

〈논 문〉 SAE NO. 97370051

# 비선형 타이어모형을 이용한 완전능동형 4WS 제어방법에 관한 연구

## A Study on the Full Active 4WS Control Method Using Nonlinear Tire Model

김 형 내\*, 김 석 일\*\*, 김 동 룡\*\*\*, 김 건 상\*\*\*  
H. N. Kim, S. I. Kim, D. R. Kim, K. S. Kim

### ABSTRACT

The understeer characteristics of four wheel steering system(4WS system) in a high speed region have a negative effect upon the yaw velocity, leading to a decrease in the handling ability of vehicle. As a result, even if the side slip angle of vehicle can be kept up a minimum, a driver must compensate a decrease in yaw velocity by increasing the steering wheel angle in order to track the desired vehicle path. In this study, to keep the side slip angle of vehicle at zero and achieve a suitable yaw velocity in vehicle motion, a full active 4WS system(FA 4WS system) with actively steerable front and rear wheels is presented based on a nonlinear vehicle model and a model following control of yaw velocity. And the analysis results show the fact that, besides the excellent stability of vehicle, the FA 4WS system is able to realize better handling performance of vehicle than the previous 4WS systems in the high speed region.

주요기술용어 : FA 4WS System(Full Active 4WS System, 완전능동형 4WS 시스템), Nonlinear Vehicle Model(비선형 자동차모델), Nonlinear Tire Model(비선형 타이어모형), Model Following Control(모델추종제어), Understeer Characteristics(언더조향특성)

### 1. 서 론

지금까지 여러가지 형태의 4WS(Four Wheel Steering) 시스템들이 고속주행시의 안정성과 저

속주행시의 조종성을 향상시킬 목적으로 개발되었고, 그 성과도 괄목할 만한 것이었다.<sup>1)</sup> 그러나 후륜조향각만을 능동제어하는 4WS 시스템들은 자동차의 주행속도가 빨라질수록 언더조향특성(Understeer Characteristics)이 극심하게 나타나는 단점을 보여주었다. 최근 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법의 하나로써 후륜조향각과 함께 전륜조향각을 능동제어하는 방법들이 많이 연

\* 한국항공대학교 기계설계학과 대학원

\*\* 정회원, 한국항공대학교 기계설계학과

\*\*\* 기이기술센터 차량연구실

구되고 있는데, 모델추종제어(Model Following Control) 기법에 토대를 둔 자동차의 횡미끄럼각(Side Slip Angle)과 요우속도(Yaw Velocity)의 피드포워드(Feedforward)/피드백(Feedback) 제어<sup>2,3)</sup>, 주행속도와 관계없이 일정한 조향특성을 얻기 위한 자동차의 요우속도의 피드백 제어<sup>4)</sup>, 최적제어 기법에 토대를 둔 자동차의 횡미끄럼각과 요우속도의 피드백제어<sup>5)</sup>, 전륜의 횡가속도와 자동차의 요우속도의 피드백제어<sup>6)</sup>등을 통해서 전륜조향각과 후륜조향각을 결정하는 연구들이 그 대표적인 예들이다. 또한 좌·우측 타이어의 구동 토크(Driving Torque)를 능동제어하는 DYC(Direct Yaw Moment Control) 시스템과 후륜조향각을 능동제어하는 4WS 시스템을 통합제어하는 방법을 통하여 4WS 자동차의 언더조향특성을 개선한 연구결과<sup>7)</sup>도 보고되었다.

특히 자동차는 고속으로 도로를 주행한다는 점 때문에 자동차의 안전도는 운전자의 생명과 직결되어 있다. 따라서 긴급 주행상황에서의 자동차의 주행특성을 보다 정확하게 예측하기 위해서는 타이어의 비선형성을 고려한 자동차모델이 필요하다. 이러한 관점에서 수행한 4WS 시스템과 관련된 연구들로는 선형 자동차모델에 토대를 두고 타이어의 비선형성을 신경회로망(Neural Network) 기법으로 고려한 연구,<sup>8,9)</sup> 그리고 비선형 타이어모델로부터 정의한 비선형 타이어의 코너링강성(Cornering Stiffness)을 이용하여 비선형 자동차모델과 비선형 4WS 제어방법을 도출한 연구<sup>10)</sup>등이 있다.

본 연구에서는 과도상태에서도 자동차의 횡미끄럼각을 0으로 유지하면서, 동시에 4WS 자동차가 곡선도로를 고속주행할 때 나타나는 언더조향특성을 개선하기 위한 방법으로서 전륜조향각과 후륜조향각을 모두 능동제어하는 형태의 FA 4WS(Full Active 4WS, 완전능동형 4WS) 제어방법을 제안하였다. 특히 극한 주행상태에서도 자동차의 동적 거동을 효과적으로 해석하기 위해서는 비선형 타이어모형을 사용하였으며, 모델추종제어 기법에 토대로 둔 요우속도의 피드백제어를 통해서 FA 4WS 시스템의 전륜 조향각을 결정하였다. 그리고 본 연구에서 제안한 FA 4WS

시스템의 유용성은 비선형 자동차모델을 이용한 2WS 자동차, 4WS 자동차 및 FA 4WS 자동차의 스텝(Step) 응답특성과 정현파(Sinusoidal) 응답특성에 대한 해석결과들을 통해서 확인하였다.

