

〈 논문 〉

차량의 선회시 주행 안정성 강화를 위한 ESP 시스템 개발 및 성능 평가

송 정 훈[†] · 부 광 석^{*}

(2006년 4월 10일 접수, 2006년 7월 31일 심사완료)

Development and Performance Evaluation of ESP Systems for Enhancing the Lateral Stability During Cornering

Jeonghoon Song and Kwangsuck Boo

Key Words : ABS(Anti-lock Brake System), ESP(Electronic Stability Program), Vehicle Dynamics(차량 동역학), Driver Model(운전자 모델)

Abstract

This study proposes two ESP systems which are designed to enhance the lateral stability of a vehicle. A BEBP uses an inner rear wheel braking pressure controller, while a EBESP employs an inner rear wheel and front outer wheel braking pressure controller. The performances of the BEBP and EBESP are evaluated for various road conditions and steering inputs. They reduce the slip angle and eliminate variation in the lateral acceleration, which increase the controllability and stability of the vehicle. However EBESP enhances the lateral stability and comfort. A driver model is also developed to control the steer angle input. It shows good performances because the vehicle tracks the desired lane very well.

기호설명

A : 브레이크 실린더 단면적
 a : CG에서 전륜까지의 거리
 b : CG에서 후륜까지의 거리
 F_{roll} : 바퀴 회전 마찰력
 F_x : 차량 종방향 힘
 I_w : 차륜 관성 모멘트
 P_b : 제동 압력
 r_w : 차륜 반경
 r_b : 브레이크 유효반경
 t_f, t_r : 차량 윤거
 T_b : 제동 토크
 T_s : power train으로 부터의 구동 토크

α : 미끄러짐 각도
 δ_f : 조향각
 γ : 요 각
 γ_{ref} : 기준 요 각
 ϕ : 롤 각
 λ_s : 미끄러짐 계수
 λ_d : 목표 미끄러짐 계수
 τ_s : 운전자 반응 시간 지연
 ω : 차륜 회전 속도

1. 서론

운전자가 미끄러운 노면에서 급제동을 하는 경우, 바퀴에 잠김 현상(locking)이 발생하여 차량은 미끄러지며 제동 및 조향 성능의 악화가 발생된다. 이를 방지하기 위하여 ABS (Anti-lock Brake System)가 개발되었으며 이미 차량의 필수 장착품의 하나로 되었다. 마찬가지로 차량의 급가속시 안전성을 보

[†] 책임저자, 회원, 인제대학교 기계자동차공학부, 인제대학교 수송기계부품기술혁신센터 (TIC)
E-mail : mechsong@inje.ac.kr
TEL : (055) 320-3755 FAX : (055) 324-1723

^{*} 인제대학교 기계자동차공학부, TIC

장하기 위하여 TCS(Traction Control System)이 개발되었으며 장착율은 급속히 증가하고 있다.⁽¹⁾

이와 같이 차량의 안전을 향상시키기 위하여 다양한 장치들이 개발 및 적용 중에 있으며 대표적인 시스템으로는 ESP(Electronic Stability Program)를 꼽을 수 있다. ESP 시스템은 YMC(Yaw Motion Controller) 혹은 VDC(Vehicle Dynamics Control)로도 알려져 있으며 운전자의 조향 및 제동 입력에 차량이 적절하게 반응토록 하는 것과 선회 운동 중 횡방향 안전성을 확보하는 것을 목적으로 하고 있다.⁽²⁾

일반적으로 ESP 는 왼쪽 바퀴와 오른쪽 바퀴의 제동 압력을 독립적으로 제어하여 차량의 요 운동(yaw motion)을 발생시킨다. β method 라고 알려진 이러한 방법은 횡방향의 힘을 제어하여 차량의 미끄러짐 각도(slip angle)를 제어한다.⁽³⁾ 만약 미끄러짐 각도가 커지면 oversteer 혹은 understeer 와 같은 현상이 발생하며 이러한 현상이 보다 심각해지면 차량의 스핀(spin) 현상이 발생한다.

따라서 미끄러짐 각도를 제어하여 횡방향 안정성을 확보하기 위하여 많은 연구자들 및 자동차회사들의 노력이 집중되고 있다. Bosch 사에서는 VDC 를 제안하였으며⁽⁴⁾ Continental TEVES 사에서는 ESP 를 개발하였다.⁽⁵⁾ Van Zanten 등⁽⁶⁾은 차량의 요 운동을 이용하여 미끄러짐 각도를 제어할 수 있음을 증명하였으며 Youn 등⁽¹⁾은 제동 압력을 이용하여 요 운동을 발생시켜 차량의 안정성을 개선시키는 연구 결과를 발표하였다.

