

가변구조 제어기법을 이용한 고장허용 현가장치 설계

Design of Self-Repairing Suspension Systems via Variable Structure Control Scheme

김도현
(Do Hyeon Kim)

Abstract : A variable structure control (VSC) based model following control system that possesses fault detection and isolation (FDI) capability as well as fault tolerance property is proposed. The nonlinear part of the proposed control law, whose magnitude is determined by sliding variables, plays the role of suppressing fault effect. Thus, approximate fault reconstruction is also possible via the analysis of sliding variables. The proposed algorithm is applied to an active suspension system of ground vehicles to verify its applicability.

Keywords : variable structure control, model following, fault tolerance, fault reconstruction, active suspension system

I. 서론

고장허용 제어시스템이란 강인하거나 재형상이 가능한 (reconfigurable) 제어시스템이라고 정의될 수 있다[1]. 여기서 강인한 시스템이란 매개변수의 변화나 부분 시스템의 고장이 발생한 경우에도 만족스러운 성능을 발휘할 수 있는 시스템을 일컫는 말이다. 이에 비해 재형상이 가능한 시스템이란 고장으로 인해 시스템의 구조나 특성이 변화했을 때 제어시스템의 구조가 바뀌어 대처하는 시스템을 일컫는다. 이때 재형상 가능 제어시스템은 미리 특정한 고장상황에 맞게 설계되어 있을 수도 있고, 실시간으로 재설계될 수도 있다.

대개의 고장허용 제어시스템은 매개변수 변화에 대해 어느 정도의 강인성을 확보하도록 설계되지만 만약 심각한 고장이 발생하는 경우에는 제어시스템의 구조를 바꾸도록 하여 강인성을 가지고 있으면서 동시에 재형상이 가능한 형태로 설계된다. 즉, 고장허용시스템은 적응(adaptive)시스템인 동시에 고장이 발생한 후에도 제어성능을 발휘할 수 있을 정도의 여유도를 가지도록 설계된다는 의미에서 여분(redundant)시스템이기도 하다.

시스템의 강인성을 극대화하여 어느 정도의 고장에 대처하고자 하는 시도는 고장이 불확실성의 일종이라는 점에서 매우 자연스러운 발상이라고도 할 수 있다. 특히 80년대 이후 다양한 강인 제어기법들이 각광을 받음에 따라 이들을 이용하여 높은 강인성을 갖는 시스템을 설계하고자 하는 연구들이 활발하게 이루어져 왔다[2]. 이러한 연구 중에서 특별히 고장에 대한 강인성을 고려한 연구들도 있는데, 이와 같은 방법에 의해 설계된 고장허용 제어 시스템을 수동적인(passive) 고장허용 제어시스템이라고 분류한다. Etemo[3]와 Stengel[4] 등의 연구가 이에 해당한다. 이와 더불어 강인 최적화 과정에 고장검출성능까지 포함한 연구도 이루어졌는데, Tyler[5]의 연구와 Stroustrup[6]의 연구가 대표적이다.

한편, 재형상 제어 혹은 제어기 재설계 기법에 의한 연구도 활발히 이루어졌다. 이들 연구는 고장의 영향을 보다 직접적으로 고려한다는 점에서 능동적(active)고장허용 제어시스템으로 분류되며, 제어이득 스케줄링, 의사역행렬(Pseudo-inverse)기법, [7, 8] 피드백 선형화(Feedback Linearization) 기법[9,10] 등이 대표적이다. 최근들어 고장에 대한 명확한 정보나 매개변수 추정과정이 필요하지 않으며, 고장전후에 일관되게 적용될 수 있다는 점에서 모델추종기법(Model Following Scheme) [11,12]이 능동적 고장허용제어기법 중에서 특히 주목되고 있다.

본 논문에서는 고장진단 및 고장허용 제어시스템을 설계하기 위하여 가변구조 제어기법을 이용한 모델추종기법을 제안하고 있다. 이 기법은 슬라이딩 모드 관측기를 이용한 상태추정 고장진단기법이 단순한 고장의 검출과 분리를 넘어 고장을 근사적으로 재건할 수 있다는 성질과 모델추종제어기법이 고 고장의 전후에 있어 제어기를 바꾸는 과정에서 발생하는 여러 가지 문제들을 야기하지 않는다는 것을 고려한 것이다. 본 논문에서는 발생한 고장을 재구성할 수 있으며 고장전후에 스위칭으로 인한 문제가 없는 고장허용 제어기법으로서 가변구조제어기법을 제안하고 있다.

