

〈논 문〉 SAE NO. 943760

Bicycle 모델을 이용한 4륜 조향 차량의 동역학 해석

Linearized Dynamic Analysis of a Four-Wheel Steering Vehicle

이 영 화,* 김 석 일,** 서 명 원,*** 손 희 성,*** 김 성 하***
Y. H. Lee, S. I. Kim, M. W. Suh, H. S. Son, S. H. Kim

ABSTRACT

Recently, four-wheel steering systems have been developed and studied as one of the latest automotive technologies for improving the handling characteristics of a vehicle. In much of the proposed four-wheel steering systems, the side slip angle at the vehicle's center of gravity is maintained at zero. This approach allows the greater maneuverability at low speed by means of counter-phase rear steering and the improved stability at high speed through same-phase rear steering. In this paper, the effects of several four-wheel steering systems are studied and discussed on the responsiveness and stability of the vehicle by using the linear analysis. Especially, the effects of the cornering stiffnesses of both front and rear wheels are investigated on the yaw velocity gain and critical speed of the vehicle.

주요기술용어 : Four-Wheel Steering System(4륜 조향 시스템), Cornering Stiffness(코너링 강성), Stability(안정성), Responsiveness(응답성), Lateral Acceleration(횡가속도), Yaw Velocity(요우 속도), Slip Angle(미끄럼각), Critical Speed(위험속도)

1. 서 론

기존의 2륜 조향 차량을 선회시키기 위해서 조향 핸들을 회전시키면, 전륜의 방향이 변경되고, 전륜에서 횡력(Lateral Force)이 유발된다. 이러한 전륜의 횡력은 차량의 무게중심에 대한 요우(Yaw) 운동을 야기하고, 결과적으로 차량의 방향을 변경시킨다. 이때에 방향이 고정되어 있던 후륜은 차량과 같은 방향으로 회전하게 되며,

후륜에서 횡력이 유발되어서 차량의 선회가 이루어지게 된다. 그러나 방향 변화를 시작하는 요우 운동과 실제로 차량을 선회시키는 전·후륜의 횡력이 동시에 발생하지 않기 때문에 조향 핸들의 회전에서 차량의 선회까지는 시간 지연이 있게 된다. 따라서 이러한 2륜 조향 시스템의 문제점을 개선하고, 차량의 주행 안정성을 향상시키기 위한 방법의 하나로서 4륜 조향 시스템은 최근 많은 주목을 받고 있다.

* 한국항공대학교 대학원
** 한국항공대학교 기계설계학과
*** 기아기술센터 차량연구실

지금까지 발표된 대부분의 4륜 조향 시스템에 대한 연구¹⁻¹²⁾에서는 고속 주행 시에는 후륜을 전륜과 동위상으로 조향시킴으로써 차량의 응답성을 증진시키고, 저속 주행 시에는 후륜을 전륜과 역위상으로 조향시킴으로써 차량의 조종성을 증진시키는 후륜 조향방법을 사용하고 있다. 그리고 제안된 4륜 조향 시스템들은 오픈 루프 시스템(Open Loop System)과 크로즈드 루프 시스템(Closed Loop System)으로 분류할 수 있다. 오픈 루프 시스템에서는 후륜 조향각이 일반적으로 차량의 주행속도의 함수인 이득(Gain)과 전륜 조향각의 곱으로 결정되지만, 크로즈드 루프 시스템에서는 후륜 조향각이 미끄럼각(Slip Angle), 횡속도, 또는 요우 속도와 같은 차량 상태 및 전륜 조향각에 의해서 결정되고 있다.

본 연구의 목적은 이러한 4륜 조향 시스템들이 차량의 응답성과 안정성에 미치는 영향을 해석적으로 고찰하는 데 있다. 특히 차량의 횡가속도와 요우 속도에 대한 과도 응답특성과 주파수 응답특성 외에도 요우 속도의 이득특성과 위험속도(Critical Speed)에 대한 전륜 타이어나 후륜 타이어나의 코너링 강성의 영향 등과 관련된 차량의 주행특성들을 비교·검토하였다.

2. 4륜 조향 차량의 동역학 모델

2.1 단순화된 차량 모델과 타이어 모델

일반적으로 극한적인 주행상태의 동적 특성을 해석하기 위해서는 비선형 모델이 필요하다. 그러나 일반적인 주행특성을 해석하는 경우, 즉 횡가속도가 약 $4m/sec^2$ 이하일 때에는 2자유도의 선형 모델(Bicycle Model)에 의해서도 매우 정확한 해석결과를 얻을 수 있다. 이러한 선형 모델에서는 차축의 좌측 바퀴와 우측 바퀴를 길이 방향의 차량 중심선에서 하나의 등가 바퀴로 대체시키고 있으며, 현가운동, 횡력 전달, 전진방향의 가·감속 등과 관련된 많은 사항들을 무시하고 있기 때문에 차량의 동적 성능을 쉽게 계산할 수 있다. 그리고 선형 모델에서는 자유도로서 차량의 횡변위(Lateral Displacement)와 요우를 사용하고 있다. Fig.1은 2자유도의 선형 모

