

SUV 차량의 횡방향 운동 및 승차감 개선을 위한 제동장치를 이용한 통합운동제어장치의 연구

송정훈*[#]

*동명대학교 메카트로닉스공학부

A Study on the Integrated Dynamic Control System to Improve the Lateral Dynamics and Ride Comfort of SUV Vehicles

Jeonghoon Song*[#]

*School of Mechatronics Engineering, Tongmyong University

(Received 4 June 2018; received in revised form 9 June 2018; accepted 27 June 2018)

ABSTRACT

This paper describes an Integrate Dynamic Control system with Brake System (IDCB) for SUV vehicles. The system was developed to stabilize the lateral dynamics, maintain the steerability and improve the ride comfort on various roads. A fuzzy logic control method is used to design the IDCB. The performance of the IDCB is validated under different road and driving conditions. The results show that the IDCB tracks the reference yaw rate under all tested conditions; in addition, it reduces the body slip angle and roll angle. When a vehicle runs on a split- μ road and a brake input is applied, the IDCB virtually eliminates the lateral dynamics. Thus, the IDCB improves the lateral stability, preserves the steerability and enhances the ride comfort of vehicles.

Key Words : SUV (Sports Unility Vehicle, 스포츠 유틸리티 자동차), IDCB (Integrated Dynamic Control system with Brake system, 제동장치를 이용한 통합운동제어장치), Fuzzy Logic Control (퍼지논리제어), Yaw Rate (요속도), Lateral Stability (횡방향 안정성)

1. 서 론

미끄러운 노면에서 SUV (Sports Utility Vehicle) 차량이 선회 운동을 하면 원심력에 의하여 발생하는 롤 (roll) 운동은 선회력을 감소시켜 조종성과 차량 안정성 그리고 승차감을 동시에 악화시킨다. 이는 SUV 차량의 무게 중심이 일반 승용차에 비하여 높기 때문에 보다 쉽게 발생한다^[1]. 마찬가지로 요

(yaw) 운동이나 피치 (pitch) 운동도 조향성능 및 안정성 그리고 승차감에도 악영향을 미칠 수 있다.

이를 억제하기 위하여 다양한 방법들이 연구되며 제안되고 있다. 스테빌라이저 바 (stabilizer bar)에 유압식 구동기를 장착한 유압식 능동 롤 제어 (active roll control, ARC) 시스템에 대한 연구는 1990년대부터 진행되었고, 최근 고급 승용차량을 중심으로 실용화 되고 있다^[2].

한편 제동, 조향, 현가 장치를 통합제어하여 롤 운동 발생을 억제하거나 최적화하여 차량 안정성 및 조향성을 개선시키고자 하는 노력도 지속적으로

Corresponding Author : jhsong@tu.ac.kr

Tel: +82-51-629-1537, Fax: +82-51-629-1559

진행되고 있다. Song은 제동 장치와 조향 장치를 통합제어하기 위한 연구를 실시하고 있으며^[3,4] Lul 등도 롤 운동의 억제를 위한 연구를 실시하였다^[5]. Seo 등은 다층 구조를 이용한 Unified Chassis Control을 개발하여 차량의 안정성을 개선하였다^[6].

하지만 이러한 방법들은 새로운 하드웨어를 요구하거나 보다 복잡한 소프트웨어가 필요하게 된다. 특히 완벽한 통합 제어가 이루어지지 않는다면 제어기 간의 상호 간섭으로 인하여 오히려 성능 악화가 발생할 가능성이 커지게 된다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 이 연구에서는 제동장치만을 이용한 통합제어 방법을 제안하고자 한다. 일반적인 4 바퀴 차량은 좌우 바퀴의 제동력 차이로 요 운동을 발생시킬 수 있다. 전륜 및 후륜의 좌우 제동력 차이에서 발생하는 요 운동을 각각 제어하는 것이 아니라 통합 제어하여 SUV 차량의 조향 성능 향상 및 주행 안정성 강화를 얻고자 하였다. 이러한 제어 방법이 성공적으로 이루어진다면 기존의 ABS (Anti-lock Brake System) 시스템에 비하여 추가적인 하드웨어는 거의 요구하지 않으며 소프트웨어의 개선만으로 기존 전자제어 제동 장치를 장착한 차량의 성능 향상을 얻을 수 있게 된다.

