

< 논문 >

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

송 정 훈*

(2006년 4월 26일 접수, 2006년 10월 31일 심사완료)

Development and Evaluation of ESP Systems for Enhancement of Vehicle Stability during Cornering (II)

Jeonghoon Song

Key Words : ESP(Electronic Stability Program), Yaw Rate(요 속도), Lateral Acceleration(횡방향 가속도), Slip Angle(미끄러짐 각도), Slip(미끄러짐 계수), 4WS(Four Wheel Steer, 사륜구동)

Abstract

Two yaw motion control systems that improve a vehicle lateral stability are proposed in this study: a rear wheel steering yaw motion controller (SESP) and an enhanced rear wheel steering yaw motion controller (ESESP). A SESP controls the rear wheels, while an ESESP steers the rear wheels and front outer wheel to allow the yaw rate to track the reference yaw rate. A 15 degree-of-freedom vehicle model, simplified steering system model, and driver model are used to evaluate the proposed SESP and ESESP. A robust anti-lock braking system (ABS) controller is also designed and developed. The performance of the SESP and ESESP are evaluated under various road conditions and driving inputs. They reduce the slip angle when braking and steering inputs are applied simultaneously, thereby increasing the controllability and stability of the vehicle on slippery roads.

1. 서론

최근 차량의 횡방향 안정성 및 조향 성능 확보 그리고 운동 성능 개선을 위하여 ESP(Electronic Stability Program) 제어기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽¹⁻³⁾ 지금까지 주로 연구된 ESP는 후륜 조향을 통하여 횡방향의 안정성을 확보하는 사륜 조향(4WS, four wheel steer) 방법과 네 바퀴에서 발생하는 제동 압력을 제어하는 방법을 이용한 것이다.⁽³⁾ 제동 압력을 이용하는 방법은 상용화된 대부분의 ESP가 채택하고 있는 방법으로 많은 연구가 진행되었다.⁽¹⁻⁴⁾

한편 사륜 조향 방법은 차량의 주행 안정성을 크게 향상시킬 수 있는 기술의 하나이다.⁽⁵⁾ 일반적인 사륜 조향 방법은 차속이 느릴 경우, 회전 반경을 줄이기 위하여 후륜을 전륜과 반대방향으로 조향하며 차속이 빠를 경우 차량의 안정성 확보를 위하여 동일한 방향으로 조향한다. 하지만 이 방법은 노면 상태를 고려하지 않으며 또한 차량의 가, 감속 상태와는 상관없이 조향 방향을 결정하는 단점이 있다.⁽⁵⁾

이러한 단점을 개선하기 위하여 이 연구에서는 차량의 주행상태를 고려하여 후륜 조향 각도를 능동적으로 제어할 수 있는 시스템을 설계한다. 이를 위하여 기준 요 속도(reference yaw rate)를 설정하고 후륜 조향을 이용하여 목표 값을 추종하는 SESP(steer ESP) 제어기를 제안하고 성능을 분석한다. 또한 횡방향 안정성을 보다 개선하기

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

위하여 전륜 바깥쪽 바퀴의 제동 압력까지 동시에 제어하는 ESESP (Enhanced SESP) 제어기도 제안한다.

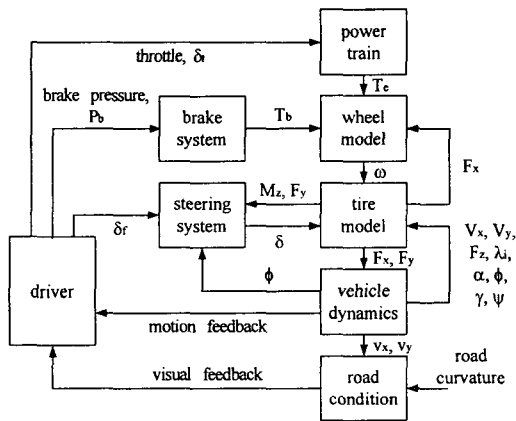
ESP 제어기의 성능을 평가하기 위하여 15 자유도의 비선형 차량 모델을 사용하며 종방향 안전성 확보를 위하여 ABS(Anti-lock Brake System) 제어기를 이용한다. ABS의 기능을 구현하기 위하여 슬라이딩 모드 제어법을 적용하였다. 완성된 차량 모델 및 제어기의 성능은 다양한 조향 입력과 노면 조건을 이용하여 검증하였다.

