
요우모멘트를 통한 주행안정성 향상 제어 알고리즘에 관한 연구

박중현* · 김순호*

A Study on Improving Driving Stability System by Yaw Moment Control

Jung-hyen Park* · Soon-ho Kim*

요 약

본 논문에서는 ESP와 4WS차량의 동적성능에 관한 연구와 차량이 불안정 영역으로의 주행 시 안정영역으로의 거동으로 할 수 있게 하는 차량의 주행안정성 향상에 관한 연구를 수행하였다. 고속으로 주행하는 차량이 조향과 동시에 가·감속을 하는 경우 관련된 변수로는 종방향 및 횡방향의 속도변화, 요우잉 등을 들 수 있으며, 이 변수들은 타이어 특성, 차량의 중량, 제동력, 조향각등에 따른 동역학적 관계식들로 표현 할 수 있다.

본 연구는 위와 같은 제동·조향장치들을 제어하여, 차량의 주행 중 위급상황 시 탁월한 성능을 발휘 할 수 있는 시스템에 관하여 고찰하고, 주행시 안정성향상을 위한 제어시스템 알고리즘개발을 통하여 운전상황을 안전하게 하기 위함이다.

ABSTRACT

This paper proposed yaw moment control scheme using braking and active rear wheel steering for improving driving stability especially in high speed driving. Its characteristics the unified chassis control system of two equipment that 4WS(4 Wheel Steering) and ESP(Electronic Stability Program). In this study the performance of the vehicle was compared each equipment. And conventional ABS and TCS can only possible to control the longitudinal movement of braking equipment and drive which can only available to control of longitudinal direction. There after new braking system ESP was developed, which controls both of longitudinal and lateral, with adding of the function of controlling Active Yaw Moment. On this paper, we show about not only designing of improved braking and steering system through establishing of the integrated control system design of 4WS and ESP but also designing of the system contribute to precautions for advanced vehicle stability problem.

키워드

ESP(차량주행안정성제어장치), 4WS(4륜조향장치), 요우각속도, 횡미끄러짐

I. 서 론

차량의 운동은 일반적으로 제동(Braking), 조향(Steering), 안정성(Stability)의 3가지로 구분 할 수 있다. 이를 위한 장

치로는 ABS, TCS, ESP, 4WS, 4WD 등 많은 첨단장치들이 연구 개발되고 있다. 이러한 장치들은 기계·유압 장치들과 각종 센서들로 구성 되어진다¹⁾.

4WS는 기존의 2WS와 달리 차량의 4륜 모두가 조향되

는 장치를 말하는데 주행 중 차량의 요우각속도(yaw rate)를 감지 및 제어하여 요우모멘트(yaw moment)를 줄여 차량이 고속운동 시 주행안정성을 높일 수 있는 조향장치의 첨단기술이다. 요우각속도 및 횡력 센서에서 요우각속도 및 횡력을 감지해 후륜의 능동적인 조향으로 차량은 안정된 거동을 할 수 있게 된다. ABS, TCS가 차량의 종방향 운동만을 제어 했다고 하면, ESP는 차량의 횡방향 운동까지 제어할 수 있는 주행 및 제동안정성을 향상시킬 수 있는 첨단장치이다. 과도한 조향입력이나 슬립이 일어나 차량의 요우잉이 심해져서 차량의 운동이 불안정해지면, 각 휠에 독립된 제동력으로 요우모멘트를 제어하여 안정된 주행을 도와준다²⁾.

본 논문에서는 4WS와 ESP장착차량의 동적 성능에 관한 연구와 차량이 불안정영역으로의 주행 시 안정영역으로의 거동으로 할 수 있게 하는 차량의 주행안정성 향상에 관한 연구를 수행하였다. 고속으로 주행하는 차량이 조향과 동시에 가·감속을 하는 경우 관련된 변수로는 종방향 및 횡방향의 속도변화, 요우잉 등을 들 수 있으며, 이 변수들은 타이어특성, 차량의 중량, 제동력, 조향각등에 따른 동역학적 관계식들로 표현 할 수 있다.

