

# 급선회반복 및 위급상황에서의 주행안정성 시스템에 관한 연구

박중현\* · 김순호\*

A Study on Improving Driving Stability System in Slalom and Emergency Case

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 표현할 수 있다.

본 연구는 위와 같은 제동·조향장치들을 제어하여, 차량의 주행 중 위급상황 시 탁월한 성능을 발휘할 수 있는 시스템에 관하여 고찰하고, 위급상황을 안전하게 회피하여 교통사고를 획기적으로 줄이기 위함이다.

## ABSTRACT

Conventionally, 2WS is used for vehicle steering, which can only steering front wheel. In case of trying to high speed slalom or emergency through this kind of vehicle equipped 2WS, it may occur much of side slip angle. On the other hand, 4WS makes decreasing of side slip angle, outstandingly, so it is possible to support vehicle movement stable. 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(전자안정성프로그램), 4WS(4륜조향장치), 요우각속도, 횡미끄럼각

## I. 서 론

최근 자동차가 급속도로 증가함에 따라 사고의 수도 크게 증가하고 있으며, 이는 전 세계적으로 큰 사회

문제를 불러일으키고 있다. 이런 사고의 원인을 보면, 운전자 부주의에 의한 사고가 전체의 약90%를 차지하며 그중 약50%는 위급상황에서 예상치 못한 차량의 거동으로 인한 운전자의 오 조작에 의한 것으로

Edwards에 의해 밝혀졌다[1]. 이 같은 운전자의 부주의에 의한 교통사고를 미연에 방지하기 위한 차량의 능동 안전장치들에 관한연구가 70년대 이후 급속하게 진행되어 왔다.

차량의 능동안전장치의 대표적인 예로는 ABS·TCS의 종방향 운동제어에 횡방향 운동제어 기능을 추가한 주행 및 제동 안정성을 향상시킬 수 있는 ESP와 차량의 4륜 모두가 조향되어 주행 중 차량의 요우각속도(yaw rate)를 감지 및 제어하여 요우모멘트(yaw moment)를 줄여 차량의 고속운동 시 주행안정성을 높일 수 있는 4WS가 있다[1,2].

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, 위급상황을 안전하게 회피하여 교통사고를 획기적으로 줄이기 위함이다.

## II. 차량모델 및 운동방정식

차량의 정상상태 및 비정상상태 운동 시 동특성을 해석하기 위해 종방향, 횡방향, 수직축방향의 회전운동(요우잉) 및 각 차륜의 회전운동에 대한 7자유도 차량모델을 수립하였다.

본 연구에서 구성한 차량의 모델을 Fig. 1에 나타내고 있으며, 현가계의 운동 및 하중이동에 의한 영향은 고려하지 않았다.

차량의 선회운동 시 동특성을 해석하기 위해 종방향, 횡방향, 차량의 수직축방향 회전운동(요우잉) 및 각 차륜의 회전운동에 대한 7자유도 차량모델을 수립하였다. 본 연구에서 구성한 차량의 수학적 모델을 Fig. 1을 통해 나타내었다[3,4].

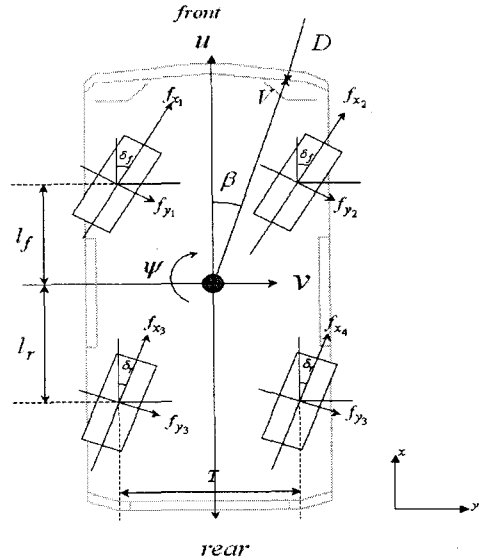


그림 1. 차량모델  
Fig. 1 Vehicle model

### 2.1. 종방향 운동

차량의 종방향 관계식은 다음과 같다.

