

# 반능동 현가시스템용 자기동조 게인조절형 스카이훅 제어기의 구현 및 실험

## Self-Tuning Gain-Scheduled Skyhook Control for Semi-Active Suspension Systems: Implementation and Experiment

홍경태, 허창도, 홍금식

(Kyung-Tae Hong, Chang-Do Huh, and Keum-Shik Hong)

**Abstract** : In this paper, a self-tuning gain-scheduled skyhook control for semi-active suspension systems is investigated. The dynamic characteristics of a continuously variable damper including electro-hydraulic pressure control valves is analyzed. A 2-d.o.f. time-varying quarter-car model that permits variations in sprung mass and suspension spring coefficient is considered. The self-tuning skyhook control algorithm proposed in this paper requires only the measurement of body acceleration. The absolute velocity of the sprung mass and the relative velocity of the suspension deflection are estimated by using integral filters. The skyhook gains are gain-scheduled in such a way that the body acceleration and the dynamic tire force are optimized. An ECU prototype is discussed. Experimental results using a 1/4-car simulator are discussed. Also, a suspension ECU prototype targeting real implementation is provided.

**Keywords** : semi-active suspension, self-tuning control, gain scheduling method, skyhook control, ECU

### I. 서론

현가시스템은 차량의 차체와 차축을 서로 연결하여 주는 장치로서, 주요한 역할은 차량의 자세를 적절히 유지하고 조종안정성을 위해 타이어나 노면 사이의 지속적이고 일정한 접촉을 유지하며 승차감(ride comfort) 향상을 위해 노면의 불균일함으로부터 발생하는 차체의 진동을 억제하는 것 등을 들 수 있다. 이러한 현가시스템의 성능은 차량의 승차감과 조종안정성 두 가지 측면에서 매우 중요한 영향을 미친다. 현가시스템의 또 다른 성능평가는 차체질량의 가속도, 현가시스템의 작동에 필요한 공간, 동적 타이어힘(dynamic tire force) 등에 의해서 결정이 되는데, 반능동 현가시스템을 채택하는 주된 목적은 능동형 현가시스템에 비해 비교적 저가격으로 승차감 및 조종안정성의 향상에 있다. 그러나, 현가시스템의 특성상 승차감과 조종안정성은 서로 상충되는 경향을 보여주고 있기 때문에, 수동현가시스템의 경우 이 두가지 모듈을 동시에 만족시키기에는 어려운 문제점을 가지고 있다[1][2]. 현가시스템의 스프링상수와 감쇠계수가 작을수록 승차감은 확보될 수 있으나, 노면접지력이 감소하여 조종안정성은 나빠지게 된다. 반면에 스프링상수와 감쇠계수가 클수록 노면 접지력이 증가하여 조종안정성은 향상되나, 현가시스템의 변위도 감소하여 승차감은 저하될 수 밖에 없다. 따라서, 이 두가지 상충되는 요소들을 동시에 만족시키기 위해서는 노면형상이나 주행조건에 맞게 현가시스템의 특성을 변화시켜야한다[3]-[5].

본 논문에서 채택한 반능동 현가시스템은 외란에 강인하며, 비선형 동역학적 특성을 감안한 알고리즘을 적용하여

[6] 설계상충요소의 한계를 어느 정도 극복하면서도 비교적 간단하며, 에너지 소비가 적고, 저가인 시스템을 개발하는 것이 가능하게 되어 현재 활발하게 연구 및 적용되고 있다 [7]. 반능동 현가시스템이 실제 차량에 장착되기 위해서는 가변댐퍼의 동특성, 센서 및 필터(신호처리) 등이 제어시스템을 구축하는데 중요한 설계요소들이 되며, 최근에는 이들을 고려한 제어기 개발이 계속 진행중에 있다[4][8]-[11].

이러한 기술개발 동향을 바탕으로, 본 논문에서는 비용 대비 성능면에서 가장 우수한 전자제어식 현가시스템으로 부각되고 있는 연속가변형 반능동 현가시스템의 제어법칙에 대한 이론적 연구를 수행하고, 자기동조기법을 이용하여 설계된 제어기를 실제 1/4 차량 simulator와 실차실험을 통해 제어기의 성능을 검증한 후, 실제차량에 적용가능한 현가시스템용 ECU(Electro-nic Control Unit)의 시제품을 제작하고, 제작된 ECU를 통한 실험으로 성능을 검증하고자 한다.

본 논문에서 제안되는 자기동조기능을 가지는 수정된 스카이훅제어는 제어입력의 계산시 차체의 질량과 스프링상수의 변화량이 자기동조기(self-tuner)에 의해서 정확하게 추정된 결과를 이용함으로써 차체의 수직가속도신호 만으로도 뛰어난 성능을 발휘한다. 또한 연속가변형 댐퍼의 물리적 특성과 노면의 공간적인 형상특성을 제어이득 설계시에 포함시킴으로써 현실성있는 제어기를 설계한다.

### II. 반능동 현가시스템의 모델링

연속가변형 댐퍼의 비선형 감쇠력이 고려된 자기동조기법을 이용한 반능동 현가시스템의 모델은 그림 1과 같은 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m_s \ddot{z}_s &= -k_s(z_s - z_u) - f_s, \\ m_u \ddot{z}_u &= k_s(z_s - z_u) + f_s - k_t(z_u - z_r), \end{aligned} \quad (1)$$

접수일자 : 2001. 8. 28., 수정완료 : 2002. 1. 3.

홍경태, 허창도 : 부산대학교 지능기계공학과(hongkt@pusan.ac.kr/cdhu@pusan.ac.kr)

홍금식 : 부산대학교 기계공학부 및 기계기술연구소(kshong@pusan.ac.kr)

여기서,  $f_s$ 는 연속가변형 댐퍼에서 발생하는 제어(감쇠)력을 나타내며, 차량모델에 사용되는 변수의 공칭값은 표 1과 같다. (1)에서 상태변수를 다음과 같이 정의한다.

$$x \equiv \begin{bmatrix} z_s \\ \dot{z}_s \\ z_u \\ \dot{z}_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{displacement of the sprung mass} \\ \text{velocity of the sprung mass} \\ \text{displacement of the unsprung mass} \\ \text{velocity of the unsprung mass} \end{bmatrix} \quad (2)$$

(2)에서 정의된 상태변수를 이용하여 (1)을 상태방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bf_s + \Gamma z_r(t), \\ y(t) &= Cx(t) + Df_s, \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_s}{m_s} & 0 & \frac{k_s}{m_s} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_s}{m_u} & 0 & -\frac{k_s+k_t}{m_u} & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{m_s} \\ 0 \\ \frac{1}{m_u} \end{bmatrix}, \quad \Gamma = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{k_t}{m_u} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$C = \begin{bmatrix} -\frac{k_s}{m_s} & 0 & \frac{k_s}{m_s} & 0 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} -\frac{1}{m_s} \end{bmatrix}$$

이다.

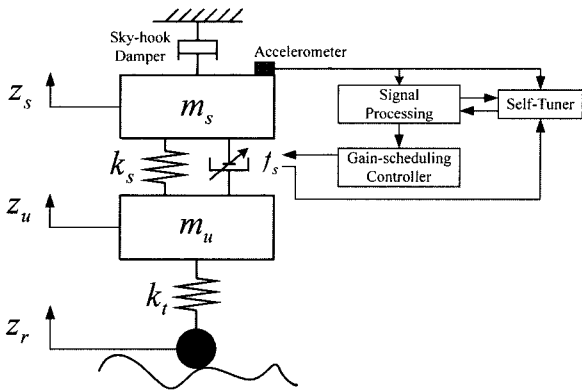


그림 1. 1/4-차량 모델을 이용한 자기동조 게인조절형 스카이훅제어의 개념도.

