

〈논 문〉 SAE NO. 96370061

핸들조향속도를 고려한 4WS 제어방법에 관한 연구

A Study on the 4WS Control Method with the Effect of Steering Wheel Angular Velocity

이 영 화,* 김 석 일,* 김 대 영,* 김 동 룡**
Y. H. Lee, S. I. Kim, D. Y. Kim, D. R. Kim

ABSTRACT

Except the collision avoidance performance related to the rapid lane change, the 4WS vehicle has better dynamic stability and handling performance than the conventional 2WS vehicle. In this paper, to improve the collision avoidance performance of the 4WS vehicle which has close relation with the driver's safety, a 4WS control method with the effect of steering wheel angular velocity is proposed based on the fact that the driver steers abruptly the steering wheel to avoid the collision. And the effects of the proposed 4WS control method are investigated on the dynamic stability and handling performance by using the ISO lane change test code.

주요기술용어 : 4WS Vehicle(4WS 자동차), Steering Wheel Angular Velocity(핸들조향속도), Collision Avoidance(추돌회피), Rapid Lane Change(급차선변경), Response Compensation(응답보상), Understeer Characteristics(언더조향특성)

1. 서 론

최근 4WS 시스템(Four Wheel Steering System)은 자동차의 성능을 개선할 수 있는 수단의 하나로서 많은 주목을 받고 있다. 지금까지 알려진 4WS 시스템의 대부분은 자동차의 주행 속도, 핸들조향각, 요우속도(Yaw Velocity) 등의 함수로서 후륜조향각을 제어하는 방법을 사용

하고 있다^{1)~6)}. 그리고 이러한 후륜조향각의 제어를 통해서 저속주행에서의 조종성과 고속주행에서의 직진안정성을 대폭적으로 향상시켰고, 그에 대한 연구결과도 많이 발표되어 있다^{7)~10)}. 그러나 고속주행시의 추돌회피 문제와 관련된 급차선변경에 대한 4WS 자동차(Four Wheel Steering Vehicle)의 성능은 거의 알려진 것이 없다. 특히 4WS 자동차는 2WS 자동차(Two Wheel Steering Vehicle)에 비해서 고속주행시 극심한 언더조향특성을 나타내기 때문에 고속주행시의 급차선변경에 대한 성능을 파악하고, 이를 개선

* 정회원, 기아기술센터 차량연구실

** 정회원, 한국항공대학교 기계설계학과

하는 것은 운전자의 안전과 관련해서 매우 중요한 의미를 갖는다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 급차선변경에 대한 4WS 자동차의 주행성능을 해석학적으로 고찰하고, 그 성능을 개선하기 위해서 핸들조향속도가 고려된 4WS 제어방법을 제안하였다. 특히 자동차의 주행속도, 핸들조향속도의 포화값(Saturation Value), 그리고 후륜조향기구(Rear Wheel Steering Mechanism)의 응답보상 등이 차선변경시의 자동차 주행특성에 미치는 영향을 비교·검토하였다.

2. 4WS 자동차의 동역학 모델

2.1 자동차 모델

본 연구에서는 자동차의 주행특성을 해석하기 위해서 자동차의 무게중심에서의 횡속도 v 와 요우속도 r 를 상태변수(State Variable)로 하는 2자유도의 선형모델을 사용하였다. 그와 관련된 운동방정식은 식 (1)과 같이 주어진다⁵⁾.

$$\begin{pmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_f \\ \delta_r \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서 δ_f 와 δ_r 은 전륜조향각과 후륜조향각을 의미한다. 그리고 자동차의 무게중심에서 전륜까지의 거리와 후륜까지의 거리를 a 와 b , 자동차의 주행속도를 u , 자동차의 질량과 요우관성모멘트(Yaw Moment of Inertia)를 M 과 I_z , 전륜타이어와 후륜타이어의 코너링강성(Cornering Stiffness)을 C_f 와 C_r 로 놓으면, 시스템행렬(System Matrix) A 와 입력행렬(Input Matrix) B 의 요소들은 아래와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} A_{11} &= \frac{-(C_f + C_r)}{Mu} & A_{12} &= \frac{(aC_f - bC_r)}{Mu} - u \\ A_{21} &= \frac{-(aC_f - bC_r)}{I_z u} & A_{22} &= \frac{-(a^2 C_f + b^2 C_r)}{I_z u} \\ B_{11} &= \frac{C_f}{M} & B_{12} &= \frac{C_r}{M} & B_{21} &= \frac{aC_f}{I_z} & B_{22} &= -\frac{bC_r}{I_z} \end{aligned}$$

