

고슬립을 이용한 6륜구동/6륜조향 차량 고장 안전 주행 제어[§]

나재원* · 김원근** · 이경수****† · 이종석**** · 이대옥*****

* 서울대학교 융합과학기술대학원, ** 서울대학교 자동차협동과정, *** 서울대학교 기계항공공학부, **** 삼성테크윈, ***** 국방과학연구소

Fault-Tolerant Driving Control of Independent Steer-by-Wire System for 6WD/6WS Vehicles Using High Slip

Jae Won Nah*[†], Won Gun Kim**, Kyongsu Yi***, Jongseok Lee****, and Daeok Lee*****

* Graduate School of Convergence Science and Technology, Seoul Nat'l Univ.

** Program in Automotive Engineering, Seoul Nat'l Univ.

*** School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul Nat'l Univ.

**** Samsung Techwin

***** Agency for Defense Development

(Received May 3, 2012 ; Revised September 27, 2012 ; Accepted February 5, 2013)

Key Words: Fault Tolerant Driving(고장 안전 주행), Vehicle Dynamics(차량동역학), Steer-by-Wire(스티어-바이-와이어), Six-Wheel-Driving(6 륜구동)

초록: 본 논문은 6 륜 독립구동/독립조향 차량의 독립 스티어-바이-와이어 장치의 고장 안전 주행 제어 방법을 제시하였다. 조향부 고장 휠의 횡방향 타이어 힘이 차량 선회 운동에 저항력으로 작용할 수 있으므로, 이를 줄이기 위하여 본 고장 안전 주행 제어 알고리즘은 조향부 고장 휠에 높은 슬립률이 발생하도록 토크 입력을 가한다. 고슬립으로 인한 조향부 고장 휠의 종방향 타이어 힘 증가를 고려하기 위하여 종방향 타이어 힘을 추정하여 고장나지 않은 휠의 구동력 최적 분배에 구속 조건에 포함시킨다. 개루프 조향 및 폐루프 조향 시뮬레이션 결과 조향부 고장이 발생한 차량의 주행시 고장을 고려하지 않은 최적 구동력 분배 제어에 비하여 본 알고리즘 적용시 차량의 주행 성능이 보정됨을 확인하였다.

Abstract: This paper describes a fault-tolerant driving control strategy for an independent steer-by-wire system in six-wheel-drive/six-wheel-steering vehicles. An algorithm has been designed to realize vehicle maneuverability that is as close as possible to that of non-faulty vehicles by inducing high slip ratio of the wheel through a faulty steer-by-wire system in order to reduce the lateral tire force, which is resistant to the yaw motion. Considering the transition of the longitudinal tire force of a wheel with a faulty steer-by-wire component, the longitudinal tire forces are optimally distributed to the other wheels. Fault-tolerant driving performance has been investigated via computer simulations. Simulation studies show that the proposed algorithm can significantly improve the maneuverability of a vehicle with a faulty steer-by-wire system as compared to the optimal traction distribution method.

- 기호설명 -

a_x, a_y : 종방향, 횡방향 가속도 [m/s ²]	t_{fmr} : 1 축, 2 축, 3 축의 트레드 [m]
V_x, V_y : 종방향, 횡방향 속도 [m/s]	m : 차량 질량 [kg]
l_f, l_m, l_r : 무게중심으로부터 1 축, 2 축, 3 축까지의 거리 [m]	β : 차량 슬립각 [rad]
	γ : 요속도 [rad/s]
	γ_{des} : 목표 요속도 [rad/s]
	V_{des} : 목표 차량 속도 [m/s]
	δ_i : i 번째 휠 조향각 [rad]
	ω_i : i 번째 휠속도 [rad/s]
	T_i : i 번째 휠 토크 [N·m]
	F_{xi}, F_{yi}, F_{zi} : i 번째 휠 종방향, 횡방향, 수직방향

§ 이 논문은 2012 년도 대한기계학회 동역학 및 제어부문 춘계학술대회(2012. 4. 11.-13., 제주 KAL 호텔) 발표논문임.

† Corresponding Author, kyi@snu.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

- 타이어 힘 [N]
- F_{xdes} : 목표 종방향 힘 [N]
- ΔM_z : 목표 추가 요모멘트 [N·m]
- c_{xi} : i 번째 휠 최적분배 가중치 [-]
- I_z : z 축 관성모멘트 [kg·m²]
- J_w : 휠 회전관성모멘트 [kg·m²]
- μ_i : i 번째 휠 마찰계수 [-]
- C_f, C_m, C_r : 1 축, 2 축, 3 축 타이어 강성 [N/rad]