Fig. 1. Schematic of the self-tuning gain-scheduled sky-hook control using a 1/4-car model.

표 1. 1/4-차량모델에 사용된 파라미터 값.

Table 1. Parameter values used in the 1/4-car model.

변수	물리량	공칭값
$m_s$	차체 질량	460Kg
$m_u$	차축 질량	36Kg
$c_s$	현가장치의 감쇠계수	2,000N · sec/m
$k_s$	코일의 스프링상수	28,000N/m
$k_t$	타이어의 스프링상수	186,000N/m

### III. 반능동 현가시스템 제어알고리즘

본 논문에서 제안하는 자기동조기법을 적용한 수정된 스카이훅제어 알고리즘의 개념도는 그림 2와 같고, 전체 제어 알고리즘의 내용은 다음과 같다. 우선 차체의 수직가속도가 측정되면 적분필터(integral filter), 자기동조기 및 대역통과 필터(bandpass filter)로 입력된다. 적분필터는 차체의 수직가속도와 (1)의 운동방정식을 이용하여 차체의 절대속도 및 현가시스템의 상대속도를 계산한다. 적분필터가 현가시스템의 상대속도를 계산할 때는 차체의 질량과 스프링상수, 감쇠계수의 정보가 중요한 변수가 된다. 실제차량에서 차량의 질량은 승객이나 짐 등의 변동에 따라서 혹은 차량이 급가감속 운동을 할 때 급격히 변하며, 스프링상수는 온도와 같이 주위환경이나 사용기간에 따라 마모에 의해서 서서히 변화하고[12], 감쇠계수 또한 연속가변형 댐퍼의 비선형으로 인해 고정된 값을 사용할 수 없다[13][14]. 따라서, 차량의 질량과 스프링상수는 자기동조기에 의해서 추정된 결과를 이용하게 되면, 감쇠계수는 매 순간 계산되는 제어감쇠력으로부터 현가시스템의 상대속도에 비례하는 양으로 근사화된 선형계수가 이용된다.

차체의 수직가속도가 대역통과 필터를 거치게 되면 노면에 대한 정보를 간접적으로 얻을 수 있는데, 이로부터 게인조절기(gain scheduler)는 현재의 노면상태에 대한 최적의 스카이훅 제어게인을 산출하게 된다. 마지막으로 수정된 스카이훅 제어감쇠력이 결정되면 반능동 현가시스템에 인가된다.

#### 1. 신호처리기법

반능동 현가시스템의 제어를 위해서는 차체의 절대속도와 현가시스템의 상대속도에 관한 정보가 필요하다. 하지만, 속도를 직접 측정하는 것은 고가의 센서를 필요로 하며, 효율성이나 가격면에서 실용화에 불리하다[15]. 따라서, 제어기의 성능을 보장할 수 있는 정도의 정확성이 보장된다면 저가의 센서로부터 필요한 정보를 필터링 또는 관측기를 이용하여 구하는 것이 바람직하다. 본 논문에서는 반능동 현가시스템의 제어에 필요한 상태를 추정하기 위해서 일반적으로 가속도센서를 사용하며, 이를 적절한 필터 또는 관측기와 병합하여 필요한 정보를 얻는다. 여기서는 차체의 수직가속도센서만을 이용하여 필요한 정보를 얻는 방법을 고려한다.

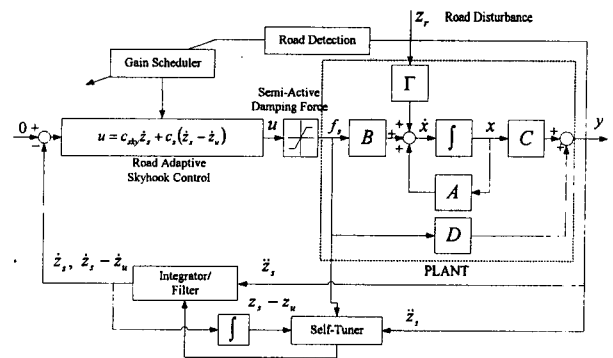


그림 2. 자기동조 게인조절형 스카이훅제어의 블록선도.

Fig. 2. Block diagram of the self-tuning gain-scheduled sky-hook control.

1.1 차체 절대속도

차체의 절대속도는 차체의 수직가속도 신호에서 고주파인 잡음과 저주파 DC 오프셋성분을 제거한 후 적분하여 구할 수 있다. 차체 절대속도를 전달함수형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\dot{z}_s}{z_s} = \frac{\omega_f^2}{s^2 + 2\xi\omega_f s + \omega_f^2} \cdot \frac{s}{s^2 + 2\xi\omega_h s + \omega_h^2} \quad (5)$$

전달함수는 전형적인 2차 저주파통과필터와 적분기를 내장한 2차 고주파통과필터의 곱으로 나타난다. 필터의 설계시 결정해야 될 설계변수는 고주파통과필터의 차단주파수  $\omega_h$ 와 감쇠비  $\xi$ 이며, 차단주파수는 설계시 고려되는 차량의 주파수 영역인 0.5~25Hz를 벗어난 값이어야 한다. 만약 고주파통과필터의 차단주파수를 1Hz 근방으로 설계한다면 DC 오프셋성분이나 극저주파 신호의 차단뿐만 아니라, 차량의 원하는 신호까지 제거하기 때문에 정확한 정보를 획득하기 힘들게 된다. 그러므로 고주파통과필터의 차단주파수는 0.2Hz 이하이어야 한다. 그리고 감쇠비는 DC 오프셋성분이나 극저주파 신호를 감쇠시키는 속도를 좌우한다. 빠른 감쇠를 위해서는 큰 감쇠비가 요구되지만, 이것은 차량의 주파수 영역의 신호를 왜곡시켜 노면 탐지 알고리즘의 성능 저하를 가져올 수 있다. 따라서, 감쇠비는 0.1~0.4의 범위로 결정한다.

1.2 현가시스템의 상대속도

현가시스템의 상대속도를 추정하는 필터를 설계하기 위해서  $f_s \approx c^*(\dot{z}_s - \dot{z}_u)$ 을 이용하여 1/4차량 모델을 새롭게 표현한다.

$$m_s \ddot{z}_s = -k_s(z_s - z_u) - c^*(\dot{z}_s - \dot{z}_u) \quad (6)$$

필터의 안정성을 향상시키기 위하여 1차의 저주파통과필터를 추가하여 현가시스템 절대속도 추정필터의 전달함수는 다음과 같이 유도된다.

$$\frac{\dot{z}_s - \dot{z}_u}{z_s} = \frac{m_s s}{c^* s + k_s} \cdot \frac{1}{(\tau s + 1)} = \frac{m_s s}{\tau c^* s^2 + (c^* + \tau k_s) s + k_s} \quad (7)$$

여기서  $\tau = 1/2 \xi \omega_1$ ,  $\xi = 0.707$ ,  $\omega_1 = 15 \sim 20\text{Hz}$ 이고,  $c^*$ 는 고정된 감쇠계수가 아닌 수동현가시스템의 감쇠계수에서 스카이훅 제어입력에 의해  $c_{\max}$ 와  $c_{\min}$  사이에서 변화하는 값이다. 여기서  $c_{\max}$ 와  $c_{\min}$ 는 연속가변형 댐퍼의 물리적 한계치를 나타낸다. 그러므로 적분필터는 설계시 제약을 가진다.