본 연구는 위와 같은 제동·조향장치들을 제어하여 차량의 고속선회 시 탁월한 성능을 발휘 할 수 있는 시스템에 관하여 고찰하고, 위급상황을 안전하게 회피하여 교통사고를 획기적으로 줄이기 위함이다.

II. 차량 동역학모델

차량의 동특성을 해석하기 위해 7자유도 차량모델을 수립하였다. 본 연구에서 구성한 차량의 수학적 모델을 Fig. 1을 통해 나타내었다.

차량의 종방향, 횡방향, 요우잉방향 관련식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 m(\dot{u} - v\dot{\psi}) &= (f_{x_1} + f_{x_2} - \frac{R}{2})\cos\delta_f \\
 &+ (f_{x_3} + f_{x_4} - \frac{R}{2})\cos\delta_r \\
 &- (f_{y_1} + f_{y_2})\sin\delta_f - (f_{y_3} + f_{y_4})\sin\delta_r \\
 &- D\cos\beta
 \end{aligned}$$

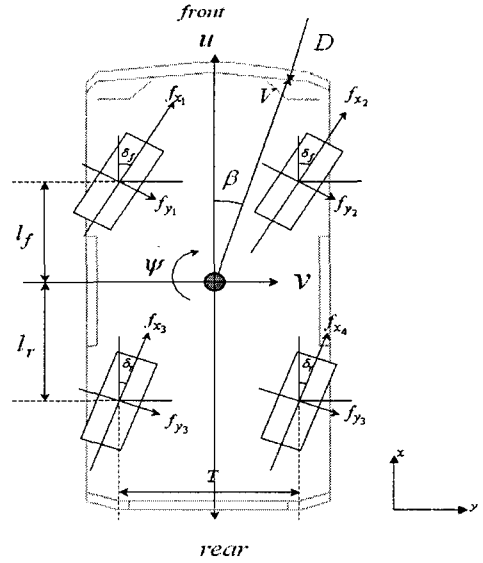


그림 1. 차량모델
Fig. 1. Vehicle model

$$\begin{aligned}
 m(\dot{v} + u\dot{\psi}) &= (f_{x_1} + f_{x_2} - \frac{R}{2})\sin\delta_f \\
 &+ (f_{x_3} + f_{x_4} - \frac{R}{2})\sin\delta_r \\
 &+ (f_{y_1} + f_{y_2})\cos\delta_f + (f_{y_3} + f_{y_4})\cos\delta_r \\
 &- D\sin\beta \\
 I_z\ddot{\psi} &= l_f(f_{x_1} + f_{x_2} - \frac{R}{2})\sin\delta_f + l_f(f_{y_1} + f_{y_2})\cos\delta_f \\
 &+ \frac{T}{2}(f_{x_1} - f_{x_2})\cos\delta_f - \frac{T}{2}(f_{y_1} - f_{y_2})\sin\delta_f \\
 &- l_r(f_{x_3} + f_{x_4} - \frac{R}{2})\sin\delta_r - l_r(f_{y_3} + f_{y_4})\cos\delta_r \\
 &+ \frac{T}{2}(f_{x_3} - f_{x_4})\cos\delta_r - \frac{T}{2}(f_{y_3} - f_{y_4})\sin\delta_r
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서, $u, v, \dot{\psi}$ 는 각각 종방향, 횡방향, 요우잉방향 속도이며 그리고 β 는 횡미끄럼각을 나타낸다. m 은 차량의 질량이고, $l_f \cdot l_r$ 은 차량 무게중심에서 전축과 후축사이의 거리이며, T 는 차량의 윤거이다. 아래첨자 1, 2, 3, 4는 각각 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측을 뜻하며, 아래 첨자 x, y 는 x 방향, y 방향 즉, 차량의 종방향과