1. 서 론

6 른 독립구동/독립조향 차량 구조에 바이-와이어(X-by-wire) 시스템의 개발로 인휠 모터와 독립 스티어링 모터를 적용함으로써, 다양한 부하 조건과 험로를 극복하며, 야지 환경에서 신속한 회피 기동이 가능하도록 인휠모터의 특성을 고려한 주행 제어 방법 개발이 이루어지고 있다. 이를 위하여 6 른 구동/조향 차량의 주행 특성이 분석되었고,⁽¹⁾ 선회 안정성 향상을 위한 주행 제어 기초가 마련되었으며,⁽²⁾ 상태 추정을 통한 최적 분배 제어 알고리즘 개발이 진행되었다.⁽³⁾

이러한 6 른 독립구동/독립조향 시스템은 야지의 환경에서의 주행이 잦고, 바이-와이어 기술 적용으로 인하여 구동 모터나 조향 장치 및 이에 장착되는 센서들의 고장 안전 제어 기술의 필요성이 크다. 이에 대한 연구는 일반 4 른 차량을 바탕으로는 많이 진행되어 왔으나,⁽⁴⁾ 6 른 독립구동/독립조향 시스템에 대하여 특화된 연구는 많지 않다. 특히, 독립조향 시스템 중 어느 한 차륜부의 고장 발생시 차량의 선회 성능의 급격한 저하로 주행이 불가능한 상황이 발생할 수 있으며, 이에 대비하여 조향 redundancy 를 고려한 설계시 비용의 증가 및 구조 설계의 복잡함을 초래하게 된다.

본 연구에서는 6 른 독립구동 /독립조향 차량이 주행 중 독립 steer-by-wire 시스템의 고장에도 불구하고 별도의 보조 시스템 없이 차량의 주행 성능을 보완하여 계속 주행이 가능하도록 힘을 목표로 하여, 고장시 고슬립을 통해 횡방향힘을 줄여 저항력을 완화시키는 고장 안전 주행 제어 알고리즘을 설계하였다. 기존 연구의 타이어 힘 분배는 종방향 및 횡방향 타이어 힘을 최대로 이끌어내는 최적 토크 분배와, 과도한 슬립을 억제하도록 하는 슬립 제어로 차량을 구동하였으나, 본 연구에서는 조향부에 고장이 발생한 차륜에 횡방향 타이어 힘을 줄이기 위하여 과도한 슬립을 유도하며, 이 때의 타이어 힘 변화를 고려하여 고장이 발생

하지 않은 나머지 차륜에 토크를 분배하도록 하였다.

2. 대상 차량 모델

본 연구의 대상 차량인 6 른 독립구동/독립조향 차량은 각 차륜부에 구동모터, 브레이크 장치, 조향 장치가 하나씩 장착되어 있다. 6 개의 차륜부에 장착된 독립 조향 steer-by-wire 시스템은 Fig. 1 과 같이 조향 모터, 랙-피니언 기어, 그리고 기어 위치 센서로 구성되어 있다. 본 연구에서의 고장 안전 주행 제어 알고리즘은 Fig. 2 와 같이 6 자유도의 상질량, 각 차륜부의 하질량을 포함하는 18 자유도의 full vehicle model 의 동역학적 특성⁽⁵⁾을 기반으로 하여 설계되었으며, 차량 동역학 모델링 소프트웨어인 TruckSim 을 이용하여 구현하였다.

Table 1 은 본 연구의 대상 차량 모델의 기본 사양을 정리한 것이다.

Table 1 Specifications of the 6WD/6WS vehicle model

차체질량	8800 kg
무게중심으로부터 각 차축까지의 거리	1.95 / -0.10 / -1.95 (m)
윤거	2.55 (m)
타이어 반지름	0.65 (m)
타이어 종류	XZL 패턴 heavy 트럭 타이어
탑재 액추에이터	60kW in-wheel motor X6 5kW steer-by-wire motor X6 Additional mechanical brakes
탑재 센서	Wheel speed sensor X6 Steering angle sensor X6 Yaw-rate sensor

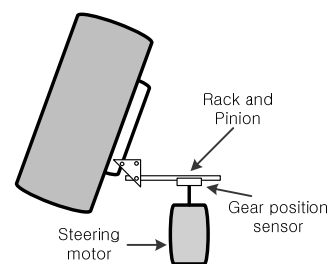


Fig. 1 Independent steer-by-wire component

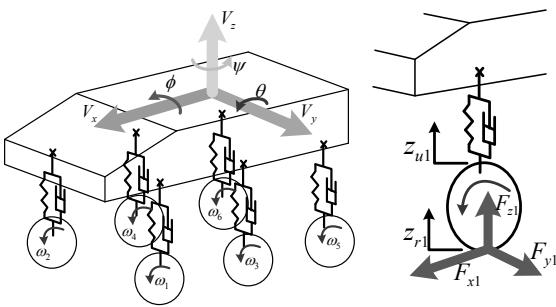


Fig. 2 6WD/6WS full vehicle model

고슬립 기반 고장 안전 주행 제어 알고리즘은 H.B.Pacejka의 타이어 이론을 기반으로 하여, 슬립률과 슬립각에 대한 종방향 및 횡방향 타이어 힘 특성을 이용한다. 차량의 각 휠 회전 운동은 해당 휠의 휠 토크와 종방향 타이어 힘에 의해 결정되며, 이 운동에 대한 방정식은 식 (2)와 같다.

