

# Safety Critical 시스템의 센서 결함 허용을 위한 Kalman Hybrid Redundancy 개발

## Development of Kalman Hybrid Redundancy for Sensor Fault-Tolerant of Safety Critical System

김 만 호, 이 석, 이 경 창\*  
(Man Ho Kim, Suk Lee and Kyung Chang Lee)

**Abstract :** As many systems depend on electronics, concern for fault tolerance is growing rapidly in the safety critical system such as intelligent vehicle. In order to make system fault tolerant, there has been a body of research mainly from aerospace field including predictive hybrid redundancy by Lee. Although the predictive hybrid redundancy has the fault tolerant mechanism to satisfy the fault tolerant requirement of safety crucial system such as x-by-wire system, it suffers from the variability of prediction performance according to the input feature of system. As an alternative to the prediction method of predictive hybrid redundancy for robust fault tolerant, kalman prediction has attracted some attention because of its well-known and often-used with its structure called Kalman hybrid redundancy. In addition, several numerical simulation results are given where the Kalman hybrid redundancy outperforms with predictive smoothing voter.

**Keywords :** fault-tolerant, IAE (Integral of the Absolute magnitude of Error) performance index, intelligent vehicle, kalman hybrid redundancy, predictive hybrid redundancy kalman filter, safety critical system

### I. 서론

최근 들어, 자동차는 기계, 전자, 통신과 제어공학의 발전으로 인하여 안전성과 편의성이 획기적으로 향상되고, 안전하고 쾌적한 주행 환경은 교통사고로 인한 사회적인 손실을 최소화시키고 있다. 또한, 자동차 산업은 단순한 운송 수단에서 운송, 정보, 업무 및 휴식 공간으로 발전할 수 있는 지능형 자동차(intelligent vehicle) 기술 개발에 대한 관심을 가지고 있다[1-3]. 여기서, 기구학적 구조의 자동차 부품은 전자 및 통신 기술을 접목한 x-by-wire 시스템과 같은 지능형 자동차 기술은 기계, 전자, 통신과 제어공학을 기초로 구현되며 보다 높은 수준의 결함 허용(fault tolerant) 기술의 적용이 요구된다[4-5]. 왜냐하면, 기구적인 구조의 자동차 부품은 주어진 기능의 저하와 같은 현상을 통하여 고장(failure)을 운전자에게 사전에 경고하지만, 전자 시스템에 기반을 둔 x-by-wire 시스템과 같은 기술은 특별한 현상 없이 불시에 고장이 발생하는 경우가 많기 때문이다.

결함 허용을 위한 중복 구조는 기존의 시스템과 비교하여 높은 신뢰성(reliability)을 갖지만 비용 문제와 구현의 복잡성 때문에 우주 항공 산업의 safety-critical 시스템에 한정되어 적용되었다. 최근에, 컴퓨터 산업의 발전과 함께 컴퓨터 공학(computer science and engineering) 분야에서 결함 허용에 관련된 연구가 많이 수행되고 있다. 특히, 1990년대에는 Lapresta와 Goeva가 TMR(Triple Modular Redundancy) 구조에서 다수결

(majority)을 이용하여 결함을 검출하는 방법을 제안하고 시뮬레이션 기법을 통하여 그 성능을 검증하였다[6-7]. 또한, Shabgahi가 다수결을 이용한 방법과 중간값(median)을 이용한 방법의 성능을 비교하였으며 Krstic가 중간값(mid-value)을 이용하여 결함을 검출하는 방법을 제안하고 시뮬레이션과 하드웨어 구현을 통하여 성능을 평가하였다[8-9]. 그리고, Levitin, Shabgahi와 Long과 같은 다수의 연구자가 TMR 구조에서 가중치(weight)를 이용하여 결함을 검출하여 제거하는 방법을 제안하고 시뮬레이션을 통하여 성능을 검증하였다[10-13]. 2000년대를 전후하여 결함 허용 구조는 임계값을 이용하여 결함을 검출하는 동적 중복 구조와 smoothing voter와 fuzzy voting scheme과 같은 단순한 구조의 하이브리드 중복 구조를 제안하고 시뮬레이션을 통하여 성능을 검증하였다[14-16]. 최근에, 지능형 자동차로 대표되는 자동차 산업은 x-by-wire 시스템과 같은 분야에 결함을 허용하기 위한 기술에 관심을 가지기 시작하였다. 또한, 전자 산업의 급격한 발전은 저가의 고성능 마이크로 컨트롤러를 원활하게 보급하게 되었고, 시스템의 신뢰성을 높이기 위한 연구를 활발하게 수행할 수 있게 하였다. 특히, 저가의 마이크로 컨트롤러의 개발은 가격에 민감한 자동차 산업에서 x-by-wire 시스템의 결함 허용을 위한 대안으로 중복 구조에 관심을 가지게 하는 계기가 되었다.

지능형 자동차에서 x-by-wire 시스템의 결함 허용을 위한 연구는 기존의 컴퓨터 공학에서 연구된 하드웨어 중복 구조를 개념적으로 도입하는 단계에 있다. 특히, 컴퓨터 공학에서 연구된 기존의 연구는 시뮬레이션 기법과 디지털 값의 결함과 같은 한정된 범위에서 검증되었기 때문에 x-by-wire 시스템과 같은 높은 신뢰성을 요구하는 시스템에 직접적으로 적용할 수 없다. 또한, x-by-wire 시스템의 구현에 관련된 연구가 진행되는 단계에 있기 때문에 x-by-wire 시스템의 결함 허용에 대한 연구는 아직 시작 단계에서 제한적으로 수행되고

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2008. 5. 16., 채택확정 : 2008. 8. 21.

김만호 : 대구경북과학기술연구원 미래산업융합기술연구원

(mhkim@dgist.ac.kr)

이경창 : 부경대학교 제어자동화공학과(gclee@pknu.ac.kr)

이 석 : 부산대학교 기계공학부(slee@pnu.edu)

※ 본 연구는 2008년 정부(교육과학기술부)로부터 지원받아 수행된 연구임(지역거점연구단육성사업/차세대물류IT기술연구사업단).

있다[4]. 최근에, 결함을 주입하는 결함 주입기 설계와 예측기 설계를 통한 결함을 검출하여 제거하는 하이브리드 중복 구조 타입의 predictive hybrid redundancy가 제안되었다[17-18]. 또한, 마이크로 컨트롤러의 가격이 하락하고 연산 기능이 향상됨에 따라 중복 구조와 결함을 검출하여 제거하는 다양한 알고리즘에 대한 연구가 진행되고 있다[19-21].

따라서 본 논문에서는 하이브리드(hybrid) 타입의 하드웨어 중복 구조(hardware redundancy)를 적용하여 Kalman hybrid redundancy를 제안한다. 특히, 본 논문에서는 제안하는 Kalman hybrid redundancy는 기존의 제안된 대표적인 하이브리드 중복 구조인 predictive hybrid redundancy에서 결함을 검출하는 예측기의 추정 알고리즘이 입력되는 값의 특성에 따라 추정 성능의 차이를 가지는 문제점을 해결하기 위하여 반복적인 연산과 보정과정을 통하여 최적의 예측 값을 찾아내는 Kalman 필터를 이용한 Kalman 예측기(predictor)를 제안한다 [22]. 또한, Kalman 예측기의 예측된 값을 이용하는 결함 검출 알고리즘을 제안하여 Kalman hybrid redundancy의 결함 허용 성능을 평가한다. 여기서, 결함의 특성에 따른 가상의 입력 신호와 결함 신호를 생성하여 제안된 Kalman hybrid redundancy의 결함 검출 및 제거 성능을 평가한다.