$$m(\dot{u} - v\dot{\psi}) = X_1 + X_2 + X_3 + X_4 - D\cos\beta \quad (1)$$

이때,

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

여기서,  $u$ 는 종방향 속도,  $v$ 는 횡방향 속도,  $\dot{\psi}$ 는 요우잉방향 속도이며  $D$ 는 공기 저항,  $V$ 는 차량속도,  $\rho$ 는 공기밀도,  $C_d$ 는 공기저항계수,  $A$ 는 투영면적 그리고  $\beta$ 는 횡 미끄러짐각을 나타낸다.  $m$ 은 차량의 질량이고,  $l_f, l_r$ 은 차량 무게중심에서 전축과 후축 사이의 거리이며,  $T$ 는 차량의 윤거이다. 아래첨자 1, 2, 3, 4는 각각 전륜 좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측을 뜻하며, 아래 첨자  $x, y$ 는  $x$ 방향,  $y$ 방향 즉, 차량의 종방향과 횡방향을 뜻한다.  $\delta_f, \delta_r$ 은 전·후륜 조향각으로 본 연구에서는 좌측과 우측에 동일한 조향 입력

을 가하였다.  $X$ 는 타이어에서 발생하는 차체의 종방향 성분으로 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} X_1 &= (f_{x_1} - R_1) \cos \delta_f - f_{y_1} \sin \delta_f \\ X_2 &= (f_{x_2} - R_2) \cos \delta_f - f_{y_2} \sin \delta_f \\ X_3 &= (f_{x_3} - R_3) \cos \delta_r - f_{y_3} \sin \delta_r \\ X_4 &= (f_{x_4} - R_4) \cos \delta_r - f_{y_4} \sin \delta_r \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $f_x$ 는 타이어에 발생하는 구동력과 제동력을 포함하는 힘이고,  $f_y$ 는 타이어의 미끄럼 각과 비례하는 힘을 발생시키는 단순한 타이어 모델이다.  $R_i$ 는 각 타이어에 발생하는 구름저항력으로 그 크기는 모두 같고 합은  $R$ 이라 가정한다.

식(2)를 식(1)에 대입하여 정리하면, 식(3)과 같은 종방향 운동방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{u} &= \frac{1}{m} (f_{x_1} + f_{x_2} - \frac{R}{2}) \cos \delta_f - \frac{1}{m} (f_{y_1} + f_{y_2}) \sin \delta_f \\ &+ \frac{1}{m} (f_{x_3} + f_{x_4} - \frac{R}{2}) \cos \delta_r - \frac{1}{m} (f_{y_3} + f_{y_4}) \sin \delta_r \\ &+ v\psi - \frac{1}{m} D \cos \beta \end{aligned} \quad (3)$$

## 2.2. 횡방향 운동

차량의 횡방향 운동 관계식은 다음과 같다.

$$m(\dot{v} + u\psi) = Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 - D \sin \beta \quad (4)$$

여기서,  $Y$ 는 타이어에서 발생하는 차체의 횡 방향 힘의 성분으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} Y_1 &= (f_{x_1} - R_1) \sin \delta_f + f_{y_1} \cos \delta_f \\ Y_2 &= (f_{x_2} - R_2) \sin \delta_f + f_{y_2} \cos \delta_f \\ Y_3 &= (f_{x_3} - R_3) \sin \delta_r + f_{y_3} \cos \delta_r \\ Y_4 &= (f_{x_4} - R_4) \sin \delta_r + f_{y_4} \cos \delta_r \end{aligned} \quad (5)$$

