

# 차량 횡방향 안정성 향상을 위한 통합새시 제어

조완기<sup>†</sup> · 이경수\* · 윤장열\*\*

## Unified Chassis Control for Improvement of Vehicle Lateral Stability

Wanki Cho, Kyoungsu Yi, Jangyeol Yoon

**Key Words :** Active front steering (앞바퀴 능동 조향), Electronic stability control (전자식 주행안정성 제어), Unified chassis control (통합 새시 제어), Yaw moment distribution (요 모멘트 분배), Continuous damping control (감쇠 제어)

### Abstract

This paper presents unified chassis control (UCC) to improve the vehicle lateral stability. The unified chassis control implies combined control of active front steering (AFS), electronic stability control (ESC) and continuous damping control (CDC). A direct yaw moment controller based on a 2-D bicycle model is designed by using sliding mode control law. A direct roll moment controller based on a 2-D roll model is designed. The computed direct yaw moment and the direct roll moment are generated by AFS, ESP and CDC control modules respectively. A control authority of the AFS and the ESC is determined by tire slip angle. Computer simulation is conducted to evaluate the proposed integrated chassis controller by using the Matlab, simulink and the validated vehicle simulator. From the simulation results, it is shown that the proposed unified chassis control can provide with improved performance over the modular chassis control.

### 기호설명

$\gamma$  : 요율(rad/s)  
 $m_s$  : 스프링 상 질량 (kg)  
 $\beta$  : 옆 미끄럼 각 (rad)  
 $V_x$  : 종 속도 (m/sec)  
 $l_f$  : 스프링 상질량과 앞 바퀴 사이 거리 (m)  
 $l_r$  : 스프링 상질량과 뒷 바퀴 사이 거리 (m)  
 $C_f, C_r$  : 코너링 강성 계수 (N/rad)  
 $M_Z$  : 요 모멘트 (N-m)  
 $M_{pb}$  : 제동에 의한 모멘트 (N-m)  
 $\delta_f$  : 앞 바퀴 조향각 (rad)  
 $\phi$  : 롤 각 (rad)  
 $t_f$  : 차폭 (m)  
 $K_{roll}$  : 롤 댐핑 (N-m/rad)  
 $M_\phi$  : 제동에 의한 모멘트 (N-m)

$h_{roll}$  : 스프링 상질량중심과 롤중심간 거리 (m)  
 $a_y$  : 횡 가속도 (m/sec<sup>2</sup>)  
 $I_z$  : 관성 모멘트 (kg-m<sup>2</sup>)  
 $F_f, F_r$  : 코너링 강성계수의 경계치  
 $\alpha$  : 슬립각 (rad)

### 1. 서론

차량의 안정성 향상을 위하여 최근 많은 연구들이 진행되어 왔다. 차량의 횡 방향 움직임을 제어하기 위하여 각 바퀴에 제동을 이용한 ESC (Electronic stability control), 능동 전륜 조향을 이용한 AFS (Active front steering) 그리고 차량의 롤 움직임을 제어하여 주행 성능을 향상 시킨 CDC (Continuous damping control) 등 여러 가지 방법들이 연구되어 실용화 되고 있는 실정이다.

ESC 의 경우 실용화에 성공하여 양산이 되고 있지만 ESC 는 제동으로 인한 갑작스런 감속으로 운전자에게 불안감을 줄 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 제어 입력을 제동(ESC)과 능동

<sup>†</sup> 서울대학교 기계항공공학부  
E-mail : nawanki0@snu.ac.kr  
TEL : (02)888-7194 FAX : (02)882-0561

\* 서울대학교 기계항공공학부

\*\* 서울대학교 기계항공공학부

전륜 조향(AFS)을 통합하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 제동에 의해 발생하는 종 방향 힘과 조향에 의해 발생하는 횡 방향의 힘은 서로 연관성을 가지고 있고 비선형성이 강하기 때문에 ESC와 AFS의 통합에 많은 어려움이 있다.

