

論文98-35S-9-6

차량의 동특성 향상을 위한 통합 샤시 제어기의 설계

(Design of an Integrated Chassis Controller for the Improvement of Vehicle Dynamic Characteristics)

李 愼 遠 *, 安 台 煥 *, 安 鉉 植 *, 李 雲 成 **, 金 道 鉉 *, 金 尙 燮 **

(S. W. Lee, T. H. Ahn, H. S. Ahn, W. S. Lee, D. H. Kim, and S. S. Kim)

요 약

본 논문에서는 능동형 샤시 시스템이 장착된 차량의 안정성(Stability), 조종성(Handling) 및 승차감(Ride comfort)을 향상시키기 위한 새로운 통합제어기를 설계한다. 하이브리드 퍼지논리 제어기는 퍼지논리 제어기, 스카이 훅 제어기, 자세 제어기 및 롤 모멘트 분포 제어기로 이루어지며, 차량의 주행상태에 기초한 통합제어 로직을 이용하여 위와같은 제어기들을 적절히 결합시켜 사용한다. 또한 MATRIXx/SYSTEMBUILD 소프트웨어를 이용하여 16자유도 차량모델에 대하여 시뮬레이션을 수행함으로써 차량의 승차감, 조종성 및 능동적 안전도가 향상됨을 확인한다.

Abstract

In this paper, a novel type of an integrated controller is designed for vehicles equipped with active chassis systems to improve vehicle stability, handling, and ride comfort. The hybrid fuzzy logic controller consists of a fuzzy logic controller, a skyhook controller, an attitude controller, and a roll moment distribution controller, and these controllers are used with a proper combination which is determined by the integrated control logic based on driving conditions of a vehicle. It is shown by simulations using MATRIXx/SYSTEMBUILD software that ride comfort, handling, and active safety are improved for a 16 degree-of-freedom vehicle dynamic model.

I. 서 론

최근 마이크로프로세서를 이용한 전자제어기술의 발달과 더불어 샤시를 능동적으로 제어함으로써 차량의 안전도 및 승차감을 향상시키고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 그 결과로 능동현가시스템(active

suspension system), 4륜조향시스템(four wheel steering system), 잠김 방지 제동시스템(anti-lock brake system) 등이 실용화되고 있다. 이들은 샤시의 수직축, 횡축 및 종축운동을 독립적으로 제어하도록 설계, 개발되고 있는데 이와 같은 추진, 제동, 조향 및 현가시스템 등이 독립적으로 동작될 때 차량의 각 방향 운동은 상호 간섭작용을 일으킬 수 있게 되고 따라서 한 방향의 제어는 다른 방향의 운동에도 영향을 미치게 된다^{[1][2]}. 그러므로 샤시 제어시스템들을 단순히 결합하여 샤시의 모든 방향을 제어하는 것 보다 각 시스템간의 관계와 차량의 안전도 및 성능에 미치는 영향을 고려하여 상호보완적으로 결합함으로써 목표성을 극대화하고, 또한 센서, 액츄에이터 및 ECU(Electronic Control Unit)등의 공유를 통해 경

* 正會員, 國民大學校 電子工學部

(School of Electronic Engineering, Kookmin University)

** 正會員, 國民大學校 機械 自動車工學部

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University)

接受日字: 1997年9月25日, 수정완료일: 1998年9月2日

제정도 향상시킬 수 있으므로 각 사시 제어시스템들을 효과적으로 결합, 운용할 수 있는 통합제어시스템의 개발이 시급하다.

따라서 본 논문에서는 유공압식(hydropneumatic) 능동현가시스템과 요속도 제한형 4륜조향시스템이 장착된 차량의 동특성을 향상시키기 위한 통합제어로직을 설계한다. 설계된 통합제어로직의 타당성 및 성능을 검토하기 위하여 16자유도 전차량 모델에 대한 시뮬레이션이 수행되었다. 시뮬레이션은 MATRIXx/SYSTEMBUILD 소프트웨어 환경하에서 수행되었으며, 제안된 통합제어로직을 적용함으로써 차량의 승차감(ride comfort), 안정성(stability) 및 기동성(manueverability)이 향상됨을 보인다.

II. 차량 동역학 모델

본 논문에서는 대상차량 모델로서 그림 1과 같은 비선형 16자유도 차량모델을 사용하였다. 비선형 16자유도 차량모델은 회전과 병진운동의 6자유도를 갖는 스프링상 질량부(sprung mass)와 2개의 현가장치 변위, 전륜 바퀴 2개의 조향 및 회전(spin)운동 등 6개의 자유도를 갖는 전륜 스프링하 질량부(front unsprung mass), 그리고 현가장치 변위 2개와 후륜 바퀴 2개의 회전운동 등 4개의 자유도를 갖는 후륜 스프링하 질량부(rear unsprung mass)로 구성되어 있다. 또한 전·후륜 조향운동은 각각 타이로드(tie rod)에 의하여 구속되어 있다. 이와 같은 차량모델은 운전자 조작 명령부, 외부 환경 입력부, 차량 기구학부, 차량 운동 역학부 등으로 나누어 모델링이 이루어졌다^{[3][14]}.

III. 능동형 사시시스템

1. 능동현가시스템

능동현가시스템은 전자제어장치에 의해 계산된 제어력을 차체와 차축사이에 장착된 액추에이터를 통해 발생시켜, 현가시스템을 능동적으로 제어한다. 승차감과 안정성 향상이라는 상충된 설계목표를 최대로 만족시키기 위해 많은 연구가 진행되고 있으며, 경제성과 목표성능을 고려하여 솔레노이드형 압력제어밸브를 채택한 유공압식 능동현가시스템^[5]을 대상으로 모델을 개발하고, 제어로직을 설계하였다.