본 논문은 서론을 포함하여 V 장으로 구성되어 있다. II 장에서는 결함의 특성 및 결함 허용 시스템에 대하여 설명하고, III 장에서는 본 논문에서 제안한 Kalman hybrid redundancy의 구조와 기능을 소개한다. IV 장에서는 Kalman hybrid redundancy의 성능을 평가하고 마지막 V 장에서 결론 및 향후 연구 방향을 제시한다.

II. 결함 허용 시스템

1. 결함(fault)의 특성 및 결함 허용 시스템

일반적으로, 결함 허용 시스템은 결함(fault), 오류(error)와 고장(failure)을 중심으로 구성되며 각각은 인과관계에 따라 발생된다. 결함은 오류의 원인이 되며 오류로 인하여 시스템은 고장으로 발전하게 된다. 우선, 결함은 하드웨어 또는 소프트웨어 요소의 물리적인 파괴나 불안정한 상태가 발생하는 것으로 정의된다. 즉, 시스템의 하드웨어나 소프트웨어 요소의 blemish, weakness 또는 shortcoming이 결함의 한 예가 될 수 있다. 다음으로, 오류는 결함으로 인한 비정상적인 상태를 의미한다. 즉, 결함으로 인하여 발생하는 상태의 변화를 오류라고 정의할 수 있다. 마지막으로, 고장은 결함으로 인하여 발생된 오류가 원인이 되어 주어진 시스템의 기능을 정상적으로 수행하지 못하는 상태로 정의된다[23-24]. 즉, 고장은 시스템이 요구된 기능을 수행하지 못하거나 요구되는 시점보다 늦게 주어진 기능을 수행하는 것을 의미한다. 예로, 시스템이 모터를 on/off 제어를 하고 있는 상태에서 회로 소자의 쇼트가 발생하여(stuck at logic 1) 모터를 정지(stuck at logic 0)할 수 없는 경우에서, 물리적인 쇼트는 결함, 정상적인 “0” 값을 출력하지 못하고 잘못된 “1” 값을 출력하는 상태는 오류가 되며 모터 정지 명령에 정지를 시키지 못하는 것은 고장으로 볼 수 있다.

결함 허용 시스템(fault tolerant system)은 하드웨어 및 소프트웨어의 결함이 발생하여도 주어진 기능을 정확하게 수행

하는 시스템을 의미한다. 즉, 결함 허용은 결함을 허용할 수 있는 능력을 의미하고, 결함 허용 시스템은 결함이 발생하더라도 정상적으로 기능을 수행하여 주어진 순서에 따라 동작할 수 있는 시스템을 의미한다[23]. 또한, Laprie는 결함이 발생하여도 정상적인 서비스를 제공할 수 있는 시스템을 결함 허용 시스템이라고 정의하였고, 오류 검출과 오류 회복(recovery)을 통하여 결함 허용 시스템이 구현될 수 있다고 하였다[26,27].

결함 허용 시스템을 설계하기 위하여 가장 중요한 요소는 결함의 특성과 원인을 명확하게 구분하는 것이다. 그림 1은 결함 특성에 따라 각각을 구분하여 나타내고 있다. 그림에서, 결함은 발생하는 원인(cause), 성격(nature), 기간(duration), 범위(extent)와 값(value)에 따라 구분된다[25]. 우선, 결함은 성격(nature)에 따라 구분되며 결함 성격은 결함의 유형을 의미한다. 결함이 발생한 분야에 따라 하드웨어와 소프트웨어로 구분되며 하드웨어 결함은 아날로그와 디지털 분야로 구분된다. 여기서, 발생한 결함이 하드웨어의 아날로그 타입의 결함이라면 결함이 발생할 수 있는 하드웨어의 아날로그 소자의 결함을 허용할 수 있는 중복 구조를 선택하고 소프트웨어 결함이라면 소프트웨어 중복 구조나 시간 중복 구조를 통하여 결함을 허용할 수 있다. 다음으로, 결함은 결함 기간(duration)에 따라 구분되며 결함 기간은 결함이 발생하는 시간에 따라 정의된다. 결함은 발생하는 시간에 따라 영구(permanent) 결함, 순간(transient) 결함과 간헐(intermittent) 결함으로 구분된다. 특히, safety critical 시스템에서 발생하는 센서 결함은 알 수 없는 외부의 영향이나 내부의 영향으로 인하여 완전히 기능을 상실하는 영구 결함, 순간적으로 결함이 발생하는 순간 결함과 간헐 결함 모두의 특성을 가지는 경우가 많다. 다음으로, 결함은 발생하는 범위(extent)에 따라 구분되며 결함 범위는 지역적인(local) 것과 전역적인(global) 것으로 구분된다. 다음으로, 결함은 결함값(value)에 따라 구분하며 결함값은 확정적인 값(determinate)과 불확정적인 값(indeterminate)으로 구분된다. 특히, 디지털 시스템의 경우에는 확정적인 값의 결함이 많으며 safety critical 시스템의 센서와 같은 아날로그 시스템은 하드웨어 오차에 의한 불확정적인 값의 결함이 발생하는 경우가 많다. 마지막으로, 결함은 발생하는 원인에 따라 구분되며 결함 원인은 사양(specification), 구현(implementation),

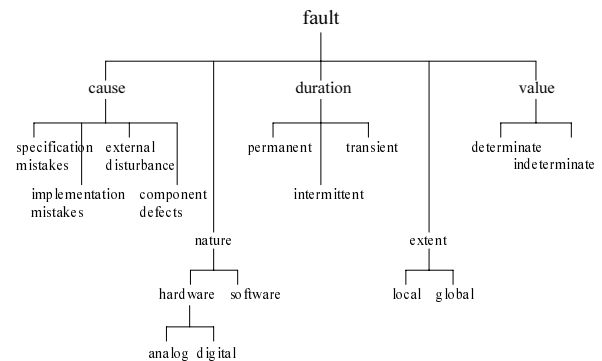


그림 1. 결함 특성에 따른 결함의 분류.

Fig. 1. Classification of faults by five attributes.

구성 요소(components)와 외부 요인(external factor) 영역으로 구분된다. 특히, 시스템 설계 사양과 구현의 문제는 하드웨어 결함뿐만 아니라 소프트웨어 결함을 함께 발생시킬 수 있는 요인이며 외부와 구성 요소의 문제는 대부분 하드웨어 결함으로 이어진다.

2. 결함 허용을 위한 중복 구조

일반적으로, 중복 구조는 동일한 기능을 수행하는 모듈을 중복으로 설계하는 하드웨어 중복 구조(hardware redundancy), 시스템 모델에 근거하여 소프트웨어로 가상의 중복 구조를 설계하는 소프트웨어 중복 구조(software redundancy), 패리티 코드(parity code)와 같이 추가적인 정보를 바탕으로 고장을 검출하는 정보 중복 구조(information redundancy)와 시간 구간에서 반복 연산을 바탕으로 고장을 검출하는 시간 중복 구조(time redundancy)가 있다. 여기에서, 가장 대표적인 중복 구조인 하드웨어 중복 구조는 디지털 제어 시스템에서 센서, 모듈 및 액츄에이터의 중복 구조 설계에 많이 사용되고 있다. 특히, 마이크로 컨트롤러의 가격이 하락함에 따라 사용 빈도가 급속히 증가하고 있으며 가장 확실한 고장 허용 방법으로 인식되고 있다[17].

