

브레이크HILS를 이용한 능동 요모멘트 제어 알고리즘의 평가

Evaluation of A Direct Yaw Moment Control Algorithm by Brake Hardware-In-the-Loop Simulation

류 제 하*, 김 호 수**
Jeha Ryu, Hosoo Kim

ABSTRACT

This paper presents a simple but effective DYC algorithm which enhances vehicle lateral stability by using an anti-lock brake system (ABS). In the proposed algorithm, only the front outer wheel is controlled during cornering maneuver instead of controlling all four wheels because the wheel has the largest role in DYC and it is easy and simple to control the only one wheel. An ABS Hardware-In-the-Loop Simulation (HILS) system that may be used to realistically test real vehicle dynamic behavior in a lab is used for evaluating the proposed DYC algorithm in severe situations where a vehicle is destabilized without DYC. The HILS results show that the proposed DYC algorithm has the potential of maintaining vehicle stability in some dangerous situations.

주요기술용어 : DYC (Direct Yaw Moment Control, 능동 요 모멘트 제어), HILS (Hardware-In-the-Loop Simulation), ABS (Antilock Brake System), Dugoff Tire Model, Slip Ratio Control (슬립율 제어)

1. 서 론

자동차 운행에 있어서 안전은 가장 중요한 요소 중의 한가지이다. 최근 들어 좌 우 바퀴의 종

* 정회원, 광주과학기술원 기전공학과

** 정회원, 광주과학기술원 기전공학과 대학원

력의 크기를 다르게 함으로써 추가적인 요모멘트를 생성하는 DYC (Direct Yaw Moment Control)나 BFDC (Brake Force Distribution Control) 와 같은 제어 알고리즘에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다.^{1,3)} 이러한 알고리즘들은 특히 큰 횡가속도나 종가속도를 갖는 극한 운전 상황에서의 횡방향 안정성을 높이기 위한 알고리즘들이다. 자동차의 횡력이 포화상태에 이르러

운전자의 추가적인 조향 입력에도 더 이상의 횡력을 생성하지 못하는 횡력 포화 영역에서도 종력은 어느 정도 더 생성할 수 있기 때문에 각 바퀴에서의 이 여분의 종력을 차등적으로 생성하는 DYC는 차량의 조향 성능을 향상시킬 수 있다. 많은 연구자들이 이 알고리즘의 성능을 시뮬레이션이나^{1~3)} 실차 시험으로^{4~8)} 보여주고 있다.

많은 자동차 회사들이 실차 시험을 이용하여 위에서 언급한 제어 알고리즘을 기반으로 한 능동 안전 차량을 개발 중이다. 그러나 오늘날처럼 극심한 경쟁 관계에 있는 자동차 산업에서는 DYC 시스템과 같은 차량 메카트로닉스 제품들의 개발 기간 단축에 많은 관심을 기울이고 있다. 이런 메카트로닉스 제품들의 성능, 안정성, 신뢰성들을 보장하기 위해서는 각 부품들의 실험실 단위의 실험이나 시험 차량에 탑재 후 실차 시험까지 많은 반복된 시험이 필요하다. 통례적으로 이러한 시험들은 원형(prototype)의 부품이나 차량을 가지고 이루어지고 있는데 이 개발 방법에는 많은 시간이 소요될 뿐 아니라 이렇게 개발된 부품이 차량 개발 마지막 단계인 시험도로에서의 실차 시험에서 문제를 일으킬 수도 있는데 이것은 부품단위에서의 충분한 반복시험이 이루어지지 않았을 수도 있고 차량 동력학의 복잡한 동적 특성을 부품단위 시험에서는 충분히 고려되지 못했기 때문이다.

