

최종연구보고서

원자로보호계통 제어기기모듈에 대한 고장검출기능과
신뢰도의 상관관계 분석

Dependability Analysis of Fault Detection Function and
Reliability for Control Module of Reactor Protection System

연구기관
충남대학교

과학기술부

제 출 문

과학기술부 장관 귀하

본 보고서를 “원자로보호계통 제어기기 모듈에 대한 고장검출 기능과 신뢰도와의 상관관계 분석” 과제의 보고서로 제출합니다.

2004 . 5 . 31

주관연구기관명 : 충남대학교

주관연구책임자 : 유 준

연 구 원 : 김 지 영
박 홍 래

보고서 초록

과제관리번호	M2-0203-00-0004	해당단계 연구기간	2002. 7. 1 ~ 2004. 5. 31	단계 구분	1/1
연구사업명	중 사업명	원자력연구기반확충사업			
	세부사업명	기초연구분야			
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명	원자로보호계통 제어기기 모듈에 대한 고장검출 기능과 신뢰도의 상관관계 분석			
연구책임자	유 준	해당단계 참여연구원수	총 : 2.4 명 내부 : 0.4 명 외부 : 2.0 명	해당단계 연구비	정부: 50,900천원 기업: 천원 계: 50,900천원
연구기관명 및 소속부서명	충남대학교		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :	상대국연구기관명 :			
위탁연구	연구기관명 :	연구책임자 :			
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	69
<p>아날로그 시스템은 하드웨어 부품만을 사용하여 원하는 기능을 수행하도록 설계 및 제작되어 있으므로 다른 목적으로 기능변경이 불가능하다. 그러나 마이크로프로세서 기반의 시스템은 응용 소프트웨어의 프로그래밍을 통하여 목적에 따라 다양한 기능으로 활용할 수 있다. 이와 같이 사용자의 목적에 따라 다양한 용도로 사용하기 위한 디지털 시스템은 아날로그 시스템과 비교하여 일반적으로 사용된 부품의 수가 많다. 그러므로 단순히 Military Standard에서 제시한 Part Count Method를 사용하면 아날로그 시스템보다 많은 부품을 사용하는 디지털 시스템의 신뢰도가 낮을 수밖에 없는 실정이다. 또한 디지털 시스템은 일부 하드웨어 및 소프트웨어의 추가만으로 고장진단(surveillance test) 기능을 용이하게 구현할 수 있다. 그 결과 아날로그 시스템과 비교할 때 시스템의 고장 및 이상상태를 조기에 검출하고 고장수리를 수행할 수 있으므로 시스템의 신뢰도 및 안전성을 향상시킬 수 있다. 이 경우에도 Part Count Method를 사용하면 추가된 고장진단 기능에 따른 하드웨어 수량의 증가로 작용해 시스템의 신뢰도가 낮게 평가되는 모순이 발생한다.</p> <p>이러한 모순을 해결하기 위하여 본 연구에서는 고장검출기능의 추가에 따른 고장률이 상승하는 모순을 입증하고, 이러한 모순을 제거하기 위한 4기능 고장모델 평가기법을 제시하였다. 4기능 고장모델은 제어기기 모듈에 포함된 부품에 고장이 발생했을 때 원전의 안전에 미치는 영향을 FMEA 기법으로 파악하여, 안전 심각성에 따라 4개의 기능그룹으로 분류하고, 이를 활용하여 고장률을 평가하였다. 이들 기능그룹에 따라 제안한 고장률 평가기법을 적용한 결과 추가된 고장진단 기능에 의한 신뢰도 개선효과를 입증하였다.</p>					
색인어 (각 5개 이상)	한글	고장률, 신뢰도, 안전성, 원전, 계측제어			
	영어	Failure Rate, Reliability, Safety, Nuclear, Instrumentation and Control System			

요 약 문

I. 제 목

원자로보호계통 제어기기 모듈에 대한 고장검출 기능과 신뢰도와의 상관관계 분석

II. 연구개발의 목적 및 필요성

현재 일반적으로 사용하고 있는 디지털 제어기기 모듈의 신뢰도 계산 기법으로는 Military Standard(MIL-HDBK-217)에서 제안하는 Part Count Method를 사용하고 있다. Part Count Method는 제어기기 모듈의 제작에 사용된 부품의 수량, 품질계수, 운전환경계수를 이용하여 고장률(failure rate) 및 신뢰도를 예측한다. 이 방법은 부품의 수량에 따라 계산하므로, 신뢰도를 높이기 위해 디지털 시스템에 추가된 기능이 도리어 신뢰도를 감소시키는 결과를 초래하고 있다. 그러므로 제어기기 모듈의 신뢰도를 정확히 계산하기 위해서는 기존 사용하고 있는 Part Count Method에 추가하여 디지털 기술에 적합한 신뢰도 평가방법을 개발하였다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 원전 신뢰도 평가기법 자료조사
- 원자로보호계통 제어기기(PLC : Programmable Logic Controller) 사양도출
- 주기기시험기능을 갖는 디지털 제어기기의 신뢰도 평가기법 제안

IV. 연구개발결과

본 연구에서는 고장검출기능의 추가에 따른 고장률이 상승하는 모순을 입증하고, 이러한 모순을 제거하기 위한 4-기능 고장모델 평가기법을 제시하였다. 4-기능 고장모델은 제어기기 모듈에 포함된 부품에 고장이 발생했을 때 원전의 안전에 미치는 영향을 FMEA 기법으로 파악하여, 안전 심각성에 따라 4개의 기능그룹으로 분류하고, 이를 활용하여 고장률을 평가하였다. 이들 기능그룹에 따라 제안한 고장률

평가기법을 적용한 결과 추가된 고장진단 기능에 의한 신뢰도 개선효과를 입증하였다.

V. 연구개발결과의 활용계획

본 연구에서 제시된 4-기능 신뢰도 모델은 원전 계측제어시스템 (KNICS) 개발 사업단 과제에서 개발하는 안전등급 PLC 제어기기의 고장률 및 신뢰도 분석에 적용될 예정이다.

S U M M A R Y

I. Title

Dependability Analysis of Fault Detection Function and Reliability for Control Module of Reactor Protection System

II. Object and Necessity of Project

The Part Count Method of the military standard MIL-HDK-217F has been used for the reliability prediction of the nuclear field. The Part Count Method predicts the failure rate of the electronics component according to the number of component, quality factor, operation environment and other factors. Normally the components added for the fault detection can be estimated that the reliability of the unit or system will be improved by the early fault detection. But it is predicted to have poor reliability in case of the components added for the fault detection due to the increased number of components. To compensate this discrepancy, the quantitative reliability analysis method is suggested using the functional separation model in this project.

III. Scope and Tasks

- o Reliability prediction with the Part Count Method for the digital output module of the PLC, and proving the discrepancy of the Part Count Method.
- o Suggestion of the quantitative reliability analysis method using the functional separation model.

IV. Result of Project

- o Suggestion of the quantitative reliability analysis method using the functional separation model.

V. Application Proposal and Future Plan

- o This suggested method will be applied for the reliability prediction of the safety grade PLC having developed in the KNICS project of the MOST.

C O N T E N T S

Chapter I. Introduction

1. Objective and Necessity of Project
2. Goal and Task of Project

Chapter II. State of the Art for Reliability Prediction in the Nuclear Fields

1. Reliability Prediction Methods
2. Introduction of Reactor Protection System

Chapter III. Reliability Prediction

1. Design of Surveillance Test Function and Reliability Analysis with Part Count Method
2. Suggestion the Quantitative Reliability Analysis Model
3. Reliability Analysis with Suggested Quantitative Reliability Analysis Model

Chapter IV. Accomplishment of Project and Contribution to Technology Development

Chapter V. Proposal for Application

Chapter VI. References

목 차

제 1 장 개 요	1
제 1 절 연구개발의 필요성	1
제 2 절 연구개발 목표 및 내용	2
1. 연구개발 목표	2
2. 연구내용 및 범위	2
제 2 장 기술개발 현황	3
제 1 절 신뢰도 분석기법 자료조사	3
1. 고장수목분석(FTA) 기법	3
2. 고장모드영향분석(FMEA) 기법	4
3. 다중화된 보호계통의 정량적 신뢰도 분석기법 자료조사	5
제 2 절 원자로 보호계통 개요	7
1. 비교논리 프로세서(BP)	7
2. 동시논리 프로세서(CP)	7
3. 자동시험 및 연계프로세서	8
4. 캐비닛운전원 모듈	8
제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과	10
제 1 절 디지털 출력모듈 주기시험 기능 예비설계 및 신뢰도 평가	10
1. 개요	10
2. 고장검출 기능 설계	10
3. MIL-HDBK-217F에 의한 DO 모듈의 예비 정량적 신뢰도 분석	15
제 2 절 신뢰도 평가모델 정립	23
1. 신뢰도 평가 모델	23
2. 대상 분석	28
제 3 절 신뢰도 분석 및 평가	31
1. 부품 고장분석	31
2. DO모듈의 신뢰도 분석	32

3. 요약 및 결론	34
제 4 장 목표 달성도 및 관련분야에의 기여도	36
제 5 장 연구개발 결과의 활용계획	37
제 6 장 참고문헌	38
부록 1 부품목록	41

그림 목 차

그림 1. FTA 수행 예제	3
그림 2. 2-out-of-4 원자로보호계통의 정상적인 동작을 위한 신뢰성블록도	6
그림 3. RPS 구성도	9
그림 4. 고장 검출기능이 없는 DO 모듈의 개략적인 구성도	11
그림 5. 고장 검출기능을 갖는 DO 모듈의 개략적인 구성도	15
그림 6. 부품별 고장률 분포도	17
그림 7. 단일 DO모듈의 Markov 모델	19
그림 8. 고장검출 기능이 있는 DO모듈의 Markov 모델	22
그림 9. 고장검출 기능이 없는 신뢰도 모델	23
그림 10. 고장검출 기능이 있는 신뢰도 모델	25
그림 11. DC 24V 디지털 출력장치 구성도	28

표 목 차

표 1. DO모듈의 FMEA 결과	12
표 2. 고장검출 기능이 없는 DO모듈의 기본 고장률	16
표 3. DO모듈 고장검출 기능의 고장률	18
표 4. DO모듈의 고장률 비교	18
표 5. DO모듈의 고장 상태도	21
표 6. 부품상태 조합에 의한 장치고장	26
표 7. DO모듈 부품 리스트 및 기능분류	29
표 8. DO모듈의 부품 고장률	31
표 9. 고장검출 기능이 없는 DO모듈의 고장률 분석	33
표 10. 고장검출 기능이 있는 DO모듈의 고장률 분석	34

제 1 장 개 요

제 1 절 연구개발의 필요성

현재 국내에서 운전되고 있는 원자로보호계통은 아날로그 시스템으로 구성되어 있으며, 최근 설치 및 시운전되고 있는 울진 5&6 호기에 이르러 비로소 디지털 시스템이 적용되고 있다. 원전 계측제어계통에 디지털 시스템이 적용되므로 마이크로프로세서 및 소프트웨어의 사용에 따른 신뢰성 및 안전성이 새로운 중요한 인허가 현안으로 작용하고 있다.

원자력분야에서는 일반적으로 Military Standard(MIL-HDBK-217F)에서 제안하고 있는 Part Count Method 또는 Part Stress Method를 사용하여 제어기기의 신뢰도를 계산하고 있다[1]. 이들 방법은 제어기기 모듈에 사용된 모든 부품의 수량, 품질계수, 운전환경계수를 이용하여 고장률(failure rate) 및 신뢰도를 예측한다. 사용된 부품의 수량을 이용하여 신뢰도를 예측하는 Military Standard 방법은, 경우에 따라서는 신뢰도를 높이기 위해 추가된 부품에 - 조기고장검출 기능 및 자가진단 기능 등 - 의하여 도리어 신뢰도가 감소되는 결과를 초래하고 있다. 일반적으로 원자력발전소는 단일고장(Single Mode Failure)에 대처하기 위하여 다중화 구조로 설계되어 있으며, 제어기기 모듈은 다양한 고장검출 기능을 포함하고 있다. 그러므로 제어기기 모듈의 신뢰도를 정확히 계산하기 위해서는 기존 사용하고 있는 MIL-HDBK-217F의 방법에 추가하여 원전에 적합한 신뢰도 평가방법론의 개발이 필요하다.

아날로그 시스템은 하드웨어 부품만을 사용하여 원하는 기능을 수행하도록 설계 및 제작되어 있으므로 다른 목적으로 기능변경이 불가능하다. 그러나 마이크로프로세서 기반의 시스템은 응용 소프트웨어의 프로그래밍을 통하여 목적에 따라 다양한 기능으로 활용할 수 있다. 이와 같이 사용자의 목적에 따라 다양한 용도로 사용하기 위한 디지털 시스템은 아날로그 시스템과 비교하여 일반적으로 사용된 부품의 수가 많다. 그러므로 단순히 Military Standard에서 제시한 Part Count Method를 사용하면 아날로그 시스템보다 많은 부품을 사용하는 디지털 시스템의 신뢰도가 낮을 수밖에 없는 실정이다. 또한 디지털 시스템은 일부 하드웨어 및 소프트웨어의 추가만으로 고장진단(surveillance test) 기능을 용이하게 구현할 수 있다. 그 결과 아날로그 시스템과 비교할 때 시스템의 고장 및 이상상태를 조기에 검출하고 고장수리를 수행할 수 있으므로 시스템의 신뢰도 및 안전성을 향상시킬 수 있다. 이 경우에도 Part Count Method를 사용하면 추가된 고장진단 기능에 따른 하드웨어 수량의 증가로 작용해 시스템의 신뢰도가 낮게 평가되는 모순이 발생한다. 본 연구에서는 이러한 Part Count Method의 모순을 해결하고, 원자로보호계통 제어기기 모듈에 주기시험 기능이 추가되었을 때 시스템의 신뢰도가 향상되는 상관관계를 규명하고 이를 정량적으로 평가할 수 있는 방법을 개발하므로, 원전의 신뢰도 및 안전성을 정확하게 분석할 수 있는 기반을 제공한다.

제 2 절 연구개발 목표 및 내용

1. 연구개발 목표

○ 최종목표

원자로보호계통 제어기기 모듈에 주기시험 기능이 추가됨으로 개선되는 신뢰도의 정량적 평가방법 개발

○ 1차년도 목표

고장검출기능이 제어기기 신뢰도에 미치는 개선효과의 정량적 평가방법론(안) 정립

○ 2차년도 목표

정량적 평가방법론 적용 및 완성

2. 연구내용 및 범위

○ 원전 신뢰도 평가기법 자료조사

- FMEA(Failure Mode Effect Analysis) 기법조사
- FTA(Fault Tree Analysis) 기법조사
- 시스템 레벨 Uncertainty 기법조사

○ 원자로보호계통 제어기기(PLC : Programmable Logic Controller) 사양도출

- 원자로보호계통 PLC 제어기기의 디지털출력(DO : Digital Output) 모듈에 대해 MIL-HDBK-217F를 사용하여 신뢰도평가 시 발생하는 문제점 제시
- FMEA 분석을 통하여, 안전등급 PLC 제어기기의 신뢰도를 높이기 위해 디지털 출력 모듈이 가져야 할 주기시험기능의 도출 및 회로설계

○ 주기시험기능을 갖는 디지털 제어기기의 신뢰도 평가

- 디지털 제어기기의 주기시험 기능이 신뢰도에 미치는 영향을 고려한 정량화 평가 방법 제시
- 원자로보호계통 PLC 제어기기 디지털출력 모듈의 신뢰도 개선효과 정량화 평가 방법론 적용

제 2 장 기술개발 현황

제 1 절 신뢰도 분석기법 자료조사

1. 고장수목분석(FTA) 기법

- FTA 목적 : FTA는 보호계통 및 이를 구성하고 있는 제어기기의 설계 취약성을 파악하기 위해 수행한다[2,3].
- FTA 방법 : FTA는 원자로정지변수에 대해 원자로정지가 이루어지지 못할 사건을 정점사건으로 설정하고, 정점사건을 유발하는 고장의 원인을 하위레벨에서 찾아 논리도형(logic diagram)으로 표현하는 연역적 분석방법이다[2-4].

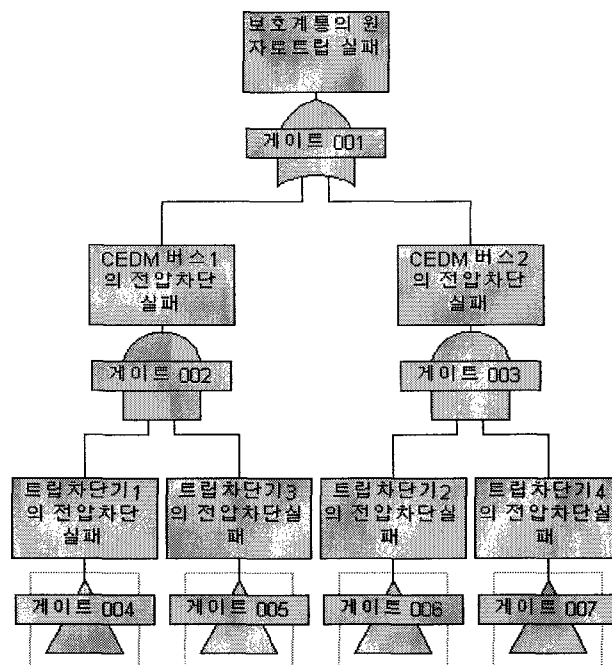


그림 1. FTA 수행 예제

□ 자료조사 결과

- FTA는 원자로정지변수인 “Low steam generator level”의 상황에서 원자로정지가 이루어지지 못할 확률인 불가용도(unavailability)를 정량적으로 평가하기 위해 수행

하였다.

