ISSN 1975-8359(Print) / ISSN 2287-4364(Online)
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 62, No. 7, pp. 994~1002, 2013
http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2013.62.7.994

원전 안전필수 계측제어시스템의 주기적 자동고장검출기능에 따른 고장허용 평가모델

The Fault Tolerant Evaluation Model due to the Periodic Automatic Fault Detection Function of the Safety-critical I&C Systems in the Nuclear Power Plants

허 섭† · 김 동 훈* · 최 종 균* · 김 창 회* · 이 동 영*
(Seop Hur · Dong-Hoon Kim · Jong-Gyun Choi · Chang-Hwoi Kim · Dong-Young Lee)

Abstract - This study suggests a generalized availability and safety evaluation model to evaluate the influences to the system's fault tolerant capabilities depending on automatic fault detection function such as the automatic periodic testings. The conventional evaluation model of automatic fault detection function deals only with the self diagnostics, and supposes that the fault detection coverage of self diagnostics is always constant. But all of the fault detection methods could be degraded. For example, the periodic surveillance test has the potential human errors or test equipment errors, the self diagnostics has the potential degradation of built-in logics, and the automatic periodic testing has the potential degradation of automatic test facilities. The suggested evaluation models have incorporated the loss or erroneous behaviors of the automatic fault detection methods. The availability and the safety of each module of the safety grade platform have been evaluated as they were applied the automatic periodic test methodology and the fault tolerant evaluation models. The availability and safety of the safety grade platform were improved when applied the automatic periodic testing. Especially the fault tolerant capability of the processor module with a weak self-diagnostics and the process parameter input modules were dramatically improved compared to the conventional cases. In addition, as a result of the safety evaluation of the digital reactor protection system, the system safety of the digital parts was improved about 4 times compared to the conventional cases.

Key Words : Safety critical system, Automatic periodic testings, Availability, Safety, Fault tolerant, Fault detection, Nuclear power plants

1. 서 론

원자력발전소는 공공의 안전성이 최우선 과제이기 때문에 대부분의 원전 계측제어시스템에 사용된 기술은 주로 아날로그 기반의 기술을 사용하였다. 그러나 아날로그 부품의 단종 및 IT 기술 도입의 필요성이 대두되면서 원자력 산업계에도 디지털 기술에 대한 필요성이 증대되면서 원전 계측제어 시스템에 전면적인 디지털 기술의 시대가 2000년대 이후에서야 열리기 시작하였다. 아날로그 기반의 안전필수시스템은 자동고장검출능력이 없어 인간에 의해 수동으로 수행하는 정기검사에 의해서만 고장이 탐지되었다. 정기검사는 원전 운영관점에서 매우 중요한 업무 중 하나이지만 모든 검사를 인간이 정해진 절차에 의해 수행함으로 막대한 경제적 비용은 물론 잠재적인 인적오류가 유발될 가능성이 있다.

안전필수시스템이 디지털화되면서 자동고장검출에 대한 관심이 증대하였고 이를 위해 자가진단기능이 대폭 강화되었다. 그러나 자가진단기능 만으로는 정기검사 요건[1]을 만족할 수 없어 기존 아날로그 방식에서 적용하였던 수동 정기검사 방식을 그대로 답습하고 있다. 안전필수시스템에 대한 정기검사를 한 달 또는 핵연료 교체시간을 주기로 실시하고 있다. 완전한 디지털 기술이 적용된 울진5,6호기 발전소보호계통은 많은 장점을 지님에도 불구하고 30일 주기를 갖는 정기검사 수행시간이 기존의 아날로그 방식을 사용한 울진3,4호기에 비해 약 6배 정도 더 소요되고 있다[2]. 이 결과 정기검사로 인해 발전소 운영시간의 약 25%는 한 채널을 우회시켜야 하는 불합리성이 존재함으로써 운영요원의 업무량이 폭주하여 경제적인 손해는 물론 인적행위 증가로 인한 인적오류가능성 증대와 다중성 손실시간 증대로 인한 시스템 불가용도가 증대됨으로써 발전소 안전성이 저하되는 결과를 초래하였다.

원자력 계에서는 이러한 문제를 해결하기 위한 방안을 찾기 위한 노력을 경주해왔다. 이 결과 수동개시 자동시험과 자동주기시험이 대표적으로 제시된 바 있다.[3] 수동개시 자동시험은 운영요원이 수동으로 개시하고 시험입력도 운영요원이 입력하는 방식으로서 시험 및 검사로 인한 안전필수기능의 영향을 배제할 수 없었기 때문으로서 이를 해결하고자 자동시험 동안에 시험채널을 우회시켜 안전필수논리 수행을 원천적으로 금지하는 개념이다. 따라서 수동개시 자동

† Corresponding Author : I&C/HF Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Korea
E-mail : shur@kaeri.re.kr
* I&C/HF Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Korea
Received : April 29, 2013; Accepted : June 5, 2013

시험은 정기검사 소요시간을 감소시키는데 큰 도움을 주지 못하고, 운영요원의 부담도 획기적으로 감소시키지 못하며, 시험에 따른 채널 우회시간도 감소시키기 힘든 것으로 나타나고 있다. 또한 자동 고장검출 측면에서도 기존의 수동개시자동시험은 고장검출 간격을 보장할 수 없어 정기검사의 수단으로만 이용될 뿐 시스템 정상운영 시에는 활용하지 않고 있다. 반면 Hur [2] 등에 의해 인간의 개입없이 안전필수 시스템 자체로 주기적인 자동시험에 의해 검사를 수행하는 반면 검사 시 다중도의 손실이 없고 타 논리수행에 방해를 주지 않도록 하는 보다 진보된 자동주기검사 개념이 제안되었다.

한편, 자동고장검출기능을 갖는 디지털 안전필수시스템의 신뢰도, 가용도 및 안전도 등 고장허용요소들에 대한 기존의 분석방법은 아날로그 기술에서 사용한 방법론을 답습하고 있는 실정이다. 이는 자동고장검출 설비 또는 회로 등에 대한 신뢰도가 완벽하다는 것을 전제로 한 개념으로서 현실적이지 않은 측면이 있다. 이를 개선하기 위해 자가진단기능의 고장 또는 기능저하요소를 고려하여 신뢰도 평가 모델을 제시한 연구가 존재하는데[4], 이 개념을 활용하여 모든 자동검출 기능에 대해 확장 적용할 필요가 있다.

본 논문은 고장허용능력 평가를 위해 원전에서의 자동고장검출기능의 취약성과 이를 평가모델에 반영한 종합적인 분석방법론을 제시하고, 이 중에서도 새롭게 제시된 자동주기검사에 의한 고장허용능력 향상효과를 실제 안전등급 플랫폼의 특성을 반영하여 평가하였다.

2. 원전 안전필수계측제어시스템의 자동고장검출 방법

2.1 자동 고장 검출 방법의 비교

원자력발전소 계측제어시스템 중 디지털화된 안전필수시스템에 적용되는 자동고장검출방법은 그림 1, 그림 2 및 그림 3에서 제시한 바와 같이 세 가지 범주로 나눌 수 있다. 첫째는 내장시험설비(built-in test facility)를 이용한 자가진단방법, 둘째 외부의 시험설비를 이용한 직접적 시험방법인 자동시험방법, 셋째 외부설비에서 다중화된 안전필수설비 또는 채널의 상태를 비교하여 이상이 있는 설비 또는 채널을 간접적으로 검출하는 상태비교방법이다.

