

〈논문〉 SAE NO. 2000-03-0074

기준모델 추종제어를 이용한 독립 후륜조향 차량의 조향 특성 해석

The Handling Characteristics of The Independent Rear Wheel Steering Vehicle Using the Reference Model Following Control

봉 우 중*, 이 상 호**, 이 언 구**, 한 창 수***
Woojong Bong Sangho Lee Unkoo Lee Changsoo Han

ABSTRACT

In this paper, the reference model following control(RMFC) scheme through the optimal control theory is investigated for the independent rear wheel steering(IRWS) vehicle. RMFC vehicle follows the dynamic performance of a virtual vehicle as a reference model designed in the controller. Linear vehicle model of two degrees-of-freedom is used to derive control scheme, which is applied to full vehicle for evaluating handling performances. And, 4WS vehicle through RMFC is compared to the conventional 2WS vehicle and 4WS vehicle in the J-turn test. The RMFC logic is also extended to IRWS vehicle. IRWS with RMFC shows not only the excellent handling performance, but also some advantages in terms of the directional stability and responsiveness from the simulation results.

주요기술용어: Reference Model Following Control(RMFC, 기준모델 추종제어), Optimal Control(최적 제어), Virtual Vehicle Model(가상 차량모델), Independent Rear Wheel Steering(IRWS, 독립 후륜조향), Handling Characteristics(조정 안정성)

Nomenclature			
M	Vehicle mass	t_f, t_r	Front, rear track width
V	Vehicle velocity	K_f, K_r	Front, rear cornering stiffness
β	Side slip angle	α_f, α_r	Front, rear tire slip angle
γ	Yaw velocity	δ_f, δ_r	Front, rear steer angle
Y_f, Y_r	Equivalent front, rear tire lateral force	δ_{0*}	Arbitrary positive angle
I_z	Yaw moment of inertia of vehicle	δ_r	Controlled rear steer angle
l_f, l_r	Distance from C.G. to front, rear axle	V_x, V_y	Longitudinal, lateral vehicle velocity
		F_x	Tire longitudinal force
		F_y	Tire lateral force
		R	Tire rolling resistance
		I_x	Roll moment of inertia
		ϕ	Roll angle
		$K_{f\phi}, K_{r\phi}$	Front, rear roll stiffness

* 회원, 한양대학교 정밀기계공학과 대학원

** 회원, 현대자동차

*** 회원, 한양대학교 정밀기계공학과

$C_{f\phi}, C_{r\phi}$	Front, rear roll damping
g	Gravitational acceleration
m_s	Sprung mass
e	Distance from C.G. to roll center
I_w	Moment of inertia of a wheel
γ	Effective wheel radius
ω	Wheel angular velocity
ΔW	Lateral load transfer

1. 서 론

고속 주행 시에 선회 안정성을 향상시키려는 목적으로 연구되고 있는 후륜 토우제어 시스템으로서 4륜 조향 시스템(Four-wheel steering system, 4WS)과 독립 후륜조향 시스템(Independent rear wheel steering, IRWS)이 있다. IRWS는 참고문헌¹⁾에서 연구된 바와 같이 선회 시의 차량 거동에는 내륜에 의한 효과는 미미하고 주로 외륜측에 의해 결정되므로 주행 상황에 따라 후륜을 각기 독립적으로 제어하여 기존의 4WS의 성능을 보이면서 유압 에너지의 소모를 줄이는 장점을 가지고 있다. 또한, 후륜의 조향각을 결정하는 제어로직 역시 많은 연구자에 의해 개발되었다. 그 중에는 전륜 조향각 비례제어²⁾, 요 각속도 귀환(Yaw velocity feedback) 제어³⁾, 그리고 요 각속도 튜닝 인자(Tuning-factor)를 도입하여 요 각속도 이득을 수정하여 귀환 제어하는 방식⁴⁾ 등이 있다. 이들 제어로직은 2 자유도의 단순화된 차량모델에서 유도하여 나름대로의 성능을 보여주고 있지만 횡풍이나 노면 입력 등의 외란에는 불안정한 거동을 보이는 경우가 있으며, 다 자유도의 차량모델에 적용하였을 때에 그 성능을 충분히 보장할 수 없었던 점들이 있다.

따라서, 최근에는 가상모델 추종제어가 선보이고 있으며, 이것은 이상적인 조향 성능을 보이는 가상의 차량을 미리 설정해 놓은 다음, 실제 차량이 가상 차량의 조향 거동을 추종하게끔 차량의 전, 후륜 조향각을 동시에 제어하는 것이다. 이와

관련된 연구로는 전, 후륜 동시제어(Cooperative control)로서 Iguchi⁵⁾ 등이 타이어 횡력과 요 각속도를 피드백 하여 2차 시스템으로 표현되는 차량의 횡 방향과 요 방향의 거동을 운전자가 다루기 쉬운 1차 시스템으로 바꾸었으며, Nagai⁶⁾는 차체 횡 미끄러짐 각(Side slip angle)과 요 각속도가 가상 차량의 그것을 추종하도록 피드백, 피드포워드 보상을 사용하여 전, 후륜 조향각을 제어했다. 또한 Ro와 Kim⁷⁾은 타이어 횡 강성(Tire lateral stiffness)은 크고 요 모멘트 관성(Yaw moment of inertia)은 작은 가상 차량을 설정하여, 실제 차량과의 오차를 슬라이딩 제어기(Sliding mode controller)를 사용하여 최소화시키는 연구를 수행하였다.