- 일반적으로 원자로보호계통에서 수행하고 있는 FTA 분석의 범위에는 원자로 보호계통과 관련된 각종 센서, 캐비닛 내부 시스템, 원격운전원 모듈, 원자로 트립 스위치기어 등의 독립고장, 운전원의 인적오류로 인한 보호계통의 고장, 그리고 공통원인 고장을 포함한다.
- 그러나 소프트웨어의 정량적 신뢰도평가 기법이 확립되지 않아서 현재 수행되고 있는 FTA 분석에는 소프트웨어의 설계오류로 인한 고장은 제외하고 있다.
- FTA 분석결과 원자로보호계통의 불가용도에 가장 큰 영향을 주는 요소는 Trip switchgear이며, 이 시스템의 개선 없이 PLC 제어기기의 개선만으로 전체 원자로 보호계통의 불가용도를 개선하기에는 한계가 있다.
- FTA 분석결과, 규제기관에서 디지털 원자로보호계통의 원전적용을 결정하기 위한 판단기준으로 사용하고 있다. 일반적으로 기존 아날로그 원자로보호계통의 불가용도 값인 $2.59E-06$ [failure/demand]보다 디지털 보호계통의 불가용도가 개선되면 원전적용이 가능하다는 입장이다.

□ FTA 기법 활용 : 일반적으로 FTA는 원전 안전성을 정량적으로 분석하기 위한 일환으로 확률론적안전성평가(PSA) 분야에서 사용하고 있다. 본 연구에서는 FTA 기법 대신 미국 전력연구소의 EPRI URD[5]에서 요구하고 있는 Military 규격인 MIL-HDBK-217F "Reliability Prediction of Electronic Equipment"의 요건에 따라 정량적 신뢰도 분석을 수행한다. 결론적으로 FTA 기법은 본 연구에서 활용하지 않았다.

2. 고장모드영향분석(FMEA) 기법

□ FMEA 목적 : FMEA는 보호계통 또는 PLC 제어기기에 포함된 잠재적인 고장모드를 파악하고, 고장이 발생한 경우 이를 신속히 검출하고 고장의 파급영향을 차단할 수 있는 대책을 수립한다[6,7].

□ FMEA 방법 : FMEA는 원자로보호계통의 각 모듈에 고장이 발생하였을 경우 이 고장이 보호계통에 미치는 영향을 추적하는 상향식(bottom-up) 신뢰성분석 기법이다. FMEA 기법은 설계문서, 부품고장률 및 과거 고장이력을 이용하여 모든 운전모드에서 보호계통에 발생하는 고장, 고장의 검출기법, 그리고 고장이 보호계통에 미치는 영향 등을 분석한다. ANSI/IEEE Std. 352 "General Principles of Reliability Analysis of Nuclear Power Generating Station Safety System"[6]에서 제안한 일반적인 FMEA 수행절차는 다음과 같다.

- 시스템 및 서브시스템의 임무 확인
- 시스템 및 서브시스템의 분석수준 결정

- 기능별 블록 설정 및 신뢰성 블록도 작성
- 블록별 고장모드 도출
- 고장모드 선정 및 고장모드에 대한 추정원인 도출
- FMEA 작업표 작성
- 고장 등급산정 및 개선안 도출

- 자료조사 결과 : FMEA는 PLC 제어기기 각 모듈에서 발생한 고장이 보호시스템의 고유기능에 미치는 영향을 분석하고 대책을 마련하므로 10CFR Part50 부록 A에서 요구하는 단일고장기준을 만족하는 보호시스템 설계에 활용할 수 있다.
- FMEA 기법 활용 : 본 연구에서는 PLC 제어기기 DO모듈의 내부회로에서 발생하는 고장검출 기능을 설계하기 위하여 FMEA 기법을 활용하였다. 또한 DO모듈에 사용된 각 전자부품의 고장모드 및 영향을 분석하고, DO모듈의 고유 기능을 하는 주기능 파트와 고장검출을 위한 파트로 분리하는데 사용하였다.

3. 다중화된 보호시스템의 정량적 신뢰도 분석기법 자료조사

- 목적 : 일반적으로 보호시스템은 단일고장(Single Failure Criteria)을 방지하기 위하여 다중화 구조로 설계되어 있다. 다중화된 보호시스템에서 시스템 차원의 정량적 신뢰도 분석 기법을 파악한다[8,9].
- 이항분포(Binomial Process)를 이용한 Mean Time Between Forced Outage 계산방법 : PLC 제어기기의 고장으로 인한 원자로보호시스템의 불시정지 빈도를 평가하기 위한 방법으로 원자력연구소에서 제안한 보호시스템 평균고장유발시간(MTBF : Mean Time Between Forced Outage) 계산기법을 분석하였다. 보호시스템은 일반적으로 2-out-of-4 시스템으로 구성되어 있으며, 이들 다중화 시스템에서 2개 이상의 채널에서 동시에 채널트립 신호가 발생하면 원자로가 정지된다. 2-out-of-4 시스템의 신뢰성 블록도는 다음 그림 2와 같다[9-11].

2-out-of-4 로직으로 구성된 보호시스템은 2개 이상의 채널에서 동시에 고장이 발생하면 원자로가 정지되므로, 원자로가 정지되지 않고 시스템이 정상적으로 동작하기 위해서는 4개의 채널 중에서 적어도 3개 이상의 채널이 정상적으로 동작하여야 한다. 시스템 운전 중에 한 채널이 고장난 상태에서 고장수리가 완료되는 MTTR(Mean Time To Repair) 시간 내에 다른 채널에서 중복하여 고장이 발생하면 보호시스템의 기능을 상실한다.

2-out-of-4 로직을 구성하고 있는 4개의 채널 중 어떤 한 채널의 고장률은 ${}_4C_1 \times \lambda$ 이고, 고장난 채널의 고장수리 시간 MTTR 동안 나머지 3개 채널에서 새로운 고장이 발생할 확률은 ${}_3C_1 \times \lambda \times MTTR$ 이다. 여기서 λ 는 채널의 고장률이며, 모든 채

널의 고장률은 동일한 것으로 가정하였다. 그러므로 2-out-of-4 보호계통의 전체 고장률 λ_{sys} 는 다음과 같다.

$$\lambda_{sys} = {}_4 C_1 \times \lambda \times {}_3 C_1 \times \lambda \times MTTR = 12 \lambda^2 \times MTTR \quad (2.1)$$

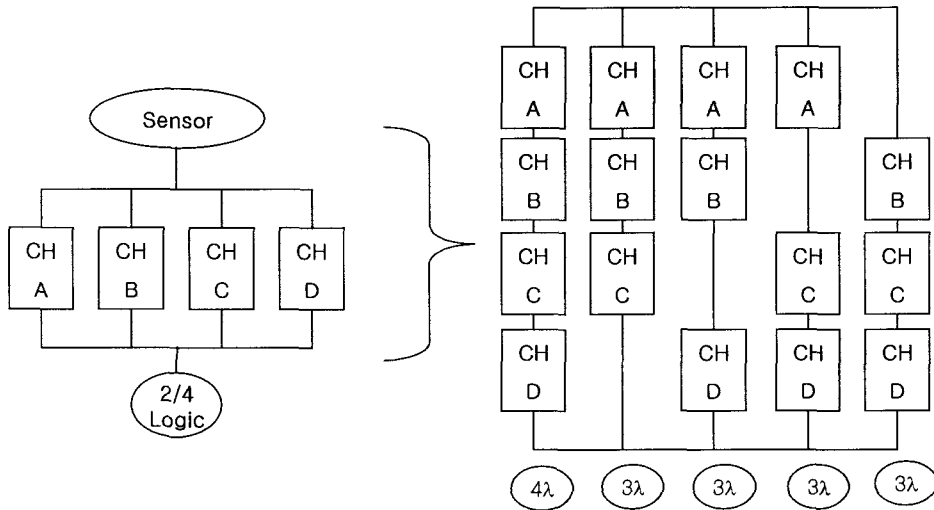


그림 2. 2-out-of-4 원자로보호계통의 정상적인 동작을 위한 신뢰성블록도

제 2 절 원자로 보호계통 개요

원자로보호계통은 4개의 채널로 구성되며, 각 채널에는 다음의 디지털 제어기기가 포함되며 각 채널은 다음 그림과 같은 구성을 갖는다[12-15].

- 비교논리 프로세서(BP) : PLC
- 동시논리 프로세서(CP) : PLC
- 자동시험 및 연계프로세서(ATIP) : PLC
- 캐비닛운전원모듈(COM) : 터치화면 및 산업용 컴퓨터와 하드웨어 스위치들

1. 비교논리 프로세서(BP)

- 비교논리 프로세서는 트립변수를 취득하여 이 값을 트립설정치와 서로 비교하여 트립 또는 예비트립 상태를 결정한다.
- 각 채널에는 동일한 구성을 갖는 2개의 비교논리 프로세서(그룹 1 및 2)가 설치된다. 각 비교논리 프로세서 PLC의 입력모듈은 트립변수와 연계되어 있고, 시험을 위해 자동시험 및 연계프로세서(ATIP)에서 제공하는 시험신호와 연계된다.
- 비교논리 프로세서 디지털 입력모듈은 발전소 기동 및 정지시 불필요한 트립을 발생시키지 않기 위해 운전우회(operating bypass) 신호를 취득한다.
- 그룹 1 및 2 비교논리 프로세서는 동일한 트립논리를 가지며, 서로 독립적으로 논리를 수행한다.
- 비교논리 프로세서의 트립논리를 통해 발생된 트립상태신호는 동일 채널 및 타 채널의 동시논리 프로세서로 전송되며, 동시논리 프로세서는 각 채널의 비교논리 프로세서에서 전송된 트립상태신호를 조합하여 2/4 보팅논리를 계산한다. 비교논리 프로세서의 트립상태신호는 안전데이터링크(SDL)를 통해 동시논리 프로세서로 전송된다.
- 비교논리 프로세서는 비교논리 작동의 건전성과 안전데이터링크의 건전성을 감시하기 위해 박동신호를 발생시켜 각 채널의 동시논리 프로세서로 전송한다.

2. 동시논리 프로세서(CP)

- 동시논리 프로세서는 각 채널의 비교논리 프로세서에서 전송된 트립상태신호를 조합하여 2/4 보팅논리를 수행한다. 2/4 보팅논리는 각 변수 별로 수행되며, 보팅결과를 조합하여 원자로 트립 및/또는 공학적안전설비-기기제어계통 작동 개시신호를 발생시킨다.

- 각 채널에는 동일한 구성을 갖는 2개의 동시논리 프로세서(그룹 1 및 2)가 설치된다. 각 동시논리 프로세서는 동일 그룹의 비교논리 프로세서로부터 트립상태신호를 제공받아 2/4 보팅논리를 수행한다.
- 원자로 트립 및 공학적안전설비-기기제어계통 작동 개시신호는 디지털 출력모듈을 통해 원자로트립 개시회로 및 공학적안전설비-기기제어계통 개시회로로 전송된다.
- 동시논리 프로세서는 각 채널의 비교논리 프로세서에서 전송된 박동신호의 건전성을 감시하여 어떤 채널에 오류가 있을 경우 그 채널의 비교논리 프로세서 출력은 모두 트립상태로 간주한다.
- 동시논리 프로세서는 유지보수를 위한 트립채널우회(trip channel bypass) 및 전 채널 우회(all bypass) 신호를 디지털 입력모듈을 통해 취득한다.

3. 자동시험 및 연계프로세서

- 자동시험 및 연계 프로세서는 원자로보호계통 각 채널의 운전상태를 감시하고, 온라인 자동시험 및 수동시험을 수행한다.
- 자동시험 및 연계 프로세서는 비교논리 및 동시논리 프로세서의 건전성을 감시하고, 노심보호연산기계통, 원자로 정지차단기, 캐비닛 내부 전원공급장치 및 온도, 캐비닛 문의 개방신호 등 채널 내 기기들의 작동상태를 감시한다.
- 자동시험 및 연계 프로세서는 타 채널의 운전상태를 취득하고, 공학적안전설비-기기 제어계통의 운전상태를 감시한다.
- 온-라인 자동시험은 비교논리 및 동시논리프로세서의 하드웨어와 소프트웨어 논리의 건전성을 주기적으로 시험하는 기능이다. 따라서 자동시험 및 연계프로세서는 시험신호를 하드와이어를 통해 비교논리 및 동시논리 프로세서의 입력모듈로 전송한다. 이 시험은 정해진 주기마다 한번씩 자동으로 이루어진다.
- 수동시험은 운전원 또는 보수요원의 시험요구에 따라 수행된다. 시험은 캐비닛운전원 모듈을 통해 개시되고, 자동시험 및 연계프로세서에서 관련된 시험신호를 발생시킨다.

4. 캐비닛운전원 모듈

- 캐비닛운전원모듈은 캐비닛 전면부에 부착되며, 터치화면과 산업용컴퓨터, 하드웨어 스위치로 구성된다. 트립채널우회 및 전 채널우회와 같이 원자로보호계통 작동과 관련된 제어기능은 캐비닛운전원모듈의 하드웨어 스위치를 통해 개시된다.
- 캐비닛운전원모듈의 터치화면부는 공정변수변화, 설정치변화, 노외핵계측계통 값의 변

화, 노심보호연산기-제어봉 인출금지 신호 존재여부, 비교논리 및 동시논리 프로세서의 운전상태 등을 표시하고, 자동주기시험 및 수동개시 자동시험의 결과를 표시한다. 캐비닛운전원모듈은 원자로보호계통의 운전상태를 정보처리계통(IPS), 경보 및 지시계통(QIAS), 기타 관련 비안전계통으로 전송하기위한 게이트웨이(gateway)로 사용된다.

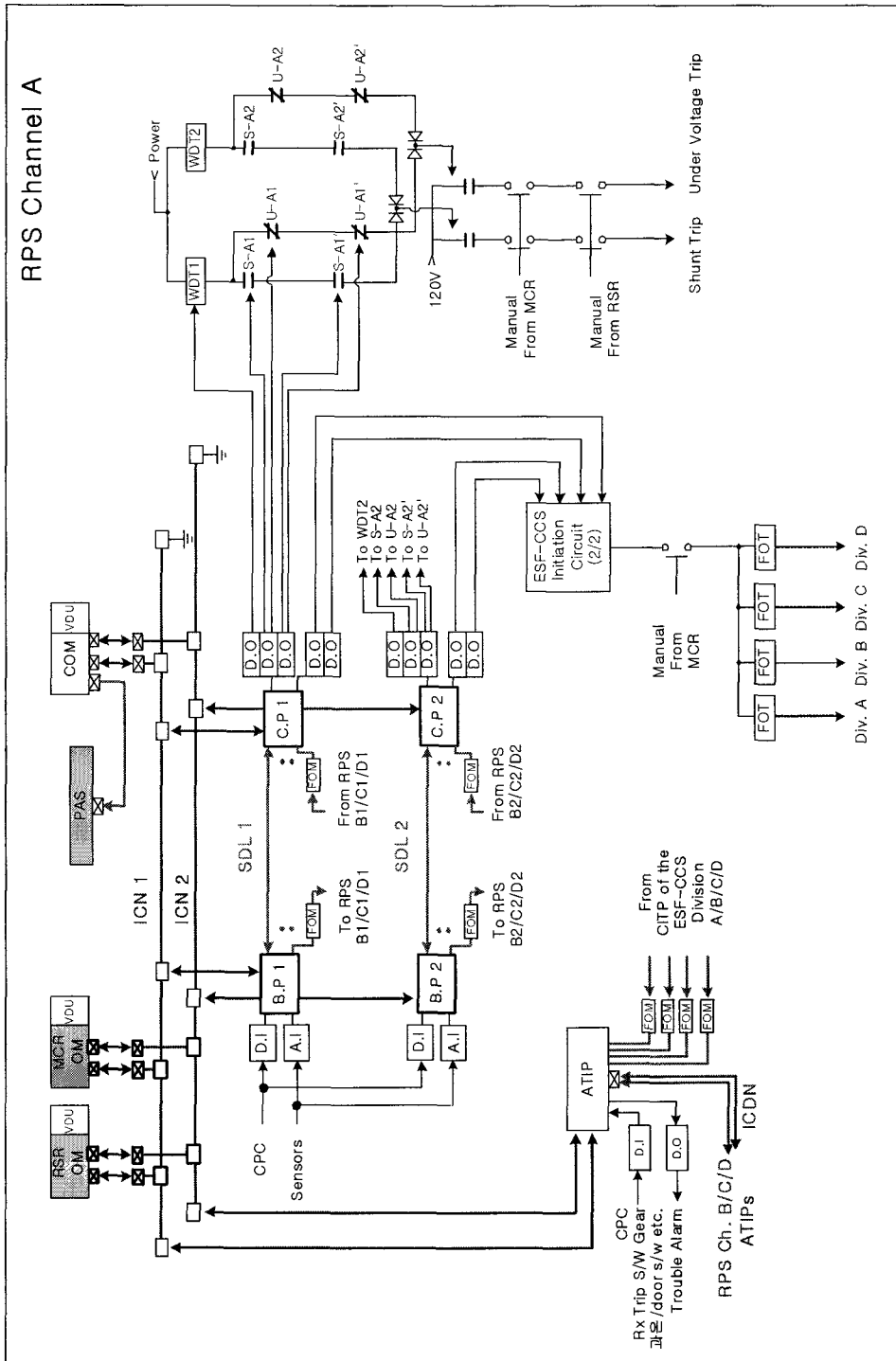


그림 3. RPS 구성도

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 1 절 디지털 출력모듈 주기시험 기능 예비설계 및 신뢰도 평가

1. 개요

산업체에서 사용하고 있는 PLC 제어기기는 CPU 모듈 및 아날로그 입력모듈에 대해서는 자가진단 및 드리프트 보정기능을 갖고 있으나, 일반적으로 디지털출력(DO) 모듈의 고장을 진단하고 검출할 수 있는 기능이 없다. 그러나 안전등급 PLC 제어기기의 DO모듈 출력단자는 원자로보호계통에서 발생한 트립신호를 직접 개시회로에 전달하는 매우 중요한 역할을 한다.