위에서 언급한 차량 메카트로닉스 제품들의 개발에 있어서의 여러 문제점과 어려운 점들을 극복하기 위하여 HILS(Hardware-in-the-Loop Simulation)와 같은 새로운 방법이 모색되고 있다.^{9,10)} 이 방법은 실시간으로 차량 동력학을 시뮬레이션 할 수 있도록 DSP(Digital Signal Processor)와 같은 매우 빠른 연산 처리 요소를 이용하고 있으며 실시간 시뮬레이션의 출력은 시험 중의 ECU나 ABS와 같은 실제 하드웨어 부품들과 연결되어 있다. 이 새로운 개발 환경 하에서는 실차 시험에서는 쉽게 수행하기 어려운 여러 극한 상황이나 운전자를 포함한 차량 모델 하에서 많은 제품들의 반복적이 시험이 가능하므로

차량 개발 시간이나 비용들을 대폭 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

본 논문에서는 브레이크 HILS를 이용하여 능동 요모멘트 제어의 성능을 평가하는데 그 목적을 두고 있다. 선회와 제동이 함께 이루어지고 있는 상황에서 요(Yaw) 운동을 가장 쉽고 효과적으로 제어할 수 있는 앞 외곽 한 바퀴만을 제어하는 DYC 알고리즘을 제안하였으며 이 알고리즘의 평가를 위해 상용의 ABS를 갖춘 브레이크 HILS 시스템을 이용하였다. 비록 본 연구에서 사용된 HILS 시스템의 ABS가 DYC 시스템에 맞도록 개발된 것은 아니었지만 이것을 이용하여서도 제안된 제어 알고리즘의 성능을 평가할 수 있었다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어있다. 제 2 장에서는 제안된 DYC 알고리즘에 대하여 설명하고 제 3 장에서는 브레이크 HILS 시스템에 대하여 간략하게 기술하며 제 4 장에서는 제안된 DYC 알고리즘의 HILS 시험 결과를 보여주고 있으며 제 5 장에서는 연구 결론을 정리하였다.

2. 능동요모멘트 제어 알고리즘

제동과 선회가 동시에 일어날 경우는 종력과 횡력이 모두 슬립율과 슬립각의 함수가 된다. 또한 종력과 횡력은 friction ellipse 개념에 의해 서로 연성되어 있다. 그래서 다른 변수들은 고정되어 있어도 만약 슬립율이 변한다면 차량에 작용하는 요모멘트는 friction ellipse 관계에 의하여 변하게 된다. 조향각이 고정된 상태에서 앞 외곽 바퀴의 슬립율 변화에 의한 요모멘트 변화는 다음 식 (1)과 같다.

$$\Delta N = \Delta F_y \left(\cos(\delta) a_f - \sin(\delta) \frac{L}{2} \right) - \Delta F_x \left(\cos(\delta) \frac{L}{2} + \sin(\delta) a_f \right) \quad (1)$$

여기서 ΔF_x 와 ΔF_y 는 각각 종력과 횡력 변화량을 나타낸다. δ_f 는 앞바퀴의 조향각을 나

타내며 a_r 는 차량 무게 중심으로부터 앞 차축까지의 거리를 나타내고 t_r 는 앞 좌우 바퀴 사이의 폭을 나타낸다.

Fig. 1은 각 바퀴에서의 슬립율이 0일때의 요모멘트로부터 다른 슬립율 값을 가질 때의 요모멘트 변화량을 보여주고 있다.