이 연구에서는 두 종류의 ESP 시스템 [BESP(Brake ESP) 및 EBESP(Enhanced Brake ESP)]을 개발하였다. BESP 는 차량이 선회 중 후륜 안쪽 바퀴의 제동 압력을 제어하는 장치이며 EBESP 은 후륜 안쪽 바퀴 뿐만 아니라 전륜 바깥쪽 바퀴의 압력까지 동시에 제어하는 시스템이다. 이러한 시스템의 개발을 위하여 차량 모델 및 운전자 모델을 설계하였으며 sliding mode control 기법을 이용하여 ABS 제어를 설계하였다. 또한 다양한 노면에서 다양한 조향 입력을 이용하여 차량 모델 및 제어기의 성능을 평가하였다.

2. 차량 모델

2.1 차량 동역학 모델

차량 모델은 ABS 와 ESP 시스템의 설계와 성능 평가를 위하여 필요하며 차시(chassis) 모델, 바퀴(wheel) 모델 그리고 제동 장치(brake system) 모델로 구성된다. 이 차량 모델은 15 자유도(Degree

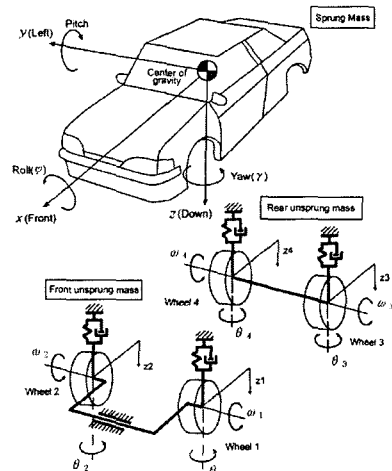


Fig. 1 Vehicle model

of Freedom)를 가지며 이 중 sprung mass 6 자유도 서스펜션(suspension) 4 자유도, 바퀴 4 자유도 그리고 조향 장치가 1 자유도를 가진다(Fig. 1). 차량 모델에 대한 보다 자세한 사항은 참고 문헌에 기술되어 있다.^(7,8)

2.2 바퀴(wheel) 모델

차량의 바퀴 모델은 다음과 같다.

$$I_{wi} \dot{\omega}_{wi} = -T_b - F_{xi} r_w - T_{rolli} + T_s$$

$$= -AP_{bi} r_b - F_{xi} r_w - F_{rolli} r_w + T_s \quad (1)$$

식 (1)의 우변은 차례대로 제동 토크, 노면 마찰 토크, 회전 마찰 토크 그리고 엔진으로부터의 구동 토크를 뜻한다. 여기서 P_b 는 제동압력 r_b 는 바퀴의 중심으로부터 브레이크 패드(brake path)의 중심까지의 거리, F_x 는 바퀴에서의 종방향 힘, 그리고 r_w 는 바퀴 반경을 나타낸다. 또한 $i = 1, 2, 3, 4$ 이며 각각 전좌륜(前左輪), 전우륜(前右輪), 후좌륜(後左輪) 그리고 후우륜(後右輪)을 뜻한다.

2.3 회전 마찰력(rolling resistance force)

회전 마찰력은 다음과 같이 정의된다.

$$F_{rolli} = f_r \times F_{ni} \quad (2)$$

여기서 회전 저항 계수 f_r 은 다음과 같다.⁽⁹⁾

$$f_r = f_0 + 3.24 f_s (K_{mph} v_{xi} / 100)^{0.25}$$

여기서 $f_0 = 0.0105$ 와 $f_s = 0.0055$ 는 curve fit 계수이며 $K_{mph} = 2.237$ 는 단위 mile/hour 를 meter/second 로 변환하기 위한 계수이다. v_{xi} 는 바퀴가 향하고 있는 방향의 바퀴 속도를 뜻한다.

2.4 바퀴 미끄러짐 계수(slip)

ABS 제어기는 미끄러짐 계수를 이용하여 제동 압력을 계산한다. 미끄러짐 계수는 제동 압력에 의하여 각 바퀴가 얼마나 잠겼는지를(locking) 나타내며 다음과 같이 정의한다.

$$\lambda_{si} = \frac{v_{xi} - \omega_{wi} r_w}{v_{xi}} \quad (3)$$

2.5 마찰 계수

바퀴의 마찰 계수 μ 는 바퀴와 노면간의 마찰력, F_{fric} 와 바퀴에 작용하는 수직력, F_n 의 비로서 다음과 같이 정의된다.

$$\mu = \frac{F_{fric}}{F_n} \quad (4)$$

마찰계수는 Burckhardt 식을 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.⁽¹⁰⁾

$$\mu(\lambda_{Resi}) = c_1 \{1 - \exp(-c_2 \lambda_{Resi})\} - c_3 \lambda_{Resi} \quad (5)$$

여기서 λ_{Res} 는 미끄러짐 계수와 미끄러짐 각(slip angle)의 산술 급수이다. 식 (5)로 표현된 Burckhardt의 식은 차량 속도와 바퀴에 가해지는 부하의 영향을 고려하여 다음과 같이 확장할 수 있다.

