

<학술논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.10.931>

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

## 슬라이딩 모드 관측기를 이용한 기구학 모델 기반 자율주행 자동차의 예견 고장진단 알고리즘

오 광 석<sup>\*†</sup> · 이 경 수<sup>\*\*</sup>

\* 한경대학교 기계공학과, \*\* 서울대학교 기계항공공학부

### Kinematic Model based Predictive Fault Diagnosis Algorithm of Autonomous Vehicles Using Sliding Mode Observer

Kwang Seok Oh<sup>\*†</sup> and Kyong Su Yi<sup>\*\*</sup>

\* Dept. of Mechanical Engineering, Hankyong Nat'l Univ.

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

(Received April 13, 2017 ; Revised July 20, 2017 ; Accepted July 22, 2017)

**Key Words:** Kinematic Model(기구학 모델), Fault Diagnosis(고장진단), Sliding Mode Observer(슬라이딩 모드 관측기), Autonomous Vehicle(자율주행 자동차), Longitudinal Safety(종방향 안전)

**초록:** 본 논문은 슬라이딩 모드 관측기를 이용한 기구학 모델 기반 자율주행 자동차의 예견 고장진단 알고리즘에 관한 연구이다. 자율주행 자동차는 안전한 주행을 위해 신뢰성이 확보된 주행환경 정보와 차량의 동적상태 정보가 필요하다. 센서 정보의 신뢰성 판단을 위해 본 연구에서는 종방향 기구학 모델 기반 슬라이딩모드 관측기를 이용하여 종방향 환경정보와 차량 가속도 정보를 실시간으로 상호 보완적 고장진단이 가능한 예견 알고리즘을 제안하였다. 적용된 슬라이딩 모드 관측기는 종방향 환경정보의 고장신호에도 강건한 입력신호 재구성능을 보이면서 알고리즘의 신뢰성을 확보할 수 있었다. 예견 고장진단 알고리즘의 합리적 성능평가를 위해 네 가지 조건에 대한 실제 주행 데이터 기반 선행차량 추종시나리오를 적용하였다. 성능평가 결과 본 연구에서 제안된 예견 고장진단 알고리즘은 모든 평가조건과 주행 시나리오에 대해 합리적인 고장진단 성능을 보여주었다.

**Abstract:** This paper describes a predictive fault diagnosis algorithm for autonomous vehicles based on a kinematic model that uses a sliding mode observer. To ensure the safety of autonomous vehicles, reliable information about the environment and vehicle dynamic states is required. A predictive algorithm that can interactively diagnose longitudinal environment and vehicle acceleration information is proposed in this paper to evaluate the reliability of sensors. To design the diagnosis algorithm, a longitudinal kinematic model is used based on a sliding mode observer. The reliability of the fault diagnosis algorithm can be ensured because the sliding mode observer utilized can reconstruct the relative acceleration despite faulty signals in the longitudinal environment information. Actual data based performance evaluations are conducted with various fault conditions for a reasonable performance evaluation of the predictive fault diagnosis algorithm presented in this paper. The evaluation results show that the proposed diagnosis algorithm can reasonably diagnose the faults in the longitudinal environment and acceleration information for all fault conditions.

- 기호설명 -

$c$  : 차간거리(clearance)

† Corresponding Author, oks@hknu.ac.kr

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

$f$  : 고장신호(fault signal)

$a$  : 가속도(acceleration)

$v$  : 차량속도(vehicle velocity)

$v_{smo}$  : 이산 입력항(discontinuous injection term)

$a_{recon}$  : 재건된 가속도(reconstructed acceleration)

$u_{opt}$  : 최적제어입력(optimal control input)

### 1. 서 론

자율주행 자동차는 인간의 조작 없이 스스로 주행이 가능한 자동차로써 카메라, 라이다, 레이더, 초음파센서 등과 같은 다양한 환경센서와 차량의 동적상태를 계측하는 내부센서를 이용하여 주행하는 차량을 말한다. 생명을 위협하는 치명적인 자동차사고 중 약 93%가 운전자의 실수이기 때문에 전 세계적으로 완전자율주행 자동차의 상용화를 위한 연구개발을 가속화하고 있다.<sup>(1)</sup> 이러한 자율주행 자동차는 다양한 주행상황에 대해 스스로 판단하고 주행해야 하는 특성 때문에 신뢰성이 높은 환경정보 및 차량상태 정보 획득이 중요하다. 하지만 내외부에서 발생할 수 있는 다양한 원인에 의한 센서, 알고리즘, 그리고 구동기의 고장은 탑승자의 생명을 위협하는 치명적 사고를 유발할 수 있다. 그러므로 센서 및 구동기의 고장신호를 검출하고 안전제어를 수행하기 위한 다양한 연구가 활발히 수행되고 있다.

R. Loureiro<sup>(1)</sup>은 컨테이너를 운반하는 대형 자율주행 자동차의 bondgraph-model 기반 고장진단과 고장허용 제어를 동시에 고려하여 적용하는 알고리즘을 제안하였다. Y. Jeong<sup>(2)</sup>은 다양한 조합의 관측기를 이용하여 조향각, 요레이트, 휠스피드 센서 그리고 조향, 스티어링, 브레이크 구동기의 고장진단 시스템을 설계하고 검증하였다. 그리고 C. Tan<sup>(3)</sup>은 슬라이딩 모드 관측기 기반 센서 고장신호를 검출하고 재건하는 두 가지 방법을 제시하였으며 S. Yin<sup>(4)</sup>은 고장검출 및 고립을 위해 세 가지 단계인 요소 분석 기반 클러스터 확인, fuzzy positivistic C-means clustering을 이용한 고장검출, 그리고 고장원인의 고립 방법을 이용하여 차량 현가장치의 고장검출 방법을 제시하였다. 또한 Y. Kim<sup>(5)</sup>은 전기자동차 독립 인휠모터의 전류센서 및 위치센서의 고장검출 및 고립위해 모델기반 알고리즘을 개발하였다.

