

## 자동차의 주행성능 향상을 위한 DYC 4WS 제어방법에 관한 연구

### A Study on the DYC 4WS Control Method for Improving the Dynamic Characteristics of Vehicle

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 4WS system is usually developed to improve the maneuverability at low speed and the straight line stability at high speed, but it is found to have the severe understeer characteristics at high speed. Therefore a 4WS vehicle requires to turn the steering wheel much more than a 2WS vehicle at high speeds even a driver goes through the same curved road. In this study, to enhance the cornering performance of the 4WS vehicle at high speed, a DYC 4WS system is proposed based on the nonlinear 4WS system and direct yaw moment control system. Especially the proposed DYC 4WS system is able to realize a zero side slip angle for vehicles and a cornering performance similar to the 2WS vehicle at high speed.

주요기술용어 : Nonlinear 4WS System(비선형 4륜조향시스템), DYC(Direct Yaw Moment Control, 직접 요우모멘트제어), Nonlinear Vehicle Model(비선형 자동차모델), Model Following Control(모델추종제어), Understeer Characteristics(언더조향특성)

#### 1. 서 론

4WS 시스템(Four Wheel Steering System)

- \* 한국항공대학교 기계설계학과 대학원
- \*\* 정회원, 한국항공대학교 기계설계학과
- \*\*\* 기아기술센터 차량연구실

은 자동차의 주행안정성을 크게 향상시킬 수 있는 효과적인 자동차 기술의 하나이다.<sup>1)</sup> 지금까지 개발된 대부분의 4WS 시스템은 자동차의 횡미끄럼각(Side Slip Angle)을 줄일 수 있도록 후륜조향각을 제어하는 개념에 토대를 두고 있다.<sup>2)</sup> 이러한 형태의 시스템이 탑재된 4WS 자동차

(Four Wheel Steering Vehicle)는 주행속도가 빨라질수록 언더조향특성(Understeer Characteristics)이 강해지는 경향을 보여준다. 따라서 4WS 자동차는 기존의 2WS 자동차(Two Wheel Steering Vehicle)보다 곡선도로를 고속주행하는 경우에 더 큰 핸들조향각을 필요로 한다. 이 사실은 4WS 자동차가 탁월한 주행안정성을 가지고 있지만, 2WS 자동차와 조향감각이 다르다는 점 때문에 2WS 자동차에 익숙한 운전자에게 혼동을 줄 수 있다는 것을 내포하고 있다.<sup>3)</sup> 결과적으로 4WS 자동차는 본래의 주행안정성을 유지하면서, 동시에 곡선도로를 고속주행할 때의 조향특성이 2WS 자동차와 유사하도록 개발될 필요가 있다. 이러한 성능을 갖는 4WS 시스템은 개념적으로 후륜조향각과 함께 전륜조향각도 능동제어하거나, 좌·우측 타이어의 구동토크(Driving Torque)를 능동제어하는 방법을 통해서 구현할 수 있다.

첫번째 방법과 관련해서는 모델추종제어(Model Following Control) 기법에 토대를 둔 자동차의 횡미끄럼각과 요우속도의 피드포워드/피드백 제어(Feedforward/Feedback Control),<sup>4,5)</sup> 주행속도와 관계없이 일정한 조향특성을 얻기 위한 자동차의 요우속도의 피드백제어,<sup>6)</sup> 최적제어 기법에 토대를 둔 자동차의 횡미끄럼각과 요우속도의 피드백제어,<sup>7)</sup> 전륜의 횡가속도와 자동차의 요우속도의 피드백제어<sup>8)</sup> 등을 통해서 전륜조향각과 후륜조향각을 결정하는 연구들이 보고되었다. 그러나 아직까지 두번째 방법과 관련된 연구결과는 보고된 바가 없다.

본 연구에서는 자동차의 횡미끄럼각을 과도상태에서도 0으로 유지하고, 고속선회시 2WS 자동차와 유사한 조향특성을 갖게 만드는 DYC 4WS 시스템을 제안하였다. 특히 DYC 4WS 시스템은 좌·우측 타이어의 구동토크를 능동제어하는 DYC(Direct Yaw Moment Control) 시스템<sup>9)~12)</sup>과 타이어의 비선형성을 고려해서 후륜조향각을 능동제어하는 비선형 4WS 시스템<sup>13)</sup>을 통합제어하는 개념에 토대를 두고 있다. 또한 극한적인 주행상태에서의 거동을 효과적으로 해석하기 위해서 비선형 자동차모델(Nonlinear Ve-

hicle Model)을 사용하였으며, 모델추종제어 기법을 이용한 요우속도의 피드백제어를 통해서 DYC 시스템의 요우모멘트를 결정하였다. 해석 결과로는 스텝(Step) 및 정현파(Sinusoidal) 조향입력에 대한 2WS 자동차, 4WS 자동차, DYC 4WS 자동차의 응답특성들을 비교·제시하였다.