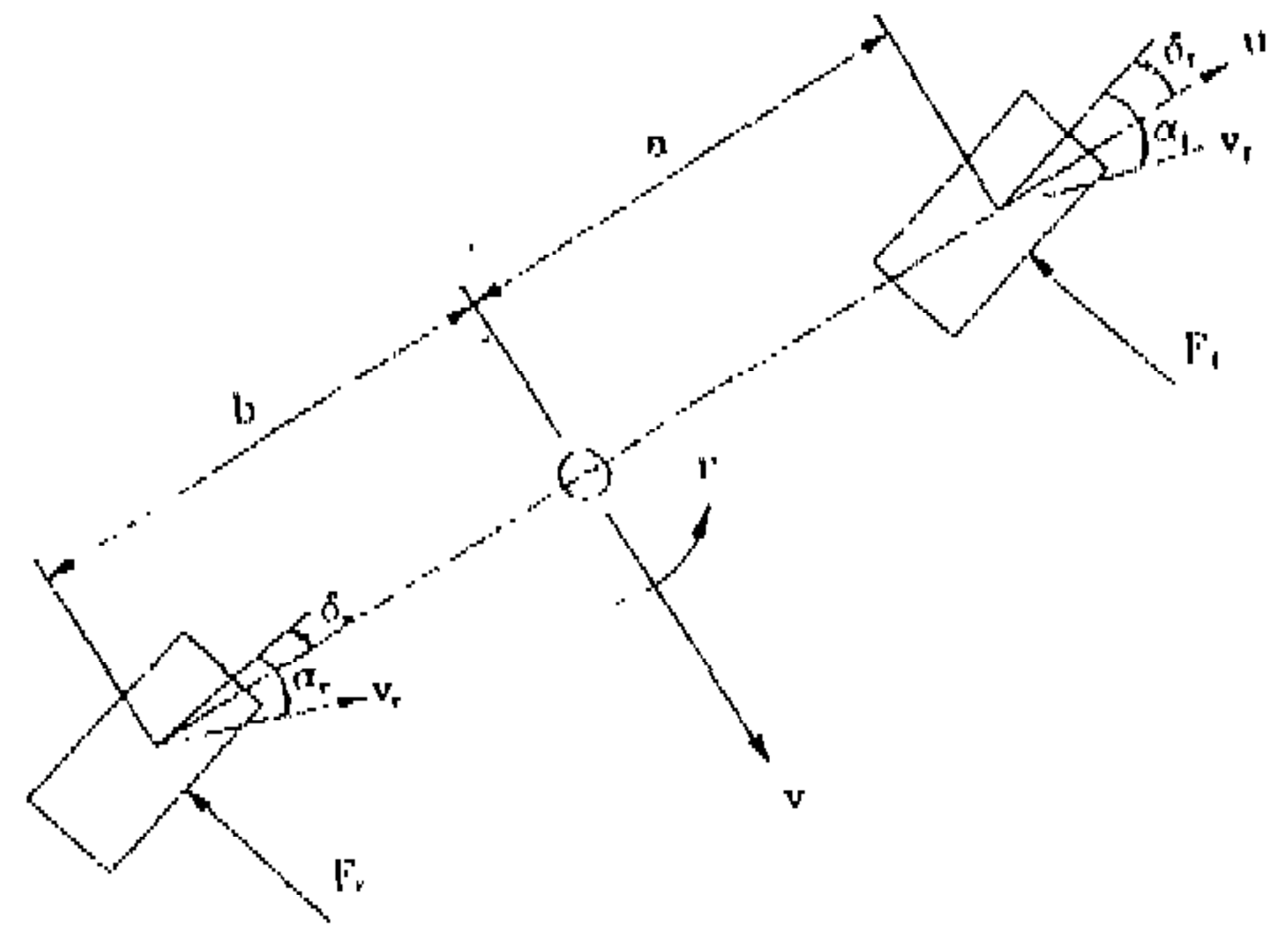


Fig.1 Simple Bicycle Model of Vehicle

델을 보여주고 있다.

이러한 차량 모델과 함께 사용할 수 있는 가장 단순한 타이어(Tire)의 모델은 미끄럼각과 비례하는 힘을 발생시키는 선형 모델이다. 보다 복잡한 타이어의 모델을 사용할 수 있지만, 그 모델은 일반적으로 비선형적이기 때문에 차량 모델의 비선형적인 표현을 초래하게 된다.

Fig.1에서 볼 수 있는 전륜 타이어나의 미끄럼각 α_f 와 후륜 타이어나의 미끄럼각 α_r 은, 전륜 조향각 δ_f , 후륜 조향각 δ_r , 차량의 무게중심에서의 횡속도 v 와 요우 속도 r , 차량의 무게중심에서 전륜까지의 거리 a 와 후륜까지의 거리 b , 그리고 차량의 주행속도 u 에 의해서 아래와 같이 표현된다.

$$\alpha_f = \delta_f - \frac{v + ra}{u} \quad (1)$$

$$\alpha_r = \delta_r - \frac{v - rb}{u} \quad (2)$$

선형적인 타이어의 모델을 이용하는 관계로 전륜 타이어나와 후륜 타이어나에 작용하는 노면 접촉부위의 반력(Cornering Force)들인 F_f 와 F_r 은 식 (1)과 (2)로 주어지는 미끄럼각 α_f 와 α_r 에 대해서 다음과 같은 관계를 갖는다.

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

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

여기서 C_f 와 C_r 은 전륜 타이어와 후륜 타이어의 코너링 강성(Cornering Stiffness)들을 각각 의미한다.

따라서 식 (3)과 (4)의 관계를 이용하면, Fig.1과 같이 주어지는 차량의 횡력 및 요우 모멘트에 대한 평형조건들로부터 다음과 같은 2개의 운동 방정식들을 도출할 수 있다.

$$M(\dot{v} + ur) = C_f \cdot a_f + C_r \cdot a_r \quad (5)$$

$$I_z \dot{r} = C_f \cdot a \cdot \alpha_f - C_r \cdot b \cdot \alpha_r \quad (6)$$

여기서 M 은 차량의 질량, I_z 는 차량의 요우 관성 모멘트이다.