자가진단 방법은 입출력카드의 루프백(loop back) 검사기능, 프로세서모듈의 메모리 점검기능, 응용프로그램 체크섬(checksum)기능, 통신모듈의 CRC (cyclic redundancy check) 점검기능 등 안전필수시스템을 구성하는 단위 모듈별로 자체의 내장설비 또는 논리에 의해 자체 진단하는 방법이다. 이 방법은 실시간성, 고장위치확인 용이 등의 장점을 갖는 반면, 자가진단이 갖는 신뢰도 문제와 하드웨어 진단 중심으로 인한 소프트웨어 논리 점검능력의 취약성 등이 존재한다. 자동시험은 자동시험설비로부터 생성된 시험입력이 안전필수논리 및 설비에 직접 입력되어 시험 예상값과 시험 출력값을 비교하는 방법이다. 이 방법은 시스템 단위 또는 기기 단위의 시험까지 모든 영역에 걸쳐 시험할 수 있고, 시험의 신뢰도가 높은 장점을 지니고 있으나 실시간 고장검출이 어렵고, 시험으로 인해 안전필수기능이 잠재적 영향을 받을 수 있는 단점이 존재한다. 상태비교기능은 외부의 자동화된 시험설비가 다중화된 안전필수 채널 또는 기기로부터 설정치, 공정치, 안전기능요구상태, 안전기능 작동상태 등 주요 안전필수논리 수행 결과를 각각 입력받아 상호 비교하여 잘못된 채널 또는 기기를 구별하는 방법이다. 이 방법은 실시간으로 수행되는 장점을 지니나 다중화 정도가 삼(3)중화 이상일 경우에만 올바른 비교가 가능하다. 또한 안전필수시스템의 안전작동요구 논리 등 정상 운영 시 발생 가능성이 낮은 과도상태를 점검하기 어려운 단점을 지닌다.

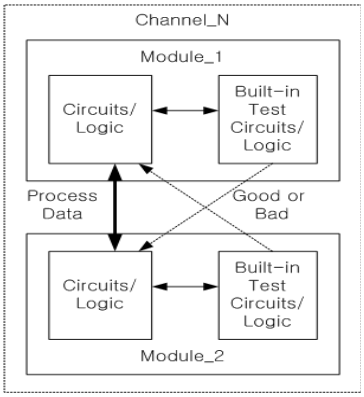

그림 1 자가진단 개념도

Fig. 1 Conceptual diagram of the self diagnostics

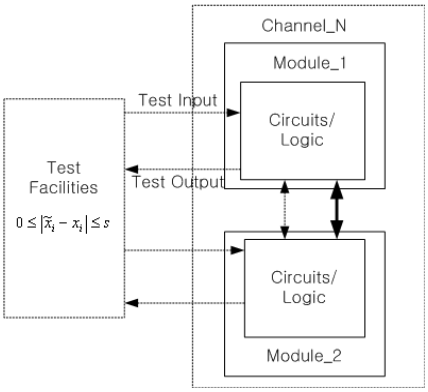

그림 2 자동시험 개념도

Fig. 2 Conceptual diagram of the Automatic Testing

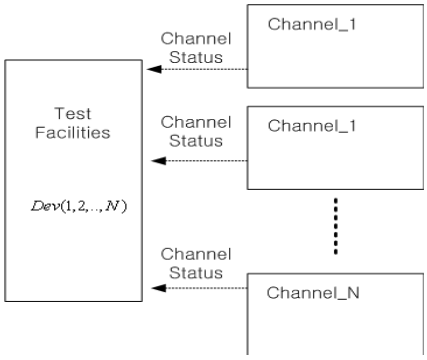

그림 3 자동시험 개념도

Fig. 3 Conceptual diagram of the Status Comparison

2.2 자동주기검사 개념

자동시험은 디지털화된 원전 안전필수 계측제어시스템의 고장허용능력을 향상시키기 위한 방법 중 하나로서 외부에서 자동시험입력을 제공하여 시스템 및 모듈의 기능을 점검하는 시험이다. 기존의 자동시험은 안전필수시스템 자체의 고유기능 수행 시 외부로 부터의 간섭을 배제시키기 위하여 시험되는 채널을 원천적으로 안전필수기능에 참여시키지 않도록 하는 우회 상태에서만 시험이 가능하도록 하였다. 이것은 시스템 다중도의 손실을 가져오는 결과를 초래한다. 이러한 자동시험을 수동개시 자동시험이라 하는데, 이 시험으로는 정기검사 시 외에는 주기적으로 활용할 수 없다는 단점을 지닌다.

이러한 기술적 한계를 극복하기 위해 자동주기시험 방법이 제안된 바 있다.[2] 이 검사방법은 인간의 개입없이 안전필수시스템 자체로 주기적인 자동시험에 의해 검사를 수행하는 개념을 가지며 검사 시 다중도의 손실을 발생시키지 않음과 동시에 검사 동안에도 외부의 시험입력과 시험수행 논리로 인해 발생 가능한 안전필수 고유논리수행의 영향을 원천적으로 배제시킨 보다 진보된 자동시험 개념이다. 이 시험방법에서 시험범위 및 시험신호 통과 경로는 자체는 기존의 시험 방식과 동일하나, 시험채널의 우회를 필요로 하지 않고, 고장검출주기를 유연하게 조정할 수 있으며, 시험시간을 획기적으로 단축시킬 수 있는 장점을 지닌다. 이를 통해 얻을 수 있는 장점으로는 고장검출간격 감소를 통한 고장검출능력을 향상시키고 시험채널의 우회 불필요로 우회시간을 단축시킬 수 있으며 시험시간 및 인적오류를 저감시킬 수 있는 것으로 보고되고 있다.

자동주기시험의 목적은 두 가지로 요약되는데, 하나는 원전 안전필수시스템에 대한 정기검사(periodic surveillance testing) 요건을 만족하는 수단으로 활용하고자 함이고, 다른 하나는 주기적 검사를 통해 조기 고장검출을 함으로써 시스템의 가용성과 안전성을 향상시키고자 함이다. 본 논문에서는 자동주기시험을 조기고장 검출을 위해 사용하는 경우 특히 자동주기검사 기능에 초점을 맞추어 분석한다.