본 논문에서는 고속으로 선회할 때, 후륜의 조향각을 결정하는 제어로직으로는 RMFC를 이용한다. 즉, 이 제어로직의 목적은 정상상태에서 차체 횡 미끄러짐 각이 제로인 가상 차량을 미리 만들어 놓고, 최적의 전, 후륜 조향각 조합을 입력력으로 실제 차량에 넣어줌으로써 실제 차량도 가상차량과 같은 조향 성능을 나타내도록 하는 것이다. 또한, 유도된 후륜 조향각을 이용하여, 독립 후륜조향 로직을 제안하였다. 단 선회 시가, 감속시의 성능은 주로 제동력, 구동력 제어를 이용하여 향상시킬 수 있으므로 본 연구에서는 관심에서 제외하였다.

연구 내용으로는 2 절에서, 본 논문에서 제안하는 독립 후륜조향 차량을 평가하기 위하여 8 자유도의 전체 차량을 모델링 한다. 3 절에서 독립 후륜 토우제어 시스템을 소개하고, 4 절에서 후륜 조향각을 결정하기 위해 RMFC 제어로직을 유도하고, RMFC에 사용할 가상 차량모델을 결정한다. 또한, 기존의 요 각속도 귀환제어를 고찰한다. 그리고 5 절에서 스텝 조향(Step steering) 시험, 외란 시험 등을 통하여 본 논문에서 제안한 제어로직의 타당성을 보이고 IRWS 시스템이 기존의 것보다 능동 제어시스템으로서 더 우수함을 확인한다.

2. 전체 차량모델

본 논문에서 차량의 조정안정성 특성을 고찰하기 위하여 8 자유도의 전체 차량을 모델링 하였다. 차체에서 직진 방향, 횡 방향, 요 방향 그리고 롤 방향의 4 자유도와 4개의 타이어 스피ن 방향에서 4 자유도로 구성되어 있다. 또한, 타이어 힘은 Pacejka 모델⁸⁾을 이용하여 계산하였으며, 시뮬레이션 프로그램인 Matlab/SimulinkO로 구현하였다. 적분기는 Runge-Kutta (fixed-step 4차)를 사용하였다.

2.1 차량 동역학 모델

Fig. 1 (a) 에서 차체의 무게중심에 고정된 좌표를 가진 2차원 평면상에서 차체의 종 방향 운동, 횡 방향 운동, 그리고 요 운동을 보여주며 식 (1) ~ (3) 은 운동방정식을 나타낸다. 그리고, Fig. 1 (b), (c)는 차체 롤 운동과 각 차륜에서의 회전을 보여주며 역시 식 (6)과 (7)에서 운동방정식을 표시하고 있다. 운동방정식에 포함된 타이어 힘은 식 (4), (5)와 같은 Pacejka 모델을 이용하고 있다.

종 방향 운동:

$$M(\dot{V}_x - V_y \cdot \dot{\phi}) = X_1 + X_2 + X_3 + X_4 \quad (1)$$

횡 방향 운동:

$$M(V_y + V_x \cdot \dot{\phi}) = Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 \quad (2)$$

요 방향 운동:

$$I_z \cdot \ddot{\phi} = l_f(Y_1 + Y_2) - l_r(Y_3 + Y_4) - t_r(X_1 + X_3) + t_f(X_2 + X_4) \quad (3)$$

종 방향 타이어 힘:

$$X_i = (F_{x_i} - R_i) \cos \delta_i - F_{y_i} \sin \delta_i \quad (4)$$

횡 방향 타이어 힘:

$$Y_i = (F_{x_i} - R_i) \sin \delta_i + F_{y_i} \cos \delta_i \quad (5)$$

롤 운동:

$$I_x \ddot{\phi} + m_s \cdot e \cdot (\dot{V}_y + V_x \cdot \dot{\phi}) = -(K_{f\phi} + K_{r\phi}) - (C_{f\phi} + C_{r\phi}) + m_s \cdot g \cdot e \cdot \sin \phi \quad (6)$$

차륜의 회전 운동:

$$I_w \cdot \dot{\omega} = -r \cdot F_{x_i} + r \cdot R_i \quad (7)$$

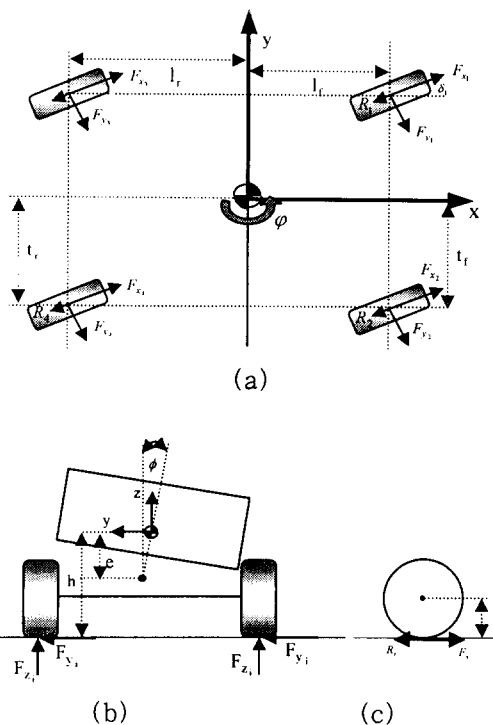


Fig. 1 Full vehicle model of 8 D.O.F.

