

# 지능화 차량의 고장진단 로직 개발

민경찬<sup>†</sup> · 김정태\* · 이건복\*\* · 이경수\*\*\*

## Model-Based Fault Detection and Failsafe Logic Development

Kyongchan Min, Jungtae Kim, Gunbok Lee, Kyongsu Yi

**Key Words :** Fault Detection(고장진단), ESP(차량안정성 제어), Residual(레지듀얼), Threshold(기준값)

### Abstract

This paper describes the fault detection and failsafe logic to be used in the Electronic Stability Program (ESP). The Aim of this paper is prevention of erroneous control in the ESP. This paper introduces the fault detection logic and evaluation of residual signals. Failsafe logic consist of four redundant sub-models and they can be used for the detection of faults in each sensor (yaw rate, lateral acceleration, steering wheel angle). We presents two mathematical residual generation method ; one is the method by the average value, and the other is the method by the minimum value of the each residual. We verify a failsafe logic using vehicle test results , also we compare vehicle model based simulation results with test vehicle results.

### 기호설명

$\dot{\gamma}$	: yaw 변화률 (radian/s)
$a_y$	: 횡방향 가속도 (m/s <sup>2</sup> )
$\delta$	: 조향각 (radian)
$d$	: 트랙 거리 (m)
$l$	: 전후륜간 거리 (m)
$v_{ch}$	: 차량특성속도 (m/s)
$C_{\alpha f, r}$	: 전,후륜 회전강성 (N/radian)
$v_{fl, r}$	: 전륜 좌우측 휠속도 (m/s)
$v_{rl, r}$	: 후륜 좌우측 휠속도 (m/s)
$\phi$	: roll 각 (radian)
$K_r$	: roll bar 강성 (Nm/radian)
$r$	: 레지듀얼
$J_{Th}$	: 기준값

### 1. 서론

차량 안정성 제어기란 차량의 제동계 및 구동계를 직접 제어하여 차량이 저마찰 노면이나 비대칭 노면을 주행할 때 급조향 및 급제동으로 발생할 수 있는 차량의 회전 현상이나 전복현상을 방지하여 안전 주행을 보장해주는 시스템이다. 이 같은 ESP 는 휠각속도센서, 요속도 센서, 조향각 센서, 횡방향 가속도 센서 등에서 측정된 신호를 이용해서 계산된 제어 목표값을 바탕으로 차량을 제어하게 된다.

따라서, 센서의 고장등으로 인해 센서신호가 부정확한 값을 출력하게 될 경우 시스템의 안정성에 큰 문제를 야기하게 되고, 운전자와 차량의 안전에 직접적인 영향을 미치게 된다. 또한, 최근 제어 시스템의 복잡화와 자동화로 시스템의 규모가 커지면서 센서 및 작동기의 고장 요인과 발생 빈도가 증가하게 되었고 제어시스템의 신뢰성과 안정성의 확보 측면에서 시스템의 고장진단이 중요한 문제로 대두되었다.

고장 진단을 위한 대표적인 두가지의 방법으로는 Physical redundancy 와 Model-based Fault Detection 이있다. 전자는 기본적으로 하나의 값

<sup>†</sup> 한양대학교 자동차공학과  
E-mail : kyongsu@hanyang.ac.kr  
TEL : (02)2290-0455 FAX : (02)2296-0561

\* 현대모비스

\*\* 숭실대학교 기계공학부

\*\*\* 한양대학교 기계공학부

을 측정하는데 있어서 여러 개의 센서를 사용해서 고장 진단을 하는 방법으로 제품의 원가 상승 요인을 제공하게 된다. 후자는 해석적인 중복구조(analytical redundancy)를 바탕으로 고장을 진단하는 방법을 말한다. 시스템이 다른 state 와 기능적인 관계를 사용하여 변수측정이 가능하다면 우리는 그 시스템을 해석적인 중복구조를 갖는다고 말한다. 본 논문은 이러한 해석적인 중복구조를 이용해서 센서의 중복 사용없이 센서의 고장을 진단하는 자동안전 로직(Failsafe Logic)을 개발하는데 그 목적이 있다.[1] 또한, 시뮬레이션 결과와 차량실험 결과를 통해서 자동안전 로직을 검증하였다.