## 2. DYC 4WS 자동차의 동역학 모델

### 2.1 비선형 자동차모델(Nonlinear Vehicle Model)

타이어의 횡력과 미끄럼각이 선형적으로 비례하는 선형 타이어모델은 타이어의 횡력이 포화되는 비선형 타이어모델에 비해서 횡방향으로 높은 강성을 갖게 된다. 따라서 선형 타이어모델을 이용하는 선형 자동차모델은 비선형 타이어모델을 이용하는 비선형 자동차모델과 비교할 때 동일한 핸들조향각에 대해서 선회반경이 작고, 횡가속도 및 요우속도가 커지는 결과를 보여준다. 일반적으로 횡가속도가 약  $4m/s^2$  이하인 경우에는 선형 자동차모델을 이용해도 비교적 정확한 결과가 얻어지는 것으로 알려져 있지만, 자동차의 주행상태를 보다 정량적으로 해석하기 위해서는 비선형 자동차모델을 사용할 필요가 있다. Fig.1과 Table 1에는 본 연구에서 사용한 비선형 자동차모델과 모델 매개변수들을 제시하였다.

전륜조향각과 후륜조향각이  $\delta_f$ 와  $\delta_r$ , 자동차의 무게중심에서의 횡속도와 요우속도가  $v$ 와

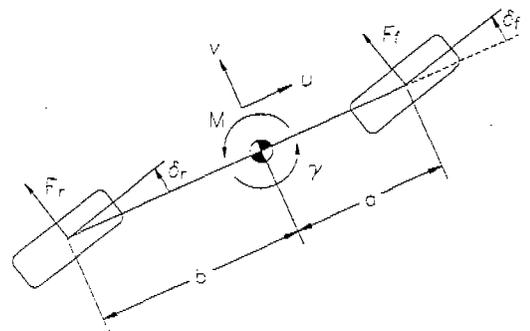


Fig.1 Model of DYC 4WS vehicle

Table 1 Parameters of vehicle model

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

$\gamma$ , 자동차의 무게중심에서 전륜까지의 거리와 후륜까지의 거리가  $a$ 와  $b$ , 그리고 자동차의 주행속도가  $u$  라면, 비선형 자동차모델에서는 전륜타이어와 후륜타이어의 미끄럼각  $\alpha_f$ 와  $\alpha_r$  이 아래와 같이 주어진다.

$$\alpha_f = \delta_f - \tan^{-1}\left(\frac{v + \gamma a}{u}\right) \quad (1)$$

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

비선형 타이어모델의 경우에는 전륜타이어와 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 비선형적인 관계를 갖는다.<sup>13)</sup>

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

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

또한 식 (3)과 (4)의  $C_f(\alpha_f)$ 와  $C_r(\alpha_r)$ 은 타이어의 미끄럼각의 함수로써 주어지는 전륜타이어와 후륜타이어의 코너링강성들을 의미하며, 매직포물러(Magic Formula) 타이어모델을 이용해서 그 일반적인 형태를 표현하면 식 (5)와 같다.

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

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

여기서  $\alpha$ 는 타이어의 미끄럼각,  $P$ 는 절정인자(Peak Factor),  $G$ 는 형상인자(Shape Factor),  $K$ 는 강성인자(Stiffness Factor),  $R$ 은

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

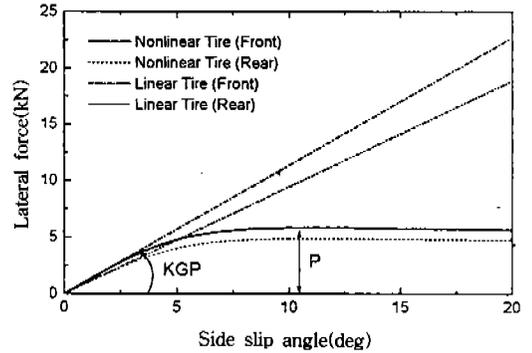


Fig.2 Linear and nonlinear tire models

곡률인자(Curvature Factor), 그리고 세 인자들의 곱인  $KGP$ 는 선형영역에서의 코너링강성(선형 타이어모델의 코너링강성)을 각각 의미한다. Table 2는 본 연구에서 사용한 매직포물러 타이어모델의 매개변수들을 보여주고 있으며, Fig.2에는 그 값들을 토대로 얻은 비선형 타이어모델의 미끄럼각과 횡력의 관계를 선형 타이어모델과 비교해서 나타내었다.

결과적으로 식 (3)과 (4)의 관계, 그리고 DYCS 시스템에 의해서 생성되는 요우모멘트  $M$ 을 고려하면, Fig.2와 같이 주어지는 자동차의 횡력과 요우모멘트에 대한 평형조건으로부터 다음과 같은 2개의 비선형 운동방정식을 얻을 수 있다.