$$J_w \frac{d\omega_i}{dt} = T_i - r_i F_{xi} \quad (2)$$

각 휠의 종방향 및 횡방향 타이어 힘은 슬립률과 슬립각, 그리고 수직방향 타이어 힘(하중)에 의해 결정된다. 각 휠의 슬립률(λ_i)과 슬립각은 식 (4), (5)와 같다.

$$\lambda_i = \frac{r_i \omega_i - V_x}{\max(r_i \omega_i, V_x)} \quad (4)$$

$$\alpha_i = \begin{cases} \delta_i - \frac{V_y + l_{f,m} \gamma}{V_x} & (i=1 \sim 4) \\ -\frac{V_y - l_r \gamma}{V_x} & (i=5 \sim 6) \end{cases} \quad (5)$$

3. 고장 안전 주행 제어 알고리즘

Fig. 3의 고장 안전 주행 제어기는 운전자의 주행 의도를 만족하고, 각 센서 신호와 상태 추정치 및 각 액추에이터의 고장 정보를 고려하는 조향, 구동 및 제동 제어 입력을 결정하도록 설계되었다. 본 논문에서는 각 by-wire 시스템의 고장에 대한 주행 제어 전략을 다루고 있으므로, 고장을 진단하는 별도의 알고리즘은 S.Anwar⁽⁶⁾ 등의 연구와 J.S.IM⁽⁷⁾ 등의 연구를 참고하였다.

3.1 상위 제어기

고장 상위 제어기는 Fig. 5와 같이 각 휠의 조

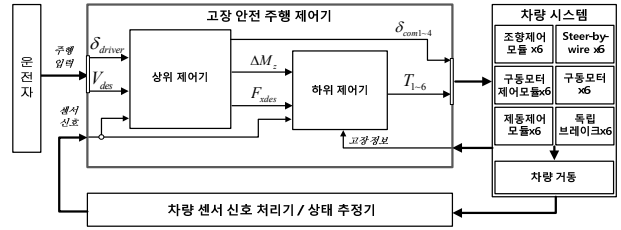


Fig. 3 6WD/6WS full vehicle model

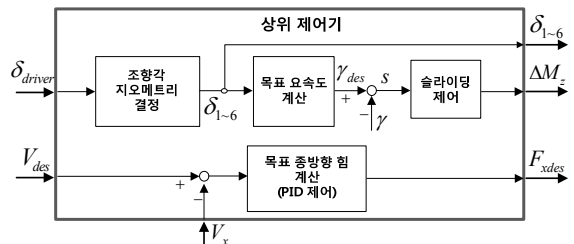


Fig. 4 Upper level control scheme

향 입력을 결정하고, 목표 요속도를 계산하여 슬라이딩 제어를 통해 목표 요 모멘트를 결정하며, PID 제어를 이용하여 목표 종방향 힘을 결정한다.

목표 종방향 힘은 식 (6)과 같이 운전자에 의해 결정된 속도 입력과 현재 속도의 차이를 에러 변수로 하는 PID 제어로부터 결정된다.

$$F_{xdes} = m \cdot \left[\begin{matrix} K_p (V_{des} - V_x) \\ + K_I \int (V_{des} - V_x) dt + K_d \frac{d(V_{des} - V_x)}{dt} \end{matrix} \right] \quad (6)$$

목표 요 속도는 2 자유도 자전거 모델로부터 구할 수 있다. 식 (7)는 2 자유도 자전거 모델의 횡방향 동역학 식과 요 모멘트 동역학 식으로부터 얻어진 상태 미분 방정식이다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (7)$$

$$\text{where } A = \begin{bmatrix} \frac{-2(C_f + C_m + C_r)}{mv_x} & \frac{-2(l_f C_f + l_m C_m - l_r C_r)}{mv_x^2} & -1 \\ -2(l_f C_f + l_m C_m - l_r C_r) & \frac{-2(l_f^2 C_f + l_m^2 C_m + l_r^2 C_r)}{I_z v_x} \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} \beta \\ \gamma \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{C_f}{l_f} & \frac{C_m}{l_m} & \frac{C_r}{l_r} \\ \frac{l_f C_f}{I_z} & \frac{l_m C_m}{I_z} & \frac{l_r C_r}{I_z} \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} \delta_f \\ \delta_m \\ \delta_r \end{bmatrix}$$

정상 상태 요속도는 식 (7)의 미분항을 0으로 가정하고 차체 슬립 각 (β)을 소거하여 얻는다. 목표 요속도는 정상 상태 요속도에 대한 1차 시간 지연 전달함수로 결정된다. 식 (8)은 목표 요속도를 구하는 과정을 나타낸다.

