

2004 춘계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

검증설비를 이용한 SMART  
경보계통 하드웨어 신뢰도 예측

Hardware Reliability Prediction for SMART Alarm System  
Using the Testbox

성덕현, 고종현, 심영록, 김중선  
삼창기업(주) 제어기술연구소  
울산 광역시 울주군 웅촌면 고연리 974-1

장귀숙, 박근옥  
한국 원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 논문은 SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor) 경보계통 검증설비에 사용된 부품 및 기기의 구성방식을 이용하여 SMART 연구로 경보계통 운영기간 중 더 높은 신뢰도를 확보할 수 있는 이중화 방안에 대하여 모색하였다. 이를 위해 이미 구성된 SMART 경보계통의 검증설비 이용하여 신뢰도를 예측 하였다. 이를 기반으로 기기의 다중구성(병렬 및 대기)을 적용하여 신뢰도를 산출한 결과, 일정 기간 이상의 시간이 경과 되면 대기구조가 고 신뢰도의 확보 측면에서 유리함을 확인 할 수 있었다.

Abstract

In this paper, we were studied redundancy method for high reliability preservation during SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor) alarm processor operation

using SMART Alarm System Testbox. For this, we predict reliability of SMART Alarm System and apply redundancy(parallel and standby) to the result. As a result, we confirmed standby structure is profitable in side of reliability if time more than schedule period is passed.

## 1. 서론

SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor) 경보계통은 통신망을 통하여 받아들인 각 계통들의 신호를 처리하여 계통이나 공정(process)의 이상을 판단하고, 운전원에게 VDU(Visual Display Unit)기반의 정보타일 및 정보리스트 그리고 음향장치를 이용하여 계통이나 공정(process)의 이상을 경고하고, 이상의 우선순위와 특성에 대한 정보를 제공하며, 운전원의 초기대응에 대한 지침을 제공하고 운전원의 대응이 적절한 시간 내에 이상을 해결했는지 확인할 수 있는 기능을 제공한다.

경보계통은 플랜트 가동 중 항상 이 기능들을 충실히 수행할 수 있어야 하며, 이를 위하여 높은 가용도 및 신뢰도를 가질 수 있는 경보계통개발을 위한 설계방안이 필요하다. 이를 위해 본 논문에서는 이미 구성된 SMART 경보계통 검증설비를 이용하여 이미 구성된 기기에 대한 신뢰도를 예측해보고, 이를 바탕으로 운전기간 중 더 높은 신뢰도를 확보할 수 있는 이중화 구성방안에 대하여 기술 한다.

### 1.1 SMART 경보계통 검증설비

SMART 경보계통 검증설비(이하 검증설비)은 SMART 경보계통 개발을 위하여 개발되었으며, 그 구성은 크게 두 부분으로 나뉘 수 있으며 각각의 기능은 다음과 같다.

#### 1) 경보처리기

각 계통에서 입력되어지는 신호들을 처리하여 경보를 생성하며, 생성된 경보에 대한 우선순위, 경보감축 및 억제를 판단하는 기능을 한다. 경보처리기는 SMART 개발사업 중 개발된 DSP 보드로 구성되어 있다.

#### 2) 경보표시 처리기

경보처리기에서 처리된 결과를 입력받아 타일이나 리스트의 형태의 화면을 운전원에게 보여주는 기능을 수행하는 기기로, 운전원의 경보 제어처리를 담당한다. 경보표시 처리기는 QNX4를 탑재한 산업용 PanelPC상용 제품으로 구성되어 있다.

본 논문의 신뢰도 예측은 경보 처리기에 사용된 보드의 부품 레벨에서 수행 되었다.

## 1.2 신뢰도 산출

본 연구의 목적은 운전 시간의 경과에 따라 변화하는 이중 구성 각각(병렬구성, 대기구성)의 신뢰도를 분석하여 적합한 이중화 방안을 제시하기 위한 것임으로 신뢰도의 분석에 사용되는 변수는 시간으로 한정하고 나머지 요소들은 고정된 값으로 제한한다. 따라서 신뢰도 분석을 위해 사용한 신뢰도 분석 방법은 시간변수를 포함하는 정량적 신뢰도 분석 방법만을 사용하였고, 정성적 분석방법은 사용되지 않았다.

