

'99 추계학술 발표회
한국원자력학회

MIL-HDBK-217 방법에 의한 원자로 보호모듈 신뢰도 평가

Reliability Evaluation for Reactor Protection Modules with MIL-HDBK-217 Method

윤 원 영, 윤 문 원

한국원자력안전기술원
대전 광역시 구성동 19

요 약

웨스팅하우스형 원자로 보호모듈의 고장율과 계통 신뢰도 비교 분석을 수행하였다. 신뢰도 추정기법으로 MIL-HDBK-217 에서 제시하고 있는 부품 스트레스 분석기법을 사용하였으며, 신뢰도 분석은 웨스팅하우스형 원자로 보호계통을 구성하는 전자모듈 중 반도체 보호논리 캐비닛에 내장된 NLP2, NAL1, NLL1, NRA1, NSA1, NSA2, NCH1 모듈을 대상으로 수행하였다. 신뢰도 분석은 경년화에 의한 원자로 보호모듈의 신뢰도 변화를 추정하기 위하여 최초 기기 설치 후 매 5년 경과에 대한 보호모듈 신뢰도와 가압기 저 압력 계통의 운전 신뢰도를 각각 계산하였다. 분석결과 원자로 보호모듈 중 가장 신뢰도가 우수한 것은 NLL1(시간응답 보상모듈)임을 알 수 있었으며, 가장 신뢰도가 낮은 것은 NAL1(비교기 회로모듈)임을 알 수 있었다. 이외에도 발전소 초기가동 후 10년에서 15년 사이에 부품 경년화에 의하여 원자로 보호계통의 운전 신뢰도가 급격히 저하될 수 있음을 제시하였다.

Abstract

The comparative study was performed to analyze the failure rate and system reliability of the Westinghouse type reactor protection modules. With the part stress analysis method recommended by MIL-STD-217F, reliability calculations were performed on NLP2, NAL1, NLL1, NRA1, NSA1, NSA2 and NCH1 modules which are installed in the solid state protection system(SSPS) cabinet of Westinghouse nuclear plants. In the calculation process, the time dependent module reliabilities and the integrated system reliability for the pressurizer low pressure channel were obtained at every 5 year interval to estimate the system operation and aging effects. The results demonstrate that the most reliable module is the NLL1 and that the least reliable module is the NAL1 among of the selected modules. It is also demonstrated that the module reliability decreases rapidly after ten years operation due to component aging effect.

1. 서론

국내 원자력 산업계는 최근까지 국내 원전의 수명연장에 관한 논의를 활발히 진행 중에 있다. 이와 관련하여 계속제어 분야의 주 관심사는 안전계통 제어모듈에 대한 경년화 상태를 진단하고 이를 근거로 설비개선의 범위와 시기를 결정하는 문제로 나타나고 있다. 특히, 지난해 수행한 고리 1호기 안전계통 제어모듈의 설비개선을 계기로 유사 계통의 설비개선이 활발히 진행될 것으로 예상되어짐에 따라 국내 원자력 산업계는 신뢰도 평가기법을 이용하여 원전 제어모듈의 경년화 상태를 진단하는 방법에 대한 관심이 증대되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 계속제어기기의 신뢰도 추정기법으로 MIL-HDBK-217 에서 제시하고 있는 부품 스트레스 분석기법을 사용하여 웨스팅하우스형 원전 제어모듈의 평균 신뢰도를 분석하였다. MIL-HDBK-217 은 미 국방성에서 개발한 군수물자의 신뢰도 예측 지침서로서 다양한 종류와 복잡한 구조를 지니는 원전 제어모듈의 신뢰도 평가에 적합하며, 원전 안전계통 신뢰도 분석에 보편적으로 사용되어지고 있는 방법 중의 하나이다.

