

〈논 문〉 SAE NO. 97370012

비선형 타이어모델을 이용한 4WS 자동차의 주행특성 해석

Dynamic Characteristics Analysis of Four Wheel Steering Vehicles 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

Four wheel steering(4WS) systems which can control the lateral and yaw motions of vehicles by steering front and rear wheels simultaneously, have been regarded as effective for improving the stability and handling performance of vehicles. However, since the 4WS systems depend only on the lateral force of tire, they have some limitation due to the nonlinear characteristics of tire related with the saturation phenomenon of lateral force to the slip angle of tire in a near-limit-performance maneuvering range. In this study, in other to evaluate the effect of nonlinear characteristics of tire on the dynamic performance of vehicles, a new concept for deriving the cornering stiffness of nonlinear tire by using the "Magic Formula" tire model is proposed. In addition, the nonlinear 4WS vehicle model is constructed based on the proposed cornering stiffness of nonlinear tire. It is noted from simulation that the nonlinear characteristics of tire affect greatly on the 4WS vehicle performance.

주요기술용어 : Nonlinear 4WS System(비선형 4륜조향시스템), Nonlinear Tire Model(비선형 타이어모델), Nonlinear Vehicle Model(비선형 자동차모델), Magic Formula(매직포뮬러), Cornering Stiffness(코너링강성)

1. 서 론

1980년대 중반부터 자동차의 조종성과 안정성을 크게 향상시키기 위한 수단으로서 4WS 시스

템(Four Wheel Steering System)이 활발히 연구되었고, 그 연구결과들이 실제 적용되기에 이르렀다^{1),2)}. 4WS 시스템의 기본적인 개념은 원하는 자동차의 횡미끄럼각(Side Slip Angle) 및 요우속도(Yaw Velocity)를 얻기 위해서 자동차의 전륜조향각 및 후륜조향각을 능동적으로 제어하는 것이다. 지금까지 4WS 제어방법을 도출하

* 한국항공대학교 기계설계학과 대학원

** 정회원, 한국항공대학교 기계설계학과

*** 기아기술센터 차량연구실

고, 그 성능을 평가하는 과정에서는 대부분 횡미끄럼각과 요우속도를 효과적으로 표현할 수 있는 2자유도의 선형 자동차모델이 사용되어 왔다^{3)~5)}. 이러한 선형 자동차모델은 타이어에 작용하는 횡력(Lateral Force)과 타이어의 미끄럼각이 선형적으로 비례한다는 타이어모델을 사용하고 있는데, 노면조건이 정상적이고, 자동차의 횡가속도가 약 $4m/s^2$ 이하인 경우에 비교적 정확한 결과가 얻어지는 것으로 알려져 있다. 그러나 돌발적인 추돌상황을 회피하는 경우, 노면차질이 급격히 감소하는 경우, 그리고 미끄러운 도로를 주행하는 경우 등과 같은 긴급 주행상황하에서는 타이어에 작용하는 횡력의 제한(타이어의 비선형성)때문에 자동차의 주행성능은 선형적인 동역학 모델에 의해서 올바르게 예측될 수 없다. 특히 4WS 자동차의 주행특성은 전륜조향각과 후륜조향각에 의해서 야기되는 타이어의 횡력과 매우 밀접한 관련이 있기 때문에 4WS 자동차의 주행특성과 타이어의 비선형성간의 관계를 해석하는 것은 긴급 주행상황하에서의 4WS 자동차의 조종성과 안정성을 파악하는 데 매우 중요하다. 이와 관련해서 최근 신경회로망(Neural Network) 기법을 이용하여 타이어의 비선형성을 고려하려는 연구가 선형 자동차모델을 토대로 진행되고 있다^{6),7)}. 그러나 이러한 연구들이 사용하는 신경회로망 자체가 블랙박스(Black Box)이고, 대부분의 응용이 실제 시스템으로부터 도출된 해석학적인 모델에 기반을 두지 않기 때문에 신경회로망 제어시스템의 설계에 많은 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 타이어의 비선형성을 충분히 반영할 수 있는 매직포물러(Magic Formula) 형태^{8),9)}의 타이어모델로부터 비선형 타이어의 코너링강성(Cornering Stiffness)을 정의하는 방법을 제안하였고, 그 개념을 토대로 비선형 자동차모델과 비선형 4WS 시스템을 구성하여 타이어의 비선형성이 4WS 자동차의 주행특성에 미치는 영향을 해석하였다. 특히 타이어의 특성과 4WS 자동차의 주행특성간의 관계는 선형 자동차모델과 선형 4WS 시스템, 비선형 자동차모델과 선형 4WS 시스템, 그리고 비선형 자동차모델과 비선형 4WS 시스템을 이용해서 비교·

분석하였다. 또한 일련의 주행특성 해석은 스텝(Step) 및 정현파(Sinusoidal) 조향입력에 대해서 수행하였으며, 4WS 자동차의 주행속도에 따른 주행경로, 횡가속도, 요우속도, 후륜조향각, 횡미끄럼각을 그 결과로서 제시하였다.