$$\mu(\lambda_{Resi}) = [c_1 \{1 - \exp(-c_2 \lambda_{Resi})\} - c_3 \lambda_{Resi}^2] \times \exp(-c_4 \lambda_{Resi} v_{COG}) \times (1 - c_5 F_n^2) \quad (6)$$

여기서 v_{COG} 는 차량 무게 중심의 속도이며 계수 c_1, c_2 그리고 c_3 는 Table 1에 나타내었으며 $c_4 = 0.02 \sim 0.04 \text{sec/m}$ 그리고 $c_5 = 0.00151 \text{kN}^{-2}$ 이다.

2.6 운전자 모델(driver model)

운전자 모델은 실제 운전자의 행동을 모사한 것이다. 운전자 모델은 운전 방법, 차량 운전 조건 그리고 도로 조건 등에 의하여 영향을 받기 때문에 정확한 모사는 어려우며 이 연구에서는 조향 입력만을 모사하였다.⁽⁸⁾ 즉, 조향 입력 δ_f 는 차량이 진행하고자 하는 요구 경로와 차량 무게 중심과의 거리 (ϵ), 운전자의 주시 거리 (L) 그리고

요 (yaw) 각도 (γ)의 함수로 가정하였다. 이를 바탕으로 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$\tau_s \dot{\delta}_f(t) + \delta_f(t) = \frac{a_2 v_{COG}}{(a_1 + L)} \epsilon(t) + a_3 \dot{\gamma}(t) \quad (7)$$

여기서 τ_s 는 운전자의 응답 지연 (보통 0.1~0.3 seconds)이며 a_1, a_2 와 a_3 는 상수이다.

3. ABS 및 ESP controller 설계

3.1 비선형 sliding mode ABS 제어기

이 연구에서는 sliding mode control 기법을 사용하여 ABS 제어를 설계하였다. 식 (1)로부터

$$\dot{\omega}_{wi} = -(K_i u + \tau_x + \tau_r) \quad (8)$$

여기서 $K_i = Ar_b / I_{wo}$, $\tau_x = F_{xi} r_w / I_{wi}$, $\tau_r = F_{roll} r_w / I_{wi}$ 이며 제어 입력 $u_i = P_{bi}$ 그리고 엔진으로부터의 출력 $T_s = 0$ 으로 가정한다. 여기서 τ_x 와 τ_r 는 정확한 값을 구하기 어려우므로 $\hat{\tau}_x$ 와 $\hat{\tau}_r$ 로 가정한다. 또한 τ_x 와 τ_r 의 추정 오차는 이미 알려진 τ_x^* 와 τ_r^* 의 범위 내에 있다고 가정한다.

미끄러짐 계수 λ_{si} 가 목표 미끄러짐 계수 λ_{di} 를 추종하기 위해서 미끄러짐 표면(sliding surface)는 다음과 같이 정의한다.⁽¹¹⁾

$$S = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} \int \lambda_r dr = \lambda_r + \lambda \int \lambda_r dr \quad (9)$$

여기서 λ 는 양의 계수이며 $\lambda_r = \lambda_{di} - \lambda_{si}$ 이고 $n = 2$ 이다. 미끄러짐 표면을 미분하면

$$\begin{aligned} \dot{S} &= \dot{\lambda}_r + \lambda \lambda_r = \frac{r_w}{x} \left(\ddot{\theta} \dot{x} - \dot{\theta} \ddot{x} \right) + \lambda (\lambda_{di} - \lambda_{si}) \\ &= \frac{r_w}{x} \left[-(K_i u + \tau_x + \tau_r) \dot{x} - \dot{\theta} \ddot{x} + \frac{x}{r_w} \lambda (\lambda_{di} - \lambda_{si}) \right] \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 x 는 차량의 이동거리이며 θ 는 바퀴 각도이다. \dot{u} 의 최적값은 $\dot{S} = 0$ 의 조건에서 구할 수 있다. 즉,

$$\hat{u} = -\frac{1}{x K_i} \left[(\hat{\tau}_x + \hat{\tau}_r) \dot{x} + \dot{\theta} \ddot{x} - \frac{x}{r_w} \lambda (\lambda_{di} - \lambda_{si}) \right] \quad (11)$$

만약

$$\bar{u} = \frac{\tau_r^* + \tau_x^* + \eta}{K_i} \text{sgn}(S)$$

와 같이 가정한다면 $u = \hat{u} + \bar{u}$ 이므로 제어 입력 u 는 다음과 같다.⁽⁷⁾

Table 1 Parameter sets for friction coefficient characteristics

	c_1	c_2	c_3
asphalt, dry	1.2801	23.99	0.52
asphalt, wet	0.857	33.822	0.347
concrete, dry	1.1973	25.168	0.5373
snow	0.1946	94.129	0.0646
ice	0.05	306.39	0

$$u = -\frac{1}{x K_i} \left[(\hat{\tau}_x + \hat{\tau}_r) \dot{x} + \dot{\theta} x - \frac{x^2}{r_w} \lambda (\lambda_{di} - \lambda_{si}) \right] + \frac{\tau_r^* + \tau_x^* + \eta}{K_i} \text{sgn}(S) \quad (12)$$

식 (12)는 다음과 같은 미끄러짐 조건을 만족시킴을 알 수 있다.

