

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.12.997>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

적응 알고리즘을 이용한 ESC와 ARS 기반 요 모멘트 분배 §

임 성 진**

* 서울과학기술대학교 기계자동차공학과

Adaptive Algorithms for Yaw Moment Distribution with ESC and ARS

Seongjin Yim**

* Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Sci. and Tech.

(Received February 18, 2016 ; Revised August 31, 2016 ; Accepted September 26, 2016)

Key Words: Integrated Chassis Control(통합 새시 제어), Yaw Moment Distribution(요 모멘트 분배), Electronic Stability Control(자세 제어 장치), Active Rear Steering(능동 후륜 조향), Adaptive Algorithms(적응 알고리즘)

초록: 본 논문은 자세 제어 장치와 능동 후륜 조향장치를 가지는 통합 새시 제어에서 요 모멘트 분배를 위해 적응 알고리즘을 적용하는 방법을 제안한다. 통합 새시 제어는 상위제어기와 하위제어기로 구성된다. 상위제어기에서 슬라이딩 모드 제어 이론을 이용하여 차량을 안정화시키는데 필요한 제어 요 모멘트를 계산한다. 하위제어기에서는 제어 요 모멘트를 만들어 내기 위해 자세 제어 장치의 제동 압력과 능동 후륜 조향장치의 조향각을 결정하는 데에 적응 알고리즘을 적용한다. 차량 시뮬레이션 패키지인 CarSim에서 시뮬레이션을 수행하여 제안된 방법의 타당성을 검증한다.

Abstract: This paper presents an application of adaptive algorithms for yaw moment distribution with electronic stability control (ESC) and active rear steering (ARS) in integrated chassis control (ICC). Integrated chassis control consists of upper- and lower-level controllers. In the upper-level controller, the control yaw moment is computed with sliding mode control required to stabilize a vehicle. In the lower-level controller, adaptive algorithms are applied to determine the required brake pressure of ESC and the necessary steering angle of ARS, in order to generate the control yaw moment. Simulation is performed using the vehicle simulation package CarSim to validate the proposed method.

- 기호설명 -

C_f, C_r : 전륜과 후륜의 코너링 강성(N/rad)
 e_k : 적응 에러
 F_{yf}, F_{yr} : 전륜과 후륜의 횡방향 타이어 힘(N)
 ΔF_x : ESC의 제동력에 의한 타이어 힘(N)
 ΔF_{yrc} : ARS에 의한 후륜 타이어 힘(N)
 G : 영향 행렬
 I_z : 요 관성 모멘트(kg·m²)
 K : 슬라이딩 모드 제어기의 게인
 K_γ : 정상상태 요율 게인

K_B : 제동 토크-압력 변환상수(MPa/N·m)
 l_f, l_r : 무게 중심에서 전륜과 후륜 차축까지의 거리(m)
 m : 차량 총중량(kgf)
 ΔM_γ : 제어 요 모멘트(N·m)
 r_w : 차륜 반경(m)
 P_B : 제동 압력(MPa)
 t_f, t_r : 전륜과 후륜의 윤거의 반값(m)
 v_x, v_y : 종방향과 횡방향 속도(m/s)
 V : 차량 속도(m/s)
 w : 제어 타이어 힘의 벡터
 α_f, α_r : 전륜과 후륜의 타이어 슬립각(rad)
 β : 횡슬립각(rad)
 δ_f : 운전자에 의한 전륜 조향각(rad)
 δ_r : ARS에 의한 후륜 조향각(rad)

§ 이 논문은 대한기계학회 창립 70주년 기념 학술대회 (2015.11.10.-14., ICC제주) 발표논문임.

† Corresponding Author, acebtif@seoultech.ac.kr

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

- ε : LMS 알고리즘의 학습률
- η : 횡슬립각에 대한 조절 계수
- ξ : zero-attracting 항에 대한 가중치
- γ, γ_d : 실제 요율과 기준 요율(rad/s)
- τ : 기준 요율의 시간 지연

1. 서 론

일반적으로 차량 안정성 제어기는 상위제어기와 하위제어기로 구성된다. 상위제어기에서는 차량의 횡방향 운동을 안정화시키는 데 필요한 제어 요 모멘트를 계산한다. 하위제어기에서는 상위제어기에서 계산된 제어 요 모멘트를 만들어내기 위해, 차량에 장착된 실제 장치들이 만들어 내는, 타이어 힘을 결정한다.⁽¹⁾ 이 과정을 요 모멘트 분배라고 한다.