2. 자기동조기의 설계

최적의  $f_s$ 를 구현하기 위해서는 시변파라미터인  $m_s$ 와  $k_s$ 를 정확히 알아야 한다. 하지만,  $m_s$ 와  $k_s$ 는 변화의 정도는 다르지만 계속 변하는 시변파라미터이므로  $m_s$ 와  $k_s$ 값을 실시간으로 조절하여 주는 자기동조기가 필요하다[13]. 특히,  $m_s$ 의 경우는 그 변화가 불규칙적으로 수시로 변하기 때문에 그 상황에 맞게 정확히 추정할 필요가 있다. 따라서, 시변파라미터인  $m_s$ 와  $k_s$ 를 추정하는 자기동조기를 설계하기 위해

먼저 (1)을 다음과 같이 표현한다.

$$-f_s = m_s \ddot{z}_s + k_s(z_s - z_u) \quad (8)$$

위의 (8)을 다음과 같이 둔다.

$$y^*(t) = \Phi^T(t-1)\theta(t), \quad (9)$$

여기서,  $y^*(t)$ , 매개변수벡터  $\theta(t)$  그리고 귀환변수벡터  $\Phi(t)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y^*(t) &= -f_s(t), \\ \theta^T(t) &= [m_s(t) \quad k_s(t)] \\ \Phi^T(t) &= [\dot{z}_s(t) \quad z_s(t) - z_u(t)] \end{aligned} \quad (10)$$

$\theta$ 를 추정하기 위해  $y^*(t)$ 의 추정치  $\hat{y}^*(t)$ 를 다음과 같이 나타낸다.

$$\hat{y}^*(t) = \Phi^T(t-1)\hat{\theta}(t). \quad (11)$$

추정오차  $e(t)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} e(t) &= y^*(t) - \hat{y}^*(t) \\ &= y^*(t) - \Phi^T(t-1)\hat{\theta}(t). \end{aligned} \quad (12)$$

오차  $e(t)$ 를 최소화하기 위하여 최소제곱법의 성능지수를 다음과 같이 정한다.

$$J_{LS}(\theta, t) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^t (y^*(k) - \Phi^T(k-1)\hat{\theta}(k))^2 \quad (13)$$

$J_{LS}$ 를 최소로 하는  $\hat{\theta}(t)$ 는 다음과 같다.

$$\hat{\theta}(t) = \left[ \sum_{k=1}^t \Phi(k-1)\Phi^T(k-1) \right]^{-1} \sum_{k=1}^t \Phi(k-1)y^*(k), \quad (14)$$

여기서,

$$R(t-1) = \sum_{k=1}^t \Phi(k-1)\Phi^T(k-1)$$

이라 두면,  $\hat{\theta}(t+1)$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) + R^{-1}(t)\Phi(t)[y^*(t+1) - \Phi^T(t)\hat{\theta}(t)]. \quad (15)$$

(14)에서  $P(t) = R^{-1}(t)$ 라 두면 행렬 역변환 공식에 의해  $P(t)$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P(t) = P(t-1) - \frac{P(t-1)\Phi(t)\Phi^T(t)P(t-1)}{1 + \Phi^T(t)P(t-1)\Phi(t)} \quad (16)$$

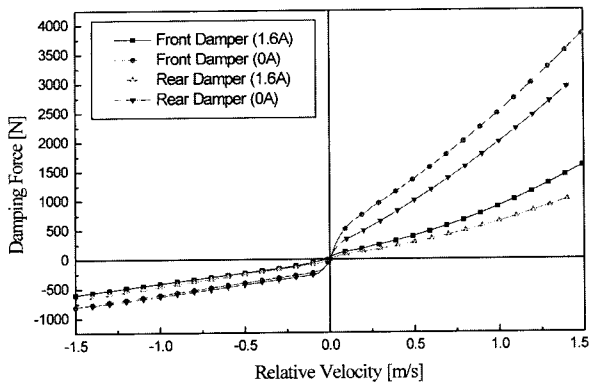


그림 3. 연속가변형 댐퍼의 감쇠특성.  
Fig. 3. Damping characteristics of a typical continuous variable damper.

(15) 및 (16)을 통해  $\theta$ 를 추정하기 위해서는  $\Phi$ 와  $y^*$ 값을 알아야 한다. 먼저,  $\Phi$ 에서 차체의 가속도인  $\dot{z}_s$ 의 값은 가속도센서로 직접 측정한 후 잡음만 제거하여 구한다.  $\Phi$ 에서 현가시스템의 상대변위  $z_s - z_u$ 의 값은 상대속도  $\dot{z}_s - \dot{z}_u$ 의 값을 적분하여 구한다. 마지막으로  $f_s$ 는 댐퍼구동유닛에서 댐퍼에 입력하는 전류를 피드백받아 그 전류값을 측정하여 그림 3의 댐퍼특성곡선을 통해 그 전류값에 해당하는 힘을 구한다.

(15)와 (16)을 이용하여 시변파라미터  $m_s$ 와  $k_s$ 를 추정하는 방법은 다음과 같은 순서로 이루어진다.

- i) 위와 같은 방법으로  $\Phi(t)$ 의 새로운 데이터를 얻는다.
- ii) 다음에 주어진 식에 의해 행렬  $P(t)$ 를 구한다.

$$P(t) = P(t-1) - \frac{P(t-1)\Phi(t)\Phi^T(t)P(t-1)}{1 + \Phi^T(t)P(t-1)\Phi(t)}, \quad P(0) = I. \quad (17)$$

- iii) 추정할 파라미터 행렬  $\theta$ 를 다음에 주어진 식에 의해 갱신시킨다.

$$\hat{\theta}(t+1) = \theta(t) + P(t)\Phi(t)[y(t+1) - \Phi^T(t)\hat{\theta}(t)]. \quad (18)$$

### 3. 수정된 스카이훅제어

Karnopp 외 2인[9]에 의해 제안된 스카이훅 감쇠제어는 능동(반능동 현가시스템과 관련하여 잘 알려진 제어알고리즘)으로 노면의 진동의란에 의한 차체의 수직가속도를 줄이기 위하여 가상적인 기준면에 감쇠기를 설치하는 방법이다. 그러나, 이상적인 스카이훅제어는 승차감 향상에만 초점이 맞추어진 것으로 차량 주행성능의 향상에는 기여하지 못한다. 따라서, 수정된 스카이훅제어에서는 차량의 주행안정성을 고려하기 위해 제어입력에 차체의 수직가속도에 비례하는 스카이훅 감쇠력에 차체와 차축의 상대속도에 비례하는 감쇠력을 포함시켜 고려한다. 수정된 스카이훅제어에 의해서 발생되는 감쇠력은 다음과 같다.

$$u = c_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) + c_{sky}\dot{z}_s, \quad (19)$$

여기서,  $c_{sky}$ 는 스카이훅계인이고  $c_s$ 는 수동현가시스템의 감

쇠계수이다. 이것은 연속가변댐퍼의 물리적 특성을 고려하지 않은 것으로 연속가변댐퍼의 물리적 특성을 고려할 실제적인 감쇠력은 다음과 같다.

$$f_s = \begin{cases} f_s^*, & \text{if } f_s^* \leq u, \\ u, & \text{if } f_s^* < u < f_s^*, \\ f_s^*, & \text{if } f_s^* \geq u, \end{cases} \quad (20)$$

여기서  $f_s^*$ 와  $f_s$ 의 값은 주어진 상대속도에 따라 구현 가능한 연속가변댐퍼 감쇠력의 최대, 최소 물리적 한계값이다.