3. 주기적 자동고장검출기능을 반영한 고장허용 분석 모델

3.1 기존 고장허용 분석모델

기존의 분석모델에는 자동고장검출기능에 자가진단기능만을 반영하였을 뿐 자동주기검사기능은 반영하지 않았다. 또한 자동고장검출기능이 언제나 건전한 것을 전제로 삼았기 때문에 각 고장검사 수단에 의한 고장검출영역은 시간에 따라 불변하며 상호 상관성도 없는 것으로 가정하였다. 안전필수시스템은 아날로그 기반 시스템과 디지털 기반시스템에 따라 고장검출방법에서 약간의 차이를 지니나 각 고장검출 수단의 능력은 불변이라는 기본 가정은 동일하다. 표 1은 기존 모델에 사용된 고장허용 분석모델에 사용한 기본 자료이며, 그림 4는 아날로그 시스템과 디지털 시스템의 분석에 사용한 기존의 모듈 고장상태도를 나타낸다. 여기에서 SN, SD_OP, SD_SD, 및 SID_SD는 각각 모듈의 정상상태, 정기검사에 의해 모듈고장이 검출된 상태, 자가진단에 의해 모듈고장이 검출된 상태, 그리고 자가진단기능의 오동작으로 인해 모듈의 거짓고장이 검출된 상태를 나타낸다. $\lambda_{A'}$, $\lambda_{B'}$, λ_{OP} 및 $\lambda_{ID/SD}$는 각각 정기검사로만 검출할 수 있는 고장검출확률, 자가진단에 의해 검출할 수 있는 고장검출확률, 정기검사에 의해 검출할 수 있는 고장검출확률, 그리고 자가진단의 오동작으로 인한 거짓고장확률을 나타내고, T_{sch}과 τ은 각각 정기검사주기 및 고장검출 후 수리소요시간을 나타

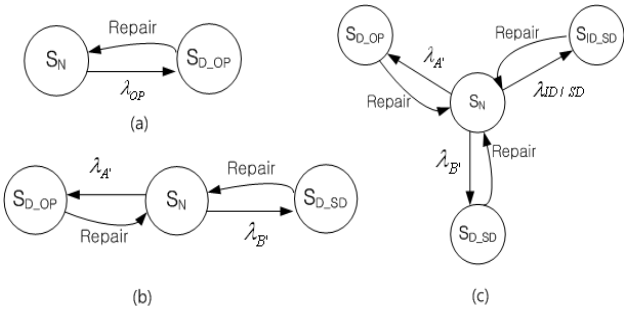

그림 4 기존 모델에서 고려한 안전필수시스템의 모듈 고장상태도

Fig. 4 Conventional Module failure state diagrams of safety critical systems

표 1 기존모델에서의 안전필수시스템 모듈 고장정의 및 특징

Table 1 Fault classification and features in the conventional models of safety critical systems

고장집합	정의	고장률	검출수단	검출주기	복구수단 및 시간
A'	정기검사에 의해서만 검출가능한 고장집합	$\lambda_{A'}$	정기검사	정기검사 주기 (T_{sch})	수동수리, τ
B'	자가진단에 의해 검출가능한 고장집합	$\lambda_{B'}$	자가진단	실시간	수동수리, τ

표 2 기존모델에서의 가용도 및 안전도 모델

Table 2 Conventional availability and safety models

Case	(a)	(b)	(c)
설명	아날로그 기반	강인한 자가진단 기능 고려	자가진단 기능의 오동작 고려
불가용도	$\lambda_{OP}t$ $(t_0 \le t \le T_{sch})$	$\lambda_{A'}t_1+\lambda_{B'}t_2$ $(t_0 \le t_1 \le T_{sch})$, $(t_0 \le t_2 \le \tau)$	$\lambda_{A'}t_1-(\lambda_{B'}+\lambda_{ID/SD})t_2$ $(t_0 \le t_1 \le T_{sch})$ $(t_0 \le t_2 \le \tau)$
평균불가용도	$\frac{1}{2}\lambda_{OP}T_{sch}$	$\lambda_{B'}\tau+\frac{1}{2}\lambda_{A'}T_{sch}$	$(\lambda_{B'}+\lambda_{ID/SD})\tau$ $+\frac{1}{2}\lambda_{A'}T_{sch}$
불안전도	$\lambda_{OP}t$ $(t_0 \le t \le T_{sch})$	$\lambda_{A'}t_1$ $(t_0 \le t_1 \le T_{sch})$	$\lambda_{A'}t_1$ $(t_0 \le t_1 \le T_{sch})$
평균불안전도	$\frac{1}{2}\lambda_{OP}T_{sch}$	$\frac{1}{2}\lambda_{A'}T_{sch}$	$\frac{1}{2}\lambda_{A'}T_{sch}$

낸다.

그림 4에서 (a)는 고장검출수단이 정기검사만을 갖는 아날로그 기반 안전필수시스템, (b) 및 (c)는 정기검사 외에도 자가진단기능을 갖는 디지털 기반 안전필수시스템의 모듈 고장상태도를 나타낸다. 그림 (b)의 경우 자가진단기능은 주어진 고장검출 성능한계 내에서 완벽한 기능을 수행한다고 가정한 것이며, (c)의 경우에는 자가진단 기능이 오동작하여 거짓고장을 발생시키는 경우를 가정하고 있다. 이들 각각에 대해 안전필수시스템 모듈의 불가용도 및 불안전도 계산 모델을 표 2에 나타내었다. 여기에서 아날로그 기반 시스템은 $\lambda_{OP}=\lambda_{A'}$ 관계를 갖고 디지털 기반 시스템에서는 $\lambda_{OP}=\lambda_{A'}+\lambda_{B'}$의 관계를 가진다.

3.2 주기적 자동고장검출을 고려한 고장허용분석 모델

기존의 분석모델은 각각의 고장검출수단이 항상 건전한 것을 전제로 하고 있지만 실제로 모든 고장검출수단은 기능저하 또는 상실요소가 존재한다. 따라서 보다 현실적이고 보수적인 고장허용분석모델을 정립하기 위해서는 고장검출수단의 기능저하요소를 반영하고 자동주기검사기능을 반영할 필요가 있다.

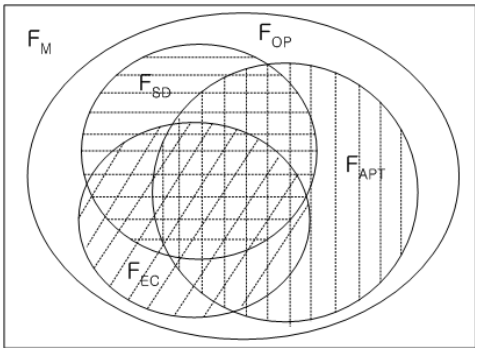

그림 5 안전필수시스템의 고장집합
Fig. 5 Failure set of safety critical systems

그림 5는 안전필수기능을 수행하는 시스템 또는 모듈의 고장 종류 및 관계를 도시화한 것이다. 모듈의 전체 고장을 전체집합(FM)이라고 하면, 모듈교체 시까지 검출되지 않는 고장집합(A)과 검출 가능한 고장집합으로 분류할 수 있다. 검출 가능한 고장을 분류하면 정기검사 시 수동검사에 의해 검출되는 고장집합(FOP), 자동주기시험에 의해 검출되는 고장집합(FAPT), 실시간으로 수행되는 자가진단에 의해 검출되는 고장집합(FSD), 그리고 외부의 설비에 의해 다중설비의 상태를 상호 비교함으로써 검출되는 고장집합(FEC)이 존재한다. 그림에서 보는 바와 같이 각각의 고장검출방법은 상호 중첩되는 경우가 존재하는데, 이 경우 가장 효율적인 방법에 의해 고장검출 방법을 결정한다. 각 영역에 대한 관계식은 아래와 같으며 이들에 대한 정의, 고장률, 검출수단 등을 표 3에 제시하였다.

$$
\begin{aligned}
A &= F_M - F_{OP},\\
B &= F_{OP} - (F_{APT} \cup F_{SD} \cup F_{EC}),\\
C &= F_{SD} - ((F_{APT} \cap F_{SD}) \cup (F_{SD} \cap F_{EC})),\\
D &= F_{SD} - ((F_{APT} \cap F_{SD}) \cup (F_{APT} \cap F_{EC})),\\
E &= F_{EC} - ((F_{EC} \cap F_{SD}) \cup (F_{APT} \cap F_{EC})),\\
F &= (F_{APT} \cap F_{SD}) - (F_{APT} \cap F_{SD} \cap F_{EC}),\\
G &= (F_{APT} \cap F_{EC}) - (F_{APT} \cap F_{SD} \cap F_{EC}),\\
H &= (F_{SD} \cap F_{EC}) - (F_{APT} \cap F_{SD} \cap F_{EC}),\\
I &= F_{APT} \cap F_{SD} \cap F_{EC}
\end{aligned} \tag{1}
$$