3. 독립 후륜 토우제어 시스템

선회나 횡풍에 의해 차체에 횡 방향 힘이 가해지게 되면, 타이어에서는 필요한 코너링 힘을 할당 받게 된다. 동시에 내륜에서 외륜으로 횡 방향 하중이동(Load transfer, ΔW)이 발생한다. (슬립각 α , Fig.2 ①) 그러나, ①에서 보다 하중이동이 더욱 커지게 되면 ($\Delta W'$), 즉 ②의 상태가 되면

이제는 현재의 슬립각으로는 필요한 코너링 힘을 보충할 수 없게 되어 어쩔 수 없이 후륜 타이어 슬립각의 크기를 증대 시켜야 한다.(슬립각 $\alpha + \Delta\alpha$, ③) 이때에 2WS의 경우는 후륜에서 더 큰 슬립각을

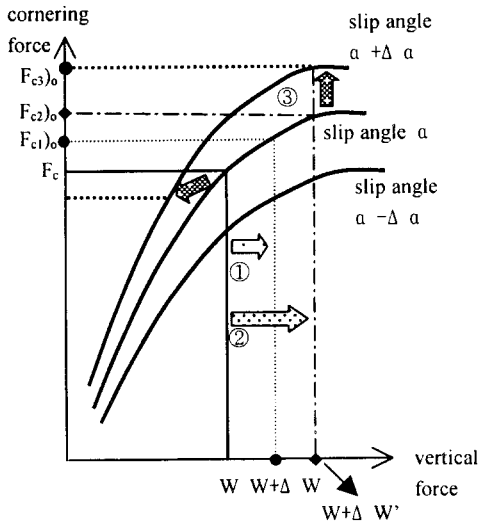


Fig. 2 Relationship between load transfer and cornering force

발생시키기 위해서는 차체의 리어-스웨이를 동반하게 되지만, 토우 제어시스템은 후륜을 조향함으로써 필요한 슬립각을 발생시킨다. (리어-스웨이 없음) 그리고, 후륜 조향각은 하중이동과 직접 관련되며, 제어로직에서는 차량 상태 변수들의 향으로 결정된다. Fig. 3을 살펴보면 독립 후륜조향 시스템은 기본적으로 하중이동에 의한 코너링 힘의 부족을 후륜의 슬립각을 미리 생성시켜서 보상해주는 개념은 4WS와 같다. 즉, 바로 이점에서는 일반적인 4WS와 IRWS의 차이는 보이지 않는다. 그러나, 4WS에서는 제어되는 외륜과 내륜 조향각의 크기가 같기 때문에 대부분의 선회 거동에서 내륜에서 조향 되는 값은 불필요한 크기다. IRWS는 선회 거동에 지배적인 영향을 미치는 후륜의 외륜만을 제어하게 된다. Fig. 3에서도 나타냈듯이 후륜을 독립 제어함으로써 토우각의 최적화가 가능한데, 본 논문에서는 2 자유도 단순 차량 모델에서 RMFC를 이용하여 횡 미끄러짐 각을 제로로 하는 조향각을 유도하고, 이것을 독립제어를 위한 로직에 적용한다.

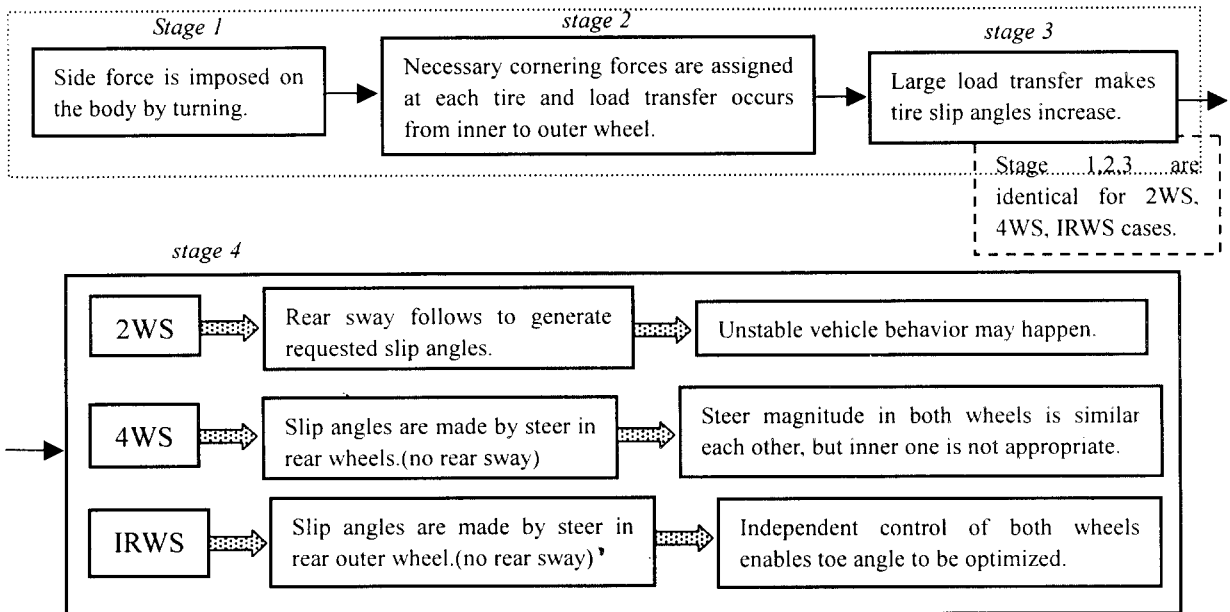


Fig. 3 Vehicle behavior of 2WS, 4WS and IRWS during turning

4. 제어 로직

4.1 기준모델 추종제어(RMFC)

