

비선형 관측기를 이용한 사륜조향 차량의 횡방향 안정성 강화를 위한 강인 제어기 설계

송 정 훈*

동명대학교 메카트로닉스공학과

Design of a Robust Controller to Enhance Lateral Stability of a Four Wheel Steer Vehicle with a Nonlinear Observer

Jeonghoon Song*

Department of Mechatronics Engineering, Tongmyong University, Busan 608-711, Korea

(Received 18 April 2007 / Accepted 16 June 2007)

Abstract : This paper describes the development of a nonlinear observer for four wheel steer (4WS) vehicle. An observer is designed to estimate the vehicle variables difficult to measure directly. A brake yaw motion controller (BYMC), which uses a PID control method, is also proposed for controlling the brake pressure of the rear and inner wheels to enhance lateral stability. It induces the yaw rate to track the reference yaw rate, and it reduces a slip angle on a slippery road. The braking and steering performances of the anti-lock brake system (ABS) and BYMC are evaluated for various driving conditions, including straight, J-turn, and sinusoidal maneuvers.

The simulation results show that developed ABS reduces the stopping distance and increases the longitudinal stability. The observer estimates velocity, slip angle, and yaw rate of 4WS vehicle very well. The results also reveal that the BYMC improves vehicle lateral stability and controllability when various steering inputs are applied.

Key words : Four wheel steer(사륜 조향, 4WS), Anti-lock brake system(ABS), Brake yaw motion control(BYMC), Non-linear observer(비선형 관측기), Slip angle(미끄러짐 각도), Yaw rate(요 속도)

Nomenclature

a : distance from CoG to front wheel, m
 b : distance from CoG to rear wheel, m
 C_{af} : front tire cornering stiffness, N/rad
 C_{ar} : rear tire cornering stiffness, N/rad
 I_z : vehicle moment of inertial around z axis,
 m_{total} : vehicle total mass, kgm^2
 R_w : wheel radius, m
 t_f, t_r : front and rear wheel distance, m
 V_{CoG} : velocity of center of gravity, m/sec

β : slip angle, rad
 γ : yaw angle, rad
 δ : steer angle, rad
 λ_d : desired slip
 ω : wheel rotational velocity(rad/sec)

Subscripts

f : front
 r : rear
 i : front left, front right, rear left, rear right

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

1. 서론

YMC(Yaw Motion Control) 또는 ESP(Electronic Stability Program), 또는 VDC(Vehicle Dynamic Control) 시스템은 가장 최근에 개발된 차량 능동 안전 시스템의 하나이다. 차량 능동 안전 시스템은 교통 사고를 미연에 방지하고자 개발된 시스템이며 ABS(Anti-lock Brake System) 혹은 TCS(Traction Control System)가 대표적이다.¹⁾

이 YMC 시스템은 차량이 선회 운동 중 횡방향 안정성을 강화시키기 위하여 개발되었다. 즉, 미끄러운 노면에서 운전자의 조향 또는 제동 입력에 차량이 정확히 반응토록 하기 위한 시스템이다.²⁾ 차량의 타이어는 제동시 혹은 가속시 종방향 안정성 및 제어성은 뛰어나지만 횡방향 안정성은 쉽게 약화되는 특징을 가진다. 즉 종방향 힘을 이용하여 횡방향 거동을 제어하면 차량 안정성을 매우 효과적으로 강화시킬 수 있다.³⁾ 구체적으로 YMC는 오른쪽 바퀴와 왼쪽 바퀴의 제동 압력을 독립적으로 제어하여 요 운동을 발생시켜 미끄러짐 각도를 감소시킨다.

하지만 이를 위해서는 차속, 미끄러짐 각도 그리고 요 속도 등에 대한 정확한 정보가 필요하나 직접적으로 측정하는 것은 어려우며 부가적인 센서 혹은 관측기가 필요하다. 따라서 많은 연구자들은 이들을 효과적으로 추정하기 위하여 많은 노력과 비용을 집중하고 있다.

Van Zanten 등⁴⁾은 차량의 요 운동을 이용하여 미끄러짐 각도를 제어할 수 있음을 증명하였으며 Huh 등⁵⁾은 Kalman Filter를 이용해 타이어의 횡방향 힘을 추정하였다. 또한 Song 등²⁾은 후륜 조향 제어기를 이용하여 YMC를 구성하였다. 하지만 이 연구에서 제안된 제어기는 관측기를 포함하지 못하고 있다.