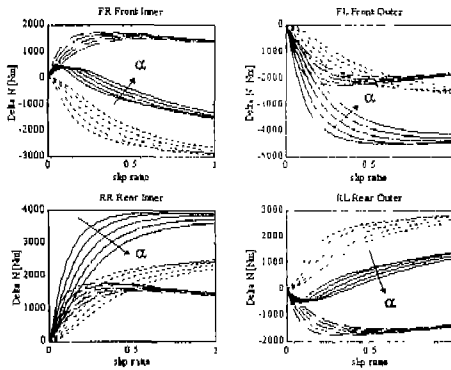


Fig. 1 Yaw Moment Variation at Each Wheel

이 그림들은 Dugoff 타이어 모델¹²⁾을 이용하여 그려졌으며 점선은 횡력 변화에 의한 요모멘트 변화량을 나타내고 일점쇄선은 제동력 변화에 의한 요모멘트 변화량을, 그리고 실선은 전체 변화량을 나타내고 있다. 앞 외곽 바퀴에서 가장 큰 요모멘트 변화량(음수: 안정화시키는 요모멘트)을 볼 수 있으며 Roll 운동과 Pitch 운동으로 인한 하중 이동을 고려한다면 앞 외곽 바퀴에서 받는 수직 하중이 가장 커지게 되므로 더욱 큰 요모멘트를 생성하게 되기 때문에 이 바퀴의 슬립율을 제어함으로써 가장 효과적인 요모멘트를 생성할 수 있다. 앞 안쪽 바퀴의 경우 작은 슬립율 범위에서는 불안정화 요모멘트를, 큰 슬립율 범위에서는 안정화 요모멘트를 생성하지만 그 크기는 앞 외곽 바퀴에 비하면 25%정도에 불과하다. 뒤 외곽 바퀴의 경우는 앞 안쪽 바퀴의 경우와 반대의 경향을 보인다. 따라서 이러한 바퀴들도 슬립율에 따라 적절히 제어함으로써

조금 더 큰 요모멘트 생성이 가능할 수도 있지만 각 바퀴 사이의 연성으로 제어 성능의 큰 향상 없이 전체 제어 시스템을 복잡하게 할 지도 모른다.^{7),8)} 이러한 이유로 본 논문에서는 선회와 제동이 함께 이루어지는 동안 안정화시키는 요모멘트를 발생시키기 위하여 앞 외곽 바퀴만을 제어한다.

필요한 요모멘트는 여러 가지 방법^{1,3,7,9)}에 의해 계산될 수 있는데 이 논문에서는 귀환 루프를 통한 목표 요율 (Yawrate)을 추종하는 방법과 차량의 횡방향 미끄러짐 각(side slip angle)을 0으로 만드는 제어 방법을 비교 검토하였다. 목표 요율은 2자유도 차량 모델에서 조향각 입력에 따른 정상상태의 요율을 가지고 정의되는 것이 일반적이다. 본 논문에서는 횡방향 미끄러짐 각은 여러 예측(estimation) 방법에 의해서 그 값을 얻을 수 있다고 가정하였고 요율 오차와 횡방향 미끄러짐 각 오차를 줄이기 위한 간단한 비례미분 (PD) 제어가 설계되었다. 마지막으로 필요한 요모멘트와 이것에 상당하는 슬립율과의 관계식은 Dugoff 타이어 모델을 이용하고 조향각과 휠 슬립각이 작다는 가정 하에서 다음과 같은 관계식으로부터 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta N &= \frac{\partial F_y}{\partial \lambda} \Delta \lambda \left(\cos(\delta_f) a_f - \sin(\delta_f) \frac{t_f}{2} \right) \\ &\quad - \frac{\partial F_x}{\partial \lambda} \Delta \lambda \left(\cos(\delta_f) \frac{t_f}{2} - \sin(\delta_f) a_f \right) \quad (2) \\ &= k_1 \Delta \lambda \end{aligned}$$

여기서

$$\begin{aligned} k_1(\lambda, \mu, W, V, \alpha, \delta_f) & \quad (3) \\ &= f(s) \left\{ - \frac{C_{\alpha f}}{(1-\lambda)^2} \left(a_f - \frac{t_f}{2} \delta_f \right) + \frac{C_{\lambda f}}{(1-\lambda)^2} \left(a_f \delta_f + \frac{t_f}{2} \right) \right\} \\ &\quad + \frac{\partial f(s)}{\partial \lambda} \left\{ \frac{C_{\alpha f}}{(1-\lambda)} \left(a_f - \frac{t_f}{2} \delta_f \right) + \frac{C_{\lambda f}}{(1-\lambda)} \left(a_f \delta_f + \frac{t_f}{2} \right) \right\} \end{aligned}$$

$$f(s) = \begin{cases} s(2-s) & \text{for } s < 1 \\ 1 & \text{for } s > 1 \end{cases} \quad (4)$$

$$s = \frac{\mu W(1 - \epsilon V \sqrt{\lambda^2 + \tan^2 \alpha (1 - \lambda)})}{2\sqrt{C_s^2 \lambda^2 + C_a^2 \tan^2 \alpha}} \quad (5)$$