본 연구에서는 종방향 기구학 모델 기반 슬라이딩 모드 관측기를 이용한 예견 고장진단 알고리즘을 제시하였다. 자율주행 자동차의 종방향 제어를 위해 사용되는 차량 가속도 및 종방향 환경정보(차간거리, 상대속도)의 고장진단을 위해 슬라이딩 모드 관측기 기반 종방향 환경정보를

이용하여 상대가속도 정보를 재건하였고, 재건된 상대가속도와 분석된 차량 종방향 가속도의 확률적 분포를 이용하여 자차량의 계측된 가속도 정보의 신뢰성을 판단하였다. 신뢰성 판단이 이루어진 가속도 정보를 이용하여 종방향 기구학 모델 기반 예견 고장진단 알고리즘을 설계하였다. 본 연구에서 설계된 고장진단 알고리즘은 가속도 정보와 종방향 환경정보의 상호 고장진단이 가능한 알고리즘이며 합리적인 성능평가를 위해 실제 주행데이터 기반 네 가지 고장조건이 적용되었다. 알고리즘 개발 및 성능평가는 MATLAB/SIMULINK 환경에서 구성 및 수행되었으며 본 논문은 다음과 같이 구성되었다.

2장에서는 본 연구에서 제안하는 예견 고장진단 알고리즘의 개념에 대해 설명하고, 3장에서는 알고리즘의 세부 내용에 대해 기술한다. 그리고 4장에서는 알고리즘의 실험 데이터 기반 성능평가 결과를 보여주며 마지막 5장에서는 본 논문의 결론에 대해 기술한다.

### 2. 예견 고장진단 알고리즘의 개념

본 연구에서 제안하는 기구학 모델 기반 예견 고장진단 알고리즘은 자차량의 가속도 정보와 종방향 환경정보(선행차량과의 상대거리 및 속도)의 고장을 상호보완적으로 진단하는 알고리즘이다. 이를 위해 종방향 기구학 모델 기반 슬라이딩 모드 관측기와 모델 예견 알고리즘이 적용되었으며 아래 Fig. 1은 알고리즘의 개념도를 보여준다.

Fig. 1의  $c$ ,  $v_{rel}$ ,  $a_s$ 는 각각 선행차량과의 상대거리, 상대속도, 그리고 자차량의 가속도 정보를 나타내며, 아래첨자 FD는 고장진단된 정보를 의미한다. 차량이 선행차량과 함께 주행하는 상황을 가정하여 고장진단 알고리즘을 설계하였으며 종방향 가속도 센서의 고장진단을 위해 슬라이딩 모드 관측기 기반 상대가속도 정보를 재건하였

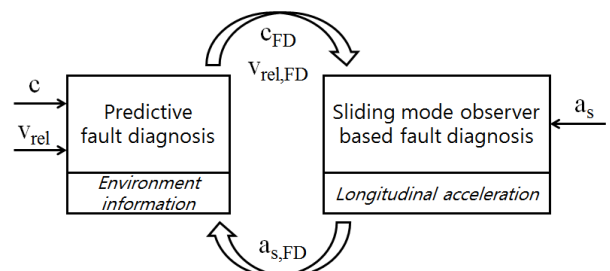


Fig. 1 Concept of fault diagnosis algorithm

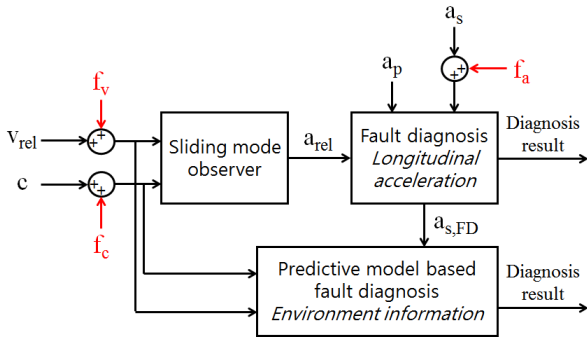


Fig. 2 Model schematics for algorithm of predictive fault diagnosis

다. 재건된 상대가속도는 통계적으로 도출된 차량의 가속도 확률분포와 함께 종방향 가속도 정보의 신뢰영역 도출에 사용되었고, 도출된 신뢰영역은 고장진단의 기준으로 사용되었다. 진단된 종방향 가속도 정보는 본 연구에서 제안하는 기구학 모델 기반 예견 알고리즘을 이용하여 종방향 환경정보(상대거리, 상대속도)의 고장진단에 사용되었다. 그리고 진단된 종방향 환경정보는 다시 가속도 센서의 고장진단을 위해 사용됨으로써 실시간 상호 진단이 가능하도록 설계되었다. 다음 장에서는 예견 고장진단 알고리즘에 대해 기술한다.

### 3. 예견 고장진단 알고리즘 설계

본 연구에서는 예견 고장진단 알고리즘의 설계를 위해 슬라이딩 모드 관측기와 예견 모델을 적용하였다. 각각의 알고리즘은 상호 보완적 고장진단을 수행하도록 설계되었으며 차량의 가속도 정보와 선행차량과의 상대거리와 속도와 같은 종방향 환경정보의 신뢰성을 평가한다. Fig. 2는 제안된 예견 고장진단 알고리즘의 모델 개략도를 나타낸다.

$f_a$ ,  $f_c$ ,  $f_v$  는 각각 가속도(a), 상대거리(c), 상대속도( $v_{rel}$ )에 대한 고장신호를 나타낸다. 아래첨자 FD는 고장진단 결과를 나타내고, 가속도 아래첨자 s, p, rel은 차량, 선행차량, 상대정보를 의미한다. 다음 절에서는 슬라이딩 모드 관측기 기반 상대가속도 재건에 대해 기술한다.

#### 3.1 슬라이딩모드 관측기 기반 고장진단

선행차량과 상대거리와 속도를 이용하여 상대가속도 정보를 재건하기 위해 슬라이딩 모드 관측기를 이용하였다. 슬라이딩 모드 관측기는 불

연속적인 입력신호를 이용하여 상태변수와 외란을 추정하는데 사용되며 그 응용범위는 다양하다. 본 연구에서는 선행차량과의 상대가속도를 재건하기 위해 아래와 같은 종방향 기구학 모델을 이용하였다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} (a_p - a_s) \quad (1)$$

여기서  $x_1$ ,  $x_2$ 은 각각 상대거리와 속도를 의미하는 상태변수이며 상대가속도는 상태공간 방정식에서 input term으로 정의되었고, 관측행렬을 이용하여 아래와 같이 출력을 정의하였다.

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

슬라이딩 모드 관측기 설계를 위해 아래와 같은 관측기 수식을 정의하였다.