식 (1)과 (2)의 관계를 식 (5)와 (6)에 대입해서 정리하면, 선형 모델의 운동방정식들은 아래와 같은 행렬식의 형태로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_f \\ \delta_r \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서 시스템 행렬 A 와 입력 행렬 B 의 요소들은 아래와 같이 주어진다.

$$A_{11} = \frac{-(C_f + C_r)}{Mu} \quad A_{12} = -\frac{(aC_f - bC_r)}{Mu} - u$$

$$A_{21} = \frac{-(aC_f - bC_r)}{I_z u} \quad A_{22} = \frac{-(a^2 C_f + b^2 C_r)}{I_z u}$$

$$B_{11} = \frac{C_f}{M} \quad B_{12} = \frac{C_r}{M}$$

$$B_{21} = \frac{aC_f}{I_z} \quad B_{22} = -\frac{bC_r}{I_z}$$

2.2 4륜 조향 시스템의 제어 알고리즘(Algorithm)

4륜 조향 시스템은 기본적으로 전륜 조향각과 차량의 동적 상태에 따라서 후륜을 조향하는 방법을 사용한다. 특히 지금까지 제안된 4륜 조향 방법들은 전륜 조향각 δ_f 와 차량의 무게중심에서의 요우 속도 r 의 함수로써 후륜 조향각을 표현할 수 있는데, 이를 일반적인 형태로 표시하면 다음과 같다.

$$\delta_r = C_1 \cdot \delta_f + C_2 \cdot u \cdot r \quad (8)$$

Table 1은 4륜 조향 시스템의 제어 알고리즘으로 제안된 대표적인 예들을 보여주고 있다. 시스템 0은 종래의 2륜 조향 시스템을 의미한다. 시스템 1¹⁾과 시스템 2²⁾는 차량의 무게중심에서의 미끄럼각을 항상 0으로 만들기 위해서 전륜 조향각과 요우 속도로부터 후륜 조향각을 결정하는 크로즈드 루프 방식의 4륜 조향 시스템이다. 특히 시스템 1은 차량의 무게중심에서 전륜 및 후륜까지의 거리가 서로 같다는 가정 하에서 얻어진

Table 1 Typical Four-Wheel Steering Systems

System	C_1	C_2
0	0	0
1	-1	$\frac{M}{(a+b)} \cdot \left(\frac{b}{C_f} + \frac{a}{C_r} \right)$
2	$-\frac{C_f}{C_r}$	$\frac{Mu^2 + Ca - C_r b}{Cu^2}$
3	$\frac{-C_f I_z \cdot s + CaMu^2 - C_r C_r b(a+b)}{C_r I_z \cdot s + C_r bMu^2 + C_r C_r a(a+b)}$	0
4	$\frac{-CaMu^2 - C_r C_r b(a+b)}{C_r bMu^2 + C_r C_r a(a+b)}$	0
5	0	$\frac{M}{(a+b)} \cdot \left(\frac{a}{C_r} - \frac{b}{C_f} \right)$

4륜 조향방법이다. 시스템 3³⁾과 시스템 4⁴⁻⁶⁾는 각각 과도상태(시스템 3의 계수에 포함되어 있는 s 는 Laplace 변수임)와 정상상태에 있는 차량의 무게중심에서의 미끄럼각을 0으로 만들기 위해서 전륜 조향각으로부터 후륜 조향각을 결정하는 오픈 루프 방식의 4륜 조향 시스템이다. 그리고 앞에서 언급한 4륜 조향 시스템들은 차량의 무게중심에서의 미끄럼각을 감소시키는 방법이지만, 시스템 5⁷⁾는 차량이 정상상태에서 항상 뉴트럴(Neutral) 조향특성을 갖게 만드는 4륜 조향방법으로서 크로즈드 루프 시스템의 하나이다. 특히 이 시스템의 조향특성은 Table 1에서 알 수 있듯이 차량의 무게중심의 위치와 전·후륜 타이어의 코너링 강성들에 의한 영향을 받지 않는다는 특징을 가지고 있다.

3. 4륜 조향 차량의 동역학 해석결과 및 고찰

본 연구에서는 앞에서 언급한 차량 모델과 4륜 조향방법들을 토대로 차량의 횡가속도와 요우 속도에 대한 과도 응답특성과 주파수 응답특성, 차량의 주행속도와 타이어의 코너링 강성에 대한 요우 속도의 이득특성, 타이어의 코너링 강성에 대한 위험속도 등과 관련된 차량의 조향특성들을 해석하였다.

본 연구에서 사용한 차량의 제원은 Table 2에서 볼 수 있다. 그리고 해석결과를 얻기 위해서 IBM 486 기종의 컴퓨터와 MATLAB을 사용하였다.

Table 2 Values of Model Parameters for Four-Wheel Steering Car

M 1,300kg	I_z 1,627kg · m ²
a 1.00m	b 1.45m
C_f 65,100N/rad	C_r 54,100N/rad

3.1 과도 응답특성(Transient Response Characteristics)

Table 1에 제시된 조향 시스템들을 적용한 차량의 과도 응답특성, 즉 횡가속도, 요우 속도, 미끄럼각에 대한 해석결과는 Fig.2에서 볼 수 있다. 해석에서는 전륜 조향각 δ_f 에 대한 핸들 조향각 δ_h 의 비가 15.5, 핸들의 각속도 $\dot{\delta}_h$ 가 300 °/sec일 때 정상상태에서의 횡가속도가 4m/sec²이 되도록 램프(Ramp) 형태의 조향 입력을 가하였으며, 차량의 주행속도 u 를 80km/h로 주었다.

시스템 1, 2, 3은 다른 시스템들에 비해서 횡가속도와 요우 속도의 응답성이 매우 빠르고, 횡가속도와 요우 속도 사이의 응답시간 지연이 거의 없는 것으로 나타났다. 또한 크로즈드 루프 방식인 시스템 2와 오픈 루프 방식인 시스템 3은 모든 과도 응답특성들이 서로 같은 것으로 나타났다는데, 이는 4륜 조향방법의 표현만이 다를 뿐 전제조건 및 유도과정이 모두 같다는 데 그 원인이 있다. 특히 오픈 루프 방식인 시스템 3은 크로즈드 루프 방식인 시스템 1과 시스템 2에서 요구되는 요우 속도 검출기를 필요로 하지 않기 때문에 상대적으로 시스템의 구성비용이 저렴하