## 2. 시뮬레이션 차량 모델

### 2.1 차체 및 현가장치

Fig. 1 과 같이 x, y, z 방향 직선운동과 롤(Roll), 피치(Pitch), 요(yaw) 방향의 회전 운동을 고려한 차체 모델을 사용하였다. 현가장치는 1/4 차량모델로 각각의 휠에 고려하였고, 차체의 회전 운동 및 노면입력에 따라 상태변수가 계산된다. 맵을 이용하여 전륜의 슬립각 및 하중에 따른 복원 토크를 고려하였다.

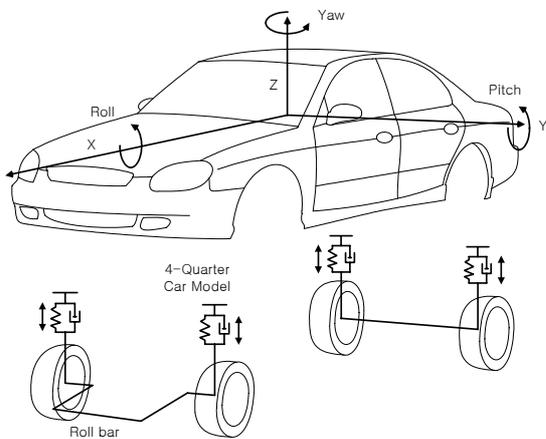


Fig. 1 3-D Vehicle dynamic model

### 2.2 구동계 모델

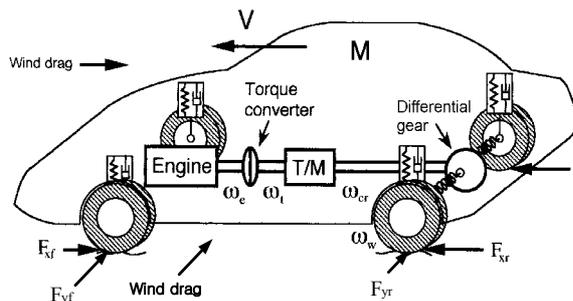


Fig. 2 Drivetrain model

구동축은 선형스프링으로 가정하여 구동토크를 구했으며, 타이어 모델은 Pacejka 모델[2]을 적용하였으며 종방향 및 횡방향 타이어 힘은 차체모델과 현가장치 모델로부터 산출된 각 차륜의 슬립율과 슬립각에 근거해 Magic formula 를 이용하여 계산했다. 또한, Combined tire model 을 채택하여 종방향과 횡방향 힘 모두 슬립율과 슬립각 모두에 종속 되도록 모델을 구성하였다.

차동기어는 좌우의 구동륜에 같은 토크를 분배하는 장치로써, 직진시나 미소한 선회시는 큰 영향을 끼치지 않으나 과도한 조향이나 임계주행상황에서는 차량거동에 큰 영향을 줄 수 있다. 그러므로 정확한 좌우 토크를 계산하기 위해 쉐인 기어(Sun gear) 및 링기어(Ring gear) 각속도의 운동방정식을 고려하여 모델링하였다.

### 2.3 실차실험을 통한 시뮬레이션 차량모델 검증

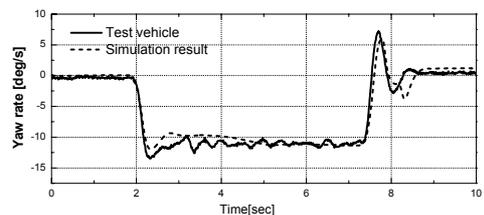
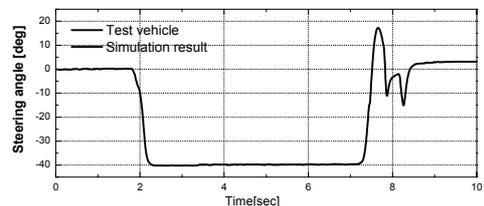
시뮬레이션 차량 모델을 사용하여 얻은 결과와 실차 실험으로부터 얻은 결과를 비교검증하였다. 차량 실험을 통해서 얻은 운동변수는 차량의 전체적인 안정성 판별에 큰 영향을 미칠 수 있는 종방향 속도, 횡방향 가속도, 요속도, 롤속도이며 이들 변수 측정에 사용된 센서는 광학 속도계, 자이로스코프(yaw rate sensor), 가속도 센서 및 조향각 센서이다.