## 2. FA 4WS 자동차의 동역학 모델

### 2.1 비선형 자동차모델

#### (Nonlinear Vehicle Model)

자동차는 타이어와 노면 사이에서 발생하는 타이어의 횡력(Lateral Force)에 의하여 선회운동을 하게 된다. 따라서 자동차의 선회운동에 대한 동역학적 해석 및 제어를 수행하기 위해서는 실제 타이어의 특성을 잘 반영할 수 있는 수학적 모델이 필요하다. 일반적으로 자동차의 횡가속도가 약  $4m/s^2$  이하인 경우에는 타이어의 횡력과 미끄럼각(Slip Angle)의 관계가 거의 선형적으로 주어지지만, 횡가속도가 그 이상인 경우에는 타이어의 특성이 비선형적인 형태를 갖는 것으로 알려져 있다.<sup>9)</sup> 따라서 타이어의 횡력과 미끄럼각의 관계가 선형적으로 주어지는 선형 타이어모형을 사용하는 경우에는 극한적인 주행상태에서의 자동차의 동적 거동을 정확하게 예측할 수 없게 된다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해서 비선형 타이어모형을 토대로 한 비선형 자동차모델을 이용하였다. Fig.1과 Table 1은 각각 본 연구에서 사용한 자동차의 동역학 모델과 모델 매개변수들을 보여주고 있다.

Fig.1과 같이 주어지는 FA 4WS 자동차에 대한 동역학 모델로부터 전륜타이어와 후륜타이어의 미끄럼각  $\alpha_f$ 와  $\alpha_r$ 을 유도하면, FA 4WS 시스템에 의해서 능동제어되는 전륜조향각과 후륜조향각  $\delta_{r_c}$ 와  $\delta_r$ , 자동차의 무게중심에서의 횡속도와 요우속도  $v$ 와  $\gamma$ , 자동차의 무게중심에서 전륜까지의 거리와 후륜까지의 거리  $a$ 와  $b$ , 그리고 자동차의 주행속도  $u$ 에 의해서 아래와 같이 표시할 수 있다.

$$\alpha_f = \delta_{r_c} - \tan^{-1}\left(\frac{v + ra}{u}\right) \quad (1)$$

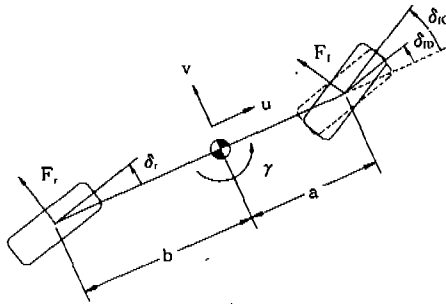


Fig.1 Model of FA 4WS Vehicle

Table 1 Parameters of Vehicle Model

$m$	1,300kg	$I_r$	1,627kg·m <sup>2</sup>
$a$	1.00m	$b$	1.45m

$$\alpha_r = \delta_r - \tan^{-1}\left(\frac{v - rb}{u}\right) \quad (2)$$

또한 타이어의 횡력과 미끄럼각이 비선형적인 관계를 갖는 비선형 타이어모델의 경우에는 전륜 타이어와 후륜타이어의 횡력  $F_f$ 와  $F_r$ 이 식 (1)과 (2)로 주어지는 각각의 미끄럼각  $\alpha_f$ 와  $\alpha_r$ 에 대해서 다음과 같은 관계를 갖는다.<sup>10)</sup>

$$F_f = C_f(\alpha_f) \cdot \alpha_f \quad (3)$$

$$F_r = C_r(\alpha_r) \cdot \alpha_r \quad (4)$$

여기서  $C_f(\alpha_f)$ 와  $C_r(\alpha_r)$ 은 전륜타이어와 후륜타이어의 비선형 코너링강성들을 의미한다.

특히 본 연구에서는 비선형 타이어의 횡력  $F$ 와 미끄럼각  $\alpha$ 의 비로 주어지는 비선형 코너링강성  $C(\alpha)$ 를 결정하기 위해서 매직포물러(Magic Formula) 타이어모델을 사용하였는데, 그 일반적인 형태는 식 (5)에 제시하였다.<sup>10)</sup>

$$C(\alpha) = \frac{P}{\alpha} \cdot \sin\{G \tan^{-1}\{K\alpha - R(K\alpha - \tan^{-1}(K\alpha))\}\} \quad \text{if } \alpha \neq 0 \quad (5)$$

$$= KGP \quad \text{otherwise}$$

Table 2 Parameters of Magic Formula Tire Model

	$K$	$G$	$P$ (kN)	$R$	$KGP$ (kN/deg)
Front Tire	0.15	1.3	5.826	1.5	1.136
Rear Tire	0.15	1.3	4.841	1.5	0.944