본 논문에서는 가변구조제어기법을 이용한 모델추종제어기의 구조를 제안한 다음, 제안된 형태의 제어기가 슬라이딩 평면으로 수렴함을 증명한다. 또한, 일정한 가정을 만족하면 비선형 제어입력이 구동기의 고장을 근사적으로 재현함을 보인다. 제안된 가변구조 모델추종제어기법의 유용성을 검증하기 위하여 1/4 차량의 능동 현가장치의 가변구조 모델추종 제어기를 설계하고 제어 및 고장검출 성능을 파악하였다. 수치예제 결과는 제안된 제어기법이 고장의 재현 및 고장대처성능을 확보하고 있음을 보여준다.

II. 고장허용 가변구조 모델추종기법

이 장에서는 시스템에 발생할 수 있는 고장을 진단하며, 동시에 고장진단 이후에 제어기의 재설계 절차를 필요로 하지 않는 가변구조 모델추종기법을 제안한다. 이러한 기법의 가장 큰 장점은 고장진단 전후에 제어기가 변화하면서 생길 수 있는 여러

논문접수 : 2002. 5. 21 ., 채택확정: 2002. 9. 23.

김도현 :우석대학교 자동차공학과(dhkim@core.woosuk.ac.kr)

※ 본 연구는 1999년도 학술진흥재단의 연구비의 지원으로 수행 (KRF- 1999-003-E00108)되었으며, 이에 감사드립니다.

가지 문제점들을 피할 수 있으며, 또한 실시간 매개변수 추정과정이 요구되지 않는다는 것이다. 물론, 매개변수 변화에 관련된 다른 정보가 있다면 그 정보를 이용할 수도 있다.

1. 문제의 정식화

다음과 같이 불확실성을 갖는 시스템을 고려하자.

$$\dot{x} = [A + \Delta A(x,t)]x(t) + [B + \Delta B(x,t)]u(t) + Ef(t) + \Gamma d(t) \quad (1)$$

여기서 $x(t) \in R^n$ 은 상태변수 벡터, $u(t) \in R^m$ 는 제어입력 벡터, $d(t) \in R^r$ 는 외란, 그리고 $f(t) \in R^r$ 은 고장벡터이다. 이때 고장과 외란은 유계라고 가정한다. 그리고 각 행렬들은 적절한 크기를 갖는 실수(real) 행렬들이며, 행렬 A 와 B 는 시스템과 입력 매개변수에 발생할 수 있는 비선형성 및 불확실성을 나타내고 있다. (1)로 표현된 고장은 일반적으로 구동기의 고장을 표현한다고 이해할 수 있지만, 감지기(sensor)의 고장도 이와 같은 형태로 모델링될 수 있다는 것이 증명되어 있다. [13]

본 논문에서는 (1)로 나타난 시스템이 다음과 같은 조건을 만족한다고 가정한다.

가정 1 : (A, B) 는 제어가능(controllable)하다.

가정 2 : 다음과 같은 매칭조건(matching condition)을 만족하는 행렬 $p(x,t)$ 와 $h(x,u,t)$ 가 존재한다.

$$\Delta A(x,t)x(t) = Bp(x,t) \quad (2)$$

$$\Delta B(x,t)u(t) = Bh(x,u,t) \quad (3)$$

위와 같은 조건들은 매개변수의 변화와 외란이 모두 입력채널을 통해서만 이루어진다는 물리적인 의미를 갖는다.

가정 3 : 두개의 0이 아닌 스칼라 ρ_1 과 ρ_2 이 존재하며, 다음과 같은 조건을 만족한다.

$$\|p(x,t)\| \leq \rho_1, \quad \|h(x,u,t)\| \leq \rho_2$$

이때, $\|\cdot\|$ 는 2-norm /induced 2-norm을 나타낸다.

이상과 같은 가정하에서 시스템이 추종하기를 원하는 기준 모델(reference model)을 다음과 같이 설정한다.

$$\dot{x}_m(t) = A_m x_m(t) + B_m r(t) \quad (4)$$

여기서 $r(t)$ 는 기준입력(reference input)을 나타낸다.

만약 (4)로 표현된 기준모델을 고장이 없는 정상적인(nominal) 폐회로 시스템으로 설정하고, 고장이 발생한 후에도 이 모델을 추종할 수 있도록 하는 제어법칙을 구현한다면, 이 모델추종 제어기법은 그대로 고장허용 제어기법으로 사용될 수 있다. 이러한 관점에서 기준모델을 다음과 같이 설정하는 것은 매우 자연스러운 일이다.

$$A_m = A - BK \quad (5)$$

$$B_m = BF_f \quad (6)$$

여기서 K 는 시스템의 안정성과 만족할 만한 성능을 확보하게 하는 상태 피드백이득이며, F_f 는 명령추종을 위해 선정되는 앞

먹입(feedforward)이득이다.