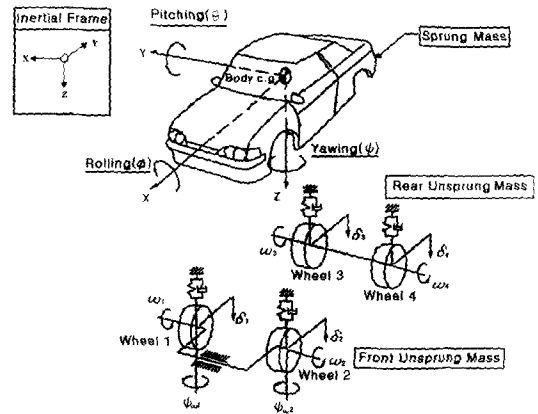


그림 1. 16자유도 차량 동역학 모델

Fig. 1. 16 degree-of-freedom vehicle dynamics model.

현가장치의 작동기 역할을 하는 유압 액추에이터는 단동형 실린더를 사용하며 차체중량과 스프링힘 및 유압력이 합해진 반력과의 평형으로 원하는 위치로 조절할 수 있고, 피스톤 감쇠밸브를 통해 외부충격을 감소시킨다. 서브어큐뮬레이터는 액추에이터와 병렬로 연결되어 완충기 역할을 하며, 압력제어밸브는 경제성과 고응답성이 요구되는데, 솔레노이드와 스톱밸브가 결합된 형태가 실용화되어 사용되고 있다^[6].

유압시스템이 장착된 차량을 능동적으로 제어하기 위해서는 압력제어밸브내의 솔레노이드 밸브에 전류를 가하여 압력챔버내의 유량을 조절할 수 있도록 해야 한다. 제어기는 노면하중에 대해 유압시스템이 가변감쇠력을 발생시키도록 하기 때문에 능동현가시스템의 성능을 결정하는 중요한 부분으로서 1/4차량모델에 대해 Sky-hook제어기와 PID제어기를 설계하였다. Sky-hook 제어기법은 스프링질량의 수직방향 절대속도를 제한(feedback)시켜 솔레노이드밸브에 가해지는 입력전압을 결정하는데, 이 방법은 승차감과 자세를 동시에 제어할 수 있으며 필요한 센서의 수를 줄일 수 있고 제어효과도 뛰어난 특징을 가지고 있다. 본 논문에서는 압력제어밸브의 동특성을 무시하고 다음과 같은 스프링질량의 속도에 대한 제한이득(feedback gain)을 결정하였다.

$$K_{dy} = 30 \quad (1)$$

한편, PID제어기법에서는 스프링질량의 변위를 제한하여 솔레노이드밸브에 가해지는 입력전류를 구한다.

PID제어기에 대한 표현식은 다음과 같으며, 반복적인 검증과정을 거쳐 PID제어기의 각 게인값을 다음과 같이 결정하였다.

$$I(s) = (K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s) Z_s(s) \quad (2)$$

$$K_p = 1 \quad K_I = 10 \quad K_D = 29 \quad (3)$$

2. 4륜조향시스템

4륜조향시스템은 차량의 중심선과 회전경로의 사이가이 최소화되도록 후륜의 조향각을 조정하는 것으로써 전·후륜 조향각의 크기와 위상이 속도에 따라 적절히 변화되도록 한다. 고속 커브주행시에 조향핸들 조작에 의해 전륜에서 발생하는 횡측력이 동시에 후륜에서도 발생되도록 후륜의 조향각을 제어함으로써 차량 무게중심에서의 횡 슬립각(sideslip angle)을 줄일 수 있게 되며, 저속 커브주행시 또는 주차시에는 후륜의 조향각을 전륜과 반대방향으로 조정하여 회전반경을 줄임으로써 능동적 안전도(active safety) 및 기동성을 향상시킬 수가 있다.

차량의 조향에 대한 특징은 Half car model 에 의해 나타낼 수 있는데 이것은 차량의 전·후 양쪽 바퀴들이 각각 하나로 뭉쳐져 무게중심을 지나는 종축(longitudinal axis)에 하나씩 존재하는 것으로 간주함으로써, 요(yaw)와 횡측 운동(lateral motion)만을 고려하고 롤(roll)과 종축역학적 측면은 무시한 것이며 이러한 단순모델에 기초하여 4륜조향 제어시스템을 설계할 수 있다^[7].

4륜조향시스템은 크게 순방향(feedforward) 제어와 궤환(feedback) 제어시스템으로 나눌 수 있는데 핸들 조향에 의해서만 후륜이 조향되는 순방향 제어시스템은 제어기 설계가 간단하지만 외란의 존재시에는 차량 신호에 따라 후륜이 자동적으로 적절히 조향되는 궤환 제어시스템이 효과적이다. 본 논문에서는 궤환제어형 4륜조향시스템으로서 차량의 요 속도를 궤환시켜 후륜 조향각을 제어하는 방법을 사용하였으며, 시스템의 구성은 그림 2와 같다.

여기서 후륜조향각을 결정하는 $F_r(s, v)$ 은

$$F_r(s, v) = K(v) \frac{1 + T_D(v)s}{1 + T_1(v)s} \quad (4)$$

이며, $K(v)$, $T_D(v)$ 및 $T_1(v)$ 는 차량모델의 파라미터를 이용하여 결정된다^[8]. 이때 이득 $K(v)$ 는 속도

의 함수로서 저속에서는 음의 값으로 후륜을 전륜과 반대방향으로 조향시켜 회전반경을 줄이는 등 조종성을 향상시키고, 고속에서는 양의 값으로 후륜을 전륜과 같은 방향으로 조향시킴으로써 차량 안정성을 향상시키는 역할을 수행한다. 그리고 후륜의 기준 조향각은 차량 무게중심에서의 원하는 횡슬립각 $\beta = 0$ 을 이용하고 $l_f \approx l_r$ 을 가정하면 다음과 같이 앞바퀴 조향각과 차량 요속도(yaw rate)의 함수로 표시할 수 있다^[9].

$$\delta_r = -\delta_f + \frac{m}{l} \left(\frac{l_f}{C_f} + \frac{l_r}{C_r} \right) v r \quad (5)$$

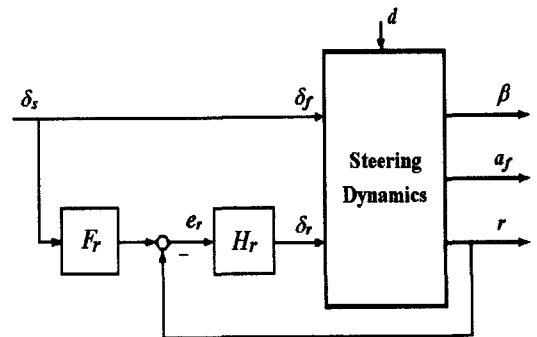


그림 2. 요속도 궤환형 4륜조향시스템
Fig. 2. Yaw rate feedback four-wheel steering system.