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

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

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

## 2.2 비선형 4WS 시스템(Nonlinear Four Wheel Steering System)

지금까지 발표된 대부분의 4WS 시스템들은 자동차의 횡미끄럼각을 0으로 제어하는 방법들을 도출하기 위해서 선형 자동차모델을 이용하였다. 그러나 이러한 선형 4WS 시스템으로 비선형적인 특성을 갖는 실제 자동차를 제어하게 되면, 타이어의 선형성이 유지되는 정상적인 주행조건에서는 자동차의 횡미끄럼각을 효과적으로 감소시킬 수 있지만, 타이어의 비선형성이 나타나는 극한적인 주행조건에서는 기대한 만큼의 효과를 얻을 수 없다. 따라서 보다 효과적으로 자동차의 횡미끄럼각을 감소시키기 위해서는 실제 자동차의 거동을 잘 묘사하는 비선형 자동차 모델로부터 4WS 시스템의 제어방법을 도출할 필요가 있다. 본 연구에서는 과도상태에서도 자동차의 횡미끄럼각을 0으로 유지하면서, 동시에 타이어의 비선형성을 극복하기 위한 방법으로서 식 (8)과 같은 형태의 비선형 4WS 시스템을 사용하였다.<sup>13)</sup>

$$\delta_r = -\frac{C_f(a_f) \cdot \cos \delta_f}{C_r(a_r) \cdot \cos \delta_r} \cdot \delta_f \quad (8)$$

$$+ \frac{1}{C_r(a_r) \cdot \cos \delta_r} \cdot (m \cdot u \cdot \gamma$$

$$+ C_f(a_f) \cdot \cos \delta_f \cdot \tan^{-1}\left(\frac{\gamma \cdot a}{u}\right)$$

$$- C_r(a_r) \cdot \cos \delta_r \cdot \tan^{-1}\left(\frac{\gamma \cdot b}{u}\right))$$

그러나 식 (8)에서 알 수 있듯이 후륜타이어의 미끄럼각  $\alpha_r$  도 후륜조향각  $\delta_r$  의 함수이기 때문에 식 (8)로부터 후륜조향각  $\delta_r$  을 결정하는 것은 많은 반복 계산을 필요로 한다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 식 (8)의 우변에 있는 후륜조향각  $\delta_r$  은  $\Delta t$  시간전의 후륜조향각  $\delta_r^*$  로부터 다음과 같은 형

태로 추정하였다.

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

## 2.3 DYC 시스템(Direct Yaw Moment Control System)

전륜(전륜구동방식의 자동차인 경우)이나 후륜(후륜구동방식의 자동차인 경우)의 좌·우측 타이어에 작용하는 구동토크를 서로 다르게 부여하면 핸들을 조향하지 않더라도 자동차를 선회시킬 수 있다. 즉 좌·우측 타이어의 구동토크에 대한 차이는 Fig.1에서와 같이 요우모멘트  $M$  의 형태로 나타나기 때문에 자동차의 요우운동을 야기한다.

따라서 본 연구에서는 이러한 개념을 토대로 고속주행시에 나타나는 4WS 자동차의 언더조향 특성을 개선하기 위해서 요우속도에 대한 모델 추종제어 기법을 도입하였다. 특히 2WS 자동차와 유사한 고속선회특성을 갖도록 만들기 위하여 정상상태로 주행하는 선형 2WS 자동차의 요우속도  $\gamma^*$  를 기준 요우속도(Reference Yaw Velocity)로 사용하였는데, 그 관계식은 식 (10)과 같이 주어진다.<sup>14)</sup>

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

여기서  $C_{f0}$  와  $C_{r0}$  은 선형적인 특성을 갖는 전륜타이어와 후륜타이어의 코너링강성을 의미한다.

고속선회하는 4WS 자동차의 요우속도가 식 (10)과 같이 주어지는 기준 요우속도와 일치하기 위해서는 4WS자동차의 언더조향특성 때문에 나타나는 요우속도의 부족부분을 좌·우측 타이어의 구동토크 차이에 의한 요우모멘트  $M$  으로 보상해야 한다. 4WS 자동차의 요우속도  $\gamma$  가 기준 요우속도  $\gamma^*$  와 같게 되도록 만드는 데 필요한 요우모멘트  $M$  은 선형 자동차모델을 이용