$$\gamma_{des} = \frac{1}{1 + \tau_S} \cdot \gamma_{ss} \quad (8)$$

where

$$\gamma_{ss} = \frac{(a_{11}b_{21} - a_{21}b_{11})\delta_f + (a_{11}b_{22} - a_{21}b_{12})\delta_m + (a_{11}b_{23} - a_{21}b_{13})\delta_r}{(a_{12}a_{21} - a_{11}a_{22})}$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \end{bmatrix}$$

목표 요속도를 만족하기 위한 목표 요 모멘트는 종방향 타이어 힘의 차이에 의해 생성되는 모멘트로써, 2 자유도 자전거 모델의 요 모멘트 동역학 식으로부터 얻어진다. 목표 요 모멘트는 식 (9)에 나타내어지는 추가되는 항(ΔM_z)과 같다.

$$I_z \dot{\gamma} = 2l_f F_{yf} \cos \delta_f + 2l_m F_{ym} \cos \delta_m - 2l_r F_{yr} \cos \delta_r + \Delta M_z \quad (9)$$

슬라이딩 모드 제어를 위한 슬라이딩 표면은 식 (10)와 같이 현재의 요속도와 목표 요속도의 차이로 결정된다.

$$s = \gamma - \gamma_{des} \quad (10)$$

슬라이딩 모드 제어의 제어 목표는 슬라이딩 표면을 0에 수렴하도록 하는 것이다. 이 슬라이딩 조건을 만족시키도록 하는 목표 요 모멘트는 식 (11)과 같이 결정된다.

$$\begin{aligned} \Delta M_z = & -2l_f F_{yf} \cos \delta_f - 2l_m F_{ym} \cos \delta_m + 2l_r F_{yr} \cos \delta_r \\ & + I_z \cdot \dot{\gamma}_{des} + I_z k_{sliding} \text{sat} \left(\frac{s}{\Phi} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

3.2 하위 제어기

고장 하위제어기는 Fig. 4와 같이 조향 고장이 발생한 휠의 고슬립을 유도하기 위한 목표 휠속도 설정, 조향 고장이 발생한 휠의 PID 제어를 이용한 휠 토크 입력 결정, 조향 고장이 발생한 휠의 종방향 타이어 힘 추정, 나머지 휠의 종방향 힘 최적 분배 제어(8,9)로 구성되어 있다.

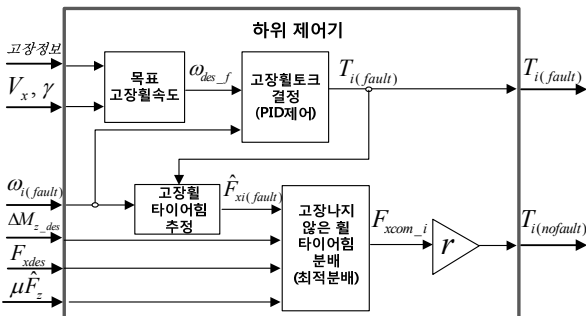


Fig. 5 High slip based lower level control scheme

최적 타이어 힘 분배를 위한 성능 지수는 식 (12)와 같이 각 휠의 추가 분배의 제공에 가중치를 곱한 값을 수직하중 추정치(10)에 의한 마찰원으로 나눈 값으로 결정된다.

$$\begin{aligned} J = & c_{x1} \cdot \frac{\Delta F_{x1}^2}{(\mu_1 F_{z1})^2} + c_{x2} \cdot \frac{\Delta F_{x2}^2}{(\mu_2 F_{z2})^2} + c_{x3} \cdot \frac{\Delta F_{x3}^2}{(\mu_3 F_{z3})^2} \\ & + c_{x4} \cdot \frac{\Delta F_{x4}^2}{(\mu_4 F_{z4})^2} + c_{x5} \cdot \frac{\Delta F_{x5}^2}{(\mu_5 F_{z5})^2} + c_{x6} \cdot \frac{\Delta F_{x6}^2}{(\mu_6 F_{z6})^2} \end{aligned} \quad (12)$$

이 최적 제어의 해는 상위제어기로부터 결정된 목표 힘과 요 모멘트 식 (13)과 (14)을 만족해야 한다.

$$\Delta F_{x1} + \Delta F_{x2} + \Delta F_{x3} + \Delta F_{x4} + \Delta F_{x5} + \Delta F_{x6} = 0 \quad (13)$$

$$\Delta M_{z_des} = \frac{t_{fmr}}{2} \{-\Delta F_{x1} + \Delta F_{x2} - \Delta F_{x3} + \Delta F_{x4} - \Delta F_{x5} + \Delta F_{x6}\} \quad (14)$$

이로부터 식 (15) 및 (16)과 같이 두 변수를 종속화 할 수 있다.

$$\Delta F_{x5} = -\frac{1}{t_{fmr}} \Delta M_{z_des} - \Delta F_{x1} - \Delta F_{x3} \quad (15)$$

$$\Delta F_{x6} = +\frac{1}{t_{fmr}} \Delta M_{z_des} - \Delta F_{x2} - \Delta F_{x4} \quad (16)$$

식 (15)과 (16)의 식 (12)에 대입하면 4개의 변수 $\Delta F_{x1}, \Delta F_{x2}, \Delta F_{x3}, \Delta F_{x4}$ 에 대한 식으로 변환되고, 이를 각 변수에 대하여 편미분하여 최적해를 얻을 수 있다. 본 연구에서 가중치(c_{xi})는 고장 안전 제어 성능에 있어 큰 영향을 주지 않으므로 모두 1로 가정하였다. 마찰원 추정방법은 김원균 등의 연구 결과(4,8)에서 사용된 방법을 인용하였다.