지금까지 요 모멘트 분배를 위해 다양한 장치들이 사용되었다. 가장 대표적인 장치는 1980년대 중반에 개발된 자세 제어 장치(Electronic Stability Control, ESC)로서 좌측 또는 우측 차륜에 독립적인 제동 압력을 가하여 제어 요 모멘트를 만들어 낼 수 있다.⁽²⁾ ESC는 차량의 안전을 획기적으로 향상시켰기 때문에 2010년 초반부터 새롭게 출시되는 차량에는 의무적으로 장착되었다.⁽³⁾ 2000년대 초반에 개발된 능동 전륜 조향장치(Active Front Steering, AFS)도 운전자의 의도와 상관없이 전륜을 조향하여 제어 요 모멘트를 만들어 낼 수 있다.⁽⁴⁾ 또한 1980년대 초반에 개발되었다가 2000년대 후반에 다시 개발되고 있는 능동 후륜 조향장치(Active Rear Steering, ARS)도 운전자의 조향과 상관없이 제어 요 모멘트를 만들어 낼 수 있다.⁽⁵⁾ 이와 같이 다양한 장치들이 차량 안정성 제어에서 요 모멘트 분배에 이용될 수 있다. 만약 요 모멘트 분배에 둘 이상의 장치들이 이용된다면 이를 통합 새시 제어(Integrated Chassis Control, ICC)라고 한다.⁽⁶⁾

제어 요 모멘트를 만들어 내는 과정에서 AFS의 조향각은 운전자의 조향각에 더해져서 작동하므로 과도한 조향으로 인해 전륜의 횡력이 쉽게 포화된다. 전륜의 횡력이 포화되면 AFS에 의한 조향은 더 이상 추가적인 횡력과 그에 따른 제어 요 모멘트를 만들어 내지 못하게 된다. 이에 비해 ARS는 운전자의 조향각이 없이 독자적으로 조향하므로 타이어 횡력이 포화되지 않는다. 따라서 본 논문에서는 제어 요 모멘트를 만들어 내는 장치로서 ESC와 ARS를 이용한다.⁽⁷⁾

둘 이상의 장치들을 사용하는 통합 새시 제어에서 요 모멘트 분배를 위해서 현재까지 다양한 방

법들이 제안되었다. 대부분의 방법들은 최적화 방법을 이용하지만 이 경우 최적해를 찾기 위한 반복적인 과정으로 인해 계산량이 많아지는 단점이 생긴다. 따라서 본 논문에서는 요 모멘트 분배를 위해 Least-Mean Square (LMS)와 같이 구현이 쉽고 적은 계산량을 가지는 적응 알고리즘을 적용한다.^(8,9) 요 모멘트 분배에 LMS를 적용할 때 생기는 문제는 제어 요 모멘트가 0이 되어도 타이어 힘이 0이 되지 않는다는 것이다. 이 문제를 해결하기 위해 목적함수를 변경하여 zero-attracting mechanism을 LMS에 도입한다.⁽¹⁰⁾ 차량 시뮬레이션 패키지인 CarSim에서 시뮬레이션을 통해서 제안된 방법의 타당성을 검증한다.⁽¹¹⁾

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 ESC와 ARS를 장착한 차량에 대한 통합 새시 제어 시스템의 설계 방법을 제안한다. 또한 적응 알고리즘을 이용한 요 모멘트 분배 과정을 제안한다. 3장에서는 제안된 방법의 타당성을 검증하기 위해 차량 시뮬레이션 패키지인 CarSim에서 시뮬레이션을 수행하며 4장에서 결론을 맺는다.

2. 통합 새시 제어기 설계

통합 새시 제어 시스템은 2단 구조로서 상위제어기와 하위제어기로 구성되어 있다.

2.1 상위제어기 설계

상위제어기에서는 Fig. 1의 2자유도 자전거모델을 기반으로 슬라이딩 모드 제어이론을 적용하여 차량을 안정화시키는데 필요한 제어 요 모멘트 ΔM_y 를 구한다.⁽⁷⁾

2자유도 자전거 모델의 운동 방정식은 식 (1)과 같다. 자전거 모델에서 전륜과 후륜의 타이어 슬립각은 식 (2)와 같이 구해진다. 운전자의 의지를 나타내며 차량이 추종해야 할 기준 요율은 운전자의 조향 입력과 차량의 현재 종속도의 함수로서 식 (3)과 같이 계산된다.⁽⁷⁾ 식 (3)에서 K_γ 는 정상상태 요 계인으로서 차량의 속도와 전륜/후륜의 횡강성에 의해 결정된다.