2. 비선형 4WS 자동차의 동역학 모델

2.1 비선형 타이어모델 (Nonlinear Tire Model)

일반적으로 타이어의 미끄럼각이 작은 경우에는 타이어의 미끄럼각과 횡력이 선형적인 비례관계를 갖지만, 미끄럼각이 커질수록 미끄럼각에 대한 횡력의 민감도(Sensitivity)가 감소하는 경향을 나타내고, 궁극적으로 타이어의 횡력이 포화(Saturation)되는 현상을 보여준다. 이러한 타이어의 비선형적인 특성을 표현할 수 있는 타이어모델의 형태는 크게 3가지로 분류할 수 있다. 첫번째 방법은 타이어의 동적 특성을 명쾌하게 나타낼 수 있는 물리적인 모델이고, 두번째 방법은 타이어의 동적 특성을 나타내는 수치적인 정보들을 직접 보간(Interpolation)하는 수치적인 모델이며, 세번째 방법은 타이어로부터 측정된 정보들을 실험적인 타이어의 특성관계식의 매개변수(Parameter)로 변환하여 나타낼 수 있는 경험적인 모델이다. 경험적인 타이어모델의 하나인 매직포물러 형태의 타이어모델은 실제 실험에서 측정된 타이어의 특성정보들을 수학적으로 표현하기 위해서 개발되었는데, 특히 수식내의 매개변수들을 변경함으로써 미끄럼각과 횡력의 관계 외에도 제동력, 가속력, 셀프얼라이닝토크(Self-Aligning Torque)의 영향 등도 쉽게 표현할 수 있다는 특징을 가지고 있다^{8),9)}.

본 연구에서는 자동차가 일정한 속도로 선회하는 경우에 나타나는 타이어의 미끄럼각 α 와 횡력 $F(\alpha)$ 의 관계를 수학적으로 표현하기 위해서 식 (1)과 같이 주어지는 매직포물러 형태의 타이어모델을 사용하였다.

$$F(\alpha) = P \cdot \sin[G \cdot \tan^{-1}\{K \cdot \alpha - R \cdot (K \cdot \alpha - \tan^{-1}(K \cdot \alpha))\}] \quad (1)$$

여기서 P 는 절정인자(Peak Factor), G 는 형상인자(Shape Factor), K 는 강성인자(Stiffness Factor), R 은 곡률인자(Curvature Factor), 그리고 세 인자들의 곱인 KGP 는 선형영역에서의 코너링강성, 즉 선형 타이어모델에 대한 코너링강성을 각각 나타낸다.

또한 본 연구에서는 비선형 자동차모델이나 비선형 4WS 시스템을 구축하는 데 필요한 비선형 타이어의 코너링강성 $C(\alpha)$ 를 식 (1)로부터 얻기 위해서 다음과 같이 비선형 타이어의 코너링강성을 새롭게 정의하였다.

$$C(\alpha) = \frac{F(\alpha)}{\alpha}$$

(타이어의 미끄럼각이 0이 아닌 경우)

$$= KGP$$

(타이어의 미끄럼각이 0인 경우) (2)

Table 1은 본 연구에서 사용한 매직포물러 형태의 타이어모델에 대한 매개변수들을 보여주고 있으며, Fig.1에는 그 값들을 토대로 얻은 비선형 타이어모델의 미끄럼각과 횡력의 관계를 선형 타이어모델과 비교해서 나타내었다.

2.2 비선형 자동차모델

(Nonlinear Vehicle Model)

노면조건이 정상적이고, 자동차의 횡가속도가 약 $4m/s^2$ 이하인 경우에는 선형 모델을 이용해도 비교적 정확한 결과가 얻어지는 것으로 알려져 있다. 그러나 자동차의 극한적인 주행상태까지도 정량적으로 해석하기 위해서는 비선형 모델이 필요하다. Fig.2와 Table 2는 본 연구에서 사용한 자동차모델과 모델 매개변수들을 보여주고 있다. 비선형 자동차모델에서는 전륜타이어와 후

륜타이어의 미끄럼각 α_f 와 α_r 이 전륜조향각 δ_f 와 후륜조향각 δ_r , 자동차의 무게중심에서의 횡속도 v 와 요속도 γ , 자동차의 무게중심에서 전륜까지의 거리 a 와 후륜까지의 거리 b , 그리고 자동차의 주행속도 u 에 의해서 아래와 같이 표현된다¹⁰⁾.

$$\alpha_f = \delta_f - \tan^{-1}\left(\frac{v + \gamma \cdot a}{u}\right) \tag{3}$$

$$\alpha_r = \delta_r - \tan^{-1}\left(\frac{v - \gamma \cdot b}{u}\right) \tag{4}$$