이 때 조향부에 고장이 발생한 휠에도 이와 같은 슬립 제어를 가할 경우 종방향 타이어 힘 뿐만 아니라 횡방향 타이어 힘도 충분히 큰 값을 내게 되므로, 운전자가 의도하는 속도와 요 모션에 대해 저항력으로 작용하게 된다. 따라서 조향부에 고장이 발생한 휠에는 높은 슬립률을 유도함으로써 횡방향 타이어 힘을 줄여 고장으로 인한 저항력을 최소화 하도록 해야 한다. 이를 위하여 일반적으로 슬립률 임계값은 노면 조건에 따라 0.1~0.2 정도를 나타내지만, 고장이 발생한 휠은 0.8로 설정하여 고슬립 상태를 유지하도록 한다. 고장이 발생한 휠의 목표 휠 속도는 다음과 같이 변경된다.

$$\omega_{des_f} = \begin{cases} \frac{V_x}{r_i \cdot (1-0.8)} & (\text{정속/가속상황}) \\ \frac{V_x}{r_i} \cdot (1-0.8) & (\text{감속상황}) \end{cases} \quad (17)$$

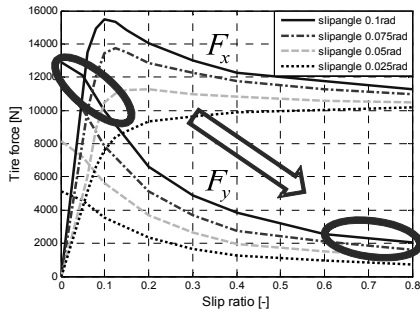


Fig. 6 Lateral tire force with respect to slip ratio

Fig. 6 은 슬립률에 따른 종방향 및 횡방향 타이어 힘의 변화를 나타낸다.⁽¹¹⁾ 조향 고장이 발생한 휠은 현재 조향 상태에 따라 횡방향 힘의 작용이 선회 모멘트를 감소시키는 저항력으로 작용할 수 있으며, 이에 고슬립을 유도함으로써 횡방향 힘을 감소시켜 저항력을 줄일 수 있다.

조향부에 고장이 발생한 휠의 목표 휠 속도를 유도하기 위하여, 식 (18)과 같이 PID 제어를 사용하여 휠 토크 입력을 결정한다.

$$T_{i(fault)} = K_{pf} (\omega_{des_i(fault)} - \omega_{i(fault)}) + K_{if} \int (\omega_{des_i(fault)} - \omega_{i(fault)}) dt + K_{df} \frac{d}{dt} (\omega_{des_i(fault)} - \omega_{i(fault)}) \quad (18)$$

고슬립 유도로 인한 조향부 고장 발생 휠의 종방향 타이어 힘 변화를 고려하기 위하여 식 (19)와 같이 토크 입력과 휠 가속도 추정치⁽¹²⁾로부터 종방향 타이어 힘을 추정한다.

$$\hat{F}_{xi(fault)} = \frac{T_{i(fault)}}{r_i} - \frac{J_{oi}}{r_i} \hat{\omega}_{i(fault)} \quad (19)$$

조향부 고장 휠의 고슬립 유도로 인한 종방향 타이어 힘 증가를 고려하기 위하여 식 (13) 및 (14)의 구속조건이 각각 식 (20) 및 (21)과 같이 수정된다.

$$\sum \Delta F_{xi(nofault)} = -\Delta \hat{F}_{xi(fault)} \quad (20)$$

$$\Delta M_{z_des} - \frac{t_{fmr}}{2} \cdot (-1)^i \Delta \hat{F}_{xi(fault)} = \frac{t_{fmr}}{2} \sum (-1)^i \Delta F_{xi(nofault)} \quad (21)$$

이 때 $\Delta \hat{F}_{xi(fault)}$ 은 $\frac{1}{6} F_{xdes} - \hat{F}_{xi(fault)}$ 을 의미한다. 따라서 식 (15)과 (16)의 두 종속변수는 1~4 번 휠의 조향부의 각 고장 발생 경우에 따라 달라지게 되며, 5 번 또는 6 번 휠의 조향부 고장 발생시에는 각각 3 번 또는 4 번 휠의 독립변수를 종속화 하여 최적해를 구할 수 있다. Table 2 는 각 휠의 조향부

