

차량동역학제어시스템 개발 Development of Vehicle Dynamics Control System

김동신*, 신현성*, 박병석*
Dongshin Kim, Hyonsung Shin, Byungsook Park

ABSTRACT

This paper describes the MANDO VDC (Vehicle Dynamics Control) system for the vehicle stability enhancement and consists of the control strategies, computer simulation and tests on the various road surfaces. This VDC system controls the dynamic vehicle motion in the emergency situation such as the final oversteer/understeer and allows the vehicle to follow the course as desired by the driver. The system is based on an active yaw control and its performance verified by the test is shown. Also the comparison between the MANDO VDC System and a competitor is carried out.

주요기술용어 : Vehicle Dynamics (차량동역학), Yaw Control (선회제어), Slip Control (미끄럼제어), Simulation (시뮬레이션)

1. 서론

차량의 안정성에 관한 연구가 활발히 진행되면서 차량의 비선형영역에서의 제어장치를 넘어서 타이어와 노면간의 마찰력 한계에서의 제어장치들이 속속 개발되고 있다. ABS(Antilock Brake System), TCS(Traction Control System) 등이 차량종방향으로의 타이어 한계에서의 제어장치 라면 차량횡방향까지 포함한 제어장치가 VDC라

고 할 수 있다. 이 장치는 운전자의 제동과 독립적으로 바퀴를 제어하며 VDC 개념의 시작은 70년대 van Zanten[1] 등이 선회중 제동할 경우 제동미끄럼배분 (Brake Slip Distribution)에 의해서 운전자가 원하는 차량운동과 실제차량운동과의 차이를 줄임으로써 비롯되었다. 그후 이 능동제동제어장치는 TOYOTA의 VSC (Vehicle Stability Control), Mercedes-Benz 의 ESP (Electronic Stability Program), BMW 의 DSC (Dynamic Stability Control), GM의 VSES (Vehicle Stability Enhancement System) 혹은 AH (Active Handling) 등의 이름으로 불리워지고 있으며 Corvette에는

* 정회원, 만도기계(주) 기술연구소

전후륜 모두 제어하는 4채널 방식을, Cadillac에는 전륜두개만 제어하는 2채널 방식을 채택하고 있다 [2,3]. 국내에서도 현대에쿠스에 장착되기에 이르렀다.

차량안정성향상을 위한 능동제동제어방법으로는 다음과 같은 여러 가지 종류가 있다. 첫번째는 최적제어이론을 이용하여 운전자가 원하는 운동과 실제차량운동의 차이를 최소화하는 동시에 최소 제동거리를 확보하는 시스템이며 차륜미끄럼과 차량미끄럼을 직렬제어(Cascade Control)하는 방식이다 [4,5,6]. 이때 선회속도(Yaw Rate)와 차량횡미끄럼각 (Sideslip Angle) 을 동시에 고려함으로써 미끄러운 노면에서 선회제어 (Yaw Control) 에 의해 차량 횡미끄럼각이 지나치게 증가하는 것을 방지 할 수 있다. 두 번째 방법은 비선형최적화를 통해 얻어진 최적매개변수를 갖는 차량기준모델을 이용해 이 모델과 실제차량운동과의 차이를 최소화하는 선회제어방법이며 이 경우 컴퓨터 시뮬레이션 (Off-Line Computer Simulation) 과 실시간 시뮬레이션 (Real Time Simulation) 을 통해 제어 전략을 세워 제품개발기간을 줄일 수 있다 [7]. 세번째는 안정성제어와 추적제어로 나누어 안정성제어의 경우에는 한바퀴의 미끄럼을 이용하여 제어를 하고 추적제어의 경우에는 네바퀴의 미끄럼을 이용하여 제어하는 것이다 [8]. 이때 과도한 언더스티어제어시 지나친 안쪽방향의 모멘트에 의한 안정성제어의 위험성을 제시하였다.

만도에서는 ABS 독자개발 경험을 바탕으로 95년도부터 VDC개발에 착수했으며, 매년 겨울 스웨덴에서 저마찰노면 (빙판길, 눈길)에서 의 실차시험을 수행 해 오고있다.