2.2 4WS 기구의 동역학 모델

운전자의 핸들조향각은 전륜조향기구(Front Wheel Steering Mechanism)를 거쳐서 전륜조향각으로 변환되고, 자동차의 주행상태와 전륜조향각에 의해서 결정되는 후륜조향각은 후륜조향기구를 거쳐서 반영되기 때문에 각각의 조향명령과 조향응답 사이에는 시간지연이 존재하게 된다. 그 관계들을 선형적이라고 가정하면 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\delta_f = \frac{1}{1 + \tau_f \cdot s} \delta_{fc} \quad (2)$$

$$\delta_r = \frac{1}{1 + \tau_r \cdot s} \delta_{rc} \quad (3)$$

여기서 δ_{fc} 와 δ_{rc} 는 전륜조향각과 후륜조향각에 대한 명령(Command)이고, δ_f 와 δ_r 은 전륜조향각과 후륜조향각에 대한 조향기구의 응답(Response)을 의미한다. 그리고 τ_f 와 τ_r 은 전륜조향기구와 후륜조향기구의 시정수(Time Constant)이다.

또한 본 연구에서는 식 (3)과 같이 주어지는 후륜조향기구의 응답지연을 보상하기 위한 방법으로 $(1 + \tau_r \cdot s)$ 로 표현되는 진상항(Lead Term)을 아래와 같이 추가하였다.

$$\delta_r = \frac{1 + \tau_r \cdot s}{1 + \tau_r \cdot s} \delta_{rc} \quad (4)$$

2.3 핸들조향속도를 고려한 4WS 제어방법

지금까지 알려진 대부분의 4WS 제어방법들은 전륜조향각 δ_{fc} 와 자동차의 무게중심에서의 요우속도 r 에 따라서 후륜조향각 δ_{rc} 를 결정하는 제어방법을 사용하고 있는데, 그 일반적인 형태는 식 (5)와 같이 쓸 수 있다^{3)~5)}.

$$\delta_{rc} = C_1 \cdot \delta_{fc} + C_2 \cdot u \cdot r \quad (5)$$

특히 폐루프(Closed Loop)형태와 개루프(Open

Loop) 형태를 갖는 식 (6)과 (7)에 제시한 4WS 제어방법들은 과도상태에서도 횡미끄럼(Side Slip)이 발생하지 않기 때문에 전반적으로 가장 우수한 성능을 나타내는 4WS 제어방법이다⁵⁾.

$$\delta_{rc} = -\frac{C_f}{C_r} \cdot \delta_{fc} + \frac{Mu^2 + C_f a - C_r b}{C_r u} \cdot r \quad (6)$$

$$\delta_{rc} = \frac{-C_f u L_2 \cdot s + C_f a Mu^2 - C_f C_r b(a+b)}{C_r u L_2 \cdot s + C_r b Mu^2 + C_f C_r a(a+b)} \cdot \delta_{fc} \quad (7)$$

그리고 식 (6)과 (7)은 표현형태만 다를 뿐 전제조건 및 유도과정이 모두 같기 때문에 모든 과도응답특성이 서로 같은 4WS 제어방법이다⁵⁾ 다만 외란의 영향이 존재하는 경우에는 식 (6)으로 표현되는 페루프형태의 4WS 제어방법이 더 강인(Robust)한 특성을 나타낸다.