본 논문에서는 ESC, AFS의 통합하는 방법 중에 하나를 제시하고 차량의 전복에 가장 큰 영향을 미치는 롤 운동을 현가장치를 통해 제어하는 CDC를 구현하였다. 우선 요율( $\gamma$ )을 제어하기 위해 제어 입력인 요 모멘트( $M_z$ )를 구한다. (1)(2) 구해진 요 모멘트를 생성시키기 위해 제동과 능동 전륜 조향을 사용하였고 두 입력의 결정 방법은 요 모멘트의 부호와 슬립각의 크기에 따라 결정하였다.(3)(4)(5) 요 모멘트는 코너링 강성계수의 불확실성을 고려한 슬라이딩 모드 컨트롤(SMC)을 사용하였다. 또한 롤 각 제어를 위해 필요 롤 모멘트를 슬라이딩 컨트롤을 이용하여 구하고 현가 장치의 감쇠비를 통하여 생성시키도록 구현하였다.(7)

시뮬레이션을 통해 ESC, AFS와 CDC가 통합하여 작동을 했을 경우 ESC만을 개별 제어했을 경우에 비해 어떠한 장점을 가지고 있는지를 비교 검토해 보았다.

## 2. 횡 방향 제어기 설계

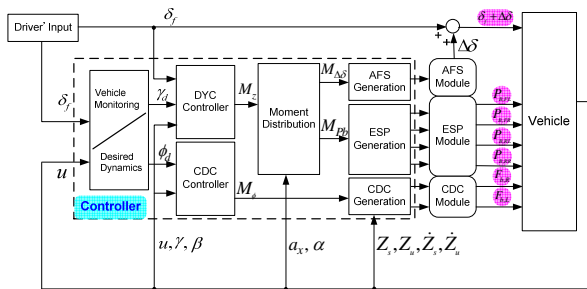


Fig. 1 Schematic diagram of UCC

ESC란 차량이 횡방향의 안정성 향상을 위해 각 바퀴에 차별화된 제동을 가하여 필요 요율(Yaw rate) 발생 시키는 것이라 말할 수 있다. ESC 처럼 제동을 이용하여 제어를 할 경우 갑작스런 차량의 감속을 가져와 차량 자체의 안정성은 향상되지만 운전자에게는 오히려 더 큰 불안감을 가져다 줄 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 AFS에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. AFS란 능동 전륜 조향으로 필요 요율을 제동으로부터 얻는 것이 아니라 앞 바퀴의 추가 조향으로부터 얻는 것을 말한다. AFS는 뛰어난 제어 성능과 차량의 감속 현상이 없는 장점을 가지고 있지만 그

범위가 바퀴의 슬립각에 따라 제한적이라는 문제점을 가지고 있다. 따라서 ESC와 AFS의 통합으로 각 개별 제어기에 대한 단점을 보완하였다. 본 논문에 대한 전체적인 개요를 보면 위 Fig. 1과 같다.

### 2.1 목표 모델

본 논문에서는 횡 방향 제어기 설계를 위해 아래 Fig. 2 같이 2 자유도 자전거 모델을 사용하였다.

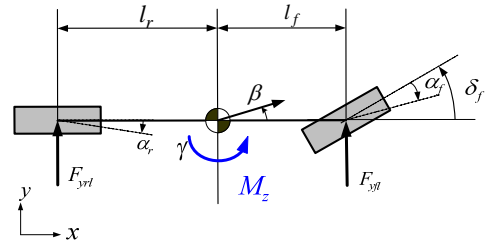


Fig. 2 2-D Bicycle model

2 자유도 자전거 모델은 그 구조의 간단함에 비해 정확성이 뛰어난 것으로 알려져 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-2(C_f + C_r)}{mV_x} & \frac{2(-l_f C_f + l_r C_r)}{mV_x^2} - 1 \\ \frac{2(-l_f C_f + l_r C_r)}{I_z} & \frac{-2(l_f^2 C_f + l_r^2 C_r)}{I_z V_x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \gamma \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{2C_f}{mV_x} \\ \frac{2l_f C_f}{I_z} \end{bmatrix} \delta_f + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{I_z} \end{bmatrix} M_z \quad (1)$$