IV. 통합 샤시 제어기 설계

1. 통합제어로직(Integrated Control Logic)

샤시의 각 방향운동은 서로 밀접하게 연계되어 있기 때문에 독립적으로 개발된 제어시스템들은 서로 간섭을 일으킬 수 있다. 따라서 시스템들의 단순결합으로는 최적의 성능을 보장할 수 없으므로 독립적으로 개발된 각 샤시 제어시스템의 기본구조는 그대로 유지하면서 차량의 주행상태에 따라 주된 제어기를 선정하는 통합제어로직이 필요하다.

통합제어로직에서는 차량의 주행상황을 판단하고 각 상황에 따라서 주된 임의의 제어기를 선정한다. 먼저 센서들을 통해 들어온 주행정보를 이용하여 현재의 주행상태를 파악할 수 있는데, 예를 들어 차량이 범프를 통과할 때에는 수직축(vertical) 성분이 비선형적으로 빠르게 변하며, 차선변경시에는 수직축 성분의 변화가 작은 반면에 횡측(lateral) 성분이 상대적으로 증가한

다. 그리고 코너링시에는 무게중심 이동에 따라 전후륜의 미끄러짐이 크게 생기는데 이러한 특징에 대한 기준값을 정하여 각 기준에 따라 주행상황을 판단할 수 있다.

본 논문에서는 이러한 통합제어로직에 바탕을 둔 하이브리드 퍼지논리 제어기를 사용하였으며 승차감제어를 위해 외부외란에 강인한 성능을 보이는 퍼지논리 제어기, 자세제어를 위한 요속도 기준형 Sky-hook 제어기, 그리고 급격한 코너링시 오버스티어, 언더스티어를 방지하는 물 모멘트 분포제어기로 구성되어 있다. 이러한 통합제어 방법은 차량의 동특성에 가장 중요한 역할을 하는 현가시스템의 제어를 위주로 하여 수직축과 횡축의 특성을 동시에 향상시키고자 하는 것이며, 이와같은 통합제어로직을 사용하는 통합 샤시제어시스템의 구성을 그림 3에 나타내었다.

2. 퍼지논리 제어기(Fuzzy Logic Controller)

능동현가시스템에 포함되어 있는 유압시스템들은 비선형성을 많이 포함하고 있고 시간에 따라 특성이 민감하게 변화하기 때문에 미리 결정된 제어법칙으로는 제한된 성능밖에 기대할 수 없다. 그러므로 수학적 모델링에 대한 의존성이 적고 동작조건의 변화에 대처할 수 있는 제어방식이 필요하게 되며, 본 논문에서는 인공지능(artificial intelligence) 분야의 하나인 퍼지논리(fuzzy logic) 이론^{[10] [11]}을 통하여 능동현가시스템의 승차감 제어를 시도한다.

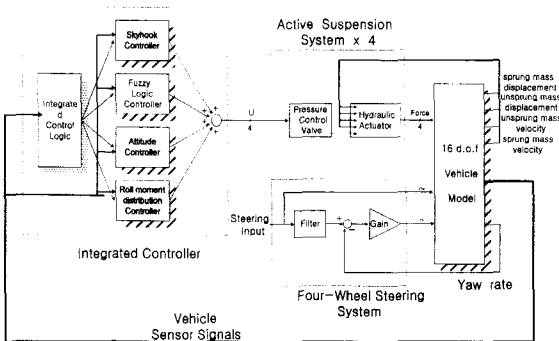


그림 3. 통합제어시스템의 블록 다이어그램
Fig. 3. Block diagram of the integrated control system.

운전자가 느끼는 차량의 승차감은 주로 수직축 방향의 속도와 가속도에 의해 좌우되므로 능동현가시스템의 승차감 제어를 위한 퍼지논리 제어기의 입력변수

e와 Δe 를 각각 차량의 속도(vertical velocity)와 속도의 변화로 하고, 출력변수는 압력제어밸브에 가해지는 입력전압으로 한다.

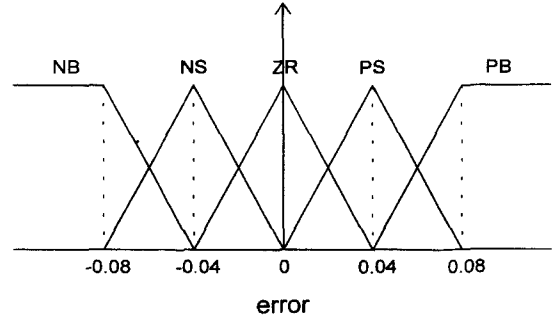


그림 4. 입력 변수 e의 소속함수
Fig. 4. Membership functions of input variable e.

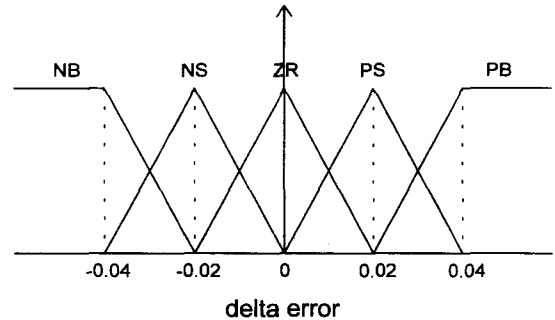


그림 5. 입력 변수 Δe 의 소속함수
Fig. 5. Membership functions of input variable Δe .