그러나 이러한 4WS 제어방법들은 고속주행시의 과도한 언더조향특성 때문에 고속주행에서 발생할 수 있는 추돌상황을 회피하는 능력에는 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 고속주행시의 급차선변경에서 운전자들이 급격하게 핸들을 조향한다는 사실을 토대로 식 (8)과 같이 핸들조향속도를 고려한 새로운 형태의 4WS 제어방법을 제안하였다.

$$\delta_{rc} = \left\{ 1 - \frac{n \cdot Sat(\delta_{fc})}{\delta_{max}} \right\} \cdot \delta_{fc}^* \quad (8)$$

여기서 n 은 전륜조향기구의 기어비(Gear Ratio), δ_{fc} 는 전륜조향속도의 명령값, δ_{max} 는 핸들조향속도의 포화값, δ_{fc}^* 는 식 (6) 또는 (7)에 제시한 후륜조향각을 의미한다. 그리고 $Sat(\)$ 는 다음과 같은 성질을 갖는 함수이다.

$$Sat(\delta_{fc}) = \begin{cases} |\delta_{fc}|, & n \cdot |\delta_{fc}| \leq \delta_{max} \\ \delta_{max}/n, & n \cdot |\delta_{fc}| > \delta_{max} \end{cases}$$

결과적으로 식 (8)로 주어지는 본 연구에서 제안한 4WS 제어방법은 급격한 핸들조향시에는 실제의 후륜조향각을 식 (6)이나 (7)에 의해서

주어지는 후륜조향각보다 작게 만들어서 언더조향특성을 보상하고, 완만한 핸들조향시에는 실제의 후륜조향각을 식 (6)이나 (7)에 의해서 주어지는 후륜조향각과 거의 같도록 만들어서 횡미끄럼각을 거의 0으로 만들어 주는 특징을 갖는 4WS 제어방법이다. 특히 본 연구에서 제안한 4WS 제어방법은 운전자의 핸들조향속도가 포화값 δ_{max} 이상인 경우에는 2WS 자동차와 같이 후륜조향각을 0으로 만들어 준다.

3. 차선변경시의 주행특성 해석 및 고찰

본 연구에서는 추돌회피문제와 관련된 4WS 자동차의 성능을 고찰하기 위해서 자동차의 주행속도, 핸들조향속도의 포화값, 그리고 후륜조향기구의 응답보상이 차선변경시의 자동차 주행특성에 미치는 영향을 해석하였다. 특히 해석결과로는 차선변경시의 전륜조향각, 후륜조향각, 주행경로, 횡가속도, 요우속도, 횡미끄럼각 등을 제시하였다. 해석에서는 Table 1에 제시된 자동차의 제원을 사용하였으며, 전륜조향각에 대한 핸들조향각의 비인 기어비 n 을 15.5, 전륜조향기구와 후륜조향기구의 시정수인 τ_f 와 τ_r 은 35msec로 가정하였다. 또한 표현상의 편의를 위해서 식 (6)이나 (7)로 주어지는 4WS 시스템을 4WS-O, 본 연구에서 제안한 식 (8)로 주어지는 4WS 시스템을 4WS-N으로 나타내었다.

3.1 자동차 주행속도의 영향

본 연구에서는 4WS-O 자동차가 ISO 7401에 정의된 차선변경경로를 주행하기 위해서 요구되는 핸들조향각을 기준으로 2WS, 4WS-O, 4WS-N 자동차의 차선변경시의 주행특성을 해석하였다. 특히 그 핸들조향각은 운전자-자동차모델¹¹⁾을 적용해서 얻었는데, 운전자의 조향반응시간은 0.5sec라고 가정하였다.