본 시스템은 ABS/TCS 기능을 포함하며 선회속도 제어를 기본으로 한다.

2. 본 론

2.1 시스템 구성

그림 1 은 시스템 구성을 나타내고 있으며 유압장치(HU) 와 전자제어장치(ECU) 가 일체형으로 되어있고 4개의 차륜속도센서, 조향각센서, 선회각센서, 횡가속도센서, 압력 센서로 이루어져 있다. 유압장치는 내장형 축압기 (Precharge Accumulator) 방식을 적용했으며 14개의 솔레노이드밸브를 사용한다. 전자제어장치는 두개의 마이크로 콘트롤러(Micro-Controller)를 사용하고 있으며 CAN (Controller Area Network) 을 이용하여 엔진 ECU와 통신한다.

2.2 제어로직

만도 VDC 시스템은 크게 두 가지 제어 로직으로 분류된다. 첫 번째는 과도한 제동력과 엔진출력에 의한 차륜의 미끄러짐을 방지하여 최적의 제동력과 구동력을 확보하는 부분 (ABS/TCS)이고 두 번째는 차량의 과도한 언더/오버스티어를 방지하는 차량선회제어로직 부분이다.

2.2.1 차륜미끄럼제어

차륜미끄럼제어는 제동시 차륜의 과도한 미끄럼을 방지하는 ABS기능 이외에 가속시 차륜미끄럼을 방지하는 TCS 기능을 포함한다.

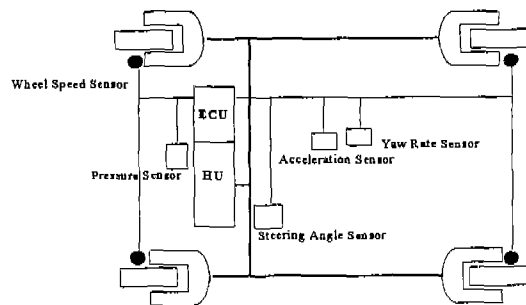


Fig. 1 MANDO VDC System

TCS는 브레이크를 이용하는 BTCS (Brake intervention Traction Control System) 와 엔진제어를 통한 ETCS (Engine intervention Traction Control System) 로 구성되며 두 기능을 더한 시스템이 FTCS (Full TCS) 이다. 그림 2 는 FTCS 제어로직 블록선도를 나타낸다.

구동력제어 여부는 차륜속도센서로부터 각 구동륜의 미끄럼량을 계산하여 판단하고, 좌우노면판단은 좌우바퀴의 미끄럼차와 기울기로 부터 결정한다. 좌우비대칭노면일 지라도 차체 속도가 미리 정의된 양보다 크면 BTCS를 작동하지 않음으로써 제동장치에 무리를 주지 않는다. 좌우비대칭노면인 경우에는 구동륜 중에서 한쪽에만 미끄럼이 발생하며 BTCS는 각 노면의 마찰력을 모두 이용 하지만 ETCS는 저마찰노면의 마찰력을 이용하기 때문에 BTCS를 작동시키는 것이 ETCS를 작동시키는 것보다 가속성이 우수하다. 따라서 좌우비대칭노면에서는 미끄럼이 일어나는 바퀴에 BTCS를

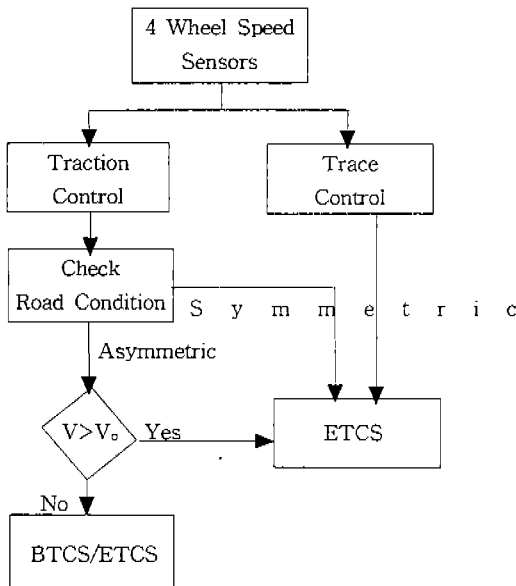


Fig. 2 FTCS Control Algorithm (V: Vehicle Speed, V_0 : Predefined Reference Vehicle Speed)

작동시키며 이때 반대쪽 구동륜의 미끄럼이 목표치보다 크면 ETCS를 작동시키고 그렇지 않으면 작동시키지 않는다.