2. 차량 모델

이 연구에서 사용된 차량 모델은 종방향 운동, 횡방향 운동, 요 운동, 롤 운동 그리고 네 바퀴의 회전 운동을 나타내는 8자유도 차량 모델이다. SUV 차량이 평지를 주행한다고 가정하면 피치 운동, 차체와 바퀴의 상하 운동은 무시할 수 있다.

따라서 차량 모델은 다음과 같다.

종방향 운동

$$m_{total}(\dot{v}_x - v_y \dot{\gamma}) - m_s h_s \dot{\gamma} \phi = \sum_{i=1}^4 F_{x_i} \quad (1)$$

횡방향 운동

$$m_{total}(\dot{v}_y + v_x \dot{\gamma}) + m_s h_s \ddot{\phi} = \sum_{i=1}^4 F_{y_i} \quad (2)$$

요 운동

$$I_z \ddot{\gamma} = a F_{y_1} + \frac{t_f}{2} F_{x_1} + a F_{y_2} - \frac{t_f}{2} F_{x_2} - b F_{y_3} + \frac{t_r}{2} F_{x_3}$$

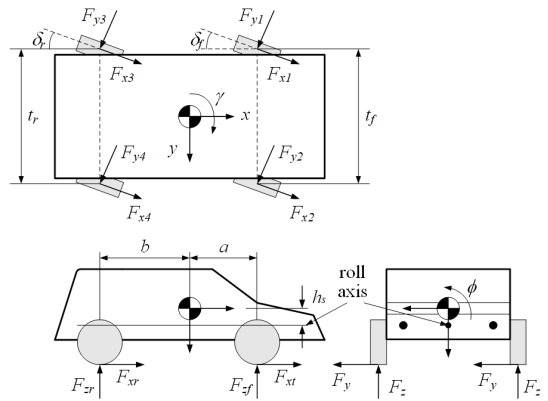


Fig. 1 Sports utility vehicle model

$$-b F_{y_4} - \frac{t_r}{2} F_{x_4} \quad (3)$$

롤 운동

$$I_x \ddot{\phi} + B_{roll} \dot{\phi} + K_{roll} \phi = m_s g h_s \sin \phi - m_s (\dot{v}_y + v_x \dot{\gamma}) h_s \cos \phi \quad (4)$$

바퀴회전운동

$$I_{w_i} \omega_i = -T_b - F_{t_i} R_w - T_{roll_i} \\ = -P_{b_i} A_w R_b - F_{t_i} R_w - F_{z_i} f_{r_i} R_w \quad (5)$$

여기서 $i = 1, 2, 3, 4$ 이며 각각 좌측 앞바퀴, 우측 앞바퀴, 좌측 뒷바퀴, 우측 뒷바퀴를 의미한다.

3. 차량 통합운동제어시스템

3.1 차량 통합운동제어시스템 (IDCB)

이 연구에서 개발된 전륜 및 후륜 제동장치를 통합 제어하는 차량 통합운동제어시스템 (Integrated Dynamics Control System with Brake system, IDCB)은 2단 구조로 구성되어 있다. 1단계에서는 차량의 주행 상태 및 주행 환경 그리고 운전자 입력 등을 고려하여 목표 요 속도 (reference yaw rate)와 목표 미끄러짐 각 (reference side slip angle)을 계산한다. 2단계에서는 목표 요 속도 및 목표 미끄러짐 각을 구현하기 위하여 전륜 좌우 바퀴의 제동력 차이와 후륜 좌우 바퀴의 제동력 차이를 계산한다. 좌측 및 우측 바퀴의 제동력 차이는 요 모멘트를 발생시

키며 이를 이용하여 목표 요 속도와 목표 미끄러짐 각을 구현할 수 있다.