2. 차량 모델 및 제어기

2.1 차량 모델

차량 모델(full car model)은 동력 발생 및 전달 기구, 서스펜션, 바퀴, 샤시 그리고 노면 조건 등과 같은 몇 개의 부분 모델(sub-model)로 구성된다. 이 모델들에 대한 자세한 기술은 Fig. 1과 참고 문헌 (4~7)을 참고하기 바란다.

한편 타이어에서 발생하는 힘은 Dugoff 모델을 이용하여 계산한다.^(6,8) 또한 운전자에 의한 조향 입력을 보다 정확히 모사하기 위하여 운전자 모델을 사용하며 simplified steering system model 을



- $F_x, F_y, F_z = x, y, z$ forces from tire or on tire
- $M_z =$ aligning moment
- $\delta_t =$ throttle angle
- $\delta_f =$ steering wheel angle
- $\phi, \psi, \gamma =$ body roll, pitch and yaw angle
- $T_e, T_b =$ engine and brake torque
- $\lambda_s, \alpha =$ slip and slip angle
- $V_x, V_y =$ velocity in x and y direction
- $\omega =$ wheel rotation speed

Fig. 1 Dynamic model for overall vehicle system

이용하여 조향 장치 및 조향 입력을 조향 바퀴 (steering wheel)에서부터 모델링 하였다.⁽⁸⁾

2.2 ABS 및 ESP 제어기

일반적인 ESP 제어기는 차량의 선회 중 발생하는 요 운동을 기준 요 운동에 추종하게 제어하는 요 속도 모델 추종 제어 방법을 사용한다.⁽³⁾ 이 연구에서 제안되는 SESP 및 ESESP 역시 이와 같은 방법으로 개발된 장치이다.

SESP 및 ESESP는 ABS와 ESP 제어기로 구성된다. ABS 제어기는 차량의 종방향 안정성을, ESP 제어기는 횡방향 안전성을 제어한다.

2.2.1 ABS 제어기

ABS 제어기는 차량 속도와 바퀴의 회전 속도를 측정하여 미끄러짐 계수를 계산한 후 최적 미끄러짐 계수를 실현할 수 있도록 제동 압력을 결정한다. 제동 압력은 각 바퀴에 독립적으로 적용되며 sliding mode control 방법을 사용하여 계산된다. 이 방법은 강인 제어(robust control)의 일종으로 외란에 강인하며 비선형 시스템을 제어할 수 있다는 장점이 있다. 또한 제어되어야 할 대상의 계수들에 대한 정확한 값을 알지 못하더라도 정밀한 제어가 가능하다.⁽⁹⁾

목표 미끄러짐 계수는 노면 조건에 상관없이 0.2로 가정하며 제동시의 미끄러짐 계수는 다음과 같이 계산된다.^(6,10)

$$\lambda_s = \frac{v_{xt} - \omega_w r_w}{v_{xt}} \quad (1)$$

여기서 λ_s 는 미끄러짐 계수, v_{xt} 는 x 방향으로의 차량 속도, ω_w 는 바퀴의 회전 속도, r_w 는 바퀴 반경을 의미한다.

2.2.2 ESP 제어기

이 연구에서 제안되는 SESP 제어기는 후륜 조향각을 이용하여 요 운동을 발생시킨다. 또한 미끄러운 노면에서 차량의 조향 성능을 보다 강화하기 위하여 PID 제어 방법을 이용하여 전륜 바깥쪽 바퀴의 제동 압력을 동시에 제어하는 ESESP 제어기도 설계한다.