하드웨어 중복 구조는 기능과 구조에 따라 정적 중복 구조(static redundancy), 동적 중복 구조(dynamic redundancy)와 하이브리드 중복 구조(hybrid redundancy)로 구분된다[17]. 먼저, 정적 중복 구조는 고장이 발생하면 고장을 차단(fault masking)하여 억제(fault containment)하는 기능을 가진다. 하지만, 정적 중복 구조는 3개 이상의 모듈을 사용하기 때문에 상대적으로 비용이 높을 뿐만 아니라, 두 개 이상의 모듈에서 동시에 고장이 발생할 경우 고장을 판단하기 어렵다는 단점을 가지고 있다. 반면에, 동적 중복 구조는 결함 검출(fault detection)을 통해 결함 위치를 찾아서(fault location) 결함 회복(fault recovery)하는 기능을 가진다. 즉, 동적 중복 구조는 결함이 발생하면 결함이 발생된 모듈을 교체(reconfiguration)할 수 있는 기능을 가지고 있다. 왜냐하면, 고장은 불규칙하게 순간적으로 발생하는 경향을 가지고 있기 때문에, 결함이 발생된 부분만을 잠시 격리하는 것이 결함을 완벽하게 차단하는 방법보다 더 효율적이기 때문이다. 주 모듈과 대기 모듈의 동작 상태에 따라 hot standby 중복 구조와 cold standby 중복 구조로 구분된다.

마지막으로, 하이브리드 중복 구조로 정적 중복 구조와 동적 중복 구조를 혼합한 구조를 가진다. 그러나 하이브리드 중복 구조는 정적 중복 구조와 동적 중복 구조의 장점을 동시에 가지고 있지만, 복잡한 연산 기능을 수행하는 고가의 마이크로 컨트롤러가 필요하기 때문에 우주선과 같은 높은 안전성을 필요로 하는 시스템에만 제한적으로 사용되어왔다. 그러나, 마이크로 컨트롤러의 가격이 낮아지고 기능이 향상됨에 따라, 자동차를 비롯한 디지털 제어 시스템에서 하이브리드 타입의 중복 구조를 적용하는 경우가 증가되고 있다.

III. Kalman hybrid redundancy 구조

본 논문에서 앞서 제안된 하이브리드 타입의 predictive hybrid redundancy는 지능형 자동차의 x-by-wire 시스템과 같은 safety critical 시스템의 센서 결함 허용을 위한 하이브리드 중복 구

구조로 제안되었다[17]. 하지만, predictive hybrid redundancy에서 센서 입력값을 추정하는 예측기는 다양한 센서 입력에 적절하게 대처하지 못한다는 단점을 가지고 있다. 즉, 센서 입력값의 변화를 추정하는 이중지수 평활법이 센서 입력값의 특성과 이중지수 평활화 상수( $\alpha$ )를 선정하는 방법에 따라 일정한 추정 성능을 보장할 수 없다. 따라서, 본 논문은 앞서 제안된 predictive hybrid redundancy의 추정 성능 문제와 최소한의 센서를 사용하여 결함을 허용하기 위하여 Kalman hybrid redundancy를 제안한다.

그림 2는 센서 입력값의 특성에 따라 추정 성능에 영향을 받는 predictive hybrid redundancy의 추정 성능을 향상시키기 위한 방법으로 Kalman 필터 이론에 따른 예측기를 적용한 Kalman hybrid redundancy를 나타내고 있다. 그림에서, Kalman hybrid redundancy는 Kalman filter 이론을 적용하여 센서값을 추정하는 Kalman 예측기, Kalman 예측기(Kalman predictor)의 추정값(FT(k))을 이용하여 결함을 검출하는 결함 검출기(fault detector), 두 센서 입력이 모두 결함으로 판단되는 예외 상황을 대처하는 예외 처리기(exception handler)와 최종 출력값을 결정하는 보터(voter)로 구성된다. 여기서, Kalman hybrid redundancy는 전 사이클의 최종 출력값인  $a(k-1)$ 을 이용하여 추정과 보정 과정을 통하여 현 사이클의 추정값 FT(k)를 추정 후 추정값 FT(k)를 이용하여 센서 입력값  $a_1(k)$ 과  $a_2(k)$ 의 결함 여부를 판단하여 최종 출력값을 보터가 결정하는 메커니즘을 가진다.

먼저, Kalman 예측기는 결함을 검출하기 위하여 사용되는 센서 입력값의 변화에 대한 임계값(threshold)을 추정하는 기능을 담당한다. 본 논문에서 센서 입력값의 임계값을 추정하기 위한 방법은 최소자승법(least square method)을 이용하여 시간에 따른 방향을 추정하는 효율적인 재귀 계산법(recursive computation solution)인 Kalman filter 이론이다[28]. 일반적으로, Kalman filter 이론은 수학적인 모델을 기반으로 측정 오류 공분산(error covariance)을 최소화하는 추정과 보정 과정을 반복하기 때문에 관측기의 잡음 성분을 포함하는 stochastic estimation 에서 효율적인 추정방법으로 알려져 있다[29]. 특히, Kalman filter 이론은 추정 시스템에서 가장 많이 적용되고 있으며 이론의 단순성과 재귀적 보정 과정으로 인하여 많은 응

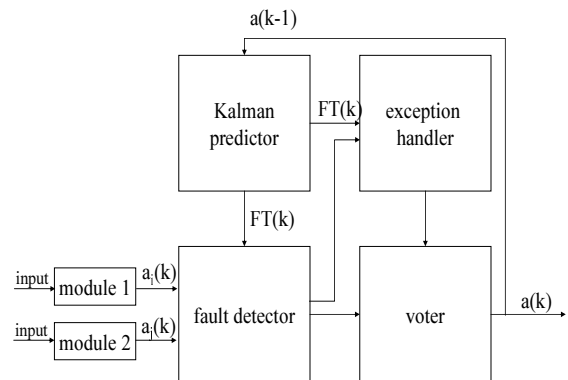


그림 2. Kalman hybrid redundancy 구조.  
Fig. 2. Structure of Kalman hybrid redundancy.

용 분야의 추정 방법으로 활용되고 있다.

본 논문에서 추정한 FT(k)를 추정하기 위하여 식(1)과 같은 상태 방정식과 관측 방정식을 갖는 이산 시스템(discrete system) 모델을 고려한다.

$$\begin{aligned} a(k) &= Aa(k-1) + Bu(k-1) + w(k-1) \\ z(k) &= Ha(k) + v(k) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $a(k) \in \mathfrak{R}^n$  는 상태 방정식의 상태벡터,  $z(k) \in \mathfrak{R}^p$  는 관측 방정식의 관측벡터,  $w(k) \in \mathfrak{R}^n$  는 시스템 잡음,  $v(k) \in \mathfrak{R}^p$  는 관측 잡음을 의미한다. 또한, 잡음 벡터  $w(k)$  와  $v(k)$  는 서로 상관 관계가 없고 가오시안 분포를 갖고 있으며 식(2)와 같은 공분산 값을 갖는다고 가정한다[30].

$$\begin{aligned} E[w(k)] &= E[v(k)] = 0 \\ cov[w(j), w(k)] &= E[w(j)w(k)^T] = Q(k) \\ cov[v(j), v(k)] &= E[v(j)v(k)^T] = R(k) \\ cov[w(j), v(k)] &= E[w(j)v(k)^T] = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Kalman 필터의 추정과 보정 과정을 모델링 하기 위하여 선 추정값을  $a^-(k)$  라고 하고 선 추정값을 이용하여 갱신하는 후 추정값  $a^-(k)$  을 이용하면 선 추정 오차 ( $e_-(k)$ )와 후 추정 오차( $e(k)$ )는 식(3)과 같이 표현할 수 있다[28,29].

$$\begin{aligned} e_-(k) &= a(k) - a^-(k) \\ e(k) &= a(k) - a^-(k) \end{aligned} \quad (3)$$