이 연구에서 설정된 목표 요 속도는

$$\dot{\gamma} = \frac{v_x \delta_f}{a+b+K \times m_{total} \times v_x^2} \quad (6)$$

$$K = \frac{bC_{\alpha r} \mu_r - aC_{\alpha f} \mu_f}{2(C_{\alpha f} \mu_f)(C_{\alpha r} \mu_r)(a+b)}$$

이다. 과도한 제동 또는 조향 입력에 의하여 차량의 불안정 상태를 방지하기 위하여 다음과 같은 최대 허용값을 가지도록 한다⁽⁴⁾.

$$\dot{\gamma}_{ref} = \begin{cases} \dot{\gamma}_{ref} & |\dot{\gamma}_{ref}| \leq 0.85g \\ 0.85 \frac{\mu \times g}{v_x} \text{sgn}(\dot{\gamma}_{ref}) & |\dot{\gamma}_{ref}| > 0.85g \end{cases} \quad (7)$$

또한 목표 미끄러짐 각은 0으로 가정한다.

각 바퀴의 제동력은 다음과 같이 결정된다. 차량의 선회시 전륜 안쪽 바퀴와 후륜 바깥쪽 바퀴의 제동력은 운전자의 제동 입력에 의해 결정되며 전륜 바깥쪽 바퀴와 후륜 안쪽 바퀴는 IDCB에 의하여 계산된 제동력이 사용된다. 이 때 운전자의 제동 압력이 너무 크거나 IDCB에 의하여 계산된 값이 너무 커 바퀴 잠김 현상이 발생되면 ABS가 개입하여 잠김 현상을 방지한다.

한편 이 연구에서 개발되어질 IDCB의 제어 입력은 차량 모델을 이용하여 계산된 요 속도와 목표 요 속도의 차이인 요 속도 오차 (e_γ)와 미끄러짐 각과 목표 미끄러짐 각의 차이인 미끄러짐 각 오차 (e_β) 이다. 출력은 전륜 두 바퀴의 제동력 차이와 후륜 두 바퀴의 제동력 차이이다. 즉, MIMO (Multi Input Multi Output) 시스템이며 성공적으로 구현하기 위해서 퍼지 논리 제어기 (Fuzzy Logic Controller, FLC)를 사용하였다.

3.2 퍼지 논리 제어기 (FLC)

퍼지 논리 제어는 시스템의 수학 모델 및 여러 상태 변수에 대한 정확한 값을 알지 못하여도 적용 가능하며 외란에도 강한 제어 방법 중 하나이다. 또한 비선형 모델에서도 사용 가능하며 특히 입력이나 출력이 여러 개이더라도 제어기의 설계가 상대적으로 쉽다는 장점이 있다⁽⁷⁾.

이 연구에서는 Mamdani 퍼지 추론 모델을 사용하여 퍼지 제어를 설계하였다⁽⁷⁾. 개발된 제어기는 요 속도 오차와 미끄러짐 각 오차가 입력이며 각각 [-0.5 0.5]와 [-1 1]의 전체집합 (universe of discourse)을 가진다. 또한 각각 7개의 삼각형 멤버십 함수 (membership function)로 구성된다.

IDCB의 출력은 전륜 안쪽 바퀴의 제동 압력 및 후륜 바깥쪽 바퀴의 제동 압력으로써 각각 [-0.5 0.5]와 [-0.5 0.5]의 전체집합을 가진다. 이들은 각각 9개의 삼각형 멤버십 함수로 구성된다.

