가속도 센서 하나만을 이용하여, 앞바퀴의 노면 입력을 사용하지 않는 관측기를 제안하였다. 새로운 관측기는 기존의 논문에서 사용한 노면 입력에 강건한 관측기에서 시작된다. 이후 관측기의 정확도를 올리고 관측기의 안정성을 위한 게인 값의 범위를 지정해주었다. 시뮬레이션을 통해 전 차량 모델에서의 관측기의 상대속도 추정 정확도를 검증하였다. 최종적으로, 새로 설계한 관측기는 여러 종류의 노면 입력으로 1/4 차량 테스트 벤치를 활용하여 실험적으로 검증되었다.

Key words: High gain observer(고이득 관측기), Suspension relative velocity estimation(서스펜션 상대속도 추정), Quarter car test bench(1/4 차량 테스트 벤치), Semi-Active suspension(반 능동적 서스펜션)

Nomenclature

Z_s : Sprung mass displacement, m
 Z_u : Unsprung mass displacement, m
 Z_1 : Relative distance $Z_s - Z_u$, m
 Z_2 : Relative velocity $\dot{Z}_s - \dot{Z}_u$, m/s
 m_s : Sprung mass weight, kg
 k : Spring constant, Nm
 b : Damping coefficient, Ns/m
 T : Sampling time, s

1. 서론

차량의 서스펜션 상대속도는 SAS(Semi-Active suspension) 반 능동적 서스펜션 차량의 승차감을 개선시키기 위해 필요한 감쇠력 제어에 있어 매우 중요한 정보이다. 감쇠력은 댐핑 계수와 상대속도의 곱으로 표현되기 때문에, 상대속도를 정확하게 추정하는 것은 좋은 제어만큼 중요한 영향을 끼친다. 차량의 서스펜션 제어에는 (sky-hook)스카이-훅 제어가 많이 사용되며 이 중에서도 두개의 조건

* 김병준, E-mail: asx9608@kaist.ac.kr

만을 사용하는(Two-state sky-hook)제어를 사용한다. 이 제어 기법은 상대속도의 부호에 의해서 댐핑 계수를 조절한다. 그러므로 제어에 있어 상대속도의 정확한 위상을 알아내는 것이 중요하다.

직접 속도 센서를 이용하여 상대속도를 측정하면 정확한 상대속도를 얻을 수 있지만 측정하는 센서의 값이 비싸, 실제 차량에서는 차량의 상질량과 하부 질량에 부착된 2개의 가속도 센서를 이용하여 상대속도를 추정한다. 일반적으로 가속도 센서를 이용한 상대속도 추정에는 적분기를 이용하여 가속도를 적분하는 방법이 있으나 센서 값을 적분할 경우 센서 값에 드리프트가 생겨 발산하는 문제를 가지고 있다. 상대속도를 추정하는 또다른 방법으로 루엔버거 관측기를 이용하는 방법이 있다. 그러나 이러한 방법은 노면의 입력을 모르는 문제와 차량의 뒷바퀴에는 용수철 하부질량에 가속도 센서가 부착되어 있지 않기 때문에 뒷바퀴의 상대속도를 추정할 수 없는 문제를 가지고 있다.

기존의 논문에서는 뒷바퀴에 들어오는 노면 입력이 일정 시간이 지난 앞바퀴에서 들어오는 노면 입력과 일치한다는 가정으로 뒷바퀴 서스펜션 상대속도를 추정하는 방식의 연구가 많이 진행하였다. 그러나 이러한 방법은 차량의 속도를 정확하게 알고 있어야 하는 문제를 가지고 있으며, 차량의 속도는 아직까지 정확하게 추정하지 못한다는 문제를 가지고 있다. 이처럼 오랜 기간에 걸쳐 서스펜션의 상대속도를 추정하는 논문들이 출판되었으나 기존의 논문은 모든 위치에 센서가 있다고 가정하거나, 뒷바퀴에 여러가지 가정을 추가해 상대속도를 추정한다. 따라서 직접적으로 뒷바퀴의 서스펜션 상대속도를 추정할 수 없으며, 앞바퀴의 추정 값보다 부정확한 추정을 하는 단점을 가지고 있다.