횡방향을 뜻한다. δ_f, δ_r 은 전·후륜 조향각으로 본 연구에서는 좌측과 우측에 동일한 조향입력을 가하였다. f_x 는 타이어에 발생하는 구동력과 제동력을 포함하는 힘이고, f_y 는 타이어의 미끄럼각과 비례하는 힘을 발생시키는 단순한 타이어모델이다. R_i 는 각 타이어에 발생하는 구름 저항력으로 그 크기는 모두 같고 합은 R 이라 가정한다. D 는 공기저항으로 식(2)와 같이 나타낸다.

$$D = \frac{1}{2} \rho C_d A V^2 \quad (2)$$

여기서, ρ 는 공기밀도, C_d 는 공기저항계수, A 는 투영면적, V 는 차량속도이다. 그리고 I_z 는 z축 주위의 Moment of Inertia이다.

타이어는 차량의 비선형을 증가시키는 중요한 인자들 중 하나이며 타이어에서 발생한 힘이 차체의 운동을 발생시킴으로써 차량의 주행을 예측할 수 있다. 특히 슬립률 변화에 따른 타이어와 노면사이의 마찰계수가 다르기 때문에 본 연구에서는 타이어의 힘을 슬립률과 슬립각으로 표현하는 H. Dugoff에 의해 제안된 모델을 이용하였다.

III. 4WS-ESP 협조제어 시스템 설계

차량의 거동을 안정적으로 제어하기 위한 제어변수 값으로 요우각속도와 횡미끄럼각을 설정하여 차량의 궤도 이탈을 방지할 수 있는 제어 시스템을 설계하였다.

본 연구에서는 4WS-VDC협조제어 시스템의 구현을 위한 물리적 개념을 제시하고, 향후 유사한 VDC시스템 연구의 토대를 마련한, A.V. Zanten과 R.Erhardt의 연구내용과 전륜 조향각에 비례하는 후륜 조향각을 설정하는 방식을 바탕으로 제어시스템을 설계하였다. 즉, 운전자의 의지를 판단하는 차량 입력값으로부터 운전자가 원하는 차량거동을 파악하고 이를 차량운동으로 구현하기 위해 차량의 요우각속도와 횡미끄럼각을 제어변수로 설정하였다.

4WS-ESP협조제어모델은 두 가지 제어블록으로 구성된다. 첫번째 제어 블록에서는 제어 알고리즘에 따라 목표요우각속도를 설정하고 이 값을 실제요우각속도와 비

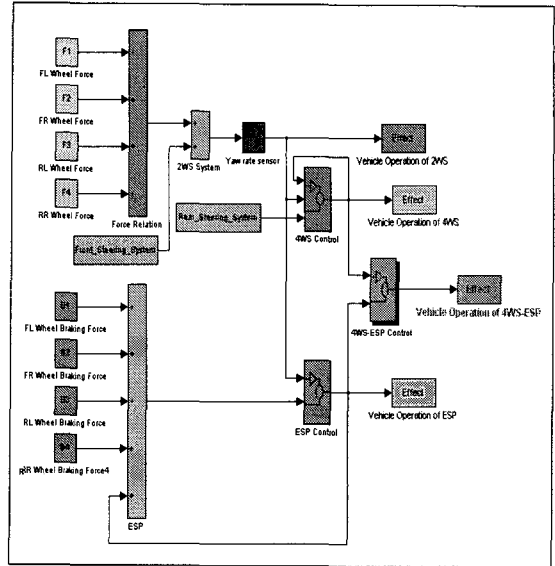


그림 2. 제어시스템
Fig. 2. Control system

교하여 목표요우각속도를 추종하기 위해 요구되는 요우모멘트를 결정한다. 다음으로 구해진 요우모멘트 값에 따라 슬립각과 슬립률 변화량의 관계식으로 표현되는 타이어 종·횡방향 변화량을 이용해 요우슬립률 변화량을 구하게 되며 이 값을 초기 슬립률에 더함으로써 목표 슬립률을 구할 수 있다.