Table 2 Dependent variables changing with respect to the faulty wheel number

고장 휠	변경된 종속 변수
1 번	$\Delta F_{x5} = -\frac{1}{t_{fmr}} \Delta M_{z_des} - \Delta \hat{F}_{x1} - \Delta F_{x3}$
2 번	$\Delta F_{x6} = +\frac{1}{t_{fmr}} \Delta M_{z_des} - \Delta \hat{F}_{x2} - \Delta F_{x4}$
3 번	$\Delta F_{x5} = -\frac{1}{t_{fmr}} \Delta M_{z_des} - \Delta F_{x1} - \Delta \hat{F}_{x3}$
4 번	$\Delta F_{x6} = +\frac{1}{t_{fmr}} \Delta M_{z_des} - \Delta F_{x2} - \Delta \hat{F}_{x4}$
5 번	$\Delta F_{x3} = -\frac{1}{t_{fmr}} \Delta M_{z_des} - \Delta F_{x1} - \Delta \hat{F}_{x5}$
6 번	$\Delta F_{x4} = +\frac{1}{t_{fmr}} \Delta M_{z_des} - \Delta F_{x2} - \Delta \hat{F}_{x6}$

의 고장 발생 경우에 따른 종속변수의 변경을 정리한 것이다.

각 고장 경우에 대하여 변경된 종속변수를 식 (15)의 성능지수에 대입하여, 조향부 고장이 발생하지 않은 휠의 종방향 타이어 힘의 최적해를 구하여 식 (23)과 같이 결정할 수 있다.

$$F_{xcom_i(nofault)} = \frac{1}{6-n} \cdot (F_{xdes} - \hat{F}_{xi(fault)}) + \Delta F_{xi(nofault)} \quad (23)$$

4. 시뮬레이션 검증

본 고슬립 기반 조향부 고장 안전 주행 제어 알고리즘의 검증을 위하여 TruckSim 을 이용하여 6 륜 독립구동/독립조향 차량을 모델링하고, MATLAB Simulink 로 본 고장 안전 주행 제어를 구현하여 시뮬레이션을 수행하였다. 개루프 조향 시뮬레이션은 조향부 고장시 선회 성능 향상을 확인하기 위함이며, 폐루프 조향 시뮬레이션은 조향 부 고장시 운전자 모델의 조향 안정성을 검증하기 위해서 수행되었다. 시뮬레이션 결과의 비교 대상은 기존 연구의 최적 분배 제어 알고리즘을 이용한 결과이다.

4.1 개루프 조향 시뮬레이션

Fig. 7 은 fish-hook 및 원선회 테스트에서 1 번 휠의 조향각이 반대로 꺾이는 고장 상황을 나타낸 것이다. 비교 대상은 고장 안전 주행 제어가 없이 6 개의 구동 입력을 최적으로 배분하는 최적 제어시의 주행 한계이다. 이 시뮬레이션은 고장시 일정 목표 차량 속도 설정에 대하여 낼 수 있는 최대 요속도를 측정하는 것으로, Fig. 8 은 이 중 30kph

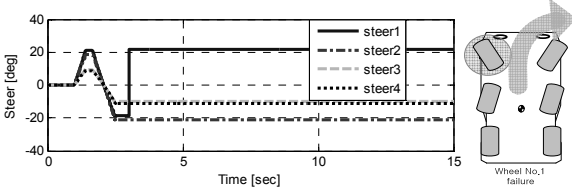


Fig. 7 Steering angle of each wheel during fish-hook and round turning

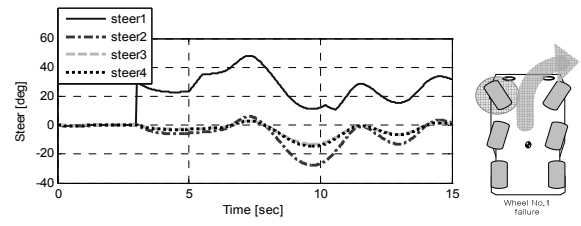


Fig. 10 Front left wheel (wheel 1) fault circumstance

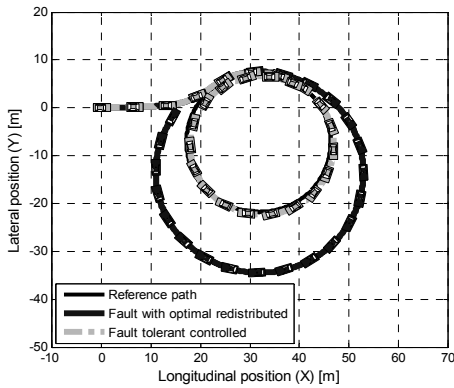


Fig. 8 Trajectories of fish-hook and round turning simulation

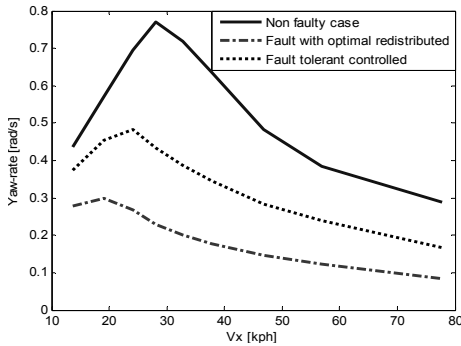


Fig. 9 Maximum stable yaw-rate curve

일 때의 차량 궤적을 나타낸 것이다. 이 때, 고슬립 기반 고장 안전 주행 제어시, 일반 최적 제어에 비하여 약 33.8%의 선회 성능이 향상됨이 Fig. 9의 차량 속도 대비 최대 요속도 기록 그래프를 통하여 확인된다.