표 3 제안모델에서의 고장집합 분류 및 검출수단
Table 3 Fault set classification and fault detection method in the proposed model

고장집합	고장률	검출수단	검출주기	복구수단
F_M: 모듈의 발생 가능한 모든 고장집합	λ_M	해당없음	해당없음	해당없음
A: 검출 불가능한 고장집합	$\lambda_A(t)$	없음	해당없음	교체
B: 수동검사에 의해서만 검출가능한 고장집합	$\lambda_B(t)$	정기검사	주기기능시험 또는 핵연료 교체주기	수동 수리
C: 수동검사외에 자가진단만으로 검출가능한 고장집합	$\lambda_C(t)$	자가진단	실시간	수동 수리
D: 수동검사외에 자동주기시험만으로 검출 가능한 고장집합	$\lambda_D(t)$	자동주기시험	설정주기에 따름	수동 수리
E: 수동검사외에 상태비교기능만으로 검출가능한 고장집합	$\lambda_E(t)$	상태비교기능	실시간	수동 수리
F: 자가진단과 자동주기시험으로 동시에 검출가능한 고장집합	$\lambda_F(t)$	자가진단	실시간	수동 수리
G: 상태비교기능과 자동주기시험으로 동시에 검출가능한 고장집합	$\lambda_G(t)$	자동주기시험	설정주기	수동 수리
H: 상태비교기능과 자가진단으로 동시에 검출가능한 고장집합	$\lambda_H(t)$	자가진단	실시간	수동 수리
I: 모든 고장검출수단으로 검출가능한 고장집합	$\lambda_I(t)$	자가진단	실시간	수동 수리

모듈이 갖는 고유의 고장률은 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$
\begin{aligned}
\lambda_M = {} & \lambda_A(t)+\lambda_B(t)+\lambda_C(t)+\lambda_D(t)+\lambda_E(t)+\lambda_F(t)\\
& +\lambda_G(t)+\lambda_H(t)+\lambda_I(t)
\end{aligned} \tag{2}
$$

정기검사에 의한 고장검출률 $\lambda_{OP}(t)$ 는 $\lambda_M-\lambda_A(t)$ 로서 영구고장을 제외한 모든 고장이 검출가능하다. 자동주기시험에 의한 고장검출률 $\lambda_{AT}(t)$는 $\lambda_D(t)+\lambda_F(t)+\lambda_G(t)+\lambda_I(t)$,

자가진단의 고장검출률 $\lambda_{SD}(t)$는 $\lambda_C(t)+\lambda_F(t)+\lambda_H(t)+\lambda_I(t)$, 상태비교의 고장검출률 $\lambda_{EC}(t)$는 $\lambda_E(t)+\lambda_G(t)+\lambda_H(t)+\lambda_I(t)$이다. 하나의 고장을 검출함에 있어 여러 가지 고장검출수단이 활용될 수 있지만 가장 효율적인 수단만을 사용한다. 이에 대한 우선순위는 자가진단, 자동주기시험, 상태비교, 정기검사의 순이다. 이를 반영하여 각 집합에 대한 고장검출수단 및 고장복구 수단을 정의하면 표 4와 같다.

그림 6은 제안 모듈 고장 상태도로서 해당 모듈이 정상상태 (S_N) 에서 천이될 수 있는 상태는 검출 불가능한 고장이 발생한 상태 (S_{UD}), 정기검사를 통해 고장이 검출된 상태 (S_{D_OP}), 자가진단을 통해 고장이 검출된 상태 (S_{D_SD}), 자동주기시험을 통해 고장이 검출된 상태 (S_{D_AT}), 외부에서 상태 비교를 통해 고장이 검출된 상태 (S_{D_EC}), 모듈은 정상적으로 작동하나 거짓고장이 발생한 상태 (S_{ID})이다. 거짓고장을 발생시키는 상태는 각각의 고장검출수단의 오작동에 기인되는 바 각 고장검출 수단별로 하나의 상태씩 존재한다. S_{ID_OP}은 정기검사시 발생 가능한 거짓고장상태, S_{ID_SD}는 자가진단시 발생 가능한 거짓고장상태, S_{ID_AT}는 자동주기시험시 발생 가능한 거짓고장상태, S_{ID_EC}는 외부의 상태비교시 발생 가능한 거짓고장상태이다. 또한 각각의 고장검출기능은 인적고장 또는 검출설비의 고장에 의해 고장검출기능이 불가한 상태가 될 수 있다. S_{UOP}는 정기검사 행위의 신뢰도 저하에 따른 고장검출 불가상태이며, S_{USD} 는 자가진단 기능의 고장에 따른 고장검출 불가상태, S_{UAT} 는 자동주기시험기능의 고장에 따른 고장검출 불가상태, S_{UEC} 는 상태비교기능의 고장에 따른 고장검출 불가상태를 나타낸다. 이들의 고장상태는 검출기능의 저하요소로 작용함으로써 특정한 상태로 천이할 확률에 변화를 주게 된다. 이러한 변화는 연쇄적으로 모듈이 S_{UD} 상태로 천이할 확률도 변하도록 작용하여 λ_A 도 시간에 따른 함수가 된다. 결국 고장검출기능의 신뢰도 저하에 따라 특정 상태의 천이 확률이 변화되고, 이는 연쇄적으로 타 상태에도 영향을 주게 된다. 표 5는 각각의 상태에 대한 정의와 상태로 천이할 고장확률을 나타낸다.

표 4 제안모델에서의 고장검출영역 및 고장률
Table 4 Fault detection coverage in the proposed model

검출수단	검출영역	고장검출에 의해 복구되는 고장률	검출수단 고장시 대체수단
정기검사	B	$\lambda_B(t)$	없음
자동주기시험	$D \cup G$	$\lambda_D(t)+\lambda_G(t)$	정기검사
자가진단	$C \cup F \cup H \cup I$	$\lambda_C(t)+\lambda_F(t)+\lambda_H(t)+\lambda_I(t)$	자동주기시험 (F, I) 정기검사(C, H)
상태비교	E	$\lambda_E(t)$	정기검사

모듈의 총 고장률 (λ_T)은 모듈의 고유 고장률(λ_M)과 각 고장검출수단의 오동작으로 인해 발생하는 거짓고장률 ($\sum_{i=1}^{n}\lambda_{ID_i}$)을 합한 것이다. 또한 표 4에서 제시한 바와 같이 고장검출수단이 상실될 경우에는 다른 검출수단으로 고장을 검출할 수 있으며, 이에 따라 각각의 고장률은 상관관계를 가지므로 그 값이 변한다. 따라서 식 2는 거짓고장 요소와 검출수단 상실에 따라 다음과 같이 시간의 함수로 표현할 수 있다. 여기에서 $\lambda_{UDT}(t)$는 검출 불가능한 영구고장률, $\lambda_{DT}(t)$는 검출 가능한 고장률이다.