여기서 C_s , C_a 는 각각 종방향, 횡방향 타이어 stiffness를 나타낸다. k_1 을 얻기 위해 필요한 마찰계수(μ), 차량 속도(V), 슬립율(λ), 휠 하중(W) 그리고 휠 슬립각이 앞 외곽 바퀴에서 여러 예측 알고리즘들에 의해 계산되거나 예측될 수 있다고 가정하였다. 이렇게 얻어진 슬립율 변화는 ABS 장착 차량의 목표 슬립율에 더해진다. Fig. 2는 제안된 DYC 알고리즘의 전체적인 흐름도를 보여주고 있다.

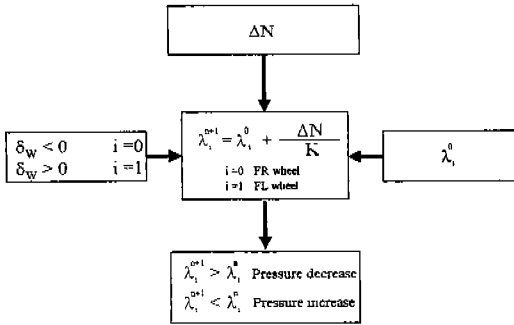


Fig. 2 Slip Ratio Regulation by Solenoid Valve

3. 브레이크 HILS 시스템

Fig. 3은 개략적으로 브레이크 HILS 시스템을 보여주고 있다. 이 HILS 시스템은 상용 ABS과 DSP, ABS와 DSP 사이의 인터페이스로 구성되어 있다. ABS는 마스터 실린더와 sol-flow 타입의 유압 장치부와 압력센서를 부착한 판 타입의 휠 어셈블리로 구성되어 있는데 상용 ABS의 ECU는 DSP 안의 제어 알고리즘으로 대체되었으며 압력센서는 제어 시에 사용하는 것은 아니고 브레이크 토크의 예측을 위한 모니터링에만

이용되고 있다.

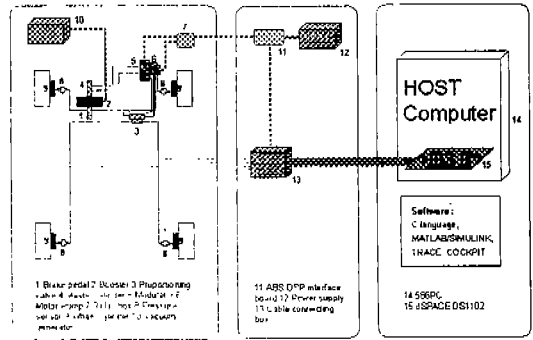


Fig.3 Schematic Diagram of A Brake HILS System

DSP 보드에서는 차량동역학 모델과 제어 로직이 시뮬레이션 되고 하드웨어적으로는 각 휠에 작용하는 브레이크 압력이 압력센서와 A/D 변환기를 통해 귀환되어 HILS 시스템이 구성된다. 비선형 타이어 모델을 위해서 Dugoff 타이어 모델을 사용하였다. 실험의 편의성을 위해 COCKPIT과 TRACE 프로그램을 이용하여 cockpit환경을 구성하였다.¹¹⁾ DSP 보드의 디지털 I/O를 통해서 솔레노이드 밸브와 모터펌프를 구동하기 위하여 ABS와 DSP 보드 사이에 인터페이스 보드를 만들었다. 본 HILS 시스템에서는 차량 동역학의 실시간 시뮬레이션에 걸리는 시간 및 D/A, A/D에 소요되는 시간을 고려하여 Master sampling time으로 2.5msec(400Hz)을 사용하였다. 17자유도 차량 동역학 모델은 집중 매개변수 접근 방법에 기초하여 개발되었으며 아담스-베쉬폴드 3차 (Adams-Bashforth 3rd order) 수치적분 방법을 이용하여 적분하였다. 구성된 ABS HILS 시스템은 이미 기존 실험 결과와 비교, 분석, 검증 되었으므로 평가도구로 활용하기에 충분하다.¹⁰⁾