한편 지금까지 차량의 횡방향 운동 관련 관측기의 설계에 관한 연구는 전륜 조향 차량에 집중되어 이루어졌다.^{1,2,4,5)} 하지만 사륜 조향 차량(4 Wheel Steer vehicle, 4WS)에 관련된 관측기는 아직 개발되어 있지 못하고 있다.

따라서 이 연구에서는 4WS 차량의 미끄러짐 각도를 관측하기 위한 비선형 관측기를 설계하며 이를 이용하여 BYMC (Brake YMC) 제어기를 설계한다. BYMC 제어기는 차량이 적절한 요 운동을 수행

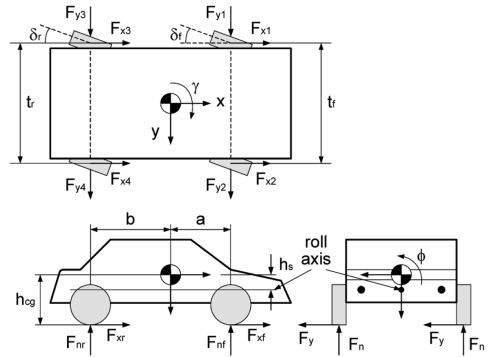


Fig. 1 Vehicle model

하도록 요구 미끄러짐 계수를 계산해 제동력을 제어함으로써 횡방향 안정성을 강화하는 제어기이다.

2. 차량 모델 및 ABS 제어기

2.1 차량 모델

이 연구에서는 BYMC를 설계하기 위하여 기존 개발된 차량 모델 및 ABS 제어기를 사용한다. 차량 모델은 15 자유도(degree of freedom)를 가지는 비선형 전체 차량 모델(full car model)이다(Fig. 1). 차량 모델 및 제어기에 대한 보다 자세한 사항은 참고문헌 (2,6,7)을 참고하기 바란다.

2.2 후륜 조향각 제어

일반적으로 후륜 조향각을 전륜 조향각 및 차속의 함수로 적절히 제어하면 차량의 조향 성능은 매우 개선되어진다. 즉, 차량이 저속으로 주행할 경우, 뒷바퀴를 전륜의 반대방향으로 조향하면 회전 반경이 감소하여 주차 및 J-turn 운전이 쉬워진다. 한편 고속으로 주행할 경우, 전륜과 동일한 방향으로 조향하면 차량의 안정성이 개선될 뿐 아니라 승차감이 개선된다고 알려져 있다.^{8,9)}

Sano 및 Furukawa⁸⁾는 후륜 조향각을 다음과 같이 결정하는 것이 차량 조향성능 및 안전성 강화에 최적이라고 주장하였다.

$$\frac{\delta_r}{\delta_f} = \frac{-b + \left(\frac{m_{total} a}{C_{ar}(a+b)} \right) v_{CoG}^2}{a + \left(\frac{m_{total} b}{C_{af}(a+b)} \right) v_{CoG}^2} \quad (1)$$

식 (1)에 나타난 것과 같은 간단한 후륜 조향 방법 만으로도 고속에서 횡방향 가속도를 감소시킬 수 있으며 응답속도를 빠르게 할 수 있다. 또한 저속에서는 회전 반경을 감소시킬 수도 있다. 하지만 이 방법은 요 속도를 고려하지 않아 특정 운전 조건에서 예상하지 못한 오작용을 발생시킬 수 있다. 따라서 Shiahkalroudi 및 Naraghi⁹⁾는 다음과 같은 새로운 후륜 조향 방법을 제안하였다.

$$\delta_r = \frac{aC_{\alpha f} - bC_{\alpha r} + m_{total}v_{CoG}^2}{v_{CoG}C_{\alpha r}}\gamma - \frac{C_{\alpha f}}{C_{\alpha r}}\delta_f \quad (2)$$

이 연구에서는 식 (2)의 방법을 이용하여 후륜 조향각을 결정한다.

2.3 ABS 제어기

ABS 제어기는 슬라이딩 모드 제어법을 사용하여 설계되었다. 이 방법은 비선형성 및 외란에 강인하며 제어하고자하는 인자들에 대하여 정확한 값을 알지 못하더라도 제어가 가능하다는 장점이 있다.¹⁰⁾

먼저 제동시 미끄러짐 계수 λ_s 는 다음과 같이 정의될 수 있다.^{2,6)}

$$\lambda_{si} = \frac{R_w\omega_i - v_x}{v_x} \quad (3)$$

여기서 아랫 첨자 i 는 1,2,3,4 이며 각각 전륜 좌측, 전륜 우측, 후륜 좌측 그리고 후륜 우측 바퀴를 뜻한다. 미끄러짐 표면 S 는

$$S = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} \int_0^t \lambda_r dr \quad (4)$$