2. MIL-HDBK-217 방법소개

일반적으로 제어모듈의 신뢰도는 구성부품의 시간에 대한 고장율이 일정하다는 전제하에 다음과 같은 관계식으로 표현될 수 있다.

$$R(t) = \exp(-\lambda t) \dots \dots \dots (1)$$

위의 식에서 부품의 고장율 λ 는 부품의 물리적 특성과 운전조건 및 설치환경 등에 의해 좌우되는 것으로 알려져 있다. 따라서 제어모듈의 신뢰도 예측은 구성부품의 고장율을 정량화하고 이를 근거로 종합적인 신뢰도를 계산하는 것이며, 이를 분석하여 관련 모듈의 설계 개선 또는 시간 경과에 따른 상대적 신뢰도를 추정할 수 있다.

MIL-HDBK-217 에서는 이와 같은 신뢰도 예측기법으로 부품수 분석(Part Count Analysis) 방법과 부품 스트레스 분석(Part Stress Analysis) 방법을 제시하고 있으며 각각의 내용을 간략히 소개하면 다음과 같다.

2.1 부품 수 분석방법

부품 수 분석은 개념 설계단계 또는 초기 설계단계에서 비교적 단순한 정보만을 이용하여 대략적인 계통의 신뢰도를 계산하는 것으로, 이 경우에 적용되는 정보는 (1) 부품의 고유 고장데이터와 수량, (2) 품질등급 및 (3) 기기, 운전환경을 고려하게된다. 운전환경이 동일한 경우에 부품 수 분석에 의한 기기 고장율은 일반적으로 다음과 같은 관계식으로 나타내어진다.

$$\lambda_{Device} = \sum_{i=1}^{i=N} Ni(\lambda_i \pi_Q) \dots \dots \dots (2)$$

여기서,

λ_{Device} = 종합적인 기기 고장율(Failure/10⁶)

λ_i = i 번째 부품의 고장율(Failure/10⁶)

π_Q = i 번째 부품의 품질계수

Ni = i 번째 부품의 수량

n = 기기 내의 부품 종류의 수

그러나, 만일 운전 환경이 상이한 경우에는, 식(2)에 운전 환경에 대한 가중치를 추가적으로 곱하여야 한다. MIL-HDBK-217 에서는 운전 환경에 대한 가중치를 표 1 에 나타낸 바와 같이 기기 설치내용에 따라 14 등급으로 분류하고있으며, 품질계수는 표 2 에 나타낸 바와 같이 부품의 특성에 따라 3~8 종으로 분류하고 있다.

표 1. 운전환경 분류내용

운전 환경	표기내용	운전 환경	표기내용
Ground, Benign	G _B	Airborne, Uninhabited Cargo	A _{UC}
Ground, Fixed	G _F	Airborne, Uninhabited Fighter	A _{UF}
Ground, Mobil	G _M	Airborne, Rotary Winged	A _{RW}
Naval, Sheltered	G _S	Space, Fight	S _F
Naval, Unshettered	G _U	Missile, Fight	M _F
Airborne, Inhabited Cargo	G _{IC}	Missile, Launch	M _L
Airborne, Inhabited GIF Fighter	G _{IF}	Cannon, Launch	C _L

표 2. 품질등급 분류내용

부 품 종 류	품 질 등 급
Microcircuit	S, B, B-1, Others
Discrete Semiconductor	JANTXV, JANTX, JAN
Capacitor	D, C, S, R, B, P, M, L
Resistor	S, R, P, M
Coil, Molded Type	S, R, P, M
Relay, Switch	R, P, M, L

2.2 부품 스트레스 분석 방법

부품 스트레스 분석은 설계가 완료된 제품에 대하여 보다 현실적인 기기 신뢰도를 계산하는데 사용되는 방법으로 다음과 같은 관계식으로 나타내어진다.