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Gv_{smo} \quad (3)$$

슬라이딩 모드 관측기의 목적인 상대가속도의 정확한 재건을 위해 수식 (3)에서 사용된  $G_n$ 은 수식 (1)의 입력행렬(B)과 동일한 행렬로 정의하였다. 하지만 슬라이딩 모드 관측기는 Coordinate transform을 통한 상태변수와 출력에 대한 수렴성 확보가 필요하다. 그러므로 좌표변환을 위한 행렬  $T_c$ 를 정의하여 수렴성을 판단하였다.

$$x_c = T_c x \quad (4)$$

$x_c$ 는 변환된 상태벡터이며  $T_c$ 는 관측행렬 [11]과 관측행렬의 null space를 이용하여 아래와 같이 정의 되었다.

$$T_c = \begin{bmatrix} Nullspace(11) \\ 11 \end{bmatrix} \quad (5)$$

정의된 transformation matrix를 이용하여 변환하면 아래 형태의 상태공간 방정식이 도출된다.

$$\dot{x}_c = T_c A T_c^{-1} x_c + T_c B (a_p - a_s) \quad (6)$$

변환된 수식의 시스템행렬( $T_c A T_c^{-1}$ )과 입력행렬( $T_c B$ )을 각각  $A_c$ ,  $B_c$ 으로 정의하고 관측기 수식 (3)을 이용하여 구분된 error dynamics를 아래와

같이 도출할 수 있다.

$$\dot{e}_1 = A_{c11}e_1 + A_{c12}e_y + G_{c1}v_{smo} \quad (7)$$

$$\dot{e}_y = A_{c21}e_1 + A_{c22}e_y + G_{c2}v_{smo} \quad (8)$$

구분된 error dynamics는 상태변수에 관한  $e_1$ 과 출력에 관한  $e_y$ 으로 구성된다. 수식 (3)에서 정의된 이산 입력항  $v_{smo}$ 를 아래와 같이 정의함으로써 eta-reachability condition 기반 출력오차( $e_y$ )를 슬라이딩 모드 서피스로 정의된  $S = \{e_y : e_y = 0\}$ 로 일정 시간 내 수렴시킬 수 있다.<sup>(6)</sup>

$$v = \rho \text{sign}(e_{y,i}), i = 1 \quad (9)$$

수렴성이 확보된 수식 (8)은 등가 입력항  $v_{smo,eq}$ 을 아래와 같이 도출할 수 있으며

$$v_{smo,eq} = -G_{c2}^{-1}A_{c21}e_1 \quad (10)$$

도출된 등가 입력항을 수식 (7)에 대입하면 아래와 같이 상태변수 오차에 관한 수식이 아래와 같이 정리될 수 있다.

$$\dot{e}_1 = (A_{c11} - G_{c1}G_{c2}A_{c21})e_1 \quad (11)$$

상태변수의 오차항  $e_1$ 의 수렴성을 확인하기 위해 transformation matrix에 의해 구성된  $A_c$ 과  $G_c$ 를 이용하여 수식 (11)의  $A_{c11} - G_{c1}G_{c2}A_{c21}$ 를 계산하면 아래와 같다.<sup>(7)</sup>

$$T_c A T_c^{-1} = \begin{bmatrix} A_{c11} & A_{c12} \\ A_{c21} & A_{c22} \end{bmatrix}, T_c G = \begin{bmatrix} G_{c1} \\ G_{c2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$A_{c11} - G_{c1}G_{c2}A_{c21} = -1 \quad (13)$$

도출된 값이 항상 음수인  $-1$ 의 값을 갖기 때문에 상태변수의 오차항인  $e_1$ 의 수렴성이 확보된다. 그러므로 상대가속도의 재건을 위해 적용된 기구학 모델 기반 슬라이딩 모드 관측기는 등가 입력항  $v_{smo,eq}$ 를 이용하여 sigmoid function 기반 구현될 수 있었다. 다음 절에서는 종방향 가속도 정보의 고장진단 알고리즘에 대해 기술한다.

### 3.2 가속도 고장진단 알고리즘

가속도 정보의 고장진단을 위해 슬라이딩 모드 관측기 기반 재건된 상대가속도 신호와 통계적으

로 분석된 차량 종방향 가속도의 확률적 분포를 이용하였다. 일반적으로 선행차량 추종 시 사용되는 종방향 가속도의 확률적 분포를 도출하기 위해 전방 레이더를 이용하여 취득된 실제 다양한 운전자의 주행 데이터를 사용한다. 고장진단을 위해 자차량의 가속도 정보를 슬라이딩 모드 관측기를 이용하여 재건된 상대가속도 정보를 이용하여 아래 수식과 같이 도출하였다.

$$a_s = a_p - a_{recon} \quad (14)$$

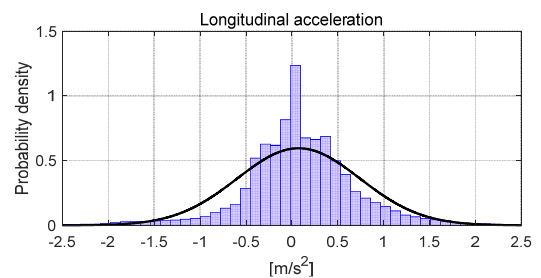
재건된 상대가속도  $a_{recon}$ 과 선행차량의 가속도  $a_p$ 를 이용하여 자차량의 가속도  $a_s$ 의 진단영역을 도출할 수 있으며 도출된 영역을 이용하여 계측된 가속도 정보의 고장진단을 수행하였다. 일반적으로 사용되는 선행차량의 가속도 분포는 총 7명의 운전자가 주행한 16개의 데이터를 이용하여 도출되었으며 아래 Fig. 3은 가우시안 분포로 근사화된 도출결과를 나타낸다. Table 1은 실험데이터와 도출된 결과에 대한 요약을 보여준다.

계측된 가속도 정보의 고장진단을 위해 도출된 가속도 분포의 표준편차를 이용하여 진단영역을 도출하였다. Fig. 3의 가속도 분포는 가우시안 분포( $N(0, \sigma^2)$ )로 근사화될 수 있기 때문에 가속도의  $\pm 3\sigma$ 은 약 99.7%의 신뢰구간을 형성한다. 그러므로 진단영역의 최대/최소 경계치는 수식 (14)를 기반으로 아래와 같이 정의할 수 있다.

