

원자력 발전소용 공정 제어기의 보증 비용을 고려한 신뢰도 목표치 설정과 신뢰도 분석 결과에 대한 연구*

김 건 명[†]

(주)우진

A Study for Reliability Target Setting Considering Warranty Cost and Reliability Analysis Result of Process Controller in Nuclear Power Plant*

Gun Myung Kim[†]

Woojin, Inc

The products to meet the requirement of are installed in nuclear power plant and the reliability target should be provided in the requirement. However, it is not easy to set a reliability target using quantitative analysis. The objective of this paper is to propose a method of reliability target setting considered warranty cost for process controller and then compare a reliability target with reliability analysis result.

Keywords: Process Controller, Reliability Analysis, Reliability Target, Warranty Cost

1. 서론

원자력 발전 장비 납품업체들은 운영사에서 요구하는 사항을 만족하는 제품들이 설치되고 이를 확인할 수 있는 근거 자료들을 요청하고 있다. 운영사에서 요구하는 사항에는 여러 가지 척도들이 있으나 그 중에서 제품이 특정 기간동안 주어진 기능을 고장없이 수행할 수 있는 확률인 신뢰도 목표치를 제시하고 있다.

Carlier *et al.*(1996)는 우주항공설비에 결정적 RAMS(Reliability, Availability, Maintainability, Safety) 요구사항과 확률적 RAMS 요구사항에 대해 연구하였고, Lu and Rudy(2000)는 자동차에서 강도와 스트레스가 정규분포, 대수정규분포, 와이블 분포를 따를 때 고객의 기대와 요구를 만족하는 신뢰도 목표치 설정하는 방법에 대해 연구하였으며, 정인수 외(2008)와 김종운 외(2011)는 철도시스템에서 정시성 요구조건을 만족하기 위한 서비스 신뢰도와RAM 목표치 설정에 대한 연구를 수행하였다. 그러나 기존에 신뢰도 목표 설정에 관한 연구들은 기업들이 현실적으로 계약을 받고 있는 비용적인 측면

이 고려되지 않고 있다.

따라서, 본 연구에서는 원자력 발전소 내에 설치를 목적으로 개발 중인 공정 제어기에 대한 신뢰도 목표치를 무고장 보증정책하에서 보증 비용을 고려하여 설정하는 방법에 대해 기술하고, 신뢰도 분석을 통해 산출된 결과를 신뢰도 목표치와 비교하고자 한다.

2. 신뢰도 목표치 설정 및 신뢰도 분석 방법

2.1 보증 정책

생산자는 판매 기간에 고객들에게 보증 정책을 제공하고 고객들이 제품을 구입하기로 결정했다면 해당 정책을 수락하게 된다. 보증 정책(Warranty Policy)은 보증 기간(달력시간, 운용횟수 등), 고장의 보상 범위, 생산자와 고객의 수리 및 교체에 따른 재무적 책임을 명시해야 한다

널리 쓰이는 보증 정책은 다음의 세 가지 정책을 들 수 있다(Yang, 2007; 서순근, 2015).

* 본 논문은 산업통상자원부 원자력융합원천기술개발사업안전등급 공정제어계측용 지시 및 제어기 개발의 지원을 받아 연구되었음

[†] 교신저자 gmkim@woojininc.com

2015년 5월 16일 접수; 2015년 7월 6일 수정본 