

주행 시뮬레이터를 이용한 차량 안정성 제어기의 성능 검증

정 태 영¹⁾ · 이 건 복²⁾ · 이 경 수³⁾

한양대학교 자동차공학과¹⁾ · 숭실대학교 기계공학과²⁾ · 한양대학교 기계공학부³⁾

Evaluation of Vehicle Stability Control System Using Driving Simulator

Taeyoung Chung¹⁾ · Gunbok Lee²⁾ · Kyongsu Yi³⁾

¹⁾Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾School of Mechanical Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea

³⁾School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 25 February 2004 / Accepted 7 June 2004)

Abstract : This paper presents human-in-the-loop evaluations of vehicle stability control(VSC) system using a driving simulator. A driving simulator which contains full vehicle nonlinear model is evaluated by using actual vehicle test data on the same driving conditions. Braking control inputs for Vehicle Stability Control system have been directly derived from the sliding control law based on vehicle planar motion equations with differential braking. Closed-loop simulation results at realistic driving situations have shown that the proposed controller reduces driving effort of a driver and enhances stability of a vehicle.

Key words : Active safety(능동안전), Human-in-the-loop evaluation(운전자 개입을 통한 검증), Vehicle stability control system(차량 안정성 제어 시스템), Driving simulator(주행 시뮬레이터), Human-centered(인간중심)

Nomenclature

α : tire slip angle, radian
 F_x : longitudinal tire force, N
 F_y : tire lateral force, N
 u : vehicle longitudinal velocity, m/sec
 u_{ch} : vehicle characteristic speed, m/sec
 v : vehicle lateral velocity, m/sec
 r : yaw rate, rad/sec
 β : vehicle's body side slip angle, radian
 μ : friction coefficient between road and tire

Subscripts

fr, fl : front right, front left
 rr, rl : rear right, rear left

1. 서론

차량 안정성 제어시스템은 선회 주행 시 발생할 수 있는 차량의 스핀 또는 전복을 막고 차량의 핸들링을 향상시키는 것이며, 기본 개념은 각 바퀴의 제동력을 독립적으로 제어하여 차량에 보상 요모멘트를 발생시켜 차량의 자세를 제어하는 것이다.

기존의 연구는 주로 운전자의 조작 즉, 가감속 및 조향입력에 대하여 미리 결정된 개루프 값을 사용하여 제어기 성능을 시뮬레이션을 통하여 검증하게

*To whom correspondence should be addressed.
kyongsu@hanyang.ac.kr

나 또는 실차실험을 통해 검증했다.^{1,3)} 개루프 값을 사용하는 경우, 제어기의 성능이나 응답특성을 고찰하는데 있어서 유용한 방법일 수 있으나, 운전자의 반응에 따른 제어기의 성능을 평가할 수 없다. 그러므로 실제 주행상황을 재현하여 운전자가 비슷한 상황대처를 이룰 수 있도록 시뮬레이터를 구성하고, 운전자 개입을 통하여 차량 안정성 제어기 성능을 검증하는 방법은 경제적인 측면에서 큰 이득을 얻을 수 있다.⁴⁾

또한, 기존의 직접 요모멘트 계산을 이용한 제어기 설계 방법은 차량의 중방향 거동을 무시한 2 자유도 선형 차량모델을 기반으로 구성하게 되는데, 이는 제동시 속도변화는 고려하지 않는다. 본 연구에서는 3 자유도 차량 모델을 기반으로 제동력을 직접 제어 입력으로 사용하는 슬라이딩 제어기를 설계했다. 3 자유도 차량모델을 이용하면 속도변화가 많은 주행조건에서의 성능향상을 기대할 수 있고 제동력을 직접 구함으로써 보다 효율적으로 제어기를 구성할 수 있다.

본 연구에서는 비선형 차량 모델을 포함한 주행 시뮬레이터를 구성하고, 이를 실차실험 결과와 비교하여 검증했다. 또한 슬라이딩 제어기를 주행 시뮬레이터에 적용하여 고속에서의 차선변경, 일정반경 도로주행, 슬라롬 주행 등의 주행상황을 재현하여 실제 운전자의 반응과 이에 따른 제어기의 성능을 고찰했다.

