

Active 4WS와 AFS 및 DYC를 통합한 SUV 차량의 통합운동제어시스템 개발

송정훈*

동명대학교 메카트로닉스공학과

Development of Integrated Dynamics Control Systems of SUV with Active 4WS, and Integration of AFS and DYC

Jeonghoon Song*

Department of Mechatronics Engineering, Tongmyong University, Busan 48520, Korea

(Received 12 March 2024 / Revised 8 July 2024 / Accepted 7 August 2024)

Abstract : To improve the lateral stability and steerability of an SUV, two integrated dynamics control systems(IDCSs) were developed: IDCSs and FSFB. IDCS integrates an active front steer(AFS) and an active rear steer(ARS), whereas an FSFB combines an AFS and a direct yaw moment control(DYC) with the fuzzy control method. To design two control systems, a 16-degree-of-freedom vehicle model that includes a suspension model was used. IDCS and FSFB were tested with two steering inputs and two road conditions. The result shows that IDCSs and FSFB reduce the yaw rate error and the body slip angle simultaneously in every driving condition. Because the IDCSs do not control the brake system, deceleration is smaller, which increases the yaw rate. The yaw rate error of the IDCSs is increased when the steering angle is increased compared to that of the FSFB. However, the IDCSs reduce the body slip angle when the velocity is similar.

Key words : Integrated dynamics control with steer systems(IDCS, 조향장치를 이용한 통합운동제어), Front steer front brake(FSFB, 전륜 조향 및 전륜 제동을 이용한 통합운동제어), Active 4WS(능동 4륜조향), Lateral stability(횡방향 안정성), Vehicle steerability(차량 조향성)

Nomenclature

A_w	: area of master cylinder, m^2	r_{rR}	: radius of rear pinion, m
B_{roll}	: roll axis torsional damping, Nm/radian/s	R_w	: wheel radius, m
c_s, c_u	: suspension/tire damping constant, N s/m	T_{motorF}, T_{motorR}	: motor torque of AFS/ARS, Nm
F_{x_s}, F_{y_s}	: tire longitudinal/lateral force, N	T_{roll}	: rolling resistance torque, Nm
h_s	: distance from centre of gravity to roll axis, m	v_x, v_y	: vehicle longitudinal/lateral velocity, m/s
I_w	: mass moment inertia of the wheel, $kg\ m^2$	$\delta_f, \delta_p, \delta_r$: steer angle of front wheel/pinion/rear wheel, radian
I_x, I_y, I_z	: vehicle inertia moment about roll/pitch/yaw axis, $kg\ m^2$	γ, ϕ, φ	: yaw/roll/pitch angle, radian
K_{roll}	: roll axis torsional stiffness, Nm/radian	η, λ	: positive constants
k_s, k_u	: suspension/tire spring stiffness, N/m	ω_x	: rotational speed of wheel, radian/s
m_{total}, m_s, m_{ui}	: vehicle total mass/sprung mass/umass, kg		
P_b	: brake fluid pressure, N/m^2		
R_b	: distance from centre of wheel to brake path, m		

1. 서론

사시 시스템은 제동, 조향, 현가 시스템으로 구성되며 자동차의 동역학 성능을 직접적으로 결정하는 시스템이

*Corresponding author, E-mail: jhsong@tu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

다. 주행 안정성 및 조향성 향상 그리고 승차감 개선에 대한 요구가 증가함에 따라 다양한 형태로 개발되어 왔다. 하지만 개별 샤시 제어 시스템은 기능적으로 종방향, 횡방향 혹은 수직 방향 중 단일 방향의 동역학 영역에만 작동하기 때문에 하나의 제어 시스템만으로는 주행 성능을 최대화하는데 한계가 있다.¹⁾ 또한 개별 샤시 시스템이 동시에 동작하면 시스템 간 간섭이 발생하여 성능에 악영향을 미치게 된다. 따라서 개별 샤시 시스템 간의 간섭을 방지하고 전체적인 동역학 성능을 향상시키기 위하여 샤시 제어 시스템의 통합 제어가 고려되고 있다.

Fig. 1은 샤시 통합제어에 대한 개념도이다.¹⁾ 그림에서 차량이 종방향으로 가속할 때나 감속할 때는 제동 장치가 포함되는 것이 유리하지만 조향 입력이 가해질 때는 현가 장치가 포함되는 것이 제어 한계를 확장할 수 있음을 나타낸다. 또한 모든 운전 조건에서 능동 사륜 조향 장치(Active 4WS)가 큰 역할을 한다.

Fig. 1에 나타난 것과 같이 현가 장치는 주로 조향 장치와 통합제어 시스템을 이룬다. Cao와 Zheng²⁾ 그리고 Chen 등³⁾은 현가장치와 조향 장치를 결합시킨 통합 제어 시스템을 개발하였다. 이들의 시스템은 롤 각(Roll angle)과 피치 각(Pitch angle)의 발생을 감소시켜 승차감

과 조향 성능의 향상을 얻고자 하였다. 이러한 통합제어 시스템은 현가 장치의 역할이 제한적이며 네 바퀴의 현가 장치를 각각 제어하여야 하므로 제어가 복잡하다는 단점이 있다.