식(5)를 식(4)에 대입하여 정리하면, 식(6)과 같은 횡

방향 운동방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{v} &= \frac{1}{m} (f_{x_1} + f_{x_2} - \frac{R}{2}) \sin \delta_f + \frac{1}{m} (f_{y_1} + f_{y_2}) \cos \delta_f \\ &\quad - \frac{1}{m} (f_{x_3} + f_{x_4} - \frac{R}{2}) \sin \delta_r + \frac{1}{m} (f_{y_3} + f_{y_4}) \cos \delta_r \\ &\quad - u\psi - \frac{1}{m} D \sin \beta \end{aligned} \quad (6)$$

## 2.3. 요우잉 운동

차량의 요우잉방향 관계식은 다음과 같다.

$$I_z \ddot{\psi} = N_1 + N_2 + N_3 + N_4 \quad (7)$$

여기서,  $I_z$ 는  $z$ 축 주위의 Moment of Inertia이며,  $N_i$ 는 타이어에서 발생하는 종방향 성분의 힘과 횡방향 성분의 힘에 의해 차체의 무게중심에서 발생하는 모멘트를 나타낸다.

$$\begin{aligned} N_1 &= l_f \cdot Y_1 + \frac{T}{2} \cdot X_1 \\ N_2 &= l_f \cdot Y_2 - \frac{T}{2} \cdot X_2 \\ N_3 &= -l_r \cdot Y_3 + \frac{T}{2} \cdot X_3 \\ N_4 &= -l_r \cdot Y_4 - \frac{T}{2} \cdot X_4 \end{aligned} \quad (8)$$

(5)를 식(8)에 대입하고, 다시 식(7)에 대입하여 정리하면, 식(9)와 같은 요우잉 운동방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \ddot{\psi} &= \frac{l_f}{I_z} (f_{x_1} + f_{x_2} - \frac{R}{2}) \sin \delta_f + \frac{l_f}{I_z} (f_{y_1} + f_{y_2}) \cos \delta_f \\ &\quad + \frac{T}{2I_z} (f_{x_1} - f_{x_2}) \cos \delta_f - \frac{T}{2I_z} (f_{y_1} - f_{y_2}) \sin \delta_f \\ &\quad - \frac{l_r}{I_z} (f_{x_3} + f_{x_4} - \frac{R}{2}) \sin \delta_r - \frac{l_r}{I_z} (f_{y_3} + f_{y_4}) \cos \delta_r \\ &\quad + \frac{T}{2I_z} (f_{x_3} - f_{x_4}) \cos \delta_r - \frac{T}{2I_z} (f_{y_3} - f_{y_4}) \sin \delta_r \end{aligned} \quad (9)$$

2.4. 휠 동역학 및 타이어모델

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. 시뮬레이션

앞의 2장에서 얻어진 식을 근거로 시뮬레이션을 수행하였다. 차량의 고속운동 시의 동특성을 알아보기 위하여, 차량의 속도를 100km/h 이상으로 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 조향각의 크기는 좌·우륵이 같다고 가정하였다. 차량주행 시 반복되는 선회 구간을 slalom으로 설정하였고, 주행 중 갑자기 장애물을 만났을 경우를 위급상황으로 설정하였다. 각 상황에서의 2WS, 4WS, ESP, 4WS와 ESP의 통합제어 시스템의 차량 궤적, 요우각속도, 횡 미끄럼각을 비교·분석하였다.

3.1 Slalom

Slalom은 차량이 반복되는 급선회 구간의 운동을 설정하여 동특성을 비교하였다. 조향입력은 부드러운 Sinusoidal 입력으로 시험하였다.