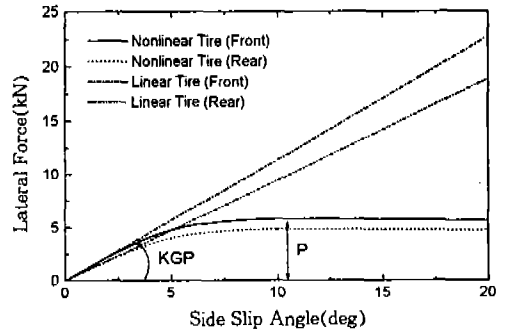


Fig.1 Linear and nonlinear tire models

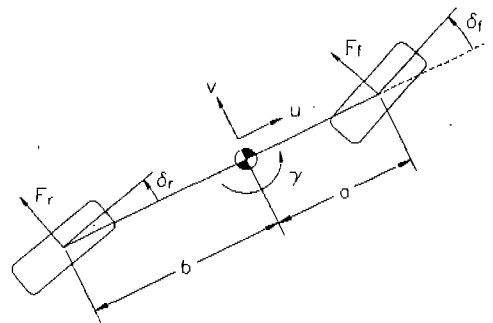


Fig.2 Model of 4WS vehicle

Table 1 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

Table 2 Parameters of vehicle model

m 1,300kg	I_r 1,627kg·m ²
a 1.00m	b 1.45m

또한 미끄럼각과 횡력이 식 (1)과 같은 관계를 갖는 전륜타이어와 후륜타이어의 횡력 F_f 와 F_r 은 식 (3)과 (4)로 주어지는 각각의 미끄럼각 α_f 와 α_r 에 대해서 비선형 타이어의 코너링강성 정의방법인 식 (2)를 적용하면, 다음과 같은 비선형적인 관계식들로 표현된다.

$$F_f = C_f(\alpha_f) \cdot \alpha_f \quad (5)$$

$$F_r = C_r(\alpha_r) \cdot \alpha_r \quad (6)$$

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

그리고 식 (5)와 (6)의 관계로부터 결정되는 타이어의 횡력들은 타이어의 횡방향으로 발생하기 때문에 자동차의 횡방향과 종방향으로 분해하면, Fig.2와 같이 주어지는 자동차의 횡력과 요우모멘트에 대한 평형조건으로부터 아래와 같은 2개의 비선형 운동방정식을 도출할 수 있다.

$$m(\dot{v} + u \cdot \gamma) = C_f(\alpha_f) \cdot \alpha_f \cdot \cos \delta_f + C_r(\alpha_r) \cdot \alpha_r \cdot \cos \delta_r \quad (7)$$

$$I_r \dot{\gamma} = a \cdot C_f(\alpha_f) \cdot \alpha_f \cdot \cos \delta_f - b \cdot C_r(\alpha_r) \cdot \alpha_r \cdot \cos \delta_r \quad (8)$$

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

2.3 비선형 4WS 시스템(Nonlinear Four Wheel Steering System)

식 (7)과 (8)의 형태로 주어지는 비선형 자동차모델로부터 정형화된 4WS 시스템의 제어방법

을 도출하는 것은 어렵다. 따라서 지금까지 개발된 기존의 4WS 시스템들은 선형 자동차모델로부터 정형화된 4WS 제어방법을 도출하였다. 최근 선형 자동차모델과 선형 4WS 시스템을 토대로 타이어의 비선형성에 의한 오차를 신경회로망 기법으로 보상하려는 연구^{6),7)}가 있었지만, 근본적으로 타이어의 비선형성을 극복할 수 있는 형태의 4WS 시스템은 제시하지 못했다.

기존의 4WS 시스템들의 대부분은 자동차의 전륜조향각과 동적 상태에 따라서 후륜을 능동적으로 조향하는 제어방법을 사용하고 있다. 그리고 이러한 4WS 시스템들은 선형 자동차모델을 토대로 자동차의 전륜조향각 δ_f , 주행속도 u , 요우속도 γ 의 함수로써 후륜조향각을 결정하고 있으며, 그 일반적인 형태는 아래와 같이 주어진다⁸⁾.

$$\delta_r = C_1 \cdot \delta_f + C_2 \cdot u \cdot \gamma \quad (9)$$

여기서 C_1 과 C_2 는 전륜조향각 δ_f 와 요우속도 γ 에 대한 후륜조향계수들이다.

특히 과도상태에서도 자동차의 횡미끄럼각을 0으로 유지시킬 수 있는 선형 4WS 시스템은 식 (10)과 같이 주어진다.

$$\delta_r = -\frac{C_{\beta f}}{C_{\beta r}} \cdot \delta_f + \frac{m \cdot u^2 + C_{\beta f} \cdot a - C_{\beta r} \cdot b}{C_{\beta r} \cdot u^2} \cdot u \cdot \gamma \quad (10)$$

여기서 $C_{\beta f}$ 와 $C_{\beta r}$ 은 선형적인 특성을 갖는 전륜타이어와 후륜타이어의 코너링강성을 의미한다.

