

# Sliding mode observer를 통한 Brake-by-wire 차량의 제동 토크 고장 진단 알고리즘 개발

성시현<sup>1)</sup>, 최세범<sup>\*1)</sup>, 현동윤<sup>2)</sup>

한국과학기술원 기계공학과<sup>1)</sup> 현대자동차 샤시제어개발팀<sup>2)</sup>

## Development of fault detection and isolation algorithm for Brake-by-wire vehicle using sliding mode observer

Sihyun Seong<sup>1)</sup> · Seibum Choi<sup>\*1)</sup> · Dongyoon Hyun<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology,  
291 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34141, Republic of Korea

<sup>2)</sup> Chassis System Control Development Team, Hyundai Motor Company, 150 Hyundaiyeonguso-ro, Namyang-eup,  
Hwaseong-si, Gyeonggi 18280, Republic of Korea

**Abstract :** 본 연구는 차량의 제동 시스템의 fail을 sliding mode 관측기를 통해서 fail을 검출 및 분류하는 알고리즘에 대해서 다루었다. Brake-by-wire 시스템은 기존의 제동 시스템에서 쓰이던 유압 라인 및 vacuum 부스터와 같은 장치들을 사용하지 않기 때문에 엔진룸과 차량 하부에 공간적 여유를 확보 할 수 있으며 Adaptive Cruise Control, Electronic brake force distribution 와 같은 샤시 제어 시스템과 연계하기 쉽기 때문에 지능형 자동차에 필수적이다. 하지만 Brake-by-wire시스템은 기계적인 backup시스템이 존재하지 않기 때문에 고장이 발생한다면 치명적인 사고로 이어질 수 있다. 차량의 제동시스템이 fail날 경우 차량은 제동시에 좌우 제동 불균형으로 인한 요 모멘트의 발생과 함께 종방향 감속도, 횡속도의 이상이 발생할 것이다. 이러한 차량의 이상은 운전자의 의도와 다르게 차량을 움직이게 하며 결과적으로 치명적인 사고의 원인이 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 강건하며 연산량이 비교적 적은 sliding mode 관측기를 설계하여 차량의 제동시스템의 고장을 검출하는 방법을 제안하였다. 또한 Carsim 시뮬레이션을 통해 제동 토크 고장 진단 알고리즘을 검증하였다.

**Key words :** Fault Detection and Isolation(고장 검출 및 분류), Braking torque fault(제동 토크 고장), Sliding mode observer(슬라이딩 모드 관측기), Actuator fault (액츄에이터 고장), Residual generator(residual 생성기)

### Nomenclature

$m$ : vehicle mass, kg

$I_w$ : wheel inertia,  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

$I_z$ : vehicle yaw inertia,  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

$C_{xi}$ : longitudinal tire stiffness

$C_{yi}$ : lateral tire stiffness

$V_y$ : vehicle lateral speed,  $\text{m/s}$

$r$ : vehicle yaw rate,  $\text{rad/s}$

$\omega_i$ : wheel speed,  $\text{rad/s}$

$l_f$ : longitudinal distance of the front axle from the c.g of the vehicle, m

$l_r$ : longitudinal distance of the rear axle from the c.g. of the vehicle, m

$K_t$ : motor torque constant,  $\text{Nm/A}$

$l_w$ : distance between left and right wheels

$R_e$ : the effective radius of the tires, m

\* 성시현, E-mail: go4090@kaist.ac.kr

## 1. 서론

최근 자동차 산업 동향을 보면 운전자의 편의성을 제공하기 위하여 사시 제어 시스템에서 기존의 유압 시스템 대신에 X-By-Wire 시스템을 도입하려는 시도가 늘고 있다. X-By-Wire 시스템이란 기계적 연결 혹은 유압 연결을 제거하고 전기적 신호로 대체하는 것을 의미한다. 이와 같은 추세로 Brake-By-Wire(BBW) 시스템 또한 주목받고 있다. BBW 시스템은 기존의 유압 연결 대신에 전동식 브레이크를 통해 차량을 제동하는 시스템을 의미한다. 유압 라인, Vacuum booster 및 기계 링크를 제거함으로써 차량의 엔진룸과 차량 하부에 공간적인 여유를 확보할 수 있으며 Adaptive Cruise Control 및 Electronic brake force distribution과 같은 시스템과 연동이 쉬워진다. 이 외에도 모터의 빠른 응답성을 통해 제동거리가 감소되며, 유압 장치의 오일이 필요하지 않으므로 환경적으로도 많은 장점이 있다.