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_Q \pi_T \pi_E \pi_{oth} \dots \dots \dots (3)$$

여기서,

λ_p = 부품 고장율 (Failure/10⁶ hours)

λ_b = 기본 고장율 (Failure/10⁶ hours)

π_Q = 부품품질계수 (Quality Factor)

π_T = 부품 운전온도계수 (Temperature Factor)

π_E = 부품 운전환경계수 (Environmental Factor)

π_{oth} = 기타 운전계수 (Other Factors)

따라서 부품 스트레스 분석을 위하여는 계측모듈의 설치 및 운전 조건에 대한 상세한 정보가 제공될 수 있어야 한다. 일반적으로 (3)식에서 운전 온도계수(π_T)는 다음과 같은 Arrhenius 상관식으로 나타나게 된다.

$$\pi_T = \pi_R \exp[A(T_R^{-1} - T_O^{-1})], \quad A = E_a/K \dots \dots \dots (4)$$

여기서,

- π_R = 기준온도계수
- T_R = 기준온도
- T_O = 운전온도
- E_a = 고장 활성화 에너지
- K = Boltzmann 상수

이외에도 (3)식에 나타나있는 기타 운전계수(π_{oth})의 내용은 입/출력 결합계수 (π_M), 인가전압에 의한 스트레스계수(π_s), 구조 복합성계수(π_c), 동작 상태계수(π_A) 등이 있으며, 이들의 값은 각각의 기기 설계 및 운전조건을 복합적으로 고려하여, 설계자의 공학적 판단에 의해 결정될 수 있다.

3. 원전 제어모듈 신뢰도 계산

본 연구에서는 고리 3,4 및 영광 1,2 원전 보호계통을 구성하는 전자모듈 중 반도체 보호논리 캐비닛에 내장된 NLP2, NAL1, NLL1, NRA1, NSA1, NSA2, NCH1 모듈을 대상으로 각각의 고장율과 시간 경과에 따른 신뢰도를 계산하였다. 신뢰도 계산을 위한 가정 사항은 다음과 같다.

- 1) 제어모듈을 구성하는 개별 부품의 고장은 기기 고장으로 나타난다고 가정하였다.
- 2) 제어모듈의 운전환경은 GB(Ground, Benign)으로 가정하였다.
- 3) 제어모듈의 품질등급은 반도체 소자의 경우 JANTX 등급을 가정하였으며, 저항 및 캐패시터의 품질등급은 M 등급을 가정하였다.
- 4) 제어모듈의 운전온도는 40℃를 가정하였다. 단, 전력용 트랜지스터(Power Transistor)의 경우에는 100℃를 가정하였다.
- 5) 회로기판, 점퍼선, 스캔, 콘넥터, 방열판 등과 같은 기계적 구조물은 고장이 발생되지 않는다고 가정하였다.
- 6) 제어모듈의 운전기간 중 교체 및 보수효과를 배제하였다.

위와 같은 조건에 따라 제어모듈 부품의 고장 데이터를 MIL-HDBK-217로부터 선정하였으며, 상세 내용은 표3에 나타내었다. 또한 표4에는 각각의 모듈에 내장된 주요부품의 내역을 나타내었다. 따라서 표 3, 4의 내용과 식(3)의 상관관계로서 개별 부품당 고장율과 종합적인 고장율을 계산할 수 있으며, 식(1)의 상관관계를 이용하면 시간 경과에 따른 전자모듈의 신뢰도를 추정할 수 있다. 이러한 내용은 각각 표 5, 6에 나타내었다. 특히, 시간 경과에 따른 전자모듈의 신뢰도 계산은 국내 원전의 가동년 수가 각기 다른 점을 고려하여 최초 설치 후 5년, 10년, 15년, 20년에 대한 값을 계산하였다.