정량적 신뢰도 분석을 위해 원전이나 군수용 제품 신뢰도 예측에 주로 사용되는 MIL-HDBK-217FN2(Parts Stress) 모델을 사용하였고, 수치산출의 편의를 위해 Relex사의 Relex 7.5를 지원도구로 사용하였다. Relex는 신뢰도 산출을 위한 많은 수학적 계산을 자동으로 수행해 주며, 신뢰도 산출 결과를 리포팅해 주는 기능을 가지고 있다. 본 논문에서 제시하는 결과치는 리포팅 기능을 이용하여 작성한 것이다.

## 1.3 운영환경

신뢰도는 기기가 운영되는 시간 및 그 환경에 영향을 받게 된다. 따라서 기기가 운영될 환경에 대한 설정이 필요하며 경보계통은 <표 1>과 같은 환경 하에서 운영된다고 가정하고 신뢰도를 산출 하였다.

<표 1> 기기운용 환경

항목	적용 환경	MIL-HDBK-217FN2
기기 주변온도	경보계통 기기가 동작하는 환경의 온도를 40℃로 가정함.	40℃
환경 인자	경보계통 기기는 동작 중 이동이나 제어가 없다고 가정함.	GF
임무 주기	경보계통 기기는 주기시간 동안 항상 동작한다고 가정함.	N/A
MTTR	예비 부품이 있다고 가정하고 경보계통의 수리에 걸리는 시간은 1시간으로 가정함.	N/A

## 2. 검증설비 신뢰도 산출

검증설비의 구성은 <그림 1>과 같다. <그림 1>의 기술된 부품들 중 일부는 데이터 확보의 어려움이 있어 <표 1>에 기술된 부품만을 적용하여 신뢰도를 산출 하였다.

<표 2> 신뢰도 평가에 적용된 기능블럭

블럭 이름	회사	부품번호	설명
DSP processor	Texas Instruments	TMS320C40FL60	중앙처리장치
VME interface controller	CYPRESS	VIC068A-NC	VME bus와의 통신 담당
flash memory	AMD	AM29F080B-90EC	데이터 백업/ 응용 프로그램 로직 저장(개발단계 중)
EEPROM	Texas Instruments	27C256-15	응용 프로그램 로직 저장
SRAM	SAMSUNG	K6R4016V1C-TC12	Data 및 응용 프로그램 운용
FGPGA	ALTERA	EPM7128STC100-15	보드 운용을 위한 프로그램 로직 디바이스

<표 2>에 기술된 부품들을 MIL-HDBK-217FN2모델에 적용하기 위해서는 각 부품별  $\pi$  팩터 값들을 산출하여야 하며, 이를 위해 <표 3>과 같이 각 부품별 설정 값을 적용 하였다.

<표 3> 각 부품별 설정값

부품명	TMS320C40	VIC068A	AM29F032B	27C256	K6R4016V1C-C	EMP7128EQI100-20
워드 크기	8 bit	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
핀 수	325	144	28	28	44	100
게이트 수	N/A	Up to 500	N/A	N/A	N/A	2500
분류	Microprocess or	PLA/PAL	EEPROM	EEPROM	SRAM	PLA/PAL
기술 유형	MOS	MOS	flotox	flotox	CMOS	MOS
패킹 유형	FlatPack	FlatPack	Hermetic: DIPs, PGA, SMT	Nonhermetic : DIPs, PGA, SMT	Hermetic: DIPs, PGA, SMT	FlatPack
용량	N/A	N/A	8MB	256KB	1MB	N/A
온도	40°C					
환경	Ground Fixed					
생산기간	>= 2.0					
품질등급	S					

<표 3>의 설정에 따라 MIL-HDBK-217FN2에 따라 아래 식을 적용하여 각 부품별 고장

율( $\lambda$ )값들을 산출할 수 있고 그 결과는 <표 4>와 같이 NPRD95에 기술되어 있다.