그러므로 본 절에서는 FMEA(Failure Mode Effect Analysis)[6] 기법을 사용하여 기존 산업용 PLC의 DO모듈이 갖는 기능 및 고장영향을 분석하고, 이를 바탕으로 원자력분야에서 사용하기 위한 PLC 제어기기의 DO모듈에 대한 고장진단 기능을 예비설계 하였다. 또한 예비설계된 고장진단 기능을 포함한 DO모듈에 대해 MIL-HDBK-217F를 사용하여 고장률을 평가하였다. 그 결과 DO모듈에 추가된 고장진단 기능에 의하여 고장률이 나쁘게 평가되었으며, 이를 개선하기 위하여 신뢰도 개선효과 정량화 방법론을 제안하였다. 제안된 방법을 적용한 결과 고장검출 기능을 갖는 PLC 제어기기에 고장이 발생하면 신속히 고장유무 및 고장원인을 파악하고 사후보전(corrective maintenance)을 수행할 수 있으므로 원자로보호계통의 가용도가 개선됨을 확인하였다[16-19].

2. 고장검출 기능 설계

가. 디지털 출력모듈 선정사유

원자로보호계통과 이를 구성하고 있는 안전등급 PLC 제어기기의 고장은 일반적으로 주기시험이나 watch-dog timer에 의해 검출된다. 그러나 PLC 제어기기의 모듈을 구성하고 있는 내부회로에서 발생한 고장은 하나의 출력단자 또는 한 개의 부품이 제공하는 기능만을[일반적으로 한 개의 부품으로 8개의 출력단자를 처리] 상실하게 된다. 이러한 부분고장은 주기시험 또는 watch-dog timer에 의해 검출이 어려우며, 오직 정기검사 기간에 수행하는 논리시험 때만 고장검출이 가능하다.

이와 같이 PLC 제어기기를 구성하는 내부회로에서 고장이 발생하였으나 검출되지 않고 잠재된 경우에는, 원자로 정지가 필요한 상황에서 원자로를 적절히 정지시킬 수 없다.

특히 동시논리 프로세서를 구성하고 있는 PLC 제어기에서 제공하는 채널트립 신호는 DO모듈의 출력단자를 통해 원자로보호계통의 개시회로로 직접 전달되므로, 동시논리 프로세서에 설치된 DO모듈의 건전성은 원전의 안전에 중요한 영향을 미친다. 이와 같이 원자로의 안전에 중요한 영향을 미치는 DO모듈의 내부회로 고장을 검출할 수 있는 회로분석을 위하여 FMEA를 수행하였다.

나. 디지털 출력모듈 개요

DO모듈은 원자로보호계통의 개시회로에 원자로정지신호를 전달하는 장치이다. DO모듈은 CPU에서 전송된 신호를 디코드 및 저장하는 장치, 외부 기기로부터 격리를 위한 광절연기, 그리고 각 출력 접점의 동작상태를 감시하기 위한 LED로 구성되어 있다. 본 연구에서 사용한 DO모듈은 릴레이 출력회로이며 구성은 다음 그림과 같다.

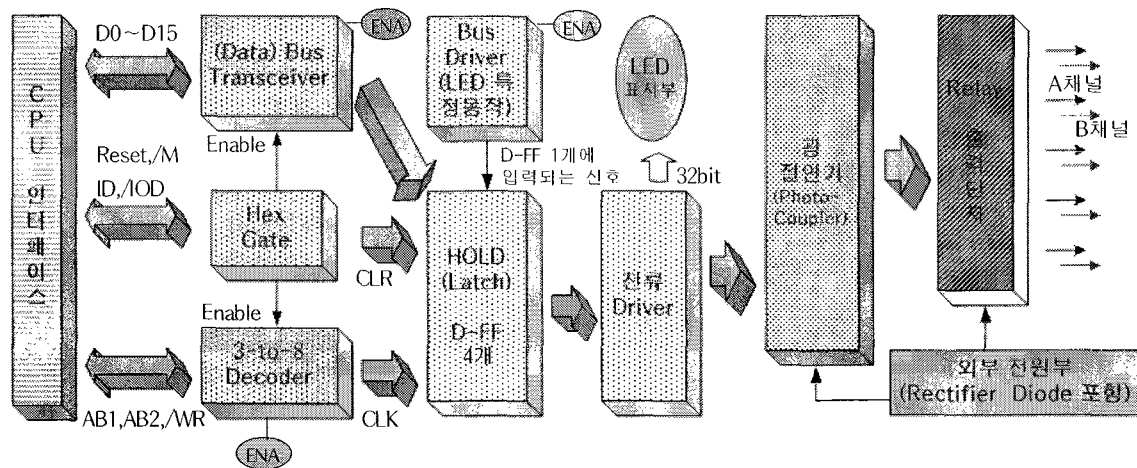


그림 4. 고장 검출기능이 없는 DO 모듈의 개략적인 구성도

각 블록에 대한 구성과 기능은 다음과 같다.

- Buffer Memory : CPU에서 데이터 버스를 통해 전송된 데이터, 주소신호 및 상태정보를 저장하는 74HC245(3-state bus transceiver), 74HC244(3-state bus driver) 등으로 구성되어 있다.
- Decoder : 74HCT138(3-to-8 line decoder/demultiplexer)을 사용하여 CPU의 주소를 디코드 한다. 디코드된 출력신호는 74HC245의 선택신호 및 다른 IC의 리셋신호로 사용한다.
- Latch 회로 : Clear를 가진 D-Type edge-triggered Flip-Flop으로 구성되어 데이터를 저장한다.

- LED 표시부 : PLC 내부에서 처리되고 있는 데이터의 ON/OFF 상태를 표시한다.
- Photo Coupler : PLC 외부에서 유입되는 장애신호를 차단한다.
- Relay : DO 모듈에서 처리된 신호를 외부로 전달한다.

다. 디지털 출력모듈의 고장검출 기능 예비설계

원자로보호계통은 다중화 구조로 설계되어 있으므로 단일 DO모듈의 고장으로 원자로 정지가 발생하지 않는다. 그러나 두개 이상의 DO모듈에서 동시에 고장이 발생하면 불시 정지가 발생한다. 즉 한 개의 DO모듈 출력단자에 발생한 잠재적인 고장이 검출되지 않고, 다른 채널의 DO모듈 출력단자에서 추가고장이 발생하면 원자로불시정지가 발생한다. 그러므로 DO 모듈의 고장 발생시 이를 신속하게 검출하고 운전원에게 알려주어 보수작업을 시작하기 위한 주기시험 기능의 도출이 필요하며, 이를 위하여 FMEA를 수행하였다. 다음 표는 DO 모듈의 FMEA 결과이다.

표 1. DO모듈의 FMEA 결과

No	Name	Failure Mode	Causes	Symptoms and Local Effects	Method of Detection
1	내부 회로 IC	U1, 4, 5, 8 Open/Short	납땜 불량, IC 불량, 제작중 불량	Latch 이상에 의한 전류 Driver에 이상신호 입력	Periodic Test
		U2, 3, 6, 7 Open/Short	납땜 불량, IC 불량, 제작중 불량	전류 Driver 출력이상에 의한 LED 동작 이상	Periodic Test
		U10 Open/Short	납땜 불량, IC 불량, 제작중 불량	디코더 불량에 의한 clock, enable 등의 신호이상으로 인해 각각 IC들의 이상동작	Periodic Test
		U9 Open/Short	납땜 불량, IC 불량, 제작중 불량	BUS Driver 불량에 의한 CPU 전송 데이터 오류, 특정한 LED 표시 이상동작	Periodic Test
		U11, 12 Open/Short	납땜 불량, IC 불량, 제작중 불량	데이터 transceiver 불량에 의해 CPU의 DATA를 전달하지 못함	Periodic Test
		U13 Open/Short	납땜 불량, IC 불량, 제작중 불량	일반 논리회로 불량으로 인해 U11,U12,U10의 ON/OFF 동작에 이상이 생기고, D-F/F에 Clear를 주지 못함	Periodic Test
2	Array Resistor	AR1-AR4 Open	납땜 불량, 저항 불량, 제작중 불량	전류가 흐르지 않고, 전압이 요구된 HIGH까지 오르지 않음	내부회로 IC 출력 전압 이상
		AR1-AR4 Short	납땜 불량, 저항 불량, 제작중 불량	데이터가 충돌하여 IC 입력신호 이상, 전류정격 초과	내부회로 IC 출력 전압 이상
		AR5-AR10 Open	납땜 불량, 저항 불량, 제작중 불량	전류가 흐르지 않고, 전압이 요구된 HIGH까지 오르지 않음	내부회로 IC 출력 전압 이상

		AR5-AR10 Short	납땜 불량, 저항 불량, 제작중 불량	데이터가 충돌하여 IC 입력신호 이상, 전류정격 초과	내부회로 IC 출력 전압 이상
		RP1-RP8 Open	납땜 불량, 저항 불량, 제작중 불량	LED에 전류 공급이 안 되어 불이 켜지지 않게 됨	None, LED 표시 이상
		RP1-RP8 Short	납땜 불량, 저항 불량, 제작중 불량	LED에 전류가 과다 공급되어 소자가 타거나 켜지는 불빛이 희미해짐	None, LED 표시 이상
3	Capacitor	C1, 2, 4, 5, 6 Open	납땜 불량, 커패시터 불량, 제작중 불량	잡음을 제거하지 못함	None
		C1, 2, 4, 5, 6 Short	납땜 불량, 커패시터 불량, 제작중 불량	과전류 발생 위험이 있고 IC의 CLR단자에 연결되어 있는 경우는 RESET이 안 됨	None
		C3 Open	납땜 불량, 커패시터 불량, 제작중 불량	정류된 교류파형을 일정한 DC 레벨로 변환하지 못하게 됨	None
		C3 Short	납땜 불량, 커패시터 불량, 제작중 불량	과전류 발생 위험이 있음	None
		BP1-BP11 Open	납땜 불량, 커패시터 불량, 제작중 불량	순간 전류가 많은 경우 전압강하가 증가하여 전압이 떨어지게 됨	Periodic Test
		BP1-BP11 Short	납땜 불량, 커패시터 불량, 제작중 불량	커패시터가 타고, 연결되어 있는 회로에 전원 공급을 못함	Periodic Test
4	Diode	LED1 Open	납땜 불량, 다이오드 불량	LED에 빛이 들어오지 않아 내부회로 동작여부를 알 수 없음	Periodic Test
		LED1 Short	다이오드 불량, 제작중 파손	LED에 들어오는 빛이 희미하거나 LED가 타고, 내부회로 동작여부를 제대로 전달하지 못함	Periodic Test
		D1-D16 Open	납땜 불량, 다이오드 불량	Relay에 적절한 신호특성을 전달하지 못하게 되고, 역기전력에 의한 전류를 차단하지 못하게 됨	Periodic Test
		D1-D16 Short	다이오드 불량, 제작중 파손	Relay에 적절한 신호특성을 전달하지 못하게 됨	Periodic Test
		D17 Open	납땜 불량, 다이오드 불량	정류작용이 원활하지 못하여 교류를 직류로 변환시키지 못하고 각 소자들에 교류전압에 의한 큰 영향을 주게 됨	Periodic Test
		D17 Short	다이오드 불량, 제작중 파손	과도한 전류가 발생	Periodic Test
5	Coil	L1 Open	납땜 불량, 인덕터 불량	인덕턴스 양단에 무한대의 전압이 발생하게 되어 큰 서지 전압 발생, 전류의 변화가 커짐	Periodic Test
		L1 Short	납땜 불량, 인덕터 불량	과다 전류가 생기게 됨	Periodic Test
		L1 Inductor failure	DOT 방향이 틀림	Cross Regulation이 안됨	Periodic Test
6	Relay	K1-K32 Open	납땜 불량, 릴레이 불량	외부회로와의 절연이 이루어지지 않아 많은 노이즈가 발생하고	Periodic Test

				저전압에서 사용시, 특정한 출력이 나오지 않음 (출력 OFF)	
		K1-K32 Short	납땜 불량, 릴레이 불량	릴레이 점접 출력의 점점이 달라붙어 있으면, PLC 내부는 OFF인데도 출력이 ON 상태가 됨	Periodic Test
7	Poto-Coupler	ISO1-ISO8 Open	납땜 불량, Photocoupler 불량, 제작중 불량	입출력 전원이 분리되지 않아 외부기기로부터의 노이즈 영향을 많이 받게 된다	Periodic Test
		ISO1-ISO8 Short	납땜 불량, Photocoupler 불량, 제작중 불량	과전류 발생하여 RELAY에 영향을 줌	Periodic Test
8	Connector	JP1 Open	납땜 불량	전원이 입력되지 않고, 데이터 등 해당 pin의 출력값을 전달하지 못함	Periodic Test
		JP1 Short	납땜 불량	해당 pin의 값을 전달하지 못하고, 데이터 충돌로 인해 이상 신호값이 전달됨	Periodic Test
		CON1 Open	납땜 불량	LED에 전류 공급이 원활하지 못하여 불이 켜지지 않음	None
		CON1 Short	납땜 불량	LED가 타거나 빛이 약함	None
9	Output Connector	TB1 Open	납땜 불량	Relay의 출력신호가 전달되지 않아 연결된 외부기기가 제대로 동작하지 않음	Periodic Test
		TB1 Short	납땜 불량	Relay의 출력신호가 전달되지 않거나 충돌하여 외부기기에 잘못된 값을 전달하여 동작 이상을 일으킴	Periodic Test

FMEA 수행결과 DO모듈에 포함된 개별 부품의 고장은 정기검사 때만 발견될 수 있으므로, DO모듈에 대한 전체적인 건전성을 판단하기 위해서는 DO모듈의 들어오는 신호의 입력단과 외부로 나가는 출력단의 신호 전체를 포함하는 고장검출 기능의 설계가 필요하다. 고장검출 기능이 포함된 DO모듈은 다음 구성도의 점선 부분과 같이 입력단 신호와 출력단 신호의 시간차를 보상하는 타이밍 제어장치, 저장장치 및 비교기로 구성되어 있다.