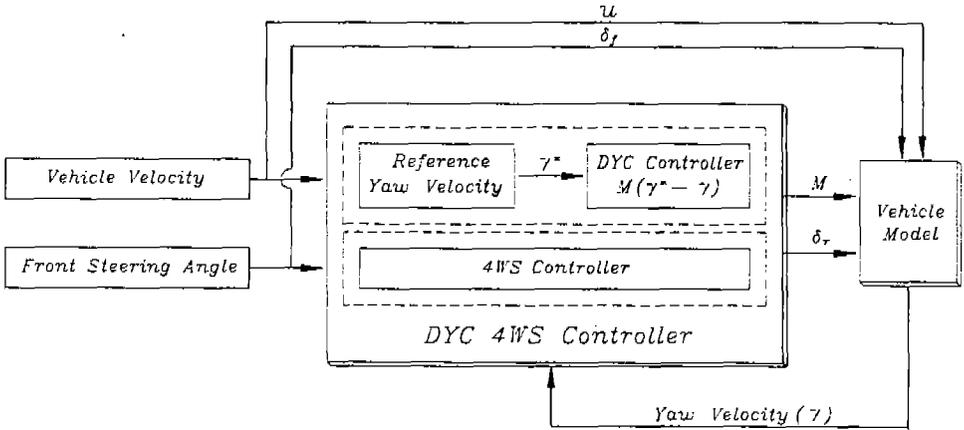


Fig.3 Block diagram of DYC 4WS system

해서 아래와 같이 결정하였다.

$$M = \frac{a^2 C_{\beta} + b^2 C_{\alpha}}{u} (\gamma^* - \gamma) \quad (11)$$

결과적으로 식 (11)은 4WS 자동차의 요우속도  $\gamma$ 가 기준 요우속도  $\gamma^*$ 와 같게 되도록 좌·우측 타이어의 구동토크를 제어하여 4WS 자동차의 고속선회특성을 개선하는 방법의 하나이다. Fig.3은 이러한 방식의 DYC 시스템을 비선형 4WS 시스템과 통합하여 과도상태에서도 자동차의 횡미끄럼각을 0으로 유지하고, 2WS 자동차와 유사한 고속선회특성을 갖도록 만들어 주는 DYC 4WS 시스템의 블록선도(Block Diagram)를 보여주고 있다.

### 3. 주행특성 해석 및 고찰

본 연구에서는 DYC 4WS 자동차의 주행특성을 평가하기 위해서 스티어링 및 정현과 조향입력에 대한 일련의 해석을 수행하였다. 특히 해석결과로는 2WS 자동차, 4WS 자동차, DYC 4WS 자동차의 횡가속도, 요우속도, 횡변위, 횡미끄럼각 등을 비교·제시하였다. 해석에서 사용한 자동차모델은 비선형 모델이며, 자동차모델과 타이어모델의 매개변수들은 Table 1과 2에서 볼 수 있다. 그리고 전륜조향각에 대한 핸들조향각의

비인 기어비(Gear Ratio)는 15.5로 가정하였다.

#### 3.1 스티어링 응답특성

본 연구에서는 2WS 자동차, 4WS 자동차, DYC 4WS 자동차의 스티어링 응답특성을 해석하기 위해서 자동차의 주행시작 2초 후부터 0.9초 동안 핸들을 90° 회전시키는 형태의 스티어링조향입력을 사용하였다. 그리고 Fig.4, 5, 6은 자동차의 주행속도가 40, 80, 120km/h일 때 해석한 주행궤적, 횡가속도, 요우속도, 횡미끄럼각, DYC 시스템의 요우모멘트 등을 비교해서 보여주고 있다.

자동차의 주행궤적에 대한 해석결과로부터 저속주행(40km/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 DYC 4WS 자동차는 4WS 자동차와 달리 고속선회시의 주행궤적이 2WS 자동차와 거의 유사하게 나타나고 있다. 이러한 사실로부터 DYC 시스템에 의한 요우모멘트 제어를 통해서 고속선회시의 4WS 자동차의 조향특성이 2WS 자동차와 유사하게 만들어진다는 것을 확인할 수 있다.