- Gate/Logic Array and Microprocessors

$$\lambda_p = (C_1\pi_T + C_2\pi_E)\pi_Q\pi_L$$

- Memory

$$\lambda_p = (C_1\pi_T + C_2\pi_E + \lambda_{cyc})\pi_Q\pi_L$$

$\lambda_p$  : 고장율,  $C_1$  : 복잡도,  $C_2$  : 팩킹,  $\pi_T$  : 온도,  
 $\pi_E$  : 환경,  $\lambda_{CYC}$  : 쓰기회수,  $\pi_Q$  : 품질,  $\pi_L$  : 생산 기간

<표 4> 사용 부품 목록

Part Number	$C_1$	$C_2$	$\pi_T$	$\pi_E$	$\pi_Q$	$\pi_L$	$\lambda_{cyc}$	개수	조합고장율
TMS320C40	0.14	1.118791	0.192167	2	0.25	1	N/A	1	0.566121
VIC068A	0.0008 5	0.254297	0.192167	2	0.25	1	N/A	1	0.127189
AM29F080B	0.0068	0.010235	0.306413	2	0.25	1	N/A	1	0.005638
27C256-15	0.0034	0.013159	0.307956	2	0.25	1	1.98E- 5	1	0.006846
K6R4016V1C-TC12	0.062	0.016676	0.306413	2	0.25	1	N/A	4	0.052349
EPM7128STC100-15	0.0034	0.130955	0.192167	2	0.25	1	N/A	1	0.065641
전체고장률 : 0.823785									

<표 3>과 <표 4>를 반영하여 Relex7.5를 이용하여 검증설비의 신뢰도를 산출해 보았으며 결과는 <표 5>과 같다. <표 5>에서 17,520시간(24개월)은 SMART의 연료 재장전 주기로서 각 기기들에 대한 주기적인 유지보수 기간을 의미한다. 또한 262,800시간은 SMART의 수명인 30년에 해당되는 시간이다. 이때 플랜트 수명기간 중 17,520시간에서의 예측결과를 함께 보이는 것은 SMART의 연료 재장전 주기를 24개월로 설정되어 있고, 이 시간이 경보계통의 정기적인 유지보수가 가능한 시점으로 의미 있는 시간이기 때문이다.

<표 5> 신뢰도 예측 결과

항목	결과치	
	17,520 시간	262,800 시간
Failuer Rate	0.823785	0.932758
Reliability	0.985671	0.805340

### 3. 기기 이중화 방안 비교.

경보계통은 부품의 여유가 있고 1시간 이내에 수리가 가능하다는 전제하에 99%이상의 가용도를 가져야 하며 예측결과는 이를 만족할 수 있다. 하지만 산업용기기의 요구 신뢰도가 99%이상인 점을 고려해 볼 때 신뢰도를 높이기 위한 방안이 필요하다.

일반적으로 기기의 신뢰도를 높이기 위해 사용되는 부품의 고품질화나 기기의 다중구성을 고려할 수 있다. 하지만 부품의 고품질화를 통한 신뢰도 및 가용도 향상은 이는 비용과 기술적인 측면에서 한계가 있다. 따라서 기기의 다중화를 통하여 높은 신뢰도를 확보하게 되는데, 본 장에서는 기기 다중 구성을 통해 높은 신뢰도를 가지는 방안에 대하여 기술한다.