RMFC의 목적은 실제 차량거동이 이상적인 조향 성능을 보이는 가상 차량모델을 추종하도록 하는데 있다. 이것은, 가상 차량의 출력과 실제 차량의 출력 사이의 오차가 제로에 수렴하도록 하면, 실제 차량도 가상 차량과 같은 이상적인 조향 성능을 보임을 의미한다. 전, 후륜의 조향각을 결정하기 위하여 기준모델 추종제어(RMFC)를 고찰하고자 한다. 제어로직을 유도하기 위해서는 선형화 된 차량모델이 필요하다. 2 장에서 유도

$$Y_r = -K_r \alpha_r = -K_r \left(\beta - \frac{l_r}{V} r - \delta_r \right)$$

전륜 조향각이 작다고 가정하여 위의 식을 행렬 형태로 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{2(K_f + K_r)}{MV} & -\left[1 + \frac{2}{MV^2}(l_f K_f - l_r K_r)\right] \\ \frac{2(l_f K_f - l_r K_r)}{I_z} & -\frac{2(l_f^2 K_f + l_r^2 K_r)}{I_z V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \gamma \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{2K_f}{MV} & \frac{2K_r}{MV} \\ \frac{2l_f K_f}{I_z} & -\frac{2l_r K_r}{I_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_f \\ \delta_r \end{bmatrix}$$

또는, $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}$ (10)

그리고 가상 차량모델의 상태방정식은 다음과 같다.

$$\dot{\mathbf{x}}_v = \mathbf{A}_v \mathbf{x}_v + \mathbf{B}_v \delta, \quad \delta = u_m \quad (11)$$

여기서, δ 는 운전자의 조향 입력을 나타낸다. 실제 차량과 가상 차량 사이의 오차 벡터, e 는

$$\mathbf{e} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_v = \begin{bmatrix} \beta - \beta_v \\ \gamma - \gamma_v \end{bmatrix} \quad (12)$$

이것을 최소화 시켜주는 입력, u 을 구하기 위하여 식 (12)을 시간에 대해 미분하고 식 (10), (11)을 이용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{e}} &= \mathbf{Ax} - \mathbf{A}_v \mathbf{x}_v + \mathbf{Bu} - \mathbf{B}_v u_m \\ &= \mathbf{A}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_v) + (\mathbf{A} - \mathbf{A}_v) \mathbf{x}_v + \mathbf{Bu} - \mathbf{B}_v u_m \\ &= \mathbf{Ae} + (\mathbf{A} - \mathbf{A}_v) \mathbf{x}_v + \mathbf{Bu} - \mathbf{B}_v u_m \end{aligned} \quad (13)$$

Fig. 5는 RMFC의 전체 흐름도를 나타내고 있다. 위의 식과 같은 오차 동역학(Error dynamics)을 제로에 수렴하게 하는 입력을 폐회로(Closed-loop) 개념으로 유도해 보면 다음과 같다.

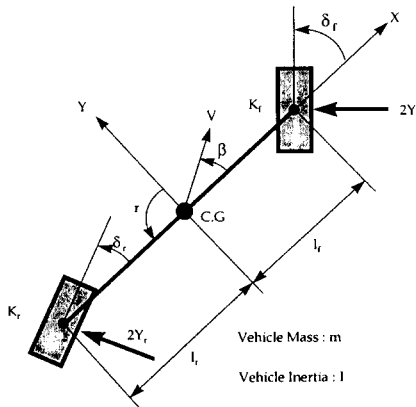


Fig. 4 Simplified linear vehicle model

된 전체차량모델을 전, 후의 좌, 우륜을 각각 중앙에 집중된 것으로 가정하여 Fig. 4와 같이 요각속도와 횡 미끄러짐 각을 상태변수로 하는 운동방정식을 식 (8), (9)로 나타낼 수 있다.

$$MV \left(\frac{d\beta}{dt} + \gamma \right) = 2Y_f + 2Y_r \quad (8)$$

$$I_z \frac{d\gamma}{dt} = 2l_f Y_f - 2l_r Y_r \quad (9)$$

여기서 $Y_f = -K_f \alpha_f = -K_f \left(\beta + \frac{l_f}{V} r - \delta_f \right)$

$$\mathbf{u} = \mathbf{K}^0 \mathbf{x} + \mathbf{K}_v^0 \dot{\mathbf{x}}_v + \mathbf{K}_u^0 u_m \quad (14)$$

여기서, $\mathbf{K}_v^0 = -\mathbf{K}^0 + \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{A}_v - \mathbf{A})$
 $\mathbf{K}_u^0 = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{B}_v$

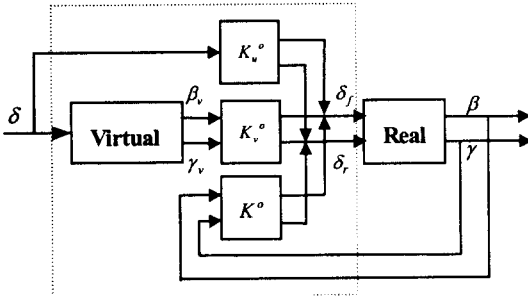


Fig. 5 RMFC flow

식 (14)의 입력을 식 (13)에 대입하면 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$\dot{\mathbf{e}} = (\mathbf{A} + \mathbf{BK}^0)\mathbf{e} \quad (15)$$

위의 식 (15)에서 \mathbf{K}^0 는 피드백 이득(Feedback gain) 행렬로서 다음과 같은 성능지수를 최소화시키는 것으로 결정되어 진다.

$$J = \int_0^{\infty} (\mathbf{e}^T \mathbf{Q} \mathbf{e} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}) dt$$

$$= \int_0^{\infty} (q_\beta e_1^2 + q_\gamma e_2^2 + r_f \delta_f^2 + r_r \delta_r^2) dt \quad (16)$$

최적 제어이론에 따르면 최적 피드백 이득행렬은 다음의 대수 리카티(Riccati) 방정식을 만족하는 해로부터 구할 수 있다.⁹⁾

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{Q} - \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} = 0$$

$$\mathbf{K}^0 = -\mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \quad (17)$$