수정된 스카이훅제어에서 수동현가시스템의 감쇠계수를 증가시키면 차체와 차축 공진최대값에서 차체의 수직가속도와 동적 타이어힘이 감소하게 되나, 수동현가시스템의 감쇠계수가 너무 커지면 중간주파수에서의 차체의 수직가속도와 동적 타이어힘이 증가하게 된다. 또한, 스카이훅 감쇠계수가 커지게 되면 차체의 공진최대값에서 차체의 수직가속도와 동적 타이어힘은 감소하나, 중간 주파수대 이상에서 차체의 수직가속도와 동적 타이어힘이 증가하게 된다. 따라서, 이 두 가지 감쇠계수를 적절히 조절하면, 승차감 지수인 차체의 수직가속도 뿐만 아니라, 주행안정성 지수인 동적 타이어힘도 동시에 감소시킬 수 있게 된다. 즉, 부드러운 노면에서 스카이훅계인을 증가시켜 차체의 공진 주파수인 1Hz 근처에서 차체의 수직가속도를 감소시키고, 스카이훅계인과는 반대로 수동현가시스템의 감쇠계수는 감소시켜 중간주파수에서의 차체의 수직가속도와 동적 타이어힘을 감소시킨다. 반대로 거친 노면에서는 수동현가시스템의 감쇠계수를 증가시키고, 스카이훅계인을 감소시켜 주행안정성 위주로 제어한다. 따라서, 노면의 상황에 맞게 최적의  $c_{sky}$ 와  $c_s$ 를 선정한다.

### 4. 기준노면의 최적계인 선정

ISO규격에 따른 노면[3]을 생성하여 생성된 노면을 입력으로 하여 시뮬레이션을 통해 차체의 수직가속도와 동적 타이어힘의 데이터를 얻는다. 얻어진 데이터를 가지고, (21)로 최적의  $c_{sky}$ 와  $c_s$ 를 구한다.

$$(c_{sky}, c_s)_{optimal} = \min_i \left\{ \sqrt{ \left[ w_i(z_r) \cdot \frac{TF(i) - TF_{min}}{TF_{max} - TF_{min}} \right]^2 + \left[ w_a(z_r) \cdot \frac{BA(i) - BA_{min}}{BA_{max} - BA_{min}} \right]^2 } \right\} \quad (21)$$

(21)에서 TF(tire force)와 BA(body acceleration)는 동적 타이

표 2. 노면입력에 따른 최적계인.  
Table 2. Optimal gains for various road inputs.

Classification	Weight factors ( $w_a, w_i$ )	Optimal gains ( $c_{sky}, c_s$ )
ISO A class	(0.8, 0.2)	(2500, 1200)
ISO B class	(0.7, 0.3)	(1500, 1400)
ISO C class	(0.6, 0.4)	(1000, 1600)
ISO D class	(0.4, 0.6)	(500, 2000)
ISO E class	(0.3, 0.7)	(0, 2800)

어힘과 차체의 수직가속도의 RMS(root mean square)값이고,  $w_d(z_r)$ 과  $w_l(z_r)$ 는 동적 타이어힘과 차체의 수직가속도의 가중치를 나타낸다. 두 가중치 선정에 있어서는 노면이 거칠수록  $w_l(z_r)$ 을 크게 선정한다. 이렇게 구해진 각 기준노면에 따른 가중치와  $c_{sb}$ ,  $c_s$ 값은 표 2와 같다.

5. 모의실험

본 논문에서 제안한 자기동조기 모델에 의하면 최적의  $f_s$ 를 구현하기 위해서는 시변파라미터인  $m_s$ 와  $k_s$ 를 정확히 알아야 함을 알 수 있다. 자기동조기의 모의실험을 통해 원하는 파라미터의 값을 정확히 추정하는지 알아보고, 그 파라미터들의 오차가 있을 때와 없을 때의 제어기의 성능차이를 모의실험을 통해 분석해 본다. 자기동조기가 정확히 시변파라미터인  $m_s$ 와  $k_s$ 값을 잘 추정하는지 알아보기 위해 추정할 파라미터인 행렬  $\theta$ , 즉  $m_s$ 와  $k_s$ 의 초기값을 0으로 두고, 1/4 차량동역학 시뮬레이션 부분에서 실제  $m_s$ 와  $k_s$ 값을  $m_s=460$  kg,  $k_s=26000$  N/m로 두고 파라미터 추정 시뮬레이션을 수행한다.

시뮬레이션 수행 결과는 그림 4 및 그림 5에서 보여지고 있다. 그림 4는 차체질량  $m_s$ 를 추정하는 과정을 나타내고 있는데 약 1초안에 초기값 0에서 점선으로 표시된 실차의 차체질량 460kg으로 추정하고 있는 것을 볼 수 있다. 그림 5는 스프링상수  $k_s$ 를 추정하는 과정을 나타내고 있는데, 약 3초 정도 시간이 걸려서 초기값 0에서 점선으로 표시된 실제 스

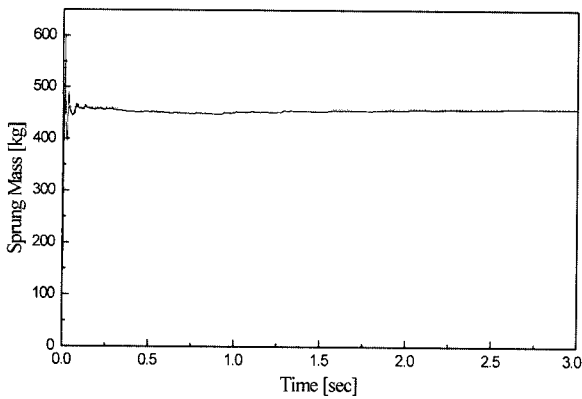


그림 4. 차체질량의 규명.  
Fig. 4. Identification of the sprung mass.

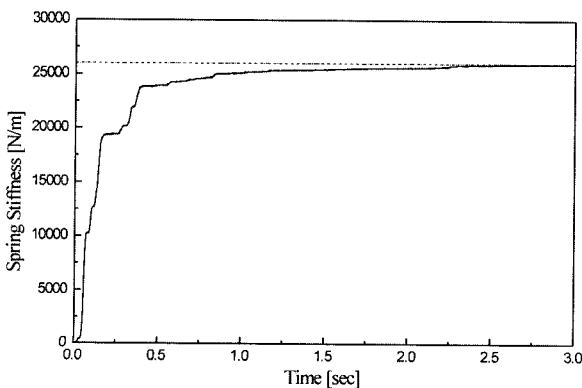


그림 5. 현가장치 스프링상수의 규명.  
Fig. 5. Identification of the suspension spring coefficient.