이제 모델의 상태변수와 플랜트 상태변수의 차이로 오차를 다음과 같이 정의한다.

$$e(t) = x(t) - x_m(t) \quad (7)$$

(7)을 미분한 다음 (1)-(4)을 대입하여 정리하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \dot{e} &= (A + \Delta A)x + (B + \Delta B)u + Ef + \Gamma d - A_m x_m - B_m r \\ &= A_m e + Bu + BKx - B_m r + Ef + \Gamma d + Bh + Bp \end{aligned} \quad (8)$$

2. 가변구조 제어기

만약 고장이 발생한 이후에도 (8)로 표현된 오차의 동역학을 안정하게 만드는 제어법칙을 설계할 수 있다면, (1)로 표현된 시스템은 고장의 허용성을 갖게 된다. 가변구조 제어기법을 이용한 모델추종제어기법은 오차를 없애는 과정에서 높은 강인성을 가지고 있을 뿐 아니라, 슬라이딩 평면의 적절한 설계를 통해 과도응답의 특성까지도 설정할 수 있기 때문에 유용하다. 일반적으로 고장의 영향을 흡수하기 위하여 재설계된 고장허용시스템의 응답특성은 고장발생 이전의 제어기와 상당히 달라지게 되는 것을 고려할 때, 고장의 영향이 사라지는 과도기간 동안의 특성을 임의로 지정할 수 있다는 것은 바람직한 장점이다.

가변구조 제어기를 설계하기 위하여 우선 다음과 같은 슬라이딩 평면을 설정하자.

$$s(t) = Ge(t) = G[x(t) - x_m(t)] = 0 \quad \forall t \geq t_s \quad (9)$$

여기서 t_s 는 슬라이딩 운동이 시작되는 시간, $m \times n$ 차원 행렬 G 는 슬라이딩 평면을 결정하는 행렬이며, 이때 GB 가 특이하지 않도록 선정하여야 한다. 슬라이딩 평면의 정의에 따라, 다음 식이 성립한다면,

$$\dot{s}(t) = G \dot{e}(t) = 0 \quad \forall t \geq t_s \quad (10)$$

다음과 같은 등가 제어입력(equivalent control)을 얻는다.

$$u_{eq} = -(GB)^{-1}G[A_m e + BKx + Bp - B_m r + Bh + Ef + \Gamma d] \quad (11)$$

위 (8)에 대입하고 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{e} &= [I - B(GB)^{-1}G][A_m e + BKx + \Delta Ax - B_m r + Bh + Ef + \Gamma d] \\ &= [I - B(GB)^{-1}G][A_m e + BKx + Bp - B_m r + Bh + Ef + \Gamma d] \end{aligned} \quad (12)$$

만약 Ef 가 B 의 range space에 놓이게 되는 구동기 고장의 경우, 가정 2를 고려하면, 외란이 없는 경우 오차의 동역학은 다음과 같이 단순해 진다.

$$\dot{e} = [I - B(GB)^{-1}G]A_m e = [I - B(GB)^{-1}G]Ae \quad (13)$$

위 식을 살펴보면 행렬 G 를 $[I - B(GB)^{-1}G]A_m$ 행렬의 고유값을 고려하여 선정하는 것이 자연스러운 일이라는 것을 알 수 있다. 이와 같은 슬라이딩 모드에 도달하기 위하여, 본 논문에서

는 다음과 같은 제어기 구조를 제안한다.

보조정리 1. 상태피먹임을 이용한 가변구조 모델추종제어기

다음과 같은 제어입력을 고려하자.

$$u(t) = -Kx_m + K_e e + K_m r + u_d \tag{14}$$

여기서 각 이득과 비선형 제어입력들은 다음과 같다.

$$K_e = -(GB)^{-1}GA, K_m = (GB)^{-1}GB_m$$

$$u_d = a(GB)^{-1}\|GB\|\text{sgn}(s), \text{sgn}(s) = \text{sgn} \begin{Bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_m \end{Bmatrix}$$

이 제어기 구조는 다음과 같은 도달조건(reaching condition)을 만족한다.