RMFC에서 쓰이는 가상 차량은 이상적인 조향 성능을 보이는 차량으로서 본 논문에서는 선회시에 차체의 횡 미끄러짐 각을 제로로 하는 성능

으로 정의한다. 식 (11)로 표현되는 가상 차량모델을 Laplace 변환으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} MVs + 2(K_f + K_r) & MV + \frac{2}{V}(l_f K_f - l_r K_r) \\ 2(l_f K_f - l_r K_r) & I_z s + \frac{2(l_f^2 K_f + l_r^2 K_r)}{V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_v \\ \gamma_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2K_f \\ 2l_f K_f \end{bmatrix} \delta \quad (18)$$

식 (18)로부터 크레머 법칙(Cramer's rule)을 적용하여 가상 차량모델의 조향각에 대한 차체 횡 미끄러짐 각의 전달함수(Transfer function)를 구하면 다음과 같다.

$$G_\beta(s) = \frac{\beta_v(s)}{\delta(s)} = G_{\beta s} \frac{\omega_n^2 (1 + T_\beta s)}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} \quad (19)$$

여기서 $G_{\beta s}$ 는 차체 횡 미끄러짐 각의 정상상태 이득(Steady state gain)이고, T_β 는 시정수(Time constant)가 된다.

$$G_{\beta s} = \frac{2l_r(l_f + l_r)K_r - l_f MV^2}{2(l_f + l_r)^2 K_r (1 + K_s V^2)} \quad (20)$$

$$T_\beta = \frac{I_z V}{2l_r(l_f + l_r)K_r - l_f MV^2} \quad (21)$$

또한, K_s 는 차량의 언더/오버스티어를 결정하는 스테빌리티 팩터(Stability factor)이다.¹⁰⁾

$$K_s = \frac{M(l_r K_r - l_f K_f)}{2(l_f + l_r)^2 K_f K_r} \quad (22)$$

식 (20)으로 표현되는 차체 횡 미끄러짐 각의 정상상태 이득을 차량 속도의 변화에 따라서 도시한 결과가 Fig. 6에 나타나 있다.

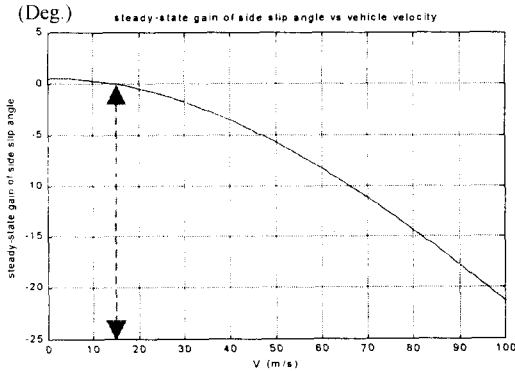


Fig. 6 Steady state gain of side slip angle

Fig. 6 을 살펴보면 차량 속도가 어떤 일정한 값에 이르렀을 때 차체 횡 미끄러짐 각의 정상 상태 이득이 제로가 됨을 알 수 있다. 그러므로 가상 차량 모델은 그 속도에서 이상적인 조향 성능을 보인다. 본 연구에서는 이 때의 가상 차량의 조향 성능을 실제 차량이 추종하도록 하는데 그 목적이 있는 것이다.

4.2 독립 후륜조향(IRWS) 제어

Fig. 7 은 조향 입력을 가할 때 타이어에서 발생하는 수직력을 비교한 그림이다. 차량이 선회 시에 횡 방향으로 하중이동(Lateral load transfer)이 발생하게 되어 선회 외륜측 타이어가 더 큰 하중을 받게 됨을 알 수 있다. 따라서, 외륜측 타이어가 차량운동에 더 큰 영향을 미치게 되므로 외륜만을 조향 하는 것으로도 기존의 4WS의 성능을 충분히 발휘할 수가 있다.^{1,11)} 본 논문에서는 기준모델 추종제어를 독립 후륜조향 차량에 적용하고자 한다. 먼저, IRWS 시스템의 제어 개념을 Fig. 8에 간단히 나타내었다. 기본적으로 다음 2가지의 경우로 설명되어 질 수 있다. 첫째로, 정상원 선회 시와 같이 선회방향이 한 방향인 경우에는 일단, 후륜의 외륜만 전륜 조향각과 동상으로 움직인다. 이것은 내, 외륜이 동시에 동상으로 제어되는 4WS와 구분이 된다. 그리고, 일정 시간 혹은 어느 정도 범위 이상의 조향각 조작이 뒤따르지 않으면 내륜도 동상으로 제어되

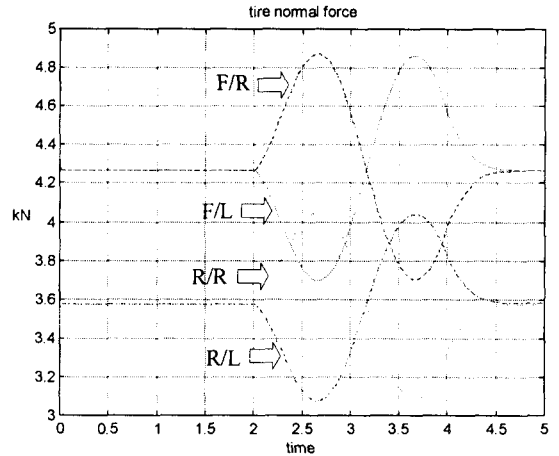


Fig. 7 Steering input and Tire vertical force

어 선회 효율을 높여줄 수 있다. 두 번째는, 이중 차선 변경과 같은 선회 방향이 계속해서 바뀌는 주행에서는 외륜이 제어된 후, 일정시간 범위 내에서 운전자의 조향각 역 조작이 발생하므로 내륜은 즉시 주행 방향과 동상으로 조향 되며 이전