Table 1 Model Parameters of Vehicle

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

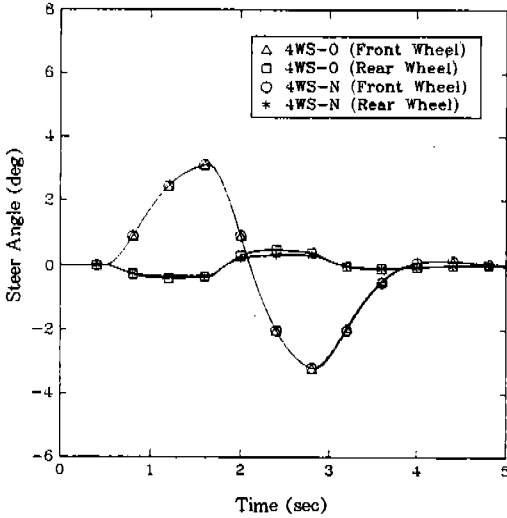


Fig.1 Front and Rear Steer Angles in Lane Change ($u=40\text{km/h}$)

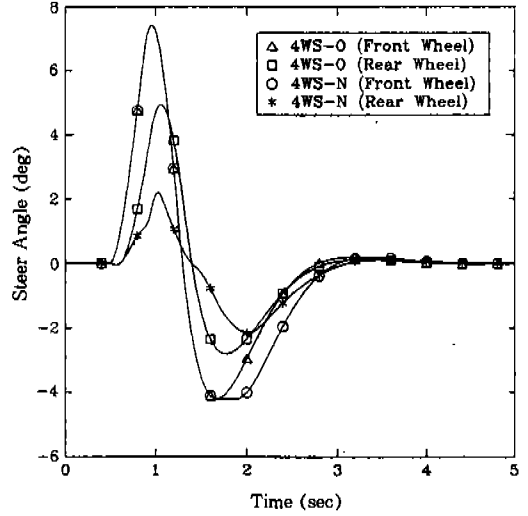


Fig.3 Front and Rear Steer Angles in Lane Change ($u=120\text{km/h}$)

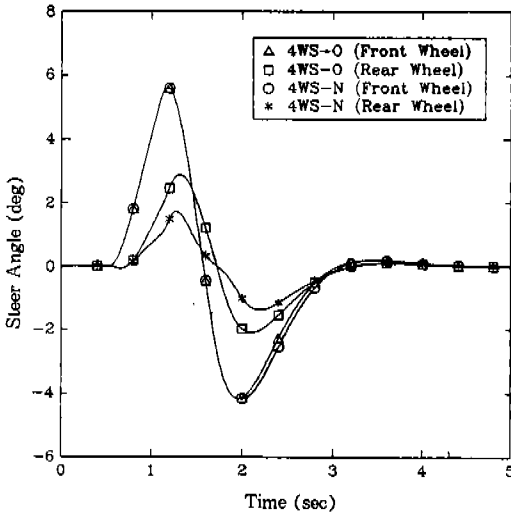


Fig.2 Front and Rear Steer Angles in Lane Change ($u=80\text{km/h}$)

Fig.1, 2, 3은 자동차의 주행속도가 각각 40, 80, 120km/h일 때 얻은 전륜조향각과 후륜조향각을 보여주고 있다. 2WS 자동차는 핸들조향각이 기준 핸들조향각(4WS-O 자동차의 핸들조향각)과 같아도 차선변경 완료후의 주행경로가 진입초기의 주행경로와 평행이 되었지만, 핸들조향

속도의 포화값 δ_{\max} 가 282.8deg/sec일 때의 4WS-N 자동차는 차선변경 완료후의 주행경로가 기준 핸들조향각에 의해서 진입초기의 주행경로와 비교할 때 양수(+)의 기울기를 갖는 것으로 나타났기 때문에 진입초기의 주행경로와 평행을 유지할 수 있도록 기준 핸들조향각에서의 2차 핸들조향구간(2차 핸들조향각의 최대값이 유지되는 시간)을 길게 조정하는 방법을 이용해서 핸들조향각을 재산출하였다. 이와 같은 방법으로 조정된 4WS-N 자동차의 핸들조향각에서 2차 핸들조향각의 최대값이 유지되는 시간은 주행속도가 40, 80, 120km/h일 때 각각 30, 50, 220msec로 늘어났다. 이러한 사실로부터 4WS-N 자동차는 차선변경 완료후의 주행경로가 진입초기의 주행경로와 평행이 되기 위해서 4WS-O 자동차보다 2차 핸들조향구간이 약간 더 길어져야 하며, 그 시간은 주행속도의 사승값에 비례하는 경향이 있음을 알 수 있다.