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} S^2 = S \times \dot{S} \leq -\eta |S|, (\eta \geq 0) \quad (13)$$

3.2 Yaw 운동 제어를 위한 ESP 제어기

ESP의 주요 역할은 미끄러짐 각도를 제어하여 차량 회전(spin) 발생을 억제하며 미끄러짐 각도를 특정 값 이하로 유지시켜 차량의 선회 안정성을 향상시키는 것이 목적이다.^(4,5)

미끄러짐 각도란 바퀴의 중심이 향하고 있는 방향과 실제 차량이 나아가고 있는 방향의 각도 차이를 의미한다.⁽⁹⁾ 만약 큰 미끄러짐 각도가 발생하면 바퀴에서 발생되는 종방향 힘(longitudinal force)은 적어지며 차량은 운전자가 원하는 방향으로 진행되지 못한다.⁽¹⁰⁾ 또한 미끄러짐 각도가 커지면 운전자는 당황하게 되어 차량의 안정성은 크게 떨어진다.⁽⁵⁾

일반적인 ESP의 설계 개념은 차량이 선회운동을 할 때 기준 요 속도(reference yaw rate)를 계산한 후, 각 바퀴의 제동 압력을 제어하여 요 운동을 제어하는 것이다. 즉, 기준 요 속도와 차량의 요 속도를 비교하여 오차를 feedback 제어를 통하여 제거하면 된다.⁽¹²⁾

기준 요 속도는 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{\gamma}_{ref} = \frac{v_{COG}}{1 + K\gamma_{COG}^2} \frac{\delta_f}{a + b} \quad (14)$$

여기서

$$K = \frac{a c_{af} \mu_f - b c_{ar} \mu_r}{(c_{af} \mu_f)(c_{ar} \mu_r)} \frac{m_{total}}{a + b}$$

여기서 a 및 b 는 차량의 무게 중심에서부터 전륜 및 후륜까지의 거리를 나타내며 c_{af} 와 c_{ar} 는 전륜 및 후륜의 cornering stiffness를 뜻한다.

만약 차량에 선회 및 조향 입력이 동시에 가해지면 후륜 안쪽 바퀴가 차량의 운동 및 진행 방향에 가장 큰 영향을 미치며 다음은 전륜의 바깥쪽 바퀴가 영향을 미친다.⁽³⁾ 특히 후륜 안쪽 바퀴는 차량의 understeer 현상에 큰 영향을 미치며 전륜 바깥쪽 바퀴는 oversteer 현상에 영향을 미친다.⁽⁴⁾

따라서 이 연구에서는 차량이 선회할 때, 후륜

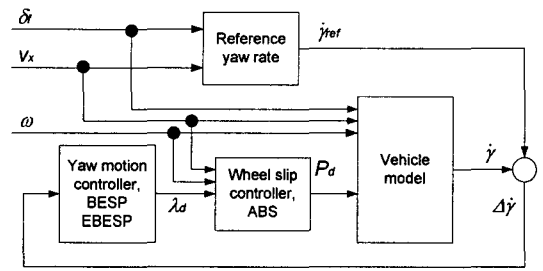


Fig. 2 A schematic of BEBP and EBESP

안쪽 바퀴의 미끄러짐 계수를 제어하는 BEBP (Brake ESP)와 후륜 안쪽 바퀴 및 전륜 바깥쪽 바퀴의 미끄러짐 계수를 동시에 제어하는 EBESP (Enhanced Brake ESP)를 제안한다. 만약 BEBP 또는 EBESP가 적용되면 차량의 나머지 바퀴들은 기존의 목표 미끄러짐 계수(일반적으로 0.2~0.3)를 유지한다. BEBP 및 EBESP 시스템에서 계산된 미끄러짐 계수는 ABS 시스템의 목표 미끄러짐 계수 λ_d 로 입력된다(Fig. 2).