조향 장치와 제동 장치를 결합한 통합제어 시스템은 가장 많이 연구되는 장치이다.^{3,7)} 제동 장치는 종방향 안정성과 제어성능에 직접적으로 관련이 있으며 조향 장치는 횡방향 주행 성능을 결정하는 부품이기 때문이다.

이 연구의 목적은 현가장치 모델을 포함한 16 자유도의 차량 모델을 사용하여 능동전륜조향장치(AFS, Active Front Steer)와 능동후륜조향장치(ARS, Active Rear Steer)를 통합제어하는 IDCS(Integrated Dynamics Control with Steer systems)를 개발하는 것이다. 또한 AFS와 DYC(Direct Yaw moment Control)를 결합한 FSFB(Front Steer Front Brake)를 설계한다(Fig. 2). 개발된 IDCS와 FSFB의 성능을 비교 평가하는 것이 두 번째 목적이다.

통합제어시스템을 AFS와 ARS 등 조향장치로 구성하면 요 모멘트를 제어하는 과정에서 감속이 적어 승차감 악화를 방지할 수 있다. 또한 감속 후 다시 가속할 필요성이 줄어들어 연비 향상을 기대할 수 있다.⁸⁾ 반면 제동장치가 포함된 FSFB는 응답성을 향상시킬 수 있으며 감속으로 인하여 선회 안전성을 향상시킬 수 있다.

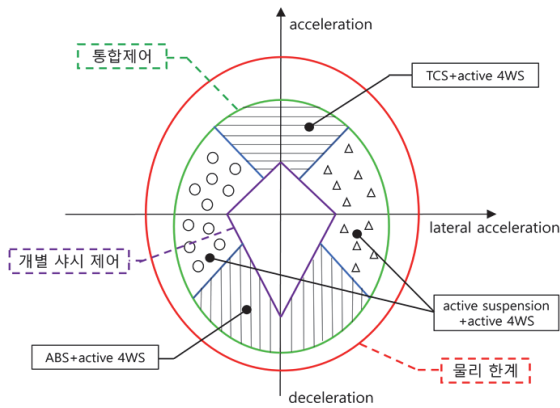


Fig. 1 Schematic of integrated chassis control system¹⁾

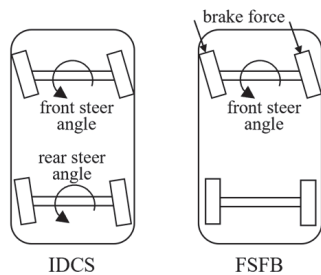


Fig. 2 IDCS and FSFB

2. 비선형 SUV 차량 모델

2.1 차량 모델

차량의 모델식은 Fig. 3에 나타난 16 자유도의 전체 차량 모델(Full car model)을 사용한다. 16 자유도는 종방향 속도(v_x), 횡방향 속도(v_y), 요(Yaw) 각(γ) 롤(Roll) 각(ϕ), 피치(Pitch) 각(φ), 네 바퀴의 회전 속도($\dot{\theta}_i$), Sprung 질량

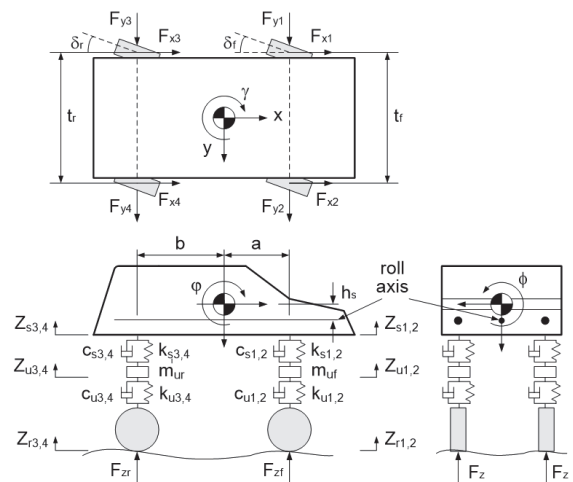


Fig. 3 Sixteen freedom of degree vehicle model

의 수직 운동(Heave, z_s), 네 개의 Unsprung 질량의 수직 운동(z_{usi}), 전륜 추가 조향각($\Delta\delta_f$) 그리고 후륜 조향각(δ_r)으로 구성 된다. 차량의 수학적 모델은 아래와 같다.

$$m_{total}(\dot{v}_x - v_y\dot{\gamma}) - m_s h_s \dot{\gamma}\dot{\phi} = \sum_{i=1}^4 F_{xi} \quad (1)$$

$$m_{total}(\dot{v}_y - v_x\dot{\gamma}) + m_s h_s \dot{\phi}\dot{\gamma} = \sum_{i=1}^4 F_{yi} \quad (2)$$

$$I_z \ddot{\gamma} = aF_{y1} + \frac{t_f}{2} F_{x1} + aF_{y2} - \frac{t_f}{2} F_{x2} - bF_{y3} + \frac{t_f}{2} F_{x3} - bF_{y4} - \frac{t_f}{2} F_{x4} + I_x \ddot{\phi} \quad (3)$$