그리고 자동차의 횡가속도와 요우속도는 선회

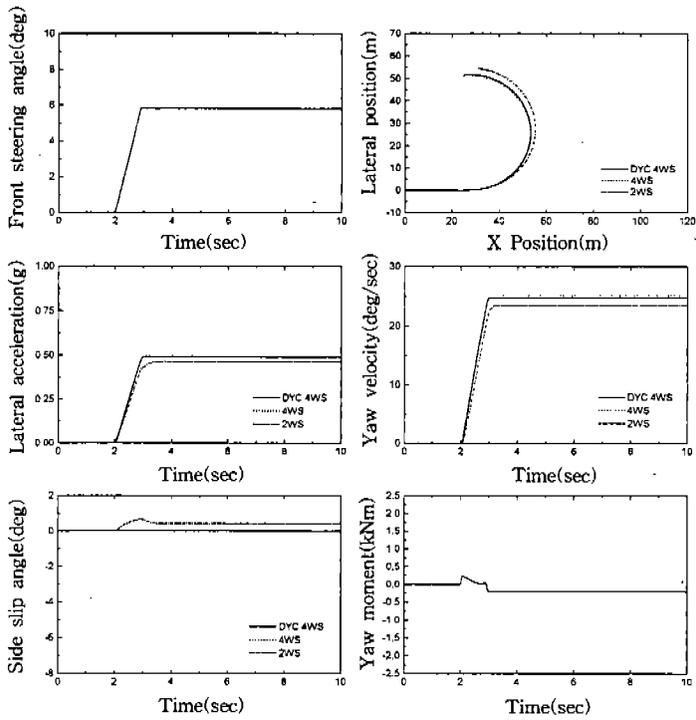


Fig.4 Step responses of vehicles ( $u=40\text{km/h}$ )

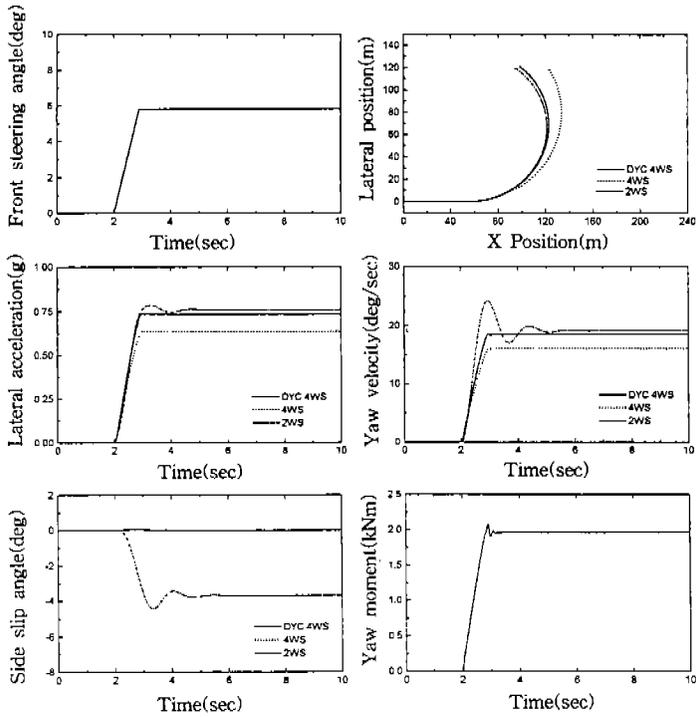


Fig.5 Step responses of vehicles ( $u=80\text{km/h}$ )

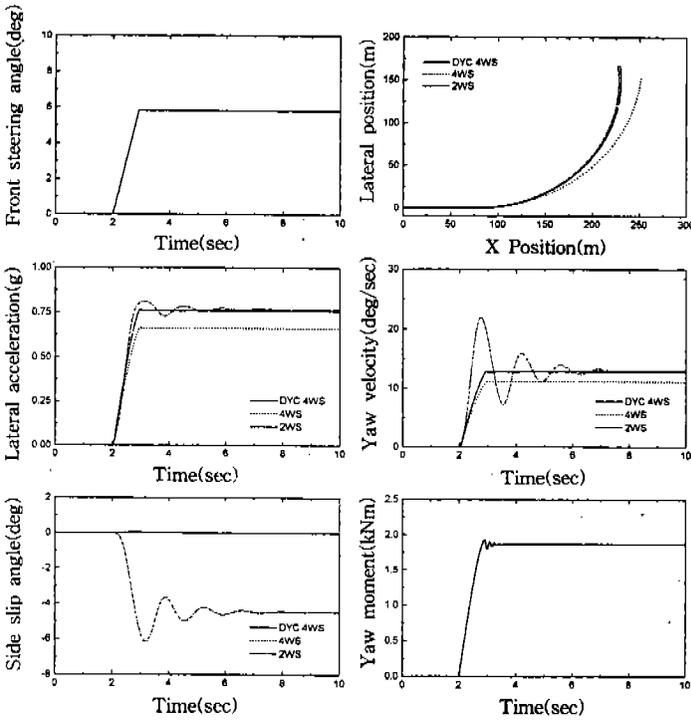


Fig.6 Step responses of vehicles ( $u=120\text{km/h}$ )

반경과 반비례하는 관계를 가지고 있는 것으로 나타났으며, 2WS 자동차는 4WS 자동차나 DYC 4WS 자동차와 달리 고속주행할수록 횡미끄럼각이 증가하는 경향을 보여주고 있다. 특히 2WS 자동차는 선회를 시작할 때 매우 불안정한 주행상태를 나타내며, 주행속도가 증가할수록 그 경향이 더 심하다는 사실을 알 수 있다. 또한 DYC 시스템의 요우모멘트는 4WS 자동차가 오버조향특성을 나타내는 저속주행(40km/h)의 경우와 언더조향특성을 나타내는 고속주행(80, 120km/h)의 경우에 서로 반대방향으로 발생하고 있다.