표 3. 고장을 데이터 선정내용

부 품 명	신뢰도 추정값 (per 10 ⁶ hours)				
	Xb	π_{θ}	π_{T}	π_{E}	π_{oth}
I.C, Logic Array	2.5× 10 ⁻³	1	0.21	0.5	1
I.C, OP Amp	1.0× 10 ⁻²	1	0.34	1	1
Tr, Signal	7.4× 10 ⁻⁴	1	1.4	1	1.5
Tr, Power	3.9× 10 ⁻²	1	1.2	1	0.7
Tr, WJT	8.3× 10 ⁻⁹	1	1.5	1	N/A
Tr, SCR	2.2× 10 ⁻⁹	1	1.6	1	N/A
Diode, Signal	3.8× 10 ⁻⁹	1	1.6	1	N/A
Diode, Zener	3.4× 10 ⁻⁹	1	1.6	1	N/A
Diode, LED	2.3× 10 ⁻⁴	1	1.6	1	N/A
Resistor, Fixed	1.7× 10 ⁻⁹	1	1.5	1	N/A
Potentiometer	2.4× 10 ⁻⁹	1	1.5	1	N/A
Capacitor, Fixed	9.9× 10 ⁻⁴	1	1.9	4.2	N/A
Capacitor, Variable	4.0× 10 ⁻⁹	1	2.5	3.2	N/A
Transformer	5.4× 10 ⁻⁹	1	3	N/A	N/A
Choke	3.0× 10 ⁻⁶	1	1.2	N/A	N/A
Switch, Thum wheel	1.8× 10 ⁻¹	1	N/A	1	N/A

표 4. 모듈별 내장 부품 수

부 품 명	내장 부품수(per Module)						
	NLP2	NAL1	NLL1	NRA1	NSA1	NSA2	NCH1
I.C, Gate Logic	-	-	17	-	-	-	-
I.C, OP Amp	2	5	11	8	9	11	8
Tr, Signal	15	11	34	15	7	7	11
Tr, Power	3	2	1	7	8	8	8
Tr, WJT	1	1	1	1	1	1	1
Tr, SCR	-	-	3	-	-	-	-
Diode, Signal	47	72	48	61	38	42	54
Diode, Zener	18	9	16	15	8	8	8
Diode, LED	1	3	1	1	1	1	1
Resistor, Fixed	72	76	21	122	90	100	90
Potentiometer	5	9	15	7	4	6	13
Capacitor, Signal	27	31	62	53	33	39	46
Capacitor, Power	1	-	-	-	-	-	-
Transformer	3	1	1	1	1	1	1
Choke	1	-	-	-	-	-	-
Switch, Thumwheel	-	2	-	-	1	1	-