$$I_x \ddot{\phi} + B_{roll}\dot{\phi} + K_{roll}\phi = m_s g h_s \sin\phi - m_s (\dot{v}_y + v_x\dot{\gamma}) h_s \cos\phi \quad (4)$$

$$I_y \ddot{\phi} = a(F_{s1} + F_{s2}) - b(F_{s3} + F_{s4}) \quad (5)$$

$$I_w \ddot{\theta}_i = -T_b - F_{ii} R_w - T_{rolli} \quad (6)$$

한편 이 연구에서는 Dugoff의 타이어 모델을 사용하여 타이어에서 발생하는 힘을 계산하였다.⁹⁾

2.2 조향 장치 모델

조향 장치는 차량의 진행 방향을 결정하는 사시 부품이다. IDCS를 구성하는 AFS와 ARS의 개발을 위해서는 전륜 조향 장치 및 후륜 조향 장치에 대한 수학적 모델이 필요하다.

이 연구에서는 참고 문헌 [8]에서 소개한 Reduced Order Model을 사용한다. 이 모델은 조향 휠에서 피니언 기어까지 하나의 시스템으로 단순화시킨 것이다. 운전자의 조향 토크와 AFS 모터의 출력 토크 그리고 타이어에서 발생하는 외력을 표시하면

$$I_{eq} \ddot{\delta}_p + B_{eq}(\dot{\delta}_p - \dot{\delta}_f) + K_{eq}(\delta_p - \delta_f) = T_{driver} + T_{motorF} - T_{loadF} \quad (7)$$

여기서, I_{eq} 는, B_{eq} , K_{eq} 는 각각 조향축, 피니언 기어, 타이어 로드 그리고 타이어의 등가 관성, 등가 감쇠계수 그리고 등가 강성계수이다. 또한 T_{driver} , T_{motorF} , T_{loadF} 는 각각 운

전자에 의한 조향 토크 입력, AFS의 모터에서 발생하는 보조 조향력 그리고 타이어에서 발생하는 마찰 토크를 의미한다.

후륜 조향 장치의 모델은 Steer-By-Wire(SBW) 모델을 사용하였다.⁶⁾ 이 장치는 모터, 모터와 연결된 후륜 랙 기어 그리고 후륜으로 구성된다.

ARS의 동작을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$M_r \ddot{x}_r + B_r(\dot{x}_r - \dot{\delta}_r r_{pR}) + K_r(x_r - \delta_r r_{pR}) = -F_{loadR} + T_{motorR} / r_{pR} \quad (8)$$

여기서 M_r , B_r 그리고 K_r 은 각각 후륜 랙과 타이어 로드의 등가 질량, 등가 댐핑 계수 그리고 등가 강성 계수이다. 또한 F_{loadR} 은 랙에 가해지는 뒷바퀴 타이어의 부하이며 T_{motorR} 은 ARS 구동 모터에서 발생하는 토크이다.

2.3 현가 장치 모델

현가 장치는 차체와 차축 사이의 연결 장치이며 차량의 승차감과 안정성에 큰 영향을 미치는 부품이다. 수동 현가 장치의 수학적 모델은 다음과 같다. 먼저 Sprung 질량의 수직 운동(Heave motion)은

$$m_s \ddot{z}_s = -F_{s1} - F_{s2} - F_{s3} - F_{s4} \quad (9)$$

이다. 여기서

$$F_{s1} = k_{s1}(z_{s1} - z_{u1}) + c_{s1}(\dot{z}_{s1} - \dot{z}_{u1}) - \frac{K_{af}}{t_f} \left(\phi - \frac{z_{u1} - z_{u2}}{t_f} \right) \quad (10)$$

$$F_{s2} = k_{s2}(z_{s2} - z_{u2}) + c_{s2}(\dot{z}_{s2} - \dot{z}_{u2}) + \frac{K_{af}}{t_f} \left(\phi - \frac{z_{u1} - z_{u2}}{t_f} \right) \quad (11)$$

$$F_{s3} = k_{s3}(z_{s3} - z_{u3}) + c_{s1}(\dot{z}_{s3} - \dot{z}_{u3}) - \frac{K_{ar}}{t_r} \left(\phi - \frac{z_{u3} - z_{u4}}{t_r} \right) \quad (12)$$

$$F_{s4} = k_{s4}(z_{s4} - z_{u4}) + c_{s4}(\dot{z}_{s4} - \dot{z}_{u4}) + \frac{K_{ar}}{t_r} \left(\phi - \frac{z_{u3} - z_{u4}}{t_r} \right) \quad (13)$$

이며

$$z_{s1} = z_s - a\varphi + \frac{t_f}{2}\phi, \quad z_{s2} = z_s - a\varphi - \frac{t_f}{2}\phi, \quad (14), (15)$$

$$z_{s3} = z_s + b\phi + \frac{t_r}{2}\phi, \quad z_{s4} = z_s + b\phi - \frac{t_r}{2}\phi \quad (16), (17)$$

이다. 한편 Unsprung 질량의 동작은

$$m_u \ddot{z}_{ui} = F_{si} - F_{ui} \quad (18)$$

으로 나타낼 수 있으며 F_{ui} 는 다음과 같다.