두번째 제어블록에서는 위에서 결정된 목표 슬립률 값과 실제 차량의 슬립률 값과의 차이에 따라 브레이크압력의 증·감압 및 후륜 조향각의 크기를 변화시켜 차량의 슬립률을 제어하게 되며 최종적으로 차량의 변화된 슬립률 값에 따라 차량의 거동이 목표값을 추종하도록 하였다.

이러한 제어 알고리즘을 근거로 하여 시뮬레이션을 수행하였다. 4WS는 전·후륜의 동위상 조향만 하게 하였고, 시간에 따른 조향입력을 다르게 하여 차선변경과 제동중 선회상황을 설정하여 각 상황에서 2WS, 4WS, ESP, 4WS-ESP협조제어 시스템의 차량계적, 요우각속도, 횡미끄럼각을 비교분석하였다.

차량이 고속에서 차선변경시의 동특성을 비교하였다. 차선변경 시에는 국내일반 고속도로의 폭(3.6m)을 기준으로 실험하였다.

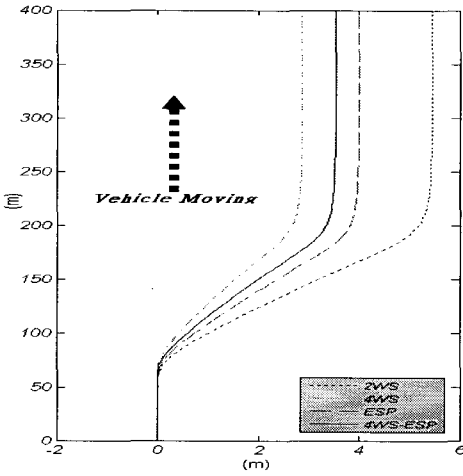


그림 3. 차량궤적(차선변경)
Fig. 3. Vehicle path (Lane change)

Fig. 3의 차량궤적을 보면, 고속에서 2WS차량은 스피너아웃을 일으켜 궤도를 이탈하는 것을 알 수 있고, 4WS-ESP장착차량은 후륜 조향각과 제동력을 조절하여 궤도이탈을 방지 할 수 있으나, 4WS차량은 언더스티어 현상, VDC차량은 고속운동에서의 속도만큼의 큰 제동력이 요구되기 때문에 오히려 위험한 상황을 연출 할 수 있고 운전자에게 위화감을 조성시킬 수 있으며, 정확한 궤도를 추종하고 있지 않는다는 것을 알 수 있다.

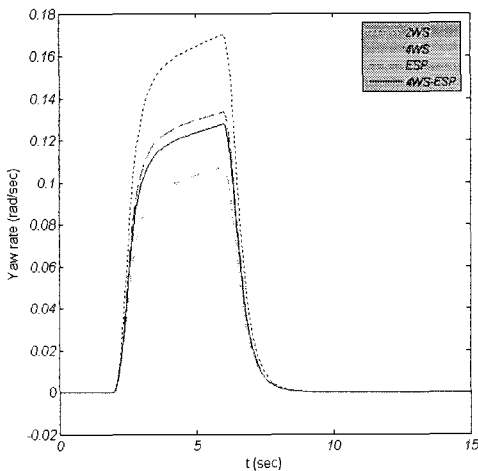


그림 4. 요우각속도(차선변경)
Fig. 4. Yaw rate (Lane change)

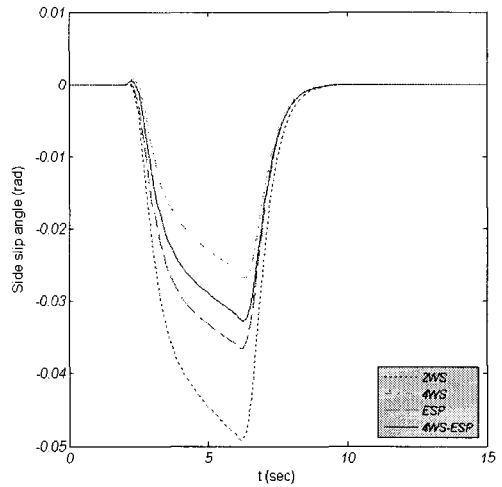


그림 5. 횡 미끄럼각(차선변경)
Fig. 5. Side slip angle (Lane change)