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} (s^T s) \right] < 0 \tag{15}$$

증명 : (8)-(10) 으로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} s^T \dot{s} &= s^T G \dot{e} \\ &= s^T [G(A_m e + B(-Kx_m + K_e e + K_m r + u_d)) + BKx - B_m r + Bp + Bh + \Gamma d + Ef] \\ &= s^T [(GA - GA_m e + (GB_m - GB_m) r + G(Bu_i + Bp + Bh + Ef + \Gamma d))] \\ &= a \|GB\| s^T \text{sgn}(s) + s^T GBp + s^T GBh + s^T GEf + s^T \Gamma d \end{aligned} \tag{16}$$

가정 3 을 고려하면,

$$s^T \dot{s} \leq \|GB\| \|a s^T \text{sgn}(s) + \|s\| (\rho_1 + \rho_2 + \frac{\|GEf\|}{\|GB\|} + \frac{\|\Gamma d\|}{\|GB\|}) \tag{17}$$

따라서 (15)식으로 표현된 도달조건은 a 를 다음과 같이 선정 하면 만족하게 된다.

$$a < -(\rho_1 + \rho_2 + \frac{\|GEf\|}{\|GB\|} + \frac{\|\Gamma d\|}{\|GB\|}) \tag{18}$$

슬라이딩 운동을 하는 동안 불연속 제어입력은 이론적으로 는 무한하게, 실제로는 대단히 빠른 속도로 채터링 운동을 하게 된다. 이처럼 빠른 진동수를 갖는 구동기의 운동은 결국 모델링 되지 않은 고주파 영역을 가진하거나 계속되는 구동기의 포화 (saturation) 상태를 일으키기도 한다. 이와 같은 채터링을 극복하는 기법들 중 가장 대표적인 것은 경계층(boundary layer)기법 [15]과 단위벡터기법(unit vector method)에서의 연속 매개변수 화 기법[14,16]등이다. 그러나 이와 같은 연속화 기법들은 결국 이상적인 슬라이딩 운동이 아니라 슬라이딩 모드와 아주 가까운 근사적인 운동을 발생시키게 된다. 따라서 외란이나 매개변 수 불확실성에 대해 불변성(invariance)을 갖는 대신 어느 정도의 강인성(robustness)을 갖게 되는 결과를 낳는다. 본 논문에서는 단순 릴레이 형태의 비선형 제어기를 어떤 문턱값을 갖도록 하는 포화입력으로 바꾸는 연속화 기법을 사용한다. 즉, (14)에서

의 $\text{sgn}(s)$ 를 다음과 같이 바꾼다.

$$\text{sat}(s/\delta) = \begin{cases} 1 & \text{when } s > \delta \\ s/\delta & \text{when } |s| < \delta \\ -1 & \text{when } s < -\delta \end{cases} \tag{19}$$

여기서 $\delta > 0$ 이며, $\pm\delta$ 는 경계층(boundary layer)으로 들어가는 경계가 되는 문턱값(threshold)이며 시스템에 따라 선택하는 설계변수이다. 이와 같이 만들어지는 경계층의 내부에서 제어 입력은 큰 이득을 갖는 선형이 되며, 경계층 밖에서는 그대로 릴레이의 형태를 갖게 된다. 이와 같은 제어입력에 따라 시스템은 슬라이딩 평면에 매우 가까운 경계층으로 접근하게 되지만, $s = 0$ 으로 표현되는 슬라이딩 평면상의 운동에는 도달하지 못한다. 따라서 앞에서 언급된 바와 같이 채터링은 제거될 수 있지만, 불 변성은 더 이상 확보되지 못한다.

3. 슬라이딩 평면의 설계

슬라이딩 평면의 설계는 슬라이딩 평면상에서 시스템이 갖 게 되는 동특성을 지정하는 과정을 의미한다. 특히, 가변구조 모 델추종기법에서는 시스템 상태변수와 모델 상태변수의 차이인 오차가 어떤 동특성을 가지며 소멸되는지를 지정한다는 물리적 인 의미를 갖는다.

일반적으로 슬라이딩 평면의 설계기법으로서 가장 널리 알 려진 것들은 Dorling 과 Zinober [17,18] 등의 연구에 기반을 두고 있다. 우선, (8)로부터 추출될 수 있는 다음과 같은 식을 검토하 자. 여기서 (8)의 다른 항들은 일단 슬라이딩 운동을 시작한 후 에는 의미가 없으며, 외란이 없다고 가정한다.

$$\dot{e} = A_m e + Bu \tag{20}$$

다음과 같은 직교변환 $z = Te$ 를 도입한다.