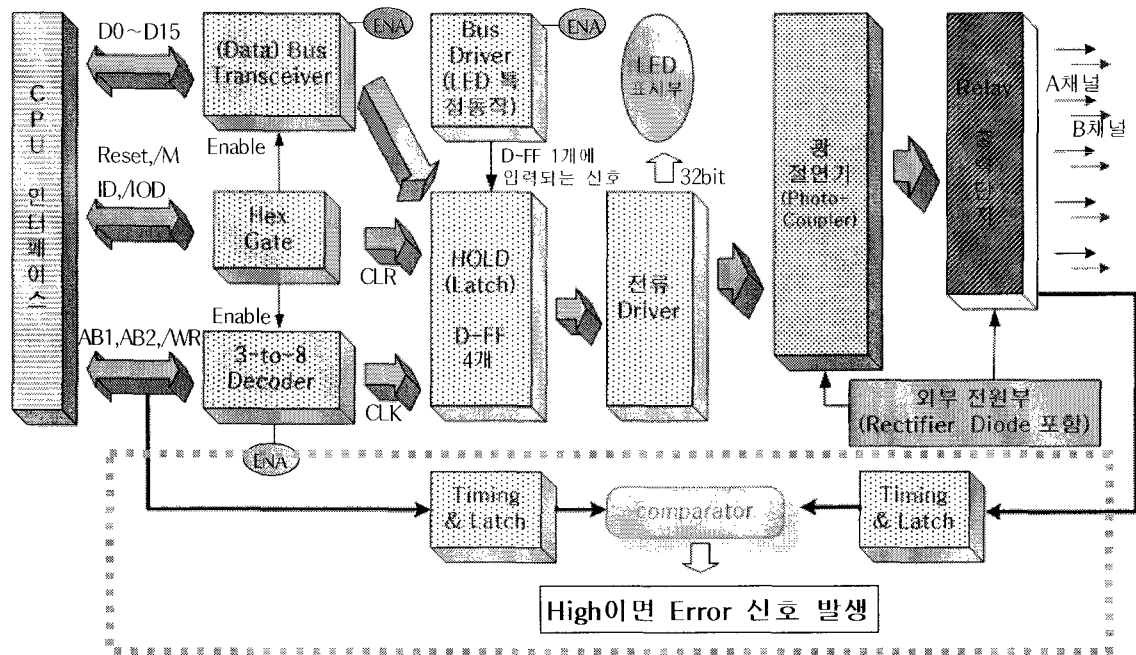


그림 5. 고장 검출기능을 갖는 DO 모듈의 개략적인 구성도

3. MIL-HDBK-217F에 의한 DO 모듈의 예비 정량적 신뢰도 분석

가. 예비 정량적 신뢰도 분석

□ 목적

EPRI-URD[5]에서 요구하고 있는 신뢰도 분석기법인 MIL-HDBK-217 “Reliability Prediction of Electronic Equipment”의 요건에 따라 예비 설계된 PLC 제어기기 DO 모듈의 신뢰도를 정량적으로 평가한다.

□ MIL-HDBK-217F 방법

MIL-HDBK-217F 핸드북은 부품의 신뢰도에 영향을 주는 인자들을 고려하여 개별 전자부품에 대한 고장률 모형을 제시하고 있으며, 또한 제어기기 모듈에 사용한 각종 부품들의 신뢰도를 합하여 시스템의 신뢰도 구하는 방법을 제시하고 있다. 신뢰도를 예측하는 방법에는 “Part Stress Analysis” 및 “Parts Count Analysis” 기법이 있다 [1]. Parts Count Analysis 기법은 회로설계의 초기단계에 적용하는 방법으로 부품의 수, 품질수준 및 사용환경 변수 등을 이용하여 시스템의 고장률을 예측하는 방법이다.

Part Stress Analysis 기법은 회로설계 시에 적용하는 방법으로 Parts Count Analysis 보다 더 많은 입력자료를 사용하여 정밀하게 부품의 고장률을 예측하는 방법이다. 본 연구에서는 PLC 제어기기 모듈의 고장률을 계산하기 위하여 Part Stress Analysis 기법을 사용하였다.

MIL-HDBK-217F 핸드북의 Part Stress Analysis 기법에서 사용되고 있는 부품고장률 모델은 부품의 종류에 따라 다르나, 고장률 모델을 일반적으로 나타내면 다음과 같다[1,10].

$$\lambda_P = \lambda_b \pi_T \pi_Q \pi_E \pi_{oth} Failures / 10^6 Hours \quad (3.1)$$

여기서

- λ_P = 부품고장률(Failure/10⁶ hours)
- λ_b = 기본고장률(Base Failure Rate)
- π_T = 부품 운전온도계수(Quality Factor)
- π_Q = 부품 품질계수(Environment Factor)
- π_E = 부품 운전환경계수(Environment Factor)
- π_{oth} = Other Factor($\pi_A, \pi_R, \pi_S, \pi_C, \pi_V, \pi_P$)를 나타낸다.

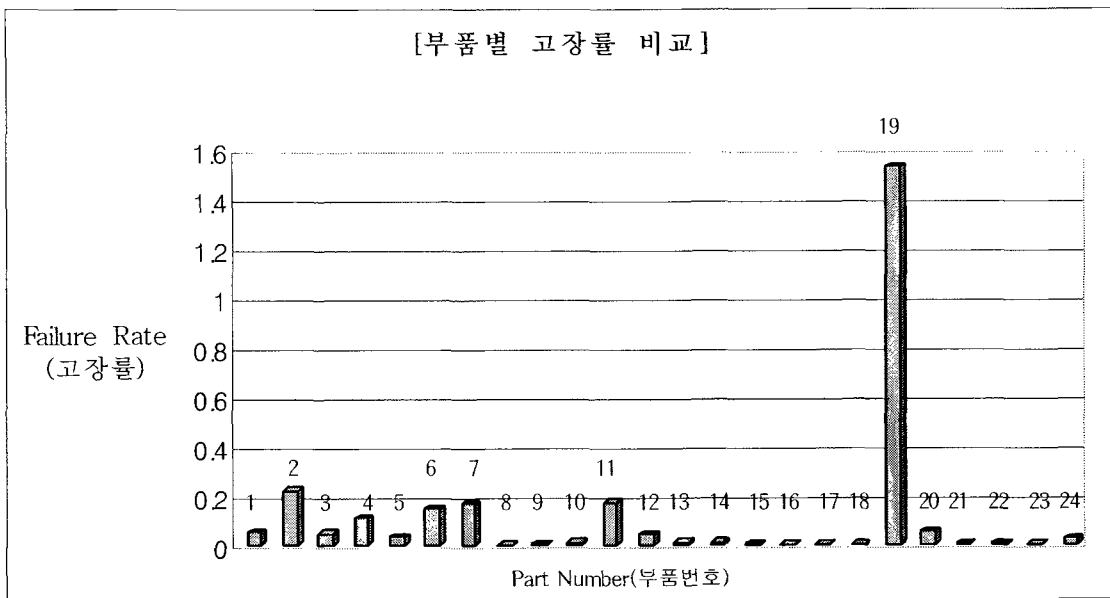
□ Part Stress Analysis에 의한 고장검출 기능이 없는 DO모듈의 고장률 평가

고장검출 기능이 없는 DO모듈의 전체 고장률을 MIL-HDBK-217F 핸드북에서 제시한 Part Stress Analysis 기법에 따라 분석한 결과 2.65E-06의 고장률을 나타내었다 [20,21]. 상세한 분석결과는 다음 표와 같다. 분석결과 그림과 같이 릴레이가 DO모듈의 고장률에 가장 큰 영향을 미치는 부품으로 판명되었으며, 릴레이 부품의 개선으로 전체 DO모듈의 신뢰도를 개선할 수 있다.

표 2. 고장검출 기능이 없는 DO모듈의 기본 고장률

번호	Part Number	부품 기능	Reference Designator	Failure rate (Failures /10 ⁶ Hours)	수량	Failure rate (고장률×수량/10 ⁶ Hours)
1	74HC244P	3-state Bus Driver/Buffer	U9	0.054800	1	0.054800
2	74HC273P	D-type Flip-Flops	U1,U4,U5,U8	0.054800	4	0.219198
3	74HCT138P	3-to-8 Decoder	U10	0.047179	1	0.047179
4	74HCT245P	Bus Transceiver	U11, U12	0.054800	2	0.109599
5	HD14572UB	16 pin Hex Gate	U13	0.034319	1	0.034319
6	M54522	전류 Driver (TR Array)	U2,U3,U6,U7	0.037030	4	0.148119
7	TLP523-4	Photo-Coupler	ISO1-ISO8	0.020674	8	0.165395
8	1N5408	Diode	D17	0.001065	1	0.001065

9	MC2838	Diode	D1-D16	0.000488	16	0.007812
10	SHB-32HLP	LED	LED1	0.011397	1	0.011397
11	0.1U	Capacitor	BP1-BP11	0.015535	11	0.170888
12	1000P	Capacitor	C1,C2,C4,C5	0.010264	4	0.041056
13	10U	Capacitor	C3,C6	0.003917	2	0.007833
14	M8-3-332G	Array Resistor	RP1-RP8	0.001049	8	0.008388
15	M9-1-102	Array Resistor	AR1-AR4	0.001374	4	0.005496
16	M9-1-103J	Array Resistor	AR5, 9, 10	0.000859	3	0.002577
17	M9-1-334J	Array Resistor	AR6-AR8	0.000733	3	0.002200
18	SBC8-101-242	Choke Coil	L1	0.000128	1	0.000128
19	JY24H-K	Relay	K1-K32	0.047737	32	1.527576
20	T.B	Terminal Block	TB1	0.051944	1	0.051944
21	PCN10EA-64A CP-2	Connector	JP1	0.004971	1	0.004971
22	A1-34PA-2	Connector	CON1	0.003148	1	0.003148
23	SMT	Interconnection Assembly		0.002540	1	0.002540
24	PTH	Interconnection Assembly		0.023324	1	0.023324
기본 DO모듈의 고장률						2.650952E-06



□ 설계 개선된 DO모듈의 고장률 평가결과

그림 5와 같이 DO모듈의 고장검출 기능은 입력단 신호와 출력단 신호의 시간차를 보상하는 타이밍 제어장치, 저장장치 및 비교기로 구성되어 있다. 이들 고장검출 기능을 구성하고 있는 부품에 의한 고장률을 MIL-HDBK-217F 핸드북에서 제시한 Part Stress Analysis 기법에 따라 분석한 결과 다음 표와 같이 0.990954E-06의 고장률을 나타내었다[20,21].

표 3. DO모듈 고장검출 기능의 고장률

Part Number	부품 기능	Reference Designator	Failure rate (Failures/10 ⁶ Hours)	수량	Failure rate (단위 고장률×수량)
74HCT86	EXCLUSIVE-OR gate	U14-U21	0.043424	8	0.347392
74HCT245	Bus Transceiver	U22-U29	0.0548	8	0.438396
M9-1-391G	Array Resistor	AR11-AR18	0.003679	8	0.029435
PS2501-4	Photo-Coupler	ISO9-ISO16	0.020674	8	0.165395
PTH	Interconnection Assembly		0.01033	1	0.010336
고장검출 기능의 고장률					0.990954E-06

□ 예비 정량적 신뢰도분석 결과 검토

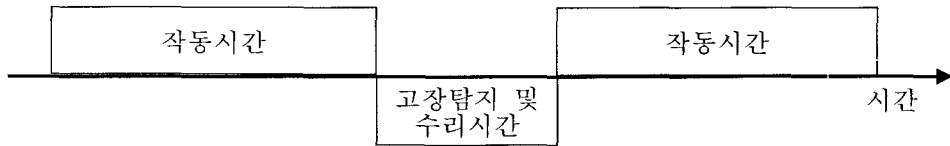
고장검출 기능을 갖는 DO모듈의 전체 고장률은 표 2에서 구한 DO모듈의 기본 고장률과 표 3의 고장검출 기능의 고장률의 합으로 표시된다. MIL-HDBK-217F 핸드북에서 제시한 Part Stress Analysis 기법은 개별 부품의 고장률을 합하여 계산하므로, 다음 표에 나타난 바와 같이 신뢰도 개선을 위해 주기시험 기능이 포함된 DO모듈의 고장률이 기본 DO모듈의 고장률보다 나쁘게 평가되었다. 이를 해결하기 위하여 본 연구에서는 주기시험 기능의 추가에 따라 개선되는 신뢰도를 정량적으로 평가할 수 있는 방법을 제안하였다[22,23].

표 4. DO모듈의 고장률 비교

구분	고장률
고장검출 기능이 없는 기본 DO모듈의 고장률 ①	2.650952E-06
고장검출 기능의 고장률 ②	0.990954E-06
고장검출 기능을 포함한 DO모듈의 고장률 (①+②)	3.641906E-06

나. 신뢰도 개선효과 정량화 평가방법론 제시

일반적으로 수리(Maintenance) 가능한 시스템의 동작 및 고장시간을 분해하면 다음과 같다.



가용도란 시점 t 에서 어떤 시스템을 사용하려고 할 때 그 시스템이 제대로 동작하게 될 확률로 정의한다. 이는 어떤 시스템이 사용되려고 할 때 고장이나 수리를 하고 있지 않을 확률을 말하며, 다음 식으로 표시된다[10,24-26].

$$Availability = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (3.2)$$

여기서 $MTBF$ (Mean Time Between Failure)는 평균고장시간을, $MTTR$ (Mean Time To Repair)은 평균고장수리시간을 나타낸다. 평균고장수리시간 $MTTR$ 은 고장 발생 후 고장검출에 소요되는 시간과 고장수리 시간의 합으로 표현된다. 가용도를 높이기 위해서는 $MTTR$ 을 감소시켜야하며, $MTTR \approx 0$ 인 경우 가용도 ≈ 1 이 된다.

$MTTR$ 을 감소하기 위해서는 고장발생 시 가능한 빨리 고장발생 여부 및 발생위치를 검출하고, 신속한 사후보전을 수행하여야 한다. 본연구의 1차년도에는 원자로 보호 계통을 구성하는 PLC 제어기기의 디지털 출력모듈에 대해서 가용도 평가를 수행하였다[27-29]. 단일 DO모듈의 경우 신뢰도는 Markov 모델을 이용하여 구할 수 있다.

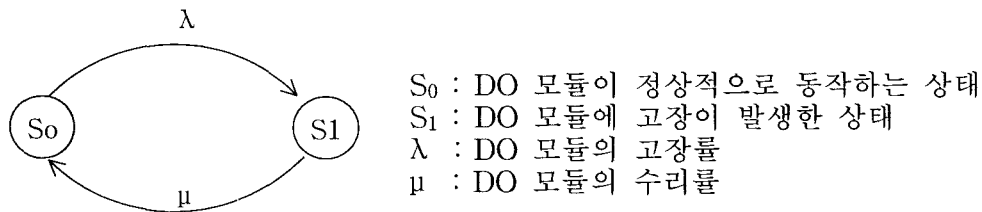


그림 7. 단일 DO모듈의 Markov 모델

Markov 모델을 미분방정식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{dP_0}{dt} = -\lambda P_0 + \mu P_1 \quad (3.3)$$

$$\frac{dP_1}{dt} = \lambda P_0 - \mu P_1 \quad (3.4)$$

$$P_0(0) = 1, \quad P_1(0) = 0 \quad (3.5)$$

여기서 P_0 는 DO모듈이 정상적으로 동작하고 있는 S_0 상태에 있을 확률, P_1 은 DO모듈에 고장이 발생한 S_1 상태에 있을 확률, 그리고 $P_0(0)$ 및 $P_1(0)$ 는 S_0 또는 S_1 상태에 있을 초기조건을 나타낸다. 이 방정식을 풀면 다음과 같다.

$$P_0(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \exp\{-(\lambda + \mu)t\} \quad (3.6)$$

$$P_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \exp\{-(\lambda + \mu)t\} \quad (3.7)$$

가용도 $A(t)$ 는 정의에 의해 시점 t 에서 어떤 시스템이 정상적으로 가동할 확률이므로 $A(t) = P_0(t)$ 이다. 여기서 정상상태(Steady State) 가용도 A 는 다음 식으로 표시된다.

$$A = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} P_0(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (3.8)$$

식 (3.8)에서 분모 및 분자를 $\lambda\mu$ 로 나누면 다음과 같다.

$$A = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{\frac{1}{\lambda}}{\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\mu}} \quad (3.9)$$

고장률이 지수분포인 경우 평균고장시간 $MTTF$ 는 평균고장률 λ 의 역수로 표시되므로 위 식은 다음과 같이 표시되며, 식 (3.10)은 처음에 정의한 가용도 식 (3.2)와 일치한다.

$$Availability = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (3.10)$$

□ 고장검출 기능이 없는 DO 모듈

고장검출 기능이 없는 DO모듈에 발생한 고장은 정기검사기간에 DO모듈의 논리검사를 수행하여야만 고장발생을 검출할 수 있다. 일반적으로 DO모듈의 논리검사는 30일

의 주기로 수행되고 있다. 그러므로 고장이 발생하여 수리에 소요되는 평균고장수리시간 $MTTR = 1/\mu = (30\text{일} / 2) * 24\text{시간} + 8\text{시간} = 368\text{시간}$ 이다. 여기서 고장은 논리검사 주기인 30일 내에서 균일하게 발생할 수 있으므로 논리검사 주기를 평균하여 15일로 설정하였다. 또한 고장을 검출하여 수리에 필요한 시간은 EPRI-URD에서 요구하는 8시간을 적용하였다. 앞 절에서 언급한 Military Handbook의 Part Stress Analysis에 의한 고장검출 기능이 없는 DO모듈의 고장률 $\lambda = 2.650952E-06$ 이므로 이를 식 (3.9)에 대입하면, DO모듈의 정상상태(Steady State) 가용도는 다음과 같다.

$$A = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{2.7174E-03}{2.650925E-06 + 2.7174E-03} = 0.999044 \quad (3.11)$$

□ 고장검출 기능이 있는 DO 모듈

본 연구에서는 고장검출 기능이 있는 DO모듈의 가용성을 분석하기 위해, DO모듈의 기능을 고장검출 기능을 제외한 기본 DO모듈과 추가된 고장검출 기능으로 구분하였다. 모델링의 단순화를 위하여 기본 DO모듈과 고장검출 기능의 고장은 상호 독립적으로 가정하였다. 즉 기본 DO모듈에서 발생한 고장이 고장검출 기능의 동작에 영향을 주지 않으며, 또한 고장검출 기능에서 발생한 고장이 기본 DO모듈의 동작에 영향을 주지 않는 것으로 가정하였다.