한편, BEBP 및 EBESP의 목표 미끄러짐 계수는 다음과 같은 PID 제어기에 의하여 계산된다.

$$\lambda_d(k) = \lambda_d(k-1) + (K_{py} + K_{iy} + K_{dy})e_\gamma(k) - (K_{py} + 2K_{dy})e_\gamma(k-1) + K_{dy}e_\gamma(k-2) \quad (15)$$

여기서 오차 $e_\gamma(k)$ 는 다음과 같다.

$$e_\gamma = \dot{\gamma}_{ref} - \dot{\gamma} \quad (16)$$

4. 결과 및 고찰

4.1 제동 입력 및 J-turn 입력 시 차량 및 제어기 성능 평가

Fig. 3은 ABS, BEBP 또는 EBESP 제어기를 장착한 차량이 눈길을 주행할 경우, 제동 입력 및 J-turn 조향 입력이 가하여 졌을 때의 응답을 나타낸다. 차량의 초기 속도는 30m/sec이며 제동 입력은 시뮬레이션의 시작 시점부터 가하여졌다.

조향 입력은 Fig. 3의 왼쪽 가장 위 그림에 나타내었다. 이 때 ABS 장착 차량은 미끄러짐 각도가 급격히 증가하며 요 속도 및 횡방향 가속도(lateral acceleration)가 증가하여 차량의 안정성이 크게 악화됨을 확인할 수 있다.^(2,8,13) 후륜 안쪽 바퀴의 미끄러짐 계수만을 제어하는 BEBP의 경우, 미끄러짐 각도가 감소하여 차량의 안정성을 개선시켰으며 요 속도 및 횡방향 가속도의 급격한 변화가 많이 감소하였다. 또한 후륜 안쪽 바퀴 및 전륜 바깥쪽 바퀴까지 제어하는 EBESP는 가장 적은 미끄러짐 계수를 발생시켰으며 요 속도 및

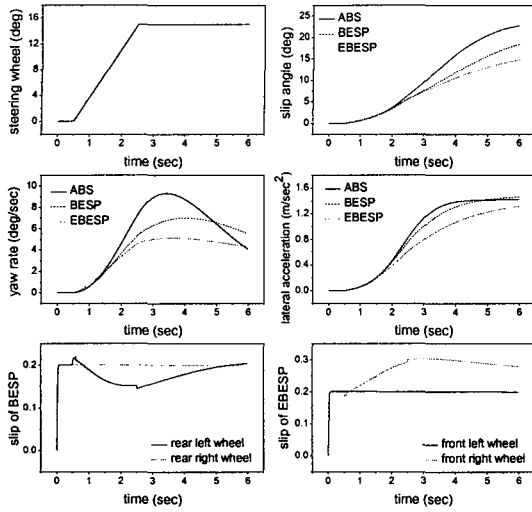


Fig. 3 Vehicle responses on snow paved road - J-turn

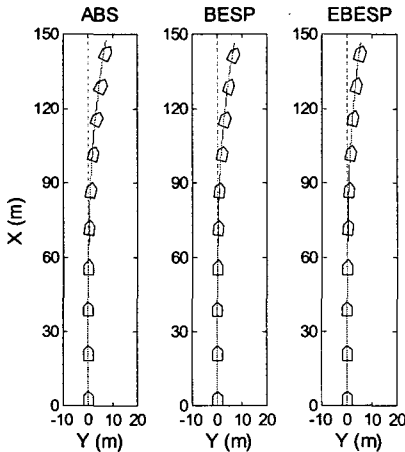


Fig. 4 Vehicle trajectories on snow paved road - J-turn

횡방향 가속도도 안정된 값을 보여준다.

Fig. 3의 가장 아래 그림은 BEBP 및 EBESP의 미끄러짐 계수를 각각 나타내고 있다. BEBP를 장착한 차량의 경우, 전륜 및 후륜 바깥쪽 바퀴는 ABS 제어기에 의하여 목표 미끄러짐 계수인 0.2를 유지하게 된다. 후륜 안쪽 바퀴의 경우, BEBP 제어기에 의하여 목표 미끄러짐 계수 값은 변화하며 ABS 제어기는 이 값을 잘 구현하고 있음을 알 수 있다. 또한 EBESP 제어기는 전륜 바깥쪽 바퀴가 적절히 제어되고 있음을 보여준다.

Fig. 4는 차량 주행 궤적을 나타낸다. 그림에서 BEBP 또는 EBESP를 장착한 차량은 oversteer 현상을 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 즉 ABS를 장착하였을 때 차량은 주행궤적보다 안쪽으로 가장 많이 향하고 있음을 알 수 있다.