표 5. 원자로 보호모듈 고장을 계산결과

부 품 명	부품 고장을 계산값 (per 10 ⁶ hours)						
	NLP2	NAL1	NLL1	NRA1	NSA1	NSA2	NCH1
I.C, Gate Logic	-	-	4.46× 10 ⁻⁶	-	-	-	-
I.C, OP Amp	3.4× 10 ⁻³	8.5× 10 ⁻³	1.87× 10 ⁻²	2.72× 10 ⁻³	3.06× 10 ⁻³	3.74× 10 ⁻³	2.72× 10 ⁻³
Tr. Signal	2.33× 10 ⁻⁶	1.71× 10 ⁻⁶	5.28× 10 ⁻⁶	2.33× 10 ⁻⁶	1.09× 10 ⁻⁶	1.09× 10 ⁻⁶	1.71× 10 ⁻⁶
Tr. Power	9.83× 10 ⁻²	6.55× 10 ⁻²	3.28× 10 ⁻²	2.29× 10 ⁻¹	2.62× 10 ⁻¹	2.62× 10 ⁻¹	2.62× 10 ⁻¹
Tr. UJT	1.25× 10 ⁻²	1.25× 10 ⁻²	1.25× 10 ⁻²	1.25× 10 ⁻²	1.25× 10 ⁻²	1.25× 10 ⁻²	1.25× 10 ⁻²
Tr. SCR	-	-	3.52× 10 ⁻³	-	-	-	-
Diode, Signal	2.86× 10 ⁻¹	4.38× 10 ⁻¹	2.92× 10 ⁻¹	3.71× 10 ⁻¹	2.31× 10 ⁻¹	2.55× 10 ⁻¹	3.28× 10 ⁻¹
Diode, Zener	9.79× 10 ⁻²	4.40× 10 ⁻²	8.70× 10 ⁻²	8.16× 10 ⁻²	4.35× 10 ⁻²	4.35× 10 ⁻²	4.35× 10 ⁻²
Diode, LED	3.68× 10 ⁻⁴	1.10× 10 ⁻³	3.68× 10 ⁻⁴	3.68× 10 ⁻⁴	3.68× 10 ⁻⁴	3.68× 10 ⁻⁴	3.68× 10 ⁻⁴
Resistor, Fixed	1.84× 10 ⁻¹	1.94× 10 ⁻¹	5.36× 10 ⁻²	3.11× 10 ⁻¹	3.11× 10 ⁻¹	2.55× 10 ⁻¹	2.30× 10 ⁻¹
Potentiometer	1.80× 10 ⁻²	3.24× 10 ⁻²	5.40× 10 ⁻²	2.52× 10 ⁻²	2.52× 10 ⁻²	2.16× 10 ⁻²	4.68× 10 ⁻²
Capacitor, Signal	2.13× 10 ⁻¹	2.45× 10 ⁻¹	4.90× 10 ⁻¹	4.19× 10 ⁻¹	4.19× 10 ⁻¹	3.08× 10 ⁻¹	3.63× 10 ⁻¹
Capacitor, Power	3.20× 10 ⁻²	-	-	-	-	-	-
Transformer	4.86× 10 ⁻⁶	1.62× 10 ⁻⁶	1.62× 10 ⁻⁶	1.62× 10 ⁻⁶	1.62× 10 ⁻⁶	1.62× 10 ⁻⁶	1.62× 10 ⁻⁶
Choke	3.60× 10 ⁻⁶	-	-	-	-	-	-
Switch, Thumbwheel	-	5.33× 10 ⁻¹	-	-	2.66× 10 ⁻¹	2.66× 10 ⁻¹	-
Total	1.07	1.61	1.06	1.49	1.35	1.46	1.32

표 6. 원자로 보호 모듈 신뢰도 계산결과

운 전 년 수	전자 모듈명(× 10 ⁻¹)						
	NLP2	NAL1	NLL1	NRA1	NSA1	NSA2	NCH1
5 년 (43800 hr)	9.54	9.32	9.55	9.37	9.43	9.38	9.44
10 년 (87600 hr)	9.15	8.69	9.12	8.78	8.89	8.80	8.91
15 년 (131400 hr)	8.69	8.10	8.70	8.22	8.37	8.26	8.41
20 년 (175200 hr)	8.29	7.54	8.22	7.70	7.89	7.75	7.93

이상의 결과를 종합하면, 단일 전자부품의 고장율이 가장 높게 나타나는 것으로는 스위치와 반도체 소자로 나타나 있으나, 실제 부품 고장이 높게 감지되는 것은 캐패시터(고정형), 다이오드(신호용) 및 저항(고정형)소자임을 알 수 있다. 또한, 원자로 정지계통 전자모듈 중 가장 신뢰도가 우수한 것은 NLL1(시간응답 보상모듈)과 NLP2(루푸전원 공급모듈)임을 알 수 있으며, 가장 신뢰도가 낮은 것은 NAL1(비교기 회로모듈)임을 알 수 있다.

4. 원자로 보호계통 신뢰도 계산 사례

원자로 보호계통의 일반적 구성은 그림 1 에 나타낸 바와 같이 개별 전자모듈이 직렬 결합되는 경우와 병렬 결합되는 경우(또는 직렬/병렬 혼합되는 경우)로 나타나게 된다. 따라서 3 단의 전자모듈이 직렬 결합되는 경우에는 식(5)에 나타낸 바와 같이 개별 전자모듈의 신뢰도를 곱한값이 전체 채널 신뢰도를 구할 수 있으며 병렬 결합되는 경우에는 식(6)에 나타낸 바와 같이 개별 전자모듈의 신뢰도를 합한 값에 중복 신뢰도를 뺀 값으로 전체 채널 신뢰도를 구할 수 있다.