2. 주행 시뮬레이터 구성 및 검증

PC를 기반으로 실시간 시뮬레이션 환경을 구성했고 23자유도 비선형 차량모델을 사용했다.⁸⁾ 주행 시뮬레이터를 동일한 주행상황에서의 실차 실험결과와 비교하여 검증했다. 실차 실험결과와 주행 시뮬레이터 실험결과는 동일한 주행조건에서 상당히 유사한 경향을 나타냈다. 즉, 주행시뮬레이터에 적용된 차량모델이 실차의 거동을 정확하게 표현한다고 볼 수 있으며, 주행시뮬레이터가 실제 주행상황과 유사한 운전자의 조작입력을 이끌어낼 수 있음을 나타낸다.

2.1 주행 시뮬레이터 구성

주행 시뮬레이터는 Fig. 1과 같이 PC를 기반으로 한 Matlab xPC target을 이용하여 실시간 시뮬레이션 환경을 구현했다.⁹⁾ 호스트 PC에서 작성된 차량 모델 및 제어기 프로그램은 타겟 PC 메모리에 업로드된다. 타겟 PC는 이 프로그램을 이용하여 실시간 시뮬레이션을 수행하고 차량운동에 관련된 변수를 3D 애니메이션 PC에 전달한다. 운전자는 스크린에 표시되는 주행상황에 대한 시각정보에 따라 상황에 대처하게 된다. 운전자의 조작입력은 각각의 센서를 통해 획득되어 다시 타겟 PC의 차량모델에 조작 입력으로서 작용하게 된다. 운전자 조작부는 실제 차량 부품을 이용했다.

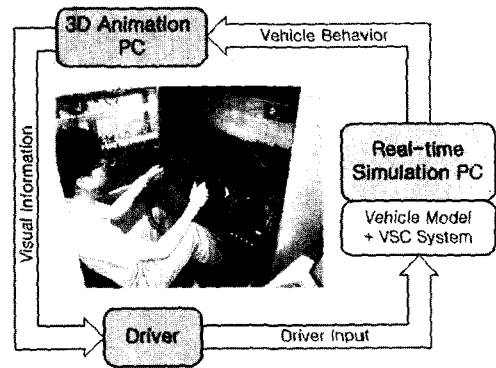


Fig. 1 Configurations of driving simulator

실시간 시뮬레이션에 사용된 차량모델은 차체의 6자유도와 각각 1/4현가장치의 8자유도를 고려했다. 구동계 모델은 정적 엔진모델 및 토크컨버터 모델, 자동변속장치를 적용했고 타이어모델은 Pacejka 모델을 사용했다.⁶⁾

2.2 실차실험 결과를 이용한 주행 시뮬레이터의 검증

주행시뮬레이터를 검증하기 위하여 다음과 일정 반경 도로 주행 및 슬라롬 주행에 대하여 실차 실험의 실측 데이터와 주행 시뮬레이터 실험 결과를 비교했다.

Fig. 2는 30m 곡률반경의 도로를 정지상태에서 차속을 증가시키면서 실험한 결과이다. Fig. 2(a)와 같이 가속할 때 운전자는 Fig. 2(b)와 같이 조향하게 된다. 30초에서 차속은 55km/h로 가속되고 이때 조