추적제어에서는 차량의 선회시 전후륜 횡가속도차가 정해진 기준값을 넘었을 때 ETCS를 작동시켜 구동력을 줄임으로써 차량의 안정성을 확보한다.

2.2.2 차량선회제어

그림 3 은 차량선회제어의 블록선도를 나타낸다. 센서를 통해 얻어진 실제차량거동과 추정을 통해 얻어진 노면상태 및 운전자 입력을 이용해 정해진 안정기준치를 비교하여 실제차량거동이 작거나, 클 경우 적절한 차륜을 제어함으로써 차량의 안정성을 확보한다.

후륜에서 먼저 타이어와 노면 사이의 접착한계에 도달했을때 오버스티어 현상이 나타나므로 전륜의 제동장치를 제어함으로써 전륜에 의해 발생하는 선회모멘트를 줄여준다. 반대로 전륜에서 먼저 타이어와 노면의 접착한계에 도달하여 언더스티어현상이 발생했을 경우 차량은 미끄러져 좀 더 커진 선회반경에서 안정을 찾을 수 있으므로, 즉 오버스티어보다 안정성측면에서 덜 심각함으로 제어조건을 완화하였다.

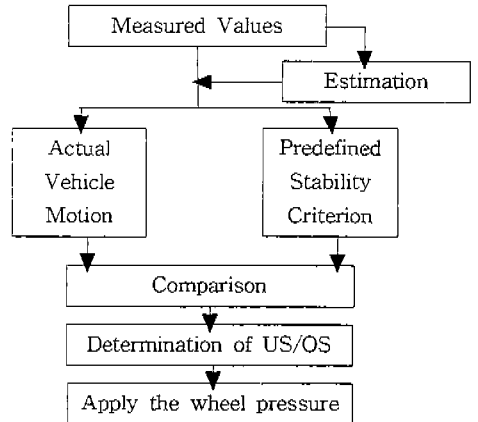


Fig. 3 Yaw Control Algorithm

노면마찰계수 변화 시에는 더욱 더 심한 오버스티어 현상이 나타날 수 있는데 여기서는 실제차량거동과 안정기준값의 차이가 규정된 값 이상의 변화율로 증가할때 전륜 바깥쪽 바퀴 이외에 전륜안쪽 바퀴도 제어 함으로써 차량 안정성을 확보하였다.

2.3 컴퓨터 시뮬레이션과 실차시험

컴퓨터 시뮬레이션은 ADAMS를 이용 하였으며 그림 4 는 시뮬레이션 구성도를 나타낸다. C-Code로 작성된 제어로직은 FORTRAN 연결프로그램을 통해 ADAMS 와 동시에 수행된다.

또한 여기서 보여주는 실차시험 결과는 스웨덴의 Arjeplog 주행시험장에서 실시한 결과이다.

2.3.1 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 모델링

차량은 전체차량모델 (Full Car Model) 을 이용하며 타이어는 UA 타이어모델 [9,10,11]을 기본으로 하고 하중이동을 고려 하기 위하여 Magic Formula [12,13,14]를 동시에 이용한다. 엔진모델은 쓰로틀 각도와 엔진토크에 관한 엔진맵으로부터 결정하였다. 급차선변경과 같은 폐회로운동 (Closed Loop Maneuver) 을 수행하기 위해서는 운전자모델이 필요하게 된다.

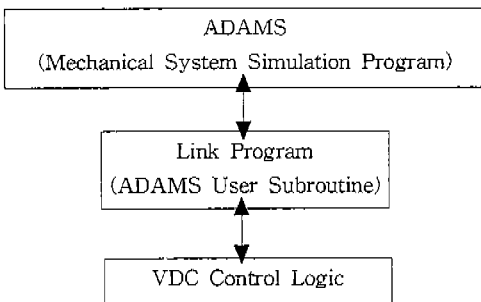


Fig. 4 Structure of Computer Simulation

운전자모델은 크게 두 가지 즉, 보상추적모델 (Compensation Tracking Model)과 예비추적모델 (Preview Tracking Model)로 나눌 수 있으며 여기서는 예비추적모델 중의 하나인 선형 예측제어모델 (Linear Predictive Control Model) 을 이용한다.