고장검출 기능이 있는 DO모듈의 고장유형 및 동작성은 다음과 같다. 1) 고장검출 기능을 제외한 기본 DO모듈이 정상적으로 동작하고 또한 추가된 고장검출 기능이 정상적으로 동작하면 DO모듈은 정상적인 신호를 출력한다. 2) 기본 DO모듈에 고장이 발생하고 고장검출 기능이 정상적으로 동작하면 DO모듈의 출력은 이상상태를 나타내고 즉시 보수를 수행할 수 있다. 3) 기본 DO모듈이 정상적으로 동작하고 있으나 고장검출 기능에 고장이 발생하면 DO모듈은 정상적인 신호를 출력하나, 고장발생 여부를 판단할 수 없다. 4) 그러나 기본 DO모듈과 고장검출 기능에 동시에 고장이 발생하면, 정기검사 중에만 고장유무를 판정할 수 있다.

표 5. DO모듈의 고장 상태도

고장유형	기본 DO모듈 상태	고장검출 기능 상태	출력신호의 상태	Maintenance	Markov State
1	정상	정상	정상		S ₀
2	고장	정상	이상	즉시 보수	S ₁
3	정상	고장	정상		S ₀
4	고장	고장	이상	정기검사 기간에 보수	S ₁

이를 Markov 모델로 표현하면 다음의 그림 8과 같다. 고장유형 1과 3은 출력단자에 정상적인 신호를 출력하므로 S₀ 상태이다. 고장유형 2는 S₁ 상태이며 고장검출 기능이 정상적으로 동작하고 있으므로 즉시 고장상태를 검출하고 보수를 시작할 수 있다. 고장유형 4는 S₁ 상태이며 고장검출 기능도 고장상태이므로 정기검사 중에 고장유무를 판정할 수 있다.

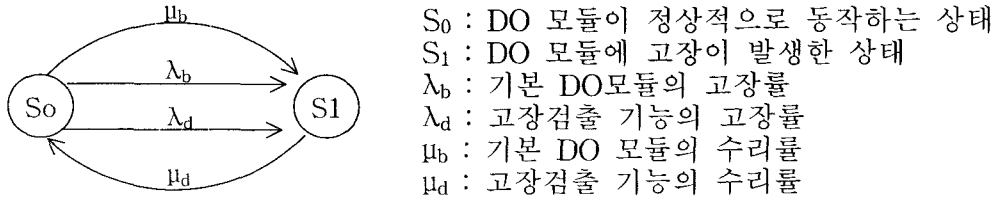


그림 8. 고장검출 기능이 있는 DO모듈의 Markov 모델

그러므로 기본 DO모듈의 고장률 및 고장검출 기능의 고장률은 $\lambda_b = 2.650952E-06$, $\lambda_d = 0.990954E-06$ 이다. $1/\mu_b = 8$ 시간, $1/\mu_d = 1/(30\text{일} / 2) * 24\text{시간} + 8\text{시간} = 368$ 시간이다. 여기서 DO모듈의 정상상태(Steady State) 가용도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{\mu_b + \mu_d}{\lambda_b + \lambda_d + \mu_b + \mu_d} \\
 &= \frac{2.7174E-03 + 0.125}{2.650925E-06 + 0.990954E-06 + 2.7174E-03 + 0.125} = 0.99997148
 \end{aligned}
 \tag{3.12}$$

이상에서 고장검출 기능이 있는 DO모듈의 정상상태 가용도는 0.999972이며, 기본적인 DO모듈의 가용도는 0.999044로, 고장검출 기능이 있는 DO모듈의 가용도가 개선됨을 확인할 수 있었다.

제 2 절 신뢰도 평가모델 정립

원자로보호계통을 구성하는 PLC 제어기기에 주기시험 기능을 추가하면 고장상태를 조기에 검출할 수 있으므로 원전 불시정지의 횟수가 줄어든다. 그럼에도 불구하고 단순히 Military Handbook에서 제시하고 있는 부품수에 따른 고장률 계산방법을 사용하면 주기시험 기능의 구현에 사용된 부품의 수만큼 고장률이 증가하고, 그 결과 신뢰도가 나빠진다. 이를 보완하기 위해 앞 절에서는 Markov 모델을 이용한 신뢰도 개선효과 정량화 방법의 가능성을 입증하였다. 제안된 방법은 DO모듈을 기본적인 기능을 수행하는 부분과 고장검출 기능을 수행하는 두 부분으로 분류하였다. 이를 바탕으로 본 절에서는 DO모듈을 4가지 소기능으로 분류하여 신뢰도를 평가하는 모델을 제안하였으며, 고장검출 기능이 있는 DO모듈의 정상상태 가용도가 기본적인 DO모듈의 가용도보다 향상되는 정도의 상관관계를 규명하고 이를 정량화하는 방법을 개발하였다[31,32].

1. 신뢰도 평가 모델

고장검출 기능의 영향을 반영한 안전등급 제어기기의 신뢰도를 평가하기 위해서는 각 제어기기의 기능 및 제어기기 내부에 구현되어 있는 자가진단 및 복구기능에 대한 정확한 분석이 이루어져야 한다. 따라서 본 절에서는 각 제어기기가 계통 내부에서 갖는 기능 및 자가진단 기능을 고려한 신뢰도 평가모델을 제시한다.

가. 고장검출 기능이 없는 신뢰도 모델

다음 그림은 고장진단 기능이 없는 일반적인 아날로그 장치의 기능 블록도로서 입력에 따라 의도된 기능을 수행하고 적절한 출력을 발생한다.

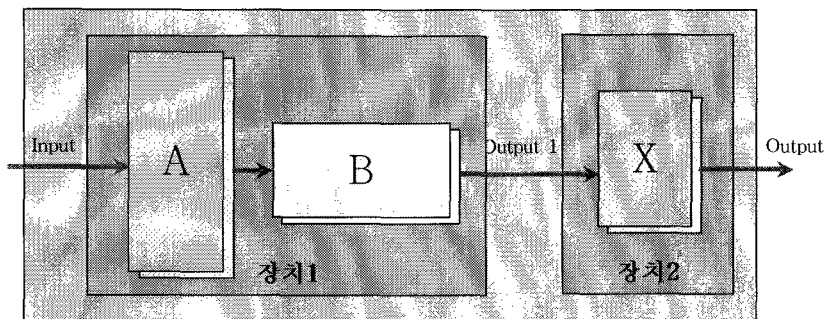


그림 9. 고장검출 기능이 없는 신뢰도 모델

장치 1은 시스템의 구성품으로서 입력을 받아 의도된 기능을 수행하여 결과를 장치2에 제공한다. 장치2는 중간적인 결과를 입력 받아서 의도된 기능을 수행하고 최종결과를 출력한다. 부품 A와 부품 B는 장치 1의 의도된 기능을 수행하기 위해 입력값을 이용하여 적절한 출력형태로 변환하는 기능을 수행한다.

□ 고장 정의

모듈의 고장 λ_M 은 장치 1과 장치 2 고장의 합으로 표현된다. 장치 1의 고장은 입력을 받아 의도된 기능을 수행하지 못하는 경우로 정의하며 고장률을 λ_1 이라 한다. 부품 A와 부품 B의 고장은 입력값을 이용하여 적절한 출력형태로 변환하는 기능을 수행하지 못하는 경우로 정의하며 고장률을 각각 λ_a, λ_b 라 한다.

□ 고장 및 불가용도 모델

모듈의 고장 λ_M 은 장치 1 및 장치 2의 고장률 합으로 Part Count Method를 적용하여 계산할 수 있다. 장치 1의 고장률은 부품 A의 고장률과 부품 B의 고장률을 합해서 구한다.

$$\lambda_M = \lambda_1 + \lambda_2 = \lambda_a + \lambda_b + \lambda_2 \quad (3.13)$$

어느 일정한 시간(T) 간격마다 주기적으로 모듈의 고장을 감시 및 검사하여 고장난 부품을 수리하는 검사 및 보수 정책을 채택하고 있다면, 모듈의 불가용도는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$Q = \lambda_M \cdot \frac{T}{2} \quad (3.14)$$

나. 고장검출 기능이 있는 신뢰도 모델

다음 그림은 두 개의 장치(장치 1, 장치 2)로 구성된 시스템을 간략하게 표현한 그림이다. 장치 1은 시스템의 구성품으로서 다음의 두 가지 기능을 수행한다. 장치 1의 주 기능은 입력에 따라 의도된 기능을 수행하고 적절한 중간결과를 장치 2에 제공한다. 장치 1의 부 기능은 자가진단 기능으로 장치 1의 출력단에서 출력되는 결과를 피드백 받아서 출력된 결과와 피드백된 결과를 비교하고 그 결과가 일치하지 않으면 출력 불일치 신호를 발생시킨다. 부품 A는 입력값을 받아서 적절한 조치를 취한 후 부품 B로 전달하는 장치 1의 주 기능을 수행할 뿐만 아니라, 피드백된 값과 출력값을 비교하여 출력 불일치 신호를

발생하고 그 결과를 부품 D로 출력하는 부 기능을 수행한다. 부품 B는 장치 1의 주 기능을 수행하기 위해 부품 A에서 전달된 값을 적절한 출력형태로 변환하여 장치 2로 전달한다. 부품 C는 부품 B의 출력값을 역변환하여 그 값을 부품A에 피드백하는 장치 1의 부 기능을 수행한다. 부품 D는 부품A에서 발생한 출력 불일치 신호를 받아서 장치 2로 출력하는 기능을 수행한다.

장치 2는 장치 1로부터 중간적인 결과를 입력받아 다음의 세 가지 기능을 수행한다. 즉 첫 번째 기능은 부품 B로부터 입력된 값을 이용하여 의도된 기능을 수행하고 최종결과를 내보낸다. 두 번째 기능은 장치 1의 부품 D에서 전달된 출력 불일치 신호를 받아서 장치 1의 건전성을 파악한다. 세 번째 기능은 시스템 외부에서 장치 1의 건전성을 감시할 수 있도록 장치 1의 출력값과 출력 불일치 신호를 시스템 외부로 출력한다.

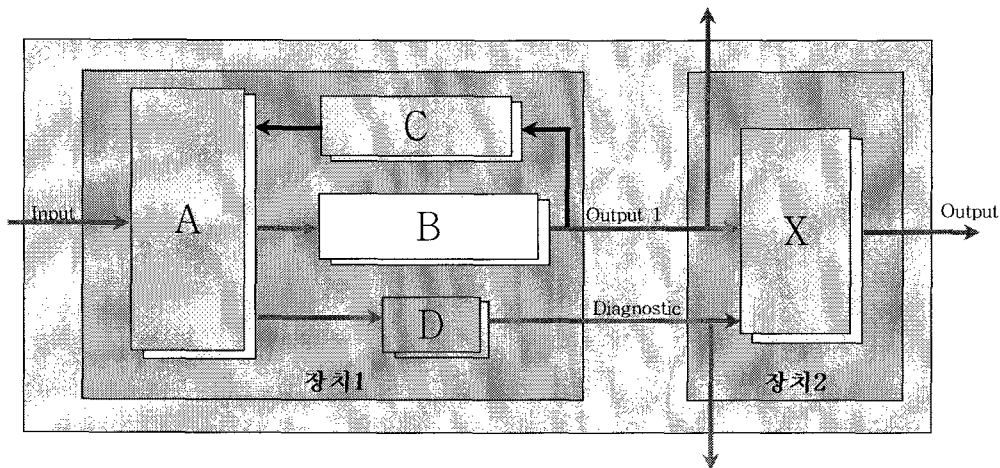


그림 10. 고장검출 기능이 있는 신뢰도 모델

□ 고장의 정의

모듈의 고장 λ_M 은 장치 1과 장치 2 고장의 합으로 표현된다. 장치 1의 고장은 주 기능과 부 기능을 동시에 수행하지 못하는 경우로 정의하며 고장률을 λ_i 라 한다. 부품 A의 고장은 입력값을 이용하여 적절한 출력형태로 변환하는 기능을 수행하지 못하는 경우 또는 출력값과 피드백값을 비교하는 기능을 적절히 수행하지 못하는 경우로 정의된다. 부품 B, C, D의 고장은 입력값을 이용하여 적절한 출력형태로 변환하는 기능을 수행하지 못하는 경우로 정의된다. 각 부품의 고장률을 각각 $\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c, \lambda_d$ 라 한다.

□ 고장 및 불가용도 모델

다음 표는 장치 1을 구성하고 있는 부품들의 고장조합이 장치 1의 주 기능 및 부 기능에 미치는 영향 및 장치 1의 전체 기능에 주는 영향을 나타낸다. 표의 첫 번째 행은 장치 1을 구성하는 부품들의 고장조합수를 나타내며 총 16가지 조합이 존재한다.

표의 두 번째 항은 각각의 고장조합을 나타낸다. 1로 표기한 부품은 정상을 나타내며 0으로 표기한 부품은 고장난 부품을 나타낸다. 예로서 표의 두 번째 고장조합은 0111이며, 이는 부품 A는 고장이고 나머지 세 부품 B, C, 그리고 D는 정상일 경우를 나타낸다. 이 표에서 주 기능을 수행하는 부품 A 또는 부품 B에 고장이 발생한 경우에 그 영향으로 인하여 장치 1에 고장이 발생하였다. 그러나 세 번째 고장조합 1011에 대해서는 부품 B에 고장이 발생한 경우에도 장치 1의 건전성이 유지되는 것으로 판단하였다. 이는 부품 A가 정상적으로 동작하고 있으므로 부품 B에 발생한 고장을 신속하게 알려주어 즉각적인 보수를 수행할 수 있다. 또한 안전등급 제어기기는 고장안전(Fail-safe) 요건을 만족하여 부품 B에 고장이 발생한 경우에 원자로정지를 유발하는 방향으로 설정이 바뀌도록 설계되어 있으므로 원자로는 안전하게 유지할 수 있다. 이런 측면에서 세 번째 고장조합 1011에 대해서는 부품 B에 고장이 발생한 경우에도 장치 1의 건전성이 유지되는 것으로 판단하였다.

표 6. 부품상태 조합에 의한 장치고장

번호	고장조합 (ABCD)	주기능	부기능	장치 1
1	1111	정상	정상	정상
2	0111	상실	상실	고장
3	1011	상실	정상	정상
4	1101	정상	상실	정상
5	1110	정상	상실	정상
6	0011	상실	상실	고장
7	0101	상실	상실	고장
8	0110	상실	상실	고장
9	1001	상실	상실	고장
10	1010	상실	상실	고장
11	1100	정상	상실	정상
12	0001	상실	상실	고장
13	0010	상실	상실	고장
14	0100	상실	상실	고장
15	1000	상실	상실	고장
16	0000	상실	상실	고장

각 부품의 고장조합에 따른 장치 1의 고장은 다음과 같은 수식을 이용하여 간단하게 표현 할 수 있다. 식에서 문자 위에 선이 그려져 있으면 해당 부품의 고장을 나타내면, 아니면 정상을 나타낸다. 장치 1이 고장나기 위해서는 총 부품의 16가지 고장 조합 중에 11가지 고장조합(2, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16)에 해당되면 된다. 따라서 다음과 같은 수식이 된다.

$$\begin{aligned}
\text{장치 1의 고장} &= ABCD + \overline{A}BCD + \overline{A}B\overline{C}D + \overline{A}B\overline{C}\overline{D} + \overline{A}B\overline{C}D + \overline{A}B\overline{C}\overline{D} \\
&\quad + \overline{A}BC\overline{D} + \overline{A}BCD + \overline{A}B\overline{C}\overline{D} + \overline{A}B\overline{C}D + \overline{A}B\overline{C}\overline{D} + \overline{A}B\overline{C}D \\
&= \overline{A}CD(B + \overline{B}) + \overline{A}C\overline{D}(B + \overline{B}) + \overline{A}C\overline{D}(B + \overline{B}) \\
&\quad + \overline{A}BC(D + \overline{D}) + \overline{A}C\overline{D}(B + \overline{B}) + \overline{A}B\overline{C}\overline{D} \\
&= \overline{A}CD + \overline{A}C\overline{D} + \overline{A}C\overline{D} + \overline{A}BC + \overline{A}C\overline{D} + \overline{A}B\overline{C}\overline{D} \\
&= \overline{A}D(C + \overline{C}) + \overline{A}D(C + \overline{C}) + \overline{A}BC + \overline{A}B\overline{C}\overline{D} \\
&= \overline{A}D + \overline{A}D + \overline{A}BC + \overline{A}B\overline{C}\overline{D} \\
&= \overline{A}(D + \overline{D}) + \overline{A}BC + \overline{A}B\overline{C}\overline{D} \\
&= \overline{A} + \overline{A}BC + \overline{A}B\overline{C}\overline{D} \\
&= \overline{A} + \overline{A}B(\overline{C} + \overline{D})
\end{aligned} \tag{3.15}$$

따라서 장치 1의 고장확률은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
\text{장치 1의 고장확률} &= P\{\overline{A} + \overline{A}B(\overline{C} + \overline{D})\} \\
&= P(\overline{A}) + P(A)P(\overline{B})P(\overline{C}) + P(A)P(\overline{B})P(\overline{D}) \approx P(\overline{A})
\end{aligned} \tag{3.16}$$

장치 1의 고장률은 다음과 같은 근사치를 사용할 수 있다.

$$\lambda_1 = \lambda_a \tag{3.17}$$

그러므로 모듈의 고장 λ_M 은 장치 1 및 장치 2의 고장률 합으로 Part Count Method를 적용하여 계산할 수 있다.

$$\lambda_M = \lambda_1 + \lambda_2 = \lambda_a + \lambda_2 \tag{3.18}$$

본 신뢰도 모델은 장치 1의 출력신호 및 출력 불일치 신호를 시스템 외부에서 항상 감시할 수 있으므로 시스템에 이상이 발생하면 즉각적으로 유지보수를 수행할 수 있다. 그러므로 고장검출 기능이 있는 신뢰도 모델의 불가용도는 다음과 같다.

$$Q = \lambda_M \cdot T_a \tag{3.19}$$

여기서, T_a 는 고장에 노출된 시간으로 일반적으로 평균 고장수리 시간(MTTR)이다.