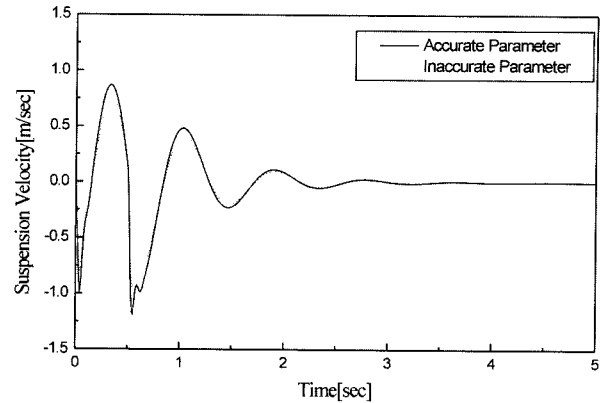


그림 6. 스피드범퍼의 통과시 차체의 속도변화.  
Fig. 6. Time response of the suspension velocity for a speed-bumper.

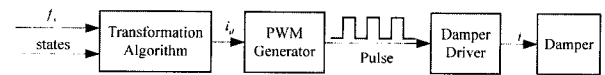


그림 7. 제어전류 변환 단계.  
Fig. 7. Control current generation steps.

프링 상수 26000N/m로 추정하고 있는 것을 볼 수 있다. 앞서 말한 바와 같이 정확한 파라미터의 값을 얻는 것은 수정된 스카이hook제어를 하는데 있어서, 측정된 차체의 가속도 신호만으로 정확한 현가시스템의 상대속도를 얻기 위함이다. 따라서, 우선 파라미터 값에 오차가 있을 때와 없을 때를 구분하여 추정한 현가시스템의 상대속도를 비교해 본다. 파라미터의 오차는 차체의 질량의 경우 타고 있던 사람이 내렸다고 가정하여 13%(약 60kg) 줄이고 스프링 상수는 서서히 변하는 값이지만 10%의 오차가 생겼다고 가정하여 시뮬레이션을 수행한다.

그림 6은 자동차가 폭이 0.5m이고 높이가 0.15m 둔덕을 통과했을 때 추정한 현가시스템의 상대속도를 비교하고 있다. 실선은 파라미터 값이 정확할 때 추정한 현가시스템의 상대속도이고 점선은 파라미터 값에 오차가 존재할 때 추정한 현가시스템의 상대속도이다. 그림 6에서 보는 바와 같이 파라미터 값의 오차에 따라 추정한 현가시스템의 상대속도가 차이가 14.2% 정도 생기는 것을 볼 수 있다.

IV. 현가시스템용 ECU(Electronic Control Unit)

1. 댐퍼의 전류입력생성

제어기를 통해서 구해진 제어입력  $f_s$ 를 실제 반응동 현가시스템에 입력으로 주기 위해서는 그림 7과 같이 몇 가지 과정이 필요하다. 먼저 반응동 현가시스템의 입력은 전류이므로 제어기를 통해 구해진 제어입력  $f_s$ 를 전류값  $i$ 로 변환시켜 주어야 한다. 변환한 전류값에 맞는 실제 전류를 생성하기 위해 PWM 생성기로 전류값  $i$ 에 해당하는 펄스를 발생시킨다. 댐퍼구동기는 생성된 펄스로 전류  $i$ 를 생성하여 댐퍼에 입력으로 넣어준다. 여기서 가장 중요한 과정은  $f_s$ 를 댐퍼입력 전류  $i$ 로 변환하는 과정이다. 따라서, 본 논문에서는 실제 댐퍼 테스트를 통해 얻어진 데이터로부터 구해진 룩업테이블(look-up table)에 의해 그 데이터를 근사화시킨 다항식을

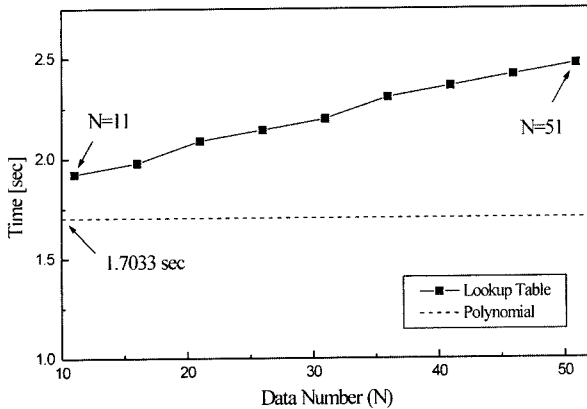


그림 8. 연산시간의 비교: 룩업테이블과 다항식방법.  
Fig. 8. Access time comparison: lookup table and polynomial.

이용하여 실험하였다.

실제 실험을 하거나 자동차에 적용시킬 때에는 모든 알고리즘을 코딩하여  $\mu$ -com에 이식하여 사용하기 때문에 알고리즘의 연산량이 제어기 성능에 큰 영향을 미친다. 그림 8은 룩업테이블과 근사화된 다항식의 연산량을 룩업테이블의 데이터 개수에 따라 비교한 그래프이다. 두 방식의 연산량 측정은 전류가 0A일 때의 곡선을 선정하여 상대속도값을 임의로 준 후 탭핑력값을 계산하는 과정을 1,000,000회 반복해서 수행시켜 연산작업이 시작될 때부터 끝날 때까지의 시간을 타임인터럽트를 사용하여 정확히 측정하였다 [16][17]. 윈도우 운영체제에서는 여러 작업이 동시에 수행될 수 있어서 정확한 시간을 구하지 못할 수 있기 때문에 DOS 운영체제에서 프로그램을 실행하여 근사식과 룩업테이블의 연산시간을 구한다. 그림 8에서 볼 수 있듯이 룩업테이블의 경우 데이터 개수가 많을 때는 룩업테이블의 연산량이 다항식 보다 많지만 데이터 개수가 줄어들면서 룩업테이블의 연산량이 줄어드는 것을 알 수 있다. 따라서, 룩업테이블을 사용하려면 탭퍼의 특성을 정확히 나타내는 최소 데이터 개수를 선정하여 그 때의 근사식과 비교한 후 계산량이 적으면 룩업테이블을 사용하고 비슷하거나 많다면 근사화된 다항식을 사용하는 것이 유리하다.

그러나, 그림 8에서 볼 수 있듯이 룩업테이블의 데이터 개수를 11개까지 줄여도 근사식을 사용한 시간보다 더 오래

표 3. 다항식 근사법.

Table 3. Polynomial approximation method.

$(z_v - z_u = \Delta v)$	Maximum Damping Force (0A)	Minimum Damping Force (1.6A)
$0.25 < \Delta v$	$440 + 1650 \Delta v + 420 \Delta v^2$	$95 + 405 \Delta v + 402 \Delta v^2$
$0 < \Delta v < 0.25$	$8500 \Delta v - 36500 \Delta v^2 + 66450 \Delta v^3$	$37 + 1504 \Delta v - 7284 \Delta v^2 + 17164 \Delta v^3$
$-0.1 < \Delta v < 0$	$6700 \Delta v + 78000 \Delta v^2 + 340000 \Delta v^3$	-
$-0.25 < \Delta v < 0$	-	$530 \Delta v$
$\Delta v < -0.1$	$410 \Delta v - 190$	-
$\Delta v < -0.25$	-	$370 \Delta v - 43$

표 4. CPU 제원.

Table 4. CPU specifications.

자원	제원	용도
RAM	2Kbytes	제어변수 저장
ADC	8ch, 10bit	아날로그신호 측정
CAPCOM	4ch	PWM신호 발생
UART	1ch	PC와의 통신
SSC	1ch	주변기기의 동기방식 통신
Digital I/O	59ch	디지털신호의 발생 및 측정
Interrupt	4ch	제어기 주변상황 감시
CAN	1ch	제어기 간의 고속통신

걸림을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 룩업테이블의 근사적인 표 3를 이용하여  $f$ 로부터 전류입력  $i$ 를 계산한다.