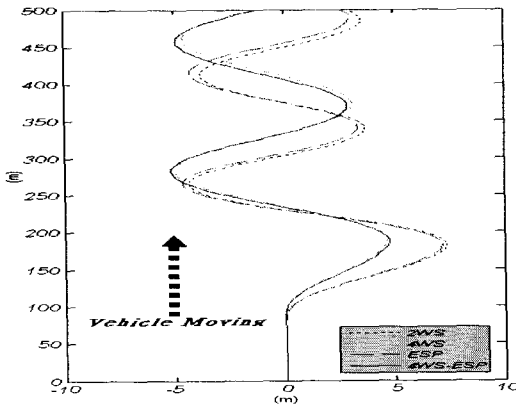


그림 2. 급선회반복시의 차량궤적  
Fig. 2 Slalom Vehicle path

Fig. 2의 차량궤적을 보면 고속에서 2WS차량과 ESP 차량은 Spinout과 Drift out을 반복하며 궤도를 이탈하는 것을 알 수 있다. 4WS장착차량은 4WS-ESP통합제어 차량과 비슷한 경로로 운동하는 것을 알 수 있다. 이는 고속에서의 Slalom시 4WS차량은 4WS-ESP통합제어 차량과 비슷한 궤적을 보이거나 보다 극한 상황 즉, 조향각을 급격히 변화시키면 언더스티어 현상이 강하게 나타났으며, 조향반응이 늦어지는 것을 알 수 있다.

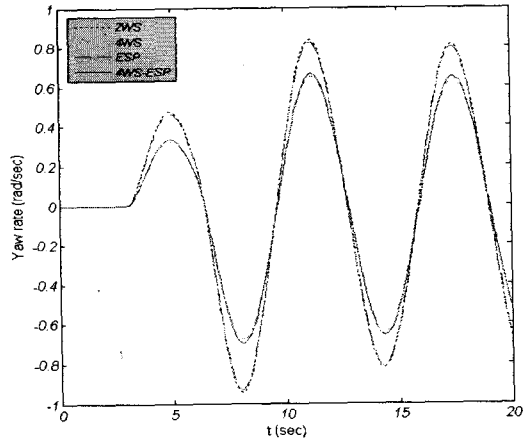


그림 3. 요우잉 각속도  
Fig. 3 Yaw rate

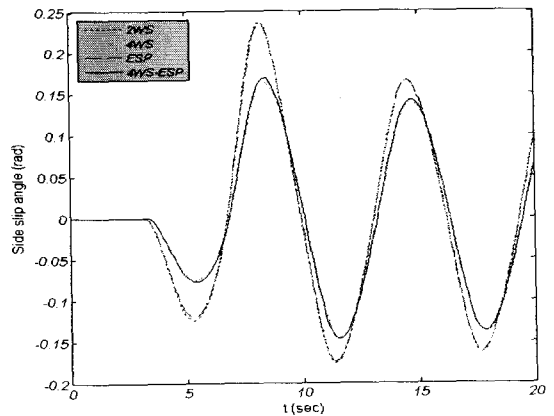


그림 4. 횡 미끄럼각  
Fig. 4 Side slip angle

3.2 Emergency

위급상황은 차량의 고속주행 중 갑자기 장애물을

발견하고 피하는 상황을 설정하였다. 급격한 조향 입력력을 설정하기 위해 2초 내에 조향이 종료되는 상황에서 차량의 이동궤적, 요우각속도, 횡 미끄럼각을 측정하였다.

Fig. 5의 차량궤적을 보면, 고속에서 위급상황 시에 2WS차량과 ESP차량은 스펀아웃을 일으켜 궤도를 벗어나고 있음을 볼 수 있다. 급격한 조향입력에 의해 차량의 횡 미끄럼각이 증가하여 차량이 궤도에서 점점 벗어남을 볼 수 있다. 4WS차량의 횡 미끄럼각은 다른 장치들보다 낮게 나왔지만 언더스티어 현상으로 장애물을 미처 피하지 못하는 것을 볼 수 있다. 4WS-ESP 통합제어차량은 언더스티어와 오버스티어를 조절하여 정확한 궤도를 주행하는 것을 볼 수 있으며 위급상황의 탈출 시에도 시작할 때의 궤도를 다시 추종하여 안정적인 특성을 보인다.