$$F_{ui} = c_{ui}(\dot{z}_{ri} - \dot{z}_{ui}) + k_{ui}(z_{ri} - z_{ui}) \quad (19)$$

3. 통합운동제어시스템(IDCS, FSFB) 개발

3.1 통합운동제어시스템의 구성

통합운동제어시스템은 퍼지논리제어(Fuzzy Logic Control, FLC) 방법을 사용하여 설계한다. 이 시스템은

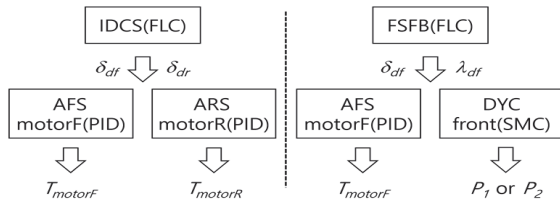


Fig. 4 Hierarchical structure of IDCS and FSFB systems

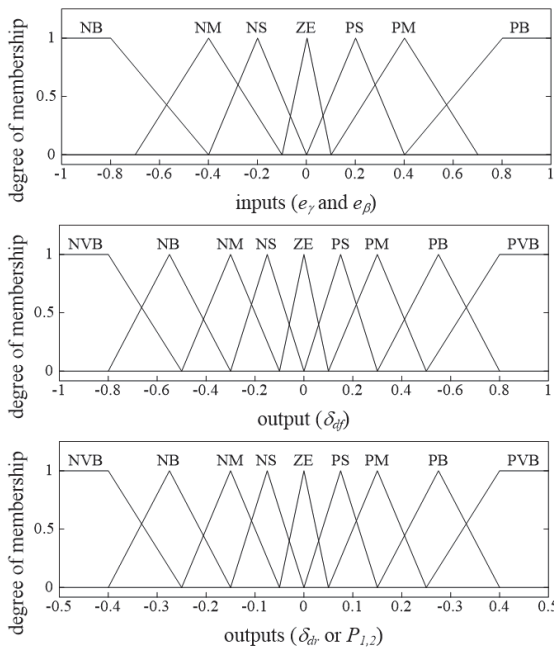


Fig. 5 Input and output membership function of IDCS and FSFB

상위 제어기와 하위 제어기의 이층 구조로 이루어진다. IDCS의 상위 제어기는 SUV의 요 속도가 목표 요 속도(Yaw rate)를 추종하고 차체 미끄러짐 각(Body slip angle) 오차를 최소화시키기 위하여 전륜 조향각(δ_f)과 후륜 조향각(δ_r)을 동시에 결정한다. FSFB는 전륜 조향각과 전륜 좌우 바퀴의 미끄러짐 값(λ_1 또는 λ_2)을 계산한다(Fig. 4).

상위 제어기의 제어 입력은 다음과 같다.

e_γ = reference yaw rate- yaw rate

e_β = reference body slip angle- body slip angle

상위 제어기는 Mamdani 추론을 이용하여 구성한다. 요 속도 오차와 횡방향 미끄러짐 각 오차의 전체 집합은 $[-1,1], [-1,1]$ 이고 각각 7개의 삼각 멤버십 함수를 사용하여 설계하였다. IDCS 제어 출력의 전체 집합은 $[-1,1], [-0.5,0.5]$ 로 설정하였다. FSFB 출력의 전체 집합은 $[-1,1], [-0.5,0.5]$ 이다. 이들은 각각 9개의 삼각 멤버십 함수로 구성되었다(Fig. 5).

3.2 AFS와 ARS 설계

IDCS의 하위 제어기를 구성하는 AFS와 ARS는 PID(Proportional-Integral-Differential) 방법을 이용하여 설계하였다. 상위 제어기에서 계산된 목표 전륜 조향각은 AFS가 구현하며 목표 후륜 조향각은 ARS가 실현한다.

AFS를 설계하기 위하여 먼저 $e_{\delta f} = \delta_p - \delta_{df}$ 라 정의한다. δ_{df} 는 상위 제어기에서 전달되는 목표 전륜 조향각이다. 전륜 조향 토크는 다음과 같다.

$$T_{motorF}(k) = T_{motorF}(k-1) + (K_p + K_i + K_d)e_{\delta f}(k) - (K_p + 2K_d)e_{\delta f}(k-1) + K_d e_{\delta f}(k-2) \quad (20)$$

여기서 K_p, K_i, K_d 는 비례, 적분, 미분 계수이다.

ARS의 목표 후륜 조향각 또한 식 (15)와 유사한 방법으로 계산할 수 있다.

3.3 DYC 설계

FSFB의 하위 제어기는 AFS와 DYC로 구성된다. DYC는 왼쪽 바퀴와 오른쪽 바퀴의 제동 압력을 달리하여 요 모멘트를 발생시키는 제어기이다. SUV가 선회할 때 발생하는 요 속도 오차(e_γ)가 0보다 클 경우 전륜 왼쪽 바퀴의 제동 압력을 제어하며 요 속도 오차가 0보다 작으면 전륜 바깥쪽 바퀴의 제동 압력을 제어한다.