와 같이 정의할 수 있다.⁷⁾ 여기서 λ 는 양의 상수이며 $\lambda_r = \lambda_d - \lambda_s$, $n = 2$, $\lambda_d = -0.2$ 로 설정한다. 한편 다음과 같은 미끄러짐 조건을 만족시키기 위한

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} S^2 = S \times \dot{S} \leq -\eta |S|, (\eta \geq 0) \quad (5)$$

제어 입력 $u_i (= P_i)$ 는 다음과 같이 유도된다.

$$u_i = -\frac{R_w}{v_x K_i} \left[(\hat{\tau}_{xi} + \hat{\tau}_{ri})v_x + \omega_i \dot{v}_x - \frac{v_x^2 \lambda}{R_w} (\lambda_{si} - \lambda_{di}) \right] + \frac{\tau_{xi}^* + \tau_{ri}^* + \eta}{K_i} \text{sat} \left(\frac{S}{\Phi} \right) \quad (6)$$

3. BYMC 제어기 및 비선형 관측기 설계

3.1 BYMC 제어기

ABS 제어기의 장점 중 하나는 차량의 제동시 조향 성능을 유지시키는 것이다. 하지만 선회 동작을 위한 적절한 요 운동을 발생시키지 못하여 oversteer 혹은 understeer 현상 뿐만 아니라 심할 경우 차량의 spin 현상을 발생시키기도 한다.²⁾

이를 방지하기 위하여 요 운동의 되먹임 제어 (feedback control) 방법이 많이 사용되고 있다. 즉, 다양한 운전 상태에 대한 기준 요 속도(reference yaw rate)를 설정하고 차량에서 발생하는 요 속도와 비교하여 오차를 감소시키는 것이 일반적이다.^{1,2)}

기준 요 속도는 다음과 같이 계산된다.⁷⁾

$$\dot{\gamma}_{ref} = \frac{v_{CoG}\delta_f}{(a+b) \left[1 + \left(\frac{v_{CoG}}{v_{ch}} \right)^2 \right]} \quad (7)$$

여기서 v_{ch} 는 다음과 같다.

$$v_{ch} = \frac{C_{\alpha f}C_{\alpha r}(a+b)^2}{m_{total}(C_{\alpha f}a - C_{\alpha r}b)}$$

만약 조향 및 제동 입력이 동시에 가해지면 후륜 안쪽 바퀴가 차량의 거동에 가장 큰 영향을 미친다. 또한 동시에 각 바퀴의 요구 미끄러짐 계수를 기준으로 네 바퀴의 제동 압력을 제어하면 차량의 동적 응답이 불안정해질 수 있다.^{1,2)}

따라서 이 연구에서는 후륜 안쪽 바퀴의 요구 미끄러짐 계수를 BYMC를 이용하여 결정한다. ABS는 후륜 안쪽 바퀴는 이 값을, 그리고 나머지 바퀴는 최대 종방향 힘을 발생시킬 수 있는 미끄러짐 계수인 -0.2를 추종하도록 제동 압력을 제어한다(Fig. 2).

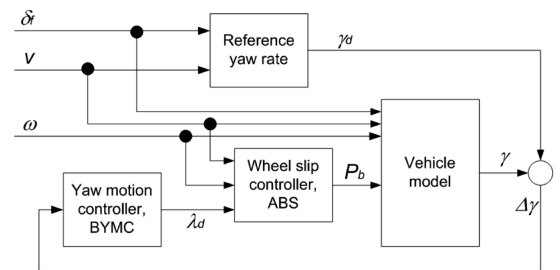


Fig. 2 A schematic of BYMC and ABS controller

후륜 안쪽 바퀴의 요구 미끄러짐 계수는 PID 제어법을 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$\lambda_d = \lambda_d + K_p(\dot{\gamma}_{ref} - \dot{\gamma}) + K_d \frac{d}{dt}(\dot{\gamma}_{ref} - \dot{\gamma}) + K_i \int (\dot{\gamma}_{ref} - \dot{\gamma}) dt \quad (8)$$

where K_p, K_d, K_i : PID control constants

여기서 요속도인 $\dot{\gamma}$ 는 관측기 혹은 차량 모델을 이용하여 구할 수 있다.⁶⁾

3.2 비선형 관측기

일반적으로 관측기는 측정하기 매우 어려운 상태값을 수학적으로 관측 또는 추정하기 위하여 사용된다. 하지만 차량 모델이 비선형이므로 Luenberg 관측기를 직접적으로 적용하기 어렵다. 이를 해결하기 위해 선형화(linearization) 방법을 이용한다.¹¹⁾