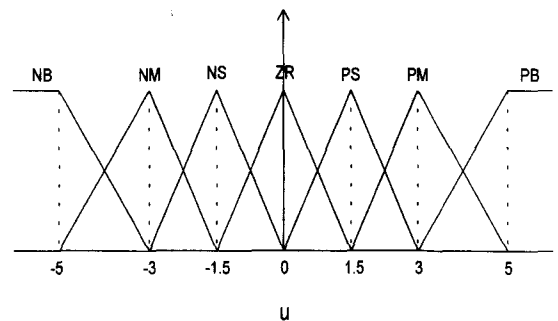


그림 6. 출력 변수 u의 소속함수
Fig. 6. Membership functions of output variable u.

이와같은 입·출력 변수들에 대한 퍼지제어 규칙과 소속함수들을 각각 표 1과 그림 4, 그림 5, 그림 6에 나타내었다. 표 1에서 각각의 규칙들은 "IF <condition> THEN <action>"과 같은 언어형태로 구성되어 있으며(식 (6)), 입력 변수의 소속함수 PB, PS, ZR, NS, NB는 각각 'Positive Big', 'Positive

Small', 'ZeRo', 'Negative Small', 'Negative Big' 을 의미하고, 출력 변수의 소속함수 PB, PM, PS, ZR, NS, NM, NB은 각각 'Positive Big', 'Positive Medium', 'Positive Small', 'ZeRo', 'Negative Small', 'Negative Medium', 'Negative Big'을 나타낸다. 이상과 같은 퍼지제어 규칙과 입·출력 변수들의 소속함수들을 바탕으로 퍼지논리 제어기는 퍼지추론 과정 및 비퍼지화 과정을 거쳐 능동현가시스템에 인가할 입력전압을 만들게 된다. 본 논문에서는 추론 방법으로 Mamdani의 Max-Min 합성법을 이용하였고, 비퍼지화는 무게중심법(center of gravity)을 사용하였다(식 (7))^[12].

$$R^1: \text{If } x_1 \text{ is } A_{11} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{12}, \text{ then } y \text{ is } B_1$$

$$\vdots$$

$$R^n: \text{If } x_1 \text{ is } A_{n1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{n2}, \text{ then } y \text{ is } B_n$$
(6)

$$y^0 = \frac{\int B^0(y) y dy}{\int B^0(y) dy}$$
(7)

표 1. 퍼지 제어 규칙
Table 1. Fuzzy control rules.

| $e \backslash \Delta e$ | NB | NS | ZR | PS | PB |
|-------------------------|----|----|----|----|----|
| PB | NS | NM | NB | NB | NB |
| PS | ZR | NS | NM | NB | NB |
| ZR | PB | PM | ZR | NM | NB |
| NS | PB | PB | PM | PS | ZR |
| NB | PB | PB | PB | PM | PS |

3. 자세제어기(Attitude Controller)

일반적으로 4륜조향시스템을 장착한 차량이 코너링을 할 경우에는 롤각에 큰 변화가 발생하는데, 특히 본 논문에서 승차감 제어 및 바운스(bounce)제어기로 사용한 퍼지논리 제어기는 차량의 수직축 방향 속도와 속도 변화를 입력으로 받기 때문에 상대적으로 속도와 가속도의 수직축 성분이 작은 코너링에서는 퍼지논리 제어기에 의한 능동현가시스템의 동작이 활발히 이루어지지 않아 차량의 롤각에 대한 신속한 제어가 잘 이루어지지 않는 현상이 생긴다. 이와같이 차량의 롤각이 커지게 되면 캠버각(camber angle)의 변화와 롤스티어(roll steer), 그리고 롤 모멘트 분포(roll moment distribution)의 변화를 초래하여 차량의 조종성에도 영향을 미치게 되므로, 롤각을 줄이는 것은 최악의 차량 전복(roll over) 등을 방지하여 안전성

(stability)을 높일 뿐만 아니라 롤에 의해 생기는 캠버각과 롤 스티어에 의한 영향을 방지하여 조종성(handling) 향상에도 기여한다. 따라서 횡측 방향의 제어를 효과적으로 수행하기 위하여 자세제어(attitude control)가 필요하다^[13].

본 논문에서는 요속도를 제어신호로 하는 새로운 Sky-hook제어기를 제안한다. 차량이 과도한 코너링을 할수록 요속도는 증가하게 되고, 이때 요속도의 크기와 롤각의 크기가 서로 비례한다고 가정하면, 다음과 같은 제어식을 생각할 수 있다.

$$u = \dot{Z}_s (K_{static} + K_{dynamic} |r|)$$
(8)

여기서 u 는 압력제어밸브에 가해지는 입력전압이고 \dot{Z}_s 는 스프링상 질량의 수직속도 성분, r 은 요속도를 나타낸다. 그리고 K_{static} 는 Sky-hook제어기의 static gain, $K_{dynamic}$ 은 dynamic gain을 각각 나타낸다.

4. 롤모멘트 분포제어기(Roll moment distribution controller)

차량이 코너링을 할 때 각각의 타이어에 발생하는 회전력(cornering force)은 타이어에 가해지는 하중(load)에 대해 비선형적으로 연관되어 있다. 코너링시 횡측 방향으로의 무게이동(load transfer)이 발생하고 이는 각 차축(front or rear axle)의 전체적인 회전력을 감소시키므로 이와같은 회전력의 감소는 회전을 하기 위해 필요한 횡력(lateral force)을 유지하기 위해 타이어의 횡슬립각(side-slip angle)을 증가시키는 결과를 초래한다. 전륜(front wheel)의 횡슬립각이 커지면 차량은 언더스티어(understeer)현상을 나타내고, 후륜(rear wheel)의 횡슬립각이 커지면 오버스티어(oversteer)가 발생하는데, 이러한 현상은 차량의 조종성을 저하시키며, 특히 오버스티어 현상이 증가하면 안정성에도 심각한 문제가 생길 수 있다^[14]. 따라서 롤 모멘트 분포제어(roll moment distribution control)를 통해 앞축과 뒤축에 능동 롤 모멘트를 적절히 분배하여 인가함으로써 이러한 차량의 언더스티어와 오버스티어 현상을 방지하도록 하는 것이 필요하다^[15]. 실제로 언더스티어 경사도(understeer gradient)^[14]를 이용하여 앞뒤 차축에 적절한 능동 롤 모멘트를 인가하기 위해서는 현재 차량의 스핀(spin) 또는 드리프트(drift) 현상을 감지해야 하는데 실제 언더스티어 경사도를 구성하는 하중과 cornering