그러나 본 연구에서는 식 (7)을 이용하여 과도상태에서도 자동차의 횡미끄럼각을 0으로 유지하고, 동시에 타이어의 비선형성을 극복할 수 있는 비선형 4WS 시스템을 식 (11)과 같이 제안하였다.

$$\delta_r = -\frac{C_f(\alpha_f) \cdot \cos \delta_f}{C_r(\alpha_r) \cdot \cos \delta_r} \cdot \delta_f + \frac{1}{C_r(\alpha_r) \cdot \cos \delta_r} \cdot \left\{ (m \cdot u \cdot \gamma + C_f(\alpha_f) \cdot \cos \delta_f \cdot \tan^{-1} \left(\frac{\gamma \cdot a}{u} \right) - C_r(\alpha_r) \cdot \cos \delta_r \cdot \tan^{-1} \left(\frac{\gamma \cdot b}{u} \right)) \right\} \quad (11)$$

여기서 후륜타이어의 미끄럼각 α 도 후륜조향각 δ 의 함수이기 때문에 식 (11)로부터 직접적으로 후륜조향각 δ 을 결정할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 식 (11)의 우변에 있는 후륜조향각 δ 을 Δt 시간전의 후륜조향각 δ^* 로부터 아래와 같은 형태로 추정하였다.

$$\delta_t = \delta^* + \frac{d\delta^*}{dt} \cdot \Delta t \quad (12)$$

3. 주행특성 해석 및 고찰

본 연구에서는 타이어의 비선형성이 4WS 자동차의 주행특성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 스텝 및 정현파 조향입력에 대한 일련의 해석을 수행하였다. 특히 비선형 자동차모델과 선형 자동차모델의 비교, 그리고 비선형 4WS 시스템과 선형 4WS 시스템의 비교를 통해서 타이어의 비선형성의 영향을 분석하였다. 해석시에 사용한 타이어의 특성 매개변수와 자동차의 주요 제원은 Table 1과 2에서 볼 수 있다. 그리고 전륜조향각에 대한 핸들조향각의 비인 기어비(Gear Ratio)는 15.5로 가정하였다.

또한 표현상의 편의를 위해서 선형 자동차모델과 선형 4WS 시스템을 이용한 경우는 4WS-LL, 비선형 자동차모델과 선형 4WS 시스템을 이용한 경우는 4WS-NL, 그리고 비선형 자동차모델과 비선형 4WS 시스템을 이용한 경우는 4WS-NN으로 각각 표기하였다.

3.1 스텝 응답특성

타이어의 비선형성이 4WS 자동차의 스텝 응답특성에 미치는 영향을 해석하기 위해서 자동차의 주행시작 2초 후부터 0.9초 동안 핸들을 90° 회전시키는 형태의 스텝 조향입력을 사용하였다. 그리고 Fig.3, 4, 5에는 4WS 자동차의 주행속도가 40, 80, 120km/h일 때 해석한 후륜조향각, 주행궤적, 횡미끄럼각, 횡가속도, 요우속도 등을 제시하였다.

동일한 전륜조향각에 대해서 후륜조향각이 고

속주행할수록 동위상측으로 증가하는 4WS 시스템 특유의 경향을 해석결과로부터 확인할 수 있다. 또한 저속주행(40km/h)인 경우에는 후륜조향각의 역위상 정도가 4WS-NL, 4WS-LL, 4WS-NN, 4WS-NN의 순으로 약간씩 크게 나타났지만, 고속주행(80, 120km/h)인 경우에는 후륜조향각의 동위상 정도가 4WS-LL, 4WS-NN, 4WS-NL의 순으로 크게 나타났다. 특히 이러한 해석결과는 다음과 같은 세가지 사실을 잘 보여주고 있다.

- (1) 4WS-NN은 타이어의 비선형성 때문에 4WS-LL보다 타이어가 지지할 수 있는 횡력이 작아서 더 큰 선회반경을 갖게 된다. 따라서 4WS-NN은 자동차의 횡미끄럼각을 0으로 유지시키는 후륜조향각이 4WS-LL보다 작다.
- (2) 4WS-NL의 요우속도는 타이어의 비선형성에 기인하여 4WS-LL보다 작고, 그 결과로 4WS-NL은 4WS-LL보다 식 (10)에 제시한 선형 4WS 시스템의 동위상 관련항(요우속도 관련항)의 값이 작아진다. 따라서 4WS-NL은 4WS-LL보다 저속주행시에는 후륜조향각의 역위상 정도가 크고, 고속주행시에는 후륜조향각의 동위상 정도가 작다.
- (3) 비선형 자동차가 고속주행할수록 타이어의 비선형성, 특히 후륜타이어의 코너링강성이 감소하는 경향 때문에 식 (11)에 제시한 비선형 4WS 시스템의 동위상 관련항(요우속도 관련항)의 값이 식 (10)에 제시한 선형 4WS 시스템보다 커진다. 따라서 고속주행시의 후륜조향각은 4WS-NN이 4WS-NL보다 크다.

