

비대칭형 유압실린더를 사용한 능동현가 시스템에서의 Feedback Linearization을 이용한 최적 제어기 설계

Optimal Controller Design for Active Suspension System with Asymmetric Hydraulic Cylinder using Feedback Linearization

°Yujin Jang, Sang-Woo Kim, PooGyeon Park

포항공과대학교 전자전기공학과 (Tel : (0562) 279-5679; Fax: (0562)279-5699; E-mail: gabang@cap.postech.ac.kr)

Abstract Asymmetric cylinders are usually used as an actuator of active suspensions. The conventional optimal controller design does not include actuator dynamics as a state, and force controller is needed to track the desired force. But the actuator is not ideal, so performance of an active suspension system is degraded. In this paper, we take account nonlinear actuator dynamics and obtain a linear model using a feedback linearization technique then apply optimal control method. Effectiveness of proposed method is demonstrated by numerical simulation of 1/4 car model

Keywords Active suspension, Asymmetric cylinder, Optimal control, Feedback Linearization

1. 서론

자동차의 도로 주행 시, 범퍼나 도로의 불규칙성은 타이어를 거쳐 자동차 차체에 충격을 주어 운전자와 승객의 승차감과 안정성에 영향을 미친다. 여기서 안정성은 자동차의 핸들링에 관계되는 조향성으로 타이어나 도로의 접지의 정도에 따라 결정된다. 승차감은 차체의 여러 가지 축과 1/4차량 모델에서의 수직 방향의 진동에 의해 결정된다고 할 수 있다. 이러한 도로의 불규칙성에 의한 안정성과 승차감에 미치는 나쁜 영향을 줄이기 위해 1950년 이후 현가 시스템(suspension system)에 대한 연구가 진행되어 왔다. 현재까지 대부분의 자동차에 스프링과 완충기로 구성된 수동 현가 시스템을 사용하고 있는데, 이것은 공진 주파수에서의 시스템 이득을 상당히 줄여서 성능향상을 가져 왔지만 스프링 상수와 댐핑 상수가 고정되어 있어서 시스템의 가변적 환경에 능동적으로 대처 할수 없고 수동현가 시스템 자체의 공진 주파수(대략 1Hz) 때문에 저주파 대역에서 외란에 대한 성능향상을 기대하기 어렵다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 1970년 이후 수동현가 시스템에 액츄에이터를 추가한 능동현가시스템에 대한 연구가 활발히 진행되어왔다. 능동현가 시스템은 자동차의 운행 상태의 환경 변화에 대한 정보를 여러 가지 센서를 통해서 입력받아서 액츄에이터가 발생시켜야 하는 힘을 조절하게 하는 것이 목적이다.

능동현가 시스템을 위한 여러 가지 제어이론들이 연구 되어졌는데 Sky Hook제어, 최적제어, 적응제어등이 여기에 속한다 [1][2][3][4].

LQR/LQG의 최적제어 기법은 비교적 오래전부터 알려진 방법으로 제곱 형태의 성능 평가함수를 최소화 하는 제어 입력을 찾는 기법인데, 여러 가지 성능 기준에 대한 가중치를 조절해서 만족스러운 성능을 내게한다. 그러나, 지금까지의 최적제어 이론의 적용에는 액츄에이터의 특성을 고려하지 않고 액츄에이터가 발생시켜야 하는 힘을 최적제어 이론을 사용하여 구하고, 그 힘은 힘제어(force control)를 이용하여 발생시켰었다.[5] 이러한 방법은 액츄에이터의 비선형성을 고려하지 않고 간단히 최적제어 이론을 적용시킬수 있는 장점이 있는 반면 액츄에이터의 성능이 이상적이지 않기 때문에 실제로 적용했을 때 기대했던 성능이

나오지 않는 단점이 있다. 본 논문에서는 비대칭형 액츄에이터가 발생시키는 힘을 상태변수로 놓고, feedback linearization을 이용하여 선형화 시킨후에 최적제어 이론을 적용하였다. 이렇게 함으로써 이상적이지 않은 액츄에이터를 사용한 능동현가시스템에서 기존의 힘제어를 적용했을 때 나타나는 성능 저하에 대한 문제를 최소화 하였고, 모의 실험을 통해 검증했다.