상위 제어기에서 계산된 목표 미끄러짐 값을 ABS(Anti-lock Brake System)을 이용하여 제동압력으로

구현한다. ABS는 Sliding Mode Control(SMC) 방법을 이용하여 설계하였다. 식 (6)에 나타난 바퀴 모델에서

$$\begin{aligned}\dot{\omega}_i &= -\frac{1}{I_{wi}}(P_{wi}A_wR_b + F_{xi}R_w + T_{rolli}) \\ &= -(K_i u + \tau_x + \tau_r)\end{aligned}\quad (21)$$

여기서 아래 첨자 $i=1$ 또는 2 이며 각각 전륜 좌측 또는 우측을 뜻한다. 또한 $K_i = A_w R_b / I_{wi}$, $\tau_{xi} = F_{xi} R_w / I_{wi}$, $\tau_{ri} = T_{rolli} / I_{wi}$ 이며 제어 입력인 $u_i = P_{bi}$ 이다. 또한 미끄러짐 값은 다음과 같다.

$$\lambda_{si} = \frac{v_x - R_w \omega_{xi}}{v_x}\quad (22)$$

슬라이딩 표면인 S 는 다음과 같이 정의된다.

$$S = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right) \int_0^t \lambda_r dr = \dot{\lambda}_r + \lambda \int_0^t \lambda_r dr\quad (23)$$

여기서 $\lambda_r = \lambda_{di} - \lambda_{si}$ 이며 λ_{di} 는 상위 제어기에서 계산된 전륜의 목표 미끄러짐 값이다. 슬라이딩 표면 S 를 미분하고 식 (21)과 (22)를 대입하면

$$\begin{aligned}\dot{S} &= \dot{\lambda}_r + \lambda \lambda_r = -\dot{\lambda}_{si} + \lambda(\lambda_{di} - \lambda_{si}) \\ &= \frac{R_w}{v_x^2} \left[-(K_i u_i + \tau_{xi} + \tau_{ri}) v_x - \omega_{xi} \dot{v}_x + \frac{v_x^2 \lambda}{R_w} (\lambda_{di} - \lambda_{si}) \right]\end{aligned}\quad (24)$$

연속 제어법에 따른 최적의 입력 추정치는 $\dot{S} = 0$ 에서 구할 수 있다. 즉,

$$\hat{u} = -\frac{1}{v_x K_i} \left[(\hat{\tau}_x + \hat{\tau}_r) v_x + \omega_{xi} \dot{v}_x - \frac{v_x^2 \lambda}{R_w} (\lambda_{di} - \lambda_{si}) \right]\quad (25)$$

이다. 불연속값인 \bar{u} 를 다음과 같이 정의하고

$$\bar{u} = \frac{\tau_{ri}^* + \eta + \xi}{K_i} \text{sgn}(S)\quad (26)$$

$\xi = \tau_{xi}^*$ 로 설정하면 $u = \hat{u} + \bar{u}$ 이므로 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned}u_i = P_{bi} &= -\frac{1}{v_x K_i} \left[(\hat{\tau}_{xi} + \hat{\tau}_{ri}) v_x + \omega_{xi} \dot{v}_x - \frac{v_x^2 \lambda}{R_w} (\lambda_{di} - \lambda_{si}) \right] \\ &+ \frac{\tau_{xi}^* + \tau_{ri}^* + \eta}{K_i} \text{sat}(S)\end{aligned}\quad (27)$$

4. 결과

개발된 IDCS 및 FSFB는 정현과 조향 입력과 J-turn 조향 입력을 이용하여 눈길 및 젖은 아스팔트 노면 조건에서 성능 평가를 실시하였다.

4.1 눈길에서의 성능 평가

눈길은 동절기 운전에서 겪을 수 있는 가장 미끄러운 노면 중 하나이며 ABS 등과 같은 안전 장치가 장착되지 않은 차량이라면 쉽게 제어 불능 상태에 빠질 수 있다. 또한 타이어와 노면의 마찰이 적기 때문에 SUV가 회전할 때 진행 방향이 운전자의 의도와는 다른 방향으로 나아갈 수도 있다.

Fig. 6과 Fig. 7은 눈길에서 진폭이 점점 커지는 정현과 조향 입력이 가해질 때 통합운동제어장치인 IDCS 또는 FSFB가 장착된 차량과 장착되지 않은 차량의 주행 성능을 비교한 것이다. 초기 속도는 15 m/s이며 운전자에 의한 제동 입력은 없다. 또한 평지를 가정하였으며 외부 환경에 의한 영향(바람, 기온, 습도등)은 무시하였다.

