Sliding Mode Control 및 Fuzzy Logic Control 방법을 이용한 AFS 및 ARS 제어기 설계 및 성능 평가

송 정 훈*

동명대학교 메카트로닉스공학과

Design and Evaluation of AFS and ARS Controllers with Sliding Mode Control and Fuzzy Logic Control Method

Jeonghoon Song*

Department of Mechatronics Engineering, Tongmyong University, Busan 608-711, Korea
(Received 5 March 2012 / Revised 17 August 2012 / Accepted 20 August 2012)

Abstract : This study is to develop and evaluate an AFS and an ARS controllers to enhance lateral stability of a vehicle. A sliding mode control (SMC) and a fuzzy logic control (FLC) methods are applied to calculate the desired additional steering angle of AFS equipped vehicle or desired rear steer angle of ARS equipped vehicle. To validate AFS and ARS systems, an eight degree of freedom, nonlinear vehicle model and an ABS controllers are also used. Several road conditions are used to test the performances. The results showed that the yaw rate of the AFS and the ARS vehicle followed the reference yaw rate very well within the adhesion limit. However, the AFS improves the lateral stability near the limit compared with the ARS. Because the SMC and the FLC show similar vehicle responses, performance discrimination is small. On split- μ road, the AFS and the ARS vehicle had enhanced the lateral stability.

Key words : AFS(Active Front Steer, 능동 전륜 조향), ARS(Active Rear Steer, 능동 후륜 조향), SMC(Sliding Mode Control, 슬라이딩 모드제어), FLC(Fuzzy Logic Control, 퍼지 로직 제어), Yaw rate(요 속도), Body slip angle(차체 미끄러짐 각), ABS(Anti-lock Brake System, 잠김 방지 제동 장치)

Nomenclature

C_f / C_r	: cornering stiffness of front/rear axle, N/rad
C_{af} / C_{ar}	: cornering stiffness of front/rear tire, N/rad
I_{zz}	: vehicle yaw moment of inertia, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$
m	: vehicle mass, kg
V_x	: longitudinal velocity, m/s
V_y	: lateral velocity, m/s
δ_f / δ_r	: front/rear steer angle, rad
$\dot{\gamma}$	: yaw rate, rad/s
λ, η	: positive constants

1. 서 론

최근 들어 능동 안전 제어(Active safety control) 장치를 장착하여 차량의 안정성 및 조향성을 개선시키고자 하는 다양한 시도들이 이루어지고 있다. 대표적으로 능동 제동, 능동 조향 그리고 능동 현가 장치가 있으며 이들은 주로 횡방향 주행 안정성을 강화시키기 위한 시스템이다. 능동 현가 장치는 차량 각 바퀴에 가해지는 부하를 제어하는 시스템이며¹⁾ 능동 조향 장치는 전륜 혹은 후륜에 추가적인 조향 입력을 더하는 장치이다.²⁾ 한편 능동 제동 장치는 좌우 양쪽 바퀴의 제동력을 달리하여 필요 요 운동을 발생시키는 장치로써 초기 ABS의 개발부터 현

*Corresponding author, E-mail: jhsong@tu.ac.kr

제의 ESP 상용화까지 가장 활발히 개발이 진행되고 있는 시스템이다.³⁾

이 연구는 능동 안전 제어 장치들 중 능동 조향 장치인 AFS(Active Front Steer) 및 ARS(Active Rear Steer)의 제어기 개발 및 성능 평가에 관한 것이다. AFS는 독일의 ZF Lenksysteme와 BMW AG 사에서 상용화된 시스템으로 운전자의 조향 입력에 부가적인 능동 전륜 조향 입력을 가함으로써 조향감 향상, 응답속도 향상 그리고 차량 안정성 확보를 위한 시스템이다. Rack and pinion 방식의 EPS(Electric Power Steering)에 AFS용 모터 및 Planetary gear set 등을 장착하여 필요 능동 조향각을 생성하는 것이 일반적인 구조이다.⁴⁾