유압장치의 모델링은 여러 가지 다른 물리적 시스템간의 상호작용 때문에 상당히 복잡하며 비선형성이 매우 강하고 이를 정확히 시뮬레이션하기 위해서는 전자기장해석, 전산유체해석(Finite Element Computational Fluid Dynamics) [15] 등을 이용할 수 있으나, 여기서는 간단히 시험결과를 바탕으로 한 1차 시스템으로 단순화시켜 시뮬레이션을 실시하였다.

2.3.2 결과

그림 5 는 시뮬레이션의 검증을 위해서 연속정현과 시험결과와 비교한 것이다. VDC는 조향입력에 대한 차량의 선회응답에 특히 영향을 끼치므로 선회속도와 횡가속도를 비교 평가하였고 그림에서 보여주듯이 시뮬레이션과 실차시험결과가 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

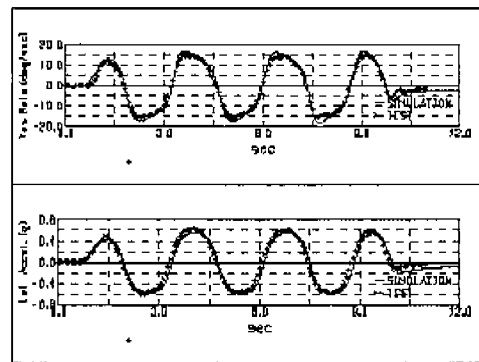


Fig. 5 Verification of Computer Simulation Using Slalom Test

그림 6 (a) ~ (d) 는 노면마찰계수 0.45의 균일한 노면상태에서 조향각의 진폭을 증가시키면서 정현파 입력을 가했을 때의 시뮬레이션 결과로써, VDC를 장착하지 않은 차량은 3번째 정현파입력에서 안정성을

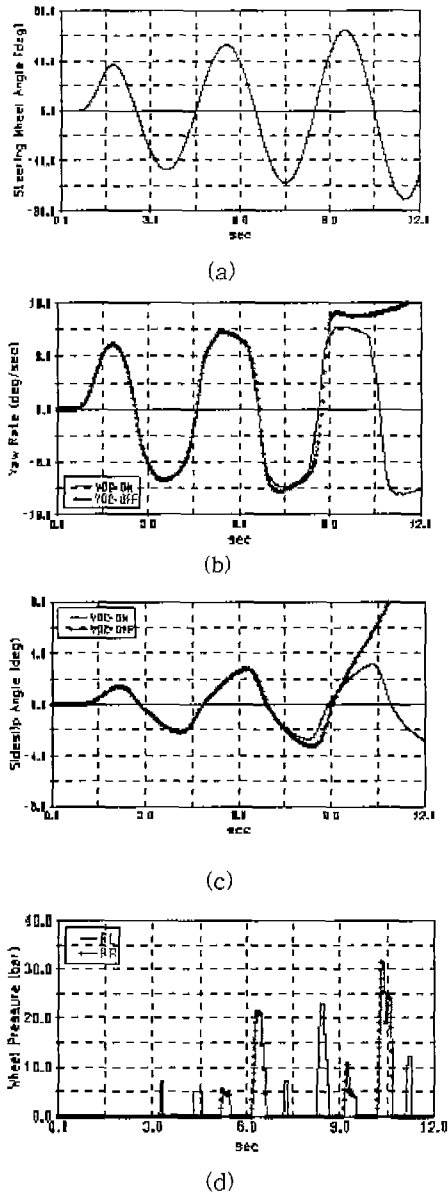


Fig. 6 Slalom Maneuver Simulation, $V=80\text{KPH}$, $\mu = 0.45$

잃어 스핀이 발생함을 보여주고 있다. 그러나 VDC를 장착한 차량은 횡미끄럼각 3도이내에서 안정하게 조향입력을 잘 따라가고 있음을 알 수 있다. 이때 오버스티어현상을 방지하기 위해서 전륜에서만 제어압력이 발생함을 보여주고 있다.