또한 자동차의 선회반경은 고속주행할수록 커지며, 4WS-NN, 4WS-NL, 4WS-LL의 순으로 크다는 점, 그리고 자동차의 횡가속도와 요우속도는 선회반경과 반비례 관계에 있다는 점은 해석결과로부터 확인할 수 있다. 특히 4WS-NN과 4WS-LL은 자동차의 횡미끄럼각을 0으로 유지시키지만, 4WS-NL의 횡미끄럼각은 고속주행할수록 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 해석결

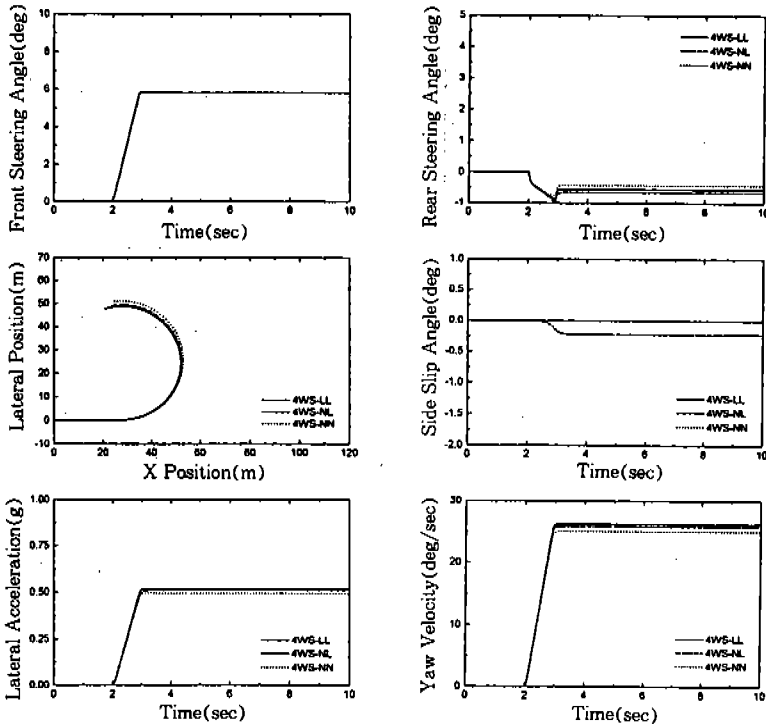


Fig.3 Step responses of 4WS vehicles ($u=40\text{km/h}$)

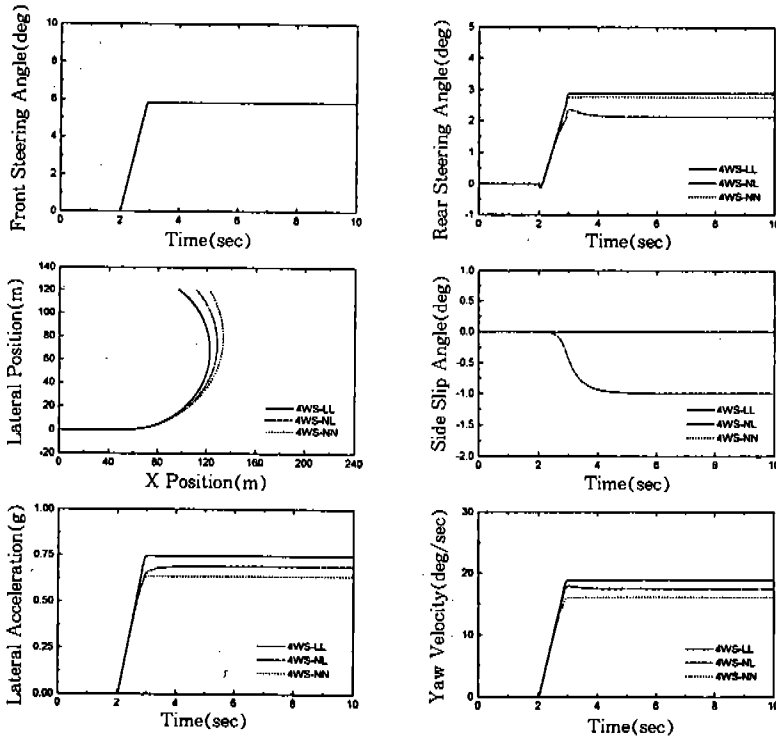


Fig.4 Step responses of 4WS vehicles ($u=80\text{km/h}$)