최적의 선형 추정치에 대한 추정오차는 측정치들로 구성되는 선형벡터 공간에 직교한다는 선형 추정 이론의 직교 원리에 따르면 선 추정값 오차 공분산  $P_-(k)$  와 현재 상태벡터와 보정된 상태벡터의 후 추정값 오차 공분산  $P(k)$  는 식(4)와 같이 표현할 수 있다[30].

$$\begin{aligned} P_-(k) &= E[e_-(k)e_-(k)^T] \\ &= E[(a(k) - a^-(k))(a(k) - a^-(k))^T] \\ P(k) &= E[e(k)e(k)^T] \\ &= E[(a(k) - a^-(k))(a(k) - a^-(k))^T] \end{aligned} \quad (4)$$

Kalman 예측기는 후 추정값을 전 단계에서 추정한  $a^-(k)$  에 관측기에서 측정된  $z(k)$  와 측정 추정값  $H(k)a^-(k)$  의 차이를 선형관계로 나타내는 과정에서 선 추정된 값을 이용하여 입력값을 추정한다. 즉, 식(5)와 같이 후 추정값  $a^-(k)$  을 갱신하기 위하여 측정값  $z(k)$  에서 선 추정값  $a^-(k)$  의 오차를 계산하여 이득값을 곱한 뒤에 최적의 평가치를 더하는 과정을 반복한다[28,30].

$$\begin{aligned} a^-(k) &= a^-(k) + K(k)(z(k) - Ha^-(k)) \\ a^-(k) &= A(k-1)a^-(k-1) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,  $K(k) \in \mathfrak{R}^{n \times p}$  는 칼만 이득값을 의미하고 재귀연산을 통해 매번 반복적으로 갱신되어 계산된다. 또한,  $(z(k) - Ha^-(k))$  는 실제로 출력되는 값을 관측기에서 관측

한 값과 선 추정값의 오차를 연산하여 얻은 값을 의미한다.

칼만 이득값을 계산하기 위하여, 식(4)를 식(5)에 대입하면 식(6)과 같이 표현할 수 있다[30].

$$\begin{aligned} P(k) &= P_-(k) - K(k)HP_-(k) - P_-(k)K(k)^T H^T \\ &\quad + K(k)(HP_-(k)K(k)^T H^T + R(k))K(k)^T \end{aligned} \quad (6)$$

행렬 미분방정식을 이용하여 칼만 이득값의 최적 값을 구하기 위하여 식(6)을 미분하면 식(7)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} K(k) &= P_-(k)H^T [HP_-(k)H^T + R(k)]^{-1} \\ &= \frac{P_-(k)H^T}{HP_-(k)H^T + R(k)} \end{aligned} \quad (7)$$

칼만 이득값을 계산하는 식(7)을 식(6)에 다시 대입하면 공분산 행렬을 식(8)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} P(k) &= P_-(k) - K(k)(HP_-(k)K(k)^T H^T + R(k))K(k)^T \\ &= (I - K(k)H)P_-(k) \end{aligned} \quad (8)$$

공분산 행렬 값은 (k+1)-th 사이클의 값을 추측하여 위해 사용되며 다음 사이클의 추정값은 식(9)와 같이 표현할 수 있다[29].

$$\begin{aligned} a^-(k+1) &= Aa^-(k) + Bu(k) \\ P_-(k) &= AP(k)A^T + Q(k) \end{aligned} \quad (9)$$

공분산 행렬식 (9)을 식(8)에 대입하면 식(10)과 같은 공분산 행렬의 이전 값을 추정할 수 있으며 이를 이용하여 센서 입력값 변화를 추정된 임계값 FT(k)를 계산하는 과정과 보정하는 과정을 반복한다.

$$\begin{aligned} P_-(k) &= A(P_-(k) - K(k)HP_-(k))A^T + Q(k) \\ &= A(I - K(k)H)P_-(k)A^T + Q(k) \end{aligned} \quad (10)$$

결함 검출기는 Kalman 예측기에서 추정된 임계값 FT(k)를 이용하여 입력값의 결함을 검출하는 기능을 담당한다. 본 논문은 입력 신호가 급격한 변화를 보이는 경우를 포함하여 입력값의 결함을 검출할 수 있는 알고리즘을 개발한다. 왜냐하면, 디지털 제어 시스템에서 일정 속도로 동작하는 플랜트의 출력인 센서 값이나 플랜트의 입력인 구동기 제어 값은 스텝 응답 신호와 같이 초기에 상대적으로 급격한 변화를 보이는 경우가 있기 때문이다.

그림 3은 예측기에서 추정된 FT(k)를 이용한 결함 검출 알고리즘을 나타내고 있다. 그림에서, Kalman 예측기는 입력값이 들어오면 FT(k)를 계산한다. 여기서, 결함 검출기는 입력되는 값의 변화가 크면 결함 유무를 정상적으로 판단하기 어렵기 때문에 변화의 폭이 가장 작은 입력값의 편차 FT(k)를 예측기에서 추정한다. 다음으로, 결함 검출기는  $(1+\beta)FT(k)$ 를 이용하여 입력값의 결함 여부를 판단한다. 결함 검출 알고리즘은 입력값과 직전 사이클의 출력값의 차이가  $(1+\beta)FT(k)$  범위를 벗어나게 되면 입력값에 문제가 있다고 판단한다. 여기서, 최소한 하나의 입력값이 정상으로 판단되면 결함 검출기는 정상으로 판단된 값을 보더로 보낸다.

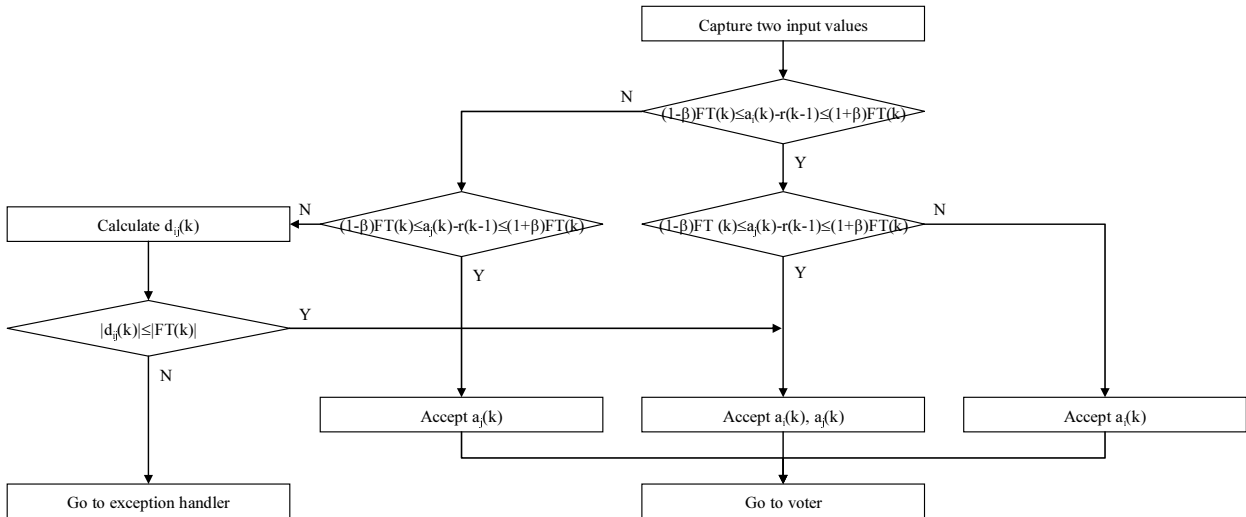


그림 3. Kalman hybrid redundancy의 결함 검출 알고리즘.

Fig. 3. Fault detection algorithm of the Kalman hybrid redundancy.