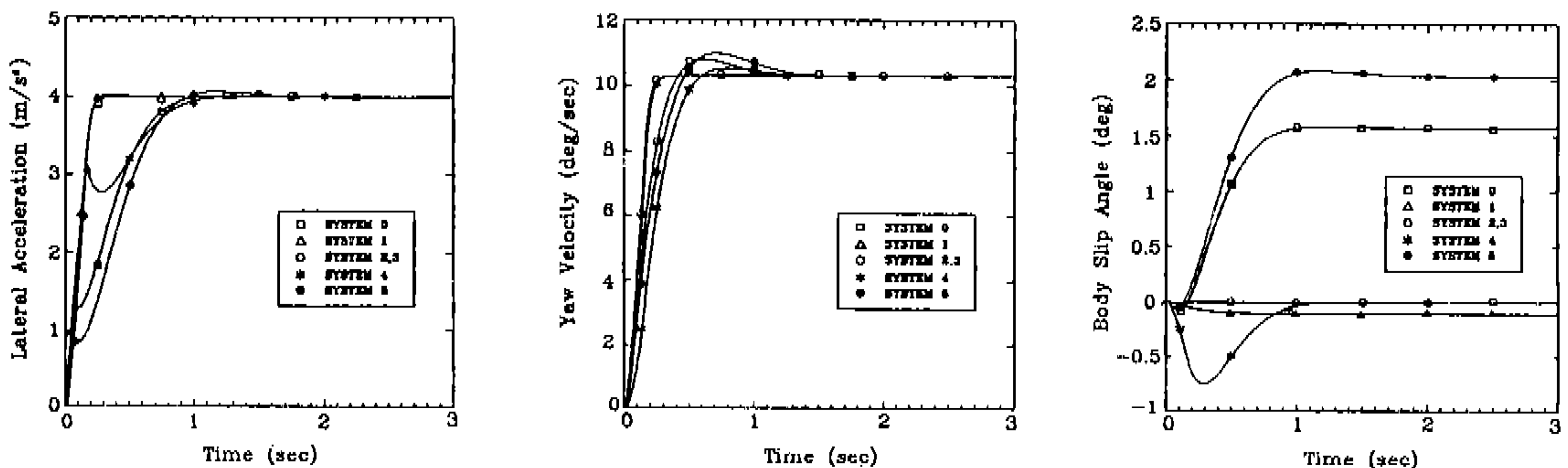


Fig.2 Transient Response Characteristics

며, 결과적으로 가장 유용한 시스템이라고 판단된다.

시스템 0, 4, 5는 요우 속도가 횡가속도에 비해서 응답성이 약 2배정도 빠르기 때문에 횡가속도와 요우 속도 사이의 응답시간 지연이 비교적 크며, 결과적으로 주행 성능이 시스템 1, 2, 3보다 상대적으로 나쁜 것으로 나타났다. 또한 4륜 조향 시스템인 시스템 4와 시스템 5는 2륜 조향 시스템인 시스템 0보다 오히려 요우 속도의 응답성이 나쁘며, 항상 뉴트럴 조향을 구현하는 시스템 5가 횡가속도와 요우 속도에서 모두 가장 큰 오버슈트를 발생시키기 때문에 안정성이 가장 떨어짐을 알 수 있다.

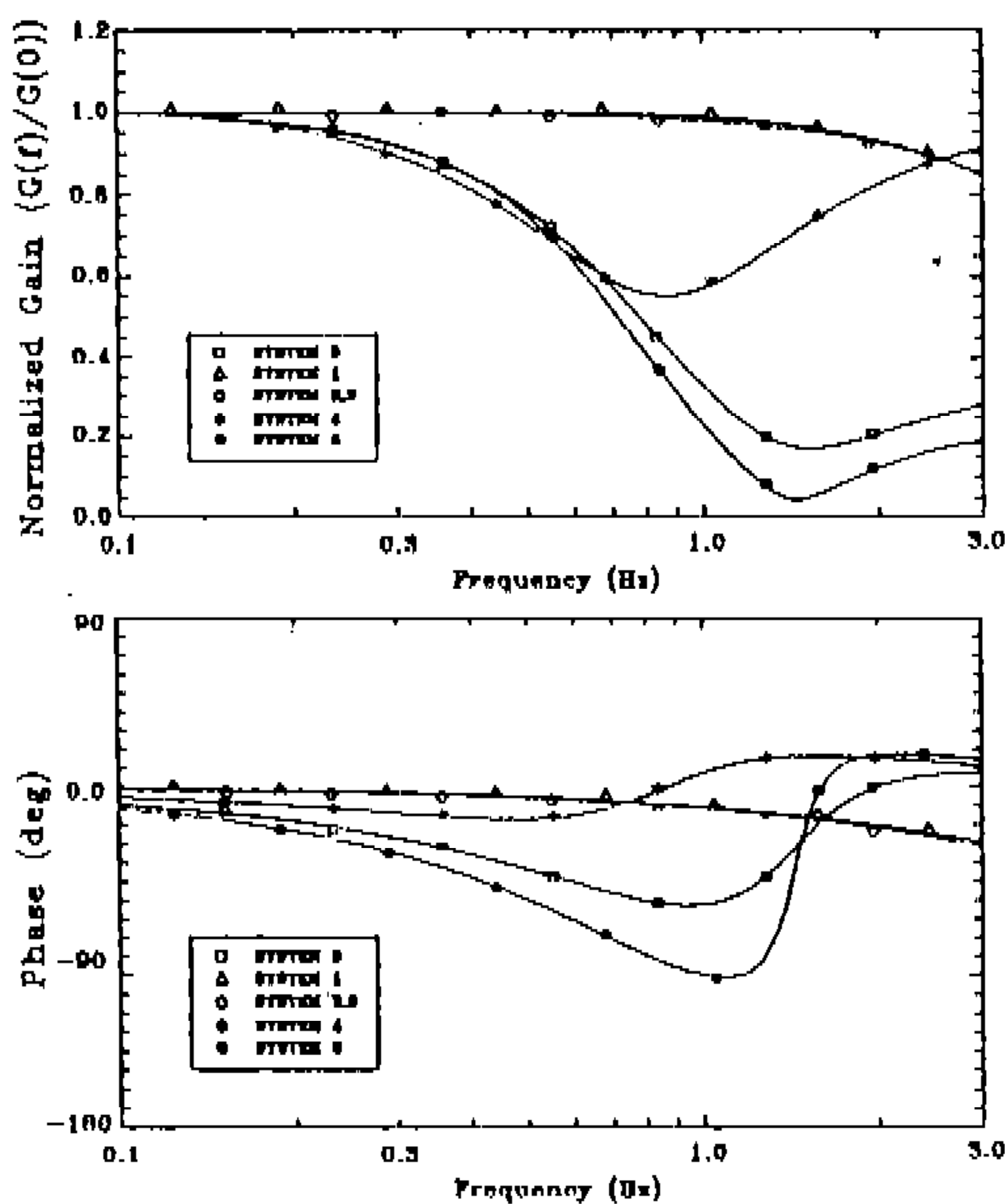
차체의 미끄럼각에 대한 특성도 시스템 2와 시스템 3이 가장 우수한 결과를 보여주고 있는데, 이는 항상 미끄럼각을 0으로 만들어 주는 4륜 조향방법을 사용했기 때문이다. 정상상태에서의 미끄럼각을 0으로 만드는 시스템 4의 경우에는 핸들을 조향하고 나서 약 1초 후에 미끄럼각이 0으로 되고 있으며, 시스템 1은 차량의 무게중심에서 전륜 및 후륜까지의 거리가 서로 같다는 가정을 사용하였기 때문에 미끄럼각이 0으로