2. 대상 분석

이상에서 제안된 신뢰도 평가 모델을 바탕으로 본 절에서는 고장검출 기능이 있는 DO 모듈의 정상상태 가용도와 고장검출 기능이 없는 기본적인 DO모듈의 가용도를 구하였다.

가. 디지털 출력모듈

DC 24V 디지털 출력장치는 연산장치에서 입력된 연산된 결과를 디지털 신호로 동작하는 외부로 출력한다. 다음 그림은 DC 24V 디지털 출력장치의 구성도를 보여준다. DC 24V 디지털 출력장치는 다음과 같이 크게 세 가지 기능을 수행한다.

- 연산장치에서 입력된 디지털 신호를 32개의 접점으로 출력
- 루프백(loop back) 기능이 있어서 내부부품에 고장이 발생하면 연산장치에 이상 상태 정보를 전송하는 진단기능을 수행
- DC 24V 디지털 출력장치의 작동상태를 표시장치에 전달

따라서 내부부품의 고장으로 인하여 DC 24V 디지털 출력장치에 나타나는 영향은 다음과 같이 세 가지로 분류될 수 있다.

- 출력신호 전송고장
- 진단기능 오류
- 표시장치 고장

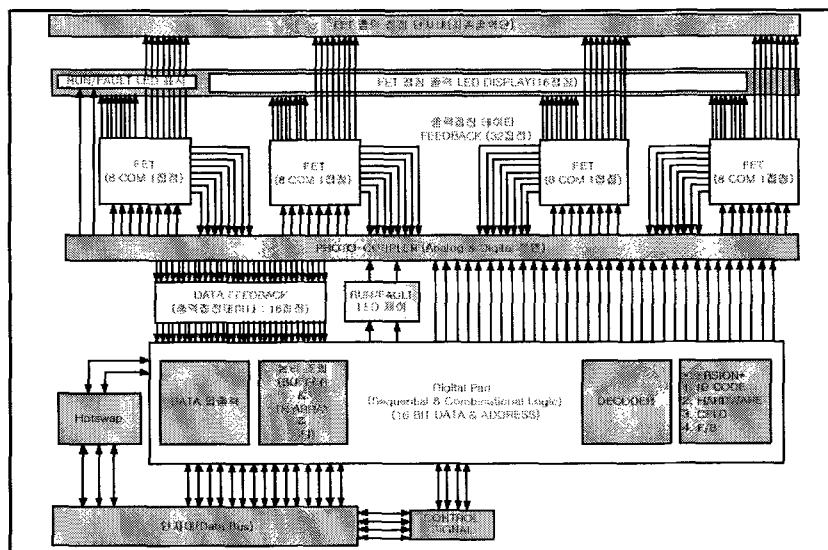


그림 11. DC 24V 디지털 출력장치 구성도

나. 고장률 분석을 위한 기능분류

우선적으로 고장률 분석을 위해 부품 리스트를 작성하였다. 부품리스트 작성을 위한 부품목록은 부록1에 나타나 있다. FMEA 분석을 통하여 DO모듈의 부품이 시스템에 미치는 영향에 따라 표 7과 같이 4가지 소기능으로 분류하였다. 부품 A는 입력값을 이용하여 적절한 출력형태로 변환하는 기능을 수행하고 피드백된 값과 출력값을 비교하여 불일치가 생기면 이산신호를 부품 D로 출력한다. 부품 B의 기능은 입력값을 적절한 출력형태로 변환하여 장치 2로 넘겨준다. 부품 C의 기능은 장치 1의 주 기능과는 관계없이 부품 B의 출력값을 역변환해 그 값을 부품 A에 제공해주는 부 기능을 수행한다. 부품 D의 기능은 부품 A에서 오는 출력값 불일치 신호를 받아서 출력하는 기능을 한다. 장치 2는 출력단자 및 보조부품이며, DO모듈에서 사용되었으나 모듈의 고장에 전혀 영향을 미치지 않는 부품은 'Don't Care'로 분류하였다. 다음 표는 DO모듈에 대한 기능 분류표이다.

표 7. DO모듈 부품 리스트 및 기능분류

Part Name	Category	Subcategory	기능 분류
10KΩ	Resistor	RZ	A
0.1uF	Capacitor	CDR	A
47uF	Capacitor	CWR	A
10uF	Capacitor	CWR	A
REGULATOR	Diode	VR	A
74ABT245	IC(Digital Gate)	BCMOS	A
CPLD	IC(PLD)	CMOS	A
20MHz	Quartz Crystal		A
0.1uF	Capacitor	CDR	A
0.01uF	Capacitor	CDR	A
47uF	Capacitor	CWR	A
100uH	Coil	FC	A
0.1uF	Capacitor	CDR	B
470Ω	Resistor	RZ	B
10KΩ	Resistor	RM	B
TLP281-4	Photo Device	PTDD	B
TD62083	IC(Digital Gate)	COMS	B
1KΩ	Resistor	RZ	C
1KΩ	Resistor	RM	C
1KΩ	Resistor	RM	C
0.1uF	Capacitor	CDR	C
0.22uF	Capacitor	CDR	C

TLP281-4	Photo Device	PTDD	C
74ABT245	IC(Digital Gate)	BCMOS	C
MC14050BD	IC(Digital Gate)	CMOS	C
10K Ω	Resistor	RZ	D
74ABT245	IC(Digital Gate)	BCMOS	D
0.1 μ F	Capacitor	CDR	장치2
RXE	Thermistor	TEM	장치2
1SMA10A	Diode	TS	장치2
PS7113L-1A	Transistor	LFMOS(OCMOSFET)	장치2
100K Ω	Resistor	RZ	장치2
100K Ω	Resistor	RM	장치2
0.1 μ F	Capacitor	CDR	장치2
IDTQS3245	IC(Digital Gate)	CMOS	장치2
C96-MALE-R/A-FMLB	Connector General	CD	장치2
	Connector General		장치2
S220YKT/RED	Photo Device	LED	장치2
A2-6PA-2.54DSA	Connector General	CR	Don't care
10K Ω	Resistor	RM	Don't care
4.7K Ω	Resistor	RM	Don't care
0.007 Ω	Resistor	RM	Don't care
2.7 Ω	Resistor	RM	Don't care
10 Ω	Resistor	RM	Don't care
36K Ω	Resistor	RM	Don't care
15K Ω	Resistor	RM	Don't care
56K Ω	Resistor	RM	Don't care
0.1 μ F	Capacitor	CDR	Don't care
100 μ F	Capacitor	CWR	Don't care
2N7002	Transistor	LFMOS	Don't care
MTB50N06V	Transistor	LFMOS	Don't care
AS1D	Switch	RED	Don't care
LTC4211	IC(Linear Gate)	IIL	Don't care
1SMA10A	Diode	TS	Don't care

제 3 절 신뢰도 분석 및 평가

1. 부품 고장분석

본 절에서는 MIL-HNBK-217F Notice 2의 Part Stress Method를 근거로 하여 DO모듈에서 사용되는 각 부품들의 고장률을 구하였다. 고장률 계산에 ISOGRAPH사에서 제공하는 신뢰도 평가도구인 Reliability Workbench, Version 9.0 소프트웨어 도구[30]를 사용하였다. 각 부품의 사용 환경은 원자력 발전소의 안전계통이 사용되는 주위환경과 같은 25°C에서 사용되는 것으로 가정하였다.

표 8. DO모듈의 부품 고장률

Part Name	Category	수량	부품 고장률 (단위 : 10^{-6} hr)	수량×부품 고장률 (단위 : 10^{-6} hr)
부품 A				
10KΩ	Resistor	4	0.001836308	0.007345232
0.1uF	Capacitor	4	0.016331561	0.065326244
47uF	Capacitor	1	0.004000028	0.004000028
10uF	Capacitor	1	0.002802079	0.002802079
REGULATOR	Diode	1	0.000163075	0.000163075
74ABT245	IC(Digital Gate)	2	0.040492458	0.080984916
CPLD	IC(PLD)	1	0.308597445	0.308597445
20MHz	Quartz Crystal	1	0.054375034	0.054375034
0.1uF	Capacitor	1	0.016331561	0.016331561
0.01uF	Capacitor	1	0.01321362	0.01321362
47uF	Capacitor	1	0.004000028	0.004000028
100uH	Coil	1	0.000104826	0.000104826
부품 A 고장률 계				0.557244
부품 B				
0.1uF	Capacitor	4	0.016331561	0.065326244
470Ω	Resistor	8	0.000748076	0.005984608
10KΩ	Resistor	32	0.002595429	0.083053728
TLP281-4	Photo Device	8	0.0434631	0.3477048
TD62083	IC(Digital Gate)	4	0.056481253	0.225925012
부품 B 고장률 계				0.727994
부품 C				
1KΩ	Resistor	8	0.004507601	0.036060808
1KΩ	Resistor	2	0.039920125	0.07984025
1KΩ	Resistor	34	0.007766039	0.264045326
0.1uF	Capacitor	11	0.016331561	0.179647171
0.22uF	Capacitor	32	0.637358665	20.39547728
TLP281-4	Photo Device	9	0.0434631	0.3911679

74ABT245	IC(Digital Gate)	5	0.040492458	0.20246229
MC14050BD	IC(Digital Gate)	6	0.008800313	0.052801878
부품 C 고장률 계				21.601503
부품 D				
10K Ω	Resistor	4	0.001836308	0.007345232
74ABT245	IC(Digital Gate)	2	0.040492458	0.080984916
부품 D 고장률 계				0.08833
장치 2				
0.1 μ F	Capacitor	2	0.016331561	0.032663122
RXE	Thermistor	32	0.014499462	0.463982784
1SMA10A	Diode	32	0.003120389	0.099852448
PS7113L-1A	Transistor	32	0.21363385	6.8362832
100K Ω	Resistor	7	0.000748076	0.005236532
100K Ω	Resistor	1	0.001036598	0.001036598
0.1 μ F	Capacitor	4	0.016331561	0.065326244
IDTQS3245	IC(Digital Gate)	4	0.054171029	0.216684116
C96-MALE-R/A-FMLB	Connector General	1	0.040281929	0.040281929
	Connector General	1	0.020140965	0.020140965
S220YKT/RED	Photo Device	38	0.001577658	0.059951004
장치 2 고장률 계				7.841439
Don't Care				
A2-6PA-2.54DSA	Connector General	1	0.001000005	0.001000005
10K Ω	Resistor	4	0.002595429	0.010381716
4.7K Ω	Resistor	2	0.003607822	0.007215644
0.007 Ω	Resistor	1	0.003822878	0.003822878
2.7 Ω	Resistor	1	0.002026458	0.002026458
10 Ω	Resistor	1	0	0
36K Ω	Resistor	1	0.001554969	0.001554969
15K Ω	Resistor	1	0.00221733	0.00221733
56K Ω	Resistor	1	0.001246781	0.001246781
0.1 μ F	Capacitor	2	0.016331561	0.032663122
100 μ F	Capacitor	1	0.004758686	0.004758686
2N7002	Transistor	5	0.052755529	0.263777645
MTB50N06V	Transistor	1	1.207184792	1.207184792
AS1D	Switch	1	0.0020201	0.0020201
LTC4211	IC(Linear Gate)	1	0.035999395	0.035999395
1SMA10A	Diode	1	0.003120389	0.003120389
DO 모듈에 직접적으로 영향을 미치지 않는 부품들의 고장률 계				1.57899

2. DO모듈의 신뢰도 분석

이상에서 제안된 신뢰도 평가모델을 바탕으로 본 절에서는 고장검출 기능이 있는 DO 모듈의 정상상태 가용도와 고장검출 기능이 없는 기본적인 DO모듈의 가용도를 구하였다.

□ 고장검출 기능이 없는 DO모듈의 고장률 분석

고장검출 기능이 없는 DO모듈은 부품 A와 부품 B로 분류된 기능만을 수행하도록 설계되어 있다. 즉 DO모듈의 입력값을 적절한 출력형태로 변환하여 장치 2로 넘겨주는 기능을 수행한다. 그러므로 DO모듈의 고장률은 부품 A와 부품 B 및 장치 2의 고장률의 합으로 표시되며, 식 (3.20)과 같다.

$$\lambda_M = \lambda_1 + \lambda_2 = \lambda_a + \lambda_b + \lambda_2 \quad (3.20)$$

표 8로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

표 9. 고장검출 기능이 없는 DO모듈의 고장률 분석

구분		고장률(단위 : 10^{-6} hr)
장치1	부품 A	0.557244
	부품 B	0.727994
장치 2		7.841439
계		9.126677

앞 절에서 정의한 바와 같이 고장검출 기능이 없는 DO모듈의 불가용도는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$Q = \lambda_M \cdot \frac{T}{2} \quad (3.21)$$

고장검출 기능이 없는 DO모듈에 발생한 고장은 정기검사기간에 DO모듈의 논리검사를 수행하여야만 고장발생을 검출할 수 있다. 일반적으로 DO모듈의 논리검사는 30일의 주기로 수행되고 있다. 그러므로 T는 $T = (30일 / 2) * 24시간 + 8시간 = 368$ 시간 이다. 여기서 고장은 논리검사 주기인 30일 내에서 균일하게 발생할 수 있으므로 논리검사 주기를 평균하여 15일로 설정하였다. 또한 고장을 검출하여 수리에 필요한 시간은 EPRI-URD에서 요구하는 8시간을 적용하였다. 앞 절에서 언급한 Military Handbook의 Part Stress Analysis에 의한 고장검출 기능이 없는 DO모듈의 고장률 $\lambda = 9.126677E-06$ 이므로 이를 식 (3.20)에 대입하면, DO모듈의 불가용도는 다음과 같다.

$$Q = \lambda_M \cdot \frac{T}{2} = 9.126677E-06 * 368 = 3.358E-03 \quad (3.22)$$

□ 고장검출 기능이 있는 DO모듈의 고장률 분석

앞 절에서 언급한 바와 같이 고장검출 기능이 있는 DO모듈의 고장률은 부품 A와 장치 2의 고장률의 합으로 표시되며, 식 (3.23)과 같다.

$$\lambda_M = \lambda_1 + \lambda_2 = \lambda_a + \lambda_2 \quad (3.23)$$

표 8로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

표 10. 고장검출 기능이 있는 DO모듈의 고장률 분석

구분		고장률(단위 : 10^{-6} hr)
장치1	부품 A	0.557244
장치 2		7.841439
계		8.398683

앞 절에서 정의한 바와 같이 고장검출 기능이 있는 DO모듈의 불가용도는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$Q = \lambda_M \cdot T_a \quad (3.24)$$

고장검출 기능이 있는 DO모듈에 발생한 고장은 자동주기시험 또는 출력불일치 신호에 의해 즉각적으로 판단할 수 있다. 일반적으로 자동주기시험은 8시간마다 한번씩 수행하므로 고장검출에 소요되는 최대시간 T_a 는 $T_a = 8\text{시간} + 8\text{시간} = 16\text{시간}$ 이다. 여기서 고장을 검출하여 수리에 필요한 시간은 EPRI-URD에서 요구하는 8시간을 적용하였다. 앞 절에서 언급한 Military Handbook의 Part Stress Analysis에 의한 고장검출 기능이 없는 DO모듈의 고장률 $\lambda = 8.398683E-06$ 이므로 이를 위 식에 대입하면, DO모듈의 불가용도는 다음과 같다.

$$Q = \lambda_M \cdot T_a = 8.398683E-06 * 16 = 1.34E-04 \quad (3.25)$$

3. 요약 및 결론

아날로그 시스템은 하드웨어 부품만을 사용하여 원하는 기능을 수행하도록 설계 및 제작되어 있으므로 다른 목적으로 기능변경이 불가능하다. 그러나 마이크로프로세서 기반의 시스템은 응용 소프트웨어의 프로그래밍을 통하여 목적에 따라 다양한 기능으로 활용할 수 있다. 이와 같이 사용자의 목적에 따라 다양한 용도로 사용하기 위한 디지털 시스템은 아날로그 시스템과 비교하여 일반적으로 사용된 부품의 수가 많다. 그러므로 단순히 Military Standard에서 제시한 Part Count Method를 사용하면 아날로그 시스템보다 많은 부품을 사용하는 디지털 시스템의 신뢰도가 낮을 수밖에 없는 실정이다. 또한 디지털 시스템은 일부 하드웨어 및 소프트웨어의 추가만으로 고장진단(surveillance test) 기능을 용이하게 구현할 수 있다. 그 결과 아날로그 시스템과 비교할 때 시스템의 고장 및 이상상태를 조기에 검출하고 고장수리를 수행할 수 있으므로 시스템의 신뢰도 및 안전성을 향상시킬 수 있다. 이 경우에도 Part Count Method를 사용하면 추가된 고장진단 기능에 따른 하드웨어 수량의 증가로 작용해 시스템의 신뢰도가 낮게 평가되는 모순이 발생한다.