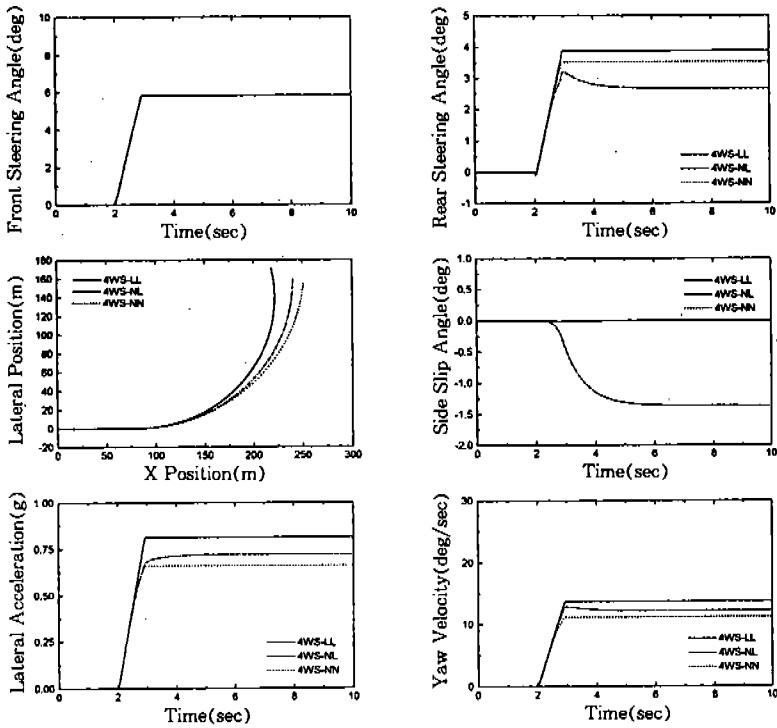


Fig.5 Step responses of 4WS vehicles($u=120\text{km/h}$)

과는 본 연구에서 제안한 비선형 4WS 시스템이 비선형 자동차를 효과적으로 제어할 수 있다는 사실, 그리고 기존의 선형 4WS 시스템으로 비선형 자동차를 제어하는 경우에는 횡미끄럼각을 0으로 만들 수 없다는 사실을 동시에 보여준다.

4. 정현파 응답특성

타이어의 비선형성이 4WS 자동차의 정현파 응답특성에 미치는 영향을 해석하기 위해서 자동차의 주행시작 1초 후부터 2초 동안 0.5Hz의 주기와 90° 의 진폭으로 핸들을 조향하는 형태의 정현파 조향입력을 사용하였다. 그리고 Fig.6, 7, 8에는 4WS 자동차의 주행속도가 40, 80, 120km/h일 때 해석한 후륜조향각, 주행궤적, 횡미끄럼각, 횡가속도, 요우속도 등을 제시하였다.

동일한 전륜조향각에 대해서 저속주행(40km/h)인 경우에는 후륜조향각의 역위상 정도가 4WS-NL, 4WS-LL, 4WS-NN의 순으로 약간씩 크게

나타나지만, 고속주행(80, 120km/h)인 경우에는 후륜조향각의 동위상 정도가 4WS-LL, 4WS-NN, 4WS-NL의 순으로 크게 나타났다. 이러한 경향은 앞서의 스텝 응답특성의 경우와 동일하다.

또한 자동차의 횡변위는 고속주행할수록 커지며, 4WS-LL, 4WS-NL, 4WS-NN의 순으로 크다는 점, 그리고 자동차의 횡가속도와 요우속도의 크기는 횡변위와 정반대라는 점을 해석결과에서 볼 수 있다. 특히 본 연구에서 제안한 비선형 4WS 시스템이 비선형 자동차를 효과적으로 제어할 수 있다는 사실, 그리고 기존의 선형 4WS 시스템으로 비선형 자동차를 제어하는 경우에는 횡미끄럼각을 0으로 만들 수 없다는 사실은 앞서의 스텝 응답특성의 경우와 마찬가지로 4WS-NN과 4WS-LL의 경우에는 자동차의 횡미끄럼각이 0이지만, 4WS-NL의 경우에는 고속주행할수록 횡미끄럼각이 증가한다는 해석결과로부터 확인할 수 있다.