2장에서는 능동현가 시스템의 모델링을 다루었고, 3장에서는 액츄에이터에서 발생하는 힘을 상태변수로 놓고 feedback linearization방법을 이용한후 최적제어 기법을 적용했고,4장에서는 힘제어(force control)를 이용한 최적제어기법과 3장에서 제시한 기법을 이용한 제어 방식의 성능을 모의 실험을 통해서 비교하였다.

2. 능동현가 시스템 모델

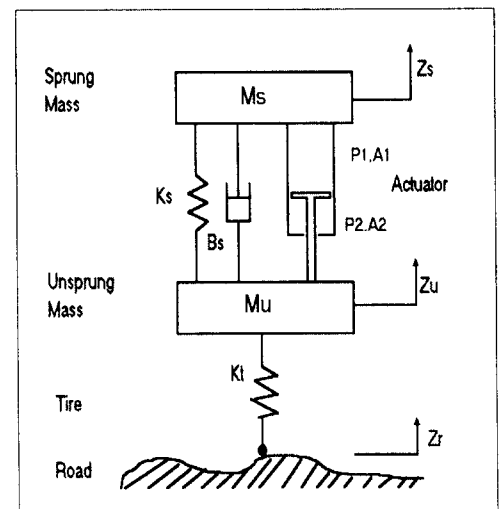


그림 1. 1/4 차량 모델
Fig 1. Quarter Car Suspension

2.1 1/4 차량모델

그림 1은 본 논문에서 고려한 1/4차량의 모델이 제시되어 있다. 여기서 K_s 는 수동현가 시스템의 스프링 상수를, B_s 는 댐핑 상수를 나타내고, K_t 는 타이어의 스프링 상수를 나타낸다. 이러한 모델에 대한 운동방정식을 세우면 다음식이 얻어진다.

$$M_s \ddot{z}_s = -K_s(z_s - z_u) - B_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) + F_a \quad (1)$$

$$M_u \ddot{z}_u = K_s(z_s - z_u) + B_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) - K_t(z_u - z_r) - F_a \quad (2)$$

위 식의 변수중 센서를 통해서 sprung mass와 unsprung mass의 가속도와 두 질량 사이의 거리, 액츄에이터에서 발생하는 힘, 액츄에이터 양쪽의 압력정보가 전달된다.

2.2 비대칭형 액츄에이터 모델

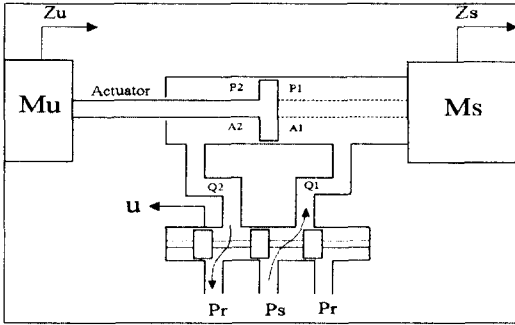


그림 2. 비대칭형 액츄에이터와 서보밸브
Fig 2. Asymmetric actuator and servo valve

그림 3은 비대칭형 액츄에이터와 서보밸브를 나타내고 있다. 여기서 u 는 서보밸브를 제어하는 전압이고 A_1, A_2 는 액츄에이터 양쪽의 면적을 나타낸다. [6]에서와 같이 서보밸브 제어전압 u 와 스푼(spool)변위는 선형관계에 있고, 서보밸브의 유량(flow rate)과 압력 강하에 따른 관계식은 다음과 같다.

$$Q_i = K_{eq} u \sqrt{\Delta P_i} \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

$$\Delta P_1 : \begin{cases} P_s - P_1 & \text{if } u > 0 \\ P_1 & \text{if } u < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\Delta P_2 : \begin{cases} P_2 & \text{if } u > 0 \\ P_s - P_2 & \text{if } u < 0 \end{cases} \quad (5)$$

액츄에이터의 누설계수(Leakage coefficient)의 영향이 작기 때문에 무시하면 각각의 압력의 변화는 다음과 같은 관계로 나타난다.

$$\begin{aligned} \dot{P}_1 &= \frac{A_1 \beta}{V_1} (Q_1 - A_1(\dot{z}_s - \dot{z}_u)) \\ V_1 &= A_1 \left(\frac{L}{2} + z_s - z_u \right) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \dot{P}_2 &= \frac{A_2 \beta}{V_2} (-Q_1 + A_2(\dot{z}_s - \dot{z}_u)) \\ V_2 &= A_2 \left(\frac{L}{2} + z_u - z_s \right) \end{aligned} \quad (7)$$