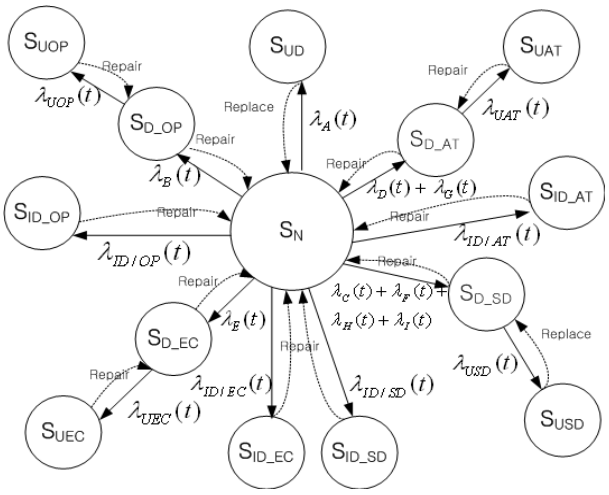

그림 6 제안모델 모듈 고장 상태도
Fig. 6 Module failure state diagram in the proposed model

$$\lambda_T = \lambda_M + \sum_{i=1}^{n}\lambda_{ID_i} = \lambda_{UDT}(t)+\lambda_{DT}(t)+\sum_{i=1}^{n}\lambda_{ID_i}$$
$$= \lambda_A(t)+\lambda_B(t)+\lambda_C(t)+\lambda_D(t)+\lambda_E(t)+\lambda_F(t)+\lambda_G(t)+$$
$$\lambda_H(t)+\lambda_I(t)+\lambda_{ID/OP}(t)+\lambda_{ID/AT}(t)+\lambda_{ID/SD}(t)+\lambda_{ID/EC}(t) \quad (3)$$

고장검출수단에 의해 검출되는 고장률, $\lambda_{DT}(t)$는 아래 식과 같다. 여기에서 $R_{DT}(t)$는 고장검출수단의 신뢰도이다.

$$\lambda_{DT}(t) = R_{DT}(t)\lambda_{DT}(0) \quad (4)$$

모듈이 갖는 고유 고장률은 일정하므로 식 (3)에 의해 검출 불가능한 영구 고장 확률 $\lambda_{UDT}(t)$도 증가한다.

$$\lambda_{UDT}(t) = \lambda_{UDT}(0)+\lambda_{DT}(0)(1-R_{DT}(t)) \quad (5)$$

표 4에 나타낸 바와 같이 어느 한 고장검출방법이 고장나면 다른 대체 고장검출방법에 의해 고장을 검출하게 되는데 이러한 인자를 반영하여 각 영역에 대한 고장 검출률을 구하면 다음과 같다.

$$\lambda_A(t_a) = \lambda_A(0)+(\lambda_B(0)-\lambda_B(t_a) \quad (6)$$

$$\lambda_B(t_b,t_c,t_d,t_e) = \lambda_B(0)R_{OP}(t_b)+((\lambda_C(0)+\lambda_H(0))$$
$$-(\lambda_C(t)+\lambda_H(t_c)))+(\lambda_D(0)-\lambda_D(t_d))+(\lambda_E(0)-\lambda_E(t_e)) \quad (7)$$

$$\lambda_C(t_f) = \lambda_C(0)R_{SD}(t_f) \quad (8)$$

$$\lambda_D(t_g,t_h) = \lambda_D(0)R_{AT}(t_g)+((\lambda_F(0)+\lambda_I(0))-(\lambda_F(t_h)+\lambda_I(t_h))) \quad (9)$$

$$\lambda_E(t_i) = \lambda_E(0)R_{EC}(t_i) \quad (10)$$

위 식에서 $t_a, t_b, t_c, t_d, t_e, t_f, t_g, t_h$ 및 t_i은 각각 각 고장검출방법별 검출시간, 수리시간, 교체시간 등에 의존하는 변수이다. 모듈의 총 불가용도는 정기검사에 의해서만 검출된 고장에 의한 불가용도, $Q_{A,M,B}(t)$, 자가진단에 의해 검출된 고장에 의한 불가용도, $Q_{S,M,CFHI}(t)$, 자동주기시험에 의해 검출된 고장에 의한 불가용도, $Q_{A,M,DG}(t)$, 상태비교 만으로 검출된 고장에 의한 불가용도, $Q_{A,M,E}(t)$, 영구고장에 의한 불가용도, $Q_{S,M,A}(t)$, 그리고 각 검출방법의 이상으로 인한 거짓 검출된 고장에 의한 불가용도, $Q_{A,M,ID}(t)$를 합한 것으로 이를 표현하면 식 11과 같다.

표 5 제안모델의 상태정의 및 이에 부합하는 고장률

Table 5 State definition and fault rate of each state in the proposed model

상태	정의	고장률
S_N	모듈 정상상태	해당 없음
S_{UD}	검출 불가능한 고장이 발생한 상태	$\lambda_A(t)$
S_{D-OP}	정기검사에 의해서만 고장이 검출된 상태	$\lambda_B(t)$
S_{D-SD}	자가진단을 통해 고장이 검출된 상태	$\lambda_C(t)+\lambda_F(t)+\lambda_H(t)+\lambda_I(t)$
S_{D-AT}	자동주기시험을 통해 고장이 검출된 상태	$\lambda_D(t)+\lambda_G(t)$
S_{D-EC}	상태 비교를 통해 고장이 검출된 상태	$\lambda_E(t)$
S_{ID-OP}	정기검사시 발생 가능한 거짓고장상태	$\lambda_{ID/OP}$
S_{ID-AT}	자동주기시험시 발생가능한 거짓고장상태	$\lambda_{ID/AT}$
S_{ID-SD}	자가진단시 발생가능한 거짓고장상태	$\lambda_{ID/SD}$
S_{ID-EC}	상태비교시 발생가능한 거짓고장상태	$\lambda_{ID/EC}$
S_{UOP}	정기검사 행위의 신뢰도 저하에 따른 고장검출 불가상태	λ_{UOP}
S_{UAT}	자동주기시험기능의 고장에 따른 고장검출 불가상태	λ_{UAT}
S_{USD}	자가진단기능의 고장에 따른 고장검출 불가상태	λ_{USD}
S_{UEC}	상태비교기능의 고장에 따른 고장검출 불가상태	λ_{UEC}

$$Q_{A,M}(t)=Q_{A,M,A}(t)+Q_{A,M,B}(t)+Q_{A,M,CFHI}(t)+Q_{A,M,DG}(t)+Q_{A,M,E}(t)+\sum_{i=0}^{n}Q_{A,M,ID_i}(t) \quad (11)$$

$$Q_{A,M,A}(t_1,t_2,t_4)=1-\exp(-(\lambda_A(0)+\lambda_B(0)(1-e^{-\lambda_{UOP}(t_1+t_4)}))(t_2+t_4))$$

$$Q_{A,M,B}(t_1,t_2,t_3,t_4)=1-\exp(-(\lambda_B(0)e^{-\lambda_{UOP}(t_1+t_4)}+(\lambda_C(0)+\lambda_H(0))(1-e^{-\lambda_{USD}(t_2+t_4)})+\lambda_D(0)(1-e^{-\lambda_{UAT}(t_3+t_4)})+\lambda_E(0)(1-e^{-\lambda_{UEC}(t_3+t_4)}))(t_3+t_4))$$