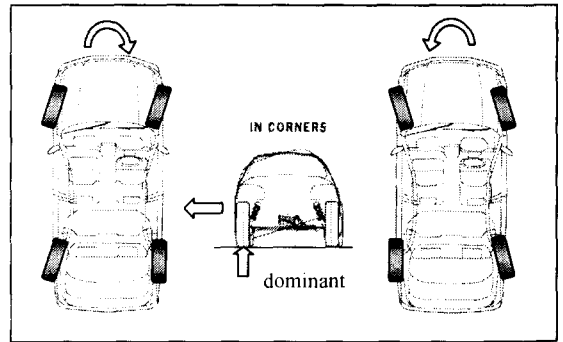


Fig. 8 Concept of independent toe control in rear wheel

의 외륜은 서서히 중립위치로 와서 다음 조작을 위해 대기하게 된다. 참고문헌¹¹⁾을 참조하면, 후륜에서 소모되는 에너지가 4WS 차량의 경우보다 더욱 적게 됨을 알 수 있다. 바로 이점이 IRWS가 선회 방향이 바뀌에 따라 양륜이 역 방향으로 같이 구동 되는 4WS에 비교하여 제어 응답성 측면에서 장점을 갖고 있다고 할 수 있겠

다. Fig. 9는 IRWS의 제어 흐름을 보여준다. 후륜은 식 (14)로 표현된 후륜 조향각에 대해서 두 개의 액추에이터에 의해서 독립적으로 제어된다. 전, 후륜 조향각의 부호가 같으면, 좌, 우륜의 실제 액추에이션은 식 (23), (24)에 의해 결정된다. 즉, 부호가 양(+)인 경우, 식 (23)는 우륜에 사용되고, 좌륜은 식 (24)에 의해서 적용된다.

$$\delta_r^* = \delta_r \quad (23)$$

$$\delta_r^* = 0 \quad (24)$$

한편, 전, 후륜 조향각 부호가 다르면, 후륜의 좌, 우륜은 각각 식 (25), (26)에 의하여 제어된다.

$$\delta_r^* = \delta_r \left(1 - \frac{\delta_f}{\delta_0}\right) \quad \text{when } \delta_f > 0 \quad (25)$$

$$\delta_r^* = \delta_r \left(1 + \frac{\delta_f}{\delta_0}\right) \quad \text{when } \delta_f < 0 \quad (26)$$

4.3 요 각속도 귀환제어

본 절에서는 RMFC를 이용한 IRWS 차량의 성능을 비교 하고자 기존의 연구^{3,4,11)}에서 그 성능이 입증된 요 각속도 귀환제어를 유도하고자 한다. 식 (27)에서 후륜 조향각을 전륜의 조향각과 차량의 요 각속도에 대한 함수로 정의한다.

$$\delta_r = k_\delta \delta_f + k_\gamma \gamma \quad (27)$$

이때 정상 상태에서 차체 횡 미끄러짐 각이 제로가 되도록 하는 이득 k_δ 와 k_γ 을 구하면 식 (28), (29)과 같다.

$$k_\delta = -\frac{K_f}{K_r} \quad (28)$$

$$k_\gamma = \frac{MV^2 + 2(l_f K_f - l_r K_r)}{2K_r V} \quad (29)$$

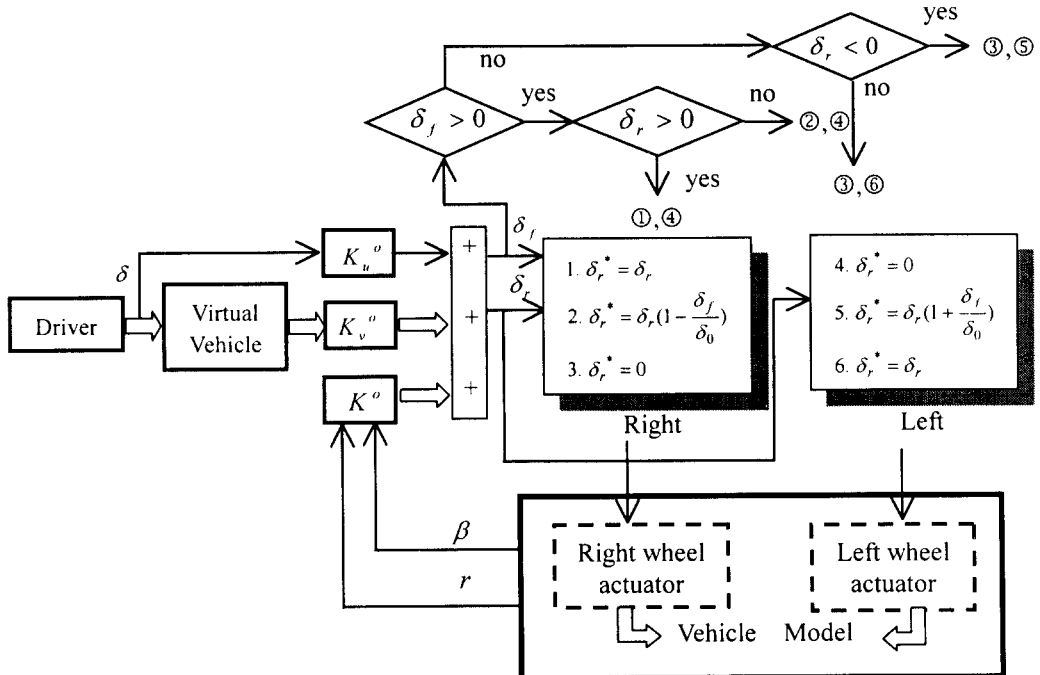


Fig. 9 Control strategy to steer rear wheels in IRWS

5. 전체차량 시뮬레이션

본 절에서는 먼저 RMFC의 성능이 기존의 것보다 어떤 측면에서 우수한지 검증을 하고 나서 RMFC를 IRWS에 적용하였을 때 어떤 결과를 보이는지 고찰하도록 하겠다. 결과 그림에서 RMFC(4WS)는 4장의 식(14)에 의한 것이고 RMFC_IRWS는 식 (23)~(26)에 의해 유도된 값을 전, 후륜의 조향각으로서 입력하였다.