되지 않는다. 특히 뉴트럴 조향을 지향하는 시스템 5의 경우가 가장 큰 미끄럼각을 나타내고 있다.

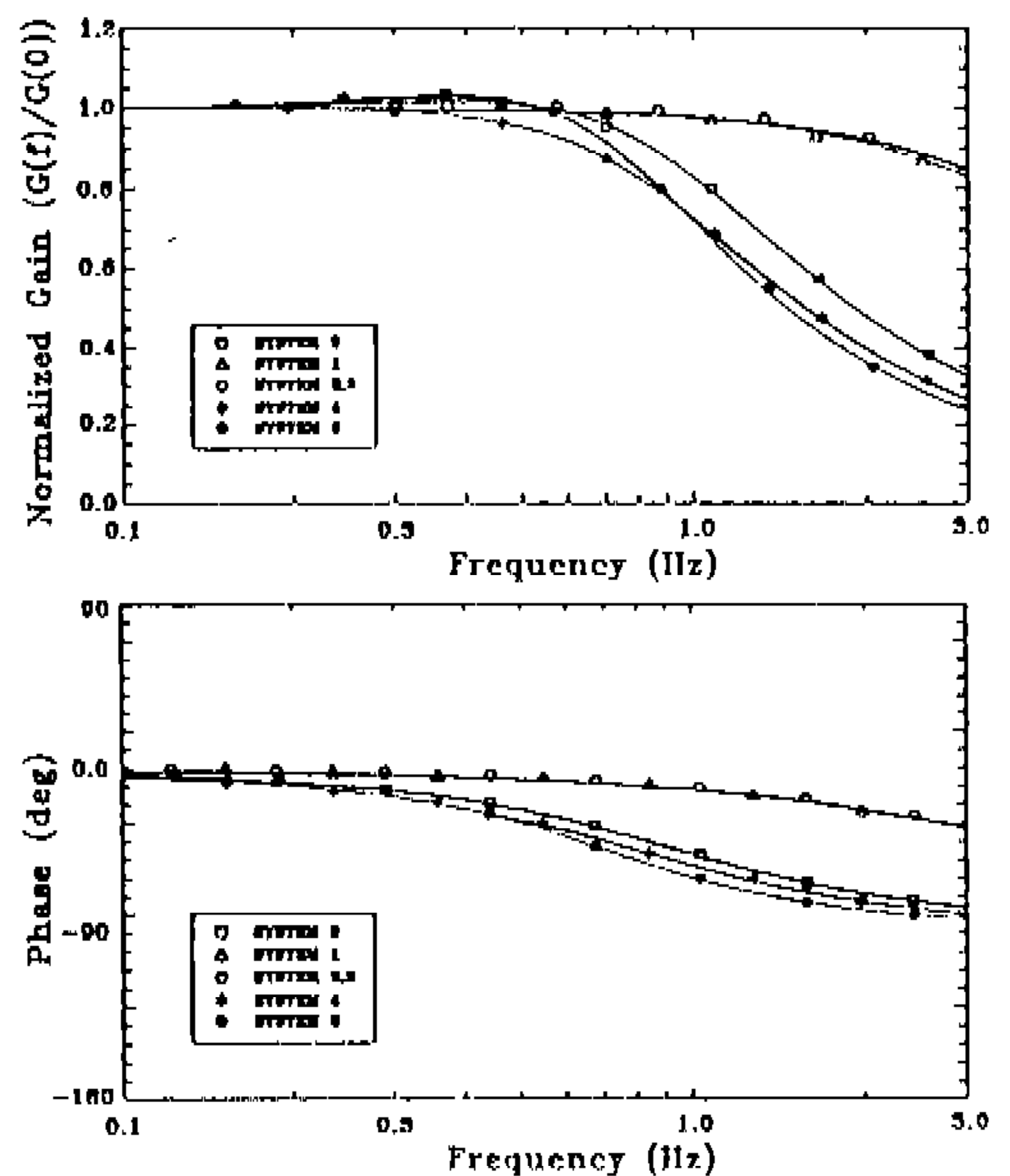
3.2 주파수 응답특성(Frequency Response Characteristics)

Fig.3은 Table 1에 제시된 조향 시스템들을 적용한 차량의 주파수 응답특성, 즉 횡가속도와 요우 속도에 대한 해석결과를 보여주고 있다. 해석은 차량의 주행속도 u 가 80km/h일 경우에 수행되었다.