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

개발된 IDCB의 성능 평가는 건조한 아스팔트 및 눈길 그리고 좌우마찰계수가 다른 노면 (split-μ road)에서 실시되었다. 건조한 아스팔트 및 눈길에서는 운전자의 제동 입력 없이 조향입력만 가해졌을 때를 가정하였다. 좌우마찰계수가 다른 노면에서는 운전자에 의하여 전제동압력 이 가해지며 조향입력은 없다고 가정한다. 시뮬레이션은 Matlab/Simulink를 이용하여 실시되었다.

4.1 건조한 아스팔트 노면에서 성능평가

건조한 아스팔트 노면에서 두 가지 운전 조건으로 SUV 차량의 IDCB 성능 평가를 실시하였다. 먼저 정현파형 (sinusoidal wave)의 조향입력을 가정하였으며 (Fig. 2(a)) 둘째는 step 조향 입력을 가정하였다 (Fig. 3(a)). 차량의 초기 주행 속도는 30 m/s를 가정하였다. 운전자에 의한 제동 입력은 주어지지 않았으나 운전 조건에 따라 IDCB가 개입하여 제동 압력을 제어하도록 하였다.

두 운전 조건 모두에서 IDCB는 차량의 요 속도를 목표 요 속도에 잘 추종하도록 제어하였으며 (Figs. 2(c), 3(c)) 미끄러짐 각은 최소로 억제되고 있음을 확인할 수 있다 (Figs. 2(d), 3(d)). 결과적으로 IDCB는 SUV 차량의 조향성능 (제어성) 및 안정성을 동시에 강화시킴을 확인할 수 있다⁽³⁾.

한편 롤 각 및 롤 속도는 IDCB를 장착하지 않은 차량의 것들이 크며 변화량도 크게 나타났다 (Figs. 2, 3 (e), (f)). 이는 SUV 차량이 선회할 때 IDCB 차량의 승차감이 개선되었음을 의미한다⁽⁵⁾.

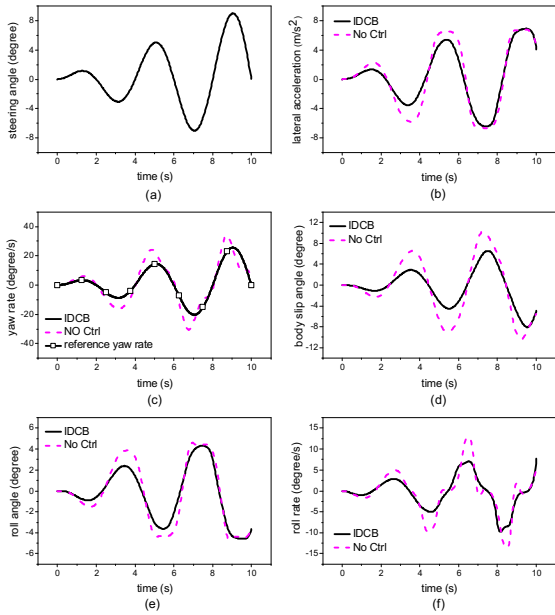


Fig. 2 Responses of SUV vehicle on dry asphalt road with sinusoidal steering input