4.2 페루프 조향 시뮬레이션

페루프 조향 시뮬레이션은 double lane change 구간을 TruckSim에서 제공하는 운전자 모델에 의한 조향 입력으로 tracking 하도록 구성하였으며, 상위 제어기의 차량 속도 제어는 40kph를 유지하도록 하였다. Fig. 9는 double lane change 도중 1번 조향부가 한 쪽으로 꺾여진 채로 주행하는 상태의 각

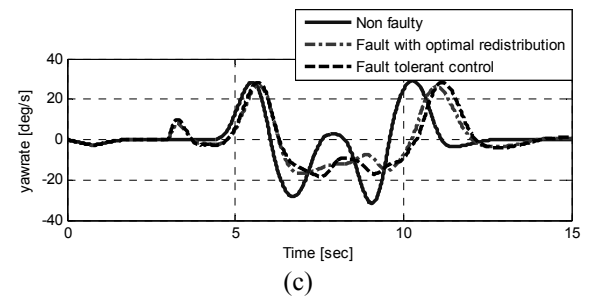
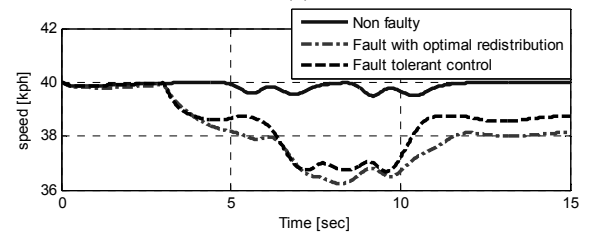
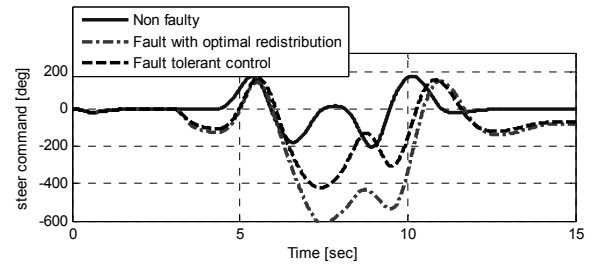


Fig. 11 Results of closed-loop simulation - (a) driver model's steering command (b) Vehicle speed (c) Yaw rate

휠 조향각을 나타낸 것이다. 이 때 Fig. 10(a)에 도식된 운전자 조향 입력은 고슬립 기반 고장 안전 주행 제어시 최적 분배에 비하여 적음을 알 수 있다. 이 때 Fig. 11(b), (c)에 도식된 바와 같이 차량 속도와 요속도는 큰 차이가 없다.

Fig. 12는 고슬립 기반 고장 안전 주행 제어시 1번 휠의 휠 토크 입력을 나타낸 것이며, Fig. 13의 (a)와 (b)는 각각 1번 휠과 2번 휠의 횡방향 타이어 힘을 도식화 한 것이다. 고슬립 기반 고장 안전 주행 제어시 조향부 고장이 발생한 휠의 휠 토크 입력을 증가시킴으로써, 횡방향 타이어 힘이 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있다.

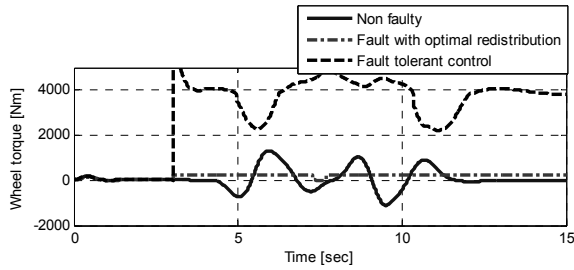
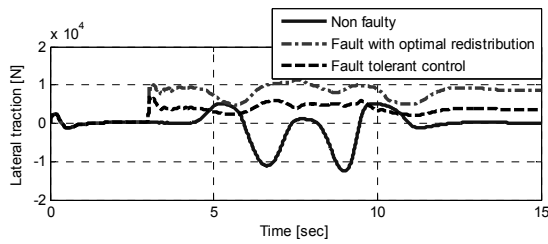
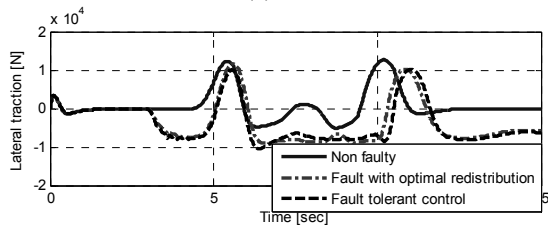


