

# 차량 조향 안전성 제어

허 건 수 교수 · 한양대학교 정밀기계공학

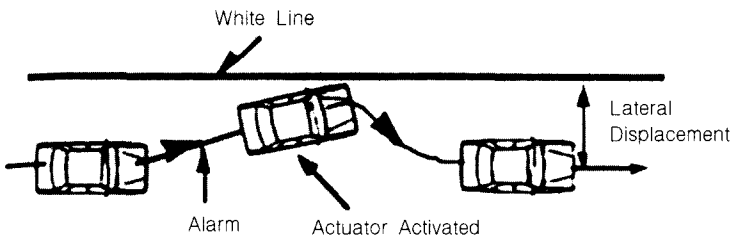
## 1. 횡방향 제어 (lateral control)의 소개

횡방향 제어(lateral control)는 조향 제어(steering control)라고 언급하기도 하며 그 의미는 차량이 곡선 또는 직선도로를 주행시 도로의 횡방향 위치를 이탈하지 않고 주행하도록 제어하는 것이라고 할 수 있다.

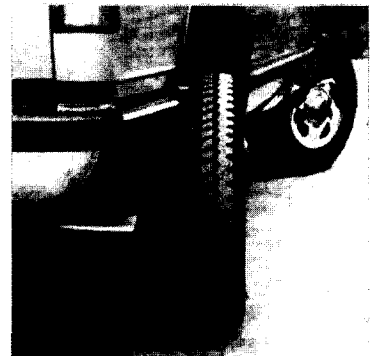
횡방향 제어 시스템은 운전자의 조향 조작을 도와주는 보조 조향 시스템과 무인 자율주행 차

량에서 사용되는 자율조향 시스템이 있다. 보조 조향 시스템은 운전자가 주된 조향 명령을 내리지만 운전자의 실수나 졸음등의 이유로 심각한 위험이 임박했을 때 이를 방지하는 보조 역할을 하게 된다. 또한 운전자는 정상적으로 조향을 하고 있는데 도로의 상태와 차량의 상태에 따라 정상적인 횡운동이 일어나지 않을 때도 이상을 감지하고 운전자의 의도대로 운행되도록 하는 것도 포함된다.

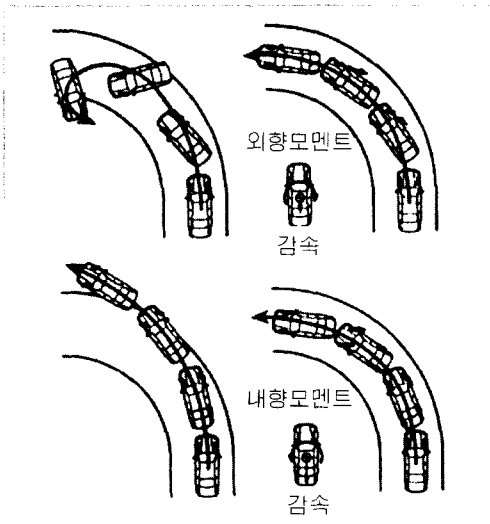
목적이나 방법 등에 따라 <그림 1>과 같은 차선 이탈 방지 시스템, <그림 2>와 같은 4륜 조향 시스템, 그리고 <그림 3>과 같은 요우 모멘트 제어(또는 스핀 제어)등을 들 수 있겠다. 무인 자율 조향 시스템은 차량 스스로 도로의 형상 또는 차선을 따라 주행하도록 제어하여야 한다. 차선에 대한 차량의 횡방향 상대 위치를 알아내기 위하여는 도로에 자기 유도선이나 자석과 같은 차선 표점을 별도로 매설하고 이