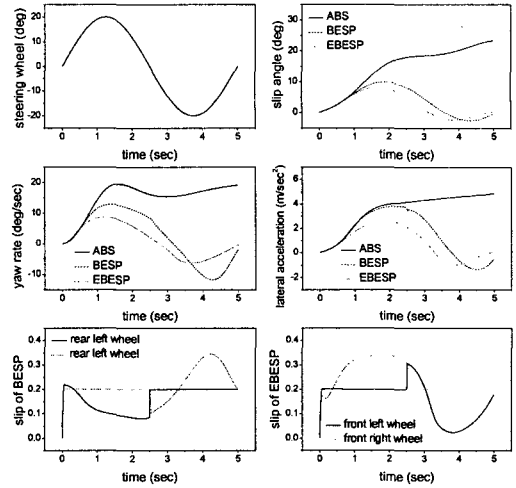


Fig. 5 Vehicle responses on wet asphalt - sinusoidal input

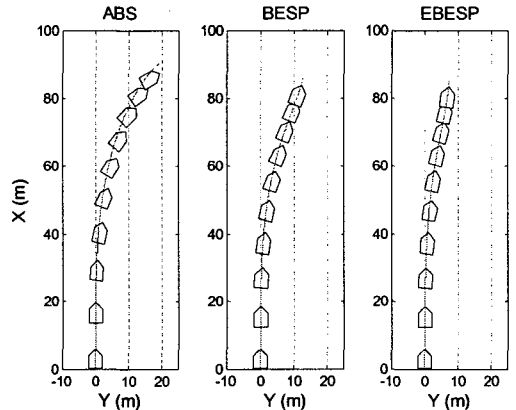


Fig. 6 Vehicle trajectories on wet asphalt - sinusoidal input

Mohan 등은 차량의 선회 중 제동 혹은 가속 입력이 가해지면 타이어에서 발생하는 횡방향 힘이 줄어들어 큰 미끄러짐 각도가 발생한다고 설명하였다.⁽²⁾ 만약 이러한 현상이 전륜에서 발생되면 understeer가 발생되어 조향 성능이 급속히 악화된다. 또한 후륜에서 발생되면 차량의 뒤쪽 부분이 미끄러지고 앞부분은 회전 반경의 안쪽으로 향하게 되는 oversteer 현상이 발생된다.

4.2 제동 입력 및 삼각 함수의 조향 입력 시 차량 및 제어기 성능 평가

다음은 제동 입력 및 삼각 함수의 조향 입력을 이용하여 차량 모델 및 제어기의 성능을 살펴보았다. 차량은 젖은 아스팔트 도로를 30m/sec로 주행하고 있으며 처음부터 제동 입력이 가해진다고 가정하였다. 이 때 조향 휠에 가해지는 입력은 진폭 ±20° 그리고 0.2Hz의 주기를 가진다.

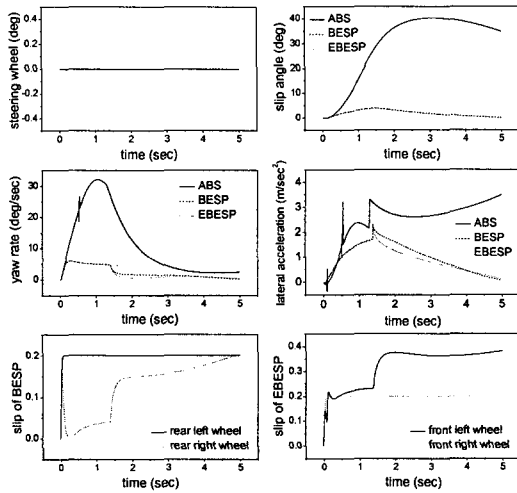


Fig. 7 Vehicle responses on split μ road – zero steering input

Fig. 5를 살펴보면 ABS만을 장착한 차량의 경우 조향이 거의 불가능해짐을 알 수 있다. 즉, 요 속도 및 횡방향 가속도 등으로 표현되는 차량의 응답은 조향 입력이 변화하더라도 거의 반응하지 못하는 것을 알 수 있다. 하지만 BESP 또는 EBESP가 장착된 차량의 경우, 차량은 조향 입력에 적절히 반응을 하며 또한 제동 속도가 감소함에 따라 미끄러짐 각도는 0으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 특히 EBESP의 경우 차량의 조종성 및 제어 성능을 유지하여 안정성을 크게 향상시킬 수 있었다.

차량의 주행 궤적은 Fig. 6에 나타내었다. ABS의 경우, 궤적을 살펴보면 제어성 및 조향성은 크게 악화되었음을 알 수 있다. 또한 BESP 차량은 EBESP 차량에 비하여 상대적으로 큰 요 속도 및 횡방향 가속도로 인하여 횡 방향으로의 변위가 비교적 크게 발생하였음을 확인하였다.

4.3 split- μ 노면에서 차량 모델 및 제어기 성능 평가

Split- μ 노면에서 초기 속도 30m/sec로 차량이 주행 중 제동 입력이 가하여졌을 때의 응답을 살펴보고자 한다. 또한 초기 상태에서는 차량의 오른쪽 두 바퀴는 젖은 아스팔트 도로에, 왼쪽 두 바퀴는 눈길 위에 있다고 가정한다.