$$TB = \begin{bmatrix} 0 \\ B_2 \end{bmatrix} \tag{21}$$

변수벡터 z 를 $[z_1^T \ z_2^T]^T$ 라 나누면 (20)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= A_{11}z_1 + A_{12}z_2 \\ \dot{z}_2 &= A_{21}z_1 + A_{22}z_2 + B_2u \end{aligned} \tag{22}$$

여기서 $z_1 \in R^{n-m}, z_2 \in R^m$ 이며 행렬 A_{ij} 는 다음 식에서 정의된 바와 같다.

$$TA_m T^T = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$$

슬라이딩 모드에서는 $s = 0$ 이므로, 이를 고려하면 다음 식을 얻는다.

$$\dot{z}_1 = (A_{11} - A_{12}G_2^{-1}G_1)z_1 \equiv (A_{11} - A_{12}F)z_1 \tag{23}$$

따라서 (22)으로 표현되는 시스템의 고유값은 m 개의 0 과 ($n-m$) 개의 0이 아닌 값을 갖는다. 이제 슬라이딩 평면의 설계는

($A_1 - A_2 F$) 이 원하는 특성을 갖도록 하는 이득 F 의 설계로 귀결된다.

지금까지 제어이득 F 를 설계하기 위해서 사용되어 온 방법으로는 2차 최적화(quadratic minimization), 고유공간 지정법, 또는 강인 고유값 지정법등이 대표적이다. F 가 결정된 다음 G 를 구하기 위해 다음 식을 이용한다.

$$G_2 F = G_1 \tag{24}$$

즉, 행렬 G 는 다음과 같이 결정된다.

$$G = [F \quad I_m]^T \tag{25}$$

4. 고장의 재구성

보조정리 3.1에서 제안된 형태의 제어입력을 고려하면, (8)의 오차방정식은 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{e} &= A_m e + B(-K_x m + K_e e + K_m r + u_d) + BKx - B_m r + Bp + Bh + Ef + \Gamma d \\ &= [I - B(GB)^{-1}G]Ae + B(u_d + p + h) + Ef + \Gamma d \end{aligned} \tag{26}$$

불연속 제어입력 ud 에 (19)로 제안된 saturation 함수를 도입하면, 슬라이딩 변수의 기울기는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{s} &= G \dot{e} \\ &= G[I - B(GB)^{-1}G]Ae + GBu_d + p + h + GEf + \Gamma d \\ &= G[I - B(GB)^{-1}G]Ae + a \|GB\| \text{sat}(s/\delta) + GB(p + h) + GEf + \Gamma d \\ &= a \|GB\| \text{sat}(s/\delta) + G[B(p + h) + Ef + \Gamma d] \end{aligned} \tag{27}$$

따라서 경계층 안에서는 다음과 같다.

$$s = a \|GB\| \frac{s}{\delta} + G[B(p + h) + Ef + \Gamma d] \tag{28}$$

슬라이딩 변수는 고장이나 매개변수의 변화가 발생한 다음, 보조정리 1에 제안된 제어기에 의하여 유한시간 이내에 경계층에 도달하게 된다. 그리고, 일단 경계층 안에 도달한 슬라이딩 변수는 (28)에 의해 지배받는 동역학을 나타내게 된다. 이때 만약 매개변수 변화와 고장의 영향이 스텝함수의 형태를 가진다면, 충분한 시간이 지난 다음의 슬라이딩 변수는 다음과 같이 표현될 것이다.

$$s(t) = - \left(\frac{\delta}{a} \right) \frac{1}{\|GB\|} \{GB(p + h) + GEf + \Gamma d\} \tag{29}$$

일반적으로 매개변수의 변화와 고장은 모두 저주파의 형태를 갖기 때문에, (29)은 스텝함수의 형태를 갖지 않는 경우에도 근사적으로 매우 잘 성립하는 식이다. 이 식은 시스템에 작용하는 외란의 크기가 발생한 고장에 비해 상대적으로 작은 경우 적절히 선정된 모니터링 변수와 슬라이딩 변수의 비교를 통해 시스템에 발생한 고장을 진단할 수 있다는 것을 나타내고 있다. 예를 들어, 고장의 영향으로 인해 시스템 행렬 A 의 매개변수가 변화하는 경우, 슬라이딩 변수는 근사적으로 다음과 같은 변화를 일으키게 된다.

$$s(t) = - \left(\frac{\delta}{a} \right) \frac{GB}{\|GB\|} p \tag{30}$$

따라서, 슬라이딩 변수의 변화를 통해 고장의 진단이 가능해진다. 이는 수치예제를 통해 확인될 것이다.