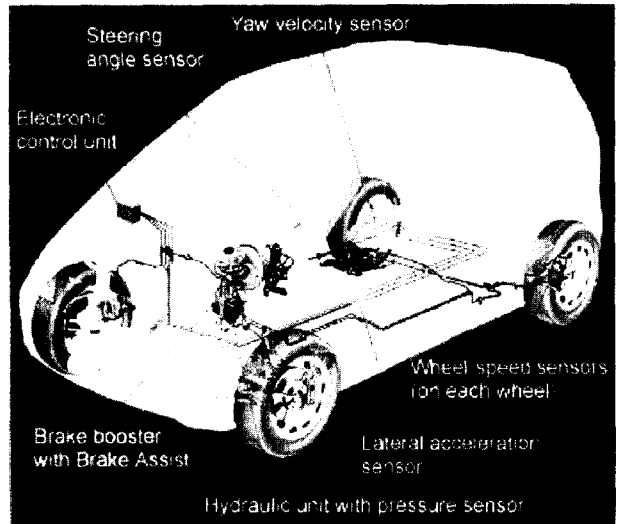
<그림 1> 차선이탈방지 시스템



<그림 2> 4륜조향 시스템



〈그림 3〉 Yaw Moment 제어 시스템



〈그림 4〉 Bosch ESP 시스템

를 측정하는 방법과 도로 위의 흰 차선을 vision sensor등으로 감지하는 방법이 있다.

횡방향 제어에 대한 전반적인 내용은 자동차공학회지 1999년 8월 호에 특집 기고한 바 있으며 본 글에서는 조향 안정성 제어에 대하여 주로 소개하고자 한다.

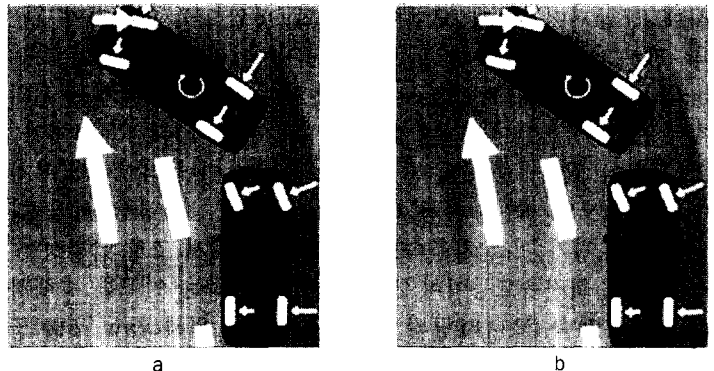
## 2. 자동차 회사의 조향 안정성 제어 시스템 개발

자동차 회사들은 거의 포화된 시장에서 새로운 구매 의욕을 불러일으키기 위해 첨단화, 지능화를 통한 안정성 확보와 환경 친화적인 차세대 차량 제어 기술 연구에 열중하고 있다. 특히 조향 안정성 제어에 관련하여 유럽의 Volkswagen, Mercedes-Benz, 미국의 GM Delphi와 Ford, 그리고 일본의 Toyota와

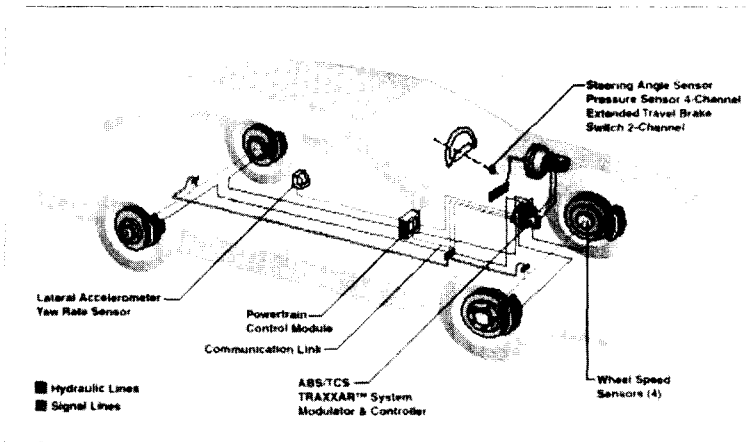
Honda등의 회사에서 안전도 증대를 목표로 한 조향 안정성 제어 시스템들을 개발하고 있다.