주행 시뮬레이터를 이용한 차량 안정성 제어기의 성능 검증

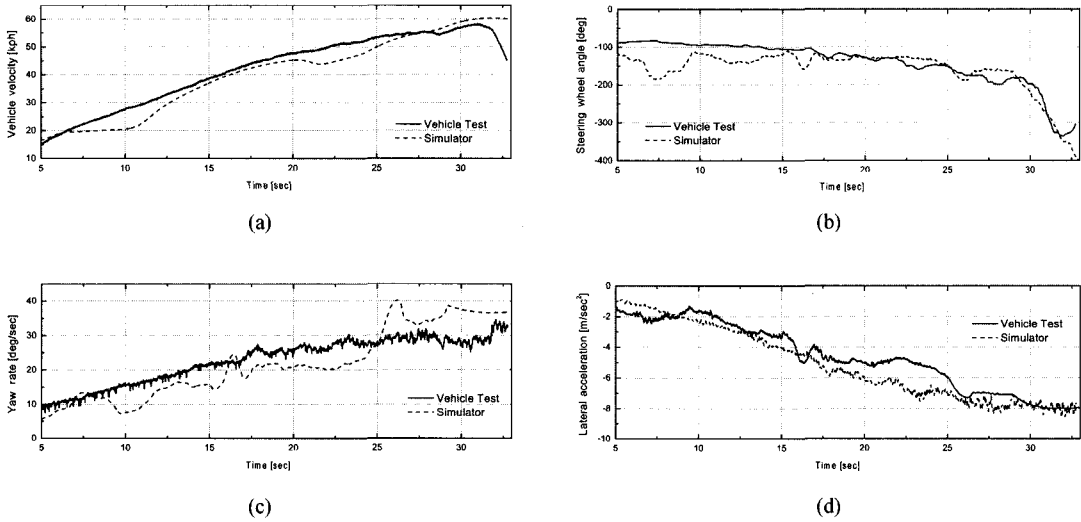


Fig. 2 Evaluation results of driving simulator on circular road driving

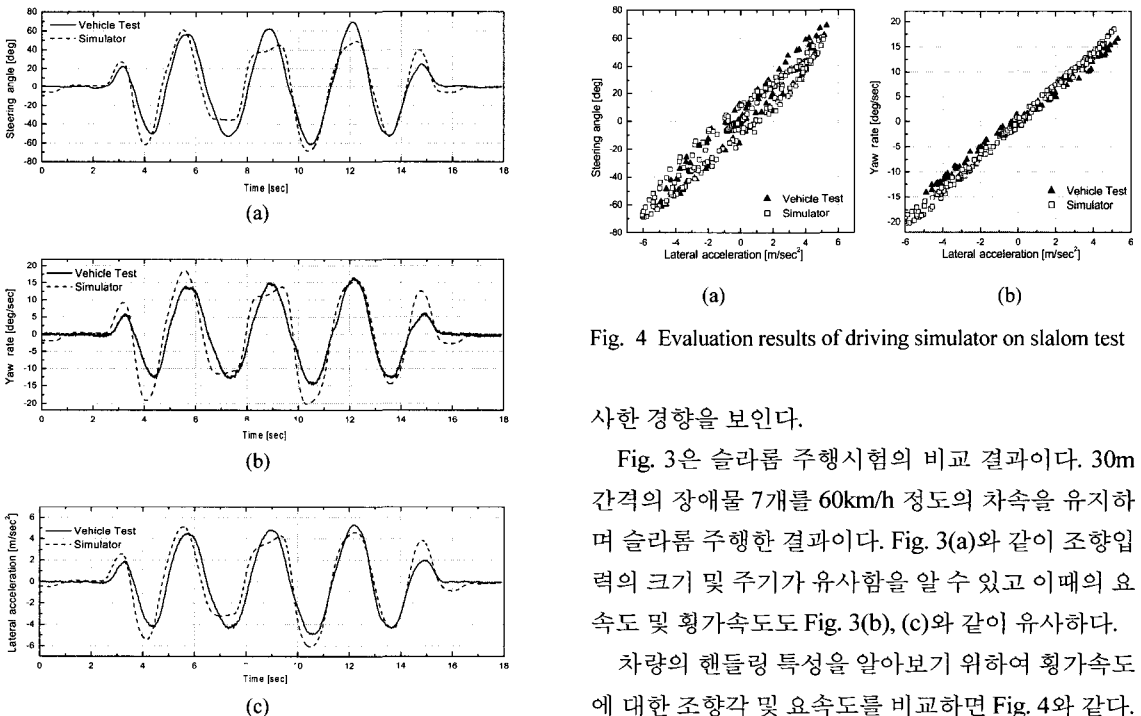


Fig. 3 Evaluation results of driving simulator on slalom test

Fig. 4 Evaluation results of driving simulator on slalom test

사한 경향을 보인다.