$$Q_{A,M,DG}(t_2,t_3,t_4,t_5)=1-\exp(-((\lambda_D(0)+\lambda_G(0))e^{-\lambda_{UAT}(t_3+t_4)}+(\lambda_F(0)+\lambda_I(0))(1-e^{-\lambda_{USD}(t_2+t_4)}))(t_4+t_5)$$

$$Q_{A,M,CFHI}(t_2,t_4)=1-\exp(-(\lambda_C(0)+\lambda_F(0)+\lambda_H(0)+\lambda_I(0))e^{-\lambda_{USD}t_2}t_4)$$

$$Q_{A,M,E}(t_3,t_4)=1-\exp(-\lambda_E(0)e^{-\lambda_{UEC}t_3}t_4)$$

$$Q_{A,M,ID}(t)=\sum_{i=0}^{n}Q_{M,ID_i}(t_1,t_4,t_5)=4-(e^{-\lambda_{ID/OP}(t_1+t_4)}+e^{-\lambda_{ID/SD}(t_4+t_5)}+e^{-\lambda_{ID/AT}t_4}+e^{-\lambda_{ID/EC}t_4})$$

위 식에서 t_1는 핵연료 교체주기, T_{refuel} 까지의 시간구간이며, T_{refuel} 주기로 일부 모듈의 교정 및 자동주기검사 설비 점검 등을 수행함으로 관련 고장률은 모두 초기화 된다. t_2는 모듈의 교체 주기, T_{sch}까지의 시간구간이고 t_3는 안전필수시스템의 정기검사 주기, T_{sch} 까지의 시간구간이며, t_4는 고장이 검출된 후 고장이 수리되어 재가동되기까지의 보수시간, τ이고, t_4는 자동주기검사의 검사주기, T_{apt} 까지의 시간구간이다.

각각의 시간 인자는 고장검출기능에 영향을 준다. 예를 들어 자가진단기능에 의한 고장검출은 실시간으로 이루어지고, 고장복구 소요시간은 τ이므로 총 τ 시간 후에 발견된 고장은 초기화된다. 그러나 자가진단기능이 상실될 경우 이에 대한 복구는 부품교체주기인 T_{rep}시간 후에나 가능하므로 이에 따라 고장검출능력은 지속적으로 하락하게 된다. 자동주기시험의 경우 발견된 고장이 복구되기까지의 시간은 $T_{apt}+\tau$ 이다.

모듈의 평균 불가용도는 다음과 같이 표현되는데, 여기에서 θ는 시간변수이며 고장의 종류에 따라 적분구간이 다양하게 나타나는데 (θ)는 이를 표현한 것으로서 상기에서 설명한 시간인자 정의 및 설정된 주기를 따른다.

$$q_{A,M}=\frac{\int_0^{(\theta)}Q_{A,M}(t)dt}{(\theta)} \quad (12)$$

모듈의 고장률이 충분히 작고 수리 또는 교체시간이 발전소 수명보다 충분히 작다고 가정하면 식 11은 선형적으로 근사화화 할 수 있다. 각각의 고장검출방법에 대해 식 12를 적용하여 모듈 전체의 평균 불가용도 $(q_{A,M})$ 를 구하면 아래 식 13이 도출된다. 여기에서 첫째 줄에 포함된 모든 항은 기존의 해석 모델과 동일한 형태를 보이며, 나머지 항들은 고장검출수단의 신뢰도와 관련되는 항과 거짓 고장이 반영된 결과이다.

$$\begin{aligned}q_{A,M}&=q_{A,M,A}+q_{A,M,B}+q_{A,M,CFHI}+q_{A,M,DG}+q_{A,M,E}+\sum_{i=0}^{n}q_{A,M,ID_i}\\&\cong(\lambda_C(0)+\lambda_F(0)+\lambda_H(0)+\lambda_I(0)+\lambda_E(0)+\lambda_{ID/SD}+\lambda_{ID/EC})\tau\\&\quad+\frac{1}{2}\lambda_A(0)T_{rep}+\frac{1}{2}\lambda_B(0)T_{sch}+\frac{1}{2}(\lambda_D(0)+\lambda_G(0))(T_{apt}+\tau)\\&\quad+\frac{1}{3}\lambda_B(0)\lambda_{UOP}T_{refuel}(T_{rep}-T_{sch})\\&\quad+\frac{1}{3}(\lambda_D(0)+\lambda_G(0))\lambda_{UAT}T_{sch}(T_{sch}-(T_{apt}+\tau))\\&\quad+\frac{1}{3}(\lambda_C(0)+\lambda_H(0))\lambda_{USD}T_{rep}T_{sch}\\&\quad+\frac{1}{3}(\lambda_F(0)+\lambda_I(0))\lambda_{USD}T_{rep}((T_{apt}+\tau)-T_{sch})\\&\quad+\frac{1}{3}\lambda_E(0)\lambda_{UEC}\tau T_{sch}+\frac{1}{2}\lambda_{ID/OP}T_{refuel}\end{aligned} \quad (13)$$

고장안전개념을 적용한 시스템은 자가진단에 의해 고장이 검출되면 시스템이 이를 인지하여 자동으로 안전한 방향으로 제어함으로써 고장이 모듈의 안전성에 영향을 주지 않는다. 예를 들어 원자로보호계통에서 자가진단을 통해 특정모듈의 이상이 있다고 검출하는 경우 채널 내에서 원자로를 정지시키는 방향으로 출력시킴으로 원자로를 안전하게 정지시킬 수 있다. 그러나 자동주기시험이나 상태비교기능, 정기점검에 의한 수동검사에 의해 고장이 발견되더라도 안전필수설비는 이를 인지하지 못하여 자동조치를 취할 수 없다. 그러므로 이러한 고장은 시스템 안전성에 영향을 준다. 고장검출수단에 의한 거짓 고장검출은 안전기능과는 무관하므로 안전성에는 영향이 없다. 고장안전개념을 적용한 안전필수시스템의 모듈 평균 불안전도를 표현하면 아래 식 14와 같다.

$$
\begin{aligned}
q_{S,M,fs} \cong\ & \lambda_E(0)\tau + \frac{1}{2}\lambda_A(0)\,T_{rep} + \frac{1}{2}\lambda_B(0)\,T_{sch} + \frac{1}{2}(\lambda_D(0) \\
& + \lambda_G(0))(T_{apt}+\tau) + \frac{1}{3}\lambda_B(0)\lambda_{UOP}T_{refuel}(T_{rep}-T_{sch}) \\
& + \frac{1}{3}(\lambda_D(0)+\lambda_G(0))\lambda_{UAT}T_{sch}(T_{sch}-(T_{apt}+\tau)) \\
& + \frac{1}{3}(\lambda_C(0)+\lambda_H(0))\lambda_{USD}T_{rep}T_{sch} \\
& + \frac{1}{3}(\lambda_F(0)+\lambda_I(0))\lambda_{USD}T_{rep}((T_{apt}+\tau)-T_{sch}) \\
& + \frac{1}{3}\lambda_E(0)\lambda_{UEC}\tau T_{sch}
\end{aligned}
\tag{14}
$$