또한 주행속도가 빨라질수록 운전자는 차선변경에 대한 시간적인 여유를 갖지 못하기 때문에 핸들조향속도와 핸들조향각이 커지며, 그 결과로 4WS-O 자동차와 4WS-N 자동차의 후륜조향각에는 큰 차이가 나타남을 알 수 있다. 특히 고속주행을 할수록 4WS-N 자동차는 4WS-O 자동

차보다 후륜조향각이 작아져서 언더조향특성이 감소되고 있다.

Fig.4, 5, 6은 Fig.1, 2, 3에 제시된 전륜조향각들을 토대로 해석한 2WS, 4WS-O, 4WS-N 자동차의 과도응답특성인 횡변위, 횡가속도, 요우속도, 횡미끄럼각을 보여주고 있다. 주행속도가 느린 경우(조향속도가 느린 경우)에는 4WS-O 자동차와 4WS-N 자동차의 과도응답특성에 큰 차이가 없지만, 주행속도가 빠른 경우(조향속도가 빠른 경우)에는 그 차이가 커지는 것으로 나타났다. 특히 추돌회피성능과 관련된 횡변위에서는 4WS-N 자동차가 4WS-O 자동차보다 주행속도 80km/h에서 약 1.5m, 주행속도 120km/h에서 약 4.5m 정도 더 큰 값을 가지고 있다. 결과적으로 4WS-N 자동차는 고속주행시의 급차선변경에서 4WS-O 자동차보다 탁월한 추돌회피성능을 보여주기 때문에 운전자의 안전도를 향상시킨다는 사실을 알 수 있다. 또한 핸들조향을 시작한 순간부터 횡변위가 정상상태값의 90

%에 도달하는 순간까지의 시간으로 응답성을 평가한 결과는 Table 2에 제시하였는데, 응답성은 4WS-O, 4WS-N, 2WS 자동차의 순으로 우수하게 나타났다. 특히 고속주행할수록, 즉 핸들조향속도가 빠를수록 4WS-N 자동차의 응답성이 2WS 자동차의 응답성에 가까워짐을 보여주고 있다. 따라서 전반적인 과도응답특성들을 비교해 보면, 저속주행시의 차선변경에서는 4WS-N 자동차가 4WS-O 자동차의 특성을 갖지만, 고속주행시의 차선변경에서는 4WS-O 자동차와

Table 2 Responsiveness of Vehicle (Lateral Position)

Speed \ Vehicle	40km/h	80km/h	120km/h
2WS	2.43sec	1.94sec	1.77sec
4WS-N	2.33sec	1.84sec	1.75sec
4WS-O	2.32sec	1.72sec	1.39sec