Fig. 3은 슬라롬 주행시험의 비교 결과이다. 30m 간격의 장애물 7개를 60km/h 정도의 차속을 유지하며 슬라롬 주행한 결과이다. Fig. 3(a)와 같이 조향입력의 크기 및 주기가 유사함을 알 수 있고 이때의 요속도 및 횡가속도도 Fig. 3(b), (c)와 같이 유사하다.

차량의 핸들링 특성을 알아보기 위하여 횡가속도에 대한 조향각 및 요속도를 비교하면 Fig. 4와 같다. Fig. 4(a)에서 볼 수 있는 바와 같이 동일한 횡가속도를 발생시키기 위한 조향각의 최대값이 거의 일치한다. 또한, Fig. 4(b)와 같이 횡가속도에 따라 유사한 요속도가 발생되며 그 기울기도 유사한 결과를 보임을 알 수 있다.

향각이 급격하게 증가하며 더 이상 일정 반경도로 추종하지 못하게 되며 주행 시뮬레이터 실험 결과와 실차 실험결과가 상당히 근접한 결과를 보인다. Fig. 2(c), (d)와 같이 요속도 및 횡가속도 또한 유

3. 제동력 입력 슬라이딩 제어기 설계

3.1 3자유도 차량 모델

Fig. 5는 제어기 설계를 위한 단순한 차량모델을 나타낸다. 차량의 평면운동을 고려한 3자유도 차량 모델에서 시스템에 작용하는 외력은 각 타이어에 작용하는 종방향 및 횡방향 힘의 합으로 가정한다.

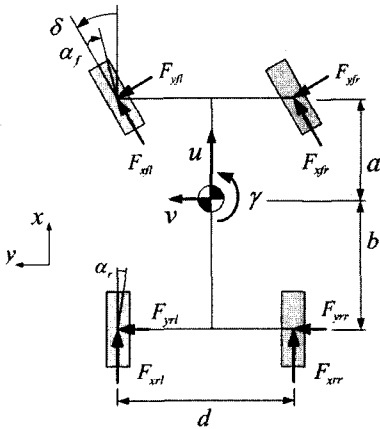


Fig. 5 3-DOF vehicle planar model

차량의 평면 운동에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m\dot{u} &= F_{xr} + F_{yf} \cos \delta - F_{yf} \sin \delta + mrv \\ m\dot{v} &= F_{yr} + F_{yf} \sin \delta + F_{yf} \cos \delta - mru \\ I_z \dot{r} &= aF_{yf} \sin \delta + aF_{yf} \cos \delta - bF_{yr} \\ &\quad + \frac{d}{2}(F_{yfr} - F_{yfl}) \cos \delta + \frac{d}{2}(F_{xrr} - F_{xrl}) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 a 와 b 는 각각 무게중심에서 전후 차축까지의 거리이며, d 는 윤거, m 은 차량의 총질량, I_z 는 z 축방향 질량관성 모멘트를 각각 나타낸다. δ 는 운전자의 조향입력이다.

3.2 제어기 설계

요속도의 목표값은 2자유도 선형 차량모델의 정상상태 값으로 다음과 같이 정의되며, 이 값의 절대치는 $\mu g/u$ 미만의 값으로 제한한다.

$$r_{des} = \frac{u}{L(1+u^2/u_{ch}^2)} \delta \quad (2)$$

요속도의 실제값과 목표값의 오차 및 차체 슬립각(β)를 고려하여 슬라이딩 평면을 다음과 같이 정의한다.⁷⁾

$$s = r_{des} - r + \rho \cdot \beta \quad (3)$$

여기서 ρ 는 임의의 양의 정수이다. 다음 식과 같이 양의 K 값에 대하여 S 값은 시간이 지남에 따라 0에 수렴하게 된다.