4. 원자력 안전등급 플랫폼에의 적용

4.1 분석모델 및 입력 데이터

제 3 장에서 제시한 일반화 분석모델을 국산화한 원자력 안전등급 플랫폼[6]의 각 모듈에 대해 적용하여 기본의 결과에 비교분석한다. 자동고장검출기능은 새롭게 제시된 자동주기검사기능과 자가진단기능으로만 국한하며, 자동고장 검출기능의 시간에 따른 저하 요소도 반영한다. 이를 표현하는 모듈의 상태도는 그림 7과 같다. 식 11로 부터 상기의 모듈 상태도에 부합하는 모듈의 불가용도는 구하면 다음과 같다.

$$
\begin{aligned}
Q_{A,M}(t) &= Q_{A,M,B}(t) + Q_{A,M,CF}(t) + Q_{A,M,D}(t) \\
&\quad + Q_{A,M,ID/AT}(t) + Q_{A,M,ID/AT}(t) \\
&= (1-\exp(-(\lambda_B(0)+\lambda_C(0)(1-e^{-\lambda_{USD}t_2})+\lambda_D(0)(1-e^{-\lambda_{UAT}t_3}))) \\
&+ (1-\exp(-(\lambda_D(0)e^{-\lambda_{UAT}t_3}+\lambda_F(0)(1-e^{-\lambda_{USD}t_2}))(t_5+t_4))) \\
&+ (1-\exp(-\lambda_C(0)e^{-\lambda_{USD}t_2}t_4))) \\
&\quad + (1-e^{-\lambda_{ID/SD}t_4}) + (1-e^{-\lambda_{ID/AT}(t_4+t_5)})
\end{aligned}
\tag{15}
$$

상기로부터 모듈의 평균 불가용도와 불안전도를 구하면 식 (16)과 (17)로 각각 나타난다.

$$
\begin{aligned}
q_{A,M} \cong\ & \lambda_C(0)\tau + \frac{1}{2}\lambda_B(0)\,T_{sch} + \frac{1}{2}\lambda_D(0)(T_{apt}+\tau) \\
& + \frac{1}{3}\lambda_D(0)\lambda_{UAT}T_{sch}(T_{sch}-(T_{apt}+\tau)) + \frac{1}{3}\lambda_C(0)\lambda_{USD}T_{rep}T_{sch} \\
& + \frac{1}{3}\lambda_F(0)\lambda_{USD}(0)\,T_{rep}(T_{apt}+\tau) - \frac{1}{3}(\lambda_C(0)+\lambda_F(0))\lambda_{USD}T_{rep}\tau \\
& + \frac{1}{2}\lambda_{ID/SD}\tau + \frac{1}{2}\lambda_{ID/AT}(T_{apt}+\tau)
\end{aligned}
\tag{16}
$$

$$
\begin{aligned}
q_{S,M,fs} \cong\ & \frac{1}{2}\lambda_B(0)\,T_{sch} + \frac{1}{2}\lambda_D(0)(T_{apt}+\tau) \\
& + \frac{1}{3}\lambda_D(0)\lambda_{UAT}T_{sch}(T_{sch}-(T_{apt}+\tau)) + \frac{1}{3}\lambda_C(0)\lambda_{USD}T_{rep}T_{sch} \\
& + \frac{1}{3}\lambda_F(0)\lambda_{USD}(0)\,T_{rep}(T_{apt}+\tau) - \frac{1}{3}(\lambda_C(0)+\lambda_F(0))\lambda_{USD}T_{rep}\tau
\end{aligned}
\tag{17}
$$

표 6 안전등급 플랫폼 구성모듈의 고장검출 수단별 초기검출확률 [5]

Table 6 Initial fault detection probability of each module of safety grade platforms corresponding the fault detection methods [5]

고장률 (/10^6 hr)	아날로그 입력 모듈	디지털 입력 모듈	디지털 출력 모듈	릴레이 출력 모듈	프로세서 모듈	통신 모듈	통신 드라이버 모듈
$\lambda_M(0)$	4.315	1.778	2.265	1.914	6.720	2.738	4.264
$\lambda_{OP}(0)$	4.315	1.778	2.265	1.914	6.720	2.738	4.264
$\lambda_{SD}(0)$	4.160	1.690	2.170	1.650	0	2.650	4.020
$\lambda_{AT}(0)$	4.107	1.555	0.566	0.478	6.210	2,738	4.257
$\lambda_A(0)$	0	0	0	0	0	0	0
$\lambda_B(0)$	0.049	0.014	0.088	0.189	0.510	0	0.007
$\lambda_C(0)$	0.203	0.210	1.611	1.650	0	0	0
$\lambda_D(0)$	0.106	0.075	0.007	0.081	6.210	0.088	0.237
$\lambda_E(0)$	0	0	0	0	0	0	0
$\lambda_F(0)$	3.957	1.480	0.559	0.403	0	2.650	4.020
$\lambda_G(0)$	0	0	0	0	0	0	0
$\lambda_H(0)$	0	0	0	0	0	0	0
$\lambda_I(0)$	0	0	0	0	0	0	0
$\lambda_{ID/OP}$	0	0	0	0	0	0	0
$\lambda_{ID/SD}$	0.003	4.23	3.75	0.026	0	0	0.048
$\lambda_{ID/AT}$	0.0106	0.0075	0.0007	0.0008	0.621	0.0088	0.0237
λ_{UOP}	0	0	0	0	0	0	0
λ_{UAT}	0.007	0.005	0.0005	0.00056	0.435	0.006	0.017
λ_{USD}	0.142	1.21	0.108	1.31	0	0.015	0

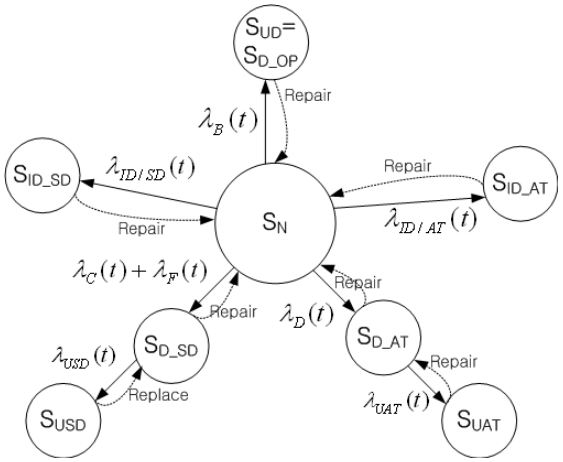

그림 7 자동주기검사를 반영한 모듈의 고장 상태도

Fig. 7 Module failure state diagram with the automatic periodic testing

제 3장에서 구한 안전등급 플랫폼에 대한 자동고장검출수단별 검출확률과 참고문헌 [5]에서 제시된 자가진단의 잠재적 고장률, 그리고 자동주기검사 설비의 신뢰도 등을 상기 식에 적용하여 자동주기검사의 효과를 살펴본다. 표 6은 정기검사, 자가진단, 그리고 정기검사에 의해 검출될 고장확률, 그리고 자동고장검출수단의 고장률, 거짓 검출률을 나타내고 있다.

4.2 모듈별 고장허용능력 평가 및 고찰

모듈의 평균 불가용도와 평균 불안전도는 안전필수 시스템 안전도 및 가용도를 분석하는데 기초자료로 활용되는 최종적 결과물이다. 표 7은 자동주기검사 적용 전과 전용 후에 대한 모듈의 평균 불가용도와 평균 불안전도에 대한 비교 결과를 나타낸다. 먼저 자동주기검사 적용 후 평균 불가용도는 아날로그 입력모듈은 자동주기검사 적용 전 보다 약 3.3 배, 디지털 입력모듈은 약 7.2 배, 프로세서 모듈은 약 8 배, 통신모듈은 약 2.3 배, 통신드라이버 모듈은 약 3 배로 각각 감소하였다. 반면에 디지털 출력모듈, 릴레이 출력모듈, 버스모듈 및 전원모듈은 평균 불가용도 감소폭이 상대적으로 낮았다.