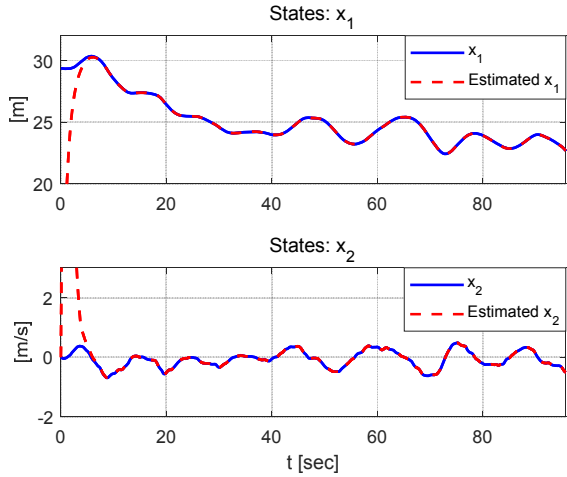
$$a_{s,upper} = 3\sigma - a_{recon} \quad (15)$$

**Table 1** Summary of acceleration distribution

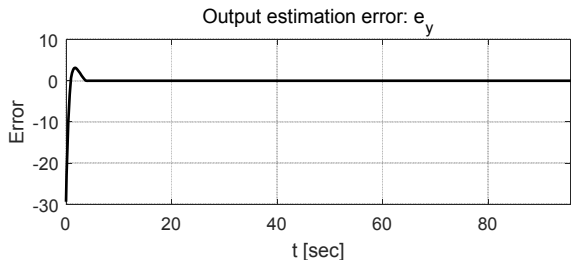
Division	Value	
The number of test drivers	7	
The number of test data	16	
Acceleration distribution	Mean( $\mu$ )	0.0728 m/s <sup>2</sup>
	Standard deviation( $\sigma$ )	0.6698 m/s <sup>2</sup>



**Fig. 3** Acceleration distribution(Gaussian)



(a) Estimated states:  $x_1$ (clearance) and  $x_2$ (velocity)



(b) Output estimation error:  $e_y$

Fig. 4 Estimated states and output error

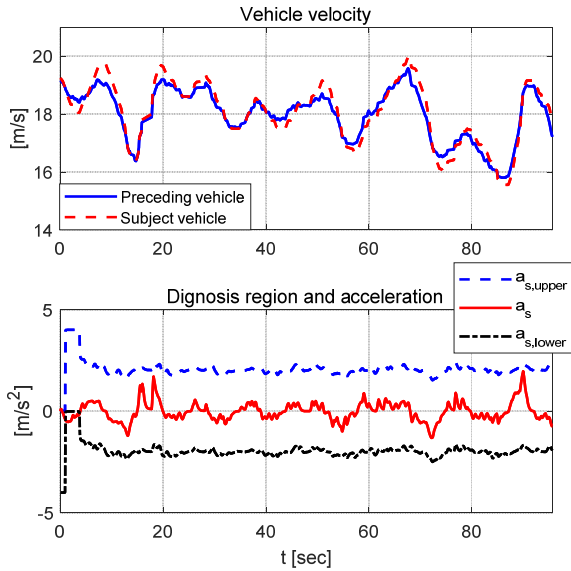


Fig. 5 Diagnosis region and driving condition

$$a_{s,lower} = -3\sigma - a_{recon} \quad (16)$$

Fig. 4와 5는 다양한 실험데이터 중 한 가지 주행상황에 대하여 추정된 상태변수( $x_1, x_2$ )와 출력 추정오차( $e_y$ ) 그리고 상대가속도 재건결과 및 가

속도분포를 이용하여 도출된 진단영역 및 종방향 가속도 정보를 나타낸 것이다.

설계된 슬라이딩 모드 관측기를 이용하여 상태 변수를 합리적으로 추정할 수 있었으며 계측된 종방향 가속도가 진단영역 내 있을 경우 신뢰할 수 있는 정보로 간주하여 예견기반 고장진단 알고리즘에 전달된다. 그리고 진단영역을 벗어나는 가속도가 계측되었을 경우 신뢰할 수 없는 값으로 고장상태 판단이 이루어지며 제안된 알고리즘은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{if } a_{s,lower} \leq a_s \leq a_{s,upper} \quad \rightarrow \text{Normal} \\ & \quad a_{s,FD} = a_s \\ & \text{elseif } a_{s,lower} > a_s \text{ OR } a_{s,upper} < a_s \rightarrow \text{Fault} \quad (17) \\ & \quad a_{s,FD} = (a_{s,lower} + a_{s,upper})/2 \\ & \text{end} \end{aligned}$$

예견 고장진단 알고리즘에서 사용하기 위한 가속도 값은 신뢰할 수 있을 경우 계측된 가속도를 그대로 전달하지만 고장상태일 경우 최소/최대 경계치의 평균값이 전달되도록 알고리즘을 구성하였다. 다음 절에서는 예견 고장진단 알고리즘에 대해 기술한다.

### 3.3 예견 고장진단 알고리즘

본 연구에서는 진단된 종방향 가속도 정보를 이용하여 선행차량과의 상대속도, 상대거리와 같은 환경정보의 고장진단을 위한 예견 고장진단 알고리즘을 제안하였다. 자율주행 차량의 센서 고장진단은 한 가지 센서 정보를 신뢰할 수 있을 때 다른 센서의 고장을 검출할 수 있었다. 하지만 신뢰하는 센서가 고장이 있을 경우 진단 자체가 불가능하다는 단점이 있다. 이러한 점을 해결하기 위해 본 연구에서는 종방향 기구학 모델을 이용하여 상호보완적으로 고장진단이 가능한 예견 고장진단 알고리즘을 제안하였으며 사용된 종방향 기구학 모델은 수식 (1)을 이용하여 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} a_s + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} a_p \quad (18)$$

위 수식을 이용하여 현재의 입력값( $a_s$ )과 외란으로 간주되는 값( $a_p$ )을 이용하여 향후 2초간의 상태변수를 예측하였다. 이를 위해  $T$ 를 0.1sec로 정의하고 이산화 모델을 아래처럼 도출하였다.



$$\begin{bmatrix} x_{1,k+1} \\ x_{2,k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1,k} \\ x_{2,k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -T \end{bmatrix} a_{s,k} + \begin{bmatrix} 0 \\ T \end{bmatrix} a_{p,k} \quad (19)$$