본장의 제 1절에서는 고장검출기능의 추가에 따른 고장률이 상승하는 모순을 입증하고, 제 2절에서는 이러한 모순을 제거하기 위한 4-기능 모델 고장률 평가기법을 제시하였다. 4-기능 모델은 제어기기 모듈에 포함된 부품에 고장이 발생했을 때 원전의 안전에 미치는 영향을 FMEA 기법으로 파악하여 이를 4개의 기능그룹으로 분류하였다. 이들 기능그룹에 따라 제안한 고장률 평가기법을 적용한 결과 추가된 고장진단 기능에 의한 신뢰도 개선효과를 입증할 수 있었다.

제 4 장 목표 달성도 및 관련분야에의 기여도

원자력분야에서는 일반적으로 Military Standard(MIL-HDBK-217F)에서 제안하고 있는 Part Count Method 또는 Part Stress Method를 사용하여 제어기기의 신뢰도를 계산하고 있다. 이들 방법은 제어기기 모듈에 사용된 모든 부품의 수량, 품질계수, 운전환경계수를 이용하여 고장률(failure rate) 및 신뢰도를 예측한다. 사용된 부품의 수량을 이용하여 신뢰도를 예측하는 Military Standard 방법은, 경우에 따라서는 신뢰도를 높이기 위해 추가된 부품에 - 조기고장검출 기능 및 자가진단 기능 등 - 의하여 도리어 신뢰도가 감소되는 결과를 초래하고 있다. 일반적으로 원자력발전소는 단일고장(Single Mode Failure)에 대처하기 위하여 다중화 구조로 설계되어 있으며, 제어기기 모듈은 다양한 고장검출 기능을 포함하고 있다. 그러므로 제어기기 모듈의 신뢰도를 정확히 계산하기 위해서는 기존 사용하고 있는 MIL-HDBK-217F의 방법에 추가하여 원전에 적합한 신뢰도 평가방법론의 개발이 필요하다.

아날로그 시스템은 하드웨어 부품만을 사용하여 원하는 기능을 수행하도록 설계 및 제작되어 있으므로 다른 목적으로 기능변경이 불가능하다. 그러나 마이크로프로세서 기반의 시스템은 응용 소프트웨어의 프로그래밍을 통하여 목적에 따라 다양한 기능으로 활용할 수 있다. 이와 같이 사용자의 목적에 따라 다양한 용도로 사용하기 위한 디지털 시스템은 아날로그 시스템과 비교하여 일반적으로 사용된 부품의 수가 많다. 그러므로 단순히 Military Standard에서 제시한 Part Count Method를 사용하면 아날로그 시스템보다 많은 부품을 사용하는 디지털 시스템의 신뢰도가 낮을 수밖에 없는 실정이다. 또한 디지털 시스템은 일부 하드웨어 및 소프트웨어의 추가만으로 고장진단(surveillance test) 기능을 용이하게 구현할 수 있다. 그 결과 아날로그 시스템과 비교할 때 시스템의 고장 및 이상상태를 조기에 검출하고 고장수리를 수행할 수 있으므로 시스템의 신뢰도 및 안전성을 향상시킬 수 있다. 이 경우에도 Part Count Method를 사용하면 추가된 고장진단 기능에 따른 하드웨어 수량의 증가로 작용해 시스템의 신뢰도가 낮게 평가되는 모순이 발생한다.

이러한 모순을 해결하기 위하여 본 연구에서는 고장검출기능의 추가에 따른 고장률이 상승하는 모순을 입증하고, 이러한 모순을 제거하기 위한 4-기능 모델 고장률 평가기법을 제시하였다. 4-기능 모델은 제어기기 모듈에 포함된 부품에 고장이 발생했을 때 원전의 안전에 미치는 영향을 FMEA 기법으로 파악하여 이를 4개의 기능그룹으로 분류한다. 이들 기능그룹에 따라 제안한 고장률 평가기법을 적용한 결과 추가된 고장진단 기능에 의한 신뢰도 개선효과를 입증하였다. 원전 계측제어계에 디지털 시스템을 적용하기 위해서는, 적용할 디지털 시스템의 신뢰도가 아날로그 시스템보다 나쁘지 않다는 것을 분석하여 규제기관에 제출하여야 한다. 본 연구에서는 주기시험 기능의 추가에 따른 신뢰도 향상의 정도를 정량화 하므로 디지털 기술의 원전적용을 용이하게 하고 그 결과 인허가 비용을 절감할 수 있다.

제 5 장 연구개발 결과의 활용계획

일반적으로 원자력분야에서는 Military Standard(MIL-HDBK-217F)에서 제안하고 있는 Part Count Method 또는 Part Stress Method를 사용하여 제어기기의 신뢰도를 계산하고 있다. 이들 방법은 제어기기 모듈에 사용된 모든 부품의 수량, 품질계수, 운전환경계수를 이용하여 고장률(failure rate) 및 신뢰도를 예측한다. 사용된 부품의 수량을 이용하여 신뢰도를 예측하는 Military Standard 방법은, 경우에 따라서는 신뢰도를 높이기 위해 추가된 부품에 - 조기고장검출 기능 및 자가진단 기능 등 - 의하여 도리어 신뢰도가 감소되는 결과를 초래하고 있다. 이러한 모순을 해결하기 위하여 본 연구에서는 고장검출기능의 추가에 따른 고장률이 상승하는 모순을 입증하고, 이러한 모순을 제거하기 위한 4-기능 모델 고장률 평가기법을 제시하였다. 4-기능 모델은 제어기기 모듈에 포함된 부품에 고장이 발생했을 때 원전의 안전에 미치는 영향을 FMEA 기법으로 파악하여 이를 4개의 기능그룹으로 분류한다. 이들 기능그룹에 따라 제안한 고장률 평가기법을 적용한 결과 추가된 고장진단 기능에 의한 신뢰도 개선효과를 입증할 수 있었다.

본 연구에서 제시된 4-기능 신뢰도 모델은 원전 계측제어시스템(KNICS) 개발 사업단 과제에서 개발하는 안전등급 PLC 제어기기의 고장률 및 신뢰도 분석에 적용될 예정이다.

제 6 장 참고문헌

- [1] Military Handbook, "Reliability Prediction of Electronic Equipment : MIL-HDBK-217F"
- [2] NUREG-0492, Fault Tree Handbook, 1981
- [3] NASA Lewis Research Center의 Fault Tree Analysis (고장목 분석) 기술자료
- [4] J.B. Dugan, S.J. Bavuso, M.A. Boyd, "Dynamic fault-tree models for fault-tolerant computer systems", Reliability, IEEE Transactions on , Vol. 41, Issue. 3, pp. 363 - 377, Sept. 1992.
- [5] "Advanced Lighter Water Reactor Utility Requirements Document", Volume II, Chapter 10, EPRI, 1990.
- [6] ANSI/IEEE Std 352-1987, IEEE Guide for General Principles of Reliability Analysis of Nuclear Power Generating Station Safety Systems IEEE, 1987.
- [7] KAIST EMDEC, Reliability & Maintenance를 위한 국제세미나 자료집, 2002.
- [8] J. Bowen and V. Stavridou, "Safety-critical systems, formal methods and standards", 1993.
- [9] 이동영, 박주현 외, "Reliability assessment of the digital I&C equipment using reliability block diagram", KAERI/TR-2047/02, 2002.
- [10] 이동영, 박주현 외, "계측제어기기 수명평가 현안기술", KAERI/AR-562/2000, 2000.
- [11] 이동영, 유준 외, "이항분포를 이용한 원자로보호계통 가동성 분석", 한국원자력학회, pp. 223-233, 2002. 11.

- [12] KNICS-RPS-SDR101, Rev. 00, 원자로보호계통 설계요건서, 2001
- [13] KNICS-RPS-DS101, Rev. 00, 원자로보호계통 설계사양서, 2002
- [14] KAERI/TR-2010/2002, Rev. 00, 원자력발전소 안전계통에 적용하기 위한 PLC 일반요건 및 규격, 2002
- [15] 한국원자력 안전기술원, "원전 계측제어설비 안전성 WORDSHOP", 2000.
- [16] Krishna B. MISRA, "RELIABILITY ANALYSIS AND PREDICTION : A Methodology Oriented Treatment", Elsevier.
- [17] J.B. Dugan, K.S. Trivedi, "Coverage modeling for dependability analysis of fault-tolerant systems", Computers, IEEE Transactions on , Vol. 38, Issue. 6, pp. 775 - 787, June 1989.
- [18] Daniel P.Siewiorek and Robert S.Swarz, "RELIABLE COMPUTER SYSTEMS : design and evaluation", Burlington, 1992.
- [19] 모아소프트, "Availability and Maintainability Benchmarking over Computer Systems"
- [20] 모아소프트 신뢰성기술연구소, 신뢰성예측 가이드(A Guide Book for Reliability Prediction), 교우사.
- [21] Computer Program, Version 7.5, Relex Software.
- [22] P.A. Tobias, D.C. Trindade(1994), "Applied Reliability", Van Nostrand Reinhold
- [23] P.V. Varde, J.B. Han, and D.Y. Lee, "Reliability Modeling of Digital Safety System of Nuclear Power Plant", ICONE-11, Tokyo, 2003.

- [24] 박경수, "신뢰도 및 보전공학", 영지문화사.
- [25] 김선진 외, "신뢰성공학", 원창출판사.
- [26] 김원경, "시스템 신뢰도공학", 교우사.
- [27] 김지영, 박홍래, 유준 외, "가용도 분석을 이용한 원자로보호계통 제어기기 출력모듈의 신뢰도 설계", 2003년도 하계종합학술대회 논문집, pp. 2524-2548, 2003. 7, 대한전자공학회
- [28] D.Y. Lee, and J. Lyou, "Availability Evaluation for Architectures of the Reactor Protection System", in Proc. IFAC PPS 2003, International Federation of Automatic Control (IFAC), World Congress, Seoul, 2003. 09.
- [29] D.Y. Lee, J.B. Han, J. Lyou, "Reliability Analysis of the Reactor Protection System with Fault Diagnosis", in Proc. 11th APCNDT, The Korean Society for Non-Destructive Testing, 2003. 11.
- [30] Computer Program, Version 10.0 by ISOGRAPH, Reliability Workbench for Windows 95/98/NT/2000/Me, 2002.
- [31] D.Y. Lee, J.B. Han, J. Lyou, "An Economic Design of the k-out-of-n Reactor Protection System", 10th PRDC, 타이티, 2004. 3. 3-5.
- [32] 김지영, 박홍래, 유준 외, "원자로보호계통의 고장검출기능과 신뢰도의 상관관계 분석", 대한전기학회 시스템 및 제어 부문회/대한전자공학회 시스템 및 제어 Society, 2004. 5.

부록 1

부품 목록

고장률 분석을 위해 작성된 부품 리스트에 사용된 부품목록은 다음과 같은 항목으로 구성되어 있다.

1 No.

각 부품의 분류번호를 기술한다.

2 Part Name

각 부품의 이름을 기술한다.

3 Order Number

각 부품의 제작사가 제공하는 Order Number를 기술한다

4 Category

각 부품의 종류를 기술하며 다음과 같은 항목중에 하나를 선택한다.

- IC (MicroProcessor)
- IC (Memory, EEPROM)
- IC (Memory, All except EEPROM)
- IC (Linear Gate/Logic Array)
- IC (Digital Gate/Logic Array)
- IC (PLA/PAL)
- Diode
- Transistor
- Photo Device
- Resistor
- Capacitor
- Transformer
- Coil
- Switch
- Connector, General
- Connector, Socket
- Quartz Crystals
- PCB

5 SubCategory

각 부품의 해당Category에서 세부 Category를 기술하며 각 Category 별로 다음과 같은 Subcategory 가 있다.

5.1 IC (Microprocessor, Memory, Linear, Digital, PLA/PAL)

IC (Microprocessor, Memory, Linear, Digital, PLA/PAL)의 경우에는 다음과 같은 제조기술 중에 해당하는 하나를 선택하여 약자로 기입한다.

- ALPS TTL: Advanced Low Power Schottky TTL
- AS TTL: Advanced Schottky TTL
- BCMOS: Bipolar CMOS
- CML: Current Mode Logic
- CMOS: Comp Metal Oxide Semiconductor
- DTL: Diode Transistor Logic
- ECL: Emitter Coupled Logic
- FTTL: Fast TTL
- HSTTL: High Speed TTL
- IIL: Integrated Inject Logic
- ISL: Integrated Schottky Logic
- LPSTTL : Low Power Schottky TTL
- LPTTL : Low Power TTL
- MNOS : Metal Nitr Oxide Semiconductor
- NMOS : N Channel Metal Oxide Semiconductor
- PMOS : P Channel Metal Oxide Semiconductor
- STTL : Schottky TTL
- TTL : Transistor Transistor Logic

5.2 Diode

Diode는 다음과 같은 항목중에 해당하는 항목을 선택하여 약어로 기입한다.

- Low Frequency Diodes
 - GPA : General Purpose Analog
 - SWT : Switching

- FR : Fast Recovery Power Rectifier
 - SP : Power Rectifier/Schottky Power Diode
 - HVS : Power Rectifier with High Voltage Stacks
 - TS : Transient Suppressor/Varistor
 - CR : Current Regulator
 - VR : Voltage Regulator and Voltage Reference (Avalanche and Zener)
- High Frequency Diodes (Microwave, RF)
- SI : Si IMPATT ($\leq 35\text{GHz}$)
 - GN : Gunn/Bulk Effect
 - TN : Tunnel and Back (Including Mixers, Detectors)
 - PIN : PIN diode
 - 1 SB : Schottky Barrier (Including Detectors and Point Contact
($200\text{MHz} \leq \text{Frequency} \leq 35\text{GHz}$))
 - VS : Varactor and Step Recovery

5.3 Transistor

Transistor 는 다음과 같은 항목중에 해당하는 항목을 선택하여 약어로 기입한다

- LFBP : Low Frequency, Bipolar (NPN $< 200\text{MHz}$, PNP $< 200\text{MHz}$)
- LFMOS : Low Frequency, SI FET, MOFET ($\leq 400\text{MHz}$)
- LFJFE : Low Frequency, SI FET, JFET ($\leq 400\text{MHz}$)
- UNI : Unijunction Transistors
- LNHFBBP : Low Noise, High Frequency, Bipolar, Microwave RF Transistors (Frequency $> 200\text{MHz}$, Power $< 1\text{W}$)
- HPHFBP : High Power, High Frequency, Microwave, RF Bipolar Transistors (Average Power $\geq 1\text{W}$)
- HFGA : GaAs Low Noise, Driver and Power FETs ($\geq 1\text{GHz}$)
- HFMOS : High Frequency MOSFET (Average Power $< 300\text{mW}$, Freq $> 400\text{MHz}$)
- HFJFE : High Frequency JFET (Average Power $< 300\text{mW}$, Freq $> 400\text{MHz}$)

5.4 Photo Device

Photo Device(LED포함) 다음과 같은 항목중에 해당되는 항목의 약자를 기입한다

- Photo Detectors
 - PT : Photo Transistor
 - PD : Photo Diode

- Opto-Isolators
 - PDSO : Photodiode Output, Single Device
 - PTSD : Phototransistor Output, Single Device
 - DRSD : Photodarlington Output, Single Device
 - LSSD : Light Sensitive Resistor, Single Device
 - PDDO : Photodiode Output, Dual Device
 - PTDO : Phototransistor Output, Dual Device
 - DRDO : Photodarlington Output, Dual Device
 - LSDD : Light Sensitive Resistor, Dual Device

- Emitters
 - IRLD : Infrared Light Emitting Diode
 - LED : Light Emitting Diode

5.5 Resistor

Resistor 다음과 같은 항목 중에 해당되는 항목을 선택하여 약자로 기입한다

- RC : Fixed, Composition (Insulated)
- RL : Fixed Film, (Insulated)
- RM : Fixed, Film, Chip
- RN : Fixed, Film, (High Stability)
- RD : Fixed, Film, (Power Type)
- RZ : Networks, Fixed, Film
- RB: Fixed, Wirewound (Accurate)
- RW : Fixed, Wirewound (Power Type)
- RTH : Thermistor, (Thermally Sensitive Resistor), insulated
- RT : Variable, Wirewound (Lead Screw Activated)

- RR : Variable, Wirewound, Precision
- RA : Variable Wirewound (Low Operating Temperature)
- RK : Variable, Wirewound, Semi-Precision
- RP : Wirewound, Power Type
- RJ : Variable, Nonwiewound
- RV : Variable, Composition
- RQ : Variable, Nonwirewound, Precision

5.6 Capacitor

Capacitor 다음과 같은 항목중에 하나를 선택하여 해당항목의 약자를 기입한다.