4. HILS 평가 결과

제안된 DYC 알고리즘은 다음과 같은 방법으로 평가되었다. 저마찰 계수($\mu=0.3$)를 갖는 노면에서 초기 속도가 90km/h인 차량이 차선 변경을 할 수 있도록 Fig. 4와 같이 90° 사인파의 조향각을 입력으로 주었는데 이것은 위급 사태의 차선 변경 충돌 회피를 하려는 초보 운전자의 거동에 상응한다. 브레이크 페달은 시뮬레이션 시작 후 운전자에 의해 1초 후에 밟게 하였으며 Fig. 4의 조향각 입력은 브레이크 페달을 밟은 후 1.2초 후에 차량 모델에 주게 하였다. Fig. 5부터 Fig. 12는 HILS 시험 결과를 보여주고 있다. 이 그림들에서 점선은 ABS 제어만 있는 경우를 나타내고 실선은 ABS와 함께 목표 요율을 추종하게 하는 DYC가 적용된 경우를 보여주며 일점 쇄선은 ABS와 함께 차량 횡방향 미끄러짐 각을 0으로 만드는 DYC가 적용된 경우를 나타낸다. ABS의 목표 슬립율은 차선 변경에 의한 안전한 장애물 회피를 위해 0.03으로 설정하였다. Fig. 5에서 세 가지 경우에 대하여 차량 감속이 거의 같음을 볼 수 있다. Fig. 6의 차량 궤적을 보면 ABS 작용에 의해서만은 안전한 차선 변경을 보장하지 못하는데 비하여 제안된 DYC 알고리즘들이 적용된 차량에서는 안전한 차선 변경을 볼 수 있다. 이것은 차선 변경의 2단계에서 조향각 입력만으로는 차선 변경을 마무리 짓는데 필요한 충분한 요모멘트를 생성하지 못하기 때문이다. 반면에 ABS-DYC (Fig. 7부터 Fig. 12)에서 볼 수 있는 바와 같이 목표 요모멘트를 만들기 위한 앞 외곽 바퀴의 슬립을 제어해 통해서 필요한 요모멘트를 생성할 수 있다. 차량 횡방향 미끄러짐 각을 0으로 만드는 귀환 제어가 목표 요율 제어에 비해서 목표 요율 (가는 점선 : in Fig. 11)도 더 잘 추종하며 Fig. 12에서 볼 수 있듯이 더 적은 요 모멘트를 필요로 하기 때문에 목표 요율 추종 DYC 알고리즘에 비해 더 좋은 성능을 보여주고 있음을 알 수 있다.

제안된 제어 알고리즘의 성능은 식(2)에 기술된 바와 같이 요모멘트 변화와 슬립을 변화와의 관계식과 매우 밀접한 관계를 갖고 있다. 그래서 마찰계수나 수직 하중, 슬립율, 미끄러짐 각 등의 변수들의 변화나 불확실성(uncertainty)에 의한 k_1 값의 변화에 따른 제어기의 강인성을 시험해 보았다. Fig. 13부터 Fig. 15는 제안된 알고리즘이 k_1 값 변화 (점선-0.5 k_1 , 실선-정상 k_1 , 일점 쇄선-1.5 k_1)에 민감하지 않음을 보여주고 있다. 이것은 제안된 DYC 알고리즘은 앞서 언급한 변수 변화나 불확실성(uncertainty)에 대해서 좋은 강인성을 보여주고 있음을 나타낸다.