그림 7 (a) ~ (c)는 노면마찰계수 0.45의 균일한 노면상태에서 ISO3888 [16]에 따른 2회연속 급차선변경시 결과로서 VDC를 장착하지 않은 차량은 정해진 궤적을 벗어나고 있으며 (그림 7(c)) 결국에 가서는 조향력을 잃어버림을 볼 수 있다. 그러나 VDC를 장착한 차량의 경우 적절한 제동력이 발생하여 횡미끄럼각 7도 이내에서 주어진 궤적을 잘 쫓아가고 있다.

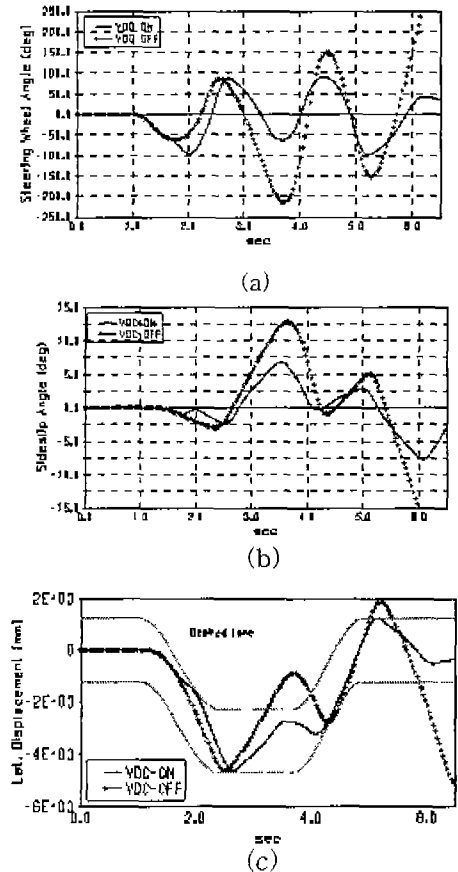


Fig. 7 Double Lane Change Maneuver Simulation, $V = 80\text{KPH}$, $\mu = 0.45$, (a) Steering Wheel Angle, (b) Sideslip angle, (c) Trajectory of Mass Center of the vehicle

그림 8 은 다져진 눈길 (노면마찰계수 약 0.35)에서의 실차시험 결과로서 계단과 조향입력을 가했을 때의 VDC가 장착된 차량과 그렇지 않은 차량을 비교한 것이다. VDC를 장착하지 않은 차량은 1.8초를 지나면서 안정성을 잃고 스펀이 발생함을 보여주고 있다. 그러나, VDC를 장착한 차량은 일정한 선회속도를 가지고 선회운동을 유지하고 있음을 알 수 있다.

그림 9 (a) ~ (b) 는 역시 눈길에서의 실차시험결과로서 폐회로운동의 대표적인 급차선 변경 시험이다. 그림 9(a)는 주어진 궤적을 쫓아가기 위한 조향각을 나타내고 있으며 VDC를 장착하지 않은 차량의 조향각은 VDC 차량의 약 2배에 해당하는 큰 값을 나타내면서 결국에는 안정성을 잃어버리고 있다. 그림 9(b)는 선회속도를 나타내고 있으며 VDC 비장착차량의 경우 변경된 차선에서는 타이어 특성에 의해 조향각입력에 대한 선회속도출력의 시간지연이 크게 나타나고 있지만 VDC는 적절한 제동력에 의해 차량을 안정적으로 차선변경하도록 한다.

그림 10 (a) ~ (b)는 가장 낮은 노면마찰 계수상태인 얼음판 (Polished Ice) 에서의 급차선 변경 시험결과로서 VDC가 장착되지 않은 차량은 과도한 조향각입력 후에 차량안정성을 잃어버리고, VDC 장착차량은 안정하게 차선을 변경함을 알 수 있다.