$$\begin{cases} mv_x(\dot{\beta} + \gamma) = F_{yf} \cos \delta_f + F_{yr} \cos \delta_r \\ I_z \dot{\gamma} = l_f F_{yf} \cos \delta_f - l_r F_{yr} \cos \delta_r + \Delta M_y \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \alpha_f = \delta_f - \frac{v_y + l_f \gamma}{v_x} = \delta_f - \beta - \frac{l_f}{v_x} \gamma \\ \alpha_r = \delta_r - \frac{v_y - l_r \gamma}{v_x} = \delta_r - \beta + \frac{l_r}{v_x} \gamma \end{cases} \quad (2)$$

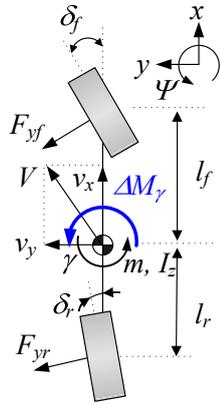


Fig. 1 2-DOF bicycle model

$$\gamma_d = \frac{K_\gamma}{\tau s + 1} \cdot \delta_f \quad (3)$$

제어 요 모멘트 ΔM_γ 를 구하기 위해 슬라이딩 모드 제어를 적용한다. 차량의 횡방향 운동을 제어할 때 제어 목표는 조종안정성과 횡방향 안정성이 있다. 조종안정성은 차량의 요율이 기준 요율을 추종하도록 하는 것이고 횡방향 안정성은 차량의 횡슬립각을 작게 하는 것이다. 이러한 두 가지 목표를 위한 슬라이딩 모드 제어의 오차 표면 (error surface)은 요율 에러와 횡슬립각을 결합하여 식 (4)와 같이 정의된다. 이 오차가 0이 되기 위해 만족해야 하는 제어 시스템의 동역학은 식 (5)와 같이 주어진다. 식 (1), (4), 그리고 (5)를 결합하면 식 (6)과 같은 제어 요 모멘트 ΔM_γ 가 계산된다.⁽⁷⁾

$$s = (\gamma - \gamma_d) + \eta\beta \quad (4)$$

$$\dot{s} = -Ks \quad (K > 0) \quad (5)$$

$$\Delta M_\gamma = I_{zz}\dot{\gamma}_d - I_{zz}\eta \left(\frac{F_{yf} \cos \delta_f + F_{yr} \cos \delta_r}{mv_x} - \gamma \right) - l_f F_{yf} \cos \delta_f + l_r F_{yr} \cos \delta_r - I_{zz}K(\gamma - \gamma_d + \eta\beta) \quad (6)$$

2.2 하위제어기 설계

하위제어기에서는 제어 요 모멘트를 ESC와 ARS에 의해 생성되는 타이어 힘으로 분배한다. Fig. 2는 각 타이어 힘과 제어 요 모멘트의 기하학적 관계를 보여 준다. Fig. 2에서 ΔF_{x1} , ΔF_{x2} , ΔF_{x3} , 그리고 ΔF_{x4} 는 ESC에 의해 생성되는 종방향 타이어 힘, 즉 제동력이며 ΔF_{yrc} 는 ARS에 의해 생성되는 후륜의 횡방향 타이어 힘이다. 제어 요 모멘트 ΔM_γ 를 만들어 내기 위해 이와 같은 5개의 타이어 힘이 결정되어야 한다. 이를 위해 본 논문에서는

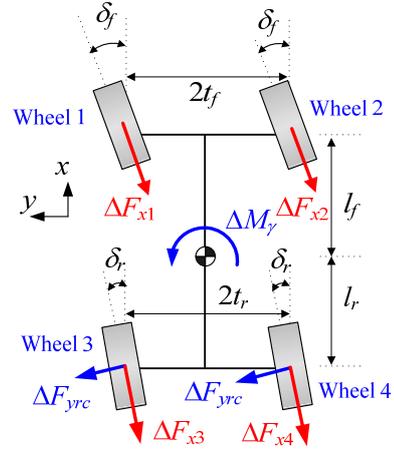


Fig. 2 Tire control forces used to generate M_B

적응 알고리즘을 이용한다.⁽⁷⁾

각 타이어 힘과 제어 요 모멘트의 기하학적 관계는 Fig. 2와 같은 관계를 이용하여 식 (7)과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \Delta F_{x1} \\ \Delta F_{x2} \\ \Delta F_{x3} \\ \Delta F_{x4} \\ \Delta F_{yrc} \end{bmatrix} = \Delta M_\gamma \quad (7)$$

$$\begin{aligned} a_1 &= t_f, & a_2 &= -t_f, & a_3 &= t_r \cos \delta_r + l_r \sin \delta_r, \\ a_4 &= -t_r \cos \delta_r + l_r \sin \delta_r, & a_5 &= -2l_r \cos \delta_r \end{aligned}$$