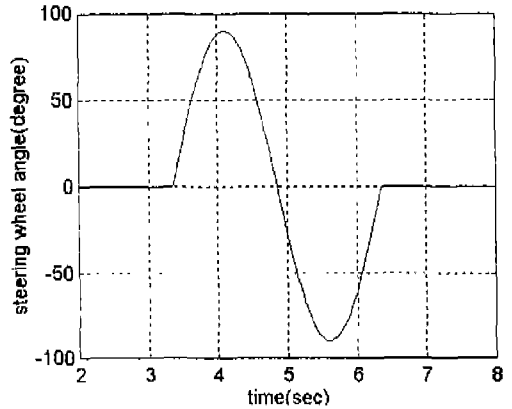


Fig. 4 Steering angle

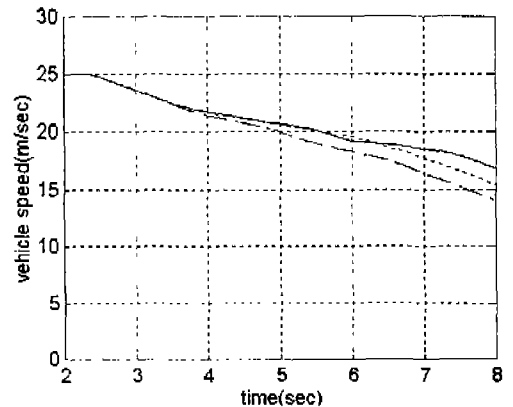


Fig. 5 Vehicle Velocity

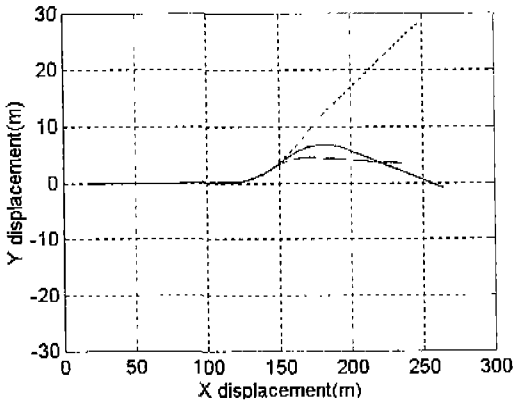


Fig. 6 Vehicle Trajectory

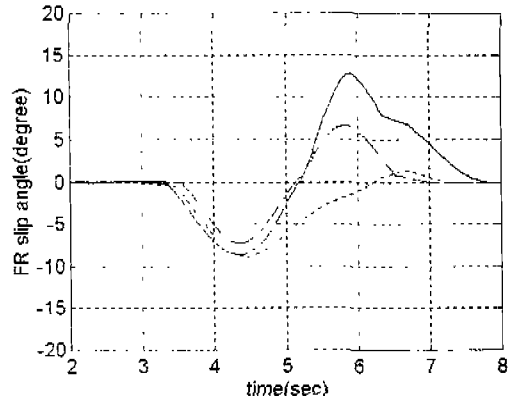


Fig. 9 FR Wheel Slip angle

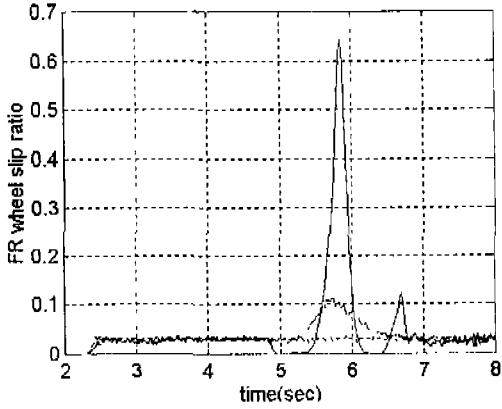


Fig. 7 FR Wheel Slip ratio

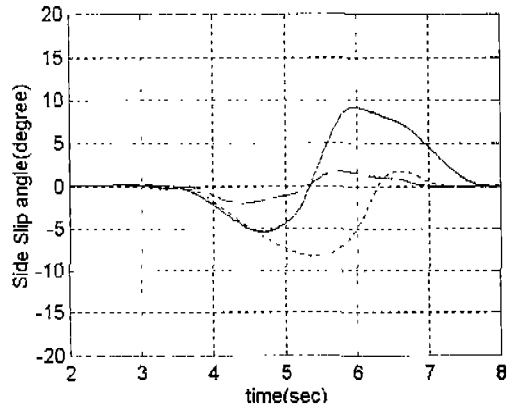


Fig. 10 Side Slip angle

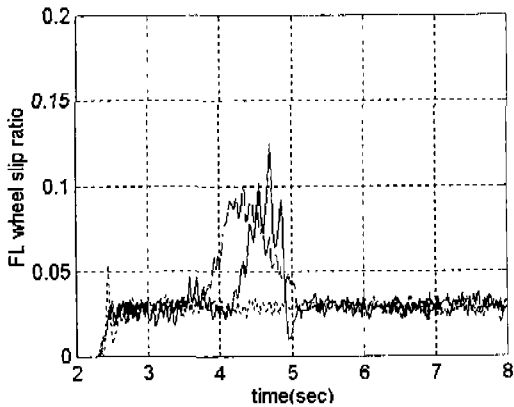


Fig. 8 FL Wheel Slip ratio

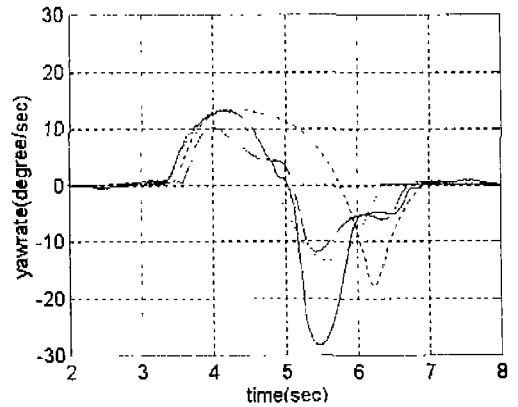


Fig. 11 Yawrate

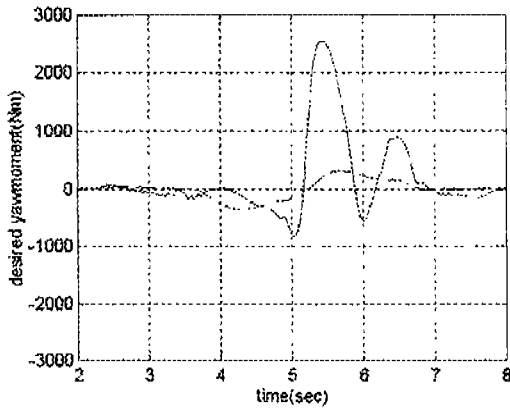


Fig. 12 Desired Yawmoment

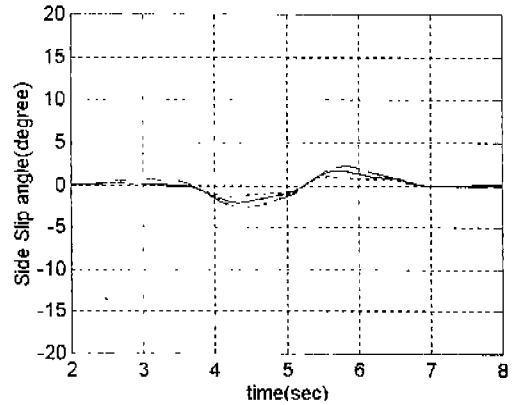


Fig. 15 Side Slip angle for variation K

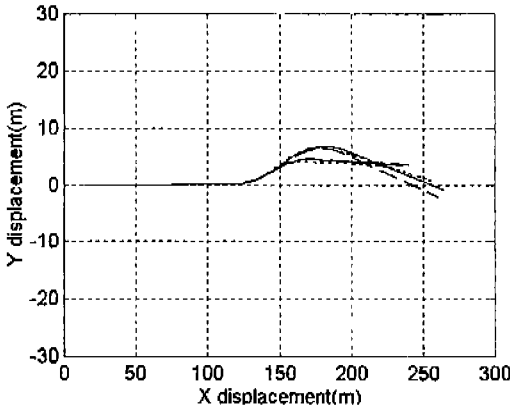


Fig. 13 Vehicle Trajectory for variation K

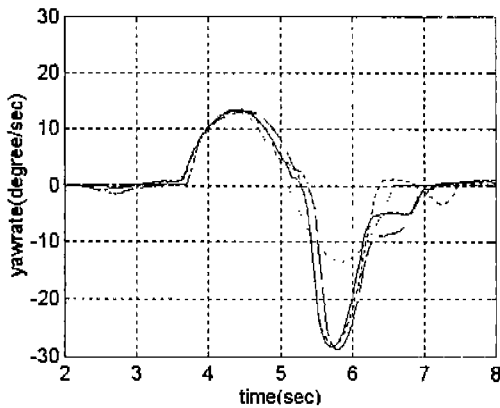


Fig. 14 Yawrate for variation K

5. 결론