하지만, 결함 검출기가 두 개의 입력값이 모두 문제가 있다고 판단하면, k-th 사이클에 입력된  $a_i(k)$ 와  $a_j(k)$ 의 거리 차이  $d_j(k)$ 를 이용하여 정말로 결함인지를 다시 한번 판단한다. 왜냐하면, 제어 시스템의 특성에 따라 센서 입력값은 상대적으로 급격한 변화를 보이는 경우가 발생하는데 예측기의 추정된 값은 이와 같은 순간적인 변화에 민감하게 반응하지 못하는 경우가 많기 때문이다. 만일,  $d_j(k)$ 가  $FT(k)$  이내에 있다면 두 입력이 비슷하게 움직인 것이기 때문에 결함이 아니라 급격한 신호의 변화라고 판단하고, 두 입력값을 정상으로 판단한다. 하지만,  $d_j(k)$ 가  $FT(k)$  범위 밖이라면 두 입력이 서로 다르고, 두 입력 모두 신뢰할 수 없다고 판단하여 예외 처리기를 작동시킨다.

예외 처리기는 결함 검출기에서 두 개의 입력값이 모두 결함으로 판단되는 예외 상황에서 결과값을 출력하는 역할을 담당한다. 예외 처리기는 피드백 된 이전 사이클에서 결정된 출력값들을 이용하여 입력값의 증감을 판단한다. 이전 두 사이클의 입력값이 증가하는 추세라면 예외 처리기는 직전 사이클에서 피드백 된 출력값  $r(k-1)$ 에  $FT(k)$ 를 더한  $r(k-1)+FT(k)$ 을 출력한다. 반대로, 이전 두 사이클의 입력값이 감소하는 추세라면 예외 처리기는 직전 사이클에서 피드백 된 출력값에  $FT(k)$ 를 뺀  $r(k-1)-FT(k)$ 을 출력한다. 이러한 방법으로 예외 처리기는 신뢰할 수 있는 입력값이 없을 때 임시적으로 출력을 생성하여 시스템이 작동하도록 하며, 입력값의 결함이 순간 결함이나 간헐 결함일 경우 다음 사이클의 입력을 받아 정상적으로 작동을 수행할 수 있게 한다.

보터는 결함 검출기에서 출력되는 결과값이나 예외 처리기에서 출력되는 결과값을 이용하여 최종 출력값을 연산하는 역할을 담당한다. 여기서, 결함 검출기에서 하나의 결과값을 보터로 보내거나 예외 처리기에서 추정된 값을 보내는 경우에 보터는 그 값을 그대로 최종 출력값으로 결정한다. 하지만, 결함 검출기에서 두 개의 결과값을 보터로 보내는 경우에는 두 값 중 어느 값이 더 정상적인 값인지 판단할 수

없기 때문에 두 개의 결과값을 평균 연산하여 최종 출력값을 결정한다.

#### IV. Kalman hybrid redundancy 성능 평가

우선, 제한한 Kalman hybrid redundancy의 성능을 평가하기 위하여 본 연구는 MATLAB Simulink의 함수를 이용하여 Kalman hybrid redundancy의 시뮬레이션 모델을 구현하였다. 그림 4는 MATLAB Simulink를 이용하여 구현한 Kalman hybrid redundancy를 나타내고 있다. 그림에서, 입력값의 변화를 추정하는 예측기는 Simulink의 Kalman function 함수를 이용하여 구현하고 입력값의 결함 여부를 판단하는 결함 검출기와 예외 처리기는 MATLAB Stateflow를 이용하여 구현하였다. 그림 5는 Simulink의 Kalman function 함수를 이용하여 설계한 Kalman 예측기를 나타내고 있다. 여기서, 추정값 오차 공분산의 초기값은  $1 \times \text{eye}(1)$ 로, 상태 방정식의 천이행렬은  $[1]$ 로, 상태방정식의 잡음 공분산은  $1 \times \text{eye}(1)$ 로 각각 설정하였다. 또한, 관측 방정식의 관측행렬은  $[1]$ 로, 관측 방정식의 잡음 공분산은  $1 \times \text{eye}(1)$ 로 설정하였다. 또한, 성능 평가를 비교하기 위하여 일반적으로 사용되는 보팅 기법인 중간값(median) 보터와 평균값(average) 보터를 Simulink 함수로 구현하였다.

PC 환경의 MATLAB 시뮬레이션을 위한 가상의 입력 신호는 그림 6과 같은 브레이크 페달 신호를 사용하였다. 그림에서, 가상의 입력 신호는 운전자가 위험을 인지하고 급격하게 브레이크를 밟아서 약 400ms 에서 약 4.5V(페달 센서 출력은 0에서 5V 기준)까지 상승시켜 일정한 기간 동안 그 상태를 유지한 후 약 600ms부터 천천히 브레이크 페달에서 발을 떼서 약 1,000ms 에서 .05V까지 감소시키는 상황을 모사하였다.

본 연구는 그림 6과 같이 생성한 가상의 브레이크 페달 신호에 결함을 주입하기 위해서 결함 신호를 생성하였다. 결함은 순간 결함(transient)과 간헐 결함(intermittent)의 특성을 가지는 그림 7과 같은 impulse 형태의 결함 신호와 영구 결함(permanent)의 특성을 가지는 그림 8과 같은 영구 결함으로

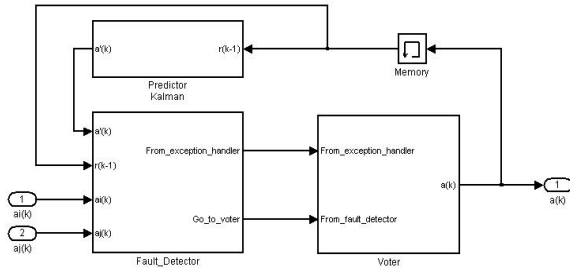


그림 4. Kalman hybrid redundancy 시뮬레이션 모델.  
Fig. 4. MATLAB simulation model of Kalman hybrid redundancy.

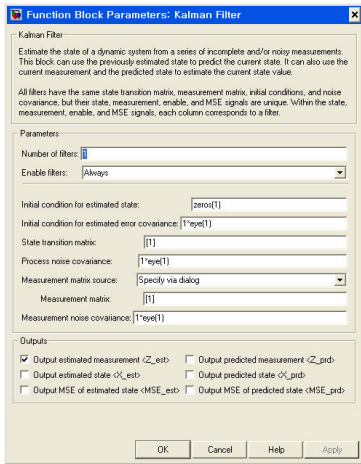


그림 5. Kalman 예측기 시뮬레이션 모델.  
Fig. 5. MATLAB Kalman filter function block of Kalman predictor.

구분하여 정상적인 브레이크 페달 신호에 주입되었다[4][23]. 여기서, 결함은 결함률과 결함값을 따라 주입되며 결함률은 샘플 된 신호의 총수에 대한 확률적으로 주입된 결함을 포함하는 샘플 수의 비로 정의한다. 또한, 결함값은 결함을 포함한 신호 값과 원래 신호의 최대 차이를 센서 최대 출력 값으로 나눈 것이다. 예로, 그림 6에서 브레이크 페달 신호의 42 번째 입력 신호는 1.80V지만, 결함이 주입된 그림 7에서 브레이크 페달 신호는 15% 결함값(최대 출력 5V의 15%인 0.75에서 - 0.75 V)에 따라 0.72V 값이 주입된 2.52V가 되었다.