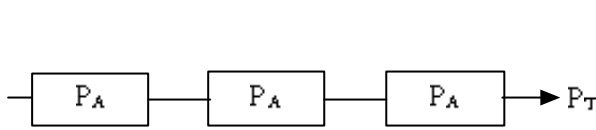


그림 1-1 직렬 결합형

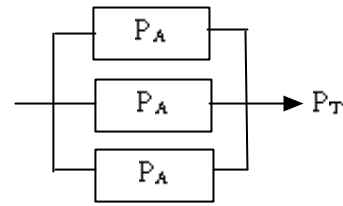


그림 1-2 병렬 결합형

$$P_T = P_A \times P_B \times P_C \dots \dots \dots (5)$$

$$P_T = (P_A + P_B + \dots P_N) - (P_A P_B + P_A P_C + P_B P_C) + P_A P_B P_C \dots \dots \dots (6)$$

이외에도 직렬/병렬 혼합형의 경우에는 위 식의 관계를 적절히 조합하여 전체 채널 신뢰도를 구할 수 있다. 따라서 그림 2 와 같이 3 개의 독립적인 채널로 부터 2/3 논리신호를 발생시키는 경우를 가정할 때, 이 경우의 전체 계통신뢰도는 (7)식과 같은 관계로 나타나게 된다.

$$P_s = P_{T1} P_{T2} + P_{T2} P_{T3} + P_{T3} P_{T1} - P_{T1}^2 P_{T2} P_{T3} - P_{T1} P_{T2}^2 P_{T3} - P_{T1} P_{T2} P_{T3}^2 + P_{T1}^2 P_{T3}^2 \dots \dots \dots (7-1)$$

만일, $P_{T1} = P_{T2} = P_{T3}$ 인 경우

$$P_s = 3P_T^2 - 3P_T^4 + P_T^6 \dots \dots \dots (7-2)$$

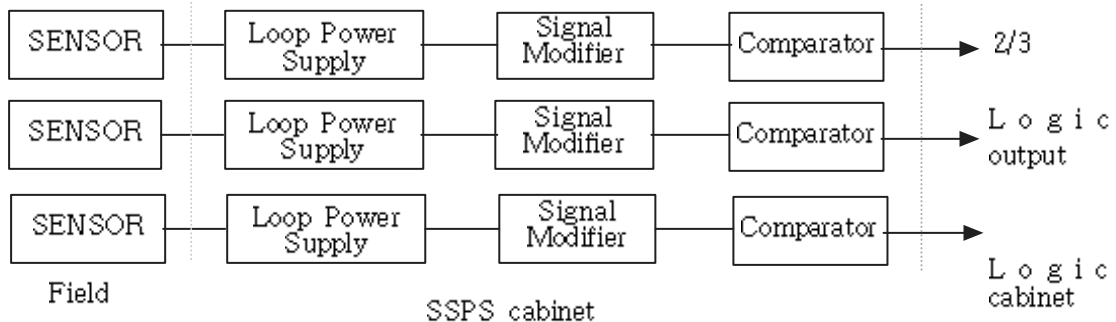


그림 2. 가압기 저 압력 원자로 정지계통 구성도

웨스팅하우스형 원전 보호계통 설계의 경우, 위와 같은 회로 구성은 가압기 저 압력에 해당하는 것으로 Signal Modifier는 NLL1(시간응답 보상모듈)에 해당하며 기타 Loop Power Supply와 Comperator는 각각 NLP2(루푸전원 공급모듈)와 NAL1(비교기 회로모듈)에 해당한다. 또한, OPDT & OTDT 보호 채널을 제외한 기타의 보호채널의 경우에는 신호 변환모듈(Signal Modifier)이 생략된 형태로 구성되어있다. 따라서, 본 연구에서는 일반적인 보호채널의 신뢰도를 추정하기 위하여, 식(7)의 관계를 이용하여 신호감지기를 제외한 가압기 저 압력보호 회로구성에 대한 계통 신뢰도를 각각 5 년 주기에 대하여 계산하였으며, 표 7 과 그림 3 에는 각각의 계산 결과를 나타내었다.