그렇기에 본 논문에서는 고이득 관측기를 통해 차량의 상질량에 부착된 가속도 센서만을 이용해 뒷바퀴 서스펜션의 상대속도를 추정하는 관측기를 소개한다. 이는 뒷바퀴 추정에 필요했던 가정들이 필요 없기 때문에 보다 직관적이고 강건한 성능을 보일 것으로 기대한다. 또한 앞 바퀴 용수철 하부 질량에 부착된 가속도 센서를 제거하여도 상대속도를 추정할 수 있기 때문에 차량의 센서 개수를 줄일 수 있을 것으로 기대한다

2. 고이득 관측기

고이득 관측기는 관측기의 이득(Gain)값을 높여 시스템의 모델보다 측정 값에 비중을 주어 시스템의 상태를 추정하는 방법이다. 본 절에서는 이를 상대속도를 추정에 적용하는 방법에 대해 설명한다.

2.1 노면 입력에 강건한 관측기 설계

고이득 관측기를 설계하기 위하여 1/4 차량의 서스펜션 모델의 형태에서 변형을 시켜주어야 한다. 노면 입력에 강건한 모델을 설계하기 위해 기존에 연구된 모델을 사용하였다.²⁾ 이 모델은 알지 못하는 노면 입력을 센서를 통해 얻은 측정값으로 대신하여, 노면 입력을 알지 못해도 관측기 모델을 통해 상대속도를 추정할 수 있다

$$\dot{\hat{z}}_1 = \hat{z}_2 + h_1(y_1 - \hat{y}_1)$$

$$\dot{\hat{z}}_2 = \ddot{z}_s + \ddot{y}_2 + h_2(y_1 - \hat{y}_1)^2$$

2.2 센서 개수를 줄인 고이득 관측기 설계

2.1의 모델 형태에서 h 값을 높여주면 관측기는 모델의 영향을 적게 받기 때문에 아래와 같은 고이득 관측기의 형태로 나타낼 수 있다.¹⁾

$$\dot{\hat{z}}_1 = \hat{z}_2 + h_1(y_1 - \hat{y}_1)$$

$$\dot{\hat{z}}_2 = \phi_0(\hat{z}, u) + h_2(y_1 - \hat{y}_1)$$

h값을 높여줄 경우 모델의 불확실성을 아래와 같이 정의하면, 불확실성 δ 가 추정 값에 얼마나 큰 영향을 미치는지 δ 에서 $\hat{z}_2$ 로 가는 전달함수 $G_0(s)$ 를 통해 확인할 수 있다.

$$\delta(x, \hat{x}) = \phi(z, u) - \phi_0(\hat{z}, u),$$

$$G_0(s) = (s + h_1)/(s^2 + h_1s + h_2)$$

$h_2 \gg h_1 \gg 1$ 조건을 만족할 경우 $G_0(s)$ 는 0으로 수렴하기 때문에 이득을 높여줄수록 모델의 불확실성에 강건한 고이득 관측기를 설계할 수 있다. 그러나 h값을 높여줄 경우 센서 노이즈에 민감한 단점이 있기 때문에 적절한 이득 값을 선정하는 것이 관측기의 성능에 중요하다.

2.3 고이득 관측기의 h 한계 설정

실제 차량에 센서는 연속적인 센서 값을 보내주는 것이 아닌 불연속으로 센서 값을 보내주기 때문에 h를 크게 해줄 경우 관측기가 불안정하다. 따라서 이를 수식적으로 범위를 구해주기 위해

위의 고이득 관측기를 불연속 모델로 변형해 준 후, 불연속 관측기 상태방정식 모델의 고유값의 크기가 1보다 작아야 한다는 점근 안정성 (asymptotically stable) 조건을 만족하도록 h 값을 설정해준다. 위의 과정을 통해 나온 h 값의 범위는 아래와 같다.

$$H_1 = \frac{h_1}{\varepsilon}, \quad H_2 = \frac{h_2}{\varepsilon^2}$$

$$m = \frac{k}{m_s}, \quad n = \frac{b}{m_s}$$

$$p = \sqrt{k^2 + \frac{4T^2 H_2 a}{\varepsilon^2}}, \quad k = \frac{TH_1 m}{\varepsilon} + \frac{TH_2 n}{\varepsilon^2}$$

$$a_1 = 1 + k + 0.5p$$

$$a_2 = 1 - 0.5p$$

$$|a_{1,2}| < 1$$

$a_{1,2}$ = 불연속 고이득 관측기 모델의 고유값

위의 조건에 의하면 h 를 높여줄수록 관측기의 안정성을 위해 T (Sampling time)가 작아져야 한다. 실제 차량에서 가속도 센서 값은 보통 1ms로 들어오기 때문에 위의 조건을 만족시키는 h 를 설정해 줄 수 있다. 시간에 대하여 일정한 다른 상수들과는 다르게, Fig.1과 같이 댐핑 계수는 상대속도에 따라서 변하기 때문에 h 값을 실시간으로 변하게 하여 수렴성을 증가시킬 수 있다.