이와 같은 BBW시스템의 상용화를 위해서는 신뢰성 문제가 해결되어야 한다. 기존의 유압 제동 시스템과 달리 BBW 시스템의 경우 기계적인 back up 시스템이 없기 때문에 고장이 발생할 경우 치명적인 사고를 일으킬 수 있다. 따라서 Fault Detection and Isolation (FDI) 알고리즘 및 Fault Tolerant Control이 매우 중요하다. 고장 진단(FDI) 알고리즘은 크게 관측기 기반 방식과 parity space 방식으로 나뉜다. 관측기 기반 방식은 모델 관측기를 통해 residual을 생성하여 고장 진단을 하는 방식이며 parity space 방식은 시스템의 입력과 출력에 parity vector를 곱하여 residual을 생성한 뒤 고장 진단을 한다. 본 연구에서는 Planar-full car 모델을 사용하여 차량을 모델링 하였으며, 차량의 제동 토크의 fault를 모델링 한 뒤 sliding mode 관측기를 사용하여 residual을 생성하였다. 그 후에 residual을 평가하여 고장을 진단하였다. 여러 관측기중에서 sliding mode 관측기를 사용한 이유는 기존에 많이 사용되던 Luenberger 관측기보다 강건하며 칼만필터보다 연산량이 작기 때문에 sliding mode 관측기를 이용하여 차량의 브레이크 고장을 진단하였다.

## 2. Vehicle 및 fault 모델링

차량의 한 쪽 제동장치가 고장이 발생한다면 제동 시에 중방향 감속도, 휠 속도의 이상과 함께 좌우 제동 불균형으로 차량의 요 레이트가 생길 것이다. 따라서 좌우 제동 불균형으로 인해 발생하는 요 모션을 표현하기 위해 planar full car 모델을 사용하여 차량을 모델링 및 제동 토크의 고장을 모델링 하였다.

### 2.1 Planar full car 모델링

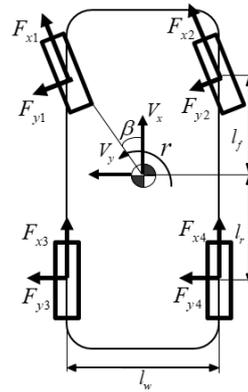


Figure 2.1 Planar full car 모델

Figure 2.1은 Planar full car 모델이며 차량의 거동을 표현하기 위해 횡방향 힘 평형식, 모멘트 평형식, 휠 다이내믹스, 타이어 중방향 다이내믹스, 타이어 횡방향 다이내믹스를 사용하였다.

$$m(\dot{V}_y + rV_x) = F_{y1} + F_{y2} + F_{y3} + F_{y4} \quad (2.1)$$

$$I_z \dot{r} = l_f \cdot (F_{y1} + F_{y2}) - l_r \cdot (F_{y3} + F_{y4}) - \frac{l_w}{2} \cdot F_{x1} + \frac{l_w}{2} \cdot F_{x2} - \frac{l_w}{2} \cdot F_{x3} + \frac{l_w}{2} \cdot F_{x4} \quad (2.2)$$

$$I_{\omega} \dot{\omega}_i = -R_e F_{xi} - T_i \quad (i=1,2,3,4) \quad (2.3)$$

$$F_{xi} = C_{xi} \frac{R_e \omega - V_x}{V_x} \quad (i=1,2,3,4) \quad (2.4)$$

$$F_{yi} = -C_{yi} \left( \frac{V_y + l_f r}{V_x} - \delta_f \right) \quad (i=1,2) \quad (2.5)$$

$$F_{yi} = -C_{yi} \left( \frac{V_y - l_r r}{V_x} \right) \quad (i=3,4) \quad (2.6)$$