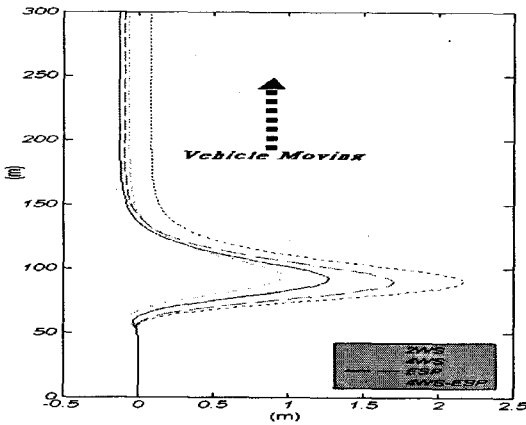


그림 5. 차량궤적  
Fig. 5 Vehicle path

#### IV. 결 론

본 논문의 연구내용은 차량의 종방향, 횡방향, 수직축 방향의 회전운동 및 각 차륜의 회전운동에 대한 7자유도 차량모델을 제시하였고, Slalom 및 위급상황시의 동특성을 비교·실험하여 결론을 도출하였다.

3장의 시뮬레이션에서 보는바와 같이 일반 2WS차량보다는 4WS, ESP차량의 안정성이나 차량의 이동궤적의 결과가 안정적으로 보여 졌다. 그리고 그보다

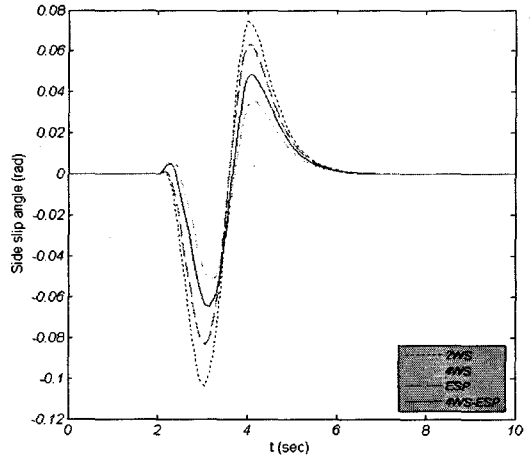


그림 6. 횡 미끄럼각  
Fig. 6 Side slip angle

4WS-ESP의 통합제어 시스템에 의한 결과는 전반적으로 향상된 성능을 발휘함을 알 수 있었다.

4WS차량은 고속에서의 조향 시 언더스티어 현상이 강하게 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 제동력에 의한 제어로 운전자에게 위화감을 느낄 수 있는 단점을 알 수 있었다. 4WS차량과 ESP차량도 조향입력을 변화시키거나 브레이크 압력을 증·감압 시켜 4WS-ESP통합제어 차량과 같은 궤적을 나타낼 수는 있다. 그러나 이러한 조작 방법들은 고속상황에서 요우각속도나 횡 미끄럼각이 안정영역에서 벗어나 더 위험한 상황을 초래하게 된다. 앞으로는 조향장치와 제동장치의 협조제어 뿐만 아니라 탑승자의 승차감을 높일 수 있는 현가장치를 접목하여 제동·조향·현가의 통합화로 보다 향상된 주행 안정성을 만들어내는 것이 과제이다. 그리고 더 나아가 각 바퀴의 구동력을 독립적으로 제어가 가능하게 장치 등 차량의 전반적인 새시장치의 통합 제어화 및 모듈화를 구축할 수 있는 연구가 필요하다.

참고문헌

[1] M. L. Edwards, S. Malone, 1987 "Driver Crash Avoidance Behavior", National high-way 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 " $H_{\infty}$  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

박중현(Jung-Hyen Park)



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

※관심분야 : 최적제어, 강인성제어, 최적설계

김순호(Soon-Ho Kim)



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

※관심분야 : 기계재료역학, 차량제어, 최적설계