제어 요 모멘트의 방향이 양(+)인 경우 타이어 힘 ΔF_{x1} , ΔF_{x3} , 그리고 ΔF_{yrc} 가 필요하며 이에 따라 식 (7)은 다음과 같이 식 (8)이 된다. 이와 반대로 제어 요 모멘트의 방향이 음(-)인 경우 타이어 힘 ΔF_{x2} , ΔF_{x4} , 그리고 ΔF_{yrc} 가 필요하여 이에 따라 식 (7)은 다음과 같이 식 (9)가 된다.

$$\begin{bmatrix} a_1 & a_3 & a_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta F_{x1} \\ \Delta F_{x3} \\ \Delta F_{yrc} \end{bmatrix} = \Delta M_\gamma \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} a_2 & a_4 & a_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta F_{x2} \\ \Delta F_{x4} \\ \Delta F_{yrc} \end{bmatrix} = \Delta M_\gamma \quad (9)$$

2.3 요 모멘트 분배를 위한 적응 알고리즘

식 (8)과 (9)를 기반으로 임의의 시점 k 에 주어지는 요 모멘트 분배 오차는 식 (10)으로 주어진다. 목적 함수를 식 (11)과 같이 설정하면 최적의 타이어 힘 \mathbf{w} 는 식 (12)와 같이 구해진다. 식 (12)

에서 ε 은 학습률이다. 이 방법이 가장 간단한 적응 알고리즘인 Least-Mean Square (LMS) 알고리즘이다.⁽⁸⁾

$$e_k = \mathbf{G}_k \mathbf{w}_k - \Delta M_{\gamma,k} \quad (10)$$

$$J_1 = e_k^2 \quad (11)$$

$$\mathbf{w}_{k+1} = \mathbf{w}_k + 2\varepsilon e_k \mathbf{G}_k^T \quad (12)$$

식 (12)에서 볼 수 있듯이 $M_{\gamma,k}$ 가 0이 된다고 해도 \mathbf{w}_k 가 0이 된다는 보장은 없다. 따라서 식 (13)과 같이 목적 함수 J_2 를 새롭게 설정한다. 이에 따라 \mathbf{w}_k 의 갱신 규칙을 구하면 식 (14)와 같다. 식 (14)를 이용하면 $M_{\gamma,k}$ 가 0일 때 \mathbf{w}_k 도 0이 된다. 이 방법을 zero-attracting(ZA) mechanism이라고 하며 이 방법이 적용된 LMS (14)를 ZA-LMS라고 한다.⁽¹⁰⁾

$$J_2 = e_k^2 + \xi \|\mathbf{w}_k\| \quad (13)$$

$$\mathbf{w}_{k+1} = \mathbf{w}_k + 2\varepsilon e_k \mathbf{G}_k^T - 2\varepsilon \xi \text{sgn}(\mathbf{w}_k) \quad (14)$$

적응 알고리즘을 적용하여 타이어 힘을 구하면 식 (15)와 같이 기존의 연구에서 제안된 관계식을 이용하여 ESC의 제동 압력 P_{Bi} 와 ARS의 조향각 δ_r 을 계산한다.⁽⁷⁾

$$P_{Bi} = \frac{r_w}{K_B} \cdot \Delta F_{xi}, \quad i \in \{1, 2, 3, 4\} \quad (15)$$

$$\delta_r = \frac{\Delta F_{yrc}}{C_r}$$

2.4 능동 후륜 조향각의 결정

기존의 연구에서와 같이 식 (15)에서 ARS의 조향각 δ_r 을 계산할 때 $\Delta F_{yrc}/C_r$ 은 조향각이 아니라 후륜의 타이어 슬립각이다. 타이어 슬립각의 정의 (2)에 따라 정확히 계산된 값은 식 (16)과 같다.⁽¹⁾ 식 (16)에서 $\alpha_{r,target}$ 은 Fig. 3에서와 같이 ΔF_{yrc} 에 의해 구해지는 타이어 슬립각이다. 일반적으로 전륜의 경우 운전자의 조향각에 의해서 포화될 가능성이 있지만 후륜의 경우 운전자의 조향각이 없으므로 쉽게 포화되지 않는다. 따라서 Fig. 3에서 보듯이 후륜의 타이어 슬립각이 선형 영역에만 있다면 $\alpha_{r,target}$ 은 식 (17)과 같이 계산된다. 보다 엄밀하게 $\alpha_{r,target}$ 을 구하기 위해서는 정확한 타이어 모델의 역함수를 이용해야 하지만 제어 성능상의 차이가 크지 않고 계산이 복잡해지므로 본 논문에서는 식 (17)의 값을 사용한다.