횡방향 힘 평형식과 모멘트 평형식에 타이어 중방향 다이내믹스와 타이어 횡방향 다이내믹스를 통해 정리하면 식(2.7), 식(2.8)과 같다.

$$m(\dot{V}_y + rV_x) = (C_{y1} + C_{y2})(\delta_f - \frac{V_y + l_f r}{V_x}) - (C_{y3} + C_{y4})(\frac{V_y - l_r r}{V_x}) \quad (2.7)$$

$$I_z \dot{r} = l_f \cdot (C_{y1} + C_{y2})(\delta_f - \frac{V_y + l_f r}{V_x}) + l_r \cdot (C_{y3} + C_{y4})(\frac{V_y - l_r r}{V_x}) - \frac{l_w}{2} \cdot C_{x1} \frac{R_e \omega - V_x}{V_x} + \frac{l_w}{2} \cdot C_{x2} \frac{R_e \omega - V_x}{V_x} - \frac{l_w}{2} \cdot C_{x3} \frac{R_e \omega - V_x}{V_x} + \frac{l_w}{2} \cdot C_{x4} \frac{R_e \omega - V_x}{V_x} \quad (2.8)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{I_w} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{I_w} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{I_w} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{I_w} \end{bmatrix}, B_f = \begin{bmatrix} \frac{C_{y1} + C_{y2}}{m} \\ \frac{l_f(C_{y1} + C_{y2})}{I_z} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{2} l_w (C_{x1} - C_{x2} + C_{x3} - C_{x4}) \\ \frac{R_e C_{x1}}{I_w} \\ \frac{R_e C_{x2}}{I_w} \\ \frac{R_e C_{x3}}{I_w} \\ \frac{R_e C_{x4}}{I_w} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

따라서 이를 state-space 꼴로 표현하면 아래와 같이 표현 할 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + Bu + B_f \delta_f + E \quad (2.9)$$

$$y = Cx$$

$$x = [V_y \quad r \quad \omega_1 \quad \omega_2 \quad \omega_3 \quad \omega_4]^T \quad (2.10)$$

$$y = [r \quad \omega_1 \quad \omega_2 \quad \omega_3 \quad \omega_4]^T \quad (2.11)$$

$$u = [T_1 \quad T_2 \quad T_3 \quad T_4]^T \quad (2.12)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{(C_{y1} + C_{y2}) + (C_{y3} + C_{y4})}{mV_x} & -V_x - \frac{l_f(C_{y1} + C_{y2}) - l_r(C_{y3} + C_{y4})}{mV_x} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{l_f(C_{y1} + C_{y2}) - l_r(C_{y3} + C_{y4})}{I_z V_x} & -\frac{l_f^2(C_{y1} + C_{y2}) + l_r^2(C_{y3} + C_{y4})}{I_z V_x} & -\frac{l_w C_{x1} R_e}{2V_x} & \frac{l_w C_{x2} R_e}{2V_x} & -\frac{l_w C_{x3} R_e}{2V_x} & \frac{l_w C_{x4} R_e}{2V_x} \\ 0 & 0 & -\frac{R_e^2 C_{x1}}{I_w V_x} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{R_e^2 C_{x2}}{I_w V_x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{R_e^2 C_{x3}}{I_w V_x} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{R_e^2 C_{x4}}{I_w V_x} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

시스템의 state는  $V_y$ , 요 레이트, 4개의 바퀴의 휠 속도이며 시스템의 input은 각 바퀴의 제동 토크, 시스템의 출력은 요 레이트와 4개의 바퀴의 휠 속도이다.

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 & x_y \end{bmatrix}^T \quad (3.4)$$

$$\beta = \begin{bmatrix} 0 & \beta_y \end{bmatrix}^T \quad (3.5)$$

### 2.2 Braking torque fault 모델링

차량의 제동장치의 고장은 Multiplicative fault로 모델링 하였다.

$$\dot{x} = Ax + (B + \Delta B)u + B_f \delta_f + E \quad (2.14)$$

식(2.14)의 fault 항을 구분하기 위해 식 (2.15)와 같이 변형하였다.

$$\dot{x} = Ax + Bu + \beta f + B_f \delta_f + E \quad (2.15)$$

고장 모델링에서 다음과 같은 가정을 하였다.