5.1 RMFC검증

5.1.1 스텝 조향 시험

앞에서 유도한 기준모델 추종제어를 평가하기 위하여 초기 속도 80km/h로 주행하다가 2초에서 0.2초 동안 45deg의 조향 입력을 가하는 스텝 조향 시험을 수행하였다. 2WS 차량과 RMFC와 요 각속도 피드백(YVF) 제어가 적용된 4WS 차량을 시뮬레이션 하였으며, Fig. 10과 Fig. 11에서 차체 횡 미끄러짐 각, 요 각속도, 롤각 그리고 횡 가속도를 비교하였다. 4WS 차량이 전체적으로 2WS 차량과는 달리 미리 후륜에 코너링 힘을 발생시키므로 안정된 차량 거동을 보여준다. 특히, RMFC가 적용된 차량은 YVF가 적용된 차량과 비슷한 성능을 보이고 있으며 횡 미끄러짐 각에서는 기준모델을 정확히 추종함으로써 유도된 제어로직이 타당함을 보여주고 있다.

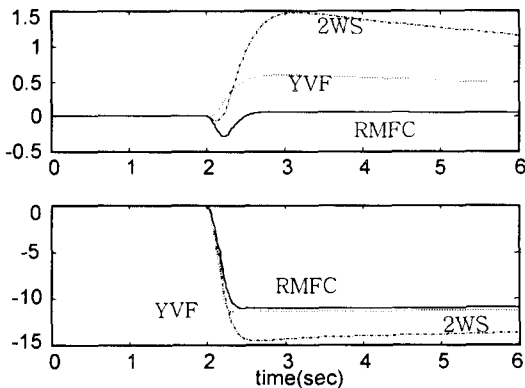


Fig. 10 Step steering test comparison (side slip angle(deg.) & yaw rate(deg./sec))

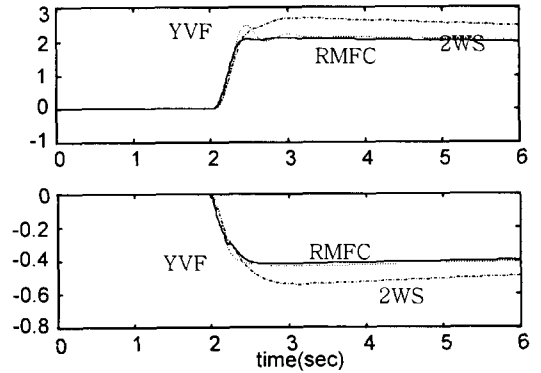


Fig. 11 Step steering test comparison (roll angle(deg.) & lateral acceleration(g))

5.1.2 외란에 대한 시험

RMFC의 강인성을 확인하기 위하여 외란 입력 시험을 수행하였다. 차선 변경 시 1000N의 횡풍이 외란으로 차량의 무게 중심에 약 1초간 작용하는 경우를 대상으로 하였고, 2WS와 YVF와 RMFC가 적용된 4WS의 횡 미끄러짐 각을 비교한 그림이다. RMFC 차량이 외란의 작용에 대해서 가장 안정된 모습을 보여줌을 알 수 있다.

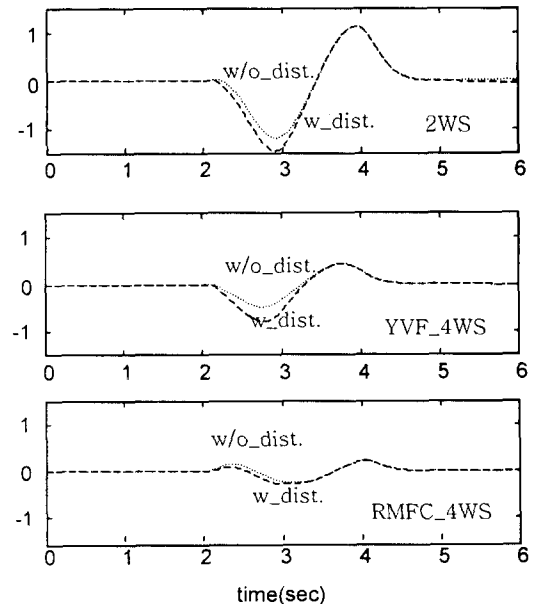


Fig. 12 Disturbance response test for side slip angle(deg.)