예측은 총 N-step(20)으로 현 상태정보( $a_{s,0}$ ,  $a_{p,0}$ )를 기반으로 2초 동안의 주행 시 상대거리와 속도를 도출하는 것으로 수행되었다. 이산화된 수식 (19)의 시스템행렬, 입력행렬, 외란행렬을 각각 아래와 같이 정의하여 예측을 수행하였다.

$$A_d = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, B_d = \begin{bmatrix} 0 \\ -T \end{bmatrix}, F_d = \begin{bmatrix} 0 \\ T \end{bmatrix} \quad (20)$$

정의된 이산화 행렬들을 이용하여 상태벡터  $x_0$  에 대한 N번째 예측값을 도출하면 아래와 같이 행렬들을 이용하여 도출할 수 있다.

$$x_p(N) = M_1 x_0 + M_2 a_{s,0} + M_3 a_{d,avg} + M_4 a_{p,0} \quad (21)$$

$$M_1 = A_d^N, M_2 = \sum_{i=1}^N A_d^{i-1} B_d \quad (22)$$

$$M_3 = \sum_{i=1}^N A_d^{i-1} F_d, M_4 = \sum_{i=1}^N (N-i) A_d^{i-1} B_d \quad (23)$$

예측된 N개의 상태벡터들은 저장되어 실시간 계측된 전방차량과의 상대거리 및 상대속도 정보와 비교/분석을 통해 고장진단이 수행된다. 진단영역을 도출하기 위해서는 최대/최소 경계치가 필요하기 때문에 본 연구에서는 분석된 선행차량의 가속도정보를 이용하여 경계치를 도출하였으며 가능한 선행차량의 가속도 값은 최대값인 표준편차의 세배 그리고 자차량의 가속도 변화량  $a_{d,avg}$  는 일반적으로 사용되는 jerk의 평균치를 이용하여 아래와 같이 적용되었다.

$$a_{d,avg} = jerk_{avg} \times T \quad (24)$$

고장진단을 위한 예측결과와 계측된 종방향 환경정보와의 비교분석 방법은 과거 예측된 N개의

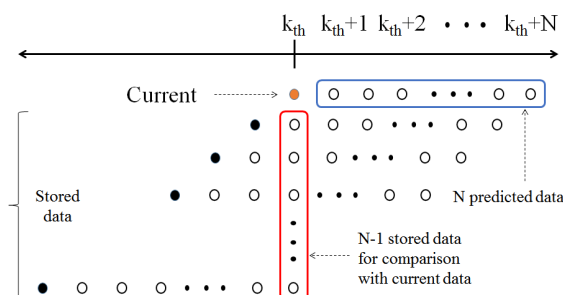


Fig. 6 Concept of predictive fault diagnosis

데이터들 중 현 시점을 예측한 데이터의 영역을 비교하는 것이다. 총 N-1개의 과거 예측된 데이터와 현 시점의 환경정보가 비교/분석되는 것이며 Fig. 6은 현재 계측된 환경정보가 과거 예측된 결과들과 비교되는 개념을 나타낸다.

총 N-1개의 과거 예측된 데이터와 현 시점에서 획득된 종방향 환경정보(상대거리, 상대속도)가 진단영역과의 위치가 비교/분석됨으로써 고장진단이 이루어진다. 본 연구에서는 계측된 환경정보가 진단영역 내 위치하면 0, 진단영역 밖에 위치하면 1을 부여함으로써 고장진단을 수행하도록

Table 2 Evaluation scenario (4 cases)

Case division	고장조건	
	종방향 센서	가속도 센서
Case - 1	정상	정상
Case - 2	고장	정상
Case - 3	정상	고장
Case - 4	고장	고장

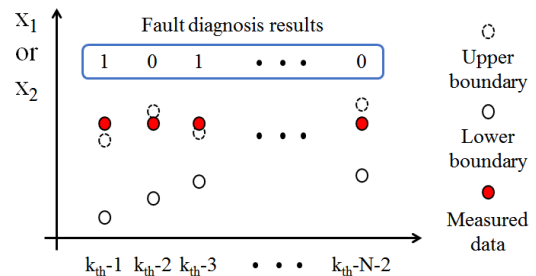
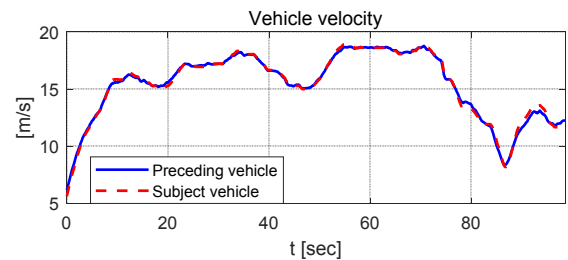
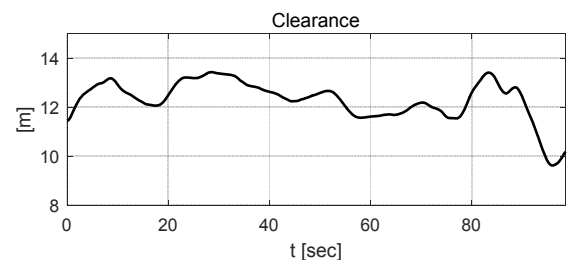