시스템 1, 2, 3에서는 횡가속도와 요우 속도의 이득이 약 2Hz까지 거의 일정한 값으로 유지되고 있으며, 핸들의 조향 입력에 대한 횡가속도와 요우 속도의 위상 지연이 전반적으로 비교적 작기 때문에 응답성이 우수함을 알 수 있다. 일반적으로 운전자가 정상 주행 시에 입력하는 핸들의 조향 주파수가 1Hz 이하이고, 긴급 주행 시에 입력하는 핸들의 조향 주파수가 2Hz 이하라는 점을 고려하면, 이러한 시스템들은 만족할 만한 특성을 가지고 있는 것으로 판단된다. 특히 시스템 2와 시스템 3은 모든 주파수 응답특성이



(a) Lateral Acceleration



(b) Yaw Velocity

Fig.3 Frequency Response Characteristics

서로 같고, 횡가속도와 요우 속도 사이의 위상 지연이 없는 것으로 나타났다. 이러한 결과들은 과도 응답특성에 대한 해석결과들과 잘 일치하고 있다.

시스템 0, 4, 5의 경우에는 횡가속도와 요우 속도의 이득이 각각 약 0.2Hz와 약 0.7Hz까지만 거의 일정한 값으로 유지되고 있으며, 핸들의 조향 입력에 대한 횡가속도의 위상 지연은 주파수가 높아질수록 증가하다가 감소하는 데 비해서, 요우 속도의 위상 지연은 계속 증가하는 경향을 보이고 있다. 따라서 주파수가 높아질수록 횡가속도와 요우 속도 사이의 위상 지연이 커지기 때문에 이러한 시스템들을 통해서 긴급 주행 시에 대한 주행 안정성을 확보한다는 것은 매우 어렵다.

3.3 요우 속도의 이득특성(Yaw Velocity Gain Characteristics)

요우 속도의 이득 G_{yaw} 는 핸들의 조향각에 대한 요우 속도의 비로 정의되며, 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$G_{yaw} = \frac{r}{\delta_h} \tag{9}$$

여기서 δ_h 는 핸들의 조향각을 의미한다.

Fig.4는 200km/h까지의 주행속도에 대한 차량의 요우 속도의 이득특성을 보여주고 있다. 뉴트럴 조향을 구현하는 시스템 5는 예측한 대로 조향특성을 나타내고 있지만, 시스템 1, 2, 3, 4의 경우에는 저속에서 오버(Over) 조향특성, 고속에서 언더(Under) 조향특성을 나타내고 있으며, 특히 시스템 2, 3, 4의 요우 속도의 이득특성은

서로 같게 나타나고 있다. 그리고 2륜 조향 시스템인 시스템 0은 전체적으로 언더 조향특성을 가지고 있다. 또한 시스템 0, 1, 2, 3, 4는 차량의 주행속도가 빠를수록 점점 언더 조향되는 경향이 있으며, 고속 영역에서는 시스템 1, 2, 3, 4가 2륜 조향 차량인 시스템 0에 비해서 매우 큰 언더 조향특성을 보여주고 있다. 따라서 시스템 1, 2, 3, 4의 경우에는 고속 주행하면서 커브길에서 가속 또는 감속을 할 때 2륜 조향 시스템에 비해서 더 큰 핸들의 조향각이 요구됨을 알 수 있다.

Table 3에는 Table 2에 제시된 차량 및 타이어의 제원을 이용해서 얻은 요우 속도의 이득들을 나타내었다. 특히 차량의 주행속도가 80km/h일 때 전륜과 후륜의 타이어 강성을 Table 2에 제시된 값의 90%, 100%, 110%로 각각 변화시켜 가면서 요우 속도의 이득을 계산하였다.

해석결과로부터 전륜 타이어의 코너링 강성이 커질수록 시스템 0, 1, 2, 3, 4에 대한 요우 속도의 이득은 증가하여 언더 조향특성이 개선됨을 알 수 있다. 그리고 후륜 타이어의 코너링 강성이