stiffness는 측정하기가 어렵기 때문에 본 논문에서는 전·후륜의 횡슬림각을 이용하여 제어하는 방법을 사용하기로 한다. 즉 차량이 주행중에 오버스티어인 경향을 나타낸다면 전륜쪽에 능동 롤 모멘트를 많이 인가하여 앞 축(front axle)에서 발생하는 횡력을 감소시키고, 언더스티어인 경향을 보인다면 후륜쪽에 능동 롤 모멘트를 많이 인가하여 뒤 축(rear axle)에서 발생하는 횡력을 감소시킬 수 있다.

$$\begin{aligned} M_f &= M_{fs} - M \\ M_r &= M_{rs} + M \end{aligned} \quad (9)$$

$$M = -\frac{1}{2} k a_y \Delta a$$

$M_f(M_{fs})$: roll (static) moment of front axle

$M_r(M_{rs})$: roll (static) moment of rear axle

k : roll moment distribution gain

V. 시뮬레이션 및 결과

위와같이 설계된 통합제어로직의 성능평가를 위해 16자유도의 전차량 모델에 대한 시뮬레이션을 수행한다. 세가지의 차량 주행환경을 설정하였는데, 각 상황에서 통합제어기는 현재의 차량 주행환경을 파악하여 적절한 제어를 수행하게 된다. 첫번째는 승차감 제어를 확인하기 위한 범프통과 상황을 설정하였다. 범프는 정편파 형태의 좌우 비대칭 범프를 가정하였으며, 범프의 높이는 각각 0.05m, 0.03m이다. 또한 차량은 100Km/h의 속도로 주행을 시작하여, 약 0.2초후에 범프를 만나게 된다. 두번째의 차량 주행환경은 차선변경(lane change)으로서, 역시 100Km/h의 주행중에 오른쪽으로 3m 차선변경을 한다. 마지막으로 과도한 코너링중에 발생하는 차량의 언더스티어, 오버스티어 현상을 제어함으로써 안정성 및 조종성 향상을 도모하기 위한 J-turn 시뮬레이션을 수행하는데, 차량이 코너링을 하면서 제동을 하는 위급상황을 설정하였다.

이상과 같은 시뮬레이션은 편의상 세가지의 상황으로 구분하여 각각 실행했지만, 통합제어시스템에 의해 현재의 주행상황을 판단하여 제어하므로, 이 과정들이 연속적으로 발생하는 경우에 대한 시뮬레이션 결과로 고려할 수 있다.

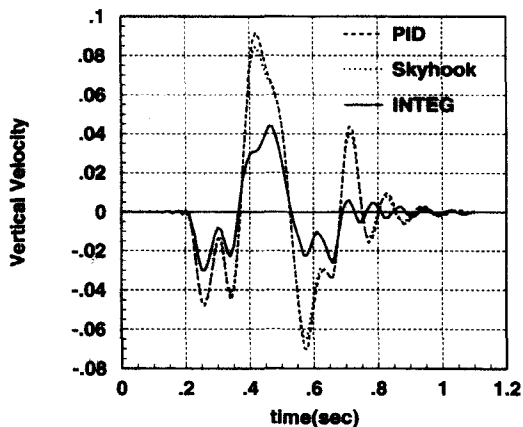
1. 승차감 제어 결과

차량이 범프통과를 할 때 승차감에 영향을 미치는

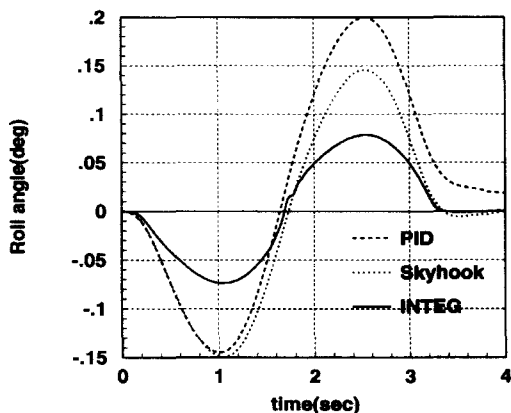
요소는 수직축 방향의 속도와 가속도 성분이므로 승차감 향상을 위해서는 이 성분들의 크기가 작아지도록 제어를 해야 한다. 좌우 비대칭 범프의 상황에서 이미 구축된 통합제어로직에 의해 차량은 스스로 현재 주행 상황을 판단하여 적절한 제어를 수행한다. 범프통과의 경우 수직축 방향의 속도와 속도 변화분을 입력으로 하는 퍼지논리 제어기가 동작하며 시뮬레이션 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림 7(a)와 7(b)는 차량 무게 중심에서의 수직축 방향 속도와 가속도를 나타내며, 'PID'와 'Skyhook'은 각각 PID 제어기와 Sky-hook 제어기를 사용한 능동현가시스템을 장착한 차량의 결과를 보이고, 'INTEG'는 통합제어로직에 의해 구축된 통합제어시스템의 결과를 나타낸다. 그림에서 보면 통합제어로직에 의해 제어하는 경우 PID 제어기 또는 Sky-hook 제어기를 사용한 경우보다 속도와 가속도 성분이 현저히 감소하여 승차감 향상에 크게 기여하였다. 이와같이 노면의 불규칙한 형상을 외부 외란이라고 생각할 때, 고정된 제어 파라미터를 갖는 기존의 제어기보다 퍼지 제어기가 동작하는 통합제어시스템이 훨씬 더 견실한 제어성능을 발휘한다.