Fig. 7 Diagnosis region and fault diagnosis result

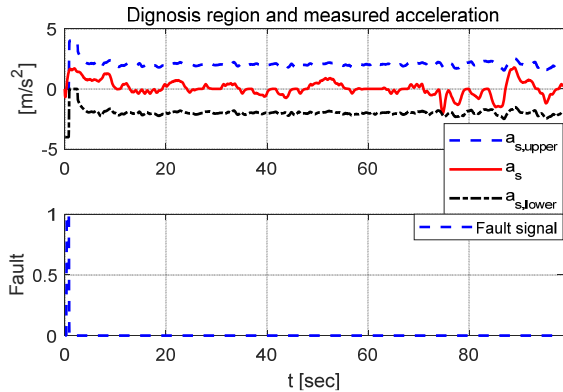


(a) Velocity: preceding and subject vehicle

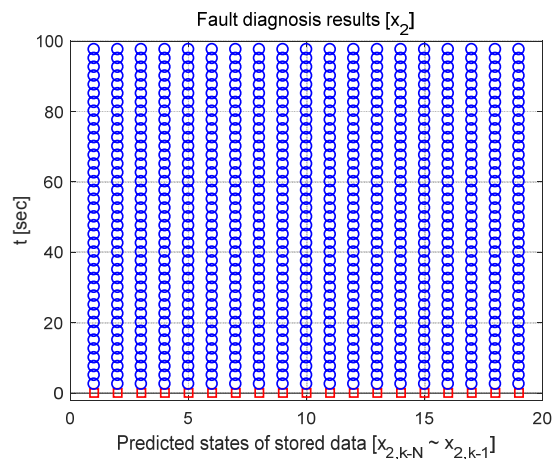
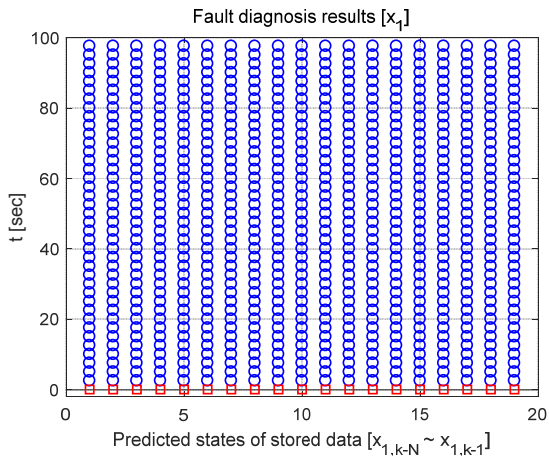


(b) Clearance

Fig. 8 Velocity and clearance of test data



(a) Acceleration sensor fault diagnosis



(b) Longitudinal sensor fault diagnosis(\$x\_1\$ and \$x\_2\$)

Fig. 9 Fault diagnosis results for case - 1

알고리즘을 설계하였다. Fig. 7은 진단영역과 고장진단 결과를 개념적으로 보여준다.

과거 예측된 결과를 이용하여 현 시점에 해당되는 예측지점의 데이터를 비교분석함으로써 현 시점에서 계측된 환경정보의 신뢰성을 평가할 수 있다. 단순히 전 단계에서의 예측결과가 아닌 과거 예측된 연속적인 결과를 이용하여 신뢰성을

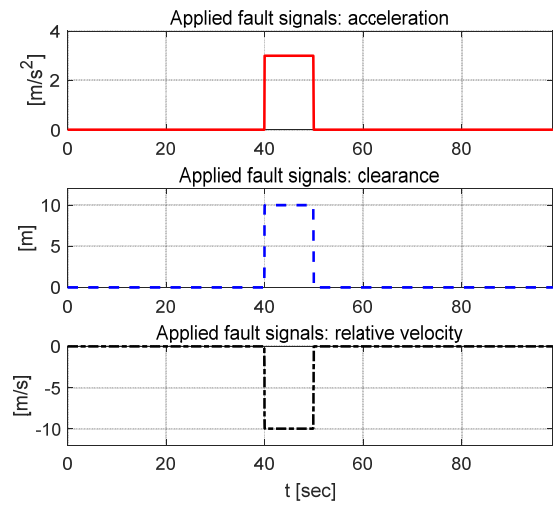


Fig. 10 Applied fault signal: square input

평가하기 때문에 합리적인 고장진단을 수행할 수 있는 알고리즘이다. 다음 절에서는 제안된 고장진단 알고리즘과 실 데이터를 이용한 다양한 고장조건에서의 성능평가 결과를 기술한다.

#### 4. 실데이터 기반 성능평가

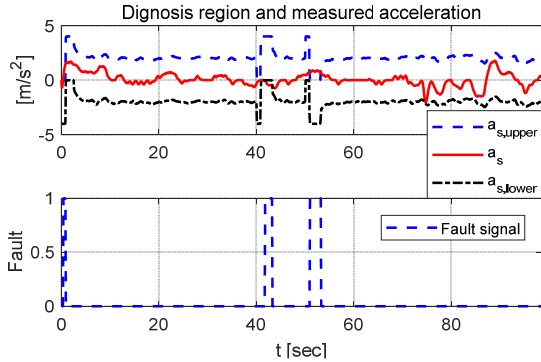
성능평가는 자율주행 도로의 직진구간에서 주행하는 자율주행 자동차라는 가정 하에 계측된 종방향 주행정보를 이용하여 네 가지 고장조건 (Table 2 참조)에서 수행되었다.

성능평가를 위해 적용된 선행차량의 추종 시나리오는 아래 Fig. 8과 같으며 상대거리와 상대속도 그리고 슬라이딩 모드 관측기를 이용하여 재건된 상대가속도를 보여준다.

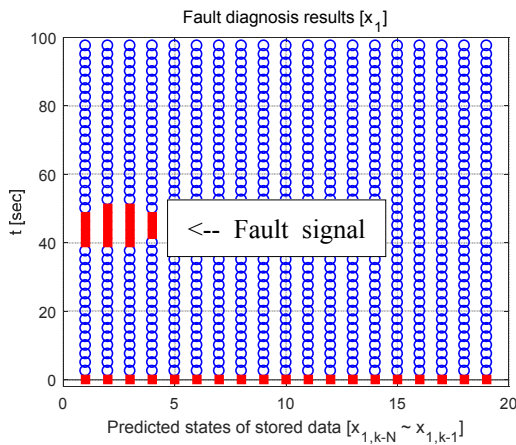
선택된 시나리오는 약 5~21 m/s 사이의 속도를 사용하며 선행차량을 추종하는 상황이며 운전자는 일반적으로 상대거리 약 6~12 m 사이 거리를 유지하면서 주행하는 것을 확인할 수 있다. 본 시나리오를 기반으로 Table 2에서 정의된 각각의 조건에 대해 고장진단 성능에 대한 평가를 수행하였으며 실 데이터에 임의의 고장신호를 인가함으로써 진단결과를 도출하고 분석하였다. 다음은 각 케이스에 대한 진단결과를 보여준다.