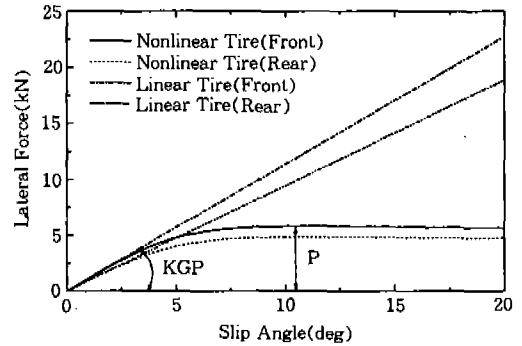


Fig.2 Linear and Nonlinear Tire Models

여기서 매직포물러 타이어모델의 매개변수인  $P$ 는 절정인자(Peak Factor),  $G$ 는 형상인자(Shape Factor),  $K$ 는 강성인자(Stiffness Factor),  $R$ 은 곡률인자(Curvature Factor), 그리고 세 인자들의 곱  $KGP$ 는 선형영역에서의 코너링강성(선형 타이어모델의 코너링강성)을 의미한다. 또한 Table 2에는 본 연구에서 사용한 매직포물러 타이어모델의 매개변수들을 제시하였으며, Fig.2는 그 매개변수들을 이용해서 얻은 비선형 타이어모델의 횡력과 미끄럼각의 관계를 선형 타이어모델과 비교해서 보여주고 있다.

결과적으로 Fig.1과 같이 주어지는 FA 4WS 자동차의 동역학 모델로부터 횡력과 요우모멘트에 대한 평형조건들을 도출하면, 다음과 같은 2개의 비선형 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$m(\dot{v} + u \cdot \gamma) = C_f(\alpha_f) \cdot \alpha_f \cdot \cos \delta_r + C_r(\alpha_r) \cdot \alpha_r \cdot \cos \delta_f \quad (6)$$

$$I_z \cdot \dot{\gamma} = a \cdot C_f(\alpha_f) \cdot \alpha_f \cdot \cos \delta_r - b \cdot C_r(\alpha_r) \cdot \alpha_r \cdot \cos \delta_f \quad (7)$$

여기서  $m$ 과  $I_y$ 는 자동차의 질량과 요우관성모멘트(Yaw Inertia of Moment),  $\dot{v}$ 와  $\dot{\gamma}$ 는 자동차의 무게중심에서의 횡기속도와 요우가속도를 의미한다.

## 2.2 FA 4WS 시스템 (Full Active 4WS System)

FA 4WS 자동차에 대한 비선형 운동방정식들인 식 (6)과 (7)은 궁극적으로 2개의 제어변수(전륜조향각과 후륜조향각)에 대해서 2개의 상태변수(횡속도와 요우속도)의 관계를 나타낸 것으로 생각할 수 있다. 그리고 이러한 개념에서 보면, 자동차의 횡미끄럼각을 0으로 유지시키면서 원하는 요우속도를 구현할 수 있는 전륜조향각과 후륜조향각을 독립적으로 결정하는 것이 가능하다.

선형 4WS 시스템으로 비선형적인 특성을 갖는 실제 자동차를 제어하면, 타이어의 선형성이 유지되는 정상적인 주행상태(미끄럼각이 작은 경우)에서는 자동차의 횡미끄럼각을 효과적으로 감소시킬 수 있지만, 타이어의 비선형성이 나타나는 극한적인 주행상태(미끄럼각이 큰 경우)에서는 기대한 만큼의 효과를 얻을 수 없다.<sup>10)</sup> 따라서 본 연구에서는 과도상태에서도 자동차의 횡미끄럼각을 0으로 유지하면서, 동시에 타이어의 비선형성을 극복하기 위한 방법으로서 식 (8)과 같은 형태의 후륜조향 제어방법을 사용하였다.<sup>11)</sup>

$$\delta_r = -\frac{C_f(\alpha_f) \cdot \cos\delta_{rc}}{C_r(\alpha_r) \cdot \cos\delta_r} \cdot \delta_{rc} + \frac{1}{C_r(\alpha_r) \cdot \cos\delta_r} \cdot \left\{ m \cdot u \cdot \gamma + C_f(\alpha_f) \cdot \cos\delta_{rc} \cdot \tan^{-1}\left(\frac{\gamma \cdot a}{u}\right) - C_r(\alpha_r) \cdot \cos\delta_r \cdot \tan^{-1}\left(\frac{\gamma \cdot b}{u}\right) \right\} \quad (8)$$

그리고 식 (8)로부터 후륜조향각  $\delta_r$ 을 반복적인 계산없이 결정하기 위해서 식 (8)의 우변에 있는 후륜조향각  $\delta_r$ 은  $\Delta t$  시간 전의 후륜조향각  $\delta_r^*$ 로부터 다음과 같은 형태로 추정하였다.