Assumption 1 :  $f$ 는 스칼라 값이며 양수

Assumption 2 :  $|f| < \gamma$

식(3.4)에서  $x_1$ 은 센서가 없는 state variables이고  $x_y$ 는 센서가 있는 state variables 이다.

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + G_l e_y + G_n v \quad (3.6)$$

$$G_l = \begin{bmatrix} A_{21} \\ L_y \end{bmatrix}, G_n = \begin{bmatrix} 0 \\ I_y \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$v = \rho \text{sign}(e_y) \quad (3.8)$$

식(3.6)은 슬라이딩 모드 관측기이다.  $v$ 는 센서가 있는 state variables error의 sign함수이며  $\rho$ 는 양수의 스칼라 값이며  $G_n, G_l$ 은 관측기 게인이다.

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \beta_y \end{bmatrix} f - \begin{bmatrix} A_{12} \\ L_y \end{bmatrix} e_y - \begin{bmatrix} 0 \\ I_y \end{bmatrix} v \quad (3.9)$$

$$\dot{e}_1 = A_{11} e_1 \quad (3.10)$$

$$\dot{e}_y = A_{21} e_1 + (A_{22} - L_y) e_y + \beta_y f - v \quad (3.11)$$

## 3. Residual generation

### 3.1 Sliding mode observer design for FDI

본 챕터에서는 차량 제동 시스템의 고장을 sliding mode 관측기를 통해서 차량의 상태를 추정하고 이를 통해서 residual을 생성하였다.

차량과 제동 토크의 fault를 모델링 하면 식 (3.1)과 같다.

$$\dot{x} = Ax + Bu + \beta f \quad (3.1)$$

시스템에 선형 좌표 변환을 통해서 state variables을 센서가 없는 state variables과 센서가 있는 state variables로 나눈다.

$$x \rightarrow T_c x \quad (3.2)$$

식 (3.9), 식(3.10), 식(3.11)은 시스템의 에러다이 나믹스이다. 슬라이딩 모드 관측기를 고장 진단에 사용하기 위해서는 두가지 조건이 필요하다. 첫 번째 조건은  $A_{11}$ 이 stable하다는 조건이다.

$$A_{11} = -\frac{(C_{y1} + C_{y2}) + (C_{y3} + C_{y4})}{mV_x} \quad (3.12)$$

본 연구의 시스템에서는  $A_{11}$ 이 식(3.12)와 같으므로 첫 번째 조건을 만족한다.

두번째 조건은 sliding motion이 일어나게 하기 위하여  $e_y$ 가 eta-reachability 조건을 만족하여야 한다.

$$\begin{aligned}
 e_y \dot{e}_y &= e_y(A_{21}e_1 + (A_{22} - L_y)e_y + \beta_y f) - \rho e_y \text{sign}(e_y) \\
 &= e_y(A_{21}e_1 + (A_{22} - L_y)e_y + \beta_y f) - \rho |e_y| \\
 &< -|e_y|(\rho - |A_{21}e_1 + (A_{22} - L_y)e_y + \beta_y f|) \\
 &< -|e_y|(\rho - (|A_{21}e_1| + |(A_{22} - L_y)e_y| + |\beta_y f|)) \\
 &< -\eta |e_y| \tag{3.13}
 \end{aligned}$$

$$(\because \rho > |A_{21}e_1| + |(A_{22} - L_y)e_y| + |\beta_y f| + \eta) \tag{3.14}$$

식(3.14)와 같이  $\rho$ 를 디자인 하게 되면  $e_y$ 가 eta-reachability 조건을 만족하게 된다.

$$\begin{aligned}
 \dot{e}_y &= A_{21}e_1 + (A_{22} - L_y)e_y + \beta_y f - v \\
 &\downarrow \\
 0 &= \beta_y f - v_{eq} \tag{3.15}
 \end{aligned}$$

$$f = \rho(\beta_y^T \beta_y)^{-1} \beta_y^T \text{sign}(e_y) \tag{3.16}$$

두가지 조건을 만족하였으므로 시스템은 sliding motion이 일어나게 되며 따라서 fault(residual)은 식(3.16)과 같이 구할 수 있다.