Table 1 Parameters and values of a small-sized SUV model in CarSim

M	1,146.0 kg	I_z	1,302.1 kg·m ²
C_f	39,401 N/rad	C_r	64,119 N/rad
l_f	0.88 m	l_r	1.32 m
t_f	1.46 m	t_r	1.47 m
v_x	80 km/h	r_w	0.398 m
$K_{B,front}$	150 N·m/MPa	$K_{B,rear}$	70 N·m/MPa

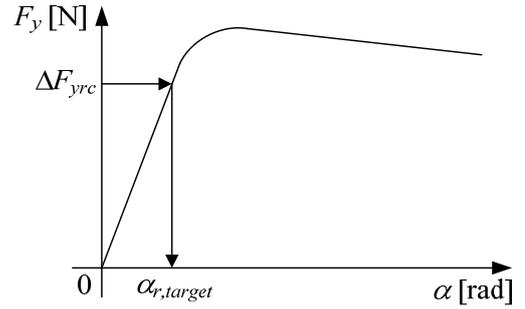


Fig. 3 Characteristic of lateral tire force with respect to tire slip angle

$$\delta_r = \alpha_{r,target} + \beta - \frac{l_r}{v_x} \gamma \quad (16)$$

$$\alpha_{r,target} = \frac{\Delta F_{yrc}}{C_r} \quad (17)$$

3. 시뮬레이션

제안된 방법의 타당성을 검증하기 위해 CarSim에서 시뮬레이션을 수행하였으며 제어기는 MATLAB/Simuink로 구현하였다. 시뮬레이션 상황은 페루프 조향으로서 운전자가 moose test track을 추종하는 상황이다.⁽⁷⁾ 조향 입력은 CarSim에서 제공하는 운전자 모델에 의해 구했으며 운전자 모델의 예견 시간은 차량 속도 대비 0.75sec로서 미숙한 운전자를 의미한다. 차량 모델은 CarSim에서 제공하는 소형 SUV 모델이며 이 모델에서 구한 차량의 파라미터는 Table 1과 같다.⁽¹¹⁾

차량의 초기 속도는 80km/h, 노면마찰계수는 0.6, 시뮬레이션 시간은 10초로 설정하였다. ESC의 유압 구동기와 ARS는 각각 0.12와 0.05의 시상수를 가지는 1차 시스템으로 모델링하였다. 과도한 제동력이 가해지는 경우 차륜의 잠금을 방지하기 위해 ABS를 구현하였으며 ABS는 슬립률이 0.15에서 0.2 사이에 있도록 작동한다.

첫 번째 시뮬레이션은 ARS의 결정 방법을 비교한다. 즉, 요 모멘트 분배 과정에서 기존의 연구에서

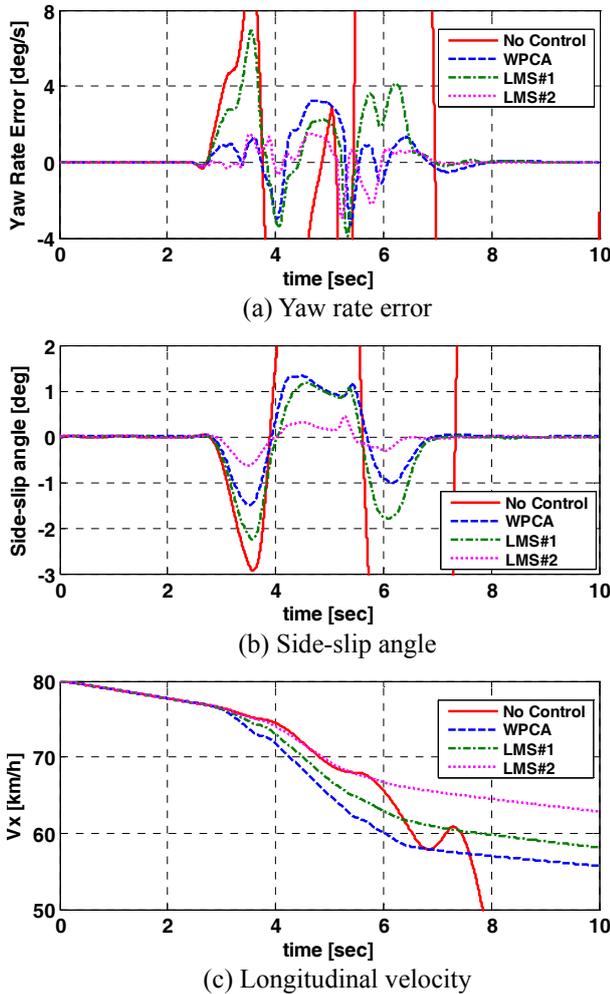


Fig. 4 Simulation results for each method

사용한 WPCA 방법, LMS에 식 (15)를 적용한 경우(=LMS#1), 그리고 LMS에 식 (16)을 적용한 경우(=LMS#2)를 비교한다.⁽⁷⁾ LMS의 학습률은 0.1로 설정하였다. LMS의 학습률이 0.1보다 큰 경우 타이어 힘에 고주파 진동이 나타나게 되며 0.1보다 작은 경우 수렴 속도가 늦어서 필요한 제어 요 모멘트를 만들어 내지 못하게 된다.