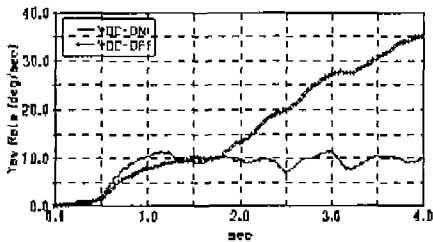


Fig. 8 Step Steering Input Test, $V = 80\text{KPH}$, $\mu \approx 0.35$

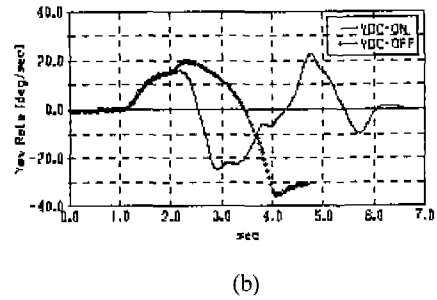
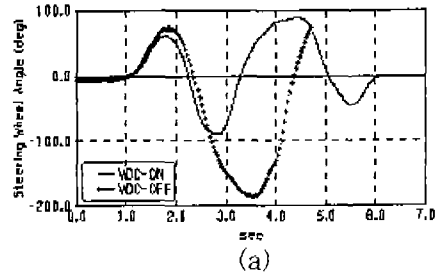


Fig. 9 Lane Change Maneuver Test, $V = 70\text{KPH}$, $\mu \approx 0.35$

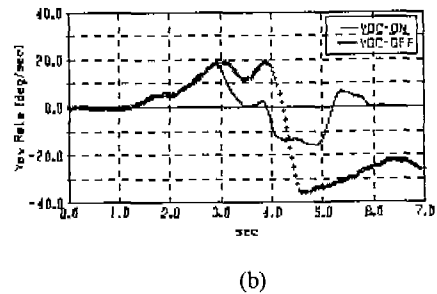
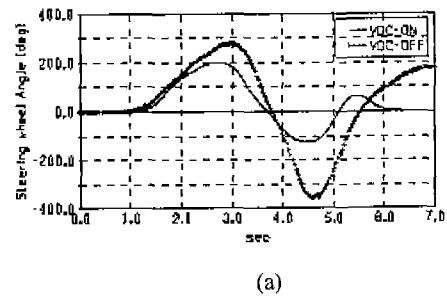
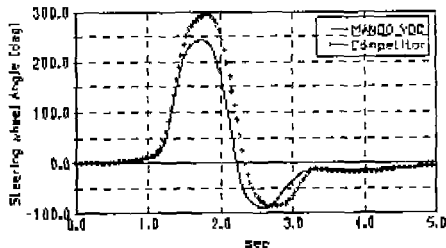
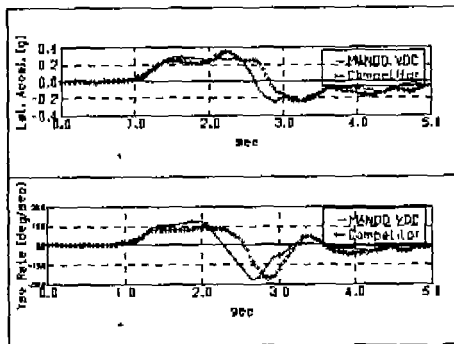


Fig. 10 Lane Change Maneuver Test, $V = 30\text{KPH}$, $\mu \approx 0.15$

참고로 이미 상품화된 외국의 경쟁사 제품과 만도 VDC를 비교한 결과를 그림 11 (a) ~ (b)에 나타내었다. 물론 이 실험결과가 제품의 전체특성을 나타낼 수는 없지만 시스템 성능의 일면을 보여준다고 할 수 있으므로 여기서는 VDC의 대표적 성능이라 할 수 있는 급차선 변경에서의 제어능력을 비교해 보았다. 그림에서 보듯이 주어진 궤적을 통과할 때 만도 VDC의 조향각이 경쟁사제품보다 작게 나타나 운전자에게 부담을 덜 주고 있으며 차체횡가속도와 선회속도는 비슷한 값을 보여주고 있다.