$$\delta_r = \delta_r^* + \frac{d\delta_r}{dt} \cdot \Delta t \quad (9)$$

기존의 4WS 자동차에서 문제가 되고 있는 고속주행시의 언더조향특성을 개선하기 위해서는, 특히 2WS 자동차와의 핸들조향 감각의 차이를 줄이기 위해서는 전륜조향각의 능동제어를 통해서 운전자의 핸들조향각에 대한 요우속도의 비를 2WS 자동차의 수준으로 증가시킬 필요가 있다. 본 연구에서는 고속주행시에 나타나는 4WS 자동차의 언더조향특성을 개선하기 위해서 선형 2WS 자동차가 정상상태로 주행할 때의 요우속도<sup>11)</sup>인 식 (10)을 기준 요우속도(Reference Yaw Velocity)  $\gamma^*$ 로 사용하는 모델추종제어 기법을 도입하였다.

$$\gamma^* = \frac{u}{1 - \left(\frac{a}{C_{r0}} - \frac{b}{C_{f0}}\right) \cdot \frac{m}{(a+b)^2} \cdot u^2} \cdot \frac{\delta_{rD}}{a+b} \quad (10)$$

여기서  $\delta_{rD}$ 는 운전자의 핸들조향각에 의해서 결정되는 전륜조향각, 그리고  $C_{f0}$ 와  $C_{r0}$ 은 전륜타이어와 후륜타이어의 선형 코너링강성들을 각각 의미한다.

그리고 고속선회하는 4WS 자동차의 요우속도  $\gamma$ 가 기준 요우속도  $\gamma^*$ 를 추종하는 데 필요한 전륜조향각의 보상값  $\Delta\delta_{rc}$ 는 선형 자동차모델로부터 아래와 같이 결정하였다.

$$\Delta\delta_{rc} = \frac{a^2 C_{f0} + b^2 C_{r0}}{a C_{f0} u} \cdot (\gamma^* - \gamma) \quad (11)$$

결과적으로 FA 4WS 자동차의 전륜조향각  $\delta_{rc}$ 는 식 (12)에서와 같이 운전자의 핸들조향각에 비례하는 전륜조향각  $\delta_{rD}$ 와 기준 요우속도  $\gamma^*$ 를 추종하기 위해서 필요한 전륜조향각의 보상값  $\Delta\delta_{rc}$ 의 합으로 주어진다.

$$\delta_{rc} = \delta_{rD} + \Delta\delta_{rc} \quad (12)$$

따라서 본 연구에서 제안한 FA 4WS 시스템은 고속주행시의 핸들조향 감각이 2WS 자동차와 유사하도록 전륜조향각을 식 (11)과 (12)에 의해서 능동제어하고, 동시에 과도상태에서도 자

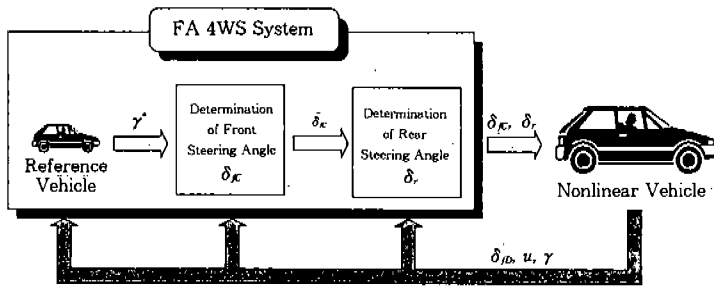


Fig.3 Block Diagram of FA 4WS System

동차의 횡미끄럼각을 0으로 유지할 수 있도록 후륜조향각을 식 (8)과 (9)에 의해서 능동제어하는 시스템이다. 그리고 Fig.3은 이러한 개념에 토대를 둔 FA 4WS 시스템의 블록선도(Block Diagram)를 보여주고 있다.

### 3. 주행특성 해석 및 고찰

본 연구에서는 스텝 및 정현파 조향입력에 대한 일련의 해석을 통해서 FA 4WS 자동차의 주행특성을 평가하였다. 특히 해석결과로는 2WS 자동차, 4WS 자동차, FA 4WS 자동차의 전륜조향각, 후륜조향각, 횡가속도, 요우속도, 횡미끄럼각 등을 비교·제시하였다. 해석에서 사용한 비선형 자동차모델과 비선형 타이어모델의 매개변수들은 Table 1과 2에서 볼 수 있으며, 전륜조향각에 대한 핸들조향각의 비인 기어비(Gear Ratio)는 15.5로 가정하였다.

#### 3.1 스텝 응답특성

ISO 7401에 정의된 스텝응답 실험코드를 토대로 2WS 자동차, 4WS 자동차, FA 4WS 자동차의 스텝 응답특성을 해석하기 위해서 자동차의 주행시작 2초 후부터 0.9초동안 핸들을  $90^\circ$  회전시키는 형태의 스텝 조향입력을 사용하였다. 그리고 자동차의 주행속도가 40, 80, 120km/h 일 때 해석한 전륜조향각, 후륜조향각, 주행궤적, 횡가속도, 요우속도, 횡미끄럼각은 Fig.4, 5, 6에서 볼 수 있다.