동일한 조건에서의 상호 비교를 위해 3 차원 차량 모델의 종방향 속도는 실험차량의 종방향 속도를 지능형 순항 제어(Intelligent Cruise Control, ICC)의 알고리즘[3]을 사용하여 추종하였고, 조향각은 실험차량의 결과를 그대로 입력으로 사용하였다.

다음의 각절에서 다양한 조향입력에 따른 결과를 비교하였다.

#### 2.3.1 스텝(Step Test)

종방향 속도를 100KPH 로 유지하며 조향각을 40deg 로 유지하며 실험하였다.



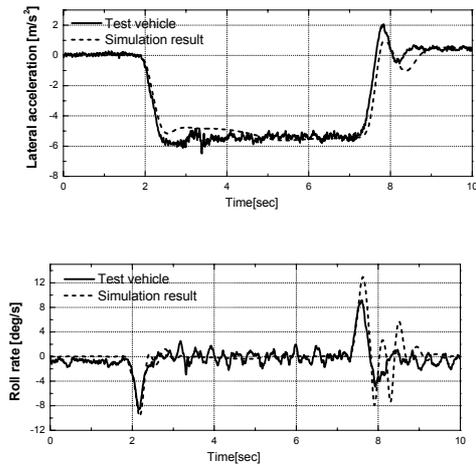


Fig. 3 Step Steer Test

2.3.2 슬라롬(Slalom Test)

차량의 종방향속도를 50KPH 로 유지하며 실험하였다.

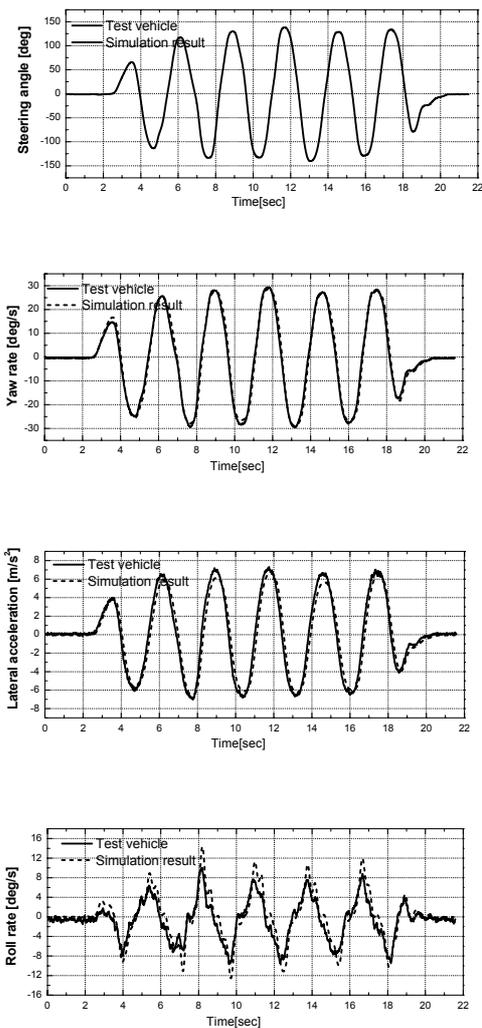


Fig. 4 Slalom Test

3. 고장진단

3.1 기본로직

Fig. 5 와 같이 각각의 센서에서 측정된 신호들은 각 신호의 하위모델에서 해당신호로 변수추종을 하게 되고, 차량의 거동에 따라 정상상태(Steady Behavior)와 과도상태(Unsteady Behavior)로 나눠 레지듀얼을 계산하여서 기준값이상의 값이 나오게되면 시스템의 고장을 선언하게 된다. [4]

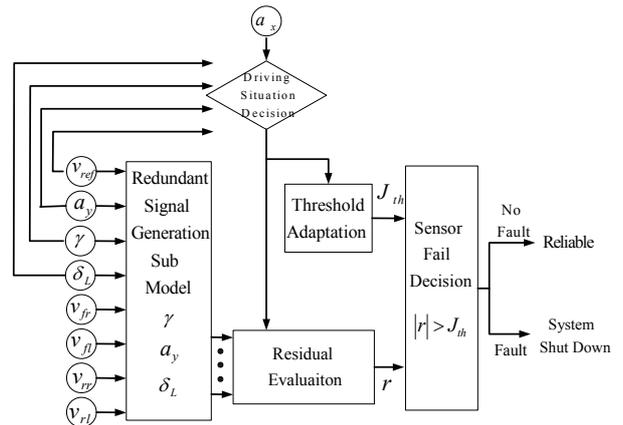


Fig. 5 Failsafe Logic

3.2 하위모델

해당 신호의 변수추종을 위해서 횡각속도, 요속도, 횡가속도, 조향각을 이용해서 Table 1 과 같은 하위모델을 정의하였다.