(a)



(b)

Fig. 11 Comparison between MANDO VDC and a competitor using lane change maneuver on a snow road surface (a) Steering wheel angle, (b) Lateral acceleration and Yaw rate outputs

3. 결론

컴퓨터 시뮬레이션과 실차시험을 통해 여러 노면조건하에서 과도한 언더/오버스티어 등과 같은 위급한 상황에서의 만도 VDC의 차량 안정성제어능력을 보여주었다. 물리적으로 가능한 범위내에서 최대의 운전안정성을 보장하며 외국의 경쟁사제품과의 비교에서도 우수한 성능을 이미 확보한 상태이다. VDC의 장착에 따라 운전자의 제동과 상관없이 타이어의 노면접착한계에서 자동적으로 브레이크를 제어함으로써 운전자가 원하는 방향, 즉 예상하는 방향으로 차가 움직여 줄 때 운전자는 더욱 더 교통 상황에 집중할 수 있게 되고 사고는 줄어들게 될 것이다. 그러나, 이러한 VDC 장점에도 불구하고 ABS에 비해 추가적으로 센서, 밸브 등이 포함되어야 함으로 가격이 상승하게 되는 부담을 안게되지만 ABS와 마찬가지로 차량안정의 중요성이 차츰 부각되면서 일반화될 것으로 보여진다.

일반적인 제어장치들이 그러하듯이 VDC의 목표성능은 주어진 차량이 도달할 수 있는 최고의 성능이므로 이미 결정된 근본적인 사시성능을 향상시킬 수는 없다. 예를 들어 오버스티어특성이 강하도록 설계된 차량은 일반도로에서 빠른 조향특성을 나타내지만 노면마찰계수가 작은 빙판길에서는 쉽게 차량안정성을 잃을수가 있다. 이때 VDC에 의해 제동압력을 제어하게 되는데 그 제어되는 유압의 크기 및 시간에는 제한이 있는 것이다. 이와같이 VDC는 기본적으로 언더스티어/오버스티어 등 차량의 사시특성과 밀접한 관계가 있으므로 시스템의 상품화개발 단계에서는 완성차업체와 공동으로 프로젝트를 수행할 필요가 있다.

향후에는 전세계적인 사시제어시스템

개발 추세에 발맞추어 VDC시스템을 중심으로 능동조향장치, 능동현가장치 등과의 통합제어를 구현함으로써 차량운동 및 안정성을 더욱 향상시킬 예정이다.

후 기

본 연구는 부분적으로 산업자원부가 시행중인 G7 차세대자동차기술개발사업의 차량안정성 제어시스템 개발 과제의 일환으로 이루어졌다.

참 고 문 헌

1. A. van Zanten, A. Krauter, Optimal Control of the Tractor-Semitrailer Truck, Vehicle System Dynamics, 7, pp. 203~231, 1978.
2. K. Koibuchi, et al. Vehicle Stability Control in Limit Cornering by Active Brake, SAE960487.
3. A. Hac, Evaluation of Two Concepts in Vehicle Stability Enhancement System, Delphi Technical Paper 98ME031, 1998.
4. G. Hee, A. van Zanten, System Approach to Vehicle Dynamic Control, SAE885107.
5. A. van Zanten, et al. VDC, The Vehicle Dynamics Control System of Bosch, SAE950759.
6. A. van Zanten, et al. Simulation for the Development of the Bosch-VDC, SAE960486.
7. B. Lammen, et al. Simulation in the Development of ASMS, SAE971059.
8. D. Hoffman, M. Rizzo, Chevrolet C5 Corvette Vehicle Dynamics Control System, SAE980233.
9. G. Gim, Vehicle Dynamic Simulation with a Comprehensive Model for Pneumatic Tires, PhD Dissertation, 1988.
10. G. Gim, et al. A Three Dimensional Tire Model for Steady-state Simulations of Vehicles, SAE931913.
11. ADAMS/Tire Manual, MDI, 1997.
12. Bakker, et al. Tyre Modelling for Use in Vehicle Dynamics Studies, SAE870432.
13. Bakker, et al. A New Tire Model with an Application in Vehicle Dynamics Studies, SAE890087.
14. D. J. Schuring, et al. The BNPS Model An Automated Implementation of the Magic Formula Concept, SAE931909.
15. J.A. Heinrichs, et al., Controlled Brake Component Development Process, SAE980238.
16. ISO 3888, 1978.