각 방법에 대해 Fig. 4는 시뮬레이션 결과를, Fig. 5는 ESC의 제동 압력과 ARS의 조향각을 보여 준다. Fig. 5의 (a)에서 FL, FR, RL, RR은 각각 Front Left, Front Right, Rear Light, 그리고 Rear Right로서 좌측과 우측 전륜, 그리고 좌측과 우측 후륜을 나타낸다. 그림에서 보듯이 제어하지 않은 경우 차량은 횡방향 안정성을 잃게 된다. 이에 비해 제어한 경우, 즉 WPCA와 LMS#1, 그리고 LMS#2는 횡방향 안정성을 유지한다.

Fig. 4에서 WPCA와 LMS#1, 그리고 LMS#2를 비교하면 본 논문에서 제시한 ARS의 조향각 결정

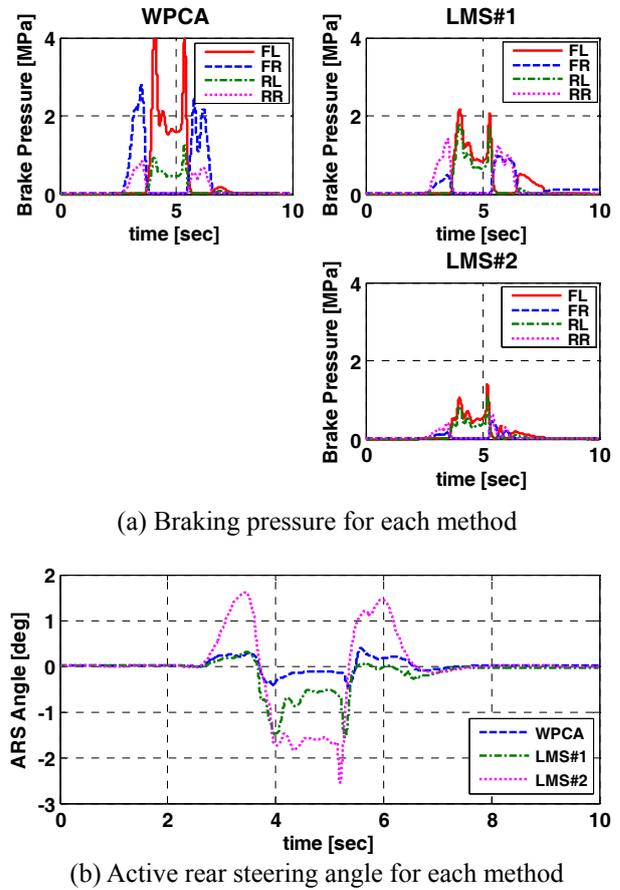


Fig. 5 Control inputs for each method

방법 LMS#2가 기존의 방법, 즉 WPCA나 LMS#1에 비해 훨씬 더 좋은 성능을 보이는 것을 알 수 있다. 예를 들어 Fig. 4에서 WPCA, LMS#1, 그리고 LMS#2의 최대 요율 에러는 각각 3.3, 6.9, 그리고 2.9 deg/s이며 최대 횡슬립각은 각각 1.5, 2.2, 그리고 0.6 deg로서 LMS#2가 가장 우수하다. Fig. 5의 (a)와 (b)에서 보면 LMS#2의 제동력이 가장 작고 ARS 조향각이 가장 크다. 예를 들어 WPCA, LMS#1, 그리고 LMS#2의 최대 제동압력은 각각 4.4, 2.2, 그리고 1.4 MPa이며 ARS의 조향각은 각각 0.4, 1.4, 그리고 2.6 deg이다. 때문에 LMS#2의 좋은 성능은 ESC의 제동력보다는 ARS의 조향각을 더 많이 사용함으로써 얻어진 결과라는 것을 알 수 있다.