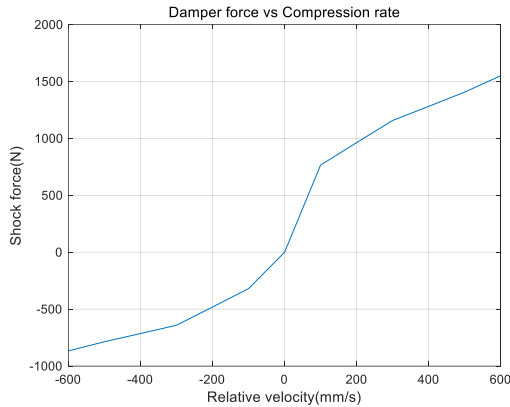


Fig.1 실험에 사용한 감쇠력-상대속도 관계 그래프

3. 관측기의 안정성과 수렴성 검증

3.1 전체 차량 모델 시뮬레이션 검증

Carsim 시뮬레이션을 이용하여 임의의 노면을 주행하였을 때, 상대속도의 추정 값이 시뮬레이션 상

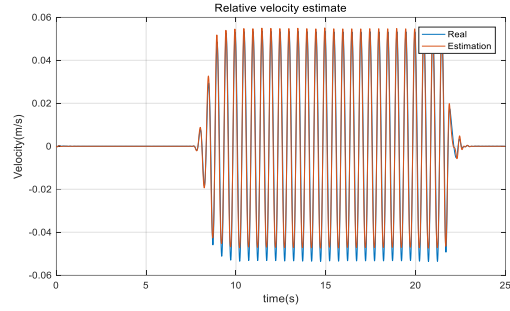


Fig.2 시뮬레이션을 통해 추정한 상대속도의 실제 서스펜션 상대속도와 일치하였다. 시뮬레이션에서 사용한 차량의 종류는 D클래스 세단이며 차량의 상, 하 질량과 스프링, 댐퍼의 정보를 모두 반영하고, Two-state sky-hook 로직을 이용하여 제어한 차량의 상대속도를 추정하였다.

위의 추정 결과 그래프를 통해 고이득 관측기가 시뮬레이션 상에서 올바르게 추정하고 있음을 확인할 수 있다. 진폭이 조금 차이나는 이유는 시뮬레이션 속 차의 댐핑 계수가 추정 관측기의 댐핑 계수와 정확하게 일치하지 않기 때문에 생겨나는 오차와 실제 시뮬레이션과 1/4차량 모델의 오차라고 해석할 수 있다.

시뮬레이션 상에서는 센서의 노이즈를 만들어 주지 않았기 때문에 실제 값과 추정 값의 과형이 일치하는 것을 확인할 수 있다. 실제 센서의 경우 노이즈를 포함하기 때문에 이를 반영한 고이득 관측기의 성능에 대해서는 아래의 테스트 벤치 실험을 통해 확인하였다.

3.2 1/4 차량 테스트 벤치 실험 검증

Fig.1과 같은 1/4 차량 테스트 벤치를 통해 구성

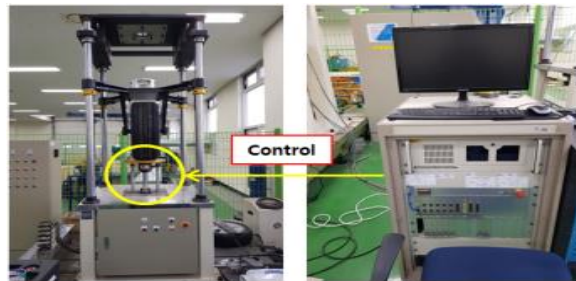


Fig.1 실험에 사용한 1/4 차량 테스트 벤치

한 고이득 관측기의 성능을 검증하였다. 1/4차량의 용수철 상질량에 가속도 센서를 부착하여 상, 하 가속도 값을 얻었다. 스프링과 댐퍼에 평행하게 LVDT 센서를 부착하여 실제 상대 변위와 상대 속도를 알아낸 후, 가속도 센서 값과 고이득 관측기를 통한 상대속도 추정 값과 비교하였다.