기준 요 속도는 다음과 같이 계산할 수 있다.⁽¹¹⁾

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

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 v_{COG} 는 차량 무게 중심의 속도, a 는 무게 중심에서 전륜까지의 거리, b 는 무게 중심에서 후륜까지의 거리, c_{of} 및 c_{or} 는 바퀴의 전륜 및 후륜의 cornering stiffness, μ_f 및 μ_r 은 전륜 및 후륜의 노면과의 마찰계수, m_{total} 은 차량의 질량 그리고 δ_f 는 전륜의 조향각을 뜻한다.

3. 결과 및 토의

SESP 및 ESESP의 성능을 다양한 운전조건에서 검증하였다. 또한 ABS만을 장착한 차량과 횡방향 안정성, 조향 성능 그리고 제어 성능 등을 비교하였다. 아래에 실시된 모든 운전 조건은 시뮬레이션의 시작과 동시에 제동 입력이 가해지며 ABS는 바퀴의 잠김을 방지하기 위하여 거의 동시에 동작을 개시한다.

3.1 눈길에서 J-turn 입력시 차량 모델 및 제어기 성능 평가

먼저 눈길에서 급제동을 하며 J-turn 조향 입력이 가하여 졌을 때 차량 및 제어기의 응답은 다음과 같다. 초기 속도는 30m/sec이며 제동 입력이 가해진 후 0.5sec에서 조향 입력이 시작되었다고 가정한다[Fig. 2(a) 그림].

ABS 장착 차량의 경우 미끄러짐 각도는 지속적으로 증가하고[Fig. 2(b)] 요 속도는 급격한 변화를 보이고 있어[Fig. 2(c)] 조향 성능 및 차량 안정성이 악화됨을 알 수 있다. 즉, 제동이 시작된 후 요 속도 및 횡방향 가속도의 급격한 증가는[Fig. 2(d)] oversteer가 발생되었음을 나타낸다. 이후 일정한 조향 입력에도 불구하고 요 속도가 감소하는 것은 차량이 조향 불능에 가까운 상태라는 것을 의미한다.⁽⁵⁾

SESP 차량은 미끄러짐 각도가 상대적으로 감소하였지만 요 속도 및 횡방향 가속도가 커 운전 상태는 여전히 불안정하다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 SESP 제어기는 요 속도의 제어를 위하여 후륜의 조향각을 증가시키지만[Fig. 2(e)] 만족할만한 제어 성능은 보여주지 못하고 있다. 하지만 ESESP 장착 차량은 미끄러짐 각도가 가장 작아 조향 성능이 우수하며 후륜 조향 각도 작은 값을 유지하여 주행 안정성을 확보하고 있음을 나타내고 있다.

Fig. 3은 차량의 주행 궤적을 나타낸다. 앞서 설명한 바와 같이 ABS 차량은 차량의 진행 방향과 차량이 향하고 있는 방향이 크게 다르나(약 23° 오차) SESP 및 ESESP 차량은 오차가 많이 감소하였음을 보여준다(각각 약 16° 및 10° 오차).