5.2 IRWS차량 특성

앞 절에서 확인한 바 있는 RMFC를 독립 후륜조향(RMFC_IRWS) 차량에 적용하여 RMFC_4WS와 비교하고자 한다. (side slip angle, yaw rate, lateral acceleration)

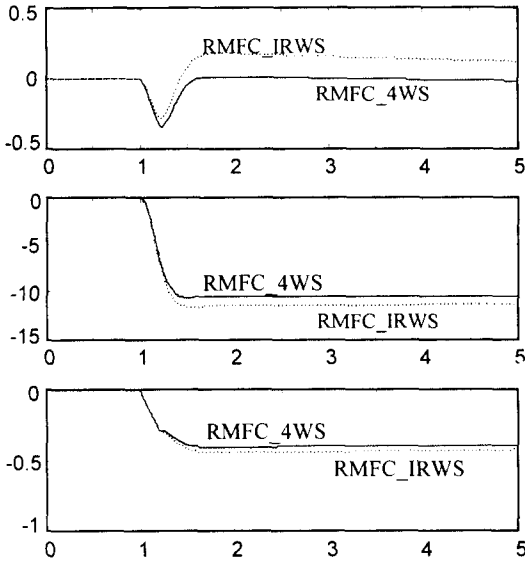


Fig. 13 Comparison between IRWS and 4WS for step input test (side slip angle(deg.), yaw rate(deg./sec), lateral acceleration(g))

다음의 결과와 참고문헌^{1,11)}을 참조하면 결과적으로 IRWS 차량으로도 4WS 차량의 성능과 거의 동일한 성능을 발휘할 수 있고, 오히려 응답 시간 측면에서는 훨씬 큰 장점을 갖고 있음을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 기준모델 추종제어를 이용하여 독립 후륜조향 차량을 제어 해석하였다. 얻어진 결론을 다음과 같이 요약 할 수 있다.

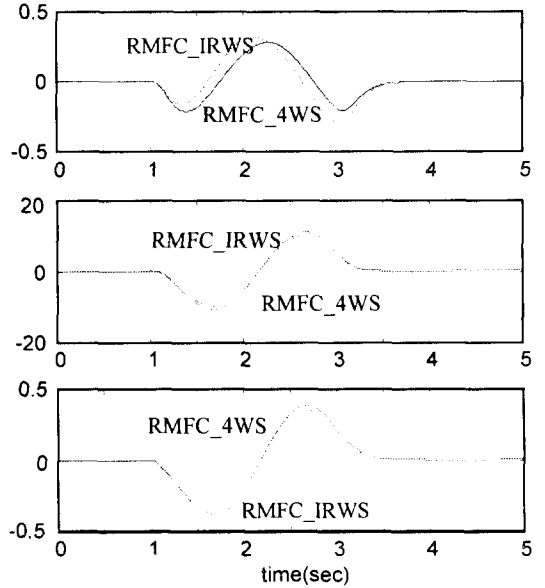


Fig. 14 Comparison between IRWS and 4WS for lane change test (side slip angle(deg.), yaw rate(deg./sec), lateral acceleration(g))

- 1) 불필요한 요 운동을 줄이고, 차량의 과도 조향성능의 향상을 위해 이상적인 기준 차량모드를 설정하여, 이를 추종하는 제어로직(RMFC)을 유도하였다. 그리고 이를 독립 후륜조향을 위한 제어전략에 이용하였다.
- 2) 주행 시뮬레이션을 통해 RMFC 제어로직과 기존의 4WS 제어로직을 비교하였다. RMFC는 YVF 보다 차량에 횡풍과 같은 외란이 작용하여도 별다른 운전자의 노력 없이 극복 할 수 있으며, 이로써 외란에 대한 강인성이 입증되었다.
- 3) RMFC 로직을 IRWS 차량에 적용하여 기존의 4WS 차량과 비교하여 거의 동일한 성능을 보임을 확인하였으므로 외륜만을 조향하여도 효율적인 시스템이 될 수 있다고 사료된다.

후 기

이 논문은 1999년 한양대학교 교내 연구비에 의하여 연구 되었음

참 고 문 헌

- 1) 이상호, 황교성, 이연구, 한창수, "후륜의 능동적 독립 토우제어에 의한 차량 안정성 향상", 한국자동차공학회지, Vol.7, No.2, SAE No. 99370065, pp. 320~334, 1999.
- 2) S. Sano, Y. Furukawa, and S. shiraishi, "Four Wheel Steering System with Rear Wheel Steer Angle Controlled as a Function of Steering Wheel Angle", SAE, 860625, 1986.
- 3) H. Inoue and F. Sugawara, "Comparison of Feed forward and Feedback Control for 4WS", Vehicle System Dynamics, pp.425~436, 1993.
- 4) 장진희, 김상현, 한창수, "후륜조향 동역학 모델 및 제어로직 개발", 한국자동차공학회지, Vol.4, No.6, SAE No. 95370118, pp.39~51, 1995.
- 5) M. Iguchi, "A Cooperative Steering Control between Front and Rear Wheels in Four-Wheel-Steering Cars", JSAE Review Vol.8, No.2, 1987.
- 6) M. Nagai, "Active Four Wheel Steering System by Model Following Control", Proceedings of 11th IAVSD Symposium, Vehicle System Dynamics, vol.18, August 21-25, pp.428-439, 1989.
- 7) P.I. Ro and H. Kim, "Four wheel steering system for vehicle handling improvement: a robust reference control using the sliding mode", Proc. Instn. Mech. Engrs. Vol. 210, 1996.
- 8) E. Bakker, H.B. Pacejka, and L. Linder, "A New tire model with an application in vehicle dynamics studies", SAE, 890087, 1989.
- 9) D.E. Kirk, Optimal Control Theory An Introduction, Prentice Hall Inc., 1970.
- 10) T.D. Gillespie, Fundamentals of Vehicle Dynamics, SAE, Inc., 1992.
- 11) Lee, S. H., Lee, U. K., Ha, S. K., and Han, C. S. "Four-wheel independent steering (4WIS) system for vehicle handling improvement by active rear toe control", JSME International Journal, Vol.42, No.4, 1999.