2. 자세제어 결과

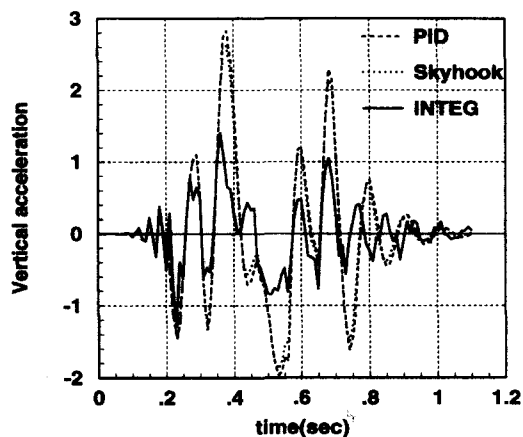
차량이 3m 차선변경을 하는 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 그림 8, 그림 9 및 그림 10에 나타내었다. 그림 8은 능동현가시스템과 2륜조향시스템을 장착한 차량의 성능을 보이는데, (a)에서 횡변위(lateral displacement)는 거의 비슷하지만, 수동현가시스템을 장착한 차량의 경우에 정상상태 수렴시간이 더 빠르게 나타났다. 이것은 능동현가시스템의 자세제어가 차량의 조종성을 저하시켰기 때문이며 이러한 조종성의 저하 현상을 극복하기 위해 4륜조향시스템의 도입이 필요하다. 롤각(roll angle)의 경우도 통합제어시스템에서 현저히 줄어들어 운전자가 느끼는 승차감 및 안정성이 향상되었다. 그러나 그림 (c)에서의 롤각속도(roll angular velocity)의 경우 차선변경중에는 감소하여 성능향상이 이루어졌으나 정상상태에 도달하면서 약간의 오실레이션이 발생하였다. 이것은 퍼지논리 제어기가 정상상태 부근에서 채터링(chattering) 현상을 발생시키기 때문이며, 이에대한 보완책으로 차후 적응(adaptive) 퍼지논리 제어기 등 [16]의 적용이 필요하다고 생각된다.



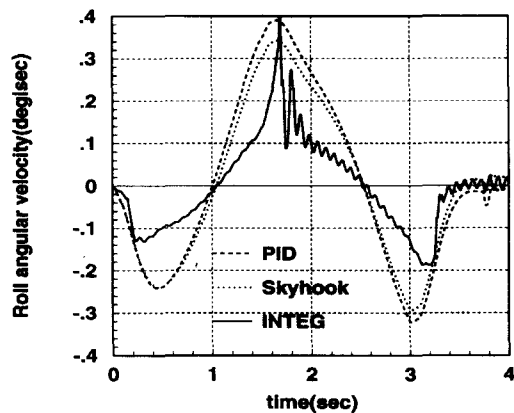
(a) 수직방향 속도
(a) Vertical velocity



(b) 롤각
(b) Roll angle



(b) 수직방향 가속도
(b) Vertical acceleration.

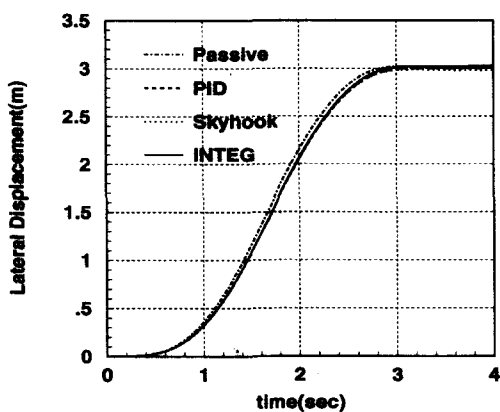


(c) 롤 각속도
(c) Roll angular velocity

그림 7. 승차감 제어에 대한 시뮬레이션 결과
Fig. 7. Simulation results of ride comfort control.

그림 8. 자세제어에 대한 시뮬레이션 결과 - 2륜조향 시스템

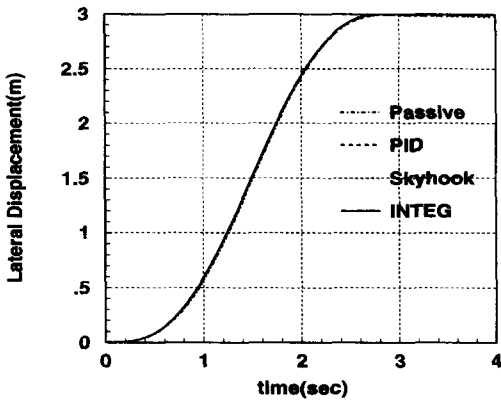
Fig. 8. Simulation results of attitude control - 2WSS.



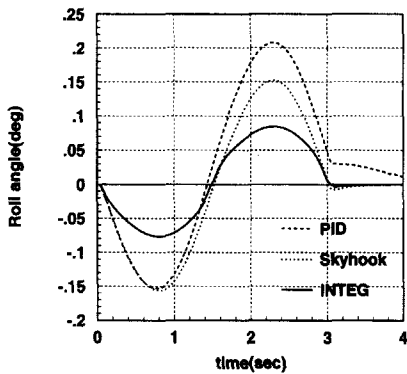
(a) 횡변위
(a) Lateral displacement

한편 자세제어없이 2륜조향을 4륜조향으로 대체시키면, 롤각이 훨씬 크게 변하는 결과를 확인할 수 있었다. 따라서 4륜 조향 시스템을 적용하는 경우에는 자세제어가 더욱 요구됨을 알 수 있으며 이 경우에 대한 결과를 그림 9에 나타내었다. 그림 8(a) 및 그림 9(a)로부터 4륜조향을 이용한 통합제어시 횡변위의 정상상태 도달시간이 감소하여 2륜조향시스템을 장착했을 경우보다 조종성이 향상되었음을 볼 수 있는데 이것은 그림 10에 나타낸 바와 같이 횡슬립각 감소로 인한 결과로 생각할 수 있다. 결과적으로 그림 8(b) 및 그림 9(b)에서 보면, 롤각은 거의 유사하게 유지되면서 횡슬립각 및 횡변위 도달시간이 감소하였으므로

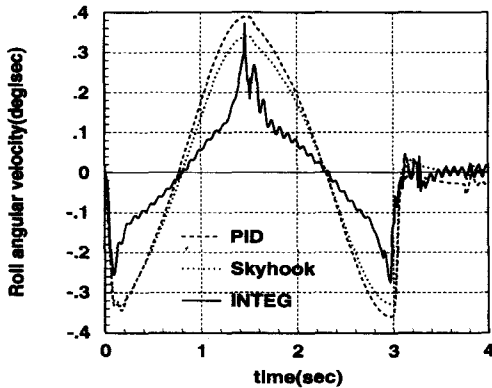
통합제어로직에 의한 자세제어가 효과적임을 확인할 수 있었다.