목표 모델의 경우 운전자로부터 조향 입력이 가해지면 차량은 그 조향 입력에 대한 정상상태로의 빠른 도달이 필요하다. 따라서 식(1)에서부터 정상상태의 값을 구하기 위해  $\beta, \dot{\gamma}$ 를 0으로 설정하여 정상상태의 요율값( $\gamma_{ss}$ )을 구하고 1차 시간 지연을 주어 목표 모델을 구한다.

$$\gamma_d = \frac{\gamma_{ss}}{1 + \tau_e s} \quad (2)$$

Where,  $\tau_e$ : Time constant

$$\gamma_{ss} = \frac{2 \cdot V_x \cdot C_f \cdot C_r \cdot (l_f + l_r)}{2 \cdot C_f \cdot C_r \cdot (l_f + l_r)^2 - m \cdot V_x^2 \cdot (l_f \cdot C_f - l_r \cdot C_r)}$$

### 2.2 제어기 설계

식(1)로부터 Controllability matrix(C)를 구하면 Full rank가 되어 제어 입력인 요 모멘트 하나로 두 State인 요율과 옆 미끄럼 각을 제어할 수 있다. 하지만 두 개의 State가 서로 독립적이지 않고 연관성을 가지고 있기 때문에 하나의 제어 입력으로 두 State의 연속적인 제어는 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 요율에 대한 제어를 하였다. 요율과 옆 미끄럼 각은 서로 연관성이 많기

때문에 요율 값이 안정적이라면 옆 미끄럼 각은 그에 대한 목표 값을 추종하지는 못하더라도 안정적인 값을 가질 것이다. 식(1)로부터 요율에 대한 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{\gamma} = \frac{2(-l_f C_f + l_r C_r)}{I_Z} \beta + \frac{-2(l_f^2 C_f + l_r^2 C_r)}{I_Z V_x} \gamma + \frac{2l_f C_f}{I_Z} \delta_f + \frac{1}{I_Z} M_z \quad (3)$$

제어기 설계를 위해 다음과 같이 Sliding surface 를 정의한다.

$$S_1 = \gamma - \gamma_d \quad (4)$$

식(3)에서 코너링 강성계수인  $C_f, C_r$  를 불확실한 값으로 가정하고 다음과 같은 경계를 만족한다고 가정한다.

$$|C_i - \hat{C}_i| \leq F_i, \quad (i = f, r) \quad (5)$$

제어기 설계에는  $C_f, C_r$  값 대신에 추정 되어진  $\hat{C}_f, \hat{C}_r$  을 사용할 것이다.

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} S_1^2 \leq -\eta_1 |S_1| \quad (6)$$

Where,  $\eta_1$  : positive const.

Sliding surface 의 미분치를 0 으로 만들어주는 제어 입력을 구하고 불연속 항을 고려하여 제어입력 값을 구하면 다음과 같다.

$$M_Z = M_{Z,eq} - k_1 \cdot \text{sgn}(\gamma - \gamma_d) \quad (7)$$

식 (6)과 같은 Sliding condition 을 만족 시켜주도록 불연속 항의 Gain  $k_1$  의 값을 계산하고 불연속 항을 Stturation 함수로 바꿔주면 다음과 같은 제어 입력을 구할 수 있다.

$$M_Z = M_{Z,eq} - k_1 \cdot \text{sat}\left(\frac{\gamma - \gamma_d}{\Phi_1}\right) \quad (8)$$