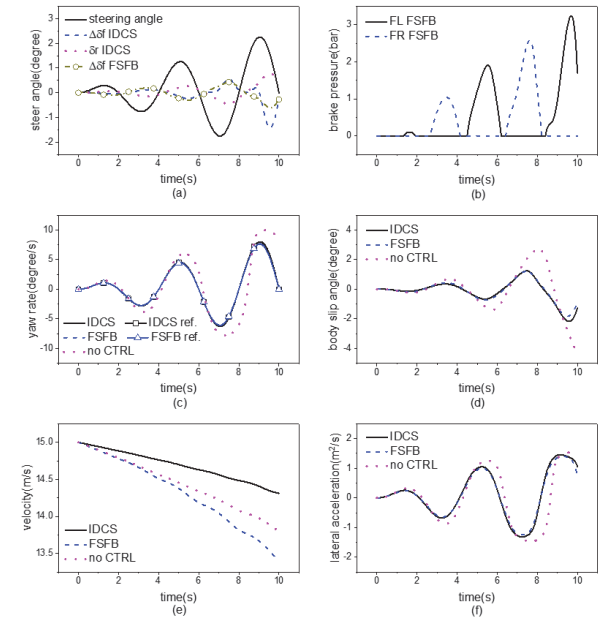


Fig. 6 Vehicle responses on sinusoidal steering input on snow paved road

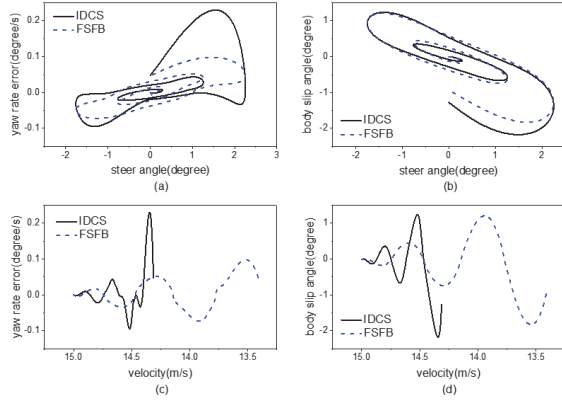


Fig. 7 Yaw rate error and body slip angle on snow paved road

Fig. 6(a)는 조향 입력 및 IDCS에 의한 전륜 추가 조향 각과 후륜 조향각을 나타낸다. 또한 FSFB에 의한 전륜 추가 조향각도 표시하였다. 조향 입력이 커짐에 따라 추가 전륜 조향각 및 후륜 조향각은 점차 커지고 있다. FSFB에 의한 제동 압력은 Fig. 6(b)에 표시하였다. 조향 입력에 따라 제동 압력이 가해지는 전륜 바퀴가 변경되며 제동 압력의 크기도 커진다. 요 속도와 횡방향 미끄러짐 각은 Fig. 6(c)와 (d)에 나타냈다. 제어를 하지 않은 SUV 차량은 요 속도 및 미끄러짐 각이 매우 커져 제어 불능 상태에 빠짐을 확인할 수 있다. 반면 IDCS 및 FSFB의 요 속도는 목표 요 속도를 매우 잘 따르고 있어 SUV의 안정성이 크게 개선되었다. 또한 미끄러짐 각도 크게 감소되어 조향 성능이 개선되었다. FSFB의 미끄러짐 각은 IDCS에 비하여 최대값 기준으로 약 16%의 감소를 보였지만 이는 감속에 의한 영향이 가장 큰 것으로 판단된다.

차속은 Fig. 6(e)에 나타냈다. IDCS를 장착한 SUV는 초기 속도와 비교하면 약 5%, FSFB는 약 11%의 감속을 보였다. 이는 FSFB에 의한 제동 압력 때문이다. SUV의 횡방향 가속도는 Fig. 6(f)에 표시하였다. FSFB를 장착한 SUV의 횡방향 가속도의 응답 속도는 제어하지 않은 것보다 최대 10.7% 빨라졌다.

Fig. 7(a)와 (b)는 조향 입력에 따른 요 속도 오차와 차체 미끄러짐 각을 나타낸다. 또한 Fig. 7(c)와 (d)는 차속 변화에 따른 요 속도 오차와 차체 미끄러짐 각을 나타낸다. 초기 차속이 빠르고 조향각이 작은 시기에는 IDCS의 요 속도 오차와 미끄러짐각이 FSFB에 비하여 작다. 하지만 조향각이 커질수록 요 속도 오차가 FSFB에 비하여 급격히 커지고 있다. 하지만 차체 미끄러짐 각은 최대 조향각이 가해질 때 IDCS의 속도가 빠르다는 점에서 FSFB에 비하여 제어 성능이 떨어지지 않는다고 판단된다.

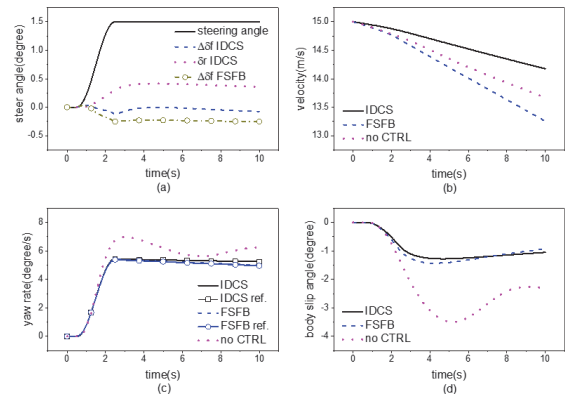


Fig. 8 Vehicle responses on J-turn steering input on snow paved road

Fig. 8은 J-turn 조향 입력이 가해질 때 SUV 차량의 응답을 나타낸다. 통합운동제어장치를 장착한 SUV 차량의 요 속도는 목표 요 속도를 잘 추종하여 안정성이 개선되며 미끄러짐 각도 역시 제어되지 않은 SUV 차량에 비하여 크게 감소되었음을 나타낸다(Fig. 8(c), (d)). 특히 미끄러짐 각도는 제어하지 않은 SUV에 비하여 최대값 기준 IDCS는 63.5%, FSFB는 59% 감소된 값을 보여주었다. 또한 차속의 차이가 크지 않는 2.5초에서 7초 사이에는 IDCS의 미끄러짐 각이 작지만 이후에는 FSFB의 미끄러짐 각이 더 작음을 확인할 수 있다.