한편, 계산 속도의 증가와 실시간 모사 실험(real time simulation)을 위해 다음과 같은 단순 차량 모델(reduced order model)을 설계하였다. 수직 방향의 거동을 무시하면 차량 운동에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 차량 무게 중심의 속도, v_{CoG} , 미끄러짐 계수, β , 그리고 요 각도, γ 로 가정하였으며 다음과 같이 계산할 수 있다.¹²⁾

$$\dot{v}_{CoG} = \frac{\cos \beta}{m_{total}}(Fx_1 + Fx_2 + Fx_3 + Fx_4) + \frac{\sin \beta}{m_{total}}(Fy_1 + Fy_2 + Fy_3 + Fy_4) \quad (9)$$

$$\dot{\beta} = \frac{\cos \beta}{m_{total} v_{CoG}}(Fy_1 + Fy_2 + Fy_3 + Fy_4) + \frac{\sin \beta}{m_{total} v_{CoG}}(Fx_1 + Fx_2 + Fx_3 + Fx_4) - \dot{\gamma} \quad (10)$$

$$I_z \ddot{\gamma} = aFy_1 + \frac{t_f}{2} Fx_1 + aFy_2 - \frac{t_f}{2} Fx_2 - bFy_3 + \frac{t_r}{2} Fx_3 - bFy_4 - \frac{t_r}{2} Fx_4 \quad (11)$$

여기서 상태변수는

$$x = [v_{CoG} \ \beta \ \dot{\gamma}]^T$$

이며 입력은

$$u = [Fx_1 \ Fx_2 \ Fx_3 \ Fx_4 \ \delta_f]^T$$

이다. 또한 측정값은

$$y = [v_{CoG} \ \dot{\gamma}]^T$$

이다. 먼저 다음과 같은 상태 방정식에서

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u) \\ y &= c(x) \end{aligned} \quad (12)$$

다음의 관측기 상태 방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= f(\hat{x}, u) + L(\hat{x}, u) \cdot (y - \hat{y}) \\ \hat{y} &= c(\hat{x}) \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 \hat{x} 는 x 의 추정치이며 추정 오차 $\tilde{x} = x - \hat{x}$ 는 시간이 무한대로 갈 때 0으로 수렴하도록 상태 이득 행렬인 L 을 설정하여야 한다. 식 (12)를 테일러 급수로 전개하면

$$f(x, u) \approx f(\hat{x}, u) + \frac{\partial f(\hat{x}, u)}{\partial x}(x - \hat{x}) \quad (14)$$

$$c(x) \approx c(\hat{x}) + \frac{\partial c(\hat{x})}{\partial x}(x - \hat{x}) \quad (15)$$

한편

$$\dot{\tilde{x}} = \dot{x} - \dot{\hat{x}} \quad (16)$$

이므로 식 (16)에 식 (12), (13) 그리고 (14)를 대입하면 추정 오차에 관한 식은 다음과 같다.

$$\dot{\tilde{x}} = \left[\frac{\partial f(\hat{x}, u)}{\partial x} - L(\hat{x}, u) \frac{\partial c(\hat{x})}{\partial x} \right] \tilde{x} \quad (17)$$

식 (17)에서 우변의 대괄호 안은 상수이어야 하므로 다음과 같이 설정할 수 있다.

$$\frac{\partial f(\hat{x}, u)}{\partial x} - L(\hat{x}, u) \frac{\partial c(\hat{x})}{\partial x} = G \quad (18)$$

여기서 상수 행렬 G 는 다음과 같다.

$$G = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{pmatrix} \quad (19)$$

여기서 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 는 행렬 L 의 거동을 결정하므로 주의하여 선정하여야 한다. 이 연구에서 $\lambda_1 = -50, \lambda_2$

= -60, $\lambda_3 = -600$ 으로 하였다.

4. 결과 및 토의

이 연구에서는 4WS 차량의 ABS 및 BYMC 제어 기 그리고 비선형 관측기의 성능평가를 실시하였다. 이를 위하여 다양한 노면에서 조향입력 및 제동 입력을 가하여 차량 및 제어기의 응답을 살펴보았다. 한편 운전자로 부터 제동 입력이 가하여졌을 때, 차량 안전성 및 승차감 개선을 위하여 앞, 뒤 바퀴의 제동 압력은 55:45의 비율로 분배된다고 가정한다.