Where,

$$M_{Z,eq} = -I_Z \cdot \left( \frac{2(-l_f \hat{C}_f + l_r \hat{C}_r)}{I_Z} \beta + \frac{-2(l_f^2 \hat{C}_f + l_r^2 \hat{C}_r)}{I_Z V_x} \gamma + \frac{2l_f \hat{C}_f}{I_Z} \delta_f \right)$$

$$k_1 = I_Z \cdot \left\{ \begin{array}{l} F_f \cdot \left| -\frac{l_f}{I_Z} \cdot \beta - \frac{l_f^2}{I_Z} \cdot \gamma + \frac{l_f}{I_Z} \cdot \delta_f \right| \\ + F_r \cdot \left| \frac{l_r}{I_Z} \cdot \beta - \frac{l_r^2}{I_Z} \cdot \gamma \right| + |\dot{\gamma}_d| + \eta_1 \end{array} \right\}$$

$\Phi_1$ : Boundary layer

### 2.3 요 모멘트 분배

앞서 구한 요 모멘트는 차량의 제동과 앞 바퀴의 추가 조향으로 생성이 된다. 제동으로 요 모멘트를 발생 시킬 경우 차량의 감속율이 증가하기

때문에 앞 바퀴의 추가 조향과 통합하여 요 모멘트를 분배하였다. 하지만 조향에 의한 제어는 각 바퀴의 슬립각에 따라 그 한계가 존재한다.

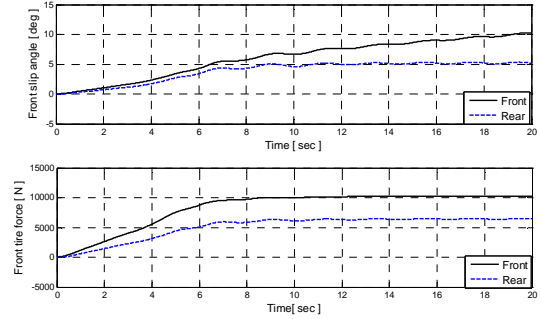


Fig. 3 Lateral tire force vs Slip angle

Fig. 3 은 각 바퀴의 슬립 각에 따른 횡력을 나타낸 그래프이다. 보는 바와 같이 일정 슬립각 이상이 되면 횡력은 변화하지 않음을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 감속율을 최소화 하면서 요 모멘트를 생성 시키기 위해 추가 조향을 우선 작동을 시키고 앞 바퀴가 일정 슬립각을 넘어서게 되면 나머지 부분에 대해서는 제동으로 요 모멘트를 발생시키도록 하였다.

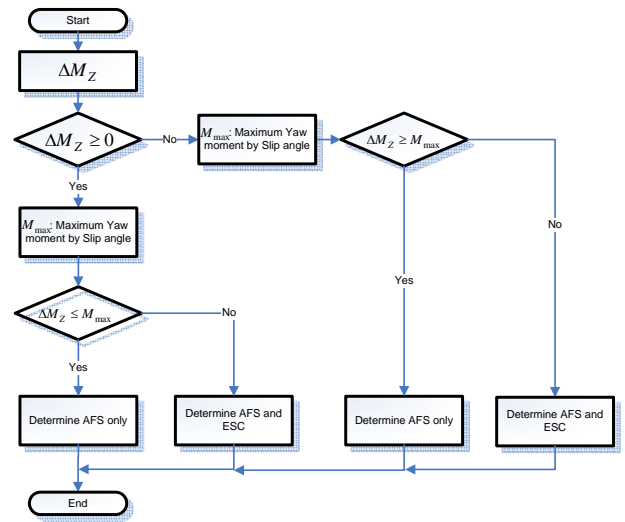


Fig. 4 Yaw moment distribution

Fig. 4 는 요 모멘트( $M_Z$ ) 분배 방법에 대한 개요를 요약하여 그린 것이다. 현재의 슬립각이 한계 범위를 벗어나 있다고 해도 요 모멘트의 부호에 따라 추가 조향으로 슬립각을 한계 범위 내에 존재하게 할 수 있게 된다. 이는 제동이 아닌 추가 조향만으로도 충분한 제어 성능을 보일 수 있음을 나타낸다. 아래 식 (9), (10)은 슬립각과 요 모멘트의 부호에 따라 요 모멘트의 분배 방법과 수식을 나타낸다.