$$\dot{s} = -K \cdot s \quad (4)$$

식 (1)에서 타이어에 작용하는 종방향 힘 F_{xf} 및 F_{xr} 는 다음과 같이 단순화할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{xf} &= F_{yfl} + F_{yfr} \equiv \frac{T_s}{r_{wf}} - (F_{Bfl} + F_{Bfr}) \\ F_{xr} &= -(F_{Brl} + F_{Brr}) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 T_s 는 구동토크를 나타내며, F_B 값은 각 휠에 대한 안정성 제어기의 제어 입력인 제동입력이 된다. 또한 각 휠에 작용하는 횡방향 힘은 2자유도 선형 차량모델로 단순화한다.

식 (5)를 식 (1)에 대입하고 이를 이용하여 식 (4)를 구성하면 각 휠의 제동입력 F_B 에 대하여 차량의 운동방정식을 정리할 수 있다.^{8,9)} 이 식에서 주행상황에 따라 좌우 전륜의 제동입력을 구한다. 운전자의 제동입력이 가해진 경우와 그렇지 않은 경우에 따라 두 가지 식을 구성할 수 있으며 상황에 따라 계산된 제동입력을 제어입력으로 선택한다. 후륜의 제동입력은 계산된 전륜의 제동력에 차속의 종방향 가속도를 고려하여 분배한다. 이때, 계산된 각 제동력은 음의 값은 무시하고 양의 값만 적용하여 이를 제어입력으로 한다.

4. 모의 주행실험 결과

주행 시뮬레이터를 이용한 모의 주행실험은 2장의 주행상황과 같은 일정반경 도로 주행, 슬라롬 주행상황에 대하여 수행되었다.

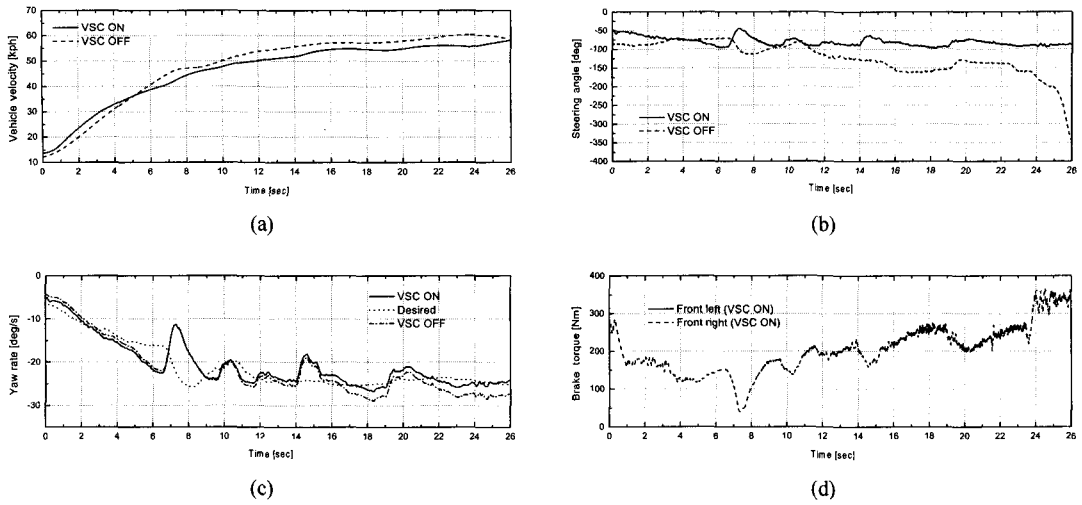


Fig. 6 Test results of circular track driving

4.1 일정반경 도로 주행 실험

회전반경 30m인 일반노면 도로를 시계방향으로 정지상태에서 가속하면서 회전반경을 유지할 수 없을 때까지 실험했다.