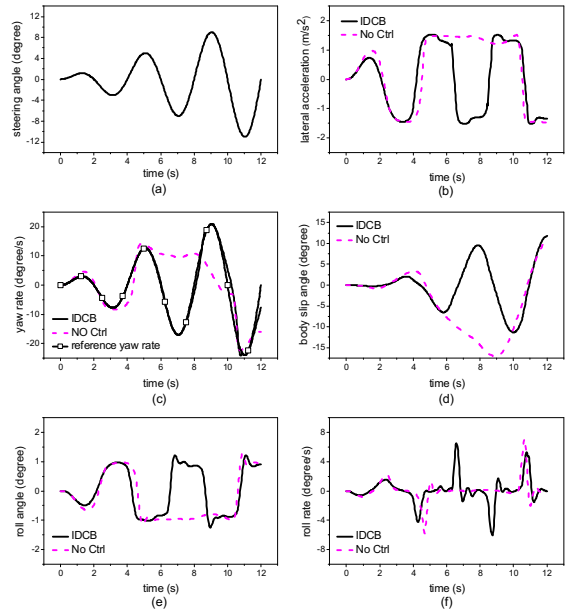


Fig. 4 Responses of SUV vehicle on snow covered road with step steering input

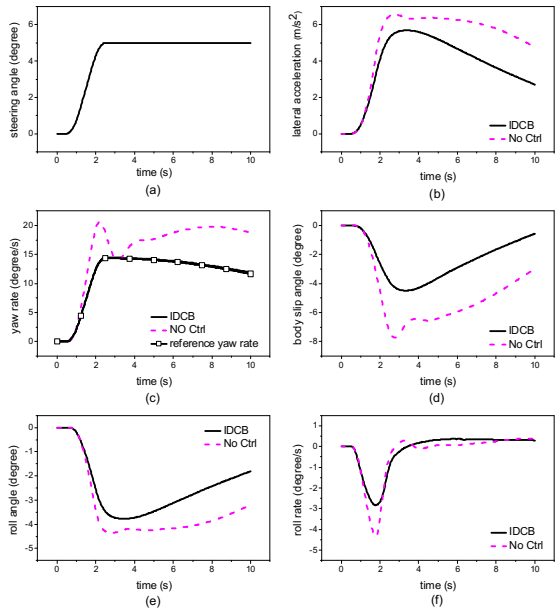


Fig. 3 Responses of SUV vehicle on dry asphalt road with step steering input

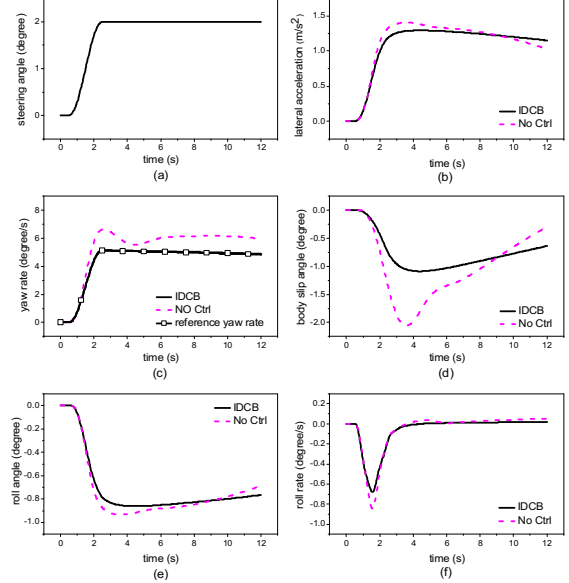


Fig. 5 Responses of SUV vehicle on snow covered road with step steering input

4.2 눈길에서의 성능평가

다음은 보다 미끄러운 노면인 눈길에서 IDCB의 성능을 평가하였다. 앞의 성능평가와 비슷하게 정현파형의 조향 입력과 step 입력의 조향입력으로 시뮬레이션이 실시되었으며 초기 주행 속도는 15m/s로 설정되었다. Figs. 4와 5는 각각 조향 입력 및 차량과 제어기의 응답을 나타내고 있다.

결과를 살펴보면 IDCB가 장착되지 않은 차량은 정현 파형의 조향 입력이 가해졌을 때 약 5초부터 요 속도 및 횡방향 가속도가 조향 입력에 응답하지 못하고 있다 (Figs. 4(c),(d), 5(c),(d)). 이는 조향 입력의 진폭이 커짐에 따라 차량이 조향 불능 상태에 빠졌다는 것을 의미한다. step 입력이 가해졌을 경우에도 미끄러짐 각의 변화가 매우 커 차량의 운전 상태가 불안정하다는 것을 나타내고 있다⁶⁾.