고속주행(80, 120km/h)하는 FA 4WS 차

차의 경우에는 실제 자동차의 전륜조향각  $\delta_K$ 가 운전자에 의해서 조향된 전륜조향각  $\delta_{D_r}$ 보다 더 크게 나타나고 있다. 이러한 사실은 고속주행할수록 증가하는 언더조향특성을 보상하기 위해서 FA 4WS 자동차의 전륜조향각이 증가한다는 것을 의미한다. 그리고 고속주행하는 자동차의 횡미끄럼각을 0으로 유지시키기 위해서 필요한 후륜조향각은 FA 4WS 자동차가 4WS 자동차보다 큰 것으로 나타났다.

자동차의 주행궤적을 살펴보면, 저속주행(40 km/h)시에는 오버조향특성(Oversteer Characteristics)이 강하게 나타나는 4WS 자동차가 2WS 자동차보다 작은 선회반경을 갖지만, 고속주행(80, 120km/h)시에는 언더조향특성이 강하게 나타나는 4WS 자동차가 2WS 자동차보다 더 큰 선회반경을 갖고 있음을 알 수 있다. 그러나 FA 4WS 자동차는 4WS 자동차와 달리 고속선회시의 주행궤적이 2WS 자동차와 거의 동일하게 나타나고 있다. 이러한 사실로부터 FA 4WS 시스템에 의한 전륜조향각의 능동제어를 통해서 고속선회시의 4WS 자동차의 핸들조향감각이 2WS 자동차와 거의 동일하게 만들어진다는 것을 확인할 수 있다.

그리고 자동차의 횡가속도와 요우속도는 선회반경과 반비례하는 것으로 나타났으며, 4WS 자동차나 FA 4WS 자동차와는 달리 2WS 자동차는 고속주행할수록 횡미끄럼각이 증가하는 경향을 보여주고 있다. 특히 2WS 자동차는 선회를 시작할 때의 주행상태가 매우 불안정하고, 주행속도가 증가할수록 그 경향이 더 심하다는 사실

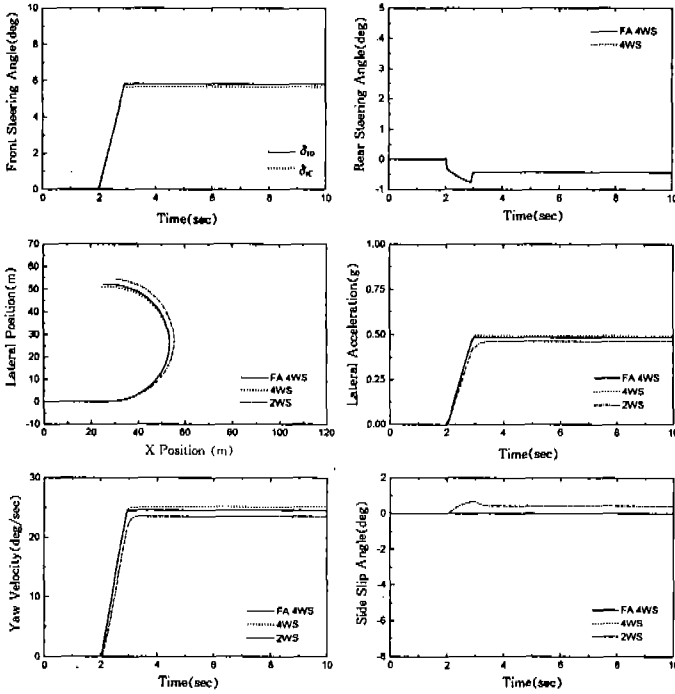


Fig.4 Step Responses of Vehicles ( $u=40\text{km/h}$ )

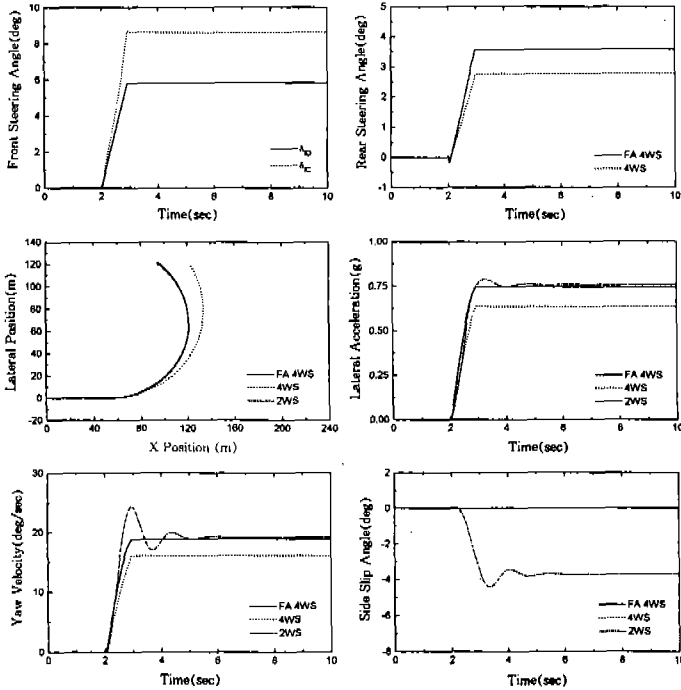


Fig.5 Step Responses of Vehicles ( $u=80\text{km/h}$ )