Fig. 6 (a)와 같이 차속이 증가될 때, 운전자는 Fig. 6 (b)와 같이 조향입력을 가하게 된다. 제어를 하지 않은 경우 55 km/h에서 더 이상 30m 회전반경을 유지하지 못하고 조향입력이 발산한다. 제어를 적용한 경우는 Fig. 6 (c)와 같이 요속도가 목표값에 비교적 정확히 추종하게 되며 90도 정도의 조향입력으로 30m 일정반경 도로를 주행하게 된다. 시계방향으로 선회하므로 Fig. 6 (d)와 같이 우측륜에 제동입력이 가해지면서 시계방향으로 모멘트가 발생하게 되어 선회안정성이 향상됨을 알 수 있다.

4.2 슬라롬 주행 실험

슬라롬 주행은 60km/h 정도의 차속을 유지하면서 30m 간격의 장애물을 피하면서 주행하는 경우에 대해 실험했다. Fig. 7은 슬라롬 주행실험의 결과이다. 조향 입력은 Fig. 7(a)와 같이 제어한 경우 200도 이내로 안정된 값을 보인다. 제동입력은 Fig. 7(b)와 같이 좌우륜에 번갈아 가면서 작동된다. 제어를 적용한 경우 Fig. 7(c)와 같이 요속도가 목표값을 잘 추종함을 볼 수 있다.

Fig. 8(a), (b), (c)는 차량의 횡가속도에 따른 결과

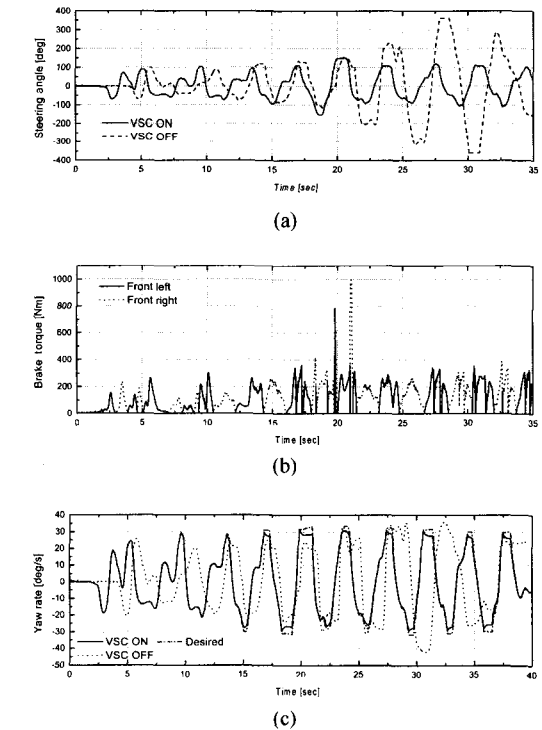


Fig. 7 Test results of slalom (I)

이다. 횡가속도의 크기가 차량에 발생하는 횡방향 힘에 비례하여 발생한다고 보면, Fig. 8(a)에서 보이는 바와 같이 안정성 제어를 적용한 경우 비슷한 크기의 횡가속도를 발생시키기 위한 조향입력이 작

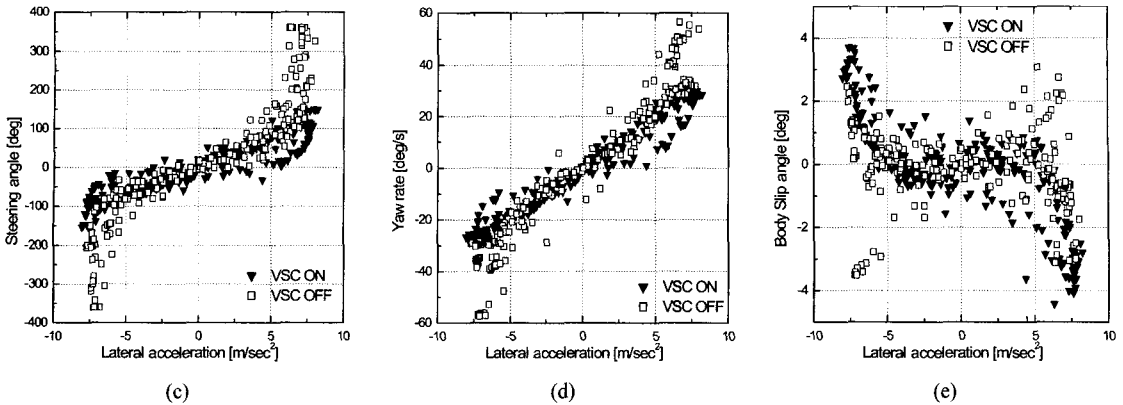


Fig. 8 Test results of slalom (II)