2. ECU의 구성

ECU 구성에 대해서는 하드웨어 부분과 소프트웨어 부분으로 나누어서 설명한다. 하드웨어 부분은 전체적인 구성 내용과 각 부분의 기능과 구성에 대해 설명하고 소프트웨어 부분은 소프트웨어의 전체적인 알고리즘 구성에 대해 개략적으로 설명한다.

2.1 ECU 하드웨어

제어기의 하드웨어 구성은 그림 9와 같다. 제어기는 크게 전원회로, CPU회로, 센서신호 입력회로, 구동회로, 디지털 입출력회로로 나눌 수 있다.

1) 전원회로 : 전원은 그 사용목적에 따라 제어기 주전원과 센서공급전원, 그리고 구동전원으로 나뉜다. 제어기의 주전원과 센서공급전원은 과전압과 역전압을 방지하기 위해 보호회로를 사용하며, 또한 Infineon사의 TLE4261을 전압조정기(voltage regulator)로 사용한다. TLE4261은 안정된 CPU reset 신호를 제공하며 reset delay 설정이 가능하다. 그리고 watchdog 회로를 내장하고 있으며 온도변화에 강인하고 EMC 규격을 충족하고 있다. 구동전원은 탭퍼구동을 위한 PWM 구동기회로를 위한 전원으로, 회로간 노이즈 영향을 줄이기 위해 독립적인 전원입력을 사용하며, PWM 구동측에서 발생하는 잡음을 억제하기 위해  $\pi$ 형 필터를 사용한다.

2) CPU회로 : CPU회로는 CPU, 클럭, 메모리, 통신포트로 구성된다. CPU는 16bit 마이크로프로세서인 Infineon사의

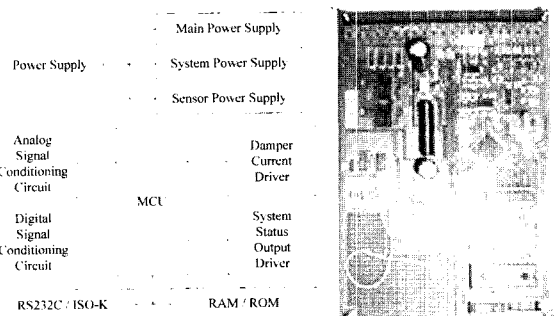


그림 9. ECU의 구성.  
Fig. 9. Configuration of the ECU.

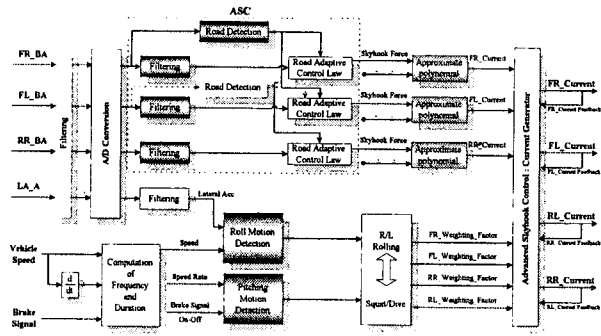


그림 10. ECU 소프트웨어의 구성.  
Fig. 10. Construction of the ECU software.

C164CI를 사용한다. 표 4에 본 제어기에서 사용하는 CPU의 내부제원을 나타내고 있다. CPU 외부클럭은 20MHz를 사용하며 내부클럭은 내부 PLL회로에 의한 2배 분주 회로를 사용하지 않고 20MHz로 같이 사용한다. 제어프로그램을 탑재하기 위한 메모리로는 ATMEL사의 AT28c256을 사용한다. 이 메모리는 버스폭이 8bit이고 32Kbyte로 구성되어 있다.

3) 센서신호 입력회로 : 센서신호 입력회로는 센서에 따라 나누면 3개의 가속도센서를 위한 회로와 차속을 측정하기 위한 회로, 그리고 차량의 브레이크신호를 감지하기 위한 회로로 구분되어진다. 차속은 차량의 속도 별스를 National Semiconductor사의 LM2917을 이용하여 전압신호로 변환한 뒤 ADC를 통해 측정한다.

4) 구동회로 : 제어기에서 연산된 최종 제어출력으로 댐퍼의 솔레노이드에 전류를 구동하는 회로로써, CPU에서 발생된 PWM신호에 따라 high-side MOSFET를 사용하여 전류를 단속할 수 있도록 한다. High-side Driver는 하나의 칩에 2 채널분의 MOSFET가 내장된 Infineon사의 BTS728L2를 2개 사용하여 각 댐퍼를 독립구동할 수 있게 한다. PWM신호의 주파수는 500Hz이며, 0~50%의 듀티비(duty ratio)에 따라 0~2.5A의 전류를 구동할 수 있도록 한다.

2.2 ECU 소프트웨어

ECU 소프트웨어의 전체 개략도는 그림 10과 같다. 그림 10에서 볼 수 있듯이 가속도 센서들과 속도센서로부터 가속도와 속도를 받고, 브레이크신호 등을 받아 필터와 A/D converter를 거쳐 그 정보를 통해 댐퍼의 전류입력을 계산하고 있다. 본 논문에서 지금까지 기술한 알고리즘은 그림 10에서 ASC(Advanced Sky-hook Control) 부분으로 제어기는 총 3개로 앞쪽의 현가시스템 2개 그리고 뒷부분은 한쪽 현가시스템의 차체에 대한 가속도신호를 받아 양쪽의 현가시스템에 같은 제어입력을 준다. 프로그램 언어는 C언어를 사용하고, 컴파일러는 Tasking사의 C166/ST10을 사용한다.

V. 1/4-차량 시뮬레이터 실험 및 결과

1. 1/4-차량 시뮬레이터 실험

1/4-차량 시뮬레이터는 크게 기구부, 신호처리 및 제어부와 유압 가진부분으로 나누어진다. 먼저 기구부는 4+2 Post의 전체 프레임과 4개의 LVDT, 2개의 로드셀 및 2개의 가속도센서로 구성된다. 4개의 LVDT에서는 차체와 차축의 절대변위, 현가시스템의 변위 및 가진기의 변위를 측정하고, 2

개의 로드셀에서는 타이어힘과 댐핑력을 측정한다. 또한 2개의 가속도센서에서는 차체와 차축의 가속도신호를 측정한다. 신호처리 및 제어부에서는 MATLAB /SIMULINK에서 구성한 제어블록에서 C코드를 생성하여 컴퓨터에 설치되어 있는 DSP보드에 다운로드해서 DSP보드가 1/4-차량 시뮬레이터를 실시간으로 제어한다[17]-[19]. 유압 가진부분은 체코의 INOVA사 액츄에이터로서 가진영역은 (125mm)이고, 최대 가진주파수는 200Hz이다. 하지만, 50Hz이상의 고주파에서 주기는 보장이되지만 크기가 정확하게 나오지 않는다. 실제로, 자동차로 들어오는 노면입력은 50Hz 이상의 고주파입력이 들어오지 않으므로 실제 실험에서는 영향을 끼치지 않고 있다.