- CP : Fixed, Paper-Dielectric, Direct Current (Hermetically Sealed in Metal Cases)
- CA : By-Pass, Radio-Interference Reduction, Paper Dielectric, AC and DC (Hermetically sealed in Metallic Cases)
- CZ : Feed through, Radio Interference Reduction AC and DC (Hermetically sealed in metal cases)
- CQ : Fixed Plastic (or Paper-Plastic) Dielectric (Hermetically sealed in metal, ceramic or glass cases)
- CH : Fixed, Metallized (Paper, Paper Plastic or Plastic Film) Dielectric, Direct Current (Hermetically Sealed in Metal Cases)
- CHR : Fixed, Metallized paper, Paper-Plastic Film or Plastic Film Dielectric
- CFR : Fixed, Plastic (or Metallized Plastic) Dielectric Direct Current in Non-Metal Cases
- CRH : Fixed Supermetallized Plastic Film Dielectric (DC, AC or DC and AC) Hermetically Sealed in Metal Cases
- CM : Fixed, Mica Dielectric
- CMR : Fixed, Mica Dielectric
- CB : Fixed, Mica Dielectric, Button Style
- CY : Fixed, Glass Dielectric
- CK : Fixed, Ceramic Dielectric (General Purpose)
- CC : Fixed, Ceramic Dielectric (Temperature Compensating)
- CDR : Chip, Multiple Layer, Fixed, Ceramic Dielectric
- CSR : Fixed, Electrolytic (Solid Electrolyte), Tantalum

- CWR : Fixed, Electrolytic (Tantalum), Chip
- CL : Fixed, Electrolytic (Nonsolid Electrolyte), Tantalum
- CRL : Fixed, Electrolytic (Nonsolid Electrolyte), Tantalum Cathode
- CU : Fixed, Electrolytic (Aluminum Oxide)
- CE : Fixed Electrolytic (DC, Aluminum, Dry Electrolyte, Polarized)
- CV : Variable, Ceramic Dielectric (Trimmer)
- PC : Variable (Piston Type, Tubular Trimmer)
- CT : Variable, Air Dielectric (Trimmer)
- CG : Fixed or Variable, Vacuum Dielectric

5.7 Transformer

Transformer 다음과 같은 항목중에 해당하는 항목을 선택하여 약어로 표시한다

- FB : Flyback (<20 volts)
- AD : Audio (15-20 KHz)
- LPP : Low Power Pulse (Peak Pwr. < 300W, Avg. Pwr. < 5W)
- HPHP : High Power, High Power Pulse (Peak Power >= 300W, Avg Pwr. >= 5W)
- RF : RF(10K - 100MHz)

5.8 Coil

Coil은 다음과 같은 항목중에 해당하는 항목을 선택하여 약어로 표시한다

- FC : Fixed Inductor or Choke
- VI : Variable Inductor

5.9 Switch

Switch는 다음과 같은 항목중에 해당하는 항목을 선택하여 약어로 표시한다.

- CTF : Centrifugal
- DIP : Dual-In-line Package
- LIM : Limit
- LIQ : Liquid Level

- MIC : Microwave
- PRS : Pressure
- PSB : Pushbutton
- RED : Reed
- RCK : Rocker
- ROT : Rotary
- SEN : Sensitice
- TEM : Thermal
- THW : Thumbwheel
- TOG : Toggle

5.10 Connector, General

Connector, General은 다음과 같은 항목중에 해당하는 항목을 선택하여 약어로 표시한다.

- CR : Circular/Cylindrical
- CD : Card Edge (PCB)
- HEX : Hexagonal
- RP : Rack and Panel
- RC : Rectangular
- RF : RF Coaxial
- TP : Telephone
- PW : Power
- TR : Triaxial

5.11 Connector, Socket

Connector, Socket은 다음과 같은 항목에서 해당되는 항목을 선택하여 약자로 기입한다

- DIP : Dual-in-line Package
- SIP : Single-in-line Package
- CHC : Chip Carrier
- PGA : Pin Grid Array
- RL : Relay
- TR : Transistor

- ET : Electron Tube, CRT

5.12 PCB

PCB 는 기판의 재질을 말하며 다음과 같은 항목중에 하나를 선택하여 기술한다

- FRL : FR-4 Laminate
- FRB : FR-4 Multilayer board
- FRC : FR-4 Mulilayer Board with Copper Clad Invar
- CMB : Ceramic Multilayer Board
- CCI : Copper Clad Invar
- CCM : Copper Clad Molybdenum
- CFC : Carbon-Fiber/Epoxy Composite
- KFB : Kevlar Fiber
- QFB : Quartz Fiber
- GFB : Glass Fiber
- EPL : Epoxy/Glass Laminate
- PGL : Polyamid/Glass Laminate
- YKL : Polyamid/Kevlar Laminate
- MQL : Polyamid/Quartz Laminate
- PKM : Epoxy/Kevlar Laminate
- ALC : Alumina (Ceramic)
- EAF : Epoxy Aramid Fiber
- PFB : Polyamid Aramid Fiber
- EPQ : Epoxy-Quartz
- FTL : Fiberglass Teflon Laminates
- PCC : Porcelainized Copper Clad Invar
- FCF : Fiberglass Ceramic Fiber

6 Quantity

각 부품들이 기기에 사용된 수량을 기술한다

7 Connection Type

Connection Type은 다음과 같이 두개의 항목 조합으로 기입한다.

- HSWO: Hand solder without Wrapping
- HSW: Hand solder with Wrapping
- CR: Crimp
- WD: Weld
- SW: Solderless Wrap
- CT: Climp Termination
- RS: Reflow Solder
- SC: Spring contact
- TB: Terminal Block

- PTH: Plated Through Hole
- SMT: Surface Mounted Technology
- OTH : The others

예) Reflow Solder 방법으로 납땜이되며 SMT 형태로 기판에 부착되는 마이크로프로세서 칩인 경우에는 RS (SMT)

8 Pin Number

각 부품의 핀수를 기술한다.

9 Chip Style

각 부품의 Package Type을 기술하며 해당 Category별로 다음과 같은 Package Type이 있다.

9.1 IC (Microprocessor, Memory, Linear, Digital, PLA/PAL)

IC(Microprocessor, Memory, Linear, Digital, PAL/PLA)의 Package Type를 다음과 같은 항목중에 해당되는 항목을 선택하여 약자로 기입한다.

- HC : Hermetic Can
- HDS : Hermetic Dip, sold/weld
- HDG : Hermetic Dip, glass seal
- HF : Hermetic Flatpack
- HP : Hermetic Pin Grid Array
- HSMT : Hermetic Surface Mount Tech

- NHDS : nonHermetic Dip
- NHP : nonHermetic Pin Grid Array
- NSMT : nonHermetic Surface Mount Tech

9.2 Diode

High Frequency Diodes의 경우에는 다음과 같은 항목중에 해당하는 항목을 선택한다.

- VC : Varactor, Voltage Control
- VM : Varactor, Multiplier
- OT : All Other Diodes

Low Frequency Diode의 경우에는 다음과 같은 항목중에 해당하는 항목을 선택한다

- MB :Metallurgically Bonded
- NM : Non-Metallurgically Bonded and Spring Loaded Contacts

9.3 Switch

Switch의 Load Type 중 해당하는 항목을 선택한다

- RES : Resistive Load
- IND : Inductive Load
- LAM : Lamp Load

10 Rated (Operating) Power

각 부품의 사용전력과 정격전력을 기입한다.

11 Electrical Stress

11.1 Diode

Applied Reverse Voltage와 Rated Reverse Voltage를 기입한다.

예) Applied Reverse Voltage 가 10 V 이고 Rated Reverse Voltage 가 20 V 이면 20(10)

11.2 Transistor

Voltage, Collector to Emitter 와 Voltage, Collector to Emitter with Base Open을 기입한다.

예) 어떤 트랜지스터의 Collector to Emitter Voltage 가 15 V 이고 Collector to Emitter with Base Open Voltage 가 30 V 이면 30(15)

11.3 Capacitor

Operating Voltage(Operating DC Voltage 와 Peak AC Voltage 의 합) 와 Rated Voltage를 기입한다

예) 어떤 capacitor 의 operating Voltage 가 10 V 이고 Rated Voltage 가 20 V 이면 20(10)

11.4 Switch

Operating Load Current 와 Rated Resistive Load Current를 기입한다.

예) 어떤 Switch의 Operating Load Current 가 1 A 이고 Rated Resistive Load Current 가 2 A 이면 2(1)

11.5 Connector, General

Contact 당 전류(Ampere per Contact)를 기입한다

예) Rectangular Connector의 Contact 당 흐르는 전류가 1 A 이면 1 A

12 Application

12.1 IC (Microprocessor)

IC (Microprocessor) 의 경우에는 마이크로프로세서의 데이터처리단위를 bit로 나타낸다

예) Z80 마이크로프로세서의 경우: 8 bit

12.2 IC (Memory, EEPROM)

IC (Memory, EEPROM) 의 경우에는 다음과 같이 3가지의 조합으로 이루어진다.

1. EEPROM TYPE

- FL : Floating Gate Tunnel Oxide EEPROM
- TP : Textured Polysilicon Type EEPROM

2. Error Corretion Code 존재 유무

- NOE : No On-Chip ECC
- ONH : On-Chip Hamming Code
- TWO : Two-Needs-One (redundant Cell Approach)

3. Memory Size (kbit)

예) 1024 bit의 용량을 갖고 있는 Textured Polysilicon Type의 EEPROM이며 EEPROM 내에 Hamming Code 가 내장되어 있으면 TP:ONH:1.024 kbit

12.3 IC (Memory, except EEPROM)

IC (Memory, except EEPROM) 의 경우에는 다음과 같이 2가지의 조합으로 이루어진다.

1. Memory Type

- ROM
- PROM (EPROM)
- UVEPROM
- EAPROM
- SRAM
- DRAM

2. Memory Size (kbit)

예) 1024 bit의 용량을 갖고 있는 SRAM의 경우면 SRAM : 1.024 bit

12.4 IC (Linear)

IC (Linear) 의 경우에는 chip에 내장된 트랜지스터의 개수를 입력한다. 트랜지스터의 개수를 정확히 모르겠으면 다음과 같은 숫자를 기입한다.

- 50 : 트랜지스터의 수가 1에서 100 개 사이
- 200 : 트랜지스터의 수가 101에서 300 개 사이
- 500 : 트랜지스터의 수가 301에서 1000 개 사이
- 5000 : 트랜지스터의 수가 1001에서 10000 개 사이

12.5 IC (Digital)

IC (Digital) 의 경우에는 chip에 내장된 Gate의 개수를 입력한다. 게이트의 수를 정확히 모르겠으면 다음과 같은 숫자를 기입한다.

- 50 : 1 to 100 개
- 500 : 101 to 1000 개
- 2000 : 1001 to 3000 개
- 5000 : 3001 to 10000 개
- 20000 : 10001 to 30000 개
- 40000 : 30001 to 60000 개

12.6 IC (PLA/PAL)

IC (PLA/PAL) 의 경우에는 chip에 내장된 Gate의 수를 입력한다. 게이트의 수를 정확히 모르겠으면 다음과 같은 숫자를 기입한다.

- 100 : 1 to 200 개
- 300 : 201 to 500 개
- 700 : 501 to 1000 개
- 3000 : 1001 to 5000 개
- 10000 : 5001 to 20000 개

12.7 Diode

Low Frequency diode에만 해당되며 Junction의 수를 기입한다.

12.8 Transistor

Transistor 는 다음과 같은 항목중에 해당하는 항목을 선택하여 약어로 기입한다

- Low Frequency Bipolar
 - LA : Linear Application
 - SW : Switching

- Low Frequency SI FET
 - LA : Linear Application
 - SW : Small Signal Switching
 - PW1 : Power FET ($2W \leq \text{Rated Output Power} < 5W$)
 - PW2 : Power FET ($5W \leq \text{Rated Output Power} < 50W$)
 - PW3 : Power FET ($50W \leq \text{Rated Output Power} < 250W$)
 - PW4 : Power FET ($250W \leq \text{Rated Output Power}$)

- UNIUNCTION
 - NA : 해당안됨

- Low Noise, High Frequency, Bipolar
 - NA : 해당안됨

- High Power, High Frequency, Bipolar
 - CW : Continuous Wave
 - PS : Pulsed

- High Frequency, GaAs FET
 - CW : Continuous Wave
 - PS : All low Power and Pulsed

- High Frequency, SI FET (Average Power $< 300 \text{ mW}$, Freq $> 400 \text{ MHz}$)
 - NA : 해당안됨

12.9 Capacitor

Capacitor sub_category가 CWR이나 CSR일 경우에만 Circuit Resistance 값을 기입하며 그 외의 경우는 해당사항이 없다. Circuit Resistance (Series Resistance) 값은 다음과 같은 식을 이용하여 구한다.

$$CR = \frac{\text{Effect Resistance Between Cap. And Ppower Supply}}{\text{Voltage Applied to Capacitor}}$$

정확한 값을 구하기 힘들 경우에는 0.1로 한다.

12.10 Transformer, Coil

Transformer, Coil의 경우에는 평균온도상승분(ΔT)을 기입한다. $\Delta T =$ Average Temperature Rise Above Ambient(?)

ΔT 근사치

- 1) MIL-C-39010/1C-3C, 5C, 7C, 9A, 10A, 13, 14 : $\Delta T=15?$
- 2) MIL-C-39010/4C, 6C, 8A, 11,12 : $\Delta T=35?$
- 3) Power Loss(Case Radiating Surface Area): $\Delta T=125 W/A$
- 4) Power Loss(Transformer Weight) : $\Delta T=11.5 W/(Wt.)0.6766$
- 5) Input Power(Transformer Weight)_Assumes 80% Efficiency :
 $\Delta T=2.1 W_i/Wt.0.6766$

Where, $W_l =$ Power Loss(W), $A =$ Radiating Surface Area of Case(in²),
 $W_t. =$ Transformer Weight(lbs. = pound), $W_i =$ Input Power(W)

정확한 값을 구하기 힘들 경우에는 50 으로 한다.

12.11 Switch

Toggle Switch 와 Pushbutton Switch의 경우에만 적용되며 다음과 같은 항목에서 선택한다.

- SPST : Single Pole, Single Throw
- DPST : Double Pole, Single Throw
- SPDT : Single Pole, Double Throw

- 3PST : Triple Pole, Single Throw
- 4PST : Four Pole, Single Throw
- DPDT : Double Pole, Double Throw
- 3PDT : Triple Pole, Double Throw
- 4PDT : Four Pole, Double Throw
- 6PDT : Six Pole, Double Throw

12.12 Connectors, General

Connectors, General 의 경우에는 American Wide Gauge를 기입한다.

예) 30 Contact Gauge 인 경우에는 30

12.13 Quartz Crystal

Quartz Crystal 의 경우에는 진동수(Frequency)를 MHz 단위로 기입한다

13 Thermal Resistance Case to Ambient (C)

IC(Microprocessor, Memory, Linear, Digital, PLA/PAL) 의 경우 열저항 (Thermal Resistance Case to Ambient)값을 모를 경우 None으로 표기

Diode 의 경우 열저항(Thermal Resistance Case to Ambient)값을 모를 경우 None으로 표기

Transistor 의 경우 열저항(Thermal Resistance Case to Ambient)값을 모를 경우 None으로 표기

14 Thermal Resistance Junction to Case

IC (Microprocessor, Memory, Linear, Digital, PAL/PLA)의 경우, 정확한 데이터가 없는 경우에는 28 (C/W)을 사용한다.

Diode의 경우 Spec에 정확한 데이터가 없는 경우에는 70 (C/W)을 사용한다.

Transistor의 경우 Spec에 정확한 데이터가 없는 경우에는 70 (C/W)을 사용한다.

15 Production Year

부품제조사가 해당 부품을 제조한 기간을 기술한다

16 Operating Temp

해당 부품의 사용온도를 기술한다.

17 Tolerance

해당 부품의 오차범위를 기술한다.

18 Maker

제조사를 기술한다.

19 Web Site

제조사의 홈페이지를 기술한다.