## 4. Fault injection Simulation

### 4.1 Carsim simulation 시나리오

Sliding mode 관측기를 통한 제동 토크 고장 진단 알고리즘을 Carsim 및 Matlab simlink를 통해서 검증하였다. Fault injection 시나리오는 다음과 같다. 첫 번째 주행 상황은 직선 주행에서 감속 상황 시 제동장치가 고장 난 시나리오이며, 두 번째 시나리오는 Double lane change를 하면서 감속할 때 제동장치가 고장 난 시나리오이다. 제동은 3초에 시작하였으며, 브레이크의 fault는 5초에 발생하였다. Fault injection 시나리오를 테이블로 정리하면 아래와 같다.

표 4.1 Carsim simulation 시나리오

시나리오	주행 상황	고장 상황
시나리오 1	- 직선 주행 하면서	왼쪽 앞바퀴
시나리오 2	90km/h에서 감속	오른쪽 앞바퀴
시나리오 3	- 3초에 감속 시작	왼쪽 뒷바퀴
시나리오 4	- 5초에 fault 입력	오른쪽 뒷바퀴
시나리오 5	- Double Lane change를	왼쪽 앞바퀴
시나리오 6	하면서 90km/h에서 감속	오른쪽 앞바퀴
시나리오 7	- 3초에 감속 시작	왼쪽 뒷바퀴
시나리오 8	- 5초에 fault 입력	오른쪽 뒷바퀴

### 4.2 Carsim simulation results

Carsim simulation 결과는 Figure 4.1~4.4와 같다. 본 연구에서는 차량은 좌우 대칭이므로 왼쪽 앞바퀴 브레이크와 왼쪽 뒷바퀴 브레이크의 고장 상황의 결과만 나타내었다.