AFS 관련 연구는 2004년 참고문헌⁴⁻⁶⁾이 발표된 후 본격적으로 이루어지고 있다. 특히 AFS 제어기를 설계하기 위하여 다양한 제어 방법이 제안되었다. Oraby는 LQR 기법을 이용하였으며⁷⁾ Karbalaee 등과⁸⁾ March와 Shim은 FLC 방법을 이용하였다.¹⁾ 또한 Junjie는 SMC(Sliding Mod Control)을 이용하여 AFS의 제어기를 개발하였다.²⁾ 요즘에는 능동 현가 및 능동 제어 장치 등과의 통합 제어에 관련된 연구가 주로 실시되고 있다.

ARS는 4륜 조향 장치의 한 단계 더 발전된 형태로 볼 수 있으며 후륜에 필요 조향각을 SBW(Steer By Wire) 등을 이용하여 제어하는 장치이다. 후륜 조향을 이용하여 횡방향 안정성을 개선하기 위하여 Song과 Che는 PID 제어법을 이용한 제어기를 설계하였으며³⁾ Junjie는 SMC를 이용한 ARS 제어기를 개발하였다.²⁾

하지만 지금까지 발표된 연구 결과는 하나의 제어 방법을 이용하여 AFS 또는 ARS를 개발하고 이들의 성능 평가를 실시한 것이 대부분이다. 즉, 지금까지의 연구 결과로는 이들을 제어할 수 있는 다양한 제어기의 성능을 비교 평가하기는 어려우며 이들을 특성에 맞는 최적의 제어 방법을 구하기 위한 연구 역시 매우 부족하다.

따라서 이 연구에서는 SMC 및 FLC(Fuzzy Logic Control)를 이용하여 AFS 및 ARS 제어기를 각각 개발하였으며 이들의 성능을 비교 평가한다.

2. 차량 모델 및 제어기 설계

2.1 차량 모델

이 연구에서는 8 자유도 차량 모델 및 2 자유도 차량 모델이 사용되었다. 8 자유도 모델은 차량 동작 모사 및 FLC 제어기 설계에 사용되었으며 SMC 및 FLC 제어기 성능 평가에 이용되었다. 한편 2 자유도 모델은 SMC 제어기 설계에 이용되었다.

2 자유도 차량 모델은 Bicycle (혹은 Single-track) 차량 모델이라고도 하며 현재까지 다양한 연구에서 사용되고 있는 차량 모델이다. 2 자유도는 횡방향 운동 및 요 운동을 의미하며 형태의 단순함에 비하여 약 0.3g의 횡방향 가속도까지는 차량의 기본적인 운동을 잘 표현한다.⁹⁾

참고문헌 (2)와 (9)에 따르면 전륜 조향 차량의 2 자유도 모델은 다음과 같은 상태 공간(State space) 방정식으로 표현할 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (1)$$

여기서

$$x = \begin{pmatrix} V_y \\ \gamma \end{pmatrix}, u = [\delta_f]$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{C_f + C_r}{m V_x} - V_x - \frac{l_f C_f - l_r C_r}{m V_x} \\ -\frac{l_f C_f + l_r C_r}{I_{zz} V_x} - \frac{(l_f^2 C_f + l_r^2 C_r)}{I_{zz} V_x} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{C_f}{m} \\ \frac{C_r}{I_{zz}} \end{bmatrix}$$

4 륜 조향 차량의 경우 다음과 같은 상태 공간 방정식으로 나타낼 수 있다.²⁾

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2)$$

여기서

$$u = \begin{bmatrix} \delta_f \\ \delta_r \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{C_f}{m} & \frac{C_r}{m} \\ \frac{l_f C_f}{I_{zz}} & \frac{l_r C_r}{I_{zz}} \end{bmatrix}$$

Fig. 1은 8 자유도 차량 모델을 나타내고 있다. 8 자유도 차량 모델에 대한 보다 자세한 사항은 참고 문헌 (3)과 (10)을 참고하기 바란다.