Volkswagen사에서는 기존의 ABS 방식을 이용하여 차량의 조향 안정성을 확보하는데 목적을 둔 연구를 수행하고 있다. 이를 위한 센서로는 차량의 휠스피드 센서, 횡가속도계, 요속도 센서, 조향각 센서등을 이용하였으

며 제어 변수인 차량의 yaw rate과 side slip angle을 이용한 PD 또는 P control을 통한 차량의 각 바퀴에 가할 제동 압력을 계산하였다. 제어기 성능의 검증을 위하여 openloop(운전자 가 장애물을 피하기 위하여 조향한 후 그 조향각을 유지)와 closed-loop(운전자가 장애물을 피하기 위하여 조향에 의해 장애



〈그림 5〉



〈그림 6〉 Delphi 횡방향 제어 시스템

물을 완전히 피한 후 원래의 course로 가기 위해 조향)에서 실험을 행하였다.

본 논문에서는 차량의 스피어를 감지하기 위하여 기준 yaw rate과 side slip angle과 side slip rate의 곱(예를 들어 이들의 곱이 0보다 크다면 spin 현상이 발생한다고 본다)을 이용하였다.

독일의 Bosch회사에서 개발하여 보급하는 ESP(Electronic Stability Program) 시스템은 현재 Mercedes등의 8개 자동차 회사에 공급되어 16개 모델에 장착 판매되고 있다. 한 예로 Mercedes-Benz의 A-class에 장착된 ESP 시스템이 〈그림 4〉에 도시되어 있다. 중요한 센싱 변수로는 요오잉 속도, 제동 압력, 조향각, 횡가속도, 차량속도 그리고 바퀴 회전속도등이며 20 msec마다 계속 모니터링되고 있다. 그리고 이 측정된 변수 값들은 56 KB의 메모리를 갖는 2

대의 컴퓨터에서 처리되어 이미 저장되어 있는 정상상태 값들과 비교된다. Spin-out과 같은 징후가 보이면 즉시 각각 바퀴의 제동력과 엔진 출력을 조절하여 미끄러운 길, 얼음길, 험지등에서도 조향성을 상실하지 않도록 한다.

〈그림 5〉 a에서 보듯이 왼쪽으로 급히 조향시 oversteer현상에 의해 스피어되려고 할 때 ESP 시스템은 오른쪽 후륜에 제동력을 가해 정상으로 회복시키고 〈그림 5〉 b에서는 understeer현상에 의해 바깥으로 미끄러져 갈 때 ESP는 왼쪽 후륜에 제동력을 가해 차선 안으로 밀어 넣게 된다.

Delphi사에서는 운전자가 정상 상태가 아닌 타이어의 부착한계의 경우, 즉 평상 시와 다른 조향 환경에서 조향 안정성을 확보하고자 하는 연구를 수행하고 있다. 이를 위해 yaw rate 또는 yaw rate과 side slip angle을 이용한 두가지 제어 방식을 제안

하였다. 이때 필요한 차량 센서로는 휠스피드 센서, 횡가속계, 요속도 센서, 조향각 센서 등이다. PD 제어 기법등을 통하여 계산된 yaw moment를 가하기 위해 차량 제동력의 좌우 차등분배를 가하도록 하였으며 그 구성의 예가 〈그림 6〉과 같다.

이러한 제어 성능을 평가하기 위하여 세 가지 경우 즉 제어가 없는 경우, yaw rate만을 고려한 경우, 그리고 yaw rate과 side slip angle을 함께 고려한 경우에 대해서 차량이 눈길에서 30mph의 속도로 lane change을 할 경우에 대하여 실험하였다. 이때 제어기가 달려 있는 경우 lane change를 할 때 훨씬 적은 조향각이 필요하다는 것을 알 수 있었고, 또한 yaw rate control과 yaw rate과 side slip angle을 함께 고려한 제어시 눈길에서는 후자의 경우가 훨씬 효과적이며, 건조한 아스팔트 도로의 경우는 전자의 경우가 효과적임을 이 논문에서는 보이고 있다.