음을 알 수 있다. 요속도는 Fig. 8(b)와 같이 제어를 적용한 경우가 비슷한 횡가속도 범위에서 작은 값을 보이며 기울기도 작다. 차체 슬립각은 올바른 슬라롬 주행을 할 수 있도록 횡방향 가속도가 큰 값을 갖을 때, 반대 부호의 방향으로 발생되어야 한다. 제어하지 않은 경우는 Fig. 8(c)와 같이 같은 방향으로 발생하는 경향이 있다.

5. 결론

본 연구에서는 차량 주행 시뮬레이터를 개발하여 실차실험을 통해 검증했고, 주행 시뮬레이터를 이용하여 3자유도 차량모델을 기반으로 한 제동력 직접 입력 슬라이딩 제어기의 성능을 다양한 주행상황에서 검토했다.

모의 주행실험 결과, 제안된 차량 안정성 제어기는 여러 가지 주행상황에서 운전자가 원하는 방향, 즉 요속도가 목표값을 정확하게 추종하고 차체 슬립각을 감소시키는 방향으로 제동입력을 발생시키는 결과를 보였다. 각 주행상황에서 차량 안정성 제어기를 적용한 경우 보다 안정되고 작은 조향입력으로 운전자의 핸들링 특성을 향상시킨다고 볼 수 있다.

향후, 보다 실제 주행에 근접하게 주행상황을 재현할 수 있는 시뮬레이터를 개발하고 운전자의 느낌이나 반응을 정량적으로 산출하여 제어기 성능을 검증할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실 사업의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- 1) A. T. Van Zanten, R. Erhardt, G. Pfaff, F. Kost, U. Hartmann, T. Ehret, "Control Aspects of the Bosch-VDC," AVEC'96, pp.573-607, 1996.
- 2) H. Tseng, B. Ashrafi, D. Madau, T. A. Brown, D. Recker, "The Development of Vehicle Stability Control at Ford," IEEE/ASME Transactions of Mechatronics, Vol.4, No.3, September, 1999.
- 3) S. Heo, K. Park, K. Yi, H. Na, I. Paik, "Design of Control Logics for Improving Vehicle Dynamic Stability," Transactions of the KSAE, Vol.8, No.5, pp.165-172, 2000.
- 4) B. Chen, H. Peng, "Differential Braking Based Rollover Prevention for Sport Utility Vehicles with Human-in-the-loop Evaluations," Vehicle System Dynamics, Vol.36, No.4-5, pp.359-389, 2001.
- 5) S. Lee, Y. Kim, K. Park, D. Kim, "Development of Hardware-in-the-Loop Simulator and Vehicle Dynamic Model for Testing ABS," SAE 2003-01-0858, 2003.
- 6) J. Ha, T. Chung, J. Kim, K. Yi, J. Lee, "Validation of 3D Vehicle Model and Driver Steering Model with Vehicle Test," Spring

- Conference Proceeding of KSAE, Vol.II, pp.676-681, 2003.
- 7) K. Uematsu, J. C. Gerdes, "A Comparison of Several Sliding Surfaces for Stability Control," AVEC'02, Paper No.20024578, 2002.
- 8) T. Chung, J. Ha, J. Kim, K. Yi, J. Lee, "Development of Vehicle Stability Control System Based on Sliding Control," Spring Conference Proceeding of KSAE, Vol.II, pp.577-582, 2003.
- 9) K. Yi, T. Chung, J. Kim, J. Lee, "An Investigation into Differential Braking Strategies for Vehicle Stability Control," IMechE Vol.217, Part D, pp.1081-1093, 2003.