$$\Delta M_z \geq 0$$

$$1. \Delta M_z \leq \hat{C}_f \cdot t_f \cdot (Slip_{max} - \alpha)$$

$$\Rightarrow \Delta \delta = \frac{\Delta M_z}{\hat{C}_f \cdot t_f} \quad (9)$$

$$2. \Delta M_z > \hat{C}_f \cdot t_f \cdot (Slip_{max} - \alpha)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \Delta \delta = Slip_{max} - \alpha \\ \Delta M_{pb} = \Delta M_z - \hat{C}_f \cdot t_f \cdot (Slip_{max} - \alpha) \end{cases}$$

$$\Delta M_z < 0$$

$$1. \Delta M_z \geq \hat{C}_f \cdot t_f \cdot (-Slip_{max} - \alpha)$$

$$\Rightarrow \Delta \delta = \frac{\Delta M_z}{\hat{C}_f \cdot t_f} \quad (10)$$

$$2. \Delta M_z < \hat{C}_f \cdot t_f \cdot (-Slip_{max} - \alpha)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \Delta \delta = -Slip_{max} - \alpha \\ \Delta M_{pb} = \Delta M_z - \hat{C}_f \cdot t_f \cdot (-Slip_{max} - \alpha) \end{cases}$$

### 3. 롤 제어기 설계

차량의 전복에 가장 큰 영향을 미치는 롤 운동을 현가장치를 이용하여 제어함으로써 전복의 위험성을 효과적으로 줄일 수 있다. 본 논문에서는 롤각과 롤 각속도를 추정할 수 있다고 가정한다. 롤 각을 최소화 하기 위한 제어입력 롤 모멘트 ( $M_\phi$ )를 구하기 위해 식 (11)과 같은 2-D 롤 모델을 사용하였다.

$$\ddot{\phi} = -\frac{K_{roll}}{I_x} \phi + \frac{m_s (a_y + g \cdot \phi) h_{roll}}{I_x} - \frac{M_\phi}{I_x} \quad (11)$$

롤 모멘트를 구하기 위해 Sliding surface 와 Sliding condition 을 정의한다.

$$S_2 = \dot{\phi} + \lambda \phi, \quad \text{Where, } \lambda : \text{positive const.} \quad (12)$$

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} S_2^2 \leq -\eta_2 |S_2| \quad (13)$$

Where,  $\eta_2$  : positive const.

Sliding surface 의 미분치를 0 으로 만들어주는 제어 입력을 구하여 불연속 항을 고려하고 식 (13) 과 같은 Sliding condition 을 만족 시켜주도록 불연속 항의 Gain  $k_2$  의 값을 계산하면 다음과 같은 제어 입력을 구할 수 있다.

$$M_\phi = M_{\phi,dq} - k_2 \cdot \text{sat} \left( \frac{\dot{\phi} + \lambda \phi}{\Phi_2} \right) \quad (14)$$

$$\text{Where, } M_{\phi,dq} = \lambda \cdot I_x \cdot \dot{\phi} - K_{roll} \cdot \phi$$

$$+ m_s (a_y + g \cdot \sin \phi) \cdot h_{roll}$$

$$k_2 \leq -\eta \cdot I_x$$

이렇게 구한 롤 모멘트는 현가 장치의 감쇠비 (Damping ratio)를 통해 생성이 된다. 감쇠비는 Fig. 5 과 같은 방법으로 조절할 수 있다. 본 논문에서는 현가장치의 속도는 알고 있다고 가정한다.