기기를 다중으로 구성하는 방법은 2개 이상의 기기를 병렬로 구성하는 것이다. 하지만 3중화 이상을 하더라도 그 효용은 2중화에 비해 그리 높아지지 않는다. 그렇기 때문에 검 증설비의 2중화를 가정하여 신뢰도를 산출해 보았다. 2중화 구성방안은 크게 병렬처리 구조와 standby 구조로 나뉠 수 있으며 그 특성은 아래와 같다.[2,3,4]

#### 1) 병렬처리 구성

두개의 처리기 모두 입력과 출력을 동시에 처리하게 된다. 기기 동작 중 한쪽 처리기가 고장이 나더라도 다른 한쪽 처리기가 계속 동작 중이므로 전체 시스템의 동작은 이상 없이 수행될 수 있다. 신뢰도 산출식은 아래와 같다.

$$R_s = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)]$$

#### 2) Standby 구성

기기 구성은 병렬구성과 유사하나 주 처리기와 백업처리기의 구분이 있다. 기기 동작도중 주 처리기의 고장이 감지되면 백업처리기가 주 처리기의 동작을 이어받게 되고, 따라서 전체 시스템의 동작은 이상 없이 수행될 수 있다. 신뢰도 산출식은 아래와 같다.

$$R_s = \sum_{i=0}^{n-1} \{(\lambda t)^i / i!\} e^{(-\lambda t)}$$

Relx7.5에서 지원하는 RDB(Reliability Block Diagram)기능을 이용해 위 구성들에 대한 신뢰도를 산출할 수 있다.

### 3.1 병렬처리

<표 6>는 SMART 경보계통 검증설비를 병렬로 구성했다고 가정하고 24개월(17,520 시간)이 경과한 시점과 30년(262,800 시간)이 경과한 시점에서의 결과치 이다.

<표 6> 신뢰도 분석 결과 - 병렬구성

항목	결과치	
	17,520	262,800
Failuer Rate	0.023275	0.268458
Reliability	0.999795	0.962108

### 3.2 Standby 구성

<표 7>는 SMART 경보계통 검증설비를 standby형태로 구성했다고 가정하고 24개월(17,520 시간)이 경과한 시점과 30년(262,800 시간)이 경과한 시점에서의 결과치 이다. 이때 작업전환의 성공률은 99%로 가정 하였다.

<표 7> 신뢰도 분석 결과 - Standby구성

항목	결과치	
	17,520	262,800

Failuer Rate	0.019727	0.152180
Reliability	0.999755	0.977945

### 3.3 결과 비교

<그림 2>에 나타나듯이 단일구성(검증설비)의 경우 이중화 구성에 비하여 시간이 갈수록 신뢰도는 더욱더 낮아지는 반면, 이중화 구조를 가정한 경우 123,355시간이 경과한 시점에서도 99%이상의 신뢰도를 유지 한다. 따라서 SMART 경보계통 기기는 이중화가 되어야 한다.

또한 같은 이중화 구조라 하더라도 병렬구성과 standby구성을 가정하였을 경우의 결과치 비교도 중요하다. <그림 2의 그래프 B>를 살펴보게 되면 시간의 경과가 길어지게 되더라도 병렬구성에 비해 standby구성을 가정하는 경우의 신뢰도 저하가 적다는 것을 알 수 있다. 이는 기기의 가동기간이 길면 길수록 기기를 standby구조로 구성하는 것이 신뢰도 측면에서 유리하다는 것을 보여준다. 하지만 <그림 3의 그래프 C>를 보게 되면 기기의 기동시작시간으로부터 약 24,000시간 까지는 병렬구성의 경우가 더 높은 신뢰도를 보임을 알 수 있다.

그렇기 때문에 추후 연료재장전 주기를 포함한 SMART 전체 및 경보계통에 대한 유지보수에 관련된 방안이 설정된 이후 경보계통 기기 이중화 설계에 반영되어야 한다.

## 4. 결론

SMART 경보계통은 그 기능을 충실히 수행하기 위해 무엇보다도 플랜트가 운영되는 기간 동안 높은 가용도를 유지해야 한다. 그래서 본 논문에서는 SMART 경보계통 검증설비를 이용하여 신뢰도 예측을 해보았고, 이 결과를 이용해 경보계통의 이중화 방안을 가정해 신뢰도를 산출해 보았다. 이를 통해 시간 경과에 따라 병렬구성과 standby구성의 신뢰도 우위가 변경되는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구 결과는 추후 SMART 경보계통의 기기 구성 및 하드웨어사양이 결정된 후 이