Honda 사에서는 차량이 비선형 거동을 행할 시에 차량 성능을 향상시키는 것을 목적으로 하는 연구를 수행하고 있으며, 특히 제동력의 좌우 차등분배를 통해 차량에 가할 수 있는 yaw moment를 이용하여 가속이나 감속 시 발생하는 under-steer나 over-steer경향을 없애고자 하였다. 이때 연구된 차량의 비선형 거동 특성에 의하면 side slip angle이 증가함에 따라

stabilizing yaw moment(어떤 외부적 요인이나 조향각으로 인하여 차량의 주행 방향이 틀어졌을 경우 이를 올바르게 바로잡기 위하여 차량에 가해야 하는 yaw moment의 크기)가 감소함을 보여 이러한 side slip angle이 yaw moment 제어에 있어서 매우 중요하게 고려되어질 변수임을 보여주었다.

또한 Honda사에서는 차량의 조향 성능과 active safety를 보장하는 방법으로서 direct yaw moment control을 개발하고 있다. 이때 제안된 제어 방식은 direct yaw moment 제어 방식으로서 비선형 타이어 모델을 가지는 side slip angle과 yaw rate에 관련된 2DOF 모델을 이용하여 sliding mode 제어 기법을 토대로 차량에 가해질 yaw moment를 계산한다.

이때 4WS의 경우는 side slip angle이 0이 되도록 sliding surface을 잡고, 2WS의 경우 조향시 side slip angle을 0이 되도록 제어할 수 없기 때문에 차량이 기준 yaw rate과 기준 side slip angle을 추종하도록 sliding surface를 잡아 필요한 yaw moment를 계산한다. Simulation은 lane change의 경우 추정된 도로의 마찰계수가 실제 마찰계수와 같을 때와 작거나 클 경우에 대하여 행하여졌다. 이때 추정된 마찰계수가 실제 마찰계수보다 작은 경우 조향각에 대한 yaw rate gain이 작아짐을 확인할

수 있었으며 나머지는 제어 성능이 훌륭함을 확인할 수 있었다.

Toyota 자동차 회사에서는 한계 조향시 차량 성능 및 차량의 안정성을 향상시키는 것을 목적으로 하는 연구를 수행하고 있다. 이 연구에서는 차량의 안정성 측면에서 타이어의 skid 현상을 고려하며 이 부분은 크게 두 부분으로 나눈다.

우선 뒤 바퀴의 skid의 경우는 lane change의 경우 발생할 수 있으며, 차량의 안정성은 side slip angle과 그것의 angular velocity에 의해 판정된다. 그 다음 앞 바퀴의 skid의 경우는 ramp-step steering input의 경우 발생하며 이때 차량의 안정성은 앞 바퀴의 slip angle로서 판단한다.

적용되어지는 제어기는 후륜의 skid 경우 yaw moment control 방법이 적당하고 전륜의 skid의 경우 차량 속도의 감소와 yaw moment control 방법이 적당하다. 이때 사용되어지는 센서로는 휠스피드 센서, 횡 및 종가속도계, throttle 센서, brake pressure 센서, 조향각 센서, yaw rate 센서등이 사용되어진다.

또한 Toyota자동차 회사에서는 타이어가 부착한계에 도달하기전과 도달한 후의 두 가지 경우에 대하여 차량의 조향성 및 안정성을 확보하고자 하는 연구를 수행하고 있다. 우선 타이어가 선형 특성을 나타내는 경우는 조향각을 이용한 제어가 매우 효

과적이며 이 경우 4WS가 가장 일반적으로 사용 되어진다. 이때 크게 전륜의 조향각에 따른 후륜의 조향각의 feed forward 항과 yaw rate과 관련된 feedback 항이 있는 제어로 나뉘는데 외란이 가해질 경우는 후자의 경우가 더욱 좋은 제어 성능을 가짐을 얻었다. 그리고 타이어의 부착한계 시는 조향각만으로는 제어에 한계성이 있기 때문에 다른 제어 방식이 도입되어야 하는데 이때 제안되어지는 것이 driving/braking force control과 vertical load control 즉 roll stiffness distribution control이다. 이때 고려되어지는 제어 변수는 yaw rate이며 차량이 기준 yaw rate을 추종하도록 하였다.