4.1 차량 모델 성능 평가

먼저 기존에 개발되어진 전체 차량 모델 및 관측기의 설계를 위한 단순차량 모델의 성능 평가를 실시하였다. Fig. 3은 두 가지 운전 조건에서의 결과를 나타낸 것이다. 두 조건 모두 노면은 젖은 아스팔트이며 제동 압력은 15bar와 25bar를 가정하였다. 첫 번째 열 (a)은 조향 입력이 0.5~2.5초에서 0~40°까지 선형적으로 증가하며 2.5초 이후는 40°를 유지할 때의 결과를 나타낸다. 이러한 주행 조건은 J-turn 주행 조건과 유사하다. 두 번째 열 (b)은 2.5초의 파장과 ±30°의 진폭을 가지는 정현파를 조향입력으로 하였을 때의 차량 응답을 나타낸다.

결과를 살펴보면 제동 압력이 낮을수록 그리고 차속이 빠를수록 두 모델의 차이는 작다는 것을 확

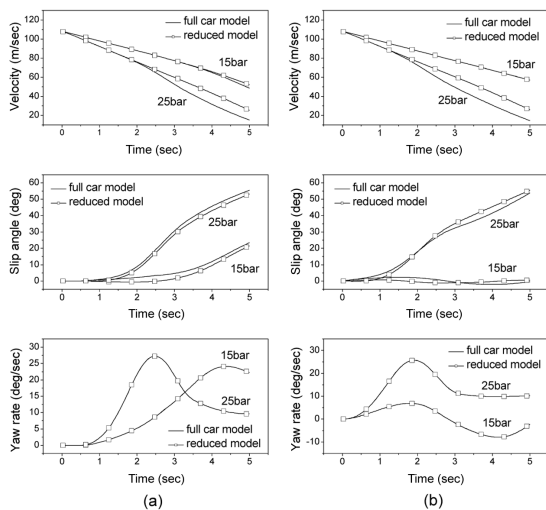


Fig. 3 Comparison of full car model and reduced order model

인할 수 있다. 이는 제동 압력이 커지면 바퀴에 잠김 현상이 발생하며 차량 운동이 심각한 비선형성을 가지기 때문이다. 즉, 단순차량 모델은 차량 운동을 선형화시켰기 때문에 비선형의 결과를 포함한 전체 차량 모델과 차이가 발생한다. 하지만 결과 값의 발생 경향이 비슷하며 차이도 크지 않아 단순차량 모델을 기반으로 비선형 관측기를 설계하여도 관측기의 오차가 크지 않을 것으로 판단된다.

4.2 4WS 차량의 ABS 제어기 성능 평가

Fig. 4는 ABS를 장착하지 않은 4WS 차량과 ABS를 장착한 4WS 차량이 직진 주행 중 급제동하였을 때의 응답을 나타내고 있다. 노면 조건은 젖은 아스팔트이나 30m에서 50m의 구간은 눈으로 덮여 있다고 가정하였다.

결과를 살펴보면 ABS를 장착하지 않은 차량은 눈길을 통과할 때 바퀴의 잠김 현상(wheel lock)이 발생함을 확인할 수 있다. 또한 잠김 현상은 앞바퀴에서 먼저 발생하였으나 뒷바퀴에서 더 오랫동안 지속된다는 것을 관찰할 수 있다. 이는 차량의 제동 시 무게 중심이 앞으로 이동하면서 발생하는 현상이다. 즉, 과도한 수직하중을 받는 앞바퀴에서 먼저 잠김 현상이 발생하나 커진 수직하중으로 인하여 바퀴의 구름 저항 토크(rolling resistance torque)도 커져 앞바퀴의 잠김이 먼저 풀리게 된다.^{6,12)}

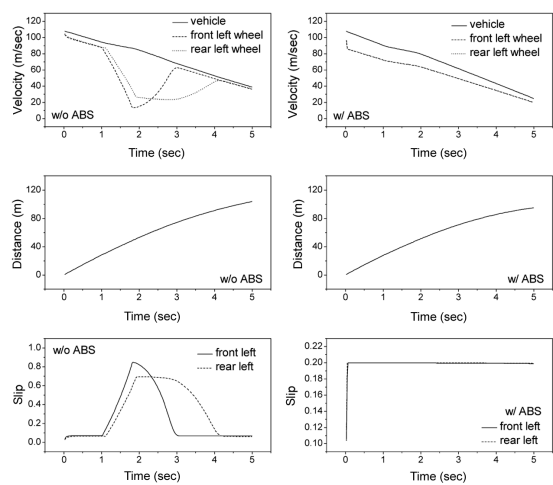


Fig. 4 Evaluation of ABS on μ change road

한편, ABS를 장착한 차량은 앞, 뒤 바퀴의 제동력이 적절히 제어되어 노면에 관계없이 거의 동일한 미끄러짐 계수를 나타내고 있음을 알 수 있다.