Fig. 1 8 degree of freedom vehicle model^{3,10)}

2.2 SMC를 이용한 AFS 및 ARS 설계

차량 운동은 불확실성(Uncertainty)이 큰 환경에서 이루어지며 매우 큰 비선형성을 보인다. 따라서 차량의 안정성을 보장하기 위해 제어기는 다양한 인자의 불규칙한 변화 및 외란에 강인한 특성을 가져야 한다. SMC는 비선형성 및 외란에 강인하며 제어하고자하는 인자들에 대하여 정확한 값을 알지 못하더라도 제어가 가능하다는 장점이 있다.¹¹⁾

AFS는 단일 입력 단일 출력(Single input single output) 시스템이므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.²⁾

$$\ddot{\gamma} = f + bu \quad (3)$$

여기서 u 는 제어 입력이며 δ_f 를 뜻한다. $\ddot{\gamma}$ 는 요 가속도를 의미하고 f 는 차량의 횡방향 운동을 나타낸다. f 의 정확한 값은 알지 못하나 $\hat{f}$ 로 추정한다. 또한 f 의 최대 추정 오차는 f^* 로 가정하며 b 는 제어 이득을 나타낸다.

제어 오차 e 및 오차 변화량 $\dot{e}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$e = \text{yaw rate} - \text{reference yaw rate} = \dot{\gamma} - \dot{\gamma}_d \quad (4)$$

$$\dot{e} = \ddot{\gamma} - \ddot{\gamma}_d \quad (5)$$

reference yaw rate는 목표 요 속도를 의미하며 다음과 같이 계산할 수 있다.⁹⁾

$$\dot{\gamma} = \frac{V_x}{l_f + l_r + \frac{m V_x^2 (l_r C_{ar} - l_f C_{af})}{2 C_{af} C_{ar} (l_f + l_r)}} \delta_f \quad (6)$$

한편 Sliding surface는 다음과 같이 정의한다.¹¹⁾

$$S = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} \int_0^t e dr \quad (7)$$

여기서 λ 는 양수이며 $n=2$ 로 설정한다. Sliding surface의 미분 값은 식 (4), (5), (7)을 이용하면

$$\begin{aligned} \dot{S} &= \dot{e} + \lambda e \\ &= f + bu - \ddot{\gamma}_d + \lambda e \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 연속제어법(Continuous control law)를 만족시키기 위한 제어 입력의 근사치는

$$\hat{u} = \frac{1}{b} (-\hat{f} + \ddot{\gamma}_d - \lambda e) \quad (9)$$

가 된다. 입력 오차를

$$\bar{u} = -\frac{1}{b} (\eta + \xi) \text{sgn}(S) \quad (10)$$

로 정의하면 제어입력 $u = \hat{u} + \bar{u}$ 이므로

$$\dot{S} = f - \hat{f} - (\eta + \xi) \text{sgn}(S) \quad (11)$$

가 된다. 만약 $\xi = f^*$ 로 설정하면

$$S \times \dot{S} = S \times [f - \hat{f} - (\eta + f^*) \text{sgn}(S)] \quad (12)$$

가 된다. 이 결과는 다음과 같은 미끄러짐 조건을 만족시키게 된다.

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} S^2 = S \times \dot{S} \leq -\eta |S| \leq 0 \quad (13)$$

따라서 제어 입력 u 는 식 (1), (9), (10)을 이용하면 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} u = \delta_f &= -\frac{1}{b_2} \left[-a_{21} V_y - a_{22} \dot{\gamma} + \ddot{\gamma}_d - \lambda (\dot{\gamma} - \dot{\gamma}_d) \right. \\ &\quad \left. - (\eta + f^*) \text{sat} \left(\frac{S}{\Phi} \right) \right] \end{aligned} \quad (14)$$

제어 입력 δ_f 는 운전자의 조향 입력 (δ_{fd})과 AFS에 의한 추가적인 조향 입력 ($\Delta \delta_f$)의 합을 의미한다.