반면에 IDCB가 장착된 차량은 요 속도가 목표 요 속도를 거의 완벽하게 추종하며 미끄러짐 각도 작은 값을 유지하고 있다. 뿐만 아니라 횡방향 가속도도 조향 입력에 잘 반응하고 있어 조향 성능도 유지되고 있음을 확인할 수 있다 (Figs. 4(b), 5(b)).

Fig. 4(e),(f)와 Fig. 5(e),(f)는 롤 각과 롤 속도를 나타낸다. IDCB를 장착하지 않은 경우 롤 운동이 조향 입력을 추종하지 못하거나 혹은 변화폭이 큰 결과를 보여준다. 결과적으로 주행 중인 SUV 차량에 조향입력이 가해져 차량의 횡방향 운동이 발생하면 IDCB에 의한 차량 안정성 및 조향성능의 향상은 미끄러운 노면에서 더욱 뚜렷해졌다.

4.3 좌우 마찰계수가 다른 노면 (split- μ road)에서의 성능 평가

좌우 바퀴와 노면 사이의 마찰계수가 서로 다른 노면에서 제동 압력이 가해지면 바퀴에서 제동력이 달라져 차량은 선회 운동을 시작한다. 이 주행 조건은 조향입력 없이 차량이 선회하기 때문에 제어기 설계 및 성능 검증에 매우 적합하다³⁾.

Fig. 9는 IDCB를 장착한 차량과 ABS를 장착한 차량이 좌우 마찰계수가 다른 노면 (건조한 아스팔트 노면과 눈길) 위를 주행하면서 급제동 입력이 가해질 때의 응답을 나타낸 것이다. 결과를 살펴보면 ABS를 장착한 차량은 좌우 바퀴의 제동력이 달

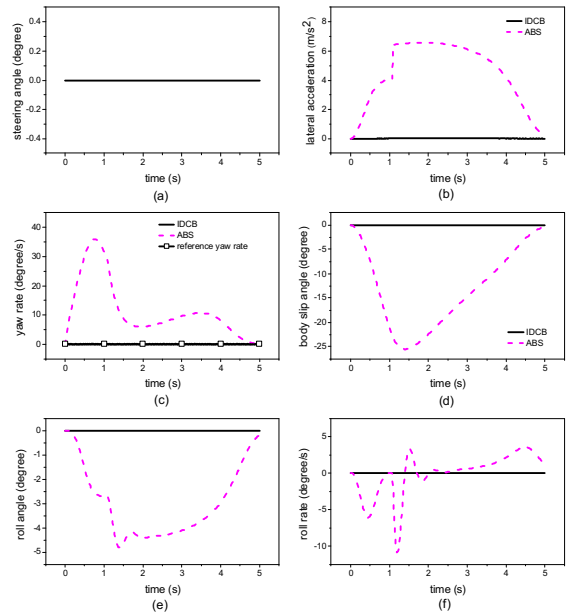


Fig. 6 Responses of SUV vehicle on split- μ road without steering input

라 마찰계수가 높은 쪽으로 선회 운동을 하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 IDCB를 장착한 차량은 횡방향 가속도, 요 속도, 롤 각 그리고 롤 속도가 거의 0에 가까워 직진 운동을 하는 것을 나타낸다.

즉, 제동 입력이 가해지더라도 IDCB를 장착한 차량이 ABS만을 장착한 차량 보다 제어성과 안정성을 개선시키고 있다. 결과적으로 롤 운동도 적절히 제어되어 승차감 향상에도 크게 기여한다.

5. 결론

이 연구는 SUV 차량의 선회시 차량의 제어성과 안정성을 개선하기 위한 IDCB 시스템의 개발과 성능 평가에 관한 것이다. 결론은 다음과 같다.

1. Fuzzy Logic Control을 사용하여 설계된 IDCB는 건조한 노면 및 눈길에서 다양한 조향 입력을 이용하여 성능을 평가하였다. 운전자에 의해 제동 입력이 가해지지 않았을 때 IDCB를 장착한 차량의 요 속도는 목표 요 속도를 잘 추종하였으며 미끄러짐 각도 최소값으로 잘 유지하였다.