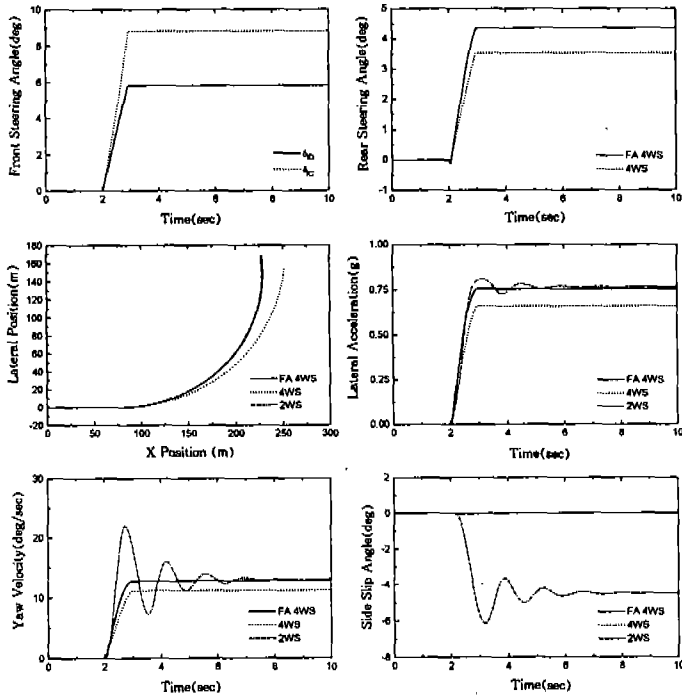


Fig.6 Step Responses of Vehicles ( $u=120\text{ km/h}$ )

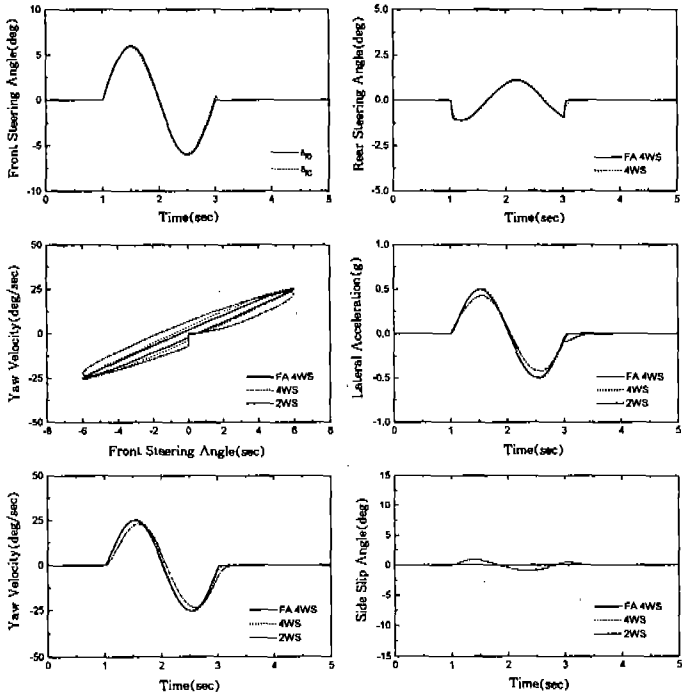


Fig.7 Sinusoidal Responses of Vehicles ( $u=40\text{ km/h}$ )

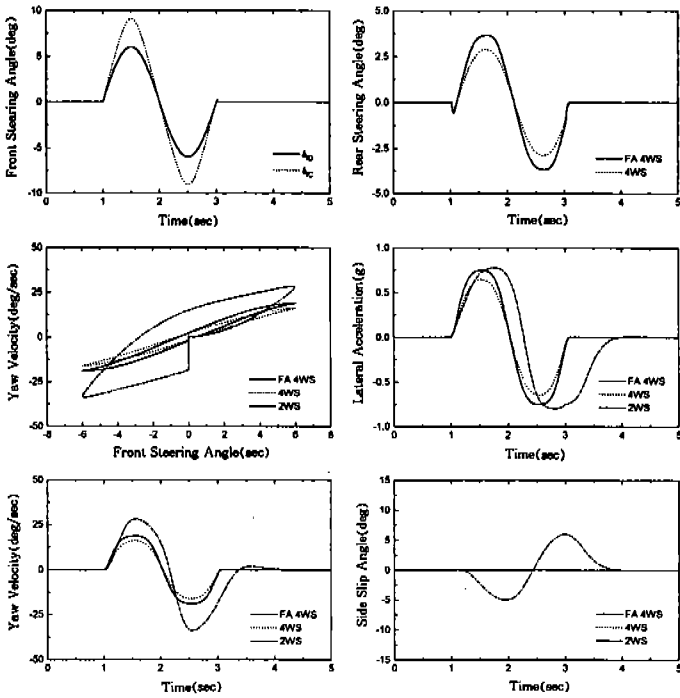


Fig.8 Sinusoidal Responses of Vehicles( $u=80$  km/h)