4.3 4WS 차량의 비선형 관측기 성능 평가

다음은 비선형 관측기의 성능을 평가하였다. 이를 위하여 앞의 3.1절에 사용한 주행 조건을 사용하였다.

4.3.1 J-turn 주행 조건시 차량 및 제어기 응답

먼저 Fig. 3(a)의 주행 조건일 경우 ABS를 장착하지 않은 차량에 제동 압력을 달리하여 바퀴 잠김 현상이 4WS 차량 및 관측기 응답에 미치는 영향을 살펴보았다. 또한 ABS를 장착한 차량과 BYMC를 장착한 차량의 응답과 관측기의 성능을 평가하였다.

Fig. 5에서 actual로 표시한 결과는 전체차량 모델을 이용하여 계산한 값이며 observed로 표시한 결과는 관측기를 이용하여 얻어진 값이다. 그림을 살펴보면 ABS 및 BYMC 제어기를 장착한 4WS 차량에서 관측기 성능은 매우 우수한 것을 확인할 수 있다. 하지만 제어기를 장착하지 않은 차량은 제동 압력 15bar를 입력하였을 때 약간의 오차가 나타났으며 25bar일 경우 약 2초에서부터 바퀴에 잠김 현상이

시작되어 차속 및 미끄러짐 각도의 관측에 오차가 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 바퀴 잠김 현상이 심해짐에 따라 차량 운동이 심각한 비선형성을 가져 단순 차량 모델을 기반으로 하는 관측기는 오차를 발생시키기 때문이다.¹²⁾

BYMC 제어기를 장착한 차량은 Fig. 5의 가장 아래 오른쪽 그림에 나타낸 것처럼 후륜 좌측(안쪽) 바퀴의 미끄러짐 계수가 제어된다. 따라서 ABS 제어기를 장착한 차량에 비하여 미끄러짐 각도가 감소하였음을 확인할 수 있다. 한편 ABS 제어기를 장착하지 않은 차량의 경우 바퀴에 잠김 현상이 발생하면 미끄러짐 각이 커지고 요 속도가 감소하여 차량이 제어 불능 상태에 빠지는 것을 알 수 있다.

4.3.2 정현파 조향입력시 차량 및 제어기 응답

Fig. 6은 Fig. 3(b)의 주행 조건에서 4WS 차량 및 제어기 응답을 나타낸다. 먼저 비선형 관측기는 앞의 결과와 마찬가지로 바퀴 잠김 현상이 발생하지 않는다면 제어기의 장착 여부에 관계없이 매우 우수한 성능을 발휘함을 알 수 있다.

왼쪽 그림들은 ABS 제어기를 장착하지 않은 차량의 응답을 보여준다. 제동압력이 낮아 바퀴에 잠김 현상이 발생하지 않을 경우(15bar) 차량은 조향