ARS도 AFS와 비슷한 방법으로 식 (2)를 이용하여 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} u = \delta_r &= \frac{1}{b_{22}} \left[-a_{21} V_y - a_{22} \dot{\gamma} - b_{21} \delta_f + \ddot{\gamma}_d - \lambda (\dot{\gamma} - \dot{\gamma}_d) \right. \\ &\quad \left. - (\eta + f^*) \text{sat} \left(\frac{S}{\Phi} \right) \right] \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 δ_f 는 운전자의 조향 입력 δ_{fd} 를 의미한다.

2.3 FLC를 이용한 AFS 및 ARS 설계

FLC도 비선형제어법의 일종으로 입력이나 모델 인자의 값을 정확하게 알지 못해도 우수한 결과를 얻을 수 있는 강인성을 가진 제어방법이다. 또한 제어기의 구성이 상대적으로 간단하고 복잡한 수식의 유도나 결과식이 필요하지 않다는 장점이 있다.¹²⁾

FLC의 입력은 식 (4)와 (5)에 나타낸 요 속도 오차 및 오차 변화량이다. 출력은 AFS는 능동 전륜 조향각($\Delta\delta_f$)이며 ARS는 능동 후륜 조향각(δ_r)이다. 입력은 각각 5개의 삼각형 멤버쉽 함수로 구성되며 출력은 7개의 삼각형 멤버쉽 함수로 이루어진다(Figs. 2, 3). 또한 Mamdani 퍼지 추론 모델을 사용한다.¹²⁾

Table 1 및 2는 요 속도 오차 입력과 요 가속도 오차 입력에 대한 AFS 및 ARS의 퍼지 규칙을 나타낸다. 표에서 NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB는 각각 Negative Big, Negative Medium, Negative Small, Zero

Fig. 2 Membership functions for inputs e and $\dot{e}$

Fig. 3 Membership functions for outputs $\Delta\delta_f$ and δ_r

Table 1 Fuzzy rules for corrective front steer angle ($\Delta\delta_f$)

$\Delta\delta_f$		Change in yaw rate error				
		NB	NM	ZE	PM	PB
Yaw rate error	NB	NB	NB	NM	NM	NS
	NM	NB	NM	NM	NS	NS
	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
	PM	PS	PS	PM	PM	PB
	PB	PS	PM	PM	PB	PB

Table 2 Fuzzy rules for rear steer angle (δ_r)

δ_r		Change in yaw rate error				
		NB	NM	ZE	PM	PB
Yaw rate error	NB	PB	PB	PM	PM	PS
	NM	PB	PM	PM	PS	PS
	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
	PM	NS	NS	NM	NM	NB
	PB	NS	NM	NM	NB	NB

Equal, Positive Small, Positive Medium, Positive Big을 나타낸다.

3. 시뮬레이션 결과

이 연구에서 개발된 SMC 및 FLC를 이용한 AFS와 ARS의 성능 평가는 젖은 아스팔트와 눈길에서 급 제동 입력이 가해졌을 때 Sinusoidal 조향 입력과 Step 조향입력을 이용하여 실시하였다. 또한 좌우 마찰계수가 다른 노면(Split- μ)에서의 주행 성능 평가도 실시하였다. ABS에 대한 자세한 사항은 참고 문헌 (3) 및 (10)을 참고하기 바란다. 시뮬레이션은 Matlab/Simulink를 이용하여 실시하였다.

3.1 Sinusoidal 조향 입력

Figs. 4와 5는 각각 젖은 아스팔트 노면과 눈길에서 sinusoidal 조향 입력을 가할 때 차량 및 제어기의 응답을 나타내고 있다. Figs. 4(a)와 5(a)는 조향 입력 및 AFS에 의한 전륜 능동 조향 입력 그리고 ARS에 의한 후륜 능동 조향 입력을 나타낸다. 초기 속도는 젖은 아스팔트의 경우 25m/s, 눈길에서는 15m/s로 설정하였으며 0 초에서부터 ABS가 동작하는 것으로 가정한다.