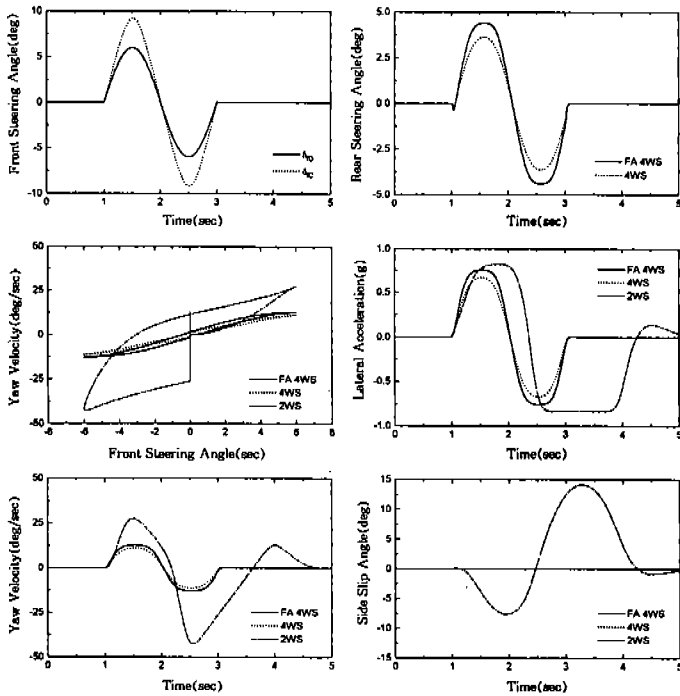


Fig.9 Sinusoidal Responses of Vehicles( $u=120$  km/h)



을 알 수 있다.

결과적으로 본 연구에서 제안한 FA 4WS 시스템은 4WS 시스템의 주행안정성을 유지하면서, 고속선회시의 핸들조향 감각이 2WS 시스템과 유사한 시스템이라고 할 수 있다.

### 3.2 정형과 응답특성

ISO/TR 8725에 정의된 정형과응답 실험코드를 토대로 2WS 자동차, 4WS 자동차, FA 4WS 자동차의 정형과 응답특성을 해석하기 위해서 자동차의 주행시작 1초 후부터 2초 동안 0.5Hz의 주기와 90°의 진폭으로 핸들을 조향하는 형태의 정형과 조향입력을 사용하였다. 그리고 자동차의 주행속도가 40, 80, 120km/h일 때 해석한 전륜조향각, 후륜조향각, 전륜조향각과 요우속도의 관계, 횡가속도, 요우속도, 횡미끄럼각은 Fig.7, 8, 9에 제시하였다.

스텝 응답특성의 경우와 마찬가지로 고속주행(80, 120km/h)하는 FA 4WS 자동차의 전륜조향각  $\delta_{\kappa}$ 는 언더조향특성을 보상하기 위해서 운전자에 의해서 조향된 전륜조향각  $\delta_{\mu}$ 보다 더 큰 값을 갖는다는 점, 그리고 고속주행하는 자동차의 횡미끄럼각을 0으로 유지시키기 위해서 필요한 후륜조향각은 FA 4WS 자동차가 4WS 자동차보다 더 크다는 점을 확인할 수 있다.

또한 운전자에 의해서 조향된 전륜조향각(핸들조향각을 기어비로 나눈 값)과 요우속도의 관계로부터 핸들조향각에 대한 요우속도의 이력현상(Hysteresis)은 2WS 자동차가 가장 크고, 주행속도가 증가할수록 그 경향이 심해진다는 것을 알 수 있는데, 이러한 사실은 과도상태에서의 2WS 자동차의 조향특성 4WS 자동차나 FA 4WS 자동차에 비해서 매우 나쁘다는 것을 의미한다. 특히 고속주행(80, 120km/h)시에는 FA 4WS 자동차가 4WS 자동차보다 동일한 핸들조향각에 대한 요우속도의 값이 크기때문에 과도상태에서의 FA 4WS 자동차의 조향특성이 더 우수하다고 판단된다.

저속주행(40km/h)시에는 4WS 자동차가 오버조향특성을 나타내기 때문에 2WS 자동차보다 더 큰 횡가속도와 요우속도를 갖지만, 고속주행

(80, 120km/h)시에는 4WS 자동차가 언더조향특성을 강하게 나타내기 때문에 2WS 자동차보다 작은 횡가속도와 요우속도를 갖는다는 사실을 확인할 수 있다. 그러나 4WS 자동차와는 달리 FA 4WS 자동차는 고속주행(80, 120km/h)시의 횡가속도와 요우속도의 최대값이 2WS 자동차와 거의 유사한 것으로 나타났다. 특히 고속주행(80, 120km/h)시의 2WS 자동차는 가장 큰 요우속도와 횡가속도를 갖지만, 그 응답성이 매우 나쁘고, 타이어의 횡력이 포화된 상태를 나타내면서 주행하기 때문에 과도상태에서의 주행안정성에 큰 문제가 있는 것으로 확인되었다. 그리고 2WS 자동차는 4WS 자동차나 FA 4WS 자동차와 달리 고속주행할수록 횡미끄럼각이 증가하는 경향을 보여주고 있으며, 특히 2차 핸들조향시에 더 불안정한 주행상태를 나타내고 있다.