Table 1 하위모델

Model Y1	$\dot{\gamma} = \frac{v_{fr} - v_{fl}}{d}$
Model Y2	$\dot{\gamma} = \frac{v_{rr} - v_{rl}}{d}$
Model Y3	$\dot{\gamma} = \frac{a_y}{v_{ref}}$
Model Y4	$\dot{\gamma} = \frac{\delta}{i_l l} \frac{v_{ref}}{(1 + (\frac{v_{ref}}{v_{ch}})^2)}$
Model A1	$a_y = v_{ref} \frac{v_{fr} - v_{fl}}{d}$
Model A2	$a_y = v_{ref} \frac{v_{rr} - v_{rl}}{d}$
Model A3	$a_y = v_{ref} \cdot \dot{\gamma}$
Model A4	$a_y = \frac{\delta}{i_l l} \frac{v_{ref}^2}{(1 + (\frac{v_{ref}}{v_{ch}})^2)}$

Model S1	$\delta = \frac{i_L l}{v_{ref}} \left(1 + \left(\frac{v_{ref}}{v_{ch}}\right)^2\right) \left(\frac{v_{fr} - v_{fl}}{d}\right)$
Model S2	$\delta = \frac{i_L l}{v_{ref}} \left(1 + \left(\frac{v_{ref}}{v_{ch}}\right)^2\right) \left(\frac{v_{rr} - v_{rl}}{d}\right)$
Model S3	$\delta = \frac{i_L l}{v_{ref}} \left(1 + \left(\frac{v_{ref}}{v_{ch}}\right)^2\right) \gamma$
Model S4	$\delta = \frac{i_L l}{v_{ref}} \left(1 + \left(\frac{v_{ref}}{v_{ch}}\right)^2\right) a_y$

3.3 레지듀얼 계산

일반적으로 센서 모델은 다음과 같이 수학적 함수와 표현이 불가능한 모델 불확실성으로 나타낼 수 있다.

$$y = f(u_{11}, \dots, u_{1m}) + \Delta, PS \in \Omega \quad (1)$$

하위모델 함수  $f_i(u_{ij}, \dots, u_{ij})$  이 주행상황 (Process Sate) 에 따라 유효한 값을 나타내는 범위  $\Omega$  에 속하게 되면 모델 불확실성  $\Delta$  의 크기는 상대적으로 줄어들게 되므로, 각 하위모델의 오차는 줄어들게 된다. 본 논문에서는 이러한 주행상황을 기준으로 차량의 거동을 정상상태 (SB)와 과도상태(USB)로 나눠서 레지듀얼을 계산하였다.[5],[6],[7]

3.3.1 정상상태 주행

정상상태 구간에서는 다음과 같이 평균값을 이용하여 레지듀얼을 계산한다.

① 각 하위모델과 센서 출력신호의 평균값  $\bar{y}$  을 구한다.

$$\bar{y} = \frac{1}{n+1} (\hat{y}_1 + \hat{y}_{n+1}), y = \hat{y}_{n+1} \quad (2)$$

②  $\bar{y}$  와 각 하위모델간의 차  $|\bar{y} - \hat{y}_i|, i=1, \dots, n+1$  를 구해서 다음의 조건을 만족하는  $\hat{y}_{i1}, \hat{y}_{i2}, \hat{y}_{i3}$  를 구한다.

$$\left| \bar{y} - \hat{y}_{i1} \right|, \left| \bar{y} - \hat{y}_{i2} \right|, \left| \bar{y} - \hat{y}_{i3} \right| < \left| \bar{y} - \hat{y}_j \right| \quad (3)$$

$$j \neq i_1, i_2, i_3, j \in \{1, \dots, n+1\}$$

③ 위에서 구해진 세개 신호의 중간값과 센서로부터 측정된 y 와의 차를 정상상태에서의 최종 레지듀얼로 한다.