본 논문은 선회 및 제동 시 앞 외곽 한 바퀴만을 제어하는 간단하면서도 효과적인 DYC 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘의 성능은 상용의 ABS을 이용하여 구성된 브레이크 HILS 시스템으로 검증되었다. 구성된 브레이크 HILS 시스템의 ABS가 제안된 DYC 시스템 용으로 개발된 것은 아니지만 제안된 DYC 알고리즘을 잘 수행하는 것을 볼 수 있었다.

참 고 문 헌

1. M. Abe, et. al., A Direct Yaw Moment Control for Improving Limit Performance of Vehicle Handling -Comparison and Cooperation with 4WS, Vehicle System Dynamics, Vol. 25, pp. 3-23, 1996.
2. M. Nagai, S. Yamanaka. Integrated Control Law of Active Rear Wheel Steering and Direct Yaw Moment Control, AVEC'96, pp.451-470, 1996.
3. Shinji Matsumoto, et. al., Improvement of Vehicle Dynamics Through Braking Force Distribution Control, SAE 920645, 1992.
4. A. T. van Zanten, et. al., VDC, The

- Vehicle Dynamics Control System of Bosch, SAE 950759, 1995.
5. Alfred Straub, "DSC(Dynamic Stability Control) in BMW 7 Series Cars", AVEC'96, pp.547-557, 1996.
 6. B. Lammen et. al., Simulation in the Development of ASMS, SAE 971059, 1997.
 7. Yoshiyuki Yasui, Kenji Tozu, Noriaki Hattori and Masakazu Sugisawa, "Improvement of Vehicle Directional Stability for Transient Steering Maneuvers Using Active Brake Control", SAE 960485, 1996
 8. Ken Koibuchi, Masaki Yamamoto, Yoshiki Fukada and Shoji Inagaki, "Vehicle Stability Control in Limit Cornering by Active Brake", SAE 960487, 1996.
 9. Hanselmann, H., Hardware-in-the-Loop Simulation as a Standard Approach for Development, Customization, and Production Test, SAE paper 930207, 1993.
 10. Lee, J. and Ryu, J., Development of a HILS System for Vehicle Active Brake Control, Proc. of KSAE paper #97380373, fall, pp. 1103-1108, 1997.
 11. dSPACE manuals, Digital Signal Processing and Control Engineering GmbH, 1996.
 12. Howard Dugoff, P.S. Fancher, and Leonard Segel, An Analysis of Tire Traction Properties and Their Influence on Vehicle Dynamic Performance, SAE700377.