마지막으로, 보터의 성능을 비교하기 위한 성능 지표로서 IAE(Integral of the Absolute magnitude of Error)를 사용하였다[31]. 일반적으로, IAE는 식 (11)와 같이 시간 영역  $\Delta T$ 를 기준으로 발생한 오차의 적분 값으로 정의하고 IAE가 작을수록 결함을 제거하는 능력이 우수함을 의미한다. 여기서,  $e(k)$ 는 실제 정상적인 브레이크 페달 신호와 보터에서 결함을 제거한 신호의 차이를 의미한다

$$IAE = \sum_{k=1}^n \Delta T \cdot |e(k)| \quad (11)$$

그림 9는 정상적인 그림 6과 같은 신호와 순간 결함과 간헐 결함의 특성이 포함된 그림 7과 같은 신호를 두 입력 신호로 하여 Kalman hybrid redundancy의 결함 제거 성능을 나타내고 있다. 그림에서, Kalman hybrid redundancy는 결함이 발생

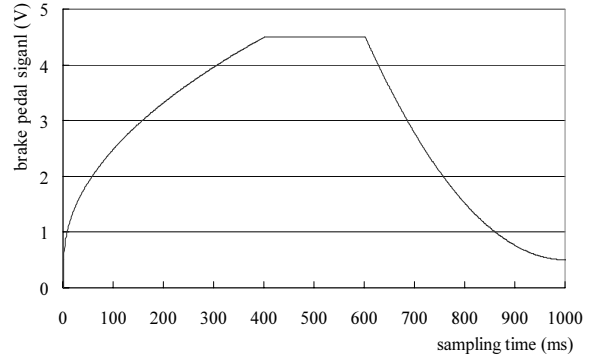


그림 6. 결함이 포함되지 않은 브레이크 신호.  
Fig. 6. Example of simulated signal of a brake pedal without a fault.

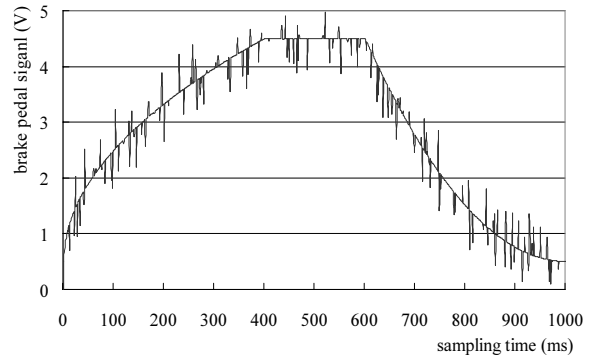


그림 7. 순간 및 간헐 결함이 포함된 브레이크 신호.  
Fig. 7. Example of simulated original of brake pedal signals with transient and intermittent fault.

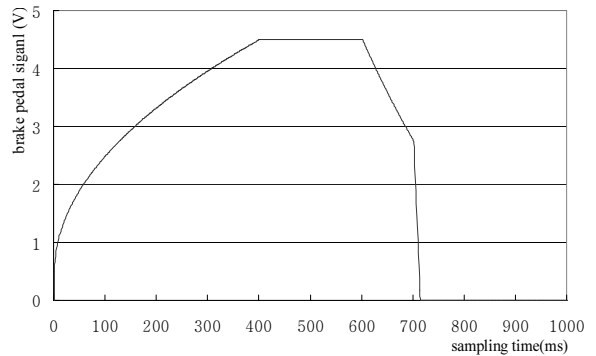


그림 8. 영구 결함이 포함된 브레이크 신호.  
Fig. 8. Example of simulated original of brake pedal signals with permanent fault.

된 신호를 결함 검출 알고리즘을 통하여 적절히 제거하는 우수한 결함 허용 성능을 가짐을 확인하였다. 또한, 그림 10은 순간 결함과 간헐 결함의 특성이 포함된 그림 7과 같은 신호와 영구 결함 특성이 포함된 그림 8과 같은 신호를 두 입력 신호로 하여 Kalman hybrid redundancy의 결함 제거 성능을 나타내고 있다. 그림에서, Kalman hybrid redundancy는 예측기에서 추정된 FT(k)와 결함 검출 알고리즘을 통하여 순간 및 간헐 결함과 영구 결함이 포함된 신호를 격리하고, 두 입력값에 동시에 결함이 발생하는 경우에는 예외 처리기를 통하여 예외 상황에 대처할 수 있는 출력값을 생성하여 우수한 결함

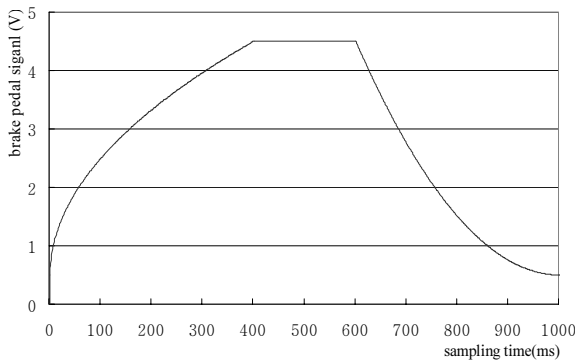


그림 9. 순간 및 간헐 결함이 포함된 신호의 Kalman hybrid redundancy 결과.

Fig. 9. Brake pedal signal output of Kalman hybrid redundancy with permanent fault.

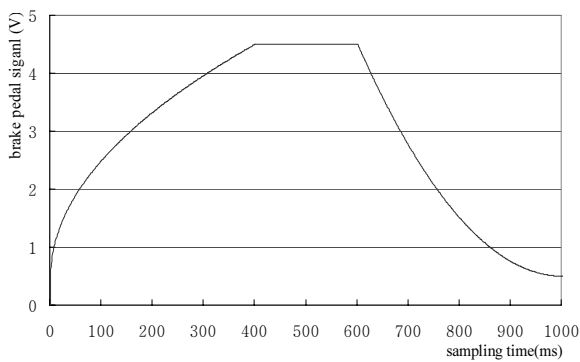


그림 10. 순간 및 간헐 결함과 영구 결함이 포함된 신호의 Kalman hybrid redundancy 결과.

Fig. 10. Brake pedal signal output of Kalman hybrid redundancy with permanent fault and transient fault.

제거 성능을 가짐을 확인하였다. 또한, Kalman hybrid redundancy의 IAE 성능 지수가 0.067임을 확인하였다. 예로, 그림 7의 브레이크 페달 신호의 746번째부터 748번째 입력 신호는 결함이 포함되어 각각 2.84, 1.45와 1.80V이며 영구 결함이 포함된 그림 8에서 브레이크 페달 신호는 모두 0V지만, 예외 처리기는 예측기를 통하여 예측한 FT(745)를 통하여 각각 2.11, 2.10과 2.09V를 출력한다. 즉, 제안된 Kalman hybrid redundancy는 간헐 및 순간 결함과 영구 결함이 발생하여도 결함을 제거할 수 있으며 전혀 다른 성격의 결함이 동시에 발생하는 최악의 경우에도 예외 처리기를 통하여 시스템이 고장으로 발전하지 않도록 적절한 최종 값을 출력할 수 있음을 확인하였다.

그림 11은 그림 7과 같은 순간 및 간헐 결함 특성을 가지는 신호에서 결함값을 10%로 고정된 상태에서 결함률을 5%에서 15%까지 증가시켜 가면서 획득한 브레이크 페달 출력 신호로부터 계산된 평균값 보터, 중간값 보터와 Kalman hybrid redundancy의 IAE 성능 지수를 나타내고 있다[17]. 그림에서, 평균값 보터의 경우 결함률이 증가함에 따라 IAE 성능 지수가 급격하게 증가하며, 결함률이 15%일 때 IAE 성능 지수가 33.897임을 확인하였다. 또한, 중간값 보터의 경우에도 결함률이 증가함에 따라 IAE 값이 증가하며, 결함률이

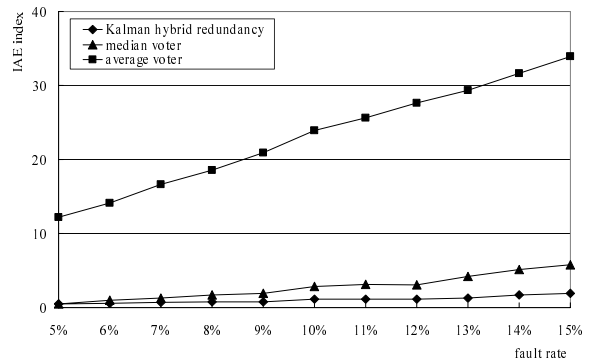


그림 11. 결함률을 변화시킨 경우 Kalman hybrid redundancy의 IAE 성능지수 결과.