성능	1 자유도 시스템
용량	7KW
가진력	17.8kN
가진변위	304mm
가진 속도	1.0m/s
용수철 상 질량	374.03kg
용수철 하 질량	52.25kg

Table 1 테스트 벤치의 성능 및 변수 설정

2Hz의 사인파, 5Hz의 정현 스위프로 노면을 가진 시켜 주어 센서 값을 통해 상대속도를 추정 결과는 Fig.2,3과 같다. 용수철 상질량의 센서 하나만을 이용해서 측정하여도 상대속도의 추정이 잘 이루어 지는 것을 확인 할 수 있다.

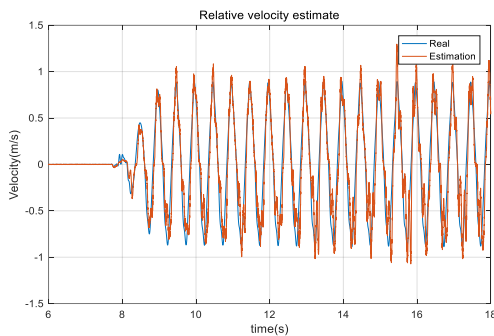


Fig.2 정현파 노면 입력 상대속도 추정 결과

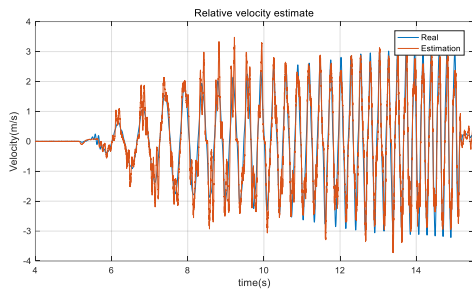


Fig.3 정현 스위프파 노면 입력 상대속도 추정 결과

실험 결과가 h값이 크기 때문에 노이즈에 어느 정도 민감한 것을 확인할 수 있으나 2.3절의 조건을 만족하는 h중 작은 값을 사용하여 이를 최소화 하였다. 노이즈가 증폭되어 추정 값의 크기는 오

차가 어느정도 존재하나 위상은 거의 정확한 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 용수철 상질량의 가속도 센서만을 이용한 상대속도 추정 알고리즘의 성능을 실험적으로 보여주었다.

4. 결 론

본 논문에서는 고이득 관측기를 이용한 상대속도 추정 방법에 대해 소개했다. 높은 이득 값을 가질 수록 정확도가 증가하나, 센서의 노이즈에 민감해지는 문제를 가지고 있다. 따라서 적절한 이득 값을 정해주어 노이즈에 덜 민감하면서 잘 수렴하는 고이득 관측기를 설계하였다. 이러한 관측기는 시뮬레이션과 1/4차량 테스트 벤치를 이용하여 실험적으로 검증하였다.

References

- 1) Jeffrey H. Ahrens, Hassan K. Khalil, "High-gain observers in the presence of measurement noise: A switched-gain approach" Automatica, Vol.45, Issue4, pp. 936-943, 2009
- 2) Kyongsu Yi, "Design of Disturbance Decoupled Bilinear Observers", KMSE, Vol.9, No. 3, pp. 344-350, 1995
- 3) Kyongsu Yi, Byung Suk song, "Observer design for semi-active suspension control", International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, Volume 32, Issue 2-3, 1999
- 4) Hernandez-Alcantara, D., Amezcua-Brooks, L., and Morales-Menendez, R., "State-Observers for Semi-Active Suspension Control Applications with Low Sensitivity to Unknown Road Surfaces," SAE Technical Paper 2014-01-0867, 2014
- 5) Sanghoon Kim, Larkkyo Kim, "Speed-sensorless control of DC servo motor using a high gain observer", The transaction of the Korean institute of electrical engineers, Vol.D, No.52D (10), pp. 583-590, 2003
- 6) A. Tornambe, "Use of asymptotic observers having-high-gains in the state and parameter estimation", IEEE, Proceeding of the 28th IEEE conference on Decision and Control,