III. 수치예제

능동현가장치가 장착된 1/4 차량 모델이 그림 1로 나타나 있다. 이 시스템의 운동방정식은 다음과 같은 상태공간 방정식으로 표현된다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + \Gamma d$$

이때, $x = [z_b - z_s, \dot{z}_b, z_s - z_r, \dot{z}_s]^T$ 이며, 각 행렬들은

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 \\ -\frac{k_s}{m_b} & -\frac{c_s}{m_b} & 0 & \frac{c_s}{m_b} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_s}{m_s} & \frac{c_s}{m_s} & -\frac{k_t}{m_s} & -\frac{c_s}{m_s} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{m_b} & 0 & -\frac{1}{m_s} \end{bmatrix}^T, \Gamma = [0 \quad 0 \quad -1 \quad 0]^T$$

이다.

본 논문에서는 아래의 물리적 특성을 가진 모델을 고려한다. $m_b=250$ kg, $m_s=40$ kg, $c_s=500$ Ns/m, $k_s=15000$ N/m, $k_t=400$ N/m 이며, 고장이 발생하기 전후에 일관되게 추종될 모델을 선정하기 위하여 시스템의 댐핑증가를 목적으로 한 LQ제어기를 설계한다.

$$K = [0.0333 \quad 189.69 \quad -148.40 \quad -1.0995]$$

이 차량에 510-6의 밀도를 갖는 백색잡음 형태의 도로 외란(road disturbance)이 가해질 때 개회로 및 폐회로의 응답이 그림 2로 제시되어 있다.

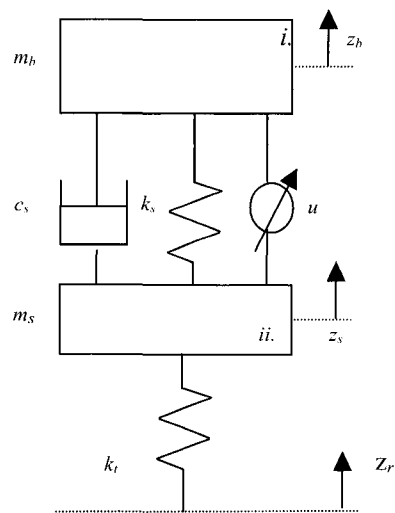


그림 1. 능동현가장치를 장착한 1/4 차량 모델.
Fig. 1. 1/4 vehicle model with active suspension.

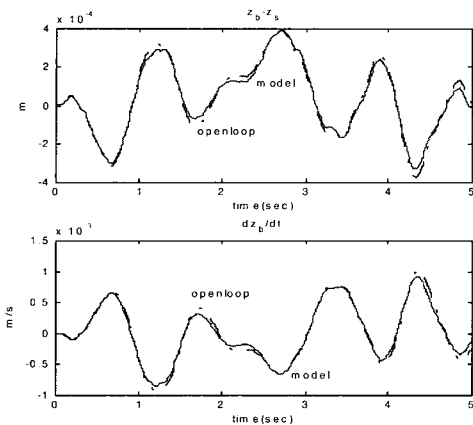


그림 2. 도로에 대한 개회로 및 폐회로(모델) 응답.
Fig. 2. Openloop /Model response of road disturbance.

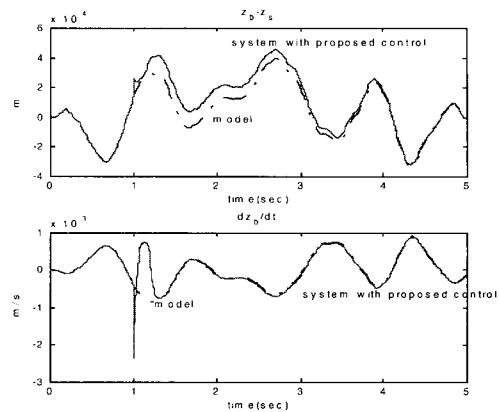


그림 4. 고장발생 후의 모델추종성능.
Fig. 4. Model following performance after fault.

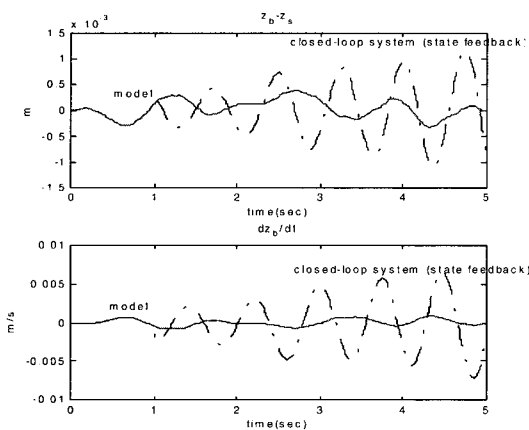


그림 3. 고장 발생 후 폐회로응답(상태피드백).
Fig. 3. Closedloop response after fault occurrence.