결과적으로 본 연구에서 제안한 DYC 4WS 시스템은 기존의 4WS 시스템의 주행안정성을 유지하면서, 고속선회시에는 2WS 시스템과 유사한 조향특성을 갖는 시스템이라고 판단된다.

### 3.2 정현파 응답특성

본 연구에서는 2WS 자동차, 4WS 자동차, DYC 4WS 자동차의 정현파 응답특성을 해석하

기 위해서 자동차의 주행시작 1초 후부터 2초 동안 0.5Hz의 주기와 90°의 진폭으로 핸들을 조향하는 형태의 정현파 조향입력을 사용하였다. 그리고 Fig.7, 8, 9에서는 자동차의 주행속도가 40, 80, 120km/h일 때 해석한 전륜조향각과 요우속도의 관계, 횡미끄럼각, 요우속도, 횡미끄럼각, DYC 시스템의 요우모멘트 등을 비교해서 볼 수 있다.

전륜조향각과 요우속도의 관계로부터 동일한 전륜조향각에 대한 요우속도의 이력현상(Hysteresis)은 2WS 자동차가 가장 크다는 점, 그리고 주행속도가 증가할수록 그 경향이 심해진다는 점을 알 수 있다. 이러한 사실은 과도상태에서의 2WS 자동차의 조향특성이 4WS 자동차나 DYC 4WS 자동차에 비해서 매우 나쁘다는 것을 의미한다. 또한 DYC 4WS 자동차는 4WS 자동차보다 전륜조향각에 대한 요우속도의 이력현상이 약간 작은 것으로 나타났으며, 특히 고속주행(80, 120km/h)시에는 DYC 4WS 자동차가 4WS 자동차보다 동일한 전륜조향각에 대

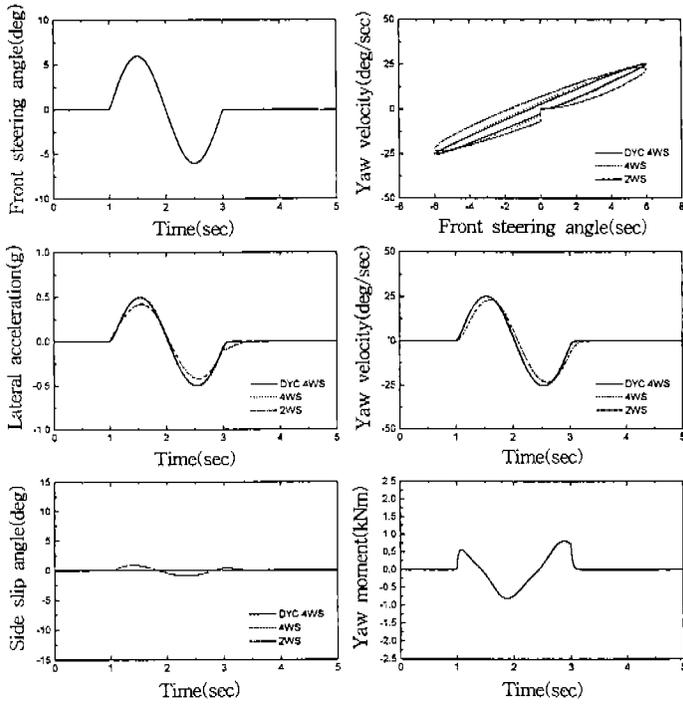


Fig.7 Sinusoidal responses of vehicles( $u=40\text{km/h}$ )

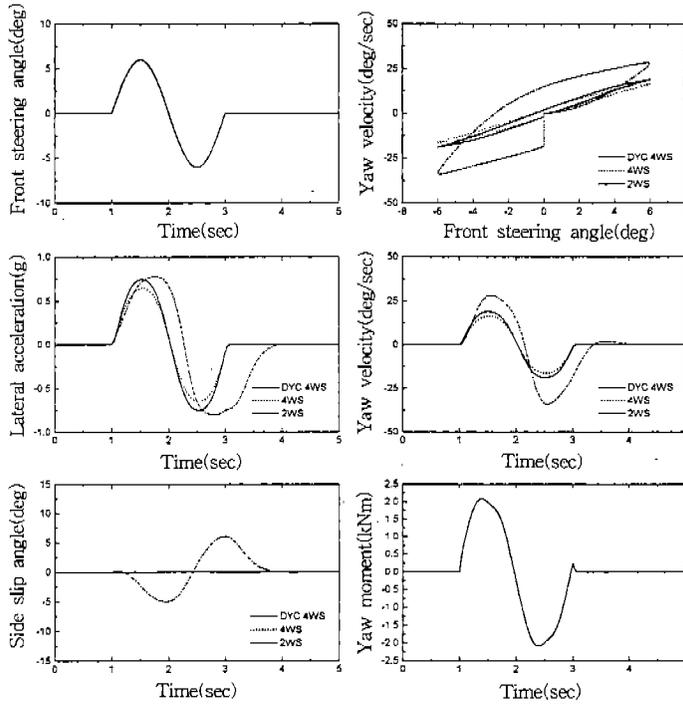


Fig.8 Sinusoidal responses of vehicles( $u=80\text{km/h}$ )