시뮬레이션 결과를 살펴보면 젖은 아스팔트 노면에서 AFS 또는 ARS를 장착한 차량은 목표 요 속도를 매우 잘 추종하는 것을 나타내고 있다(Fig. 4(c), (d)). 요 속도는 ABS만을 장착한 차량에 비하여 다소 적지만 Body slip angle은 크게 감소하였음을 나타내고 있다(Fig. 4(b)). 요 속도가 목표 요 속도를 잘 추종하는 것은 차량의 안정성이 향상되었다는 것을 의미하며 Body slip angle이 감소하였다는 것은 조향 성능이 개선되었다는 것을 의미한다.^{3,10)} 이러한 결과는 AFS 및 ARS가 차량 안정성 향상만을 위하여

Fig. 4 Vehicle responses on wet asphalt with sinusoidal steering input

Fig. 5 Vehicle responses on snow covered road with sinusoidal steering input

설계되었다는 점에서 다소 놀라운 결과이다. 일반적으로 안정성 및 조향 성능을 동시에 향상하기 위해서는 두 개의 제어 입력이 필요하지만 AFS 및 ARS는 조향각만을 제어하기 때문이다.⁸⁾ 하지만 이러한 결과는 특정 운전 조건에서만 얻을 수 있다.¹³⁾

눈길에서의 시뮬레이션 결과도 AFS 차량 및 ARS 차량의 요 속도는 목표 요 속도를 잘 추종하고 있음을 나타낸다. body slip angle은 ABS 차량에 비하여 다소 증가한 결과를 보여주나 요 속도가 ABS 차량에 비하여 커 조향 성능의 악화는 큰 문제가 되지 않을 것으로 판단된다.

Figs. 4(d) 및 5(d)는 SMC와 FLC 제어기를 적용하였을 때의 출력 오차를 나타낸다. AFS와 ARS 모두 SMC를 적용하였을 때 오차가 적음을 알 수 있다. 하지만 제동력에 의하여 차속이 감소하면 FLC에 의한 오차가 더 적음을 볼 수 있다. 또한 AFS 차량이 ARS 차량보다 오차의 최대값이 적어 AFS가 횡방향 안정성 개선에 더 효과적인 것을 나타낸다.

3.2 Step 조향 입력

AFS 및 ARS를 장착한 차량 및 제어기의 성능 평가를 위하여 Step 조향 입력을 가하였을 때의 응답을 Figs. 6과 7에 나타내었다. 시뮬레이션 조건은 앞의 실험과 동일하게 설정하였다.

시뮬레이션 결과를 보면 젖은 아스팔트에서 ARS를 장착한 차량은 제어 방법에 관계없이 모두 발산하는 것을 나타내고 있다(Fig. 6). 즉, 타이어와 노면과의 점착 한계(Adhesion limit) 부근의 운전 조건에서는 ARS가 AFS에 비하여 상대적으로 불안정하며 점착 한계도 좁음을 알 수 있다. 이는 제동 시 앞 바퀴에 차량 하중이 집중되며 앞 바퀴의 조향이 뒷 바퀴의 조향보다 차량 안정성 개선 측면에서 보다 효과적이기 때문으로 판단된다.

AFS 차량은 목표 요 속도를 잘 추종하며 Body slip angle도 ABS 차량과 비슷함을 나타내고 있다. 특히 조향 입력에 대한 요 속도의 응답 속도는 ABS 차량에 비하여 빨라졌음을 나타내고 있다. 응답 속도가 빨라졌다는 것은 충돌 회피 등과 같은 차량의 안정

Fig. 6 Vehicle responses on wet asphalt with step steering input

Fig. 7 Vehicle responses on snow covered road with step steering input

성이 개선됨을 의미한다.⁸⁾

눈길에서 step 조향 입력이 가해졌을 때의 차량 및 제어기의 응답은 Fig. 7에 나타내었다. AFS 차량 및 ARS 차량 모두 만족스러운 요 속도 응답을 보여주고 있으며 응답 속도도 ABS 장착 차량에 비하여 매우 빨라졌음을 나타내고 있다. Body slip angle이 다소 증가하였으나 앞서와 마찬가지로 요 속도가 상대적으로 크므로 차량 조향 성능의 악화는 거의 발생하지 않은 것으로 판단된다.