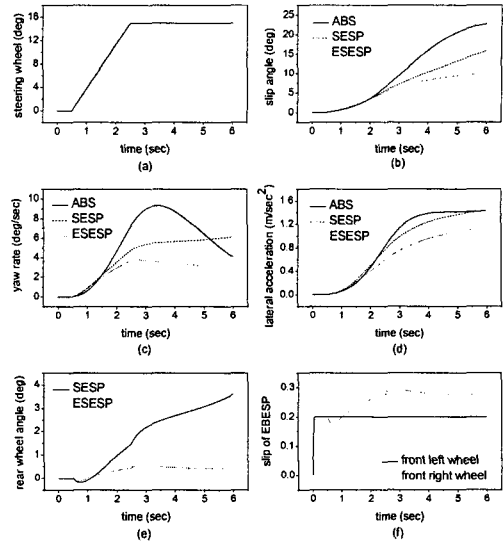


Fig. 2 Vehicle responses on snow covered road - J-turn

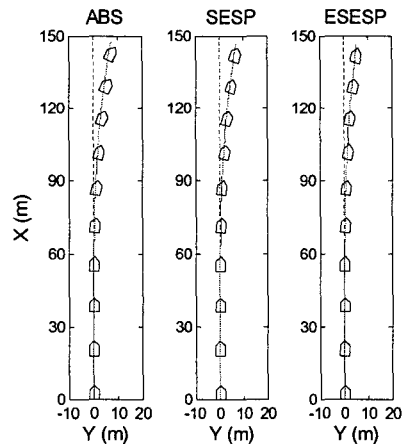


Fig. 3 Vehicle trajectories on snow covered road - J-turn

즉 차량의 조향 성능은 크게 개선되었음을 나타내고 있다.

3.2 젖은 아스팔트 노면에서 사인 파형 조향 입력시 차량 모델 및 제어기 성능 평가

젖은 아스팔트 노면에서 제동 입력 및 사인(sine) 파형의 조향 입력을 동시에 가하였을 때 차량 및 제어기의 성능을 살펴보았다. 입력으로 사용된 사인 파형의 파장은 $\pm 20^\circ$ 이며 0.2Hz의 주파수를 가진다고 가정한다[Fig. 4 (a)].