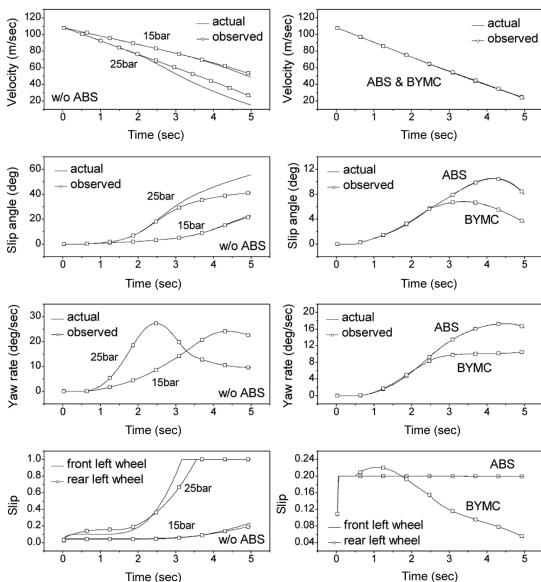


Fig. 5 Evaluation of observer on wet asphalt road with J-turn steering input

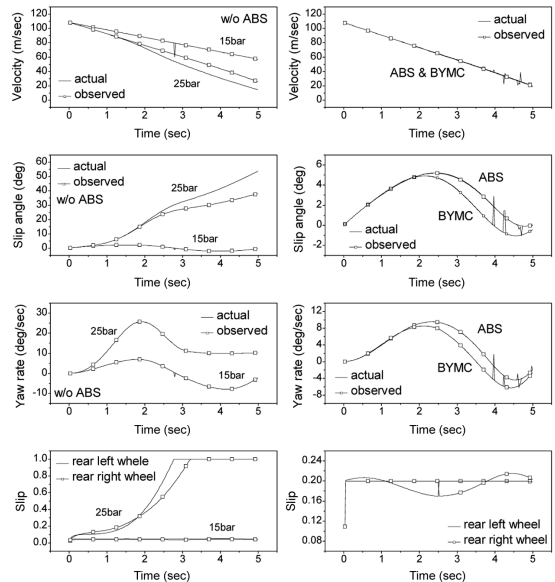


Fig. 6 Evaluation of observer on wet asphalt road with sine steering input

입력에 반응을 하였으나 적절한 제동이 이루어지지 않음을 알 수 있다. 한편 바퀴에 잠김 현상이 발생하였을 경우(25bar) 요 속도는 조향 입력에 전혀 반응하지 못하며 미끄러짐 각도가 커져 차량은 매우 불안정한 상태에 있다는 것을 확인할 수 있다.

ABS를 장착한 차량은 조향 입력에 대한 차량의 응답이 비교적 적절하였으나 미끄러짐 각도가 커 조향 성능 및 횡방향 안정성이 악화된 것을 볼 수 있다. 하지만 BYMC를 장착한 경우, 요 속도는 조향 입력에 적절히 반응하며 미끄러짐 각도도 작아져 차량 안정성 및 조향 성능이 개선되었음을 관찰할 수 있다. 한편, 미끄러짐 계수는 조향 입력의 방향이 바뀔에 따라 BYMC에 의하여 후륜의 좌우 바퀴가 번갈아가며 제어되고 있음을 볼 수 있다.

4.3.3 차선 변경시 차량 및 제어기 응답

ABS 및 BYMC 제어기를 장착한 사륜 조향 차량의 제어기 성능 및 차량 응답을 Figs. 7 및 8에 나타내었다. 차량은 젖은 아스팔트 노면에서 초기 속도 30m/sec로 주행하다 급 감속하며 0.8초 후 차선변경을 시작하여 3.3초 후 차선변경을 종료한 상황으로 가정하였다.

결과를 살펴보면 전체 차량 모델로 계산된 값과 관측기의 관측 값이 매우 유사하여 관측기의 성능이 우수하다는 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 8에 나타낸 것과 같이 ABS 및 BYMC 제어기를 장착한 차량의 궤적은 차량이 요구 주행 경로를 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

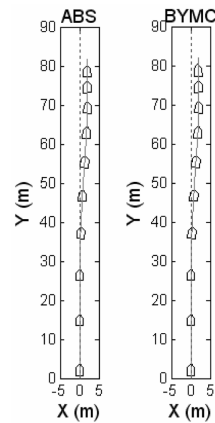


Fig. 8 Trajectory of ABS and BYMC vehicle on wet asphalt road during lane change maneuver

한편 ABS 만을 장착한 차량은 요구 미끄러짐 계수인 0.2를 잘 추종하고 있으나 BYMC 차량에 비하여 요 속도 및 횡방향 가속도의 변화가 심하여 승차감 및 횡방향 안정성이 감소되었음을 관찰할 수 있다. 또한 미끄러짐 각도도 상대적으로 커 차량 조종 성능도 악화되었음을 나타내고 있다.

한편 차량이 요구 주행 경로를 추종하게 하기 위해서는 운전자 모델이 필요하다. 이에 대한 자세한 사항들은 참고 문헌 2) 및 12)를 참고하기 바란다.

5. 결론

이 연구는 4륜 조향 차량의 횡방향 안정성 강화를 위한 BYMC 제어기 설계에 필요한 차량 속도, 요 속도 그리고 미끄러짐 각에 대한 관측기를 설계하였다. 이 연구를 통하여 얻을 수 있는 결론은 다음과 같다.