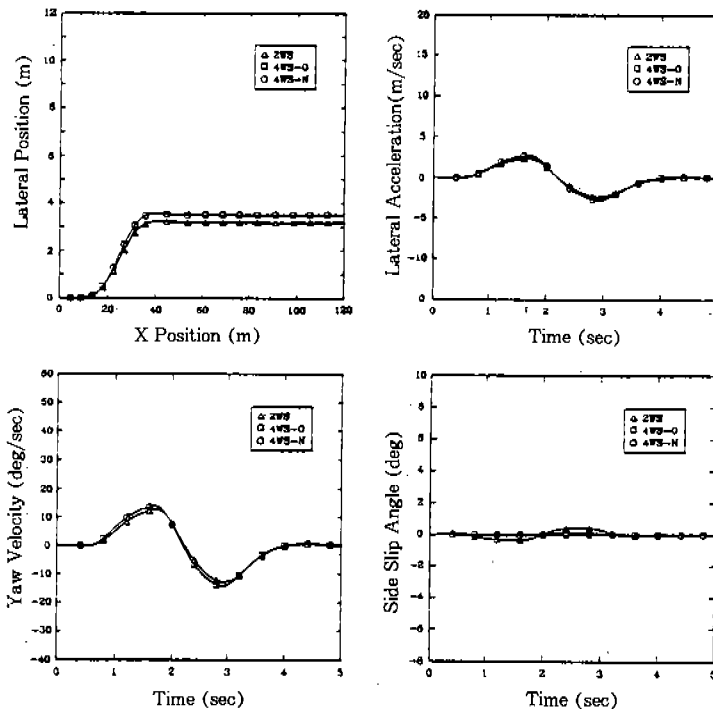


Fig.4 Transient Response Characteristics in Lane Change ($u = 40 \text{ km/h}$)

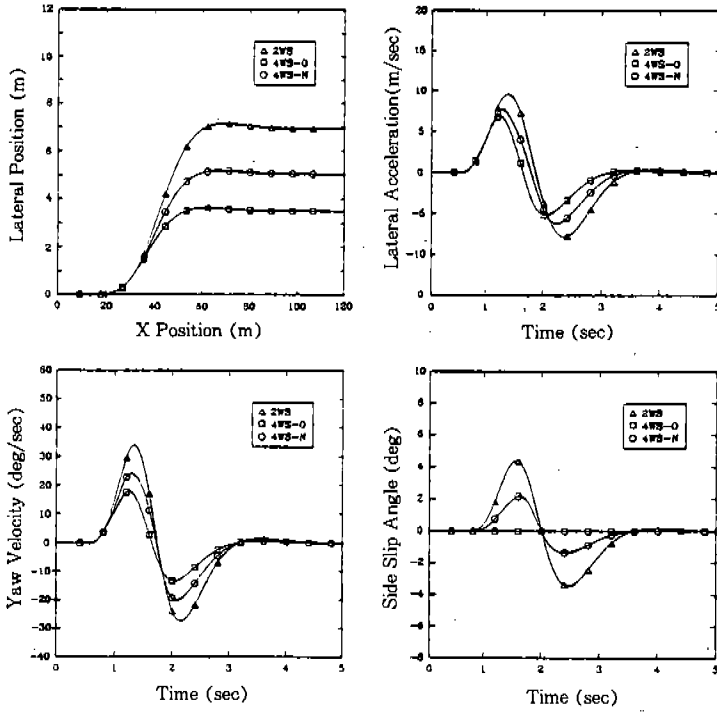


Fig.5 Transient Response Characteristics in Lane Change ($u=80\text{km/h}$)

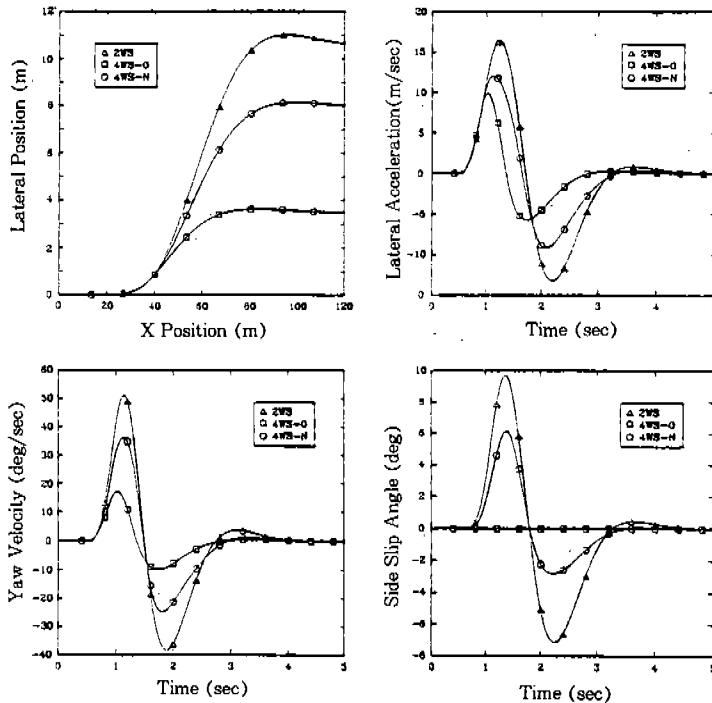


Fig.6 Transient Response Characteristics in Lane Change ($u=120\text{km/h}$)