Fig. 4를 살펴보면 ABS 장착 차량은 매우 큰 미끄러짐 각도, 요 속도 그리고 횡방향 가속을 나

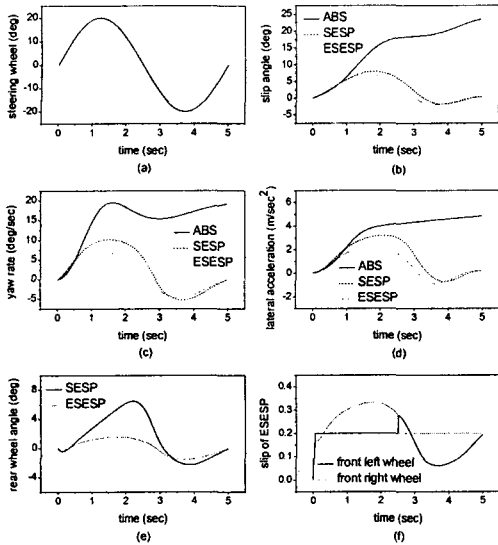


Fig. 4 Vehicle responses on wet asphalt – sinusoidal input

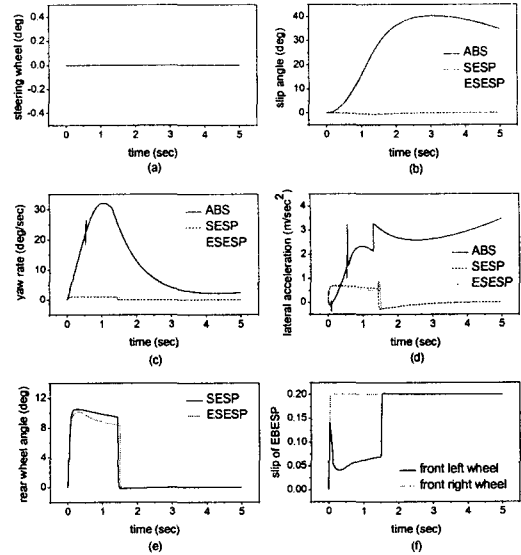


Fig. 6 Vehicle responses on split μ road – zero steering input

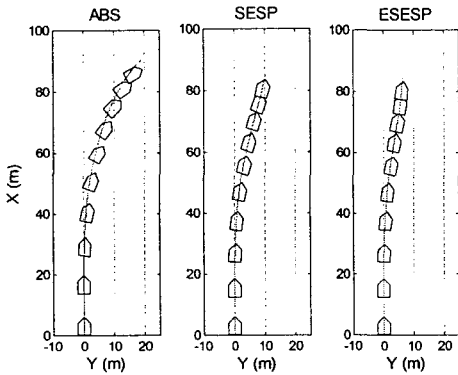


Fig. 5 Vehicle trajectories on wet asphalt – sinusoidal input

타내어 조향이 거의 불가능함을 나타내고 있다 [Fig. 4(b), (c), (d)]. SESP 차량의 경우 조향 성능이 상당히 개선되어 운전자의 조향 의지를 잘 반영하고 있음을 알 수 있다. 하지만 후륜 조향 각 제어만으로 차량의 안정성을 확보하기가 힘들어 ESESP 에 비하여 상대적으로 큰 미끄러짐 각도를 보여준다. ESESP 차량은 후륜 조향 각도의 변화가 작으며 가장 적은 미끄러짐 각도를 나타낸다 [Fig. 4(e), (b)].

한편 사인 파형의 조향 입력이 가하여지면 조향 방향에 따라 좌측 또는 우측 바퀴가 번갈아 바깥쪽 바퀴가 된다. 따라서 각 바퀴의 목표 미끄러짐 계수도 지속적으로 변화한다. Fig. 4(f)는 ESESP 장착 차량의 전륜 미끄러짐 계수를 나타내고 있다. 즉, 좌측 바퀴 및 우측 바퀴의

미끄러짐 계수는 ESESP 제어기에 의하여 적절히 제어되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5 는 차량 주행 경로를 나타낸다. 앞서 설명한 바와 같이 ABS 장착 차량은 조향 불능 상태에 있음을 확인할 수 있다. SESP 차량은 상대적으로 큰 요 속도 및 횡방향 가속도에 의하여 횡방향 쪽으로 보다 진행하였음을 나타낸다 (ABS 차량의 경우 약 19m, SESP 차량은 약 10m, ESESP 차량은 약 7m 횡방향으로 이동).

3.3 split- μ 노면에서 차량 모델 및 제어기 성능 평가

split- μ 노면에서 조향 입력 없이 제동 입력 만을 가하였을 때 차량 및 제어기의 성능을 평가하였다. split- μ 노면이란 좌우 바퀴의 노면 조건이 현저히 다른 노면을 의미한다. 이 조건에서는 운전자의 조향 입력에 의한 영향은 존재하지 않지만 차량의 횡방향 운동은 발생되므로 ESP 시스템의 성능 평가에 많이 사용되고 있다^(1,4,5,11). 이 연구에서는 오른쪽 전륜 및 후륜은 젖은 아스팔트 노면 위를 그리고 왼쪽 전륜 및 후륜은 눈길 위를 주행한다고 가정한다. 또한 차량의 초기 속도는 30m/sec 이며 조향 입력은 가해지지 않았다.

Fig. 6 은 조향 입력 및 차량의 응답을 보여주고 있다. 차량이 split- μ 노면을 주행할 때 제동 입력이 가하여지면 좌우 바퀴의 제동 토크의 불균형으로 인하여 차량은 마찰 계수가 보다 큰 쪽으로 향하게 된다.^(5,11) 이에 따라 미끄러짐 각도와 요

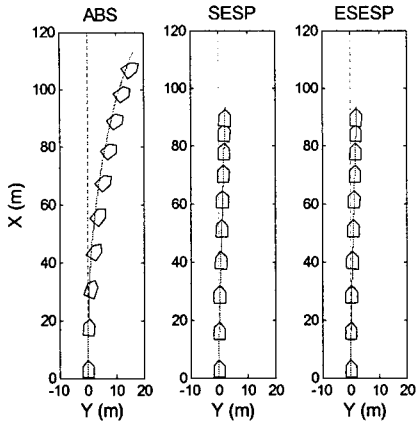


Fig. 7 Vehicle trajectories on split μ road - zero steering input

속도 그리고 횡방향 가속도가 발생된다. 결과를 살펴보면 ABS 차량은 가장 큰 미끄러짐 각과 요 속도 및 횡방향 가속도를 나타내었다. 이는 ABS가 차량의 횡방향 안전성을 보장해주지 못하기 때문이다. 하지만 SESP 및 EESP를 장착할 경우, 편향 현상의 대부분은 감소한다. 즉, Fig. 7에 나타낸 것처럼 차량이 약 90m를 전진하는 동안 횡방향의 이동량은 SESP 장착차량의 경우 약 1.5m, EESP 차량의 경우 1.2m 정도의 매우 적은 값이 발생하였다.