2. 1/4-차량 시뮬레이터

1/4-차량 시뮬레이터는 차체와 차축 2질량을 가지며, 차체의 질량은 실제 차량에서 승객의 수에 따라 변하므로 10kg단위로 추가할 수 있게 한다. 또한 1/4-차량 시뮬레이터의 고유진동수는 기저의 질량에 의해 50Hz근방에 존재하므로, 유압 액츄에이터의 기준입력신호는 이에 대한 영향을 고려하여야 한다. 1/4-차량 시뮬레이터에서 측정되는 센서신호는 그림 11에서 보는 바와 같이 총 8개이다. 그림 11에서 1/4-차량 시뮬레이터의 전체 구조물은 964mm×1,100mm(단면적)×2,900mm(높이)이고, 차체와 차축의 질량은 2개의 주 Post에 가이드 베어링으로 연결된다. 또한 4개의 부 Post는 구조물의 비틀림을 최소화하며, 차체와 차축의 절대변위를 측정하는 LVDT의 기준점이 된다. 실험장치의 구동은 그림 11과 같이 우선 노면입력을 컴퓨터에서 주면 기준부에서 차량동역학 시뮬레이션 장치를 가진하고 각 센서들로부터 나온 신호를 제어알고리즘 프로그램이 내장된 ECU와 DSP보드에서 받아서 제어입력을 계산한다. 계산된 제어입력은 PWM신호로 댐퍼 구동유닛에 입력되며 댐퍼 구동유닛에서 PWM신호에 해당하는 전류를 댐퍼에 입력하여 댐퍼를 제어한다.

3. 실험결과

본 논문에서는 1/4-차량 시뮬레이터의 차체질량과 스프링상수  $k_s$ 의 실제값을 자기동조기로 직접 추정하는 실험과 실험에 의해 검증된 자기동조기를 사용한 게인조절형 스카이훅제어의 성능 평가실험을 수행한다. 우선 표 5와 같은 제원의 1Hz, 5Hz, 10Hz의 정현파를 섞어서 노면입력으로 1/4-차량 시뮬레이터를 가진한다. 그리고 전체 제어시스템의 샘플

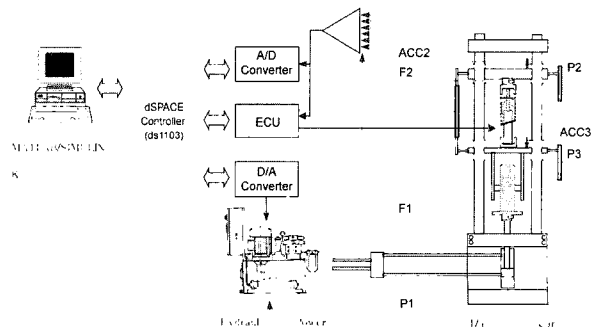


그림 11. 1/4-차량 실험장치의 구성도.  
Fig. 11. Block diagram of the 1/4-car experimental setup.

표 5. 노면입력 제원(정현파).  
Table 5. Road inputs specifications(sine wave).

	Road #1	Road #2	Road #3
Frequency (Hz)	1	5	10
Amplitude (m)	0.12	0.04	0.04

플링시간은 0.001초로 한다.

실험 수행결과는 그림 12와 그림 13에서 보여지고 있다. 그림 12는 차체질량  $m_s$ 를 추정해 가는 과정을 나타내고 있다. 차체질량을 초기값 0에서 시작해서 실제값으로 추정하는데 약 1~2초 정도 시간이 걸렸다. 그림 13은 스프링상수  $k_s$ 를 추정해 가는 과정을 나타내고 있다. 스프링상수  $k_s$ 는 초기값 0에서 시작해서 실제값으로 추정하는데 약 4~5초 가량 소요되었다. 위 결과에서 볼 수 있듯이 1/4-차량 시뮬레이터에 의한 실험에서도 자기동조기에 의한 차체질량과 스프링상수  $k_s$ 의 추정이 잘 수행됨을 알 수 있다.

그림 14는 1 Hz,  $\pm 12.5\text{mm}$ 의 정현파로 1/4 차량 simulator를 가진시켜 수동현가시스템과 자기동조 게인조절형 스카이훅제어의 차체 수직가속도 응답을 비교한 것이다. 수동현가시스템에 비해 자기동조 게인조절형 스카이훅제어는 차체의 흔들림감쇠에 있어서 향상된 성능을 나타내고 있다.

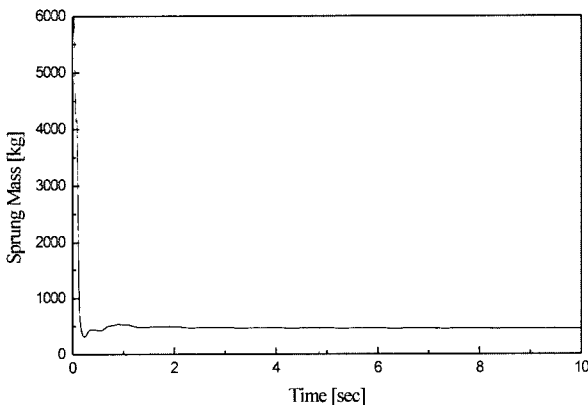


그림 12. 차체질량의 규명(실험).  
Fig. 12. Identification of the sprung mass(experiment).

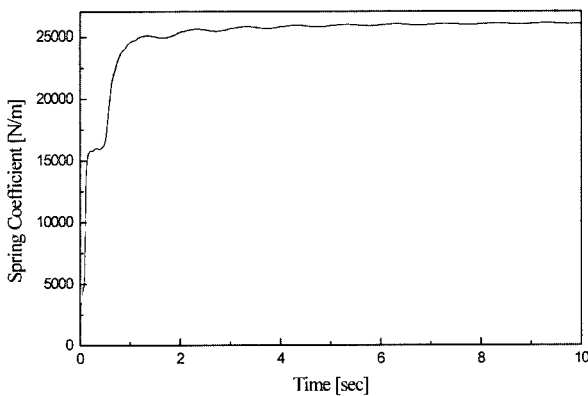


그림 13. 현가장치 스프링상수의 규명(실험).  
Fig. 13. Identification of the suspension spring coefficient(experiment).

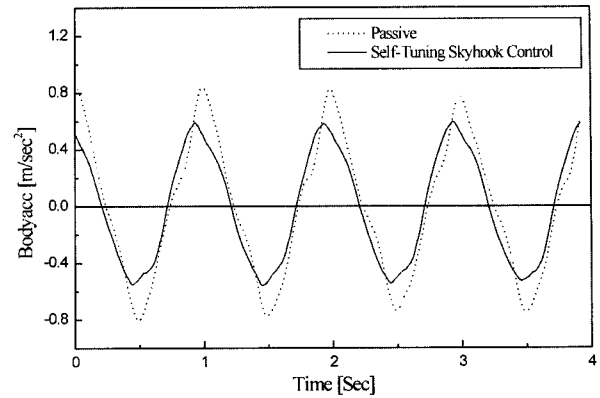


그림 14. 수동현가장치와 자기동조 게인조절형 스카이훅제어의 차체가속도 비교(실험).

Fig. 14. Sprung mass acceleration of the passive suspension and the self-tuning gain-scheduled sky-hook control(experiment).

VI. 결론

본 논문에서는 반능동 현가시스템의 수정된 스카이훅제어기 설계에 있어서 차체의 질량과 스프링상수의 변화를 자기동조기법을 도입하여 보상하였다. 차체의 질량과 스프링상수를 RLS(Recursive Least Squares)방법으로 정확히 추정하였으며, 추정된 파라미터를 바탕으로 적분필터를 설계하여 정확한 차체의 절대속도와 현가시스템의 상대속도를 얻을 수 있었으며, 필터를 통해 얻어진 차체의 절대속도와 현가시스템의 상대속도를 바탕으로 제어입력을 계산하여 적용시킬 수 있었다.