4.2 젖은 아스팔트 노면

젖은 아스팔트 노면은 운전 중 자주 경험하는 운전 조건이지만 마찰 계수는 건조한 아스팔트 노면에 비하여 대략 30~40% 낮다. 부산 지역의 교통사고를 분석한 결과 비 오는 날의 교통사고 발생 확률은 그렇지 않은 날에 비하여 약 1.7배 높다는 분석 결과도 발표되었다.¹⁰⁾

Fig. 9는 점차 커지는 조향입력이 가해질 때 IDCS, FSFB 그리고 제어되지 않은 SUV 차량의 응답을 나타낸다. 앞의 결과와 비슷하게 조향입력이 커짐에 따라 추가 전륜 조향각과 후륜 조향각의 크기는 점차 커진다. 또한 제동 압력이 제어되는 FSFB 차량의 감속이 가장 크게 나타났다.

젖은 아스팔트 노면에서도 IDCS와 FSFB의 요 속도는 목표 요 속도를 잘 추종하였으며 차체 미끄러짐 각도도 크게 감소하였다. 특히 최대 미끄러짐 각은 제어하지 않은 차량에 비하여 FSFB는 42.4%, IDCS는 62.6%의 값을 보여주었다.

조향 입력 변화와 차속 변화에 따른 요 속도 오차 및 차체 미끄러짐 각은 Fig. 10에 표시하였다. 조향 입력이 커지면 IDCS의 요 속도 오차는 FSFB에 비하여 크게 발

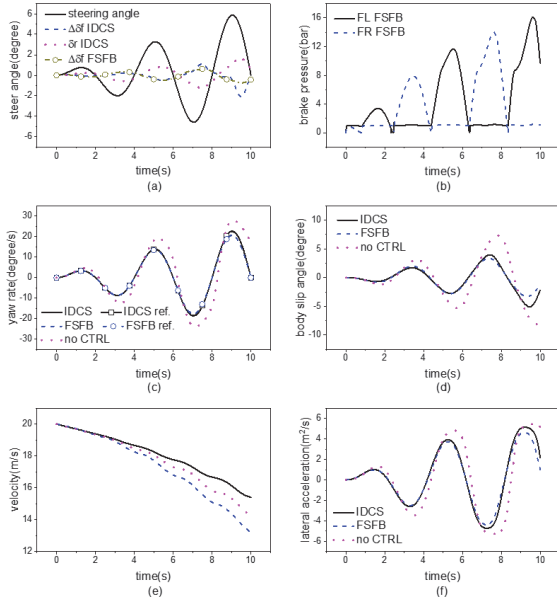


Fig. 9 Vehicle responses on sinusoidal steering input on wet asphalt

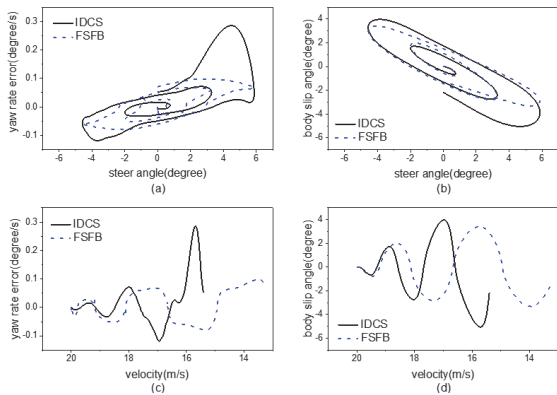


Fig. 10 Yaw rate error and body slip angle on wet asphalt

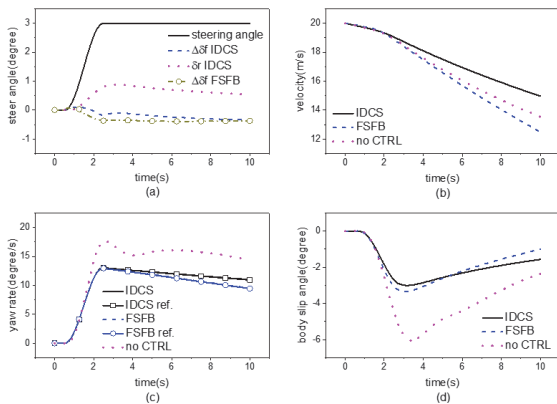


Fig. 11 Vehicle responses on J-turn steering input on wet asphalt

생한다. 하지만 요 속도와 비교하면 요 속도 오차 크기는 작으며(Fig. 9(c)와 Fig. 10(a)) 차체 미끄러짐 각에 대한 제어 성능은 FSFB의 차속이 느리다는 점에서 나쁘지 않은 것으로 판단된다.