한편 Fig. 6(d)의 약 1.5 초에서 발생한 횡방향 가속도의 급격한 변화는 차량이 완전히 젖은 아스팔트 노면으로 넘어갔음을 의미한다. 이후 SESP, EESP 장착 차량은 거의 직진 주행하는 것을 알 수 있다.

3.4 차선 변경 (lane change) 시 운전자 모델을 이용한 차량 모델 및 제어기 성능 평가
이 연구에서는 운전자에 의한 차선 변경을 모사하기 위하여 운전자 모델을 사용하였다. 여기서 조향 입력은 차량이 진행하고자 하는 목표 경로와 차량 무게 중심과의 거리, 운전자의 주시거리 그리고 요 각도의 함수로 가정하였다. 보다 자세한 사항은 참고 문헌 (7)을 참고하기 바란다.
Fig. 8은 시간에 따른 횡방향의 목표 주행 궤적을 나타낸다. 즉 차량은 1.0초에 차선 변경을 시작하여 5.0초에 완료하는 것으로 가정하였다. 노면 조건은 눈길이며 초기 주행 속도는 20m/sec이다.

Fig. 9 및 10은 차선 변경시의 차량 응답 및 주행 경로를 나타낸다. 먼저 Fig. 10에 나타낸 결과는 각 제어기에 따른 주행 경로가 크게 다르지 않음을 나타내고 있다. 따라서 차량 및 제어기의 응