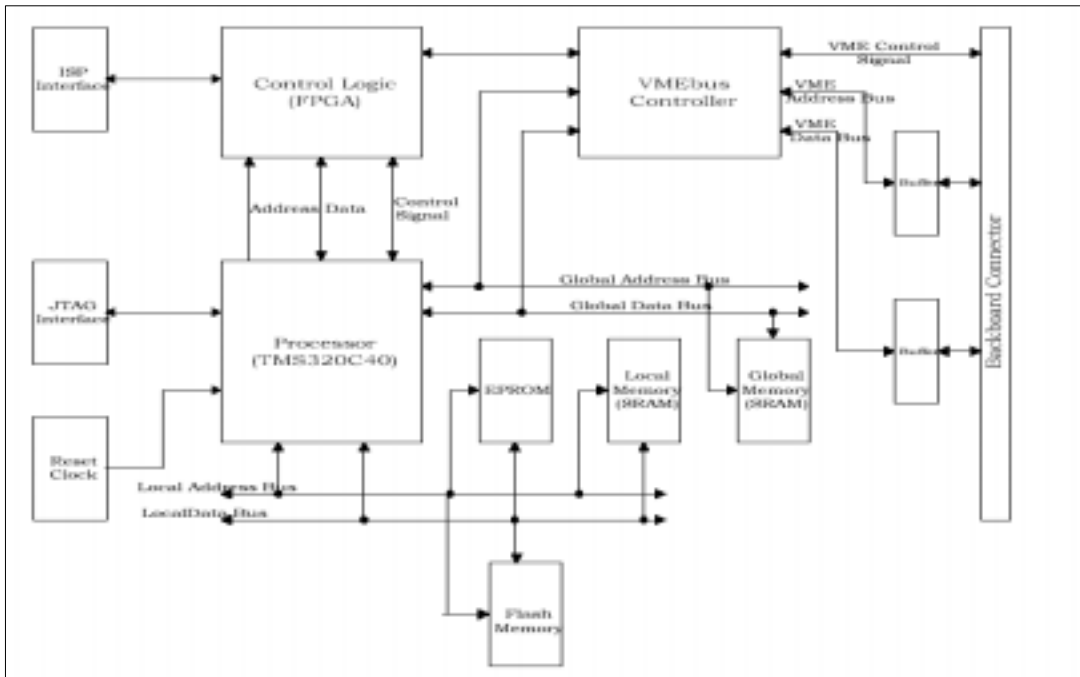
를 적용해 정량적 분석뿐만 아니라 정성적인 분석을 수행하여야 한다.