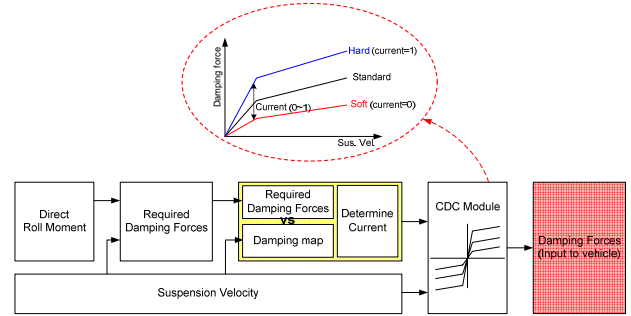


Fig. 5 Schematic diagram CDC module

### 4. 시뮬레이션 결과

앞서 제시된 통합제어의 성능을 검증하기 위하여 ESC 만을 개별 제어를 실시하였을 경우와 비교 하였다. 상용 차량 동역학 해석 프로그램인 CarSim 을 통하여 다양한 주행 상황에서 시뮬레이션을 실시 하였다.

이번 절에서 사용될 주행 시나리오를 Table.1 에 나타내었다.

Table 1. Driving scenario

Case	Scenario	Speed	$\mu$
Case 1	Double lane change ( $\pm 40$ deg)	100km/h	0.85
Case 2	Double lane change ( $\pm 80$ deg)	80km/h	0.5
Case 3	Double lane change ( $\pm 80$ deg)	120km/h	0.85

각 시나리오에 따라 제어를 하지 않은 경우와 ESC 만을 적용시킨 경우 그리고 ESC, AFS, CDC 를 통합하여 적용 시킨 경우에 대해서 요율, 옆 미끄럼 각, 종 속도, 롤 각을 살펴 보았다.

#### 4.1 Case 1

Case 1 의 경우 급격한 조향의 변화는 없고 마찰 계수가 큰 경우이기 때문에 크게 위험한 상황은 아니다.

아래 Fig.6, Fig.7 에서 보는 바와 같이 ESC 만을

작동 시킬 경우 제어를 하지 않았을 경우 보다 안정적인 움직임을 가지고 있지만 급 제동에 의한 감속이 커짐을 보이고 있다. 반면 통합제어는 오히려 감속이 줄어드는 현상을 보이고 있다. 이는 제어를 위한 제동이 가해지지 않았음을 뜻하고 있다. 따라서 크게 위험하지 않은 상황이면 AFS 만으로도 충분한 제어 성능을 나타냄을 말하고 있다.