Fig. 11. IAE performance index of brake pedal signal of Kalman hybrid redundancy for varying fault rate with a fault value of 10%.

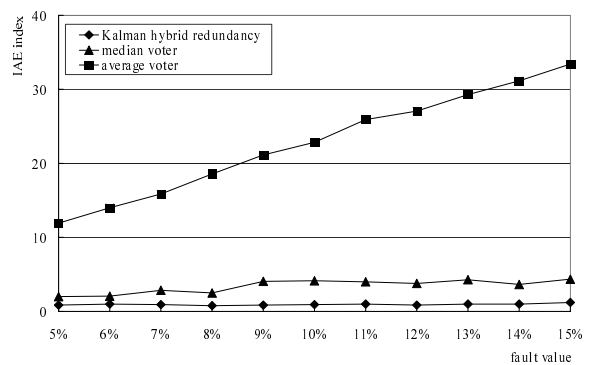


그림 12. 결함값을 변화시킨 경우 Kalman hybrid redundancy의 IAE 성능지수 결과.

Fig. 12. IAE performance index of brake pedal signal of Kalman hybrid redundancy for varying fault value with a fault rate of 10%

15%일 때 IAE 성능 지수가 8.524임을 확인하였다. 하지만, 제안된 Kalman hybrid redundancy는 결함률의 변화에 영향 없이 일정한 IAE 값을 가지며, 결함률이 15%일 때 IAE 성능 지수가 1.898로 평균값 보터나 중간값 보터에 비하여 상대적으로 낮음을 확인하였다. 즉, 평균값 보터나 중간값 보터의 경우, 결함률의 변화에 상당히 민감하게 반응하는 데 반하여 Kalman hybrid redundancy는 결함률이 변화하더라도 크게 영향을 받지 않고 일정한 성능을 가짐을 확인하였다. 또한, Kalman hybrid redundancy의 Kalman 예측기의 추정 성능 향상으로 인하여 우수한 결함 제거 성능을 가짐을 확인하였다.

그림 12는 결함률을 10%로 고정된 상태에서 결함값을 5%에서 15%까지 증가시켜 가면서 획득한 브레이크 페달 출력 신호로부터 계산된 평균값 보터, 중간값 보터와 Kalman hybrid redundancy의 IAE 성능 지수를 나타내고 있다[17]. 그림에서, 평균값 보터와 중간값 보터는 결함값이 15% 일 때 IAE 값이 각각 33.402와 4.338임을 확인하였다. 하지만, 제안된 Kalman hybrid redundancy는 결함값의 변화에 영향 없이 일정한 IAE 값을 가지며, 결함값이 15%일 때 IAE 성능지수가 1.226로 평균값 보터나 중간값 보터에 비하여 상대적으로 낮

음을 확인하였다.

그림 13과 그림 14는 그림 7과 같은 순간 및 간헐 결함 특성을 가지는 신호에서 결함값과 결함률을 변동시켜 획득한 브레이크 페달 출력 신호로부터 계산된 Kalman hybrid redundancy와 predictive hybrid redundancy의 IAE 성능 지수를 나타내고 있다. 그림 13에서, Kalman hybrid redundancy의 IAE 성능 지수는 predictive hybrid redundancy와 비교하여 최대 30%(9% 결함률)에서 최소 15%(8% 결함률)의 성능 향상을 보임을 확인하였다. 또한, 그림 14에서, Kalman hybrid redundancy의 IAE 성능 지수는 predictive hybrid redundancy와 비교하여 최대 30%(8% 결함값)에서 최소 7%(15% 결함값)의 성능 향상을 보임을 확인하였다.

이상의 결과로부터 제안한 Kalman hybrid redundancy는 일반적인 보팅 기법인 평균값 보터와 중간값 보터와 비교하여 상대적으로 우수함을 확인하였다. 또한, 예측기를 사용하는 predictive hybrid redundancy와 비교하여 Kalman hybrid redundancy는 시스템의 입력값의 특성에 영향을 받지 않는 우수한 추정 성능을 가짐을 확인하였다. 따라서, 요구되는 시스템의 결함 허용 성능이 높은 safety critical 시스템에는 Kalman hybrid

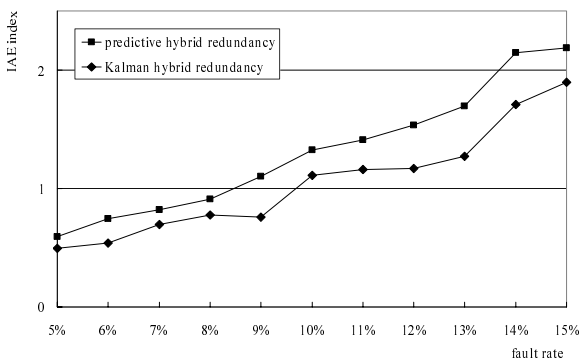


그림 13. 결함률을 변화시킨 경우 Kalman hybrid redundancy와 predictive hybrid redundancy의 IAE 성능지수 결과 비교.  
Fig. 13. Comparison of IAE performance index of Kalman hybrid redundancy and predictive hybrid redundancy for varying fault rate with a fault value of 10%.

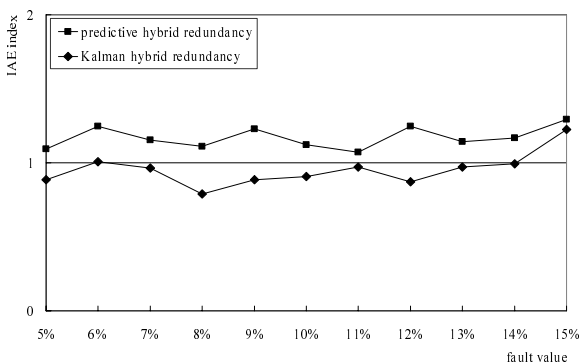


그림 14. 결함값을 변화시킨 경우 Kalman hybrid redundancy와 predictive hybrid redundancy의 IAE 성능지수 결과 비교.  
Fig. 14. Comparison of IAE performance index of Kalman hybrid redundancy and predictive hybrid redundancy for varying fault value with a fault rate of 10%.

redundancy를 적용하는 것이 적절함을 확인하였다.

## V. 결론

본 논문은 높은 신뢰성과 결함 허용 성능을 요구하는 safety critical 시스템의 결함 허용 방법으로 하이브리드 중복 구조의 Kalman hybrid redundancy를 제안하였다. 또한, Kalman hybrid redundancy를 구현하기 위하여 센서 입력값의 변화를 예측하는 Kalman 예측기의 설계 방법과 결함을 검출하는 결함 검출 알고리즘을 제안하였다. 마지막으로, 일반적인 보팅 기법인 중간값 보터와 평균값 보터와 본 논문에서 제안한 Kalman hybrid redundancy에 서로 상반되는 결함 특성을 가지는 결함 신호를 주입하여 성능을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 본 논문에서 제안한 Kalman hybrid redundancy는 일반적인 보팅 기법인 중간값 보터와 평균값 보터와 비교하여 상대적으로 우수한 결함 허용 성능을 가짐을 확인하였다. 특히, 순간 및 간헐 결함 특성을 가지는 결함 신호와 영구 결함 특성을 가지는 결함 신호를 함께 평가하여 서로 상반되는 결함 신호 특성에도 제안된 Kalman hybrid redundancy가 우수한 성능을 가짐을 확인하였다. 따라서, 제안된 Kalman hybrid redundancy는 기존의 방법에 비하여 높은 신뢰성을 가지는 중복 구조임을 확인하였다.