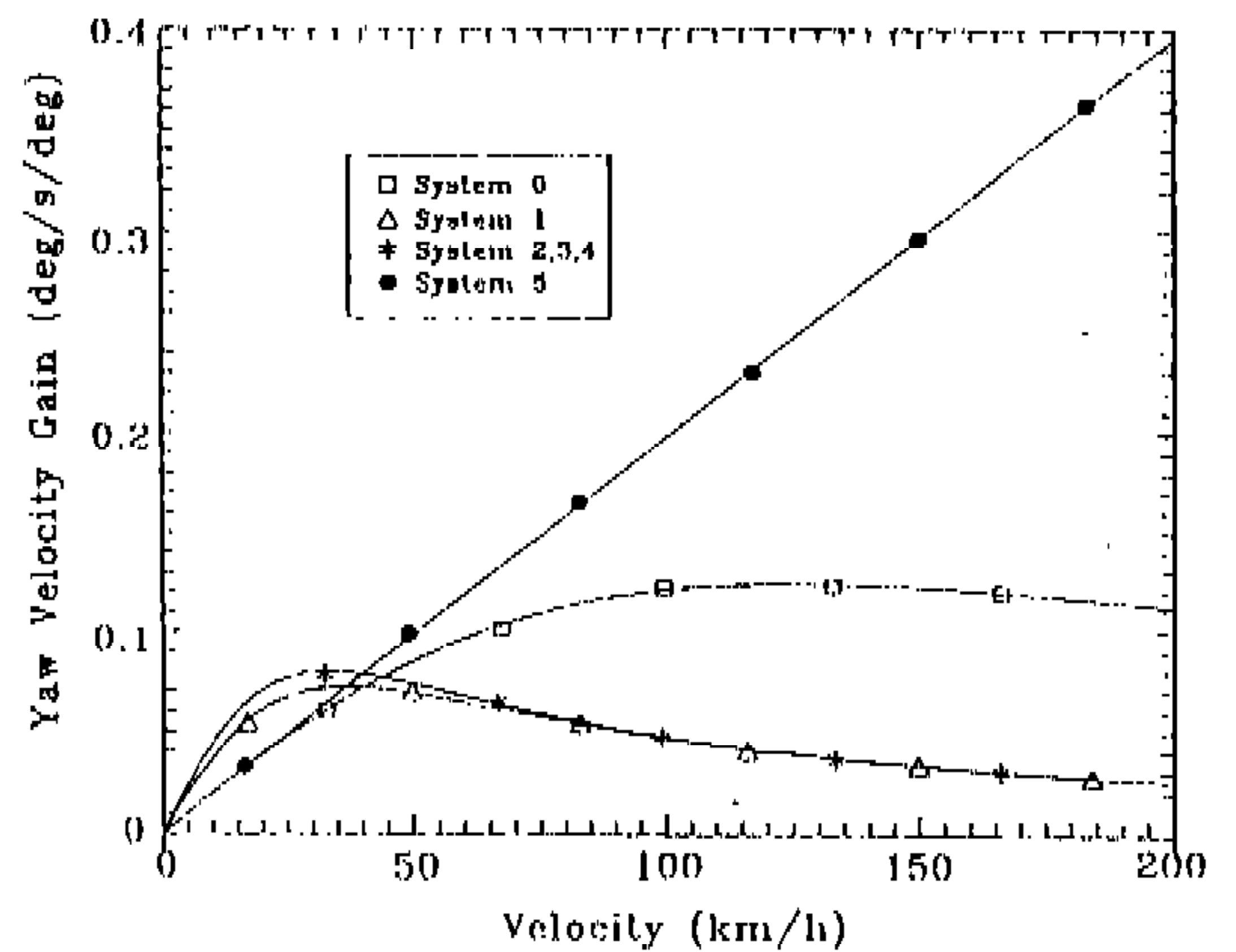


Fig.4 Yaw Velocity Gain Characteristics

Table 3 Yaw Velocity Gain [(deg/sec)/deg]

System	C_f (Stiffness of Front Wheel)		
	90%	100%	110%
0	0.095	0.113	0.133
1	0.050	0.055	0.059
2, 3, 4	0.052	0.057	0.062
5	0.158	0.158	0.158

System	C_r (Stiffness of Rear Wheel)		
	90%	100%	110%
0	0.134	0.113	0.100
1	0.055	0.055	0.055
2, 3, 4	0.057	0.057	0.057
5	0.158	0.158	0.158

커질수록 시스템 0에 대한 요우 속도의 이득은 오히려 감소하고 있으며, 시스템 1, 2, 3, 4에 대한 요우 속도의 이득은 일정한 것으로 나타났다. 특히 뉴트럴 조향특성을 갖는 시스템 5의 경우는 타이어의 코너링 강성에 관계없이 항상 일정한 요우 속도의 이득을 가지고 있다.

3.4 위험속도

4륜 조향 차량의 특성 방정식(Characteristic Equation)은 식 (7)과 식 (8)을 이용하면 다음과 같은 일반적인 형태로 쓸 수 있다.

$$\lambda^2 + D_1\lambda + D_0 = 0 \quad (10)$$

여기서 $D_0 = A_{11}A_{22} + A_{11}C_2B_{22}u - A_{12}A_{21} - A_{21}C_2B_{12}u$, $D_1 = A_{11} + A_{22} + C_2B_{22}u$ 이다.

식 (10)의 해 λ 가 음의 실수값을 갖는 경우에는 차량은 불안정한 특성을 나타낸다. 따라서 λ 가 허수축을 통과할 때의 주행속도 u 는 위험속도 u_{cr} 이 된다.

이러한 조건으로부터 계산한 시스템 0을 적용한 차량, 즉 2륜 조향 차량의 위험속도 u_{cr} 은 식 (8)의 계수 C_f 과 C_r 가 모두 0이므로 아래와 같이 주어진다.

$$u_{cr} = \sqrt{\frac{-C_f C_r (a+b)^2}{m(C_r b - C_f a)}} \quad (11)$$

특히 식 (11)로부터 알 수 있는 사실은 2륜 조향 차량의 위험속도가 차량의 요우 관성 모멘트의 영향을 받지 않는다는 점과 $C_r b$ 가 $C_f a$ 보다 큰 경우에는 차량의 주행속도에 관계없이 항상 안정하다는 점이다.

Table 1에 주어진 4륜 조향 시스템의 계수들을 이용해서 위험속도를 계산한 결과, 시스템 1을 적용한 4륜 조향 차량은 차량의 주행속도 및 차량과 타이어의 제원에 관계없이 항상 안정하지만, 시스템 2를 적용한 4륜 조향 차량의 위험속도는 식 (12)와 같은 위험속도를 갖는 것으로 나타났다.

$$u_{cr} = \sqrt{\frac{C_f a(a+b)}{mb}} \quad (12)$$

식 (12)로부터 시스템 2를 적용한 차량의 위험속도는 후륜 타이어의 코너링 강성과 차량의 요우관성 모멘트에 의한 영향을 받지 않는다는 사실을 알 수 있다. 그리고 시스템 3과 시스템 4를 적용한 4륜 조향 차량은 4륜 조향방법에 의해서 시스템 행렬 A 가 변화하지 않기 때문에 2륜 조향 차량과 같이 식 (11)과 같은 위험속도를 갖는다. 또한 시스템 5를 적용한 4륜 조향 차량의 위험속도는 식 (13)과 같이 주어진다.

$$u_{cr} = \sqrt{\frac{I_x(C_f + C_r) + m(C_f a^2 + C_r b^2)}{\left(\frac{b}{a+b}\right) C_r m^2 \left(\frac{a}{C_r} - \frac{b}{C_f}\right)}} \quad (13)$$

특히 시스템 5를 적용한 4륜 조향 차량은 식 (13)으로부터 알 수 있듯이 $C_f a$ 가 $C_r b$ 보다 큰 경우에는 차량의 주행속도에 관계없이 항상 안정하게 된다.