표 7. 경년화에 의한 가압기 저압력 원자로 정지계통 신뢰도 계산값

원자로 보호변수	운 전 년 수			
	5 년	10 년	15 년	20 년
가압기 저압력 원자로 보호계통	9.78×10^{-1}	8.93×10^{-1}	7.55×10^{-1}	6.02×10^{-1}

그림 3. 경년화에 의한 가압기 저 압력 원자로 정지계통 신뢰도 변화곡선

이상의 결과를 종합하면 표 7 과 그림 3 에는 각각 나타낸 바와 같이, 최초 기기 설치 후 5 년에서 신뢰도 감소율이 0.022 인데 비하여, 이후 5 년 주기의 신뢰도 감소율은 각각 0.085, 0.138, 0.153 으로 나타나는 것으로, 설치 후 10 년이 경과하면 운전 신뢰도가 급격히 감소하며 15 년 초과 시에도 기울기의 변화율이 크게 변하지 않음을 알 수 있다. 따라서 이는 연속 운전 후 10 년에서 15 년 사이에 원전 제어모듈 중 취약 모듈에 대한 대대적인 교체가 요구됨을 의미하는 것으로 해석되어진다. 그러나 현장보수 및 예방정비 내용에 따라 위의 설비 교체 주기는 다소 연장되어질 수 있을 것으로 평가되어지며, 운전변수에 따라 계

통 구성이 상이하게 나타남으로, 종합적인 설비교체 작업을 위해서는 보다 광범위한 검토를 수행할 필요가 있는 것으로 판단되어진다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내 웨스팅하우스형 원전 보호계통 전자모듈에 대한 상대 운전 신뢰도와 경년화에 의한 신뢰도 변화를 분석하였다. 분석 결과, 원자로 정지계통 전자모듈 중 가장 신뢰도가 우수한 것은 NLL1(시간응답 보상모듈)과 NLP2(루푸전원 공급모듈) 임을 알 수 있었으며 가장 신뢰도가 낮은 것은 NAL1(비교기 회로모듈) 임을 알 수 있었다. 또한, 이들 전자모듈의 신뢰도는 기기 설치 후 10 년이 경과하면 운전 신뢰도가 급격히 감소함을 알 수 있었다. 따라서 별도의 예방정비 프로그램을 강화하지 않는 한, 일반적으로 연속 운전 후 10 년에서 15 년 사이에 원전 제어모듈 중 취약 모듈에 대한 대대적인 교체가 요구되는 것으로 판단되어진다.

그러나 본 연구의 계산과정에서 적용된 신뢰도 추정모델과 입력 데이터의 내용의 불확실성이 존재함으로 절대적인 평가는 현 단계에서 수행되지 못하였다. 또한 현장 보수 및 예방정비 내용에 대한 평가와 각각의 운전변수에 대한 운전 신뢰도 평가가 수행되지 못하였다. 따라서 이러한 부분은 향후 보다 심층적이고, 광범위한 연구를 수행할 필요가 있는 것으로 사료되어진다.

6. 참고 문헌

1. MIL-HDBK-217F Reliability Prediction of Electronic Equipment, DOD, Washington DC, Dec., 1991
2. MIL-STD-756B Reliability Modeling and Prediction, DOD, Washington DC, Nov., 1981
3. J. B. Bowles, A Survey of Reliability Prediction for Microelectronic Devices, IEEE Transaction on Reliability, vol 41, NO. 1, 1992, March
4. Instruction Book for Process Instrumentation and Control, Westinghouse Electric Corporation
5. R. L. Jansen et al., WCAP-10271-P-A Evaluation of Surveillance Frequencies and Out of Service Times for the Reactor Protection Instrumentation System, Westinghouse Electric Corporation, May 1986