2) 본 논문에서 제안한 Kalman 예측기의 성능이 결함 허용 성능에 영향을 미치는 요인임을 확인하였다. 또한, Kalman 예측기는 추정과 보정 과정을 반복함에 따라 보다 우수한 추정 성능을 가질 수 있음을 확인하였다. 왜냐하면, Kalman 예측기는 추정과 보정을 반복적으로 수행하여 추정과 보정 횟수가 증가함에 따라 그 추정 정확도가 증가하기 때문이다. 따라서, 요구되는 결함 허용 성능이 높은 시스템의 경우에는 우수한 예측기를 가진 Kalman hybrid redundancy가 predictive hybrid redundancy보다 적절함을 확인하였다.

그러나, 본 논문에서는 시뮬레이션을 이용하여 Kalman hybrid redundancy의 성능을 검증하였기 때문에 실제 차량으로 구현하였을 경우에 발생할 수 있는 문제에 대한 고려를 하지 못하였다. 또한, 본 논문에서 사용된 결함 신호를 제외한 구현하지 못하는 다양한 형태의 결함 신호에 대한 충분한 검토와 함께 성능을 검증하는 연구가 필요하다. 마지막으로, 결함을 검출하는 결함 검출 알고리즘 및 Kalman 예측기의 성능을 좌우하는 변수 선정에 대한 다양한 연구도 필요하다.

## 참고문헌

- [1] 이경창, 김만호, 이석, “비전 기반 스마트 와이퍼 시스템을 위한 지능형 레인 센싱 알고리즘 개발,” 제어자동화 시스템공학 논문지, vol. 10, no. 7, pp. 649-657, 2004.
- [2] K. S. Yi and J. T. Chung, “Nonlinear Brake Control for vehicle CW/CA System”, *IEEE/ASME Transaction on Mechatronics*, vol. 6 no. 1, pp. 17-25, 2001.
- [3] 김만호, 손병점, 이석, 이경창, “분산형 실시간 제어 시스템을 위한 TTP 네트워크 시스템의 구현,” 제어자동화 시스템공학 논문지, vol. 13, no. 6, pp. 596-602, 2007.
- [4] R. Isermann, R. Schwarz and S. Stolz, “Fault-tolerant drive-by-wire systems,” *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 22, no. 5,



- pp. 64-81, 2002.
- [5] H. K. Sung, S. H. Lee and Z. Bien, "Design and implementation of a fault tolerant controller for EMS systems," *Mechatronics*, vol. 15, no. 10, pp. 1253-1272, 2005.
- [6] Jose Luis Garcia-Lapresta, "A general class of simple majority decision rules based on linguistic opinions," *Information sciences*, vol. 176, no. 4, pp. 352-365, 2006.
- [7] K. Goeva-Popstojanova and A. Grmarov, "N version programming with majority voting decision: Dependability modeling and evaluation," *Microprocessing and Microprogramming*, vol. 38, no. 1, pp. 811-818, 1993.
- [8] Latif Shabgahi, G. Bass and J. M. Bennett, "Efficient implementation of inexact majority and median voters," *Electronics Letters*, vol. 36, no. 15, pp. 1326-1328, 2000.
- [9] M. D. Krstic, M. K. Stojcev, G. Lj. Djordjevic and I. D. Andrejic, "A mid-value select voter," *Microelectronics and Reliability*, vol. 45, no. 3, pp. 733-738, 2005.
- [10] G. Levitin and A. Lisnianski, "Reliability optimization for weighted voting system," *Reliability engineering & system safety*, vol. 71, no. 2, pp. 131-138, 2001.
- [11] Gregory Levitin, "Weighted voting systems: reliability versus rapidity," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 89, no. 2, pp. 177-184, 2005.
- [12] G. R. Latif-Shabgahi, "A novel algorithm for weighted average voting used in fault tolerant computing systems," *Microprocessors and Microsystems*, vol. 28, no. 7, pp. 357-361, 2004.
- [13] Q. Long, M. Xie, S.H. Ng and Gregory Levitin, "Reliability analysis and optimization of weighted voting systems with continuous states input," *European Journal of Operational Research*, In Press, Corrected Proof, Available online 23, 2007.
- [14] G. L. Shabgahi, S. Bennett and J. M. Bass, "Smoothing voter: a novel algorithm for handling multiple errors in fault-tolerant control systems," *Microprocessors and Microsystems*, vol. 27, no. 7, pp. 303-313, 2003.
- [15] O. Rooksa, M. Armbrusterb, A. Sulzmann, G. Spiegelbergc and U. Kiencke, "Duo duplex drive-by-wire computer system," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 89, no. 1, pp. 71-80, 2005.
- [16] G. L. Shabgahi and A. J. Hirst, "A fuzzy voting scheme for hardware and software fault tolerant systems," *Fuzzy Set and Systems*, vol. 150, no. 3, pp. 579-598, 2005.
- [17] M. H. Kim, S. Lee and K. C. Lee, "Predictive hybrid redundancy using exponential smoothing method for safety critical systems," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 6, no. 1, pp. 126-134, 2008.
- [18] 박태호, 이형철, "센서 고장 시험을 위한 고장 인가장치 개발," 한국자동차공학회 2007년 추계학술대회논문집, pp. 1973-1979, 2007.
- [19] Olaf Moseler and Rolf Isermann, "Application of Model-Based Fault Detection to a Brushless DC Motor," *IEEE Transaction of Industrial Electronics*, vol. 47, no. 5, pp. 1015-1020, 2000.
- [20] H. K. Sung, S. H. Lee and Z. Bien, "Design and Implementation of a Fault Tolerant Controller for EMS Systems," *Mechatronics*, vol. 15, no. 10, pp. 1253-1272, 2005.
- [21] S. Wang and J. C. Sung, "Sensor-Fault Detection, Diagnosis and Estimation for Centrifugal Chiller Systems Using Principal-Component Analysis Method," *Applied Energy*, vol. 82, no. 3, pp. 197-213, 2005.
- [22] Kalman R. E., "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems," *Transaction of the ASME – Journal of Basic Engineering*, vol. 82(series D), pp. 35-45, 1960.
- [23] B. W. Johnson, *Design and Analysis of Fault-tolerant Digital Systems*, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [24] J. C. Laprie (ED), *Dependability: Basic Concepts and Terminology*, Springer, 1991.
- [25] V. P. Nelson and B. D. Carroll, "Fault tolerant computing (A tutorial)," *Presented at the AIAA Fault Tolerant Computing Workshop*, pp. 8-10, 1982.
- [26] J. C. Laprie (ED), *Dependability: Basic Concepts and Terminology*, Springer, 1991.
- [27] Mogens Blanke, Michel Kinnaert, Jan Lunze and Marcel Staroswiceki, *Diagnosis and Fault-tolerant Control*, Springer, 2006.
- [28] R. E. Kalman, "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems," *Transaction of the ASME – Journal of Basic Engineering*, vol. 82(series D), pp. 35-45, 1960.
- [29] G. Welch and G. Bishop, "An Introduction to the kalman filter," *University of North Carolina at Chapel Hill*, ACM Inc, 2001.
- [30] 정슬, "지능 제어," 충남대학교 출판부, 2005.
- [31] K. Astrom and T. Haqqlund, "PID Controller: Theory, design and tuning," *International Society for Masurement and Control*, 1995.