액츄에이터가 발생시키는 힘은 다음과 같이 나타낼수 있다.

$$F_a = P_1 A_1 - P_2 A_2 \quad (8)$$

식(3),(6),(7),(8)을 이용하면 다음과 같은 식을 얻을수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{F}_a &= \beta K_{eq} \left(\frac{A_1 \sqrt{\Delta P_1}}{V_1} + \frac{A_2 \sqrt{\Delta P_2}}{V_2} \right) u \\ &\quad - \beta \left(\frac{A_1^2}{V_1} + \frac{A_2^2}{V_2} \right) (\dot{z}_s - \dot{z}_u) \end{aligned} \quad (9)$$

3. 최적제어기 설계

3.1 상태 방정식 : Feedback linearization

Feedback linearization을 이용해서 식(9)를 변형하자. 우선 제어 입력 u 를 다음과 같이 두자.

$$u = \frac{v + \beta \left(\frac{A_1^2}{V_1} + \frac{A_2^2}{V_2} \right) (\dot{z}_s - \dot{z}_u)}{\beta K_{eq} \left(\frac{A_1 \sqrt{\Delta P_1}}{V_1} + \frac{A_2 \sqrt{\Delta P_2}}{V_2} \right)} \quad (10)$$

식(10)을 이용하면 식(9)는 다음과 같이 된다.

$$\dot{F}_a = v \quad (11)$$

여기서 v 는 새로운 제어 입력이 된다.

식(10),(11)을 이용하고, 상태변수 x 를 다음과 같이 놓으면 전체 시스템은 v 를 새로운 입력으로 하는 선형화된 모델이 된다.

$$x = [z_s - z_u \quad \dot{z}_s \quad z_u - z_r \quad \dot{z}_u \quad F_a]^T \quad (12)$$

$$\dot{x} = Ax + Bv + G\dot{z}_r$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ -\frac{K_s}{M_s} & -\frac{B_s}{M_s} & 0 & \frac{B_s}{M_s} & \frac{1}{M_s} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{K_s}{M_u} & \frac{B_s}{M_u} & -\frac{K_t}{M_u} & -\frac{B_s}{M_u} & -\frac{1}{M_u} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

3.2 최적 제어기 설계

성능 평가 함수를 다음과 같이 잡는다.

$$J = \int_0^{\infty} (\rho_1 \dot{z}_s^2 + \rho_2 (z_s - z_u)^2 + \rho_3 (z_u - z_r)^2 + \rho_4 F_a^2 + rv^2) dt \quad (14)$$

minimize J

식(14)는 행렬 형태로 다음과 같이 표현되며 성능 평가 함수를 최소화 시키는 제어입력 v 는 ARE(Algebraic Riccati Equation)을 풀어서 구한 S 를 이용해서 $v = -Kx$ 로 표현된다.

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + v^T R v) dt$$

$$v = -R^{-1} B^T S x = -Kx \quad (15)$$

where, S : stable ARE solution
 전체적인 제어블록 다이어그램은 다음과 같다.

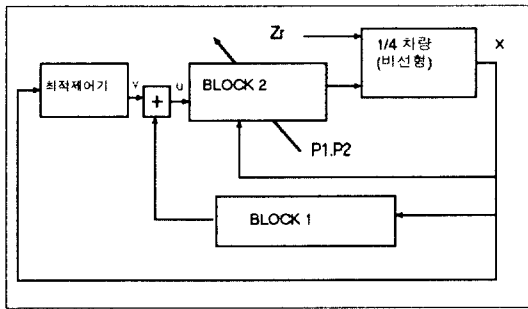


그림 3. 제어 블록 다이어그램
 Fig 3 Block diagram of controller

$$BLOCK 1 = \beta \left(\frac{A_1^2}{V_1} + \frac{A_2^2}{V_2} \right) (z_s - z_u) \quad (16)$$

$$BLOCK 2 = \beta K_{eq} \left(\frac{A_1 \sqrt{\Delta P_1}}{V_1} + \frac{A_2 \sqrt{\Delta P_2}}{V_2} \right) \quad (17)$$

4. 모의 실험

4.1 기존의 힘제어 방식(Force Control)을 이용한 최적제어

4.1.1 힘제어(Force Control)