(a) 횡변위
(a) Lateral displacement



(b) 롤각
(b) Roll angle



(c) 롤 각속도
(c) Roll angular velocity

그림 9. 자세제어에 대한 시뮬레이션 결과 - 4륜조향 시스템

Fig. 9. Simulation results of attitude control - 4WSS.

이와같은 자세제어 결과를 통합제어의 개념으로 분석해보면, 4륜조향시스템의 적용으로 인한 차량의 롤 증가를 능동현가시스템의 자세제어로 보완했으며, 자세 제어로 발생할 수 있는 롤 스티어(roll steer)의 감소에 의해 조종성이 저하되는 현상은 4륜조향시스템의 도입으로 인한 횡슬립각의 감소로 개선시킬 수 있었다. 이와같이 각 시스템들을 상호보완적으로 통합하여 제어함으로써 전체적인 차량 성능을 향상시킬 수 있으며, 또한 능동적 안전도(active safety)를 얻을 수 있다.

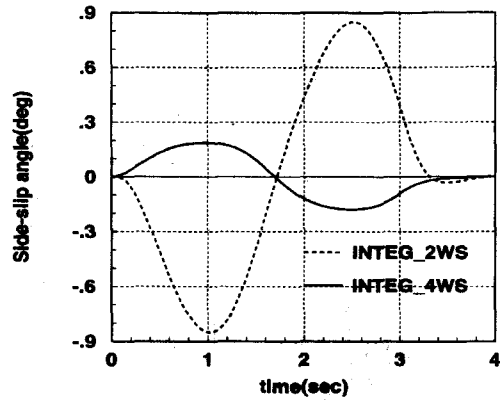
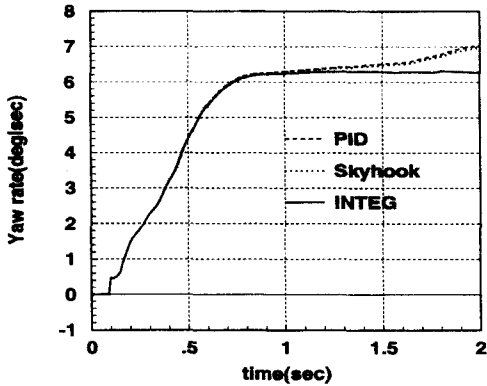


그림 10. 통합제어시 2륜조향시스템과 4륜조향시스템의 횡슬립각

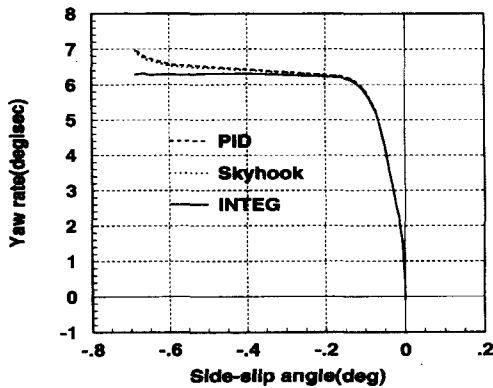
Fig. 10. Side-slip angles when 2WSS and 4WSS are used.

3. 롤 모멘트 분포 제어 결과

차량이 급격한 코너링을 하면서 제동을 하는 위급 상황의 경우에는 뒤 차축의 하중감소로 인하여 회전력이 작아지기 때문에 차량은 오버스티어 현상을 나타내게 된다. 이것은 차량의 안정성 및 조종성을 저하시키는 요인이 되므로, 롤 모멘트 분포 제어를 사용하여 이러한 오버스티어 현상을 감소시킬 수 있다. 롤 모멘트 분포 제어에 의한 제어결과를 그림 11에 나타내었다. 일반적인 PID 제어기나 Sky-hook 제어기를 사용하였을 때에는 요속도가 계속적으로 증가하여 차량이 오버스티어현상을 나타냄을 볼 수 있으나, 통합제어로직에 의한 제어의 경우에는 요속도의 증가를 앞, 뒤축의 적절한 롤 모멘트 분배로 감소시킬 수 있었다. 이와같은 롤 모멘트 분포 제어에 의해 차량의 안정성이 향상되었다.



(a) 요속도
(a) Yaw rate



(b) 횡슬립각과 요속도의 위상 그림
(b) Phase plot of Sideslip angle and Yaw rate

그림 11. 롤 모멘트 분포 제어에 대한 시뮬레이션 결과
Fig. 11. Simulation results of roll mement distribution control.

VI. 결론

본 논문에서는 능동현가시스템과 4륵조향시스템을 장착한 비선형 16자유도 차량모델을 적용대상으로 하여 하이브리드 퍼지논리 제어를 이용한 통합제어시스템의 제어조직을 개발하였고, 제안된 통합제어조직에 의해 차량의 승차감, 안정성 및 주행성능이 향상되는 것을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 차량의 동특성을 최대한 향상시키고자 하는 것이 통합제어의 목적으로서, 본 논문에서 제안한 하이브리드 퍼지논리 제어기는 차량의 현재 주행상황을 판단하여 퍼지논리 제어기 또는 요속도 기준형 Sky-hook 제어기, 그리고 롤 모멘트 분포 제어기에 의한 능동현가시스템의 제어를 통해 수직축과 횡축의 응답 특성을 동시에 개선시켰다.