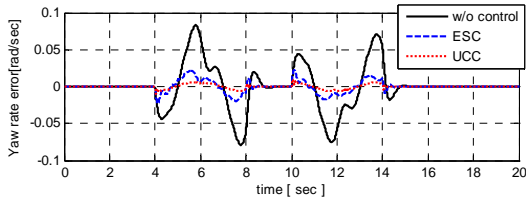


Fig. 6 Yaw rate error and Side slip angle

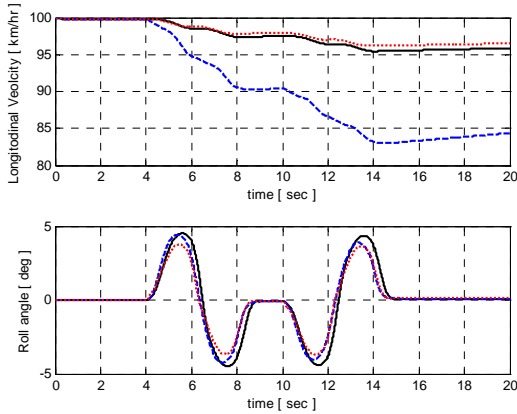


Fig. 7 Longitudinal velocity and Roll angle

#### 4.2 Case 2

Case 2 는 마찰이 작은 도로에서 급격한 조향각의 변화가 있을 경우에 대한 시뮬레이션을 수행한 결과 이다. 아래 Fig.8, Fig.9 에서 보는 바와 같이 ESC 만을 작동시킨 경우 제어를 하지 않은 경우 보다 안정적인 움직임을 보이고 있지만 Case 1 과 같이 감속이 커짐을 보이고 있다. 반면 통합제어의 경우 감속이 현저히 줄어드는 것을 볼 수 있다. Case1 과는 달리 제어를 하지 않았을 경우보다 속력이 줄어드는 것을 볼 수 있는데 이는 AFS 에 의한 요 모멘트의 한계 값을 초과 하였기 때문에 나머지 부족한 요 모멘트를 ESC 즉 제동에 의해 발생시키기 때문이다. 롤 각 또한 줄어드는 것을 볼 수 있다.

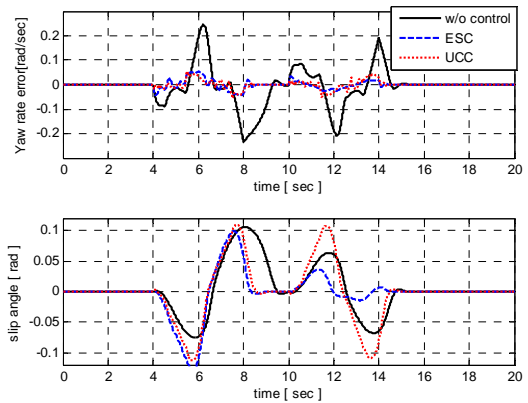


Fig. 8 Yaw rate error and Side slip angle

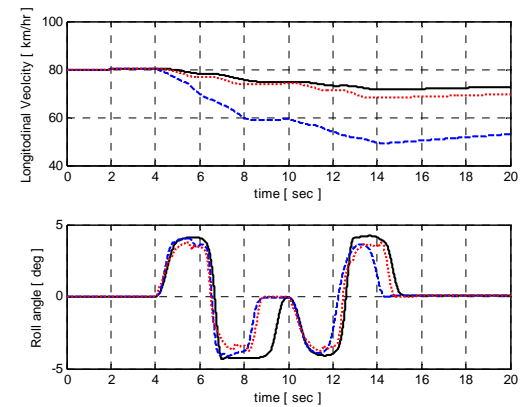


Fig. 9 Longitudinal velocity and Roll angle

#### 4.3 Case 3

Case 3 는 마찰이 크고 급격한 조향각의 변화가 있을 경우에 대한 시뮬레이션을 수행한 결과 이다. 위험한 상황이기 때문에 제어를 하지 않은 경우에는 차량이 전복 현상을 일으키는 것을 볼 수 있다. ESC 만을 작동 시킨 경우와 통합제어를 했을 경우를 비교하면 Case 1, Case 2 와 비슷한 현상을 보이고 있다. 옆 미끄럼각의 경우 ESC 만을 작동 시킨 경우에 안정적이 현상을 보이는데 이는 급격한 감속으로 차량의 속도가 줄었기 때문이다.