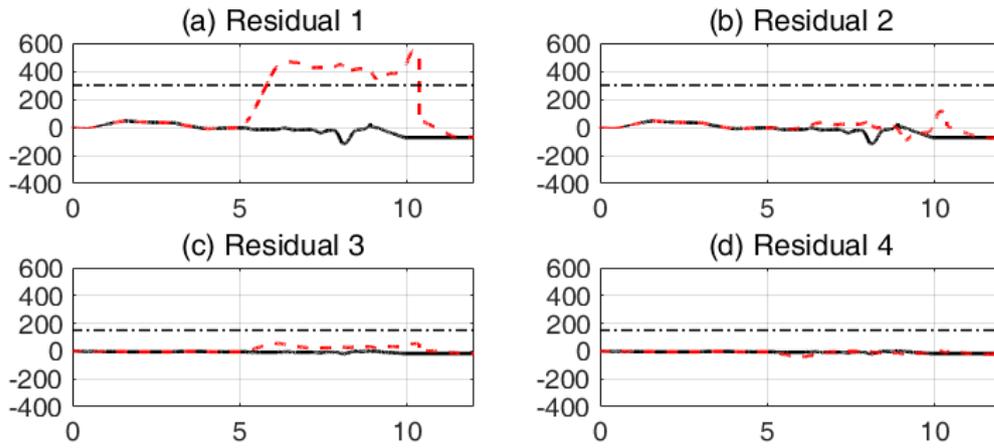


Figure 4.1 Carsim simulation 시나리오 1

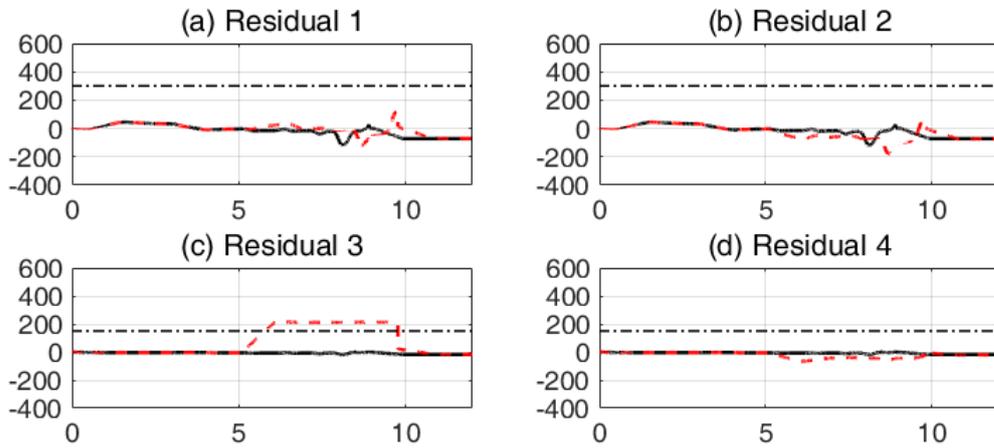


Figure 4.2 Carsim simulation 시나리오 3

Figure 4.1~4.4에서 residual 1,2,3,4는 각각 왼쪽 앞바퀴, 오른쪽 앞바퀴, 왼쪽 뒷바퀴, 오른쪽 뒷바퀴의 residual을 의미한다. 검은색은 고장이 없는 상황에서의 residual이며, 빨간색은 각 바퀴의 고장 상황에서의 residual이다.

Figure 4.1은 Carsim simulation 시나리오 1일 때 각 바퀴의 residual을 보여준다. 시나리오 1은 왼쪽 앞바퀴의 제동장치에 고장이 발생한 상황이므로 residual 1에서만 고장이 검출되고 나머지 residual 2,3,4에서는 고장이 검출되지 않는 것을 확인 할 수 있다.

Figure 4.2는 Carsim simulation 시나리오 3일 때 각 바퀴의 residual을 보여준다. 시나리오 3은 왼쪽 뒷바퀴의 제동장치에 고장이 발생한 상황이므로 residual 3에서만 고장이 검출되고 나머지 residual 1,2,4 에서는 고장이 검출되지 않는 것을 확인 할 수 있다.