Table 4에는 Table 2에 제시된 차량과 타이어의 제원을 이용해서 얻은 위험속도들을 나타내었다. 특히 전륜과 후륜의 타이어 강성을 Table 2에 제시된 값의 90%, 100%, 110%로 각각 변화시켜

Table 4 Critical Speed[km/h]

System	C_f (Stiffness of Front Wheel)		
	90%	100%	110%
0, 3, 4	97.7	125.7	184.2
1	—	—	—
2	31.4	33.1	34.7
5	124.8	164.2	245.9

System	C_r (Stiffness of Rear Wheel)		
	90%	100%	110%
0, 3, 4	185.7	125.7	104.6
1	—	—	—
2	33.1	33.1	33.1
5	248.6	164.2	133.8

가면서 위험속도를 계산하였다.

해석결과로부터 전륜 타이어의 코너링 강성이 커질수록 위험속도는 급격히 증가하지만, 후륜 타이어의 코너링 강성이 클수록 위험속도는 오히려 급격히 감소한다는 사실을 알 수 있다. 따라서 차량의 주행 안정성을 높이기 위해서는 전륜의 타이어 강성을 높이고, 후륜의 타이어 강성을 낮추는 것이 바람직하다고 판단된다.

또한 앞에서 설명한 대로 시스템 0, 3, 4는 동일한 위험속도를 가지며, 시스템 1은 항상 안정된 것으로 나타났다. 특히 시스템 2의 경우는 횡가속도, 요우 속도, 미끄럼각 등과 관련된 응답특성은 매우 우수한 것으로 나타났지만, 매우 낮은 위험속도를 가지고 있기 때문에, 주행 안정성에 문제가 있는 것으로 판단된다. 그리고 이 시스템의 위험속도는 후륜 타이어의 강성에 의한 영향을 받지 않는다.

4. 결 론

본 연구에서는 5가지 형태의 4륜 조향 시스템들이 차량의 응답성과 안정성에 미치는 영향을 차량과 타이어에 대한 선형 모델을 토대로 해석하였다. 그 해석결과들로부터 다음과 같은 사실들을 알 수 있었다.

- 1) 시스템 1, 2, 3은 핸들의 조향 입력에 대한 횡가속도, 요우 속도, 미끄럼각 등과 관련된 응답특성이 매우 우수하다. 그러나 시스템 2는 매우 낮은 위험속도를 가지고 있기 때문에 주행 안정성에 문제가 있다.
- 2) 크로즈드 루프 방식인 시스템 2와 오픈 루프 방식인 시스템 3은 모든 응답특성들이 서로 같은 것으로 나타났다. 따라서 요우 속도 검출기가 필요없는 시스템 3이 5가지 형태의 4륜 조향방식 중에서 가장 유용한 것으로 판단된다.
- 3) 시스템 1, 2, 3, 4는 고속 주행하면서 커브 길에서 가속 또는 감속을 할 때 2륜 조향 시스템에 비해서 더 큰 핸들의 조향각이 요구된다.
- 4) 차량의 주행 안정성을 높이기 위해서는 전

륜 타이어 코너링 강성을 높이고, 후륜 타이어 코너링 강성을 낮추는 것이 바람직하다.

- 5) 전륜 타이어의 코너링 강성이 커질수록 시스템 0, 1, 2, 3, 4에 대한 요우 속도의 이득은 증가하여 언더 조향특성이 개선된다.

참 고 문 헌

1. Sato H., Hirota A., Yanagisawa H., Fukushima T. : Dynamic Characteristics of a Whole Wheel Steering Vehicle with Yaw Velocity Feedback Rear Wheel Steering. IMechE 1983, C124/83
2. J.C.Whitehead : Four Wheel Steering : Maneuverability and High Speed Stability, SAE-paper 880642
3. Braess H., Thomson B. : The Motor Vehicle-A Good Example of the Wide Range of Modern Control Engineering. Proc. 10th World Congress on Automatic Control, Munich, 1987
4. Yasufi S., Namio I., Hideo I., Kenji N. : The Development of an Experimental Four-Wheel-Steering Vehicle, SAE-paper 860623
5. Takiguchi T., Yasuda N., Furutan S., Kamazawa H., Inoue H. : Improvement of Vehicle Dynamic by Vehicle-Speed-Steering Four-Wheel Steering System, SAE-paper 860624
6. Sano S., Furukawa Y., Shiraishi S. : Four Wheel Steering System with Rear Wheel Steer Angle Controlled as a Function of Steering Wheel Angle, SAE-paper 860625
7. K.H.Senger : Das Fahr-und Stabilitätsverhalten von konventionell und allradgelenkten Fahrzeugen-Grundlegende Untersuchungen, DFVLR IB-Nr. 515-87-6, 1987
8. J.E.Bernard, M.J.Vanderploeg, and J.E.Shannan : Linear Analysis of a Vehicle with Four Wheel Steering, SAE-paper 880643
9. K.H.Senger, W.Schwartz : The Influence of a Four Wheel Steering System on the Stability

- Behaviour of a Vehicle-Driver System, DFVLR, Institute for Flight Systems Dynamics, D-8031 Wessling, FRG
10. T.Landreau : Simulation of Dynamics Behaviour of a Four Wheel Steering Vehicle by Means of a Vehicle and Driver Model. SAE-paper 890078
 11. A.Ohnuma, L.Daniel Metz : Controllability and Stability Aspects of Actively Controlled 4WS Vehicles, SAE-paper 891977
 12. 김정수, 허승진, 유영민 : 4륜 조향 시스템이 차량의 주행역학적 특성에 미치는 영향, 자동차공학회지, Vol.12, No.3, 1990