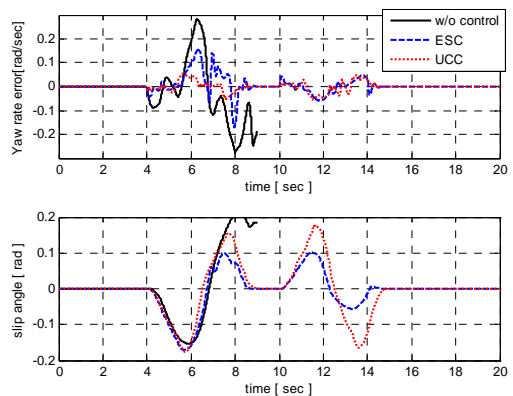


Fig. 10 Yaw rate error and Side slip angle

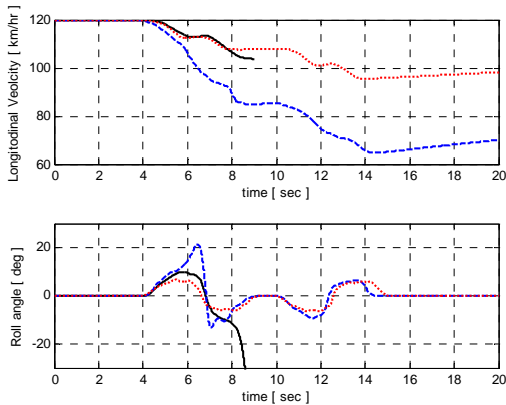


Fig. 11 Longitudinal velocity and Roll angle

## 5. 결론

본 논문에서는 기존의 차량 안정성 제어방법 (ESC)의 단점을 보완해 줄 수 있는 AFS 와 ESC 의 통합 방법에 현가장치의 감쇠비를 이용하여 롤 각을 제어하는 CDC 방법을 제안하였다. 제안된 통합 방법은 구해진 제어입력 요 모멘트의 부호와 차량 바퀴의 슬립 각을 알고 이를 이용하여 AFS 와 ESC 의 작동 영역을 구분하였다. 제어 입력인 요 모멘트는 2 자유도 선형 차량 모델의 한계성을 감안하여 코너링 강성계수에 불확실성을 주어 강건 제어기법을 통하여 구하였다. 또한 CDC 의 경우 AFS 나 ESC 에 관계없이 차량의 롤각에 의해 항상 제어될 수 있도록 하였다. 롤 각과 롤 각속도는 정확히 추정할 수 있다고 가정하였다.

CarSim 을 이용한 다양한 주행조건에서의 시뮬레이션 해석을 통해, 제안된 통합 제어 방법을 검증 하였으며, 우수한 성능을 확인 할 수 있었다.

## 후 기

이 연구는 현대 모비스의 연구 지원에 의해 수행 되었습니다.

## 참고문헌

- (1) Masao Nagai, Motoki Shino, Feng Gao, 2002, "Study on integrated control of active front steer angle and direct yaw moment", *JSAE Review 23*, pp. 309 ~315.
- (2) D. LI, X. SHEN and F. YU, 2006, "INTEGRATED VEHICLE CHASSIS CONTROL WITH A MAIN/

SERVO-LOOP STRUCTURE", *IJAT*, Vol. 7, No. 7, pp. 803-812

- (3) Youseok Kou, Huei Peng, DoHyun Jung, 2006, "Development of an Integrated Chassis Control System for Worst-Case Studies", *AVEC060154*.
- (4) Reza Kazemi, Javad Ahmadi, Ali Ghaffari, Mansour Kabganian, 2006, "Vehicle yaw Stability control through Combined Differential Braking and Active Rear Steering Based on linguistic variables", *AVEC060222*
- (5) Junmin Wang, Raul G. Longoria, 2006, "Coordinated Vehicle Dynamics Control with Control Distribution", *Proceeding of the 2006 American Control Conference*. pp. 5348-5353
- (6) Avesta Goodarzi, Mohsen Alirezaie, 2006, "A New Fuzzy-Optimal Integrated AFS/DYC Control Strategy", *AVEC060050*.
- (7) Kihong Park, Seung-Jin Heo, Taehun Hwang, Ji Yoel Joeng, Sangho Lee, Unkoo Lee, Kyu Hoon Lee, Kangwon Lee, Seung Guan Kee 2006, "Development of an Integrated Chassis Control Algorithms to Improve Vehicle Dynamics", *AVEC060225*.
- (8) W. J. Manning, M. Selby, D. A. Crolla and M. D. Brown, 2002, "Intelligent Vehicle Motion Control", *SAE 2002-01-0821*