한편 SMC AFS 차량은 젖은 아스팔트 노면에서 FLC AFS 차량에 비하여 제어 오차를 크게 감소시켰다(Figs. 6(d)). 또한 SMC ARS를 장착한 차량은 눈길에서 FLC ARS 차량에 비하여 오차를 줄일 수 있음을 확인할 수 있다. 하지만 이러한 오차의 차이에도 불구하고 전체적인 차량 응답 차이는 크지 않았다(Figs. 6(c), 7(c)). 이는 요 속도에 비하여 요 속도 오차가 매우 적기 때문이며 따라서 두 제어 방법에 의하여 설계된 AFS 및 ARS는 적절히 동작하고 있음을 의미한다.

3.3 좌우 마찰계수가 다른 노면(split- μ road)

Figs. 8 및 9는 좌우 마찰계수가 다른 노면 조건에서 차량 및 제어기 응답을 나타낸다. 이 때 조향 입력은 없으며($\delta_f = 0$) 과도한 제동 입력이 가해져 ABS가 0초에서부터 동작한 경우를 가정한다. 차량의 초기 속도는 30m/s이며, 차량의 COG를 기준으로 좌측은 눈길, 우측은 젖은 아스팔트로 가정하였다.

좌우 마찰계수가 다른 노면 조건에서 제동 입력이 가해지면 좌우 타이어에서 발생하는 힘의 차이로 인하여 조향 입력이 가해지지 않더라도 차량은 마찰계수가 큰 쪽으로 진행하게 된다.¹⁰⁾ 즉, Fig. 8(b), (c) 및 Fig. 9에서와 같이 ABS만을 장착한 차량의 경우 횡방향 운동이 크게 발생함을 알 수 있다. 하지만 AFS 또는 ARS를 장착한 차량은 횡방향 운동이 거의 발생하지 않아 직진 운동에 가까운 특성을 보여주고 있다. 이는 식 (6)에서 목표 요 속도가 0이며 따라서 제어기는 차량이 직진하도록 조향 입력을 제어하기 때문이다(Fig. 8(a)). 결과적으로 차량은 노면 조건에 관계없이 운전자의 조향 입력에 따라 진행한다.

Fig. 8 Vehicle responses on split-μ road

Fig. 9 Vehicle trajectories on split-μ road

Fig. 9는 차량의 주행 궤적을 나타낸다. 그림에서 -s는 SMC를, -f는 FLC를 의미한다. ABS 차량은 노면 마찰계수가 큰 쪽으로 차량이 진행하나 AFS 또는 ARS를 장착한 차량은 거의 직진 운동하는 것을 볼 수 있다. 즉, 차량의 주행 안정성은 크게 개선된 것을 확인할 수 있다. 한편 그림은 ARS 차량의 제동

거리가 AFS 차량에 비하여 매우 짧아졌음을 나타내고 있다. 이는 제동시 차량 하중의 이동으로 인하여 앞 바퀴에서 발생하는 타이어 힘이 제동 거리에 보다 큰 영향을 미치기 때문이다. 즉, ARS 차량은 전륜에 조향 입력이 발생하지 않기 때문에 최대의 종방향 힘을 얻을 수 있다.

Fig. 8(d)는 좌우 마찰계수가 다른 노면 조건에서 SMC 방법을 적용하였을 경우 AFS 및 ARS 차량의 요 속도 오차는 FLC 방법을 적용하였을 때보다 감소한 것을 나타낸다. 하지만 이러한 요 속도 오차는 차량의 응답(Figs 8(b),(c)) 및 주행 궤적에 큰 영향을 미치지 못하고 있다.