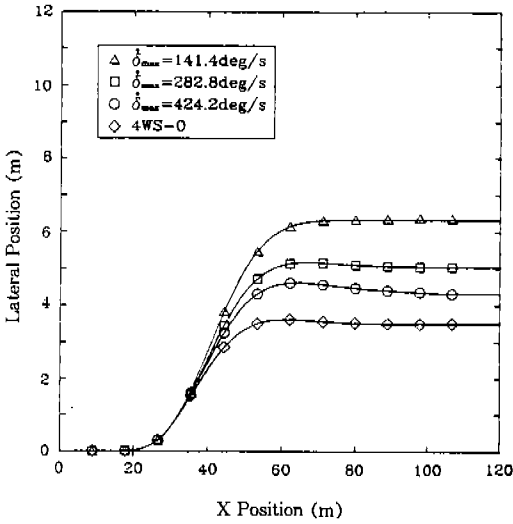


Fig.7 Effects of Saturation Value

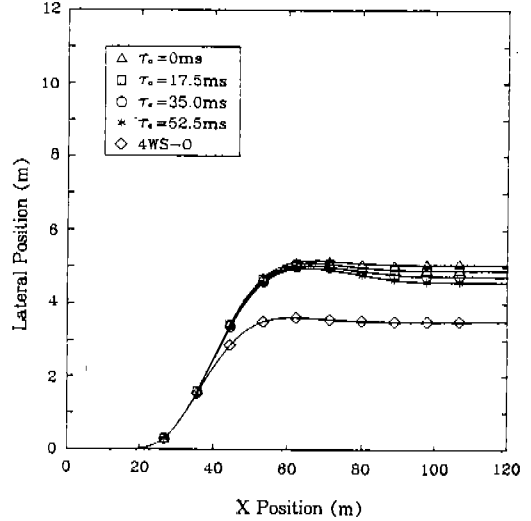


Fig.8 Effects of Lead Compensation Value

2WS 자동차의 중간 특성을 갖는다는 사실을 알 수 있다.

3.2 핸들조향속도 포화값과 후륜조향기구 응답보상의 영향

4WS-N 자동차의 제어방법인 식 (8)로부터 알 수 있듯이 핸들조향속도의 포화값 δ_{max} 가 클수록 후륜조향각에 대한 보정값이 작아지기 때문에 4WS-N 자동차는 4WS-O 자동차의 특성에 가까워진다. 이러한 사실은 핸들조향속도의 포화값을 141.4, 282.8, 424.2deg/sec로 변화시켜 가면서 자동차의 주행속도가 80km/h일 때 얻은 차선변경시의 횡변위 해석결과인 Fig.7에서 확인할 수 있다. 특히 차선변경시의 횡변위는 핸들조향속도의 포화값이 작을수록 민감하게 변하고 있다.

또한 식 (4)와 같이 표현되는 후륜조향기구의 응답보상방법에서의 τ_c 값을 0, 17.5, 35.0, 52.5msec로 변화시켜 가면서 얻은 차선변경시의 횡변위 해석결과는 Fig.8에 제시하였다. 해석은 자동차의 주행속도가 80km/h, 핸들조향속도의 포화값이 282.8deg/sec인 경우에 대해서 수행하였는데, τ_c 값이 클수록, 즉 후륜조향기구의 응답진상효과가 클수록 4WS-N 자동차의 주행특성은 4WS-O 자동차의 주행특성에 가까워지고 있다

는 사실을 볼 수 있다.