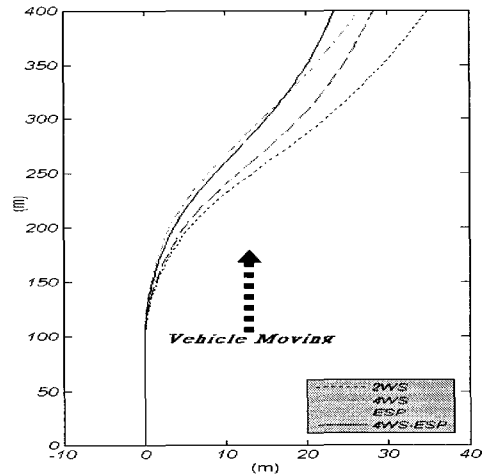


그림 6. 차량궤적(제동중 선회)
Fig. 6. Vehicle path (J-turn)

그림 6의 차량 궤적을 보면, 고속에서 제동중 선회시에 2WS 차량과 ESP차량은 스피너아웃을 일으켜 궤도를 이탈 하는 것을 알 수 있다. 4WS장착 차량은 4WS-ESP 장착 차량과 비슷한 경로로 운동하는 것을 알 수 있지만 속도가 점점 증가 할수록 회전반경이 커지는 현상 즉, 언더스티어 현상이 발생하여 시간이 지날수록 궤도를 점점 벗어나고 있다는 것을 알 수 있다. 하지만, 4WS-ESP를 장착한 차량은 보다 안정된 요우각속도와 횡미끄럼을 보이며, 원하는 궤도를 따라 움직이는 것을 알 수 있다.

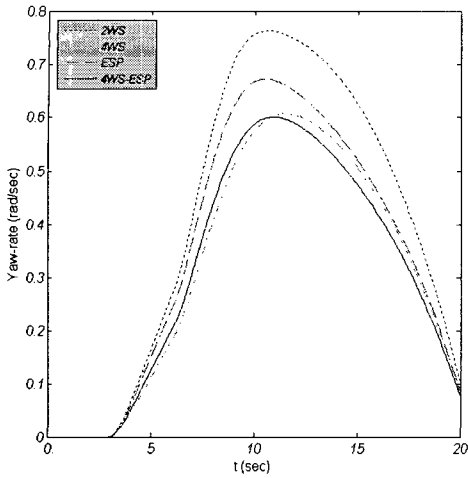


그림 7. 요우각속도(제동중 선회)
Fig. 7. Yaw rate (J-turn)

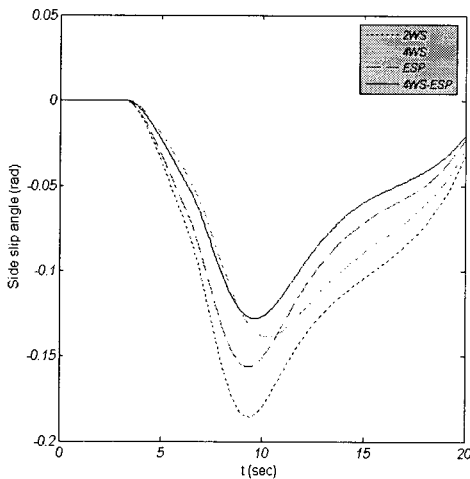


그림 8. 횡 미끄럼각(제동중 선회)
Fig. 8. Side slip angle (J-turn)

IV. 결 론

본 논문의 연구내용은 차량의 종방향, 횡방향, 차량 종축, 횡축, 수직 축 방향 회전운동 및 각 차륜의 회전운동에 대한 7자유도 차량모델을 제시하고 실험하였다. 이 실험을 통하여 제어방법의 효과와 차이점을 비교 실험하여 다음과 같은 결론을 도출 하였다.