Fig. 12 Results of closed-loop simulation – Torque command to wheel 1



(a)



(b)

Fig. 13 Results of closed-loop simulation - (a) Lateral tire force of wheel 1 (b) Lateral tire force of wheel 2

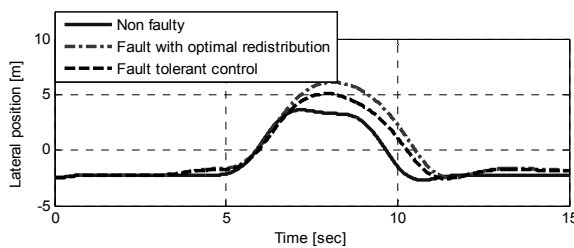


Fig. 14 Results of closed-loop simulation – lateral position

Fig. 14는 횡방향 차량 위치를 나타낸다. 고슬립 기반 고장 안전 주행 제어시 운전자의 주행 의도에 대한 오차를 줄여, 고장이 발생하지 않았을 때에 좀 더 근접한 궤적으로 주행할 수 있음을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문은 독립 steer-by-wire 시스템이 적용된 6륜 독립구동/독립조향 차량의 조향 고장이 발생한

휠에 의한 저항력으로 인한 선회 모멘트를 보정하기 위한 고슬립 기반 고장 안전 주행 제어 알고리즘을 제안하였다. 시뮬레이션 결과 조향장치 고장시 기존 연구의 최적 분배 제어 알고리즘에 비하여 선회 성능이 향상됨을 확인하였다. 본 논문의 시뮬레이션 연구 결과를 바탕으로, 향후 실제 플랫폼에 본 알고리즘을 적용하여, 고장 정보 제공시 본 알고리즘에 의해 고장 안전 주행 제어 입력이 분배되어 고장시 주행 성능을 보완함을 확인할 예정이다.

후 기

본 연구는 서울대학교 정밀기계설계공동연구소(SNU-IAMD), 국방과학연구소 및 삼성테크윈의 지원 하에 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Huh, K., Jhang, K., Oh, J., Kim, J. and Hong, J., 1999, "Development of a Simulation Tool for the Cornering Performance Analysis of 6WD/6WS Vehicles," *KSME International Journal*, Vol. 13, No. 3, pp. 211~220.
- (2) An, S.J. Yi, K., Jung, G., Lee, K.I. and Kim, Y.W., 2008, "Desired Yaw Rate and Steering Control Method During Cornering for a Six-wheeled Vehicle," *IJAT*, Vol. 9, No. 2, pp. 173~181.
- (3) Kim, W. G., Kang, J. Y. and Yi, K., 2011, "Drive Control System Design for Stability and Maneuverability of a 6WD/6WS Vehicle," *IJAT*, Vol. 12, No. 1, pp. 67~74.
- (4) Hac, A., 2006, "Control of Brake- and Steer-by-Wire Systems During Brake Actuator Failure," *2006 SAE World Congress*.
- (5) Gillespie, T. D., 1992, "Fundamentals of Vehicle Dynamics," *SAE International*.
- (6) Sohel Anwar and Lei Chen, 2007, "An Analytical Redundancy-Based Fault Detection and Isolation Algorithm for a Road-Wheel Control Subsystem in a Steer-by-Wire System," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 56, No. 5.
- (7) Im, J.S., Ozaki, F., Yeu, T.K. and Kawaji, S., 2009, "Model-Based Fault Detection and Isolation in Steer-by-Wire Vehicle Using Sliding Mode Observer," *Journal of Mechanical Science and Technology* 23, pp. 1991~1999.
- (8) Kim, W., Yi, K. and Lee, J., 2011, "Development of a Driving Control Algorithm and Performance Verification Using Real-Time Simulator for a 6WD/6WS Vehicle," *SAE Technical Paper* 2011-01-

- 0262.
- (9) Kim, S.-H., Kim, D.-H., Kim, C.-J., Kim, Y.-R., Choi, J.-Y. and Han, C.-S., 2010, "A Study on Motion Control of 6WD/6WS Vehicle Using Optimum Tire Force Distribution Method," *International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, pp.1502~1507.
- (10) Ray, L.R., 1997, "Nonlinear Tire Force Estimation and Road Friction Identification: Simulation and Experiments," *Automatica*, vol. 33, no. 10, pp.1819~1833 .
- (11) Pacejka, H.B. and Bakker, E., 1992, "The magic formula tyre model," *Vehicle System Dynamics*, Vol. 21, Supplement 001.
- (12) Zhang, Q., Liu, G., Wang, Y. and Zhou, T., 2004, "A Study of Calculation Method of Wheel Angular Acceleration in ABS System," *Proc. 2004 Int. Conf. Information Acquisition*, pp. 147~150.