##### Case - 1) 종방향 센서(정상), 가속도 센서(정상)

케이스 1의 경우 종방향 센서와 가속도 센서의 고장신호가 없기 때문에 종방향 가속도가 정의된 진단영역 내에만 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 고장신호가 진단영역을 벗어나면 1



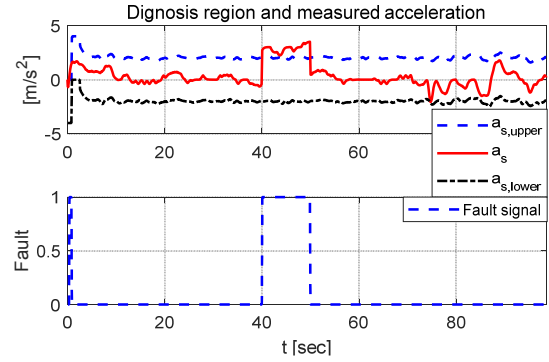
(a) Acceleration sensor fault diagnosis



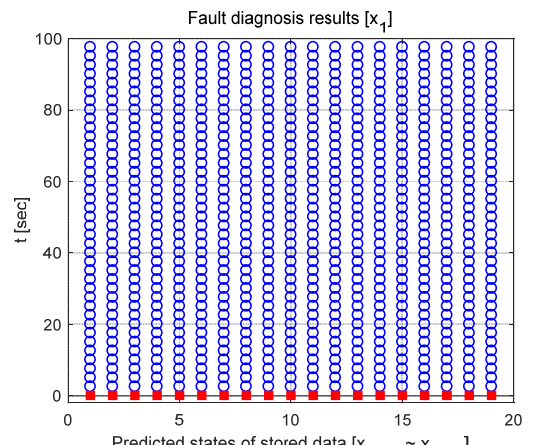
(b) Longitudinal sensor fault diagnosis( $x_1$  and  $x_2$ )

**Fig. 11** Fault diagnosis results for case - 2

영역 내 있다면 0의 값을 갖도록 설계하였기 때문에 평가 초기 수렴영역을 제외하는 모든 영역에서 0의 값을 갖는 것이 확인되었다. 본 연구에서 적용된 고장신호는 일반적으로 센서에서 발생할 수 있는 고장신호인 이전 값이 유지되는 홀딩과 전원 꺼짐에 의한 0 값이 유지되는 고장신호와 다르게 신호값이 offset 되는 고장신호를 인가하였다. 언급된 홀딩 및 전원 꺼짐에 의한 고



(a) Acceleration sensor fault diagnosis



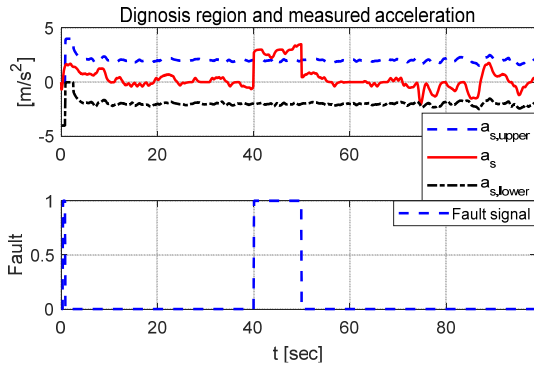
(b) Longitudinal sensor fault diagnosis( $x_1$  and  $x_2$ )

**Fig. 12** Fault diagnosis results for case - 3

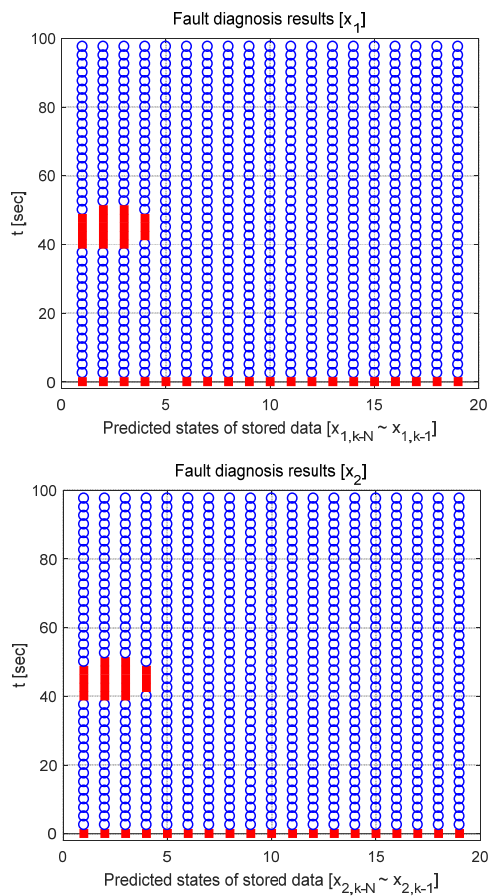
장신호는 현재 센서 자체적으로 하드웨어 및 소프트웨어 레벨에서의 고장 감지능을 제공하고 있다. 그러므로 본 연구에서는 기존의 고장신호가 아닌 offset 고장신호에 대한 검출능을 확인하고 향후 내부 고장신호의 검출 및 허용제어에 대한 연구를 계획하고 있다. Fig. 10은 각 조건별 센서에 적용된 고장신호를 보여준다.

각 고장신호들은 케이스 별 고장조건에 맞게





(a) Acceleration sensor fault diagnosis



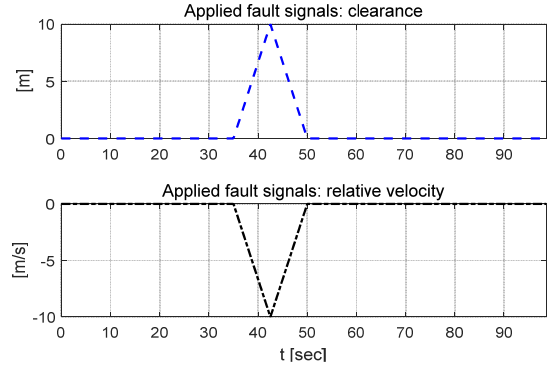
(b) Longitudinal sensor fault diagnosis( $x_1$  and  $x_2$ )

Fig. 13 Fault diagnosis results for case - 4

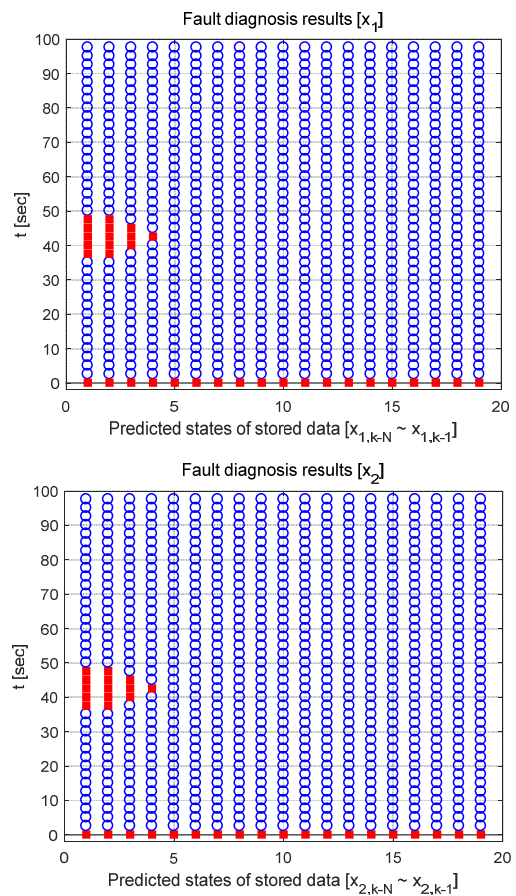
독립적으로 적용되었다. 모든 고장신호는 40초에서 시작되어 10초 동안 유지되도록 설정하였다.