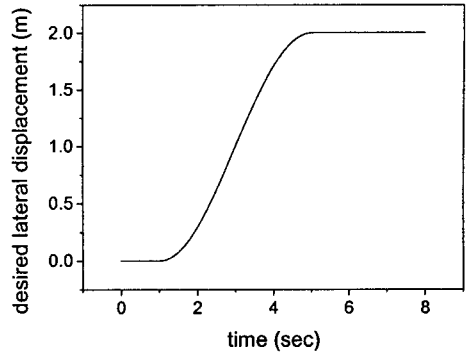


Fig. 8 Desired lateral displacement

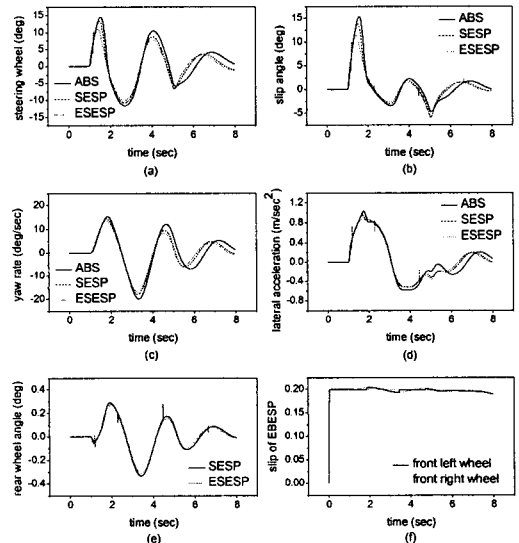


Fig. 9 Vehicle responses on snow covered road - single lane change

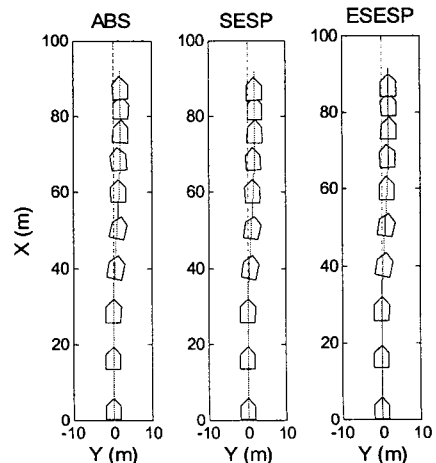


Fig. 10 Vehicle trajectories on snow covered road - single lane change

답도 다른 조건에서의 결과와 비교하면 차이가 크지 않음을 확인할 수 있다(Fig. 9). 하지만 ESESP 시스템을 장착한 차량은 비슷한 경로를 주행함에도 요구되는 조향 입력이 작아졌으며 미끄러짐 각도도 감소하였다. 이는 운전 편의성 및 안정성이 개선되었음을 나타내며 요 속도의 감소는 승차감의 향상에도 도움을 줄 수 있음을 뜻한다.

4. 결론

이 연구에서는 차량의 횡방향 안전성 향상을 위하여 후륜 조향각을 제어하는 SESP 제어기와 후륜 조향각 뿐만 아니라 전륜 바깥쪽 바퀴까지 제어하는 ESESP 제어기를 제안하였다.

차량 및 제어기의 성능을 평가하기 위하여 젓은 아스팔트 및 눈길의 노면 조건에서 시뮬레이션을 실시하였으며 다양한 조향 입력을 이용하여 횡방향 힘을 발생시켰다.

결과를 살펴보면 미끄러운 노면에서 제동 입력과 동시에 J-turn 및 사인 파형의 조향 입력이 가해지면 SESP 및 ESESP 제어기는 차량의 횡방향 안전성 및 조향 성능을 개선시켰음을 알 수 있었다. 결과적으로 **oversteering** 현상을 억제시킬 수 있었으며 운전자의 운전의지를 차량의 거동에 적절히 반영시킬 수 있었다.

한편 split- μ 노면에서 SESP 및 ESESP 제어기는 차량이 노면 마찰계수가 큰 쪽으로 편향되는 것을 방지하여 안전성을 향상시키는 것을 확인할 수 있었다. 또한 차선 변경시 조향 입력을 감소시켜 운전 편의성을 증가시켰다.

참고문헌

(1) 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.

(2) Van Zanten, A. T., 2001, "Bosch ESP Systems: 5 Years of Experience," *SAE Transaction*, SAE 2000-01-1633.

(3) Lee, C. R., Yang, H. S. and Park, Y. P., 2003, "Control of Vehicle Yaw Moment using Sliding Mode with Time-Varying Switching Surface," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 27, No. 5, pp. 666~672.

(4) Song, J., and Boo, K., 2004, "Development and Performance Evaluation of ESP Systems for Enhancing the Lateral Stability during Cornering," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 30, No. 10.

(5) Song, J., Boo, K. and Lee, J., 2004, "Using an ABS Controller and Rear Wheel Controller for Stability Improvement of a Vehicle," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 28, No. 8, pp. 1125~1134.

(6) Song, J., 2005, "Performance Evaluation of a Hybrid Electric Brake System with a Sliding Mode Controller," *Mechatronics*, Vol. 15, pp. 339~358.

(7) 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.

(8) Song, J., Boo, K., Kim, H. S., Lee, J., and Hong, S., 2004, "Model Development and Control Methodology of a New Electric Power Steering System," *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers Part D, Journal of Automobile Engineering*, Vol. 218, No. 9, pp. 967~976.

(9) Slotine, J. and Li, W., 1991, *Applied Nonlinear Control*, Prentice-Hall International Editions, USA, pp. 276~310.

(10) Kiencke, U., and Nielsen, L., 2000, *Automotive Control Systems*, Society of Automotive Engineers.

(11) Bang, M. S., Lee, S. H., Han, C. S., Maciucă, D. B. and Hedrick, J. K., 2001, "Performance Enhancement of a Sliding Mode Wheel Slip Controller by the Yaw Motion Control," *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers Part D, Journal of Automobile Engineering*, Vol. 215, No. 4, pp. 455~468.