차량이 범프를 통과할 경우에는 퍼지논리 제어기에 의해 수직 속도 및 가속도가 감소하여 운전자가 느끼는 승차감이 향상되었고, 차선변경에서는 요속도 기준형 Sky-hook 제어기의 작용으로 인해 롤각이 감소함으로써 차량의 안정성이 향상되었다. 또한 통합제어시스템에 4륵조향시스템을 도입함으로써 횡슬립각을 줄일 수 있었으며 정상상태 도달시간을 감소시켜 조종성을 향상시켰다. 그리고 차량이 급격한 코너링을 하면서 제동하는 위급상황에서는 앞, 뒤 차축의 롤 모멘트 조정을 통해 차량의 오버스티어 현상을 방지하였다. 이와같이 기존의 수동형 사시시스템이 갖고 있는 성능 향상 한계를 시스템의 능동제어 및 통합제어로 극복하여 차량의 주행상황에 따라 각 시스템을 상호보완적으로 통합 제어함으로써 전체적인 차량 성능을 향상시킬 수 있으며, 궁극적으로 능동적 안전도를 얻을 수 있었다. 앞으로 시스템들간의 상호간섭작용 상쇄에 대한 추가적인 연구와 더 많은 부시스템(subsystem)들의 효과적인 통합에 대한 연구가 계속적으로 수행되어야 하겠다.

※ 본 연구는 'G7 차세대 자동차 안전도 공통기반 기술개발'의 세부과제로서 산업자원부 및 과학기술부의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] H. Tanaka, H. Inoue, and H. Iwata, "Development of a vehicle integrated control system", in *Proc. IMechE* 25049, pp.63-74, 1992.
- [2] K. Fujita, K. Ohashi, Y. Inoue and K. Ise, "Development of automotive integrated control system", *EAEC VTST*, pp.201-225, 1993.
- [3] *Real-Time Seventeen-Degree-of-Freedom Motor Vehicle Simulation*, ADI Application Report, 1990.
- [4] 사시시스템 종합설계 및 해석 S/W 개발에 관한 연구, 1단계 보고서, 1996
- [5] M. Satoh, et. al., "An Active Suspension Employing an Electrohydraulic Pressure Control System," *29th IEEE CDC*, pp.2226-2231, 1990.
- [6] G7 차세대 자동차 안전도 공통기반 기술개발(사

시 시스템 종합설계 및 해석 소프트웨어 개발), 1차년도 중간 보고서, 1994

[7] J. Ackermann and W. Sienel, "Robust yaw damping of cars with front and rear wheel steering", *IEEE Transaction on Control System Technology*, Vol. 1, No. 1, 1993.

[8] N. Matsumoto and M. Tomizuka, "Vehicle lateral velocity and yaw rate control with two independent control inputs", *ACC*, 1990.

[9] H. Sato, A. Hirota, H. Yanagisawa, B. Fukushima, "Dynamic Characteristics of a whole wheel steering vehicle with yaw velocity feedback rear wheel steering", in *Proc. IMechE* 925049.

[10] C. C. Lee, "Fuzzy Logic in Control System : Fuzzy Logic in Controller Part I," *IEEE Trans. on System, Man and Cyber.*, Vol. 20, pp.404-418, 1990.

[11] C. C. Lee, "Fuzzy Logic in Control System : Fuzzy Logic in Controller Part II," *IEEE Trans. on System, Man and Cyber.*, Vol. 20, pp.419-435, 1990.

[12] M. Sugeno, *Industrial applications of fuzzy control*, North-Holland, 1992.

[13] R. K. Jurgen, *Automotive Electronics Handbook*, McGraw-Hill, 1994.

[14] T. D. Gillespie, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, SAE, 1992.

[15] S. M. Hwang, Y. G. Park, "Active Roll Control and Roll Distribution Control for Ground Vehicle," *AVEC*, 9438493, pp 337-342, 1994.

[16] LI-XIN WANG, *Adaptive Fuzzy Systems and Control : Design and Stability Analysis*, Prentice-Hall, 1994.

저 자 소 개



李愼遠(正會員)
1995년 2월 국민대학교 전자공학과 졸업. 1997년 2월 국민대학교 대학원 졸업(공학석사). 1997년 2월 - 현재 현대자동차(주) 기술연구소 연구원. 관심분야는 사시통합제어 로직 및 구현, 퍼지 로직 제어 및 자동차

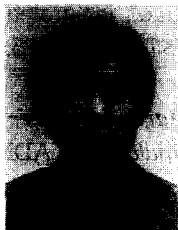
전자제어 시스템

安 台 煥(正會員)

1996년 2월 국민대학교 전자공학과 졸업. 1998년 2월 국민대학교 대학원 졸업(공학석사). 관심분야는 사시통합제어 로직 및 구현, 드라이빙 시뮬레이터, 퍼지 로직 제어 및 인공 신경망 제어

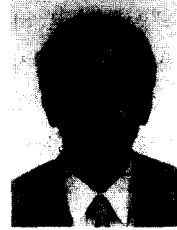
安 鉉 植(正會員) 第 34卷 S編 第 7號 參照

金 道 鉉(正會員) 第 34卷 S編 第 7號 參照



李 雲 成(正會員)
1978년 서울대학교 기계설계학과 졸업 (공학사). 1983년 Univ. of Iowa 기계공학과 졸업 (공학석사). 1987년 Univ. of Iowa 기계공학과 졸업 (공학박사). 1989~1992 Univ. of Missouri 기계항공공학과 조교수, 1992~현재 국민대학교 기계자동차공학부 부교수. 관심분야는 차량 시뮬레이터 및 차량 통합제어시스템

관심분야는 차량 시뮬레이터 및 차량 통합제어시스템



金 尙 燮(正會員)

1973년 서울대학교 기계공학과 졸업 (공학사), 1975년 서울대학교 대학원 졸업(공학석사), 1985년 University of Iowa 기계공학과 졸업 (공학박사). 1976-1986 울산대학교 기계공학과 전임강사/조교수, 1985-1988

General Motors Research Lab. 선임연구원, 1988-1992 University of Iowa 기계공학과 조교수, 1992-현재 국민대학교 부교수/교수