4. 결 론

4WS 자동차는 2WS 자동차에 비해서 전반적으로 우수한 주행특성을 가지고 있지만, 고속주행시의 과도한 언더조향특성 때문에 고속주행에서 발생할 수 있는 추돌상황을 회피하는 능력에는 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 고속주행시의 급차선변경에서 운전자들이 급격하게 핸들을 조향한다는 사실을 토대로 핸들조향속도를 고려한 4WS 제어방법을 제안하였다. 또한 자동차의 주행속도, 핸들조향속도의 포화값, 후륜조향기구의 응답진상효과 등이 차선변경시의 주행특성에 미치는 영향에 대한 해석결과들을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 4WS-N 자동차는 4WS-O 자동차에 비해서 급격한 핸들조향시에는 후륜조향각이 작지만, 완만한 핸들조향시에는 거의 같은 후륜조향각을 갖는다.
- 2) 4WS-N 자동차는 차선변경 완료후의 주행경로가 진입초기의 주행경로와 평행이 되려면, 2차 핸들조향구간이 4WS-O 자동차보다 약간 더 길어야 한다. 그 시간은 주행속도의 자승값에 비례하는 경향이 있다.

- 3) 4WS-N 자동차는 고속주행시의 급차선변경에서 4WS-O 자동차보다 탁월한 추돌회피성능을 가지고 있기 때문에 운전자의 안전도를 향상시킨다.
- 4) 4WS-N 자동차는 핸들조향속도의 포화값이 클수록 차선변경시의 횡변위가 4WS-O 자동차에 가까워진다.
- 5) 4WS-N 자동차는 후륜조향기구의 응답진상효과가 클수록 차선변경시의 횡변위가 4WS-O 자동차에 가까워진다.

후 기

본 연구는 기아자동차(주)에서 수행하는 차세대 자동차기술개발사업 “지능형 조향시스템 제작기술”의 위탁과제인 “지능형 4륜조향시스템의 액츄에이터기술개발”의 연구결과중 일부분을 밝히며, 본 연구를 지원해 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. H. Sato, A. Hirota, H. Yanagisawa, T. Fukushima : Dynamic Characteristics of a Whole Wheel Steering Vehicle with Yaw Velocity Feedback Rear Wheel Steering, IMechE, C124/83, 1983.
2. J.C. Whitehead : Four Wheel Steering; Maneuverability and High Speed Stability, SAE-Paper 880642.
3. 심정수, 허승진, 유영민 : 4륜조향시스템이 차량의 주행역학적 특성에 미치는 영향, 자동차공학회지, Vol.12, No.3, 1990.

4. Y. Lin : Improving Vehicle Handling Performance by a Closed-Loop 4WS Driving Controller, SAE-Paper 921604.
5. 이영화, 김석일, 서명원, 손희성, 김성하 : Bicycle모형을 이용한 4륜조향차량의 동력학 해석, 자동차공학회지, Vol.2, No.5, pp. 101~109, 1994.
6. Allan Y. Lee : Emulating the Lateral Dynamics of a Range of Vehicles Using a Four-Wheel-Steering Vehicle, SAE-Paper 950304.
7. Yasufi S., Namio I., Hideo I., Kenji N. : The Development of an Experimental Four-Wheel-Steering Vehicle, SAE-Paper 860623.
8. T. Takiguchi, N. Yasuda, S. Furutan, H. Kamazawa, H. Inoue : Improvement of Vehicle Dynamic by Vehicle-Speed-Steering Four-Wheel Steering System, SAE-Paper 860624.
9. T. Eguchi, Y. Sakita, K. Kawagoe, S. Kaneko, K. Mori, T. Matsumoto : Development of Super Hicas, a New Rear Wheel Steering System with Phase Reversal Control, SAE-Paper 891978.
10. N. Irie, J. Kuroki : 4WS Technology and the Prospects for Improvement of Vehicle Dynamics, SAE-Paper 901167.
11. 이영화, 김석일, 서명원, 김대영, 김동룡 : 운전자-자동차모형을 이용한 4륜조향자동차의 주행특성 해석, 자동차공학회지, Vol.13, No.3 (SAE 953742), pp.119~128, 1995.