### Acknowledgement

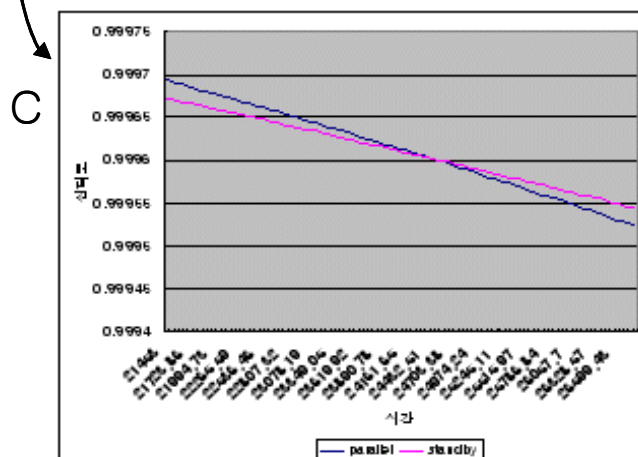
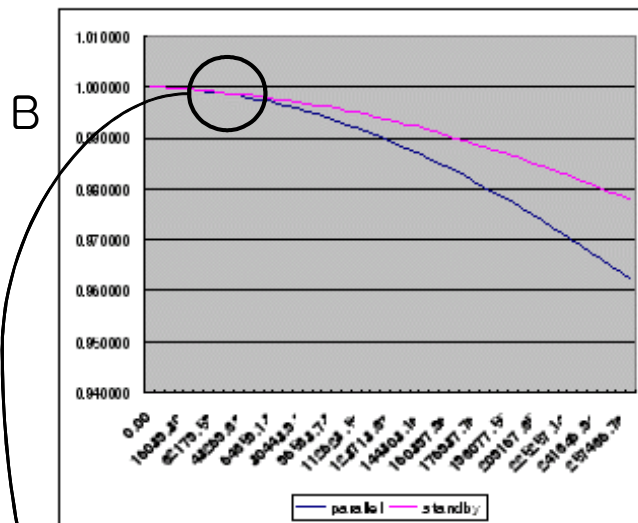
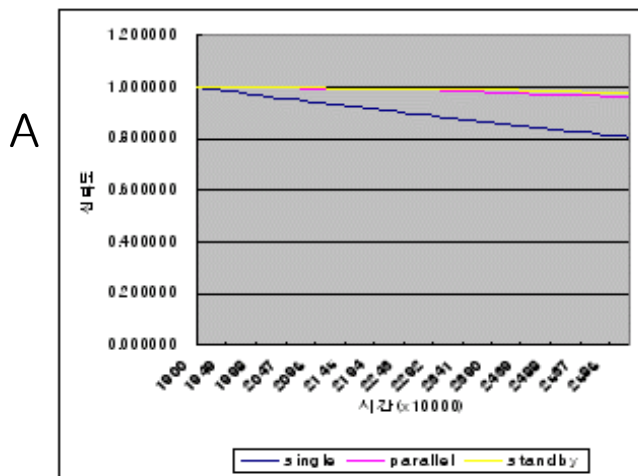
본 연구는 SMART 개발사업의 일환으로 수행되었음.

### [참고문헌]

1. US, MIL-HDBK-217, "Reliability Prediction of Electronic Equipment", version F Notic2, DOD, 1995
2. KAERI/AR-571, "디지털 계측 제어 기기의 확률론적 안전성평가를 위한 하드웨어 신뢰도 예측방법", 한국원자력연구소, 2000
3. KAERI/TR-2026, "디지털 계측제어 계통의 확률론적 안전성 평가를 위한 주요인자 선정 및 민감도 분석", 한국원자력연구소, 2002
4. KAERI/TR-2119, "디지털 계측제어기기의 하드웨어 신뢰도 정량 평가 방법 비교 연구", 한국원자력연구소, 2002
5. KAERI/CM-502, "차세대 원전 디지털 계측제어 부품의 신뢰도 정량적 평가기술개발", 한국원자력연구소, 2001
6. Relex Soft ware, "Relex 7.5 User Guide manual", Relex Soft ware, 2002



<그림 1> 경보계통 검증설비 블럭도



시간	single	parallel	standby
0.00	1.000000	1.000000	1.000000
5363.27	0.995592	0.999981	0.999946
10726.53	0.991203	0.999923	0.999874
16089.80	0.986833	0.999827	0.999782
21453.06	0.982483	0.999693	0.999672
26816.33	0.978151	0.999523	0.999543
32179.59	0.973839	0.999316	0.999397
37542.86	0.969546	0.999073	0.999232
42906.12	0.965272	0.998794	0.999049
48269.39	0.961017	0.998480	0.998848
53632.65	0.956780	0.998132	0.998630
58995.92	0.952562	0.997750	0.998394
64359.18	0.948363	0.997334	0.998140
69722.45	0.944182	0.996884	0.997870
75085.71	0.940020	0.996402	0.997583
80448.98	0.935876	0.995888	0.997278
85812.24	0.931750	0.995342	0.996957
*****			
225257.14	0.830636	0.971316	0.983230
230620.41	0.826974	0.970062	0.982513
235983.67	0.823329	0.968787	0.981783
241346.94	0.819699	0.967492	0.981040
246710.20	0.816086	0.966175	0.980285
252073.47	0.812488	0.964839	0.979517
257436.73	0.808906	0.963483	0.978737
262800.00	0.805340	0.962108	0.977945

<그림 2> 시간에 따른 신뢰도 변화