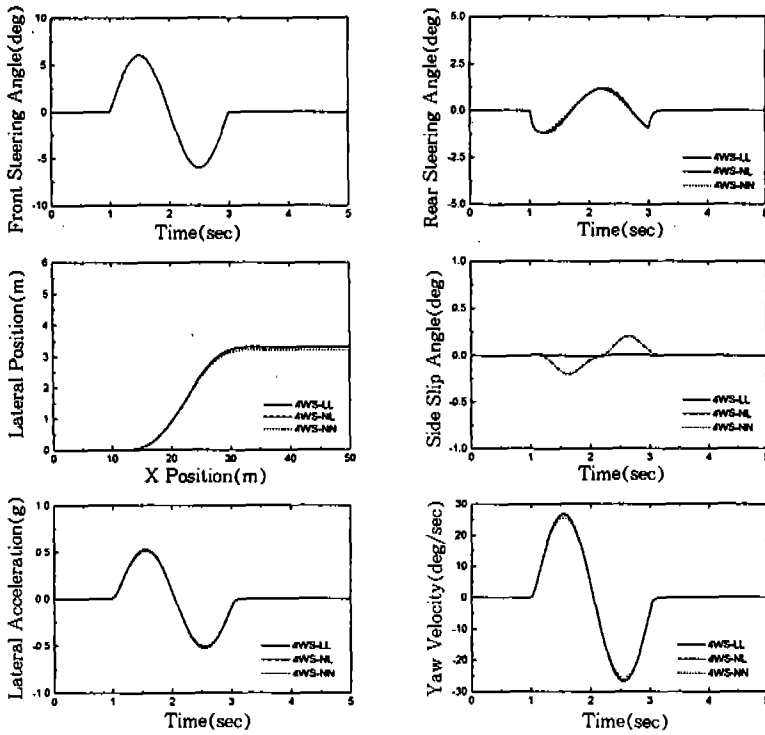


Fig.6 Sinusoidal responses of 4WS vehicles ($u=40\text{km/h}$)

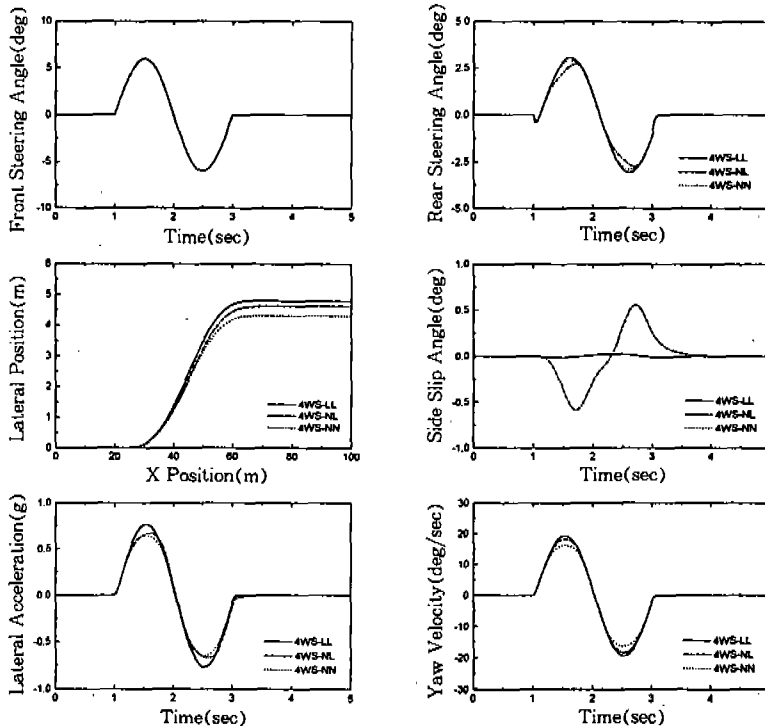


Fig.7 Sinusoidal responses of 4WS vehicles ($u=80\text{km/h}$)

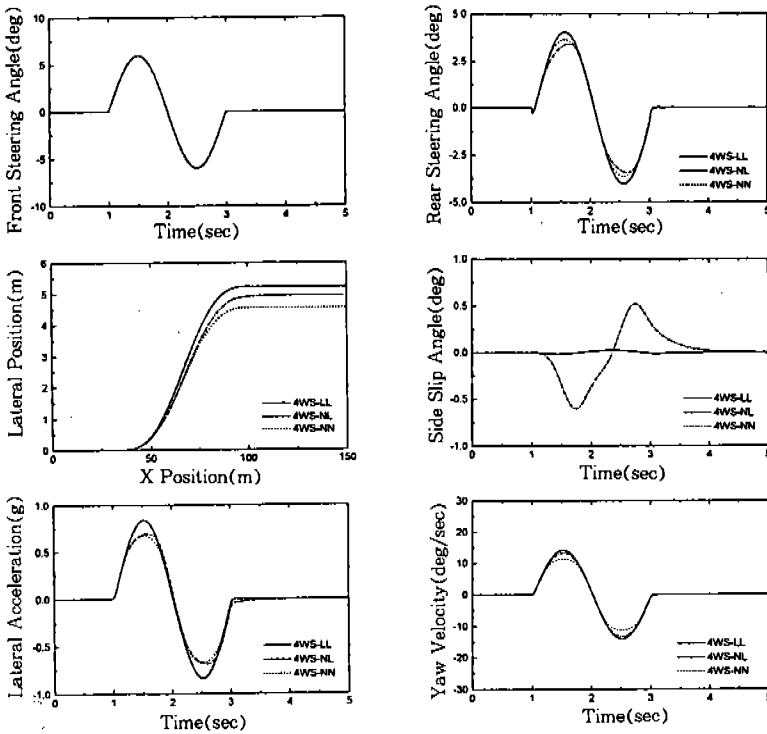


Fig.8 Sinusoidal responses of 4WS vehicles($u=120\text{km/h}$)