이제 가변구조 모델추종 제어기를 설계하기 위하여, 슬라이딩 평면 행렬 G 를 선정하여야 한다. 본 논문에서는 슬라이딩 평면의 설계 역시 LQ기법을 활용하였다. (21)로부터 변환행렬 T 를 구하고, 이에 의해 변환된 $(A11, A12)$ 행렬에 다음과 같은 가중 행렬을 이용하였다.

$$Q = \text{diag}(10^2, 10^3, 3), R = 1$$

이에 따라 구해진 G 행렬은 다음과 같으며,

$$G = [10 \quad 14.671 \quad -31.109 \quad 1.335]$$

이를 이용하여 보조정리 1의 제어 이득들을 구할 수 있다. 이때 매개변수 a 의 값으로는 (18)을 만족하도록 하면서 시행착오 방법에 의해 결정된 -8 을 사용하였다. 이 변수는 시스템 요구성과 모델불확실성의 크기, 그리고 안정성을 고려하여 설계자가 결정하여야 하는 값이다.

본 논문에서 가정한 고장은 현가시스템의 shock absorber 의 이상이다. 시뮬레이션 시작 1초 후에 shock absorber의 감쇠력이 70% 손실된 경우를 가정하였다. 이 경우 시스템 행렬의 극점이 우평면으로 이동하여 안정성을 상실하게 된다. 그림 3은 고장이

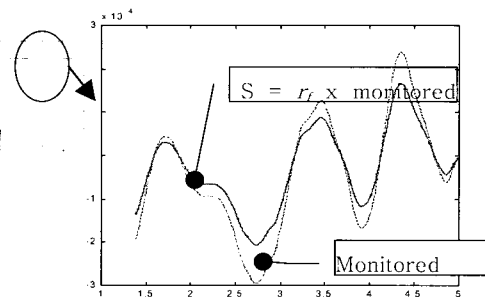


그림 5. 고장진단성능.
Fig. 5. Fault reconstruction performance.

발생한 경우 상태 피드백 제어기를 장착한 시스템과 모델과의 비교이다. 상태 피드백 제어기를 장착한 경우에도 시스템이 불안정해짐을 알 수 있다.

그림 4 는 본 논문에서 제안된 가변구조 모델추종 제어기의 모델추종성능을 보여주고 있다. 약 0.3 초 내외의 과도응답 이후 모델을 잘 추종하고 있음을 알 수 있다. 이 제어기의 또다른 장점은, 2.4절에서 보인 고장의 재구성 성능이다. 가정한 고장의 경우 고장의 영향은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Delta A = -r_f \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{c_s}{m_s} & 0 & \frac{c_s}{m_s} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{c_s}{m_s} & 0 & -\frac{c_s}{m_s} \end{bmatrix} = -r_f B [0 \quad c_s \quad 0 \quad -c_s] \equiv -r_f B p_f$$

이때, r_f 는 고장의 비율 (수치예제에서는 0.7) 이다.

이제 (30)을 이용하면,

$$s(t) = -\left(\frac{\delta}{a}\right) \frac{GB}{\|GB\|} p_f = -\left(\frac{\delta}{a}\right) \frac{G}{\|GB\|} \Delta A x = r_f \left(\frac{\delta}{a}\right) \frac{GB}{\|GB\|} p_f x$$

이다. 따라서, $\left(\frac{\delta}{a}\right) \frac{GB}{\|GB\|} p_f x$ 신호와 슬라이딩 변수가 같은 형태를 갖게 되는 경우 시스템에 발생한 고장은 shock absorber의 고장임을 알 수 있으며 두 신호의 비가 r_f 이므로 고장의 심각성도 파악할 수 있게 된다. 그 과정이 그림 5로 나타나 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 차량 현가장치에 발생할 수 있는 특정한 고장을 검출, 진단하고 그 고장에 대처할 수 있는 제어기법으로서 가변구조 제어기법을 응용한 모델추종 제어기법을 제안하였다. 일반적으로 시스템에 발생하는 고장에 대처하는 전형적인 방안은 고장의 발생여부를 선언하고, 고장의 위치를 검출한 다음, 그 고장의 심각성을 파악하는 일련의 고장 진단과정과 진단과정에서 얻어진 정보를 통해 제어기를 새롭게 구성하는 제어기 재형상 과정으로 이루어져 있다. 그러나 본 논문에서 제안된 가변구조 제어기법을 이용한 모델추종 제어기는 특정한 조건을 만족하는 고장의 경우, 고장의 진단과정과 고장에 대처하는 제어과정이 통합적으로 이루어질 뿐 아니라, 제어기의 재형상과정이 필요하지 않게 할 수 있다는 장점을 지니고 있다. 특히, 가변구조 제어기법을 사용할 경우 고장을 억제하는 비선형 제어의 크기는 슬라이딩 변수에 따라 달라지므로, 본 논문에서 제안된 제어기법은 슬라이딩 변수를 이용하여 고장에 의한 시스템의 변화를 근사적으로 재구성할 수 있게 된다.