$$r = y - \hat{y}_{i2}, \quad \hat{y}_{i1} \leq \hat{y}_{i2} \leq \hat{y}_{i3} \quad (4)$$

3.3.2 과도상태 주행

과도상태 구간에서는 모델 불확실성이 지배적으로 작용하게 되고, 하위모델의 오차가 커지게 된다. 따라서 오차가 가장 적은 하위모델을 이용해서 최종 레지듀얼을 계산한다.

$$r = |r_i| = |y - \hat{y}_i| = \min_j \{|r_j|\} = |y - y_j|, j=1, \dots, k \quad (5)$$

위와같이 최소값을 가지는 레지듀얼을 사용하게 되면 모델 불확실성에 대한 강인성은 증가하게 되지만, 고장진단 민감도는 감소하게 된다.

3.4 차량 주행상황의 판단

차량의 주행상황 일반적으로 차량의 종방향 속도와 조향각에 의해서 영향을 받게 된다. 또한, 조향각이 일정한 값을 가지게되면 차량은 정상상태 회전을 하게 되고, 조향각이 있다해도 차량은 안정한 거동을 나타내므로 조향각의 미분값도 고려해서 그 기준을 정해야 한다. 하지만 센서신호는 잡음 등의 영향으로 미분값을 사용하는 것은 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 횡방향 가속도, 종방향 속도, 요 속도를 이용하여 다음과 같은 방법으로 정상상태와 과도상태를 판단하기로 한다.

차량의 센서로부터 측정되는 횡방향가속도는 식(6)과 같이 차륜에 작용하는 tire force 와 공기저항력의 향으로 나타낼수 있다.

$$a_{y\_sensor} = \left( \sum_{i=1}^4 (F_{itrey} \cos(\gamma_i) + F_{itrex} \sin(\gamma_i)) - \rho \cdot A \cdot \frac{Cd}{2} \cdot v_y^2 \right) / m \quad (6)$$

여기서  $Cd$  : aero drag force coefficient

$A$  : vehicle area ,  $\rho$  : density of air

2-DOF Bicycle Model 에서 횡방향 가속도는 식(7)와 같이 나타낼 수 있다.

$$a_y = (\dot{v} + u \cdot r) \quad (7)$$

식(7)에서 차량의 주행상태가 정상상태 회전일 경우에는  $\dot{v} = 0$  가 되므로 그때의 횡방향 가속도는 식(8)과 같이 종방향 속도와 요 속도의 곱으로 표현된다

$$a_{y\_steady} = u \cdot r \quad (8)$$

따라서, 과도상태 구간에서는 센서에서 획득된 신호인 식(6)과 요 속도, 종방향 속도의 곱으로 표시된 식(8)의 차는 정상상태 구간에서보다 커지게 되므로 식(9)와같이 식(6)과 식(8)의 차를 구한후 식(10)과같이 일차필터를 통과시킨 신호를 이용해서 차량의 거동 상태를 판단하였다.

$$\Delta a_y = a_{lat\_sensor} - a_{lat\_steady} \quad (9)$$

$$a_{ev} = \frac{1}{\tau s + 1} \cdot \Delta a_y$$

$$( a_{ev} < a_{th} : \text{정상상태} ) \quad (10)$$

시상수와  $a_{th}$  는 센서 잡음에 의해서 정해져야한다. 센서 잡음이 크면 위에서 구한 값들이 기본적인 크기를 가지게되므로  $a_{th}$  도 역시 큰 값으로 설정하여야한다.

3.5 고장진단

자동안전 로직에 의해서 계산된 레지듀얼과 기준값을 비교해 식(11)을 만족하게되면 센서고장으로 판단하게된다.

$$|r| > J_{th} \quad (11)$$

기준값은 차량의 일반적인 주행상황(on-center steering)을 기준으로 설정하였고, 기준값의 크기를 정함에 충분히 큰 값을 사용하는 것이 일반적이다.[8],[9],[10]

4. 시뮬레이션 및 실차실험 결과

차선변경 조향조건으로 실험한 결과를 오프라인으로 계산하였다. 시뮬레이션은 실험결과의 조향각을 그대로 사용하였고, 종방향 속도는 ICC 를 사용하여 추종하였다. 각 센서의 신호의 크기를 임의로 변경시켜 센서 고장 상황을 만들었고, 센서 고장시 변화하는 레지듀얼의 크기를 시뮬레이션 결과와 비교하였다.