또한, 1/4-차량 시뮬레이터 실험을 통해서 자기동조기에 의해 차체의 질량과 스프링상수의 변화가 정확히 추정되는 것을 검증하여 보았다. 즉, 수정된 스카이훅제어기에 자기동조기를 도입하므로 해서 차체의 가속도신호 하나만으로도 정확한 차체의 절대속도와 현가시스템의 상대속도를 추정하여 원하는 제어성능을 얻을 수 있음을 보였다.

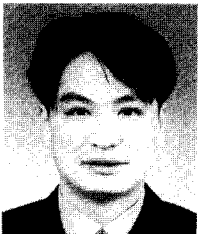
본 논문에서 제시한 현가시스템의 제어알고리즘은 가속도센서만을 사용하여 좋은 성능을 보여주므로, 이알고리즘을 실제 ECU로 적용하기 위해 ECU의 하드웨어와 소프트웨어를 구성하고 제작하였다. 하지만, 실제 ECU의 S/W에서는 anti bounce제어뿐만 아니라 anti dive, anti squat부분에 대한 연구가 진행되어야 할 것이며, 비록 현가시스템 특성상 문제가 생기더라도 자동차의 다른 제어부분보다 위험은 적지만 운전자의 실수라든지 급박한 상황에 대처하는 프로그램도 포함이 되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] 손철철, "반능동현가장치의 수정된 스카이훅 제어: 축소된 전차량 모델과 동력전달장치의 통합제어," 부산대학교 지능기계공학과 석사학위 논문, 2000.
- [2] 최영휴, "승차감 및 조종성능을 고려한 승용차 현가장치의 동적설계," 서울대학교 박사학위 논문, 1991.
- [3] 김광석, 유완석, "전력밀도합수를 이용한 노면형상 생성에 관한 연구," 한국자동차공학회 논문집, 제5권 제1호, pp. 136-145, 1997.

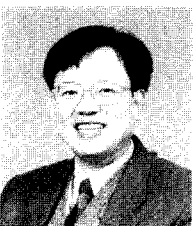


- [4] Cho, Y. J., Song, B. S., and Yi, K. S., "A Road-adaptive control law for semi-active suspensions," *KSME International Journal*, vol. 13, no.10, pp. 667-676, 1999.
- [5] Kim, H. and Yoon, Y. S., "Semi-active suspension with preview using a frequency-shaped performance index," *Vehicle System Dynamics*, vol. 24, pp. 759-780, 1995.
- [6] Alleyne, A. and Hedrick, J. K., "Nonlinear adaptive control of active suspensions," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 94-101, 1995.
- [7] 홍금식, 전동섭, 김철민, 유완석, "Macpherson형 현가장치의 새로운 모델링과 최적극배치 제어," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제4권 제6호, pp. 713-721, 1998.
- [8] Besinger, F. H., Cebon, D., and Cole, D. J., "Force control of a semi-active damper," *Vehicle System Dynamics*, vol. 24, pp. 695-723, 1995.
- [9] Karnopp, D. C., Crosby, M. J., and Harwood, R. A., "Vibration control using semi-active force generators," *ASME Journal of Engineering for Industry*, vol. 96, no. 2, pp. 619-626, 1974.
- [10] Novak, M. and Valasek, M., "A New concept of semi-active control of trucks suspension," *Proc. of AVEC 96 International Symposium on Advanced Vehicle Control*, Aachen University of Technology, pp. 141-151, 1996.
- [11] Valasek, M., Babic, M., Sika, Z., and Magdolen, L., "Development of semi-active truck suspension," *Proc. of the 8th IFAC/IFIP/IFORS Symposium on Transportation Systems*, Chania, Greece, pp. 470-475, 1997.
- [12] Vallurupalli, S. S., Dukkupati, R. V., and Osman, M. O. M., "Discrete adaptive active suspension for hardware implementation," *Vehicle System Dynamics*, vol. 26, pp. 161-196, 1996.
- [13] 이병윤, 김완일, 원상철, "신경망을 이용한 액티브 현가장치의 자기동조 최적제어," 한국자동차제어학술회의 논문집, vol. I, pp. 295-298, 1996.
- [14] 정재룡, 홍금식, "반능동현가장치의 Self-Tuning 기능을 갖는 수정된 스카이훅 제어," 한국정밀공학회 춘계 학술대회, pp. 389-392, 2000.
- [15] 이경수, "자동차 현가시스템의 능동제어," 대한기계학회지, 제36권 제7호, pp. 679-704, 1996.
- [16] Hong, K. S., Sohn, H. C., and Hedrick, J. K., "Modified skyhook control for the semi-active macpherson strut suspension: A new model and hiLS," to appear in the *Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2001.
- [17] Sohn, H. C., Hong, K. S., and Hedrick, J. K., "Semi-active control of the macpherson suspension system: hardware-in-the-loop simulations," *IEEE International Conference on Control Applications*, Anchorage, Alaska, USA, pp. 982-987, 2000.
- [18] 전동섭, 홍금식, 박배정, "맥퍼슨형 반능동현가장치의 새로운 모델링 및 HiLS 구현," 한국정밀공학회 추계 학술대회 논문집, vol. I, pp.334-347, 서울시립대학교, 1998.
- [19] 허승진, 심정수, 황성호, "승용차용 반능동형 가변댐퍼 시스템의 개발," 한국소음진동공학회지, 제8권 제4호, pp. 683-689, 1998.



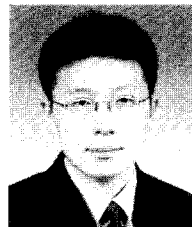
**홍 경 태**

1973년 9월 28일생. 1992~2000 금오공과대학교 전자통신공학과(공학사). 1993~1995 군복무(통신병). 2000~2002 부산대학교 대학원 지능기계공학과(공학석사). 2002~현재 동대학원 박사과정. 관심분야는 적응제어, 현가장치제어 및 ECU개발, HILS, 능동제어 차량시트개발, 개방구조의 비전센서를 이용한 Anti-Sway Control 시스템 개발, 크레인 LMI 시스템 개발, 임베디드시스템, 무선통신을 위한 Data Link Protocols.



**홍 금 식**

1957년 8월 25일생. 1975~1979 서울대학교 기계설계학과(공학사). 1985~1986 Columbia University(New York) 기계공학과(공학석사). 1987~1991 University of Illinois at Urbana-Champaign(UIUC) 응용수학과(이학석사) 및 기계공학과(공학박사). 1991~1992 UIUC 기계공학과 Post-doctoral Fellow. 1979~1982 군복무(포병). 1982~1985 대우중공업(인천) 기술연구소 연구원(소음/진동 담당). 1993~현재 부산대학교 공과대학 전임강사, 조교수, 부교수. 1996~1999 제어·자동화·시스템공학 논문지 편집위원. 2000~현재 Automatica, Associate Editor. 관심분야는 시스템이론, 적응제어, 비선형제어, 분포매개변수시스템의 제어.



**허 창 도**

1974년 8월 22일생. 1993~2000 부산대학교 기계공학부(공학사). 1995~1997 군복무(운전병). 2000~2002 부산대학교 대학원 지능기계공학과(공학석사). 2002~현재 동대학원 박사과정. 관심분야는 입력다듬제어, 최적제어, 크레인시스템제어, PC 기반 로봇제어, 차량동역학 및 현가장치제어.