5. 결 론

본 연구에서는 타이어의 비선형성이 4WS 자동차의 주행특성에 미치는 영향을 해석하기 위하여 비선형 타이어의 코너링강성을 새롭게 정의하였고, 그 개념을 토대로 비선형 자동차모델과 비선형 4WS 시스템을 구성하였다. 특히 타이어의 특성과 4WS 자동차의 주행특성간의 관계는 선형 자동차모델과 선형 4WS 시스템, 비선형 자동차모델과 선형 4WS 시스템, 그리고 비선형 자동차모델과 비선형 4WS 시스템을 이용해서 비교·분석하였다. 본 연구를 통해서 얻은 주요 결과들을 정리하면, 다음과 같다.

1) 긴급 주행상태에서 나타나는 타이어의 비선형성을 효과적으로 표현하기 위한 목적으로 매직포뮬러 형태의 타이어모델을 이용하여 비선형 타이어의 코너링강성을 정의하였다.

2) 비선형 타이어의 코너링강성을 토대로 긴급 주행상태의 자동차 거동을 효과적으로 해석 및 제어할 수 있는 비선형 자동차모델과 비선형 4WS 시스템을 제안하였다. 특히 본 연구에서 제안한 비선형 4WS 시스템은 비선형 자동차의 횡미끄럼각을 0으로 유지시킨다.

3) 기존의 선형 4WS 시스템을 이용해서 비선형 자동차를 제어하는 경우에는 자동차의 횡미끄럼각이 발생하며, 그 크기는 고속주행할수록 증가한다.

4) 비선형 자동차모델과 비선형 4WS 시스템(4WS-NN)을 통해서 얻게 되는 후륜조향각은 선형 자동차모델과 선형 4WS 시스템(4WS-LL)을 통해서 얻게 되는 후륜조향각보다 작다.

5) 비선형 자동차모델과 선형 4WS 시스템(4WS-NL)을 통해서 얻게 되는 후륜조향

- 각은 선형 자동차 모델과 선형 4WS 시스템(4WS-NL)을 통해서 얻게 되는 후륜조향각보다 저속주행시에는 역위상 정도가 크고, 고속주행시에는 동위상 정도가 작다.
- 6) 비선형 자동차모델과 비선형 4WS 시스템(4WS-NN)을 통해서 얻게 되는 후륜조향각은 비선형 자동차모델과 선형 4WS 시스템(4WS-NL)을 통해서 얻게 되는 후륜조향각보다 고속주행시의 동위상 정도가 크다.

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, 1989, pp. 151~186.
2. T. Eguchi, et al., "Development of Super HICAS", a New Rear Wheel Steering System with Phasereversal Control", SAE-Paper 891978.
3. K. H. Senger and W. Schwartz, "The Influence of a Four Wheel Steering System on the Stability Behaviour of a Vehicle-Driver System", Proc. 10th IAVSD Symposium, Prague, CSSR, 1987, pp. 388~402.
4. 심정수, 허승진, 유영면, "4륜조향시스템이 차량의 주행역학적 특성에 미치는 영향", 한국자동차공학회지, Vol.12, No.3, 1990.
5. 이영화, 김석일, 서명원, 김대영, 김동룡, "운전자-자동차모델을 이용한 4륜조향자동차의 주행특성 해석", 한국자동차공학회지, Vol.3, No.3, 1995, pp. 119~128.
6. T. Shiotsuka, A. Nagamatsu and K. Yoshida, "Adaptive Control of 4WS System by Using Neural Network", AVEC-Paper 923046.
7. M. Nagai, E. Ueda and A. Moran, "Integration of Linear Systems and Neural Networks for the Design of Nonlinear Four-Wheel-Steering Systems", AVEC-Paper 9438187.
8. H. P. Pacejka, et al., "A New Tire Model with an Application in Vehicle Dynamics Studies", SAE-Paper 890087.
9. M. Makita and S. Torii, "An Analysis of Tire Cornering Characteristics using a Magic Formula Tire Model", AVEC-Paper 923063.
10. R. W. Allen, T. J. Rosenthal and H. T. Szostal, "Steady State and Transient Analysis of Ground Vehicle Handling", SAE-Paper 870495.