결과적으로 본 연구에서 제안한 FA 4WS 시스템은 4WS 시스템의 주행안정성을 유지하면서, 과도상태에서의 조향특성이 4WS 시스템보다 우수한 시스템이라는 사실을 다시 확인할 수 있다.

## 4. 결 론

4WS 자동차는 고속주행시의 응답성과 안정성, 그리고 저속주행시의 조종성이 매우 우수한 것으로 평가되고 있지만, 고속주행시의 극심한 언더조향특성 때문에 나타나는 2WS 자동차와의 핸들조향 감각의 차이는 단점으로 지적되고 있다. 따라서 본 연구에서는 4WS 시스템의 우수한 응답성과 안정성을 유지하면서, 동시에 고속선회시의 핸들조향 감각을 2WS 자동차와 거의 동일하게 만들어 주는 FA 4WS 시스템을 비선형 타이어모델과 모델추종제어 기법에 토대를 두고 제안하였다. 그리고 본 연구를 통해서 얻은 주요결과들을 정리하면, 다음과 같다.

- 1) 전륜조향각과 후륜조향각을 모두 능동제어하는 개념에 토대로 둔 FA 4WS 시스템을 제안하였다. 특히 본 연구에서 제안한 FA 4WS 시스템은 자동차의 횡미끄럼각을 과도상태에서도 0으로 유지하고 고속선

회시 2WS 자동차와 유사한 핸들조향 감각을 갖도록 만들어 준다.

- 2) 고속주행시에 나타나는 4WS 자동차의 언더조향특성을 개선하기 위한 FA 4WS 시스템의 전륜조향각은 정상상태로 주행하는 선형 2WS 자동차의 요우속도를 기준 요우속도로 사용하는 모델추종제어 기법을 토대로 결정하였다.
- 3) 고속주행하는 FA 4WS 자동차의 전륜조향각과 후륜조향각은 4WS 자동차보다 크다.
- 4) 과도상태에서의 핸들조향각에 대한 요우속도의 이력현상은 2WS 자동차, 4WS 자동차, FA WS 자동차의 순으로 크게 나타난다. 특히 동일한 핸들조향각에 대한 요우속도의 값은고속주행시의 FA 4WS 자동차가 4WS 자동차보다 크기 때문에 FA 4WS 자동차의 조향특성이 더 우수하다고 볼 수 있다.
- 5) 고속주행시의 과도상태에서의 횡가속도와 요우속도의 최대값은 2WS 자동차, FA 4WS 자동차, 4WS 자동차의 순으로 크게 나타난다. 그러나 2WS 자동차의 경우에는 응답성이 매우 나쁘고, 타이어의 횡력이 포화된 상태를 나타내면서 주행하기 때문에 주행안정성에 문제가 있다.

## 후 기

1. Y, Furukawa, et al., "A Review of Four-Wheel Steering Studies from the Viewpoint of Vehicle Dynamics and Control", Vehicle System Dynamics, Vol. 18, No. 1, 1989, pp. 151~186.
2. M. Aga, et al., "Design of 2-Degree-of-Freedom Control system for Active Front

-and-Rear-Wheel Steering", SAE-Paper 90174.

3. T. Shiotsuka, A. Nagamatsu and K. Yoshida, "Adaptive Control of 4WS System by Using Neural Network", AVEC-Paper 923046.
4. Y. Lin, "Improving Vehicle Handling Performance by a Closed-Loop 4WS Driving Controller", SAE-Paper 921604.
5. A. Higuchi and Y. Saito, "Optimal Control of Four Wheel Steering Vehicle", AVEC-Paper 923043.
6. J. Ackermann, "Yaw Rate and Lateral Acceleration Feedback for Four-Wheel Steering", AVEC-Paper 9438204.
7. 김형내, 김석일, 김동룡, 김건상, "자동차의 주행성능 향상을 위한 DYC 4WS 제어방법에 관한 연구", 한국자동차공학회 학술강연초록집, 1996. 5, pp. 63~70.
8. T. Shiotsuka, A. Nagamatsu and K. Yoshida : Adaptive Control of 4WS System by Using Neural Network, AVEC '92 Symposium, pp. 252~257, 1992.
9. M. Nagai, E. Ueda and A. Moran : Integration of Linear Systems and Neural Networks for the Design of Nonlinear Four-Wheel-Steering Systems, AVEC '94 Symposium, pp. 153~158, 1994.
10. 김형내, 김석일, 김동룡, 김건상, "비선형 타이어모형을 이용한 4WS 자동차의 주행특성 해석", 한국자동차공학회 차량동역학 학술강연초록집, 1996. 5, pp. 115~121.
11. 이영화, 김석일, 서명원, 김대영, 김동룡, "타이어의 코너링강성이 4륜조향자동차의 조향특성에 미치는 영향", 한국자동차공학회지, Vol. 3, No. 4, 1995, pp. 115~125.