4WS차량은 고속에서의 조향 시 언더스티어 현상이 강

하게 나타났으며 조향 시 차량의 응답이 늦은 경향을 알 수 있었고, 후륜 조향의 특성상 발생하는 언더스티어 경향 때문에 운전자가 진행하고자 하는 것 보다 회전반경이 줄어들어 민첩한 조향을 하기가 힘들다는 단점을 알 수 있었다. 그리고 ESP차량은 그 응답이 너무 빨라 오버스티어 현상을 초래 할 수 있다는 결과를 알 수 있었고, 운전자가 원하지 않는 브레이킹 포스에 의한 제어로 운전자에게 위화감을 느낄 수 있는 단점을 알 수 있었다. 4WS차량과 ESP차량도 조향입력을 변화시키거나 브레이크 압력을 증, 감압 시켜 4WS-ESP차량과 같은 궤적을 나타낼 수는 있다. 그러나 이러한 조작 방법들은 고속상황에서 요우각 속도나 횡 미끄럼각이 안정영역에서 벗어나 더 위험한 상황을 초래하게 된다.

본 연구에서 볼 수 있듯이 종전에 개발되어오고 있던 4WS와 ESP는 각각의 장점들을 수행하고 있었지만 고속 선회에 대한 단점들을 볼 수 있었다. 이러한 단점들을 보완하기 위해 4WS와 ESP의 통합적인 시스템 즉, 조향과 제동을 협조적으로 제어하여, 차량의 고속운동 시에도 차량은 안정성을 유지하면서, 운전자에게는 어떠한 위화감도 조성시키지 않고, 운전자의 의지대로 조작 가능한 차량제어시스템을 구축 하였다.

앞으로 조향장치와 제동장치의 협조제어 뿐만 아니라 현가장치, 구동장치 등 차량의 전반적인 새시장치의 통합 제어화 및 모듈화를 구축하여, 차량의 종합적인 성능 향상에 기여할 수 있는 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] M. L. Edwards, S. Malone, 1987 "Driver Crash Avoidance Behavior", National highway Traffic Safety Administration, Final Report, DOT HS 807112
- [2] A. V. Zanten, R. Erhart, 1996 "The Vehicle Dynamics Control System of Bosch", In"ABS TCS-VDC Where will the technology lead us", SAE PT 57, pp.497~514
- [3] 車兩システムのダイナミックスと制御, 社団法人 日本機械學會編, 養賢堂 (1999)
- [4] J. Y. Kim, K. G. Kye, K. S. Park, K. S. Huh, K. Y. Chang, J. E. Oh, 1996 "Dynamic Performance Analysis for 4WD /4WS Electric driven Vehicles" Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers Vol. 4, No. 2,

pp.209~220

- [5] Jong Hyeon Park, Woo Sung Ahn, 1999 “ H_{∞} Yaw Control with Blake for Improving Driving Performance and Stability” Proceedings of the 1999 IEEE/ASME Intimation Conference on Advanced Intelligent Mechatronics September 19 23, Atlanta, USA
- [6] H. Dugoff, P. S. fancher, L. Segl, 1970 “An Analysis of Tire Traction Properties and Their Influence on Vehicle Dynamic Performance” SAE Transactions, 79 :341~366, 1970, SAE Paper 700377 190~198 (1997)

저자소개

박 중 현(Jung-Hyen Park)



부산대학교 생산기계공학과 공학사
고배대학교 시스템공학과 공학석사
고배대학교 시스템공학과 공학박사
2001년~현재 신라대학교 조교수

※ 관심분야 : 최적제어, 강인성제어, 최적설계

김 순 호(Soon-Ho Kim)



동아대학교 금속공학과 공학사
부산대학교 재료공학과 공학석사
부산대학교 재료공학과 공학박사
1998년~현재 신라대학교 부교수

※ 관심분야 : 기계재료역학, 차량제어, 최적설계