4.1 실험조건

다음과 같은 조향각과 종방향 속도로 실험하였다.

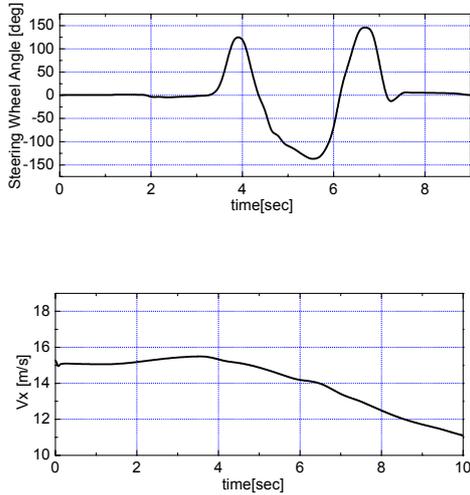


Fig. 6 실험 조건

4.1.1 실험결과

각각의 센서의 출력이 정상 신호의 50%와 70%로 가정하여 시뮬레이션한 결과와 실험결과의 레지듀얼의 변화를 나타내었다.

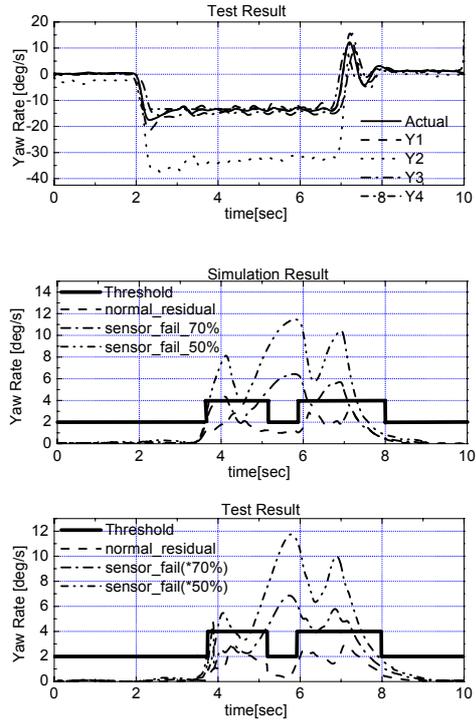


Fig. 7 Yaw Rate

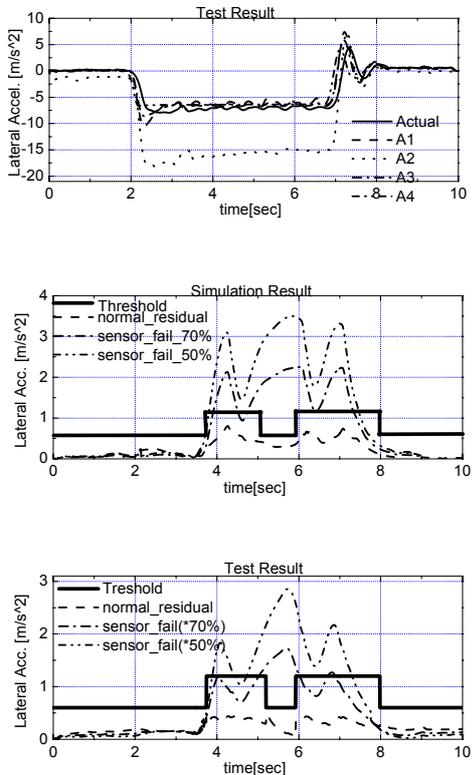


Fig. 8 Lateral Acceleration

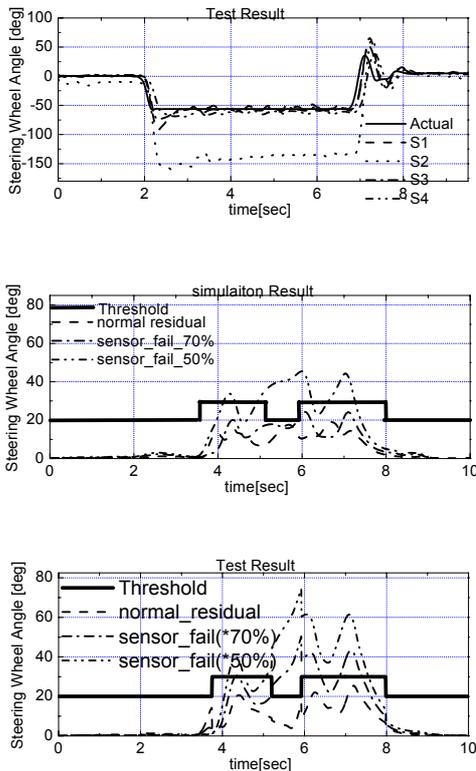


Fig. 9 Steering Wheel Angle

Fig. 7,8,9 에 각각의 실차실험에서 계산된 하위모델의 신호와 센서 고장시에 하위모델로부터 계산된 신호를 차량의 주행상태에 따라 정상상태와 과도상태로 나눠 계산된 레지듀얼을 나타내었다. 또한, 실차 실험과 동일한 주행조건에서 시뮬레이션 모델을 통해서 계산된 레지듀얼을 나타내었다. 시뮬레이션과 실차실험 결과 모두 센서 고장시에 계산된 레지듀얼이 비슷한 크기로 계산되는 것을 알 수 있고, 센서 고장시의 레지듀얼이 정상적인 경우보다 증가해서 주행 상황을 기준으로 설정된 기준값보다 큰 값을 나타냄으로써, 고장 진단이 가능하게 됨을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 이론적 접근을 통한 ESP의 자동안전 로직을 개발하여 ESP 제어기에 적용되는 요 속도센서, 횡방향 가속도 센서, 조향각 센서의 고장 진단에 대한 연구에 초점을 맞추었다. 이를 위해서 시뮬레이션 모델을 제작하였고 실험 결과와 비교하여 시뮬레이션 모델을 검증하였다. 각각의 센서에 해당하는 4 가지의 하위모델로부터 계산된 신호를 차량의 운행상태에 따라 정상상태/과도상태로 판별하고 그에 따른 각각의 레지듀얼을

계산하여 센서 고장시 계산되는 레지듀얼이 정상적인 경우보다 크게 증가하게 됨으로써 고장진단이 가능함을 보였다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실(M1-0302-00-0009)사업의 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) I.GIRAUD, P.LAURENCE and G.L.GISSINGER, 1996, "Real Time Fault Detection and Diagnosis: Application to Critical Behavior of Road Vehicle", AVEC'96, 24<sup>th</sup>~28<sup>th</sup> of June
- (2) Bakker, E., Pacejka, H.B., and Linder, L., 1998, "A New Tire Model with an Application in Vehicle Dynamics Studies," SAE Transactions, Journal of Passenger Cars, Vol. 98, SAE Paper No. 890087