4. 결론

이 연구는 Sliding mode control 및 Fuzzy logic control 방법을 이용하여 AFS 및 ARS 제어를 설계하고 차량 모델을 이용하여 이들의 성능을 비교 평가하기 위하여 실시되었다. 이 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) SMC 및 FLC를 이용하여 설계된 AFS 및 ARS는 점착 한계 안에서는 차량의 횡방향 안정성을 강화시킴을 확인할 수 있었다. 하지만 점착한계 부근에서 AFS는 ARS에 비하여 차량 안정성 확보 측면에서 보다 우수한 성능을 발휘하였다. 이는 제동시 발생하는 하중 이동으로 앞 바퀴 조향각 제어가 뒷 바퀴 조향각 제어 보다 효과적이기 때문인 것으로 사료된다.
- 2) 이 연구에서 사용되어진 운전조건에서는 SMC가 FLC에 비하여 요 속도 오차를 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 하지만 요 속도 오차는 요 속도에 비하여 상대적으로 적어 차량 응답 차이는 거의 발생하지 않았다.
- 3) 좌우 마찰계수가 다른 노면 조건에서 AFS 및 ARS 장착 차량은 거의 직진 운동을 하여 차량의 횡방향 안정성이 개선된 것을 확인할 수 있다.

후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2011-0021973).

References

- 1) C. March and T. Shim, "Integrated Control of Suspension and Front Steering to Enhance Vehicle Handling," Proc. IMechE, Part D: J. Automobile Engineering, Vol.221, pp.377-391, 2007.
- 2) H. Junjie, Integrated Vehicle Dynamics Control Using Active Steering, Driveline and Braking, Ph. D. Dissertation, University of Leeds, Leeds, 2005.
- 3) J. Song and W. S. Che, "Comparison and Evaluation of Brake Yaw Motion Controllers with an Antilock Brake System," Proc. IMechE, Part D: J. Automobile Engineering, Vol.222, pp.1273-1288, 2008.
- 4) W. Klier, G. Reimann and W. Reinelt, "Concept and Functionality of the Active Front Steering System," SAE 2004-21-0073, 2004.
- 5) W. Klier and W. Reinelt, "Active Front Steering (Part 1): Mathematical Modeling and Parameter Estimation," SAE 2004-01-1102, 2004.
- 6) W. Reinelt, W. Klier, G. Reimann, W. Schuster and R. Großheim, "Active Front Steering (Part 2): Safety and Functionality," SAE 2004-01-1101, 2004.
- 7) W. A. H. Oraby, "Improvement of Vehicle Lateral Stability during Overtaking Process by Active Front Steering System," SAE 2007-01-0810, 2007.
- 8) R. Karbalaee, A. Ghaffari, R. Kazemi and S. H. Tabatabaei, "Design of an Integrated AFS/DYC based on Fuzzy Logic Control," IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, pp.1-6, 2007.
- 9) R. Rajamani, Vehicle Dynamics and Control, Springer, New York, 2006.
- 10) J. Song, "Comparison and Evaluation of Steer Yaw Motion Controllers with an Anti-lock Brake System," Proc. IMechE, PartD: J. Automobile Engineering, Vol.223, No.4, pp.503-518, 2009.
- 11) J. J. Slotine and W. Li, Applied Nonlinear Control, Prentice-Hall, New Jersey, 1991.
- 12) H. T. Nguyen, N. R. Prasad, C. L. Walker and E. A. Walker, A First Course in Fuzzy and Neural Control, Chapman & Hall/CRC, New York, 2003.
- 13) J. Y. Wu, H. J. Tang, S. Y. Li and S. B. Zheng, "Integrated Control System Design of Active Front Wheel Steering and Four Wheel Torque to Improve Vehicle Handling and Stability," Int. J. Automotive Technology, Vol.8, No.3, pp.299-308, 2007.