힘제어(force control)는 원하는 힘(desired force : F_d)를 입력으로 넣었을 때 출력(actual force : F_a)이 원하는 힘을 잘 따라가게 하는 것이 목적이다. 그림 4는 Z_s 와 Z_u 의 상대속도를 액츄에이터에서 고려하지 않았을 때 F_d 가 400N인 경우이다. 이 경우 약 5ms의 지연이 있었다. 그림 5에서는 이러한 힘제어기를 이용해서 지면의 입력 $Z_r = 0$ 일 때 액츄에이터의 F_d 를 크기가 400N이고 주파수가 5Hz인 sin파를 넣고 Z_s 와 Z_u 의 상대속도가 액츄에이터에 주는 영향을 포함한 경우이다. Z_s 와 Z_u 의 상대속도에 의해서 힘제어가 잘 안됨을 볼수 있다.

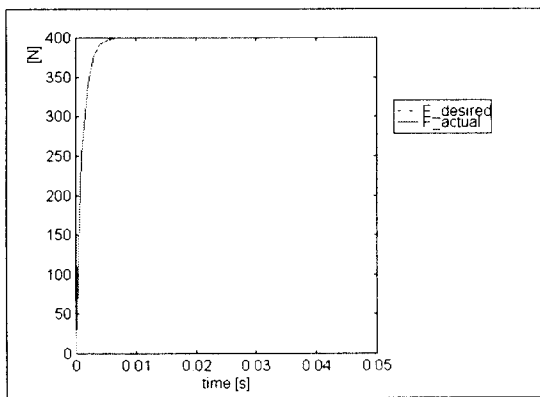


그림 4. 액츄에이터만을 가지고 힘제어한 결과
 Fig 4. Result of Force Control (actuator only)

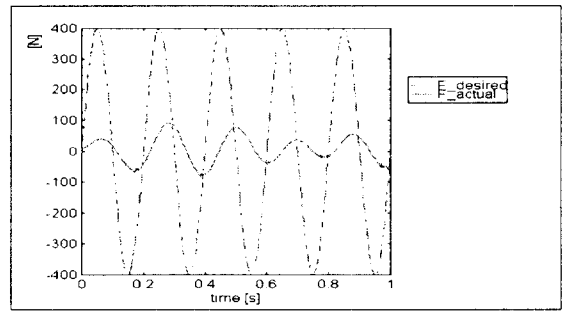


그림 5. Z_s 와 Z_u 의 상대속도의 영향을 고려했을때 힘제어 결과
 Fig 5. Result of force control (including effect of z_s - z_u)

4.1.2 힘제어(Force Control)를 이용한 최적제어

최적제어기를 설계할 때 제어 입력을 액츄에이터에서 발생되야 하는 힘(F_d)으로 보고 최적의 힘 F_d 를 계산해내고 힘제어를 통하여 액츄에이터에서 힘을 발생시킨다.

그림 6은 지면의 입력(Z_r)으로써 18Km/h로 달리는 차가 너비 2m 높이 5cm의 범포를 지나는 경우로 가정했다.

그림 7은 이상적인 액츄에이터를 사용했을때의 sprung mass의 가속도를 나타내고, 그림 8은 이상적이지 않은 액츄에이터를 사용했을때의 결과이다. 힘제어가 잘 되지 않기 때문에 성능이 떨어지고 있는 것을 볼수 있다.

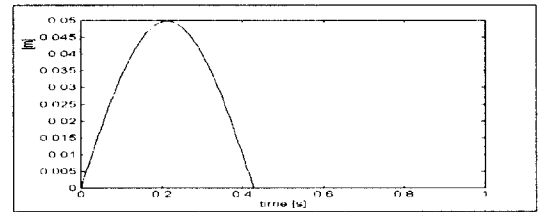


그림 6. 지면입력 (Z_r)
 Fig 6. Road input (Z_r)

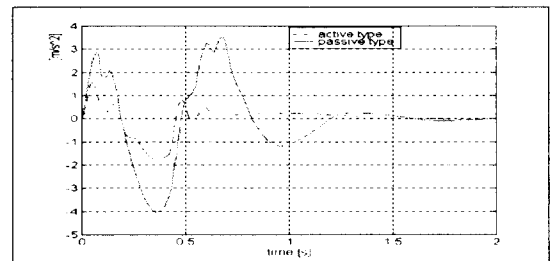


그림 7. 이상적인 액츄에이터일 경우
 Fig 7. Result of optimal control:(Ideal actuator case)