시뮬레이션 결과에서 주목할만한 점은 Fig. 5의 (a)에서 8초 근방에서 제어 요 모멘트가 0이 되어도 LMS#1의 제동 압력이 0이 되지 않는데 비해 LMS#2는 0이 된다는 점이다. 그리고 LMS#1이 LMS#2에 비해 후륜의 제동력을 더 사용하고 있는 데 이것은 Fig. 5의 (b)에서 보듯이 LMS#1의 ARS 조향각이 작기 때문이다. 이에 비해 LMS#2

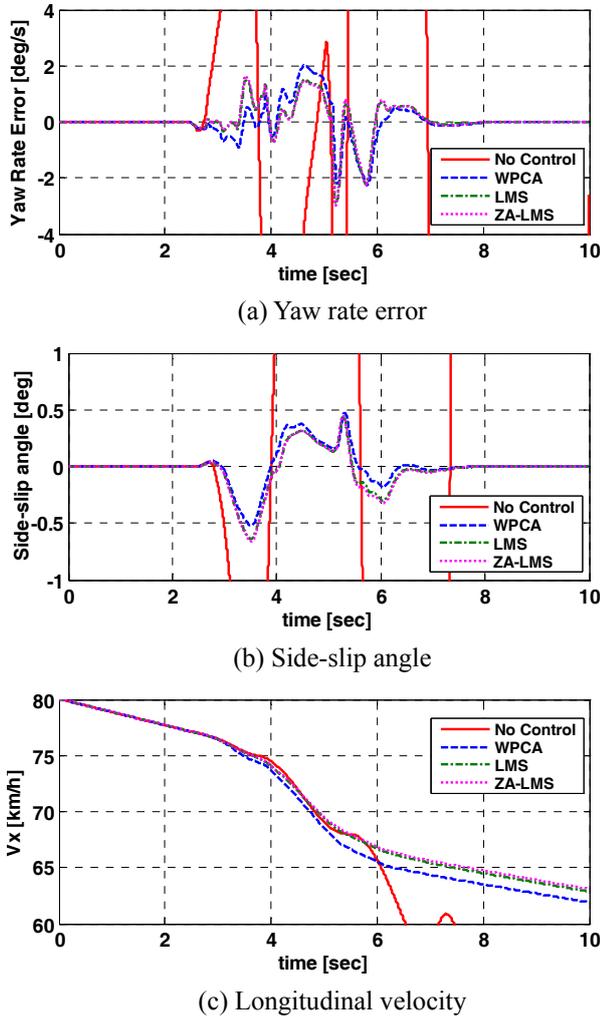


Fig. 6 Simulation results for each method

는 ARS 조향각을 더 크게 사용하여 후륜과 더불어 전륜의 제동력도 더 작게 사용하게 만든다.

두 번째 시뮬레이션에서는 기존의 연구에서 사용한 WPCA, LMS, 그리고 ZA-LMS를 비교한다. 세 가지 방법 모두 ARS의 조향각을 결정하는 방법으로 식 (16)을 적용한다. LMS와 ZA-LMS의 학습률 ϵ 은 0.1로 설정하였으며 식 (14)에서 ξ 의 값은 0.1로 설정하였다. 식 (14)에서 ξ 의 값을 0.1보다 크게 설정하면 zero-attracting 항에 의해 LMS의 성능이 저하되게 되며 0.1보다 작게 하면 zero-attracting의 효과가 없어지게 된다.

Fig. 6과 7에서는 각 방법에 대한 시뮬레이션 결과와 제어 입력을 보여 준다. Fig. 6의 (a)와 (b)에서 보듯이 이들의 성능이 매우 좋은 것을 알 수 있다. Fig. 4에서 언급한 것처럼 기존의 연구에서 사용한 WPCA와 LMS#1의 경우 최대 요율 에러가 3.3과 6.6 deg/s인데 비해 여기서는 2.3과 2.9 deg/s로서 식 (16)