참고문헌

[1] D. A. Handelman, and R. F. Stengel, "Combining expert system and analytical redundancy concepts for fault tolerance flight control," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 12, No. 1, pp. 39-45, 1989.

[2] K. Zhou, J. Doyle, and K. Glover, *Robust and Optimal Control*, Prentice Hall, Englewood Cliff, 1996.

[3] J. S. Etemo, D. P. Looze, and A. S. Willsky, "Design issues for fault-tolerant restructurable aircraft control," *Proceedings of 24th IEEE Conference on Decision and Control*, Fort Lauderdale, pp. 900-905, 1985.

[4] R. F. Stengel "Toward intelligent flight control," *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics*, Vol. 23, No. 6, pp.1699-1716, 1996.

[5] M. Tyler, and M. Morari, "Optimal and robust design of integrated control and diagnostic modules," *Proceedings of American Control Conference'94*, 1994.

[6] J. Stroupstrup, and M. J. Grimble, "Integrating control and fault diagnosis : A separation result," *Proceedings of IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS 97*, pp. 323-328, 1997.

[7] K. S. Rattan, "Evaluation of control mixer concept for reconfiguration of flight control system," *Proceedings of National Aerospace and Electronics, Dayton*, pp. 560-569, 1985.

[8] Z. Gao, and P. J. Antsaklis, "Stability of the Pseudo-inverse method for reconfigurable control systems," *International Journal of Control*, Vol. 53, No. 3, pp. 717-729, 1991.

[9] S. H. Lane, and R. F. Stengel, "Flight control design using non-linear inverse dynamics," *Automatica*, Vol. 24, No. 4, pp. 471-483, 1988.

[10] Y. Ochi, and K. Kanai, "Design of restructurable flight control systems using feedback linearisation," *Jouranal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 14, No. 5, pp. 903-911, 1991.

[11] Z. Gao, and P. J. Antsaklis, "RCS via perfect model following," *International Journal of Control*, Vol. 56, No. 4, pp. 783-792, 1992.

[12] M. Bodson, and J. E. Groszkiewicz, "Multivariable adaptive algorithms for reconfigurable flight control," *IEEE Transactions Control Systems Technology*, Vol. 5, No. 2, March, pp. 217-229, 1997.

[13] R. K. Douglas, and J. L. Speyer, "Robust fault detection filter," *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 19, No.1, pp. 214-218, 1996.

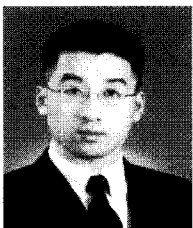
[14] A. Thurkral, and M. Innocenti, "Control design challenge: A variable structure approach," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 17, No. 5, pp. 942-949, 1994.

[15] J. J. E. Slotine, and W. Li, *Applied Nonlinear Control*, Prentice Hall, 1991.

[16] S. K. Spurgeon, and R. J. Patton, "Robust variable structure control of model reference systems," *Proceeding of IEE, Part D*, Vol. 137 D, No. 6, Nov. 1990.

[17] C. M. Dorling, and A. S. I. Zinober, "Robust hyperplane design in multivariable variable structure control systems," *International Journal of Control*, Vol. 48, No.5, pp. 2043 ~ 2054, 1988.

[18] C. M. Dorling, and A. S. I. Zinober, "Two approaches to hyperplane design in multivariable variable structure control systems," *International Journal of Control*, Vol. 44, No. 1, pp. 65-82, 1986.



김도현

1970년 9월 15일생. 서울대 항공우주공학과 학사 석사. 박사학위 취득(93,95,98). The Boston Consulting Group, SBSi, NAC & Company 근무. 현재 우석대학교 자동차공학과 전임강사(휴직중). NAC & Company 이사 및 The TechFin Strategy 부사장.