Ford사에서는 조향각만으로는 차량 조향성능을 향상시키는데 한계점이 있기 때문에 차등 brake force를 타이어에 적용하는 방법을 이용하여 Intelligent Vehicle Highway System에 적용코자 하는 연구를 수행하고 있다. 그래서 2DOF 차량 모델에 제동력 항을 포함시켜 PD, pole placement, 그리고 LQ 제어 기법을 적용시킨 제어기를 소개하고 이에 대한 성능 비교를 하였다. 이때 PD 제어 기법의 경우 만족스러운 rise time과 overshoot을 가지지만 settling time면에서는 다른 제어기에 비해 좋지 않는 성능을 보였으며 그 외 나머지 두 제어기법은 전반적으로 좋은 제어 성능을 가짐

을 보여주었다. 또한 정상 상태에서의 차량의 안정성 측면에서 differential braking force의 제한을 두어야 하기때문에 동력을 마찰계수와 조향각과 차량의 속도의 함수로 표현하여 그 관계를 설명하였다.

Nissan 자동차 회사에서는 차량 성능을 향상시키기 위하여 ABS 시스템에 덧붙여서 제동력의 좌우 분배를 통하여 외부적으로 차량에 힘을 가할 수 있는 yaw moment control을 연구 개발하고 있다. 이때 차량에 가해질 제동력의 차이는 기준 yaw 모델을 추종하기 위한 조향각에 대한 feed-forward 항과 외란에 대한 강인성을 확보하기 위하여 yaw rate에 대한 feedback 항에 의해 계산되어 진다. 이에 성능은 simulation과 실험에 의해 검증하였다. 각각의 실험은 차량이 lane change을 할 경우에 대하여 행하여졌으며 그 결과 조향각에 대한 yaw rate 응답 특성이 향상됨을 보여 주었다. 그리고 제어기의 적용면에 있어서 휠속도 센서, 조향각 센서, 종가속계, 요속도 센서, 압력 센서, brake fluid pressure actuator, controller등이 필요함을 보여 주었다.

### 3. 학계의 횡방향 제어(lateral control)의 연구동향

동경대에서는 타이어의 비선형성으로 인해 조향각만으로 차량 성능을 향상시키는 데에는 한

계점이 있기 때문에 차량의 braking force와 driving force의 차등 분배를 이용하는 direct yaw moment control을 적용하는 것이 바람직하다는 연구결과를 발표하였다.

이때 제안한 제어 시스템은 yaw rate과 side slip angle의 state feed back(LQR, H2/LQG, 또는 H)에 의한 desired dynamic model을 차량이 따르도록 하는 model matching controller이다.

이러한 제어기를 통해 차량의 후륜 조향각과 yaw moment를 제어하게 된다. 제어기의 성능은 비선형 타이어 모델을 가지는 차량모델을 사용하여 simulation을 통하여 검증하였으며 이를 통해 road surface condition(지면 마찰계수의 변화)이나 J-turn, lane change의 경우에도 비록 선형제어기를 이용하지만 그 제어 성능이 우수함을 확인할 수 있음을 보였다.

Tokushima 대학교에서는 각각의 바퀴에 모터가 들어간 전기 자동차의 traction force control을 위해 좋은 조향성능을 얻도록 하는 제어방식을 제안하였다. 전기 자동차의 경우 각각의 바퀴의 구동은 서로 독립적이므로 필요한 yaw moment control의 적용 가능성에 있어서 매우 용이하기 때문에 이 방식을 제안하였다. 이때 필요한 yaw moment는 fuzzy 제어를 통해 계산되어지며, 이 경우 fuzzy 제어기의 입력 변수는

yaw rate의 error 즉 기준 yaw rate과 현재 차량의 yaw rate와의 차이와 그것의 time difference 그리고 slip ratio로 잡았으며 비퍼지화는 product-sum gravity방식을 적용하였다. 제어 성능의 검증은 simulation을 통하여 행하여졌으며 lane change와 spirit-road에서 각각 행하여졌다.

또한 traction force control의 성능 지수로서 현재의 조향각과 이전의 조향각 차이를 잡고서 조향성능 및 안정성을 검증하였다.