젖은 아스팔트 노면에서 J-turn 조향 입력이 가해질 때의 응답은 Fig. 11에 표시하였다. 앞의 실험 결과와 비슷하게 통합운동제어장치에 의한 차량의 성능 개선을 보여주고 있다. IDCS 차량의 목표 요 속도가 FSFB에 비하여 더 큰 것은 차속이 더 빠르기 때문이다. 모의 실험이 종료되는 10초에서 IDCS 차량은 최대 약 13% 더 큰 요 속도를 보여준다. 차체 미끄러짐 각은 초기 차속이 비슷할 때 IDCS의 값이 작으며 큰 감속을 보이는 FSFB의 값은 빠르게 줄어든다. 제어가 장착되지 않은 SUV의 운동은 매우 불안정하며 조향 성능도 악화되었음을 볼 수 있다.

5. 결론

- 1) 미끄러운 노면에서 SUV 차량의 안정성 및 조향 성능을 향상시키기 위하여 AFS와 ARS를 결합한 통합운동제어시스템인 IDCS와 AFS와 DYC를 결합한 FSFB를 개발하였다. 이들의 개발 및 성능 평가를 위하여 현가장치 모델을 포함한 16 자유도의 차량 모델을 사용하였다. 눈길과 젖은 아스팔트 노면에서 성능 평가를 실시하였으며 정현파형과 J-turn 조향 입력을 이용하였다.
- 2) 눈길과 젖은 아스팔트에서 실시된 실험에서 IDCS 또는 FSFB를 장착한 SUV는 목표 요속도를 잘 추종하며 차체 미끄러짐 각이 크게 감소하여 안정성과 조향 성능이 크게 향상되었음을 확인할 수 있었다.
- 3) FSFB와 IDCS에 의한 결과를 비교하면 IDCS는 제어 제동 입력을 사용하지 않아 감속이 적게 발생한다. 따라서 IDCS를 장착한 SUV는 조금 큰 요 속도를 발생시켰다. 조향 입력이 커지면 IDCS의 요 속도 오차는 FSFB에 비하여 더 커지는 경향을 보였다. 반면 차속이 비슷할 경우 IDCS를 장착한 SUV가 적은 차체 미끄러짐 각을 보여주었다.
- 4) 이 연구에서 개발된 현가 장치 모델을 이용하여 향후 현가 장치의 제어 장치가 포함된 IDC 시스템을 개발할 예정이다. 또한 IDC를 활용하여 승차감 향상과 관련된 연구를 실시할 예정이다.

후 기

이 논문은 2023학년도 동명대학교 교내학술연구비 지원에 의하여 연구되었음(2023A024).

References

- 1) J. Lee and S. Ko, "Development Status and Future Trends of Integrated Chassis Control," *Auto Journal*, KSAE, Vol.8, pp.30-36, 2022.
- 2) Z. Cao and S. Zheng, "MR-SAS and Electric Power Steering Variable Universe Fuzzy PID Integrated Control," *Neural Computing and Applications*, Vol.31, pp.1249-1258, 2019.
- 3) W. Chen, H. Xiao, L. Liu and J. W. Zu, "Integrated Control of Automotive Electrical Power Steering and Active Suspension Systems Based on Random Sub-Optimal Control," *International Journal of Vehicle Design*, Vol.42, No.3/4, pp.370-391, 2006.
- 4) S. Li and M. A. Arat, "A Hierarchical Integrated Chassis Control Strategy Based on Wheel Force Feedback," *International Journal of Vehicle Performance*, Vol.2, No.4, pp.327-352, 2016.
- 5) M. Mirzaei and H. Mirzaeinejad, "Fuzzy Scheduled Optimal Control of Integrated Vehicle Braking and Steering Systems," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol.22, No.5, pp.2369-2379, 2017.
- 6) J. Song, "Design of Integrated Dynamics Control System to Enhance Lateral Stability of SUV," *Transactions of KSAE*, Vol.29, No.8, pp.781-787, 2021.
- 7) J. Song, "Development of Integrated Dynamics Control System on SUV to Improve Stability and Steerability," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineering*, Vol.21, No.12, pp.100-107, 2022.
- 8) H. Mirzaeinejad, M. Mirzaei and S. Rafatnia, "A Novel Technique for Optimal Integration of Active Steering and Differential Braking with Estimation to Improve Vehicle Directional Stability," *ISA Transactions*, Vol.80, pp.513-527, 2018.
- 9) J. Song, "Development of Active Front Wheel Steering (AFS) Controllers for SUV," *Transactions of KSAE*, Vol.28, No.9, pp.613-619, 2020.
- 10) H. Dugoff, P. S. Fancher and L. Segel, "An Analysis of Tire Traction Properties and Their Influence on Vehicle Dynamic Performance," *SAE Transactions*, Vol.79, pp.1219-1243, 1970.
- 11) K. Lee, I. Jung, Y. Noh, S. Yoon and Y. Cho, "The Effect of Road Weather Factors on Traffic Accident - Focused on Busan Area," *The Korean Data and Information Science Society*, Vol.26, No.3, pp.661-668, 2015.