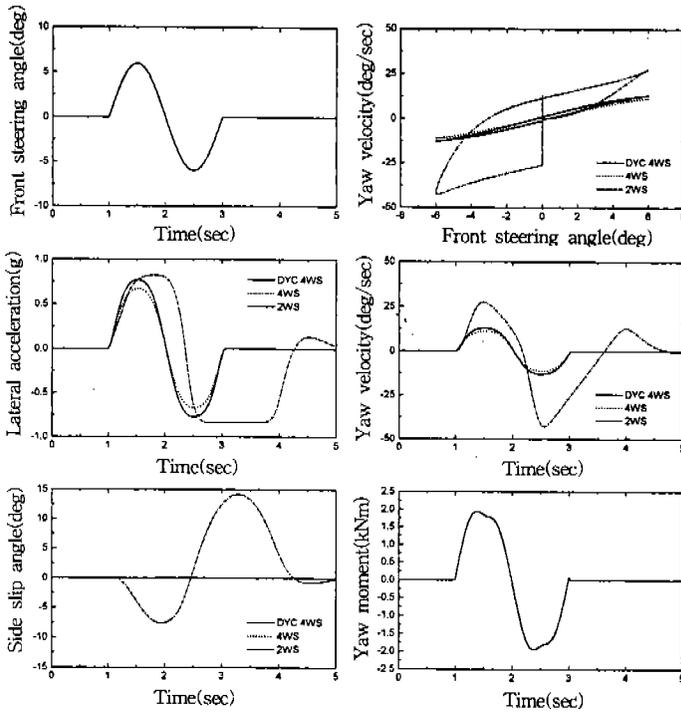


Fig.9 Sinusoidal responses of vehicles( $u=120\text{km/h}$ )

한 요우속도의 값이 크기 때문에 과도상태에서의 DYC 4WS 자동차의 조향특성이 더 우수하다고 판단된다.

저속주행( $40\text{km/h}$ )시에는 오버조향특성이 강하게 나타나는 4WS 자동차가 2WS 자동차보다 더 큰 횡가속도와 요우속도를 갖지만, 고속주행( $80, 120\text{km/h}$ )시에는 언더조향특성이 강하게 나타나는 4WS 자동차가 2WS 자동차보다 작은 횡가속도와 요우속도를 갖고 있음을 볼 수 있다. 그러나 DYC 4WS 자동차는 4WS 자동차와 달리 고속주행( $80, 120\text{km/h}$ )시의 횡가속도와 요우속도의 최대값이 2WS 자동차와 유사한 것으로 나타났다. 특히 고속주행( $80, 120\text{km/h}$ )시의 2WS 자동차는 가장 큰 요우속도와 횡가속도를 갖고 있지만, 그 응답성이 매우 나쁘고, 타이어의 횡력이 포화되는 상태를 나타내면서 주행하기 때문에 과도상태에서의 주행안정성에 큰 문제가 있다. 그리고 2WS 자동차는 4WS 자동차나 DYC 4WS 자동차와 달리 고속주행할수록 횡미끄러움이 증가하는 경향을 보여주고 있으며,

특히 2차 핸들조향시에 더 불안정한 주행상태를 나타내고 있음을 알 수 있다.

결과적으로 본 연구에서 제안한 DYC 4WS 시스템은 기존의 4WS 시스템의 주행안정성을 유지하면서, 과도상태에서의 조향특성이 기존의 4WS 시스템보다 우수한 시스템이라고 할 수 있다.

#### 4. 결 론

지금까지 여러 가지 형태의 4WS 자동차가 고속주행시의 안정성과 저속주행시의 조종성을 향상시킬 목적으로 개발되었고, 그 성과도 괄목할 만한 것이었다. 그러나 이러한 장점들을 가지고 있는 4WS 자동차는 주행속도가 빨라질수록 언더조향특성이 극심해지는 단점을 보여주었다. 따라서 본 연구에서는 4WS 자동차의 주행안정성을 유지하면서, 동시에 고속선회시의 조향특성을 2WS 자동차와 유사하게 만들어 주는 DYC 4WS 시스템을 개발하였다. 또한 해석과정에서

는 극한적인 주행상태를 보다 효과적으로 분석할 수 있도록 타이어의 비선형성을 고려한 자동차 모델을 이용하였다. 특히 DYC 4WS 자동차의 주행성능을 파악하기 위해서 스티프 및 정현과 응답특성을 해석하였으며, 2WS 자동차 및 4WS 자동차와의 성능 비교·분석을 수행하였다. 본 연구를 통해서 얻은 주요결과들을 정리하면, 다음과 같다.