**Case - 2) 종방향 센서(고장), 가속도 센서(정상)**

케이스 2의 경우 종방향 센서에 인가된 고장신호는 제안된 예견 고장진단 알고리즘에 의해 고장신호는 과거 예측된 상태와 비교되어 고장상태가 빨간색 영역으로 표시되어 진단될 수 있었다.



(a) Applied fault signal: triangular input



(b) Longitudinal sensor fault diagnosis( $x_1$  and  $x_2$ )

Fig. 14 Results for case - 4: triangular fault input

**Case - 3) 종방향 센서(정상), 가속도 센서(고장)**

케이스 3의 경우 계측된 가속도 정보에 고장신호가 인가되었지만 슬라이딩 모드 관측기에 의해 재건된 상대가속도 정보 및 제안된 진단 알고리즘에 의해 고장신호를 검출할 수 있었다.

**Case - 4) 종방향 센서(고장), 가속도 센서(고장)**

다양한 고장신호에 대한 성능평가를 수행하기

위해 본 연구에서는 삼각과 고장신호에 대한 고장신호 검출성능을 Case - 4의 경우에 대해 수행하였으며 Fig. 14는 인가된 고장신호와 검출결과를 보여주고 있다.

전반적인 평가결과를 보면 모든 조건에서 각 고장상태를 합리적으로 진단하는 것을 확인할 수 있었다. 종방향 센서의 고장신호는 예견 고장진단 알고리즘에 의해 과거 예측된 결과와 현재 예측된 정보와 비교됨으로써 붉은색 사각형의 일정 영역으로 표시될 수 있었다. 케이스 2의 경우 종방향 센서의 고장으로 인해 상대가속도의 재건성능이 일시적으로 낮아졌지만 슬라이딩 모드 관측기의 수렴성능에 의해 정상적으로 재건되는 것을 확인할 수 있었다. 다음 장은 본 논문의 결론과 향후계획에 대해 기술한다.

## 5. 결 론

본 연구는 슬라이딩 모드 관측기를 이용한 기구학 모델 기반 자율주행 자동차의 종방향 예견 고장진단 알고리즘 제시하였다. 자율주행 자동차는 종방향 제어를 위해 환경센서 기반 종방향 환경정보와 내부센서 기반 가속도 정보를 이용한다. 이러한 센서들의 고장진단을 위해 기구학 모델 기반 상호 보완적 진단 알고리즘을 개발하였고, 관측기와 예측 알고리즘을 이용하여 예견 진단 알고리즘을 설계하였다. 관측기를 이용하여 상대가속도를 재건하고, 분석된 차량의 가속도 정보 기반 자차량의 가속도 진단영역을 도출함으로써 고장을 진단하였다. 임의의 고장신호를 이용한 성능평가 결과 모든 조건에 대해 합리적인 진단 결과를 보여주었다. 하지만 케이스 2처럼 고장신호가 갑작스럽게 인가되는 시점에서 진단 오류가 발생할 수 있기 때문에 향후 진단 알고리즘의 고도화를 계획하고 있다. 이를 위해 선행차량의 가속도 정보를 종방향 환경정보를 이용하여 추정하고, 환경센서의 고장 혹은 곡선주행 시 정확한 가속도 정보의 획득을 위해 V2V 통신기반 가속도 정보의 획득을 계획하고 있다. 또한 실차기반 성능평가를 통해 합리적인 성능평가를 수행하여 제안된 고장진단 알고리즘의 성능을 검증할

계획이다. 본 연구에서 제안된 예견 고장진단 알고리즘은 향후 자율주행 자동차의 종방향 고장진단을 위해 사용되면서 고장 허용 제어를 위한 확장응용이 가능할 것으로 기대한다.

## 후 기

본 연구는 정부(미래창조과학부)의 재원(NRF-2016R1E1A1A01943543)으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 사업임.

## 참고문헌 (References)

- (1) Loureiro, R., Benmoussa, S., Touati, Y., Merzouki, R. and Bouamama, B., 2014, "Integration of Fault Diagnosis and Fault-tolerant Control for Health Monitoring of a Class of MIMO Intelligent Autonomous Vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 63, No. 1, pp. 30~39.
- (2) Jeong, Y., Kim, K., Yoon, J., Chong, H., Ko, B. and Yi, K., 2015, "Vehicle Sensor and Actuator Fault Detection Algorithm for Automated Vehicles," *In Intelligent Vehicles Symposium(IV)*, IEEE, pp. 927~932.
- (3) Tan, C. and Edwards, C., 2002, "Sliding Mode Observer for Detection and Reconstruction of Sensor Faults," *Automatica*, Vol. 38, pp. 1815~1821.
- (4) Yin, S. and Huang, Z., 2015, "Performance Monitoring for Vehicle Suspension System via Fuzzy Positivistic C-means Clustering Based on Accelerometer Measurements," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 20, No. 5, pp. 2613~2620.
- (5) Kim, Y., Jeon, N. and Lee, H., 2016, "Model Based Fault Detection and Isolation for Driving Motors of a Ground Vehicle," *Sensors & Transducers*, Vol. 199, No. 4, pp. 67~72.
- (6) Shtessel, Y., et al., "Sliding Mode Control and Observation, Control Engineering," Springer, 2014.
- (7) Edwards, C., Alwi, H. and Tan, C., 2012, "Sliding Mode Methods for Fault Detection and Fault Tolerant Control with Application to Aerospace Systems," *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, Vol. 22, No. 1, pp. 109~124.