즉, SUV 차량의 제어성과 안정성은 강화되었으며 롤 운동도 개선되어 승차감 향상에 도움을 준다는 것을 확인하였다.

2. 좌우 바퀴의 마찰계수가 다른 노면에서 제동입력이 운전자에 의하여 가해질 때 IDCB를 장착한 SUV 차량은 직전에 가까운 운행 능력을 보여주었다. 이는 IDCB에 의하여 차량의 제어성과 안정성이 향상되었음을 의미한다. 하지만 ABS만을 장착한 차량은 횡방향 운동을 보여주었으며 차량의 안정성 및 제어성이 악화되었다.

후 기

“이 논문은 2018학년도 동명대학교 교내학술연구비 지원에 의하여 연구되었음 (과제번호 2018F035)”

REFERENCES

1. Yim, S. J., Yoon, J. Y., Cho, W. K. and Yi, K. S., “An Investigation on Rollover Prevention Systems: Unified Chassis Control versus Electronic Stability Control with Active Anti-Roll Bar”, Procs. of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol. 225, pp. 1-14, 2010.
2. Zhang, Y., Wang, L., and Xia, R., "Sliding Mode Control of Electrical Active Roll Stabilizer Using Switched Reluctance Motor," SAE Technical Paper 2018-01-0832, 2018.
3. Song, J., "Development and comparison of integrated dynamics control systems with fuzzy logic control and sliding mode control," Journal of Mechanical science and Technology, Vol. 27, No. 6, pp. 1853-1861, 2013.
4. Song, J., “Development of Vehicle Integrated Dynamics Control System with Brake System Control”, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers a, Vol. 41, No. 7, pp. 591~597, 2017.
5. Lu, S. B., Li, Y. N., and Choi, S. B., “Contribution of chassis key subsystems to rollover stability control”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: J. of Automobile Engineering, Vol. 226, pp. 479-493, 2011.
6. Seo, K., Chung, T., Heo, H., Yi, K. et al., "An Investigation into Multi-Core Architectures to Improve a Processing Performance of the Unified Chassis Control Algorithms," SAE International Journal of Passenger Cars-Electronic and Electrical Systems, Vol. 3, No. 1, pp. 53-62, 2010.
7. Chai, C. H., “Performance Improvement of an Extended Kalman Filter Using Simplified Indirect Inference Method Fuzzy Logic,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineering, Vol. 15, No. 2, pp. 131-138, 2016.
8. Kang, S. J., Chung, W.J., Park, S.K., and Noe, S.H., “A Study on Gain Scheduling Programming with the Fuzzy Logic Controller of a 6-axis Articulated Robot using LabVIEW®,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineering, Vol. 16, No. 4, pp. 113-118, 2017.

Appendix - Nomenclature

- A_w : Area of master cylinder, m^2
 B_{roll} : roll axis torsional damping = 2600N rad/s
 C_f/C_r : cornering stiffness of front/rear axle, N/rad
 $C_{\phi f}/C_{\phi r}$: cornering stiffness of front/rear tire, N/rad
 f_r : tire rolling resistance, N
 F_x, F_y, F_z : tire longitudinal/lateral/normal force, N
 F_t : tire traction force, N
 h_s : distance from sprung mass CG to roll axis = 0.3m
 I_z : vehicle moment of inertia about z axis = 1627kg m^2
 K_{roll} : roll axis torsional stiffness = 45000N/rad
 m_s : sprung mass = 1560kg
 m_{total} : vehicle total mass = 1680kg
 R_b : distance from center of tire to brake pad = 0.18m
 R_w : Tire radius = 0.35m
 t_f, t_r : front and rear wheel distance = 1.638m
 v_x/v_y : longitudinal/lateral velocity, m/s
 δ_f : front steer angle, rad
 $\dot{\gamma}$: yaw rate, rad/s
 ϕ : roll angle, rad