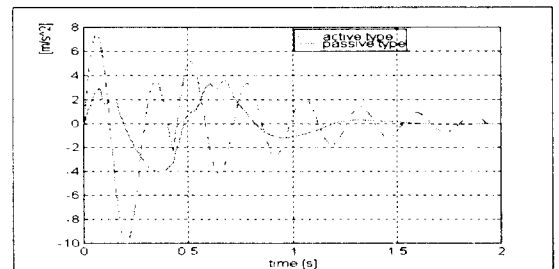


그림8 실제적인 액츄에이터일 경우의 최적제어 결과
 Fig 8. Result of optimal control (non ideal actuator case)

4.2 Feedback linearization을 이용한 최적제어

이상적인 액츄에이터를 사용할 경우 뛰어난 성능을 기대 할수 있지만 이상적이지 않은 액츄에이터를 사용하는 경우에, 기존의 힘 제어(force control)를 이용한 최적제어를 할 경우에는 Z_s 와 Z_u 의 상대적인 속도가 액츄에이터에 미치는 영향 때문에 힘제어를 하기가 어렵고 결과적으로 sprung mass의 수직방향 가속도를 효과적으로 줄일수 없게되서 승차감 향상에 좋지 않다.

그림 9에서는 3절에서 제시한 Feedback linearization방법을 이용한 최적제어 방법을 4.1.2에서와 같은 지면 입력의 조건에서 적용한 결과를 보여주고 있다. sprung mass의 수직방향 가속도 성분이 힘제어를 이용한 최적제어보다 크게 줄어있고 빨리 0로 수렴함을 알 수 있다.

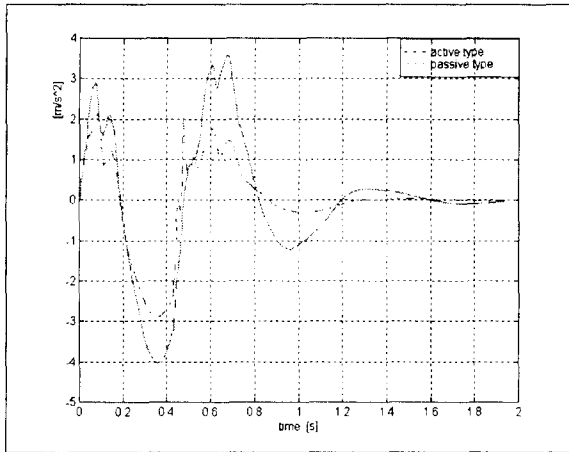


그림 9. feedback linearization을 이용한 최적제어 결과
Fig 9. Result of optimal control using feedback linearization.

5. 결론

기존의 힘제어 방식을 이용한 최적제어방법은 액츄에이터의 비선형성을 고려하지 않고 간단하게 최적제어기를 설계할수 있었다. 그러나 힘제어에 있어서 sprung mass와 unsprung mass 사이의 상대적인 속도가 액츄에이터가 내는 힘에 영향을 주기 때문에 이를 고려한 힘 제어기의 설계가 필요하다. 그러나 이러한 힘제어기는 단순한 F_d 와 F_a 의 차이만을 이용해서 제어기를 설계 하는것으로는 얻어질수가 없다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 액츄에이터가 발생시키는 힘을 상태 변수로 놓고 feedback linearization을 이용해서 전체를 선형화 시킨 다음 최적제어 이론을 이용해서 제어를 실시 하였다. 모의 실험결과 feedback linearization을 이용한 최적제어기가 좋은 성능을 보여주었다.

참고문헌

[1] Thompson,A.G "Design of Active Suspensions" Inst.Mech. Eng.Proc. vol.185,no.36, 1970-1971.
[2] Thompson,A.G. " An active suspension with optimal linear state feedback", Vehicle System Dynamics vol.5,pp.187-206 1976
[3] Hac,A. "Adaptive control of an vehicle suspension", Vehicle System Dynamics vol.16,pp.57-74 1987
[4] A. Alleyne and J.K. Hedrick, "Nonlinear Adaptive Control of Active Suspensions", *IEEE Trans. on Control System*

Technology, vol. 3, pp. 94-101, 1995

[5] 이병윤, "신경망을 이용한 능동현가 시스템의 자기동조 최적 제어기 설계", 포항공과대학교 전자전기공학과 석사논문 1996
[6] 김완일,이병윤, "Force Control of an Asymmetric Hydraulic Cylinder for Active Suspensions", 1996 KACC 2권 pp 1124-1127