Matsumoto등은 빙판이나 저 마찰계수 노면에서 차량의 조향시 발생하는 spin 상태를 줄이기 위해 각 바퀴의 제동력을 분배 시킴으로 차량의 보상 요우모멘트를 발생시켜 차량 자세를 바로 잡는 시스템을 개발하였다. 조향각 센서와 속도 센서로부터 요우잉속도를 계산하고 이를 토대로 앞, 뒤 바퀴의 differential pressure를 제어함으로써 spin 운동과 반대의 모멘트를 발생시켜 차량 안정성을 향상시킨다. Nagai 등은 요우 모멘트 제어를 위해 후륜 조향을 이용하였으며 yaw rate와 side-slip angle을 동시에 제어하여 안전성을 확보할 수 있다고 보고하였다.

Alleyne등은 미끄러운 노면에서 차량의 조향시 횡방향 운동의 안정성을 증가하기 위해 전, 후륜의 조향각과 4바퀴의 구동 또는 제동 토오르크를 제어하여 횡방향 변위와 요우잉속도의 오차가

최소가 되는 시스템을 개발하였다. 2자유도 모델을 사용하여 최적제어기와 Model reference 제어기등을 설계하였고, 측정 변수는 차량 횡가속도, 요우각, 요우잉 속도등을 사용하였으며 소형 실험 차량에서 실차 실험을 수행하였다.

그밖에 4륜 조향에 관하여는 일본의 자동차 회사들과 학계에서 활발히 연구해 왔으며 많은 논문들이 관련 학회에 발표되어 있다. 목적으로는 Side-slip angle의 최소화, 앞에서 연구된 요우잉 운동 제어, 그리고 강인성 및 안정성 향상등을 들 수 있으며 능동 현가 장치와의 연계성 등도 많이 연구되고 있다. 국내에서도 한국과학기술원, 한양대, 한국항공대등에서 관련 기술을 연구해오고 있다.

#### 4. 미래의 조향 안정성 제어

일부 자동차회사들이 안전도 증대 및 조향 안정성 향상을 위

하여 개발한 제어 시스템들이 고객에게 어느 정도 인정을 받고 있다. 최근에는 미국과 일본의 자동차 회사들이 공동으로 운전자의 의도를 정확히 판단하는 "Smart Car"를 개발하고 있다고 한다. 이전의 연구와 다른 점으로 Smart Car는 운전자가 회전을 하려는지, 차선을 바꾸려는지, 가속 또는 감속을 하려는지 아니면 추월을 하려는지 그 의도를 알아내고 이 의도가 위험할 경우 경고와 함께 보조 제어를 하는 것이다.

미국 MIT 대학의 Simulator 실험 결과에 따르면 운전자의 의도를 12초 정도 앞서서 예상하는데 95%정도의 정확도를 보였다고 한다. 이 방법은 탑승한 운전자의 개별적인 성향을 미리 모니터링하여 일련의 예비동작들이 어떤 의도 하에서 이루어지는지 분석한 data를 이용하고 있으며 운전자들의 위험한 상황을 미리 예측하고 방지할 수 있다고 한다.

그러나 이 시점에서 지적해야 하는 점은 이러한 능동 안전도 시스템들이 곧 자동차 사고의 완전 방지가 아니라는 것이다. 차량 제동에 관련한 능동 안전도 시스템으로서 ABS 시스템의 예를 들어 보자. 1970년대에 개발된 이래, 1997년에는 미국에서 시판된 새차의 60% 그리고 새 트럭들의 90%에 ABS 시스템이 장착되고 있다. 그러나 미국의 교통안전국 보고에 따르면 ABS 시스템이 본격적으로 장착된 1994~1995년에 차량의 충돌이나 뒤집힘으로 인한 단독차량 사고가 40%정도 증가했다고 한다.

이는 운전자들이 ABS 시스템에 적응하는데 상당한 시간이 걸리고 또 적응한 운전자들은 과신하여 난폭 운전을 할 수 있다는 것을 보이고 있다. 따라서 조향 안정성 제어 시스템도 이러한 운전자의 성향을 잘 고려해야 할 것이다.