- 1) 먼저 ABS 제어기의 성능 평가를 마찰 계수가 급격히 변화하는 노면에서 실시하였다. ABS를 장착한 차량의 경우 노면 조건과 관계없이 요구 미끄러짐 계수를 잘 추종하였으나 ABS를 장착하지 않은 차량은 미끄러운 노면에서 잠김 현상이 발생하였다.
- 2) 관측기는 단순차량 모델을 기반으로 설계되었으며 이 모델의 성능 평가를 위하여 두 가지 주행 조건에서 전체차량 모델과 결과를 비교하였다. 결과를 살펴보면 단순차량 모델은 바퀴에서 잡

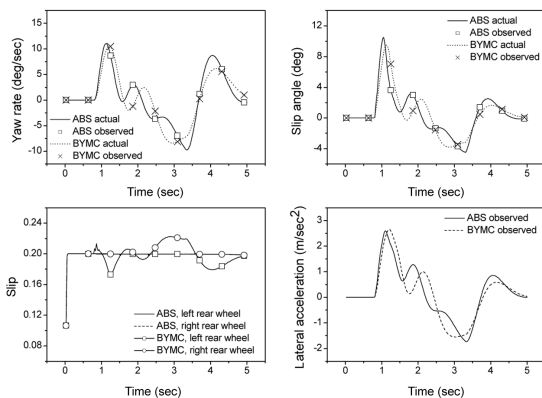


Fig. 7 Comparison of ABS and BYMC on wet asphalt road during lane change maneuver

- 김 현상이 발생하지 않는다면 전체차량 모델과 비슷한 결과를 보여 신뢰성을 확인할 수 있었다.
- 3) J-turn 조향 입력시 비선형 관측기는 바퀴에 잠김 현상이 발생하지 않으면 매우 정확한 관측 결과를 보여주었다. 한편 BYMC를 장착한 차량은 미끄러짐 각도가 감소하여 횡방향 안전성이 개선되었음을 확인할 수 있다.
 - 4) 정현파를 조향 입력으로 가할 경우에도 잠김 현상이 발생하지 않으면 관측기는 ABS 또는 BYMC의 장착 여부에 관계없이 우수한 성능을 보여주었다.
 - 5) BYMC를 장착한 차량은 ABS 만을 장착한 차량에 비하여 차선 변경 주행을 할 경우 미끄러짐 각도 및 횡방향 가속도가 작아 횡방향 안정성이 우수함을 확인할 수 있다. 또한 요 속도의 변화가 감소하여 승차감의 개선에도 큰 역할을 한다는 것을 알 수 있다.

References

- 1) A. T. Van Zanten, "Bosch ESP Systems: 5 Years of Experience," SAE 2000-01-1633, 2000.
- 2) J. Song, H. Kim and B. Kim, "Vehicle Longitudinal and Lateral Stability Enhancement Using TCS and Yaw Motion Controller," Int. J. Automotive Technology, Vol.8, No.1, pp.49-57, 2007.
- 3) M. Abe, Y. Kano, K. Suzuki, Y. Shibahata and Y. Furukawa, "Side-slip Control to Stabilize Vehicle Lateral Motion by Direct Yaw Moment," JSAE Review, Vol.22, pp.413-419, 2001.
- 4) A. T. Van Zanten, R. Erhardt and G. Pfaff, "VDC, the Vehicle Dynamic Control System of Bosch," SAE 950759, 1995.
- 5) K. Huh, J. Kim and K. Yi, Monitoring System "Design for Estimating the Lateral Tyre Force, Journal of Automobile Engineering," Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers Part D, Vol.217, No.4, pp.247-256, 2003.
- 6) J. Song, "Performance Evaluation of a Hybrid Electric Brake System with a Sliding Mode Controller," Mechatronics, Vol.15, pp.339-358, 2005.
- 7) J. Song and K. Boo, "Performance Evaluation of Traction Control System Using a Vehicle Dynamic Model," Journal of Automobile Engineering, Proceedings of Institute of Mechanical Engineers Part D, Vol.218, No.7, pp.685-696, 2004.
- 8) S. Sano and Y. Furukawa, "Four Wheel Steering System with Rear Wheel Steering Angle Controlled as a Function of Steering Wheel Angle," SAE 860625, 1986.
- 9) V. M. Shiahkhalroudi and M. Naraghi, "Model Reference Tracking Control of a 4WS Vehicle Using Single and Dual Steering Strategy," SAE 2002-01-1590, 2002.
- 10) J. Slotine and W. Li, Applied Nonlinear Control, Prentice-Hall International edn, 1991.
- 11) U. Kiencke and L. Nielsen, Automotive Control Systems, Society of Automotive Engineers, 2000.
- 12) J. Song, K. Boo and D. H. Lee, "Nonlinear Observer and Robust Controller Design for Enhancement of Vehicle Lateral Stability," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol.21, No.1. pp.79-86, 2007.