자동주기검사 적용 후 평균 불안전도는 아날로그 입력모듈 약 3.5 배, 디지털 입력모듈은 약 10.4 배, 프로세서 모듈은 약 8.5 배, 통신모듈은 약 23 배, 통신드라이버 모듈은 약 23 배로 각각 감소하였다. 반면에 디지털 출력모듈은 약 1.2 배, 릴레이 출력모듈 약 1.3 배로 각각 나타나 불안전도 감소폭이 낮았다. 이 중 통신모듈과 통신드라이버 모듈의 평균 불안전도 감소폭이 매우 크게 나타난 이유는 매우 큰 고장탐지확률을 갖는 자가진단과 관련한 항이 고장안전개념에 의해 배제되었기 때문이다.

상기의 결과로부터 자동주기검사를 적용할 경우 안전등급 플랫폼을 이루는 각 모듈의 가용도 및 안전도는 크게 향상됨을 알 수 있다. 특히 자동주기검사 적용 전 불가용도와 불안전도 값이 비교적 크게 나타나는 아날로그 입력모듈, 디지털 입력모듈, 그리고 프로세서모듈의 경우에는 자동주기검사로 모두 큰 폭으로 감소함으로써 시스템 고장허용능력을 향상시키는 주요 요인으로 작용하는 것을 알 수 있다.

표 7 자동주기검사를 통한 고장 검출시 모듈 불가용도 및 불안전도 개선효과

Table 7 Unavailability reduction and safety improvement effect through additional fault detection using automatic periodic testing

	자동주기검사 적용 전		자동주기검사 적용 후		적용 전후 비율	
	불가용도	불안전도	불가용도	불안전도	불가용도	불안전도
아날로그 입력모듈	1.15E-03	1.12E-03	3.53E-04	3.19E-04	0.31	0.29
디지털 입력모듈	1.01E-03	9.63E-04	3.53E-04	3.19E-04	0.14	0.10
디지털 출력모듈	8.40E-05	3.66E-05	7.92E-05	3.18E-05	0.94	0.87
릴레이 출력모듈	1.26E-04	9.19E-05	1.03E-04	6.91E-05	0.82	0.75
프로세서 모듈	2.42E-03	2.41E-03	3.03E-04	2.83E-04	0.13	0.12
통신모듈	5.33E-05	3.21E-05	2.29E-05	1.41E-06	0.43	0.04
통신드라이버모듈	1.20E-04	8.78E-05	3.96E-05	6.31E-06	0.33	0.04

5. 결 론

본 논문은 원자력발전소 안전필수 계측제어시스템에 대해 인간의 개입 없이 주기적으로 시험하는 새로운 개념의 자동주기검사 방법을 반영한 고장허용 분석모델을 제시하였다. 이 모델에는 고장검출 수단 자체의 고장 및 기능저하 요인을 반영하여 기존에 상수로 취급된 고장검출방법별 고장검출률을 시간에 의존하는 함수로 표현하였다. 또한 각 고장검출방법별 상관관계를 정의하여 임의의 고장 발생에 대해 일차적인 고장검출수단을 정의하고 이 수단의 고장 시에도 대체 수단에 의해 지속적인 고장검출이 되는 과정을 제안 모델에 반영하였다. 즉 특정 고장검출수단 자체의 고장에 의해 고장검출률이 감소할 경우 다른 대체수단의 고장검출률은 증가하도록 하여 시간에 따른 상호 상관관계를 갖도록 하였다.

제안 모델을 사용하여 원자력 안전등급 플랫폼에 적용하여 플랫폼을 구성하는 각 모듈의 가용성과 안전성을 평가하였다. 시스템 안전성 평가의 기초 자료가 되는 모듈별 불가용도 및 불안전도를 계산한 결과 자동주기검사의 적용 효과는 매우 큰 것으로 나타났다. 특히 입력모듈과 같이 장주기의 정기검사주기를 갖는 모듈과, 자가진단기능이 미약한 프로세서 모듈의 경우에 큰 효과가 있는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 미래창조부의 원자력 연구개발 프로그램의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

References

[1] "Periodic Testing of Protection System", USNRC Reg. Guide 1.22, 1972.

[2] S.Hur, D.H.Kim, I.K.Hwang, G.Y.Park, J.G.Park, J.G.Choi, D.Y.Lee, K.C.Kwon, S.J.Lee and S.J.Lee, "New Automatic Periodic Test method for the Digital Reactor Protection System", sixth American Nuclear Society International Topical Meeting on Nuclear Instrumentation, Control, and Human-Machine Interface Technologies, Knoxville, Tennessee, 2009 4.

[3] "Topical Report for Digital Plant Protection System and Engineered Safety Features Actuation System-Auxiliary Cabinet", KOPEC/NED/TR-99-005, KEPCO-E&C, ABB-Combustion Engineering Nuclear Power, Inc, and KEPCO, 1999.6.

[4] S.Hur, D.Y.Lee, I.K.Hwang, Y.M.Kim, H.H.Choi and S.J.Lee, "The Effect of the Fault Tolerant Capability due to Degradation of the Self-diagnostics Function in the Safety Critical System for Nuclear Power Plants", Trans.

KIEE, Vol. 59 No. 8, pp1456-1463. 2010 .8.
[5] J. G. Choi, “Reliability Analysis Report of Safety Grade Programmable Logic Controller (POSAFE-Q) “, KNICS-PLC-AR103, Rev.01, 2007.
[6] K.C.Kwon, D.Y.Lee, C.H.Kim and C.H.Choi, “Development of Safety Grade Controller (PLC) for Nuclear Power Plants“, Nuclear Industry, Vol.288 p.43-47. 2007.2.

저 자 소 개

허 섭 (許 燮)
1962년 생. 1988년 서강대 물리학과 졸업. 1990년 동 대학원 물리학과 석사. 2010년 충남대 전자공학과 박사, 1990년~현재 한국원자력연구원 책임연구원
Tel : 042-868-8656
Fax : 042-868-8916
E-mail : shur@kaeri.re.kr

김 동 훈 (金 東 勳)
1961년 생. 1984년 항공대 항공전자공학과 졸, 2001년 한남대 정보통신학과 석사, 2006년 동 대학원 박사, 1987 ~ 현재 한국원자력연구원 책임연구원

최 종 균 (崔 種 均)
1971년 생. 1994년 한양대 핵공학과 졸업, 1996년 한국과학기술원 핵공학과 석사, 2001년 동대학원 박사, 2001 ~ 현재 한국원자력연구원 선임연구원

김 창 회 (金 昌 會)
1963년 생. 1985년 경북대 전자공학과 졸업, 1992년 충남대 전자공학과 석사, 1996년 동 대학원 박사, 1986 ~ 현재 한국원자력연구원 책임연구원

이 동 영 (李 東 映)
1958년 생. 1984년 경북대 전자공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전자공학과 석사. 2006년 충남대 전자공학과 박사, 1987년~현재 한국원자력연구원 책임연구원