- 1) 좌·우측 타이어의 구동토크를 능동제어하는 DYC 시스템과 후륜조향각을 능동제어하는 비선형 4WS 시스템을 통합제어하는 개념을 토대로 DYC 4WS 시스템을 제안하였다. 특히 본 연구에서 제안한 DYC 4WS 시스템은 자동차의 횡미끄럼각을 과도상태에서도 0으로 유지하고, 고속선회시 2WS 자동차와 유사한 조향특성을 갖도록 만들어 준다.
- 2) 고속주행시에 나타나는 4WS 자동차의 언더조향특성을 개선하기 위한 DYC 시스템의 요우모멘트는 정상상태로 주행하는 선형 2WS 자동차의 요우속도를 기준 요우속도로 사용하는 모델추종제어 기법을 토대로 결정하였다.
- 3) DYC 시스템의 요우모멘트는 4WS 자동차가 오버조향특성을 나타내는 저속주행의 경우와 언더조향특성을 나타내는 고속주행의 경우에 서로 반대방향으로 발생한다
- 4) 과도상태에서의 전륜조향각에 대한 요우속도의 이력현상은 2WS 자동차, 4WS 자동차, DYC 4WS 자동차의 순으로 크게 나타난다. 특히 고속주행시의 동일한 전륜조향각에 대한 요우속도의 값은 DYC 4WS 자동차가 4WS 자동차보다 크기 때문에 DYC 4WS 자동차의 조향특성이 더 우수하다.
- 5) 고속주행시 과도상태에서의 횡기속도와 요우속도의 최대값은 2WS 자동차, DYC 4WS 자동차, 4WS 자동차의 순으로 크게 나타났다. 그러나 2WS 자동차는 응답성이 매우 나쁘고, 타이어의 횡력이 포화되는 상태를 나타내면서 주행하기 때문에

과도상태에서의 주행안정성에 큰 문제가 있다.

## 참 고 문 헌

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, pp. 151~186, 1989.
2. 이영화, 김석일, 서명원, 김대영, 김동룡, "운전자-자동차모델을 이용한 4륜조향자동차의 주행특성 해석", 한국자동차공학회지, Vol.3, No.3, pp. 119~128, 1995.
3. 이영화, 김석일, 김대영, 김동룡, "핸들조향속도를 고려한 4WS제어방법에 관한 연구", 한국자동차공학회 차량동역학 학술강연초록집, pp. 76~77, 1995.
4. M. Aga, et al., "Design of 2-Degree-of-Freedom Control System for Active Front-and-Rear-Wheel Steering", SAE-Paper 90174.
5. T. Shiotsuka, A. Nagamatsu and K. Yoshida, "Adaptive Control of 4WS System by Using Neural Network", AVEC-Paper 923046.
6. Y. Lin, "Improving Vehicle Handling Performance by a Closed-Loop 4WS Driving Controller", SAE-Paper 921604.
7. A. Higuchi and Y. Saito, "Optimal Control of Four Wheel Steering Vehicle", AVEC-Paper 923043.
8. J. Ackermann, "Yaw Rate and Lateral Acceleration Feedback for Four-Wheel Steering", AVEC-Paper 9438204.
9. S. Motoyama, H. Uki, K. Isoda and H. Yuasa, "Effect of Traction Force Distribution Control on Vehicle Dynamics", AVEC-Paper 923080.
10. Y. Shibahata, K. Shimada and T. Tomari, "The Improvement of Vehicle

Maneuverability by Direct Yaw Moment Control”, AVEC-Paper 923081.

11. T. Fujioka and N. Yanase, “Torque Split Control for Electric Vehicle with 4-Wheel Direct-Drive Motors”, AVEC-Paper 9438132.
12. M. Abe, N. Ohkubo and Y. Kano, “Comparison of 4WS and Direct Yaw Moment Control for Improvement of Vehicle Handling Performance”, AVEC-Paper 9438196.
13. 김형내, 김석일, 김동룡, 김건상, “비선형 타이어모델을 이용한 4WS 자동차의 주행특성 해석”, 한국자동차공학회 차량동역학 학술강연초록집, 1996.5.
14. 이영화, 김석일, 서명원, 김대영, 김동룡, “타이어의 코너링강성이 4륜조향자동차의 조향특성에 미치는 영향”, 한국자동차공학회지, Vol.3, No.4, pp. 115~125, 1995.