- (3) K. Yi, J. Hong, Y. Kwon, 2001, "A Vehicle Control Algorithm for Stop-and-Go Cruise Control" Proc. IMechE
- (4) Rajesh Rajamani, Adam S.Howell, Chief Chen, J.Karl Hedrick, and Masayoshi Tomizuka, 2001, "A Complete Fault Diagnostic System for Automated Vehicles Operating in a Platoon", IEEE, vol.9, No.4, p.553~564
- (5) S.X.Ding and P.M.Frank, 2002, "An Approach to the Detection of Multiplicative Faults in Uncertain Dynamic Systems", Proceedings of the 41st IEEE
- (6) S.X. Ding, T. Jeansch, P.M. Frank and E.L. Ding, 2000, "A unified approach to optimization of fault detection systems", International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, p.725~745
- (7) Vasanth Krishnaswami, Giorgio Rizzoni, 1995, "Model Based Health Monitoring of Vehicle Steering System Using Sliding Mode Observers", Proceeding of the American Control Conference Seattle, p.1652~1656
- (8) Paul M. Frank, Duisburg, 1995, "Residual Evaluation for Fault Diagnosis based on Adaptive Fuzzy Thresholds", IEEE Colloquium
- (9) X.Ding, P.M. Frank, 1991, "An Approach to Robust Residual Generation and Evaluation", Proceedings of the 30<sup>th</sup> Conference on Detection and Control
- (10) A.A. Stoorvogel, H.H. Niemann, A.Saberi, and P. Sannuti, 2002, "Optimal Fault Signal Estimation", International Journal of Robust and Nonlinear Control 2002, p.697~727