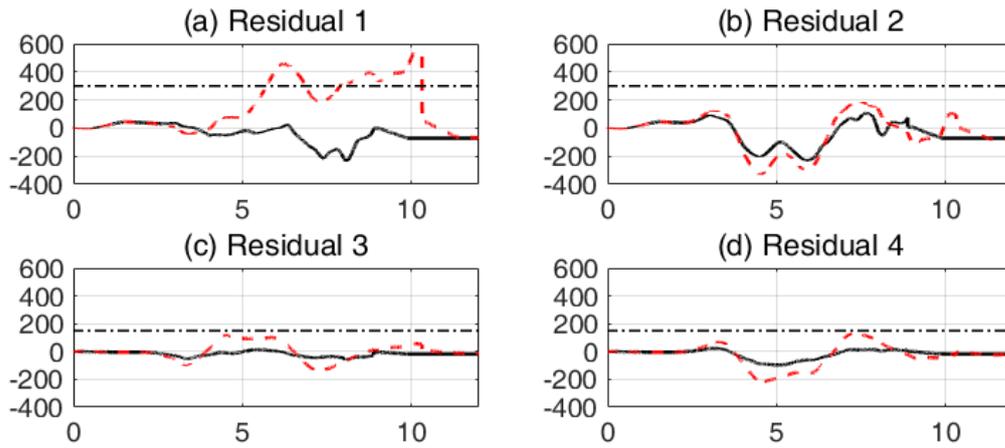


Figure 4.3 Carsim simulation 시나리오 5

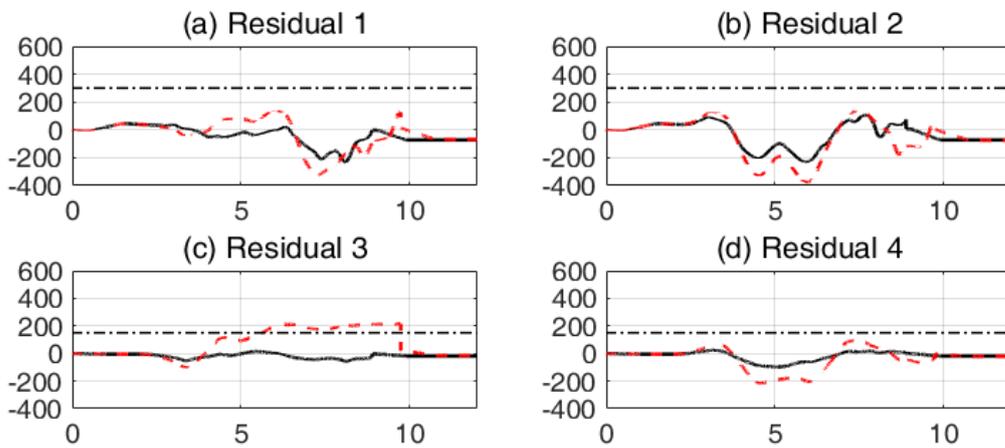


Figure 4.4 Carsim simulation 시나리오 7

Figure 4.3은 Carsim simulation 시나리오 5일 때 각 바퀴의 residual을 보여준다. 시나리오 5은 왼쪽 앞바퀴의 제동장치에 고장이 발생한 상황이므로 residual 1에서만 고장이 검출되고 나머지 residual2,3,4에서는 고장이 검출되지 않는 것을 확인 할 수 있다.

Figure 4.4은 Carsim simulation 시나리오 7일 때 각 바퀴의 residual을 보여준다. 시나리오 7은 왼쪽 앞바퀴의 제동장치에 고장이 발생한 상황이므로 residual 3에서만 고장이 검출되고 나머지 residual1,2,4에서는 고장이 검출되지 않는 것을 확인 할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 Brake by wire 시스템의 신뢰성 향상을 위하여 Sliding mode 관측기를 이용하여 차량의 제동 토크 고장 진단 알고리즘을 제안하였다. Planar full car 모델을 사용하여 차량 및 제동 토크 fault를 모델링 하고 sliding mode 관측기를 통해서 residual을 생성하였다. 그 후 residual 평가를 통해서 고장을 진단하였다. 또한 Carsim 및 Matlab 시뮬레이션을 통해 제동 토크 고장 진단 알고리즘을 검증하였다. Brake by wire 시스템의 제동 토크 고장을 Sliding mode 관측기를 통해 residual을 생성하고 residual의 변화를 통해 고장 검출 및 isolation 할 수 있었다.

## Acknowledgement

This research was partly supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIP) (No. 2017R1A2B4004116); and the BK21+ program through the NRF funded by the Ministry of Education of Korea.

본 논문은 현대자동차의 지원으로 작성되었습니다

## References

- 1) Edwards, C., Spurgeon, S. K., & Patton, R. J. (2000). Sliding mode observers for fault detection and isolation. *Automatica*, 36(4), 541-553.
- 2) Isermann, R. (2006). *Fault-diagnosis systems: an introduction from fault detection to fault tolerance*. Springer Science & Business Media.
- 3) Giseo Park, Seibum Choi, Dongyoon Hyun, "Clamping Force Estimation Based on Hysteresis Modeling for Electro-Mechanical Brakes" *International Journal of Automotive Technology*, Volume 18, No. 5, pp. 883-890, 2017
- 4) Ding, S. X. (2008). *Model-based fault diagnosis techniques: design schemes,*

*algorithms, and tools*. Springer Science & Business Media.

- 5) Shtessel, Y., Edwards, C., Fridman, L., & Levant, A. (2014). *Sliding mode control and observation* (pp. 163-166). New York: Springer New York.
- 6) You, S. H., Cho, Y. M., & Hahn, J. O. (2017). Model-based fault detection and isolation in automotive yaw moment control system. *International Journal of Automotive Technology*, 18(3), 405-416.
- 7) Isermann, R., Schwarz, R., & Stolz, S. (2002). Fault-tolerant drive-by-wire systems. *IEEE Control Systems Magazine*, 22(5), 64-81.