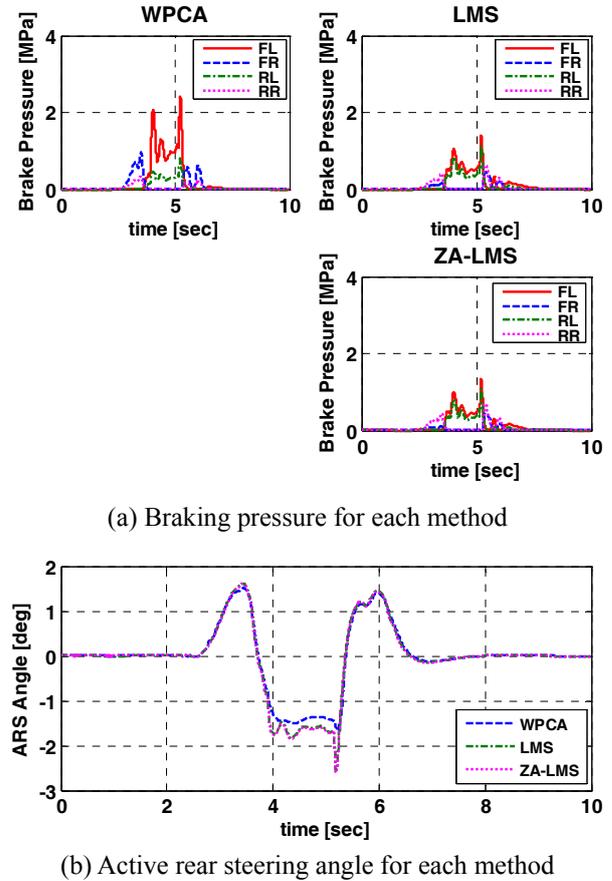


Fig. 7 Control inputs for each method

의 ARS의 결정 방법에 의해 성능이 크게 향상되었음을 알 수 있다. 또한 Fig. 6과 7에서 보듯이 WPCA, LMS와 ZA-LMS는 거의 동일한 성능을 보임을 알 수 있다. 이것은 LMS와 ZA-LMS는 zero-attracting mechanism을 제외하고는 동일한 알고리즘이기 때문이다. 또한 WPCA, LMS, 그리고 ZA-LMS 모두 ESC와 ARS에 동일한 가중치를 설정했기 때문이다. Fig. 6의 (c)에서 보듯이 LMS와 ZA-LMS의 속도가 WPCA보다 높는데 이것은 Fig. 7의 (a)에서 보듯이 LMS와 ZA-LMS의 최대 제동 압력이 1.4 Mpa로서 WPCA의 2.4 MPa보다 작기 때문이다. 이에 비해 ARS 조향각은 거의 동일하다. 이상의 결과에서 보듯이 LMS와 같은 적응 알고리즘은 매우 간단한 구조와 계산만으로도 기존의 WPCA와 동일한 정도의 성능을 보임을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 ESC와 ARS를 이용하는 통합 제어에서 요 모멘트 분배를 위해 적응 알고리즘을 적용하는 방법을 제안하였다. 가장 기본적인

적응 알고리즘으로 LMS, 그리고 LMS의 벡터가 0 이 되는 것을 보장하는 ZA-LMS를 적용하였다. 적응 알고리즘의 결과인 타이어 힘을 ARS의 조향각으로 변환할 때 기존의 방법보다 엄밀한 방법을 제안하였다. 제안된 방법의 타당성을 검증하기 위해 CarSim에서 시뮬레이션을 수행하였고 시뮬레이션 결과 본 논문에서 제안하는 적응 알고리즘 ZA-LMS와 ARS의 조향각 결정 방법이 성능이 우수함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 서울과학기술대학교의 교내연구비 지원에 의하여 수행되었음.

참고문헌 (References)

- (1) Rajamani, R., 2006, *Vehicle Dynamics and Control*, New York, Springer.
- (2) van Zanten, A.T., Erhardt, R., Pfaff, G., Kost, F., Hartmann, U. and Ehret, T., 1996, "Control Aspects of the Bosch-VDC," *Proceedings of International Symposium on Advanced Vehicle Control*, Aachen, Germany, pp. 573~608.
- (3) National Highway Traffic Safety Administration, 2007, *Federal Motor Vehicle Safety Standards; Electronic Stability Control Systems; Controls and Displays*, NHTSA-2007-27622.
- (4) Klier, W., Reimann, G. and Reinelt, W., 2004, "Concept and Functionality of the Active Front Steering System," SAE 2004-21-0073.
- (5) Nissan Motor Company, 2006, "4 Wheel Active Steer (4WAS)," www.nissan-global.com/EN.
- (6) Yim, S. and Kim, W., 2016, "Adaptive Variable Weights Tuning in Integrated Chassis Control for Lateral Stability Enhancement," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 40, No. 1, pp. 103~111.
- (7) Yim, S., 2014, "Integrated Chassis Control with Electronic Stability Control and Active Rear Steering," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 38, No. 11, pp. 1291~1297.
- (8) Diniz, P.S.R., 2008, *Adaptive Filtering: Algorithms and Practical Implementation*, Springer, New York.
- (9) Yim, S., 2015, "Integrated Chassis Control with Adaptive Algorithms," *Proceedings of IMeChE, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Vol. 230, No. 9, pp. 1264~1272.
- (10) Chen, Y., Gu, Y. and Hero, A.O., 2009, "Sparse LMS for System Identification," *Proceedings of the IEEE ICASSP*, pp. 3125~3128.
- (11) Mechanical Simulation Corporation, 2001, *CarSim User Manual Version 5*.