만약 split- μ 노면에서 차량이 주행 중 제동 입력이 가해지면 양 쪽 바퀴에서 발생하는 마찰력의 차이 때문에 마찰 계수가 큰 쪽으로 향하게 된다.⁽⁸⁾ 이와 같은 편향 현상은 차량이 ABS 시스템을 장착한 경우에도 발생된다. 즉, ABS 시스템만으로는 차량의 요 운동의 발생을 완벽하게 제어하

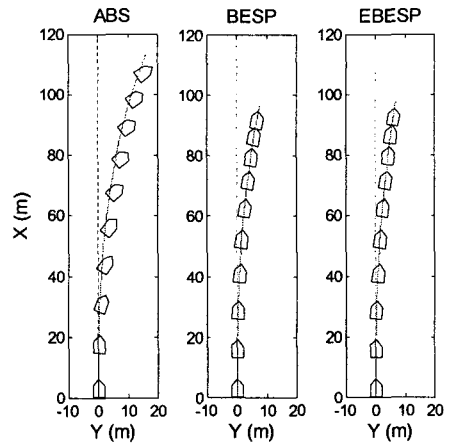


Fig. 8 Vehicle trajectories on split μ road – zero steering input

기는 불가능하기 때문이다.

Fig. 7과 8은 Split- μ 노면에서의 차량 응답 및 주행 궤적을 나타내고 있다. 그림에서처럼 모든 차량이 보다 마찰 계수가 높은 쪽으로 편향되고 있으나 BESP 및 EBESP를 장착하였을 경우 그 정도가 훨씬 감소함을 알 수 있다. 하지만 BESP와 EBESP 시스템의 성능 차이는 크지 않음을 알 수 있다. 이는 차량이 편향되기 시작할 때 EBESP 시스템에 의하여 제어되어야 할 전륜 바깥쪽 바퀴는 눈길 위에 있으며 따라서 시스템의 성능 저하가 발생하기 때문이다.

한편 Fig. 7에서 약 1.5초 정도에서의 급격한 횡방향 가속도의 변화는 차량이 젖은 아스팔트 쪽으로 완전히 넘어갔음을 의미한다.

4.4 제동 입력 및 차선 변경 시 운전자 모델을

이용한 차량 모델 및 제어기 성능 평가

눈길에서 차량 충돌 또는 사고 방지를 위하여 제동 입력을 가하면서 차선 변경(single lane change) 할 경우, 차량 응답 및 제어기 성능을 살펴보고자 한다. 초기 속도는 20m/sec이며 차선 변경을 위해서 식 (7)의 운전자 모델을 사용한다.

Figure 9 및 10은 ABS, BESP 그리고 EBESP 성능뿐만 아니라 운전자 모델의 결과를 나타낸다. ABS를 장착한 차량은 가장 큰 미끄러짐 각을 보여 제어 성능이 가장 떨어지는 것을 확인할 수 있다. BESP는 상대적으로 큰 미끄러짐 각도와 요 속도 그리고 횡방향 가속도 등을 보여 차량의 안정성이 보장되지 못하는 것으로 판단된다. 이는 차량의 제동시 하중이 앞쪽으로 쏠려 뒷바퀴 제동

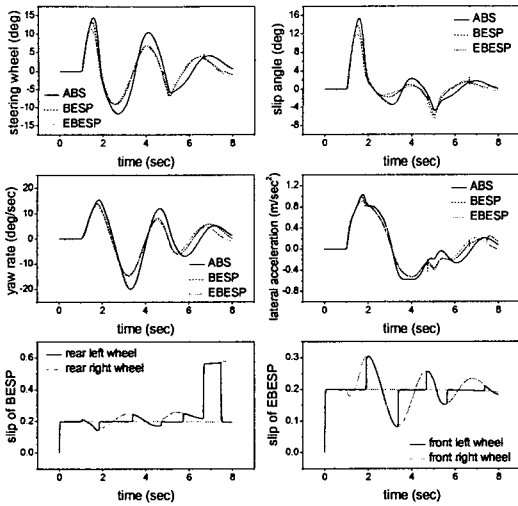


Fig. 9 Vehicle responses on snow paved road - single lane change

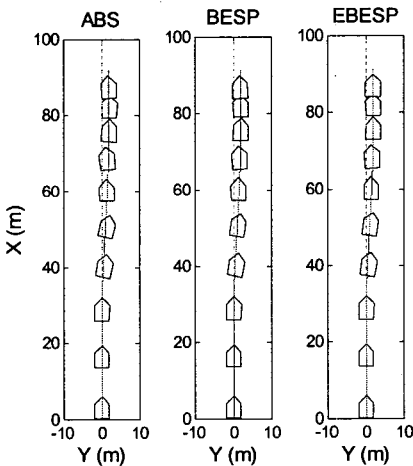


Fig. 10 Vehicle trajectories on snow paved road - single lane change

압력만으로는 차량의 안정성을 보장할 수 없기 때문이다.⁽¹³⁾

또한 이 결과는 운전자 모델이 제어기의 장착여부에 상관없이 차량이 목표 주행 경로를 적절히 주행할 수 있도록 조정할 수 있다는 것을 보여주고 있다. 즉, 이 연구를 통하여 운전자 모델의 타당성을 증명하고 있다.

5. 결론

이 연구는 BESP 및 EBESP의 개발 및 성능평가를 위하여 실시되었다. 이 시스템들은 바퀴의 미끄러짐 각도를 감소시켜 차량의 안정성과 제어

성을 향상시킨다. 차량 및 제어기의 성능은 미끄러운 노면 상태에서 다양한 조향 입력을 이용하여 평가되었다. 이 연구에서 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 이 연구를 통하여 제안된 ABS 및 ESP 제어기는 매우 강건하여 다양한 주행 조건에서 차량의 안정성을 향상시킴을 확인할 수 있었다. 즉, 목표 미끄러짐 계수 및 기준 요 속도를 잘 구현하고 있음을 알 수 있다.

(2) 차량이 J-turn을 할 경우, EBESP는 미끄러짐 각도를 크게 감소시켜 oversteer의 발생을 억제시켰으며 횡방향 안정성과 조향성을 개선시켰음을 알 수 있었다. 또한 조향 입력으로 삼각 함수가 가하여 질 때, BESP 및 EBESP는 운전자의 조향 입력을 적절히 구현할 수 있음을 확인할 수 있었다. ABS를 장착한 경우, 차량의 조향은 거의 불가능해 짐을 알 수 있다.

(3) 차량이 split- μ 노면을 주행할 때 제동 입력이 가해지면 차량은 마찰 계수가 보다 높은 쪽으로 진행하게 된다. 하지만 BESP 또는 EBESP는 중심선에서의 이탈을 최소화시켜 차량의 안전성을 향상시켰다.

(4) 운전자 모델 및 ESP 시스템은 차량이 눈길에서 주행하며 차선을 변경할 때 적절히 동작함을 확인할 수 있었다. ESP 시스템은 요 속도 및 횡방향 가속도의 크기 및 급격한 변화를 감소시켜 차량의 안정성 및 승차감을 향상시켰다.

참고문헌

- (1) Youn, W. Y., and Song, J. B., 2000, "Improvement of Vehicle Directional Stability in Cornering Based on Yaw Moment Control," *KSME International Journal*, Vol. 14, No. 8, pp. 836-844.
- (2) Mohan, S. K., and Williams, R. C., 1995, "A Survey of 4WD Traction Control Systems and Strategies," *SAE Transaction*, SAE 952644.
- (3) Shibahara, Y., Shimada, K. and Tomari, T., 1992, "The Improvement of Vehicle Maneuverability by Direct Yaw Moment Control," *Proceedings of AVEC '92*, Yokohama, Japan.
- (4) Van Zanten, A. T., 2001, "Bosch ESP Systems: 5 Years of Experience," *SAE Transaction*, SAE 2000-01-1633.
- (5) Fennel, H., and Ding, E. L., 2000, "A Model-Based Failsafe System for the Continental TEVES Electronic-Stability-Program (ESP)," *SAE Transaction*, SAE 2000-01-1635.
- (6) Van Zanten, A. T., Erhardt, R., and Pfaff, G., 1995, "VDC, the Vehicle Dynamic Control System of Bosch," *SAE Transaction*, SAE Paper 950759.
- (7) Song, J., 2005, "Performance Evaluation of a Hybrid

- Electric Brake System with a Sliding Mode Controller," *Mechatronics*, Vol. 15, pp. 339~358.
- (8) Song, J., and Boo, K., 2004, "Performance Evaluation of Traction Control Systems Using a Vehicle Dynamic Model," *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers Part D, Journal of Automobile Engineering*, Vol. 218, No. 7, pp. 685~696.
- (9) Gillespie, T. D., 1992, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, Society of Automotive Engineers.
- (10) Kiencke, U., and Nielsen, L., 2000, *Automotive Control Systems*, Society of Automotive Engineers.
- (11) Slotine, J., and Li, W., 1991, *Applied Nonlinear Control*, Prentice-Hall International Editions, USA, pp. 276~310.
- (12) Bang, M. S., Lee, S. H., Han, C. S., Machiuc, D. B., and Hedrick, J. K., 2001, "Performance Enhancement of a Sliding Mode Wheel Slip Controller by the Yaw Moment Control," *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers Part D*, Vol. 215, pp. 455~468.
- (13) Abe, M., Kano, Y., Suzuki, K., Shibahata, Y., and Furukawa, Y., 2001, "Side-Slip Control to Stabilize Vehicle Lateral Motion by Direct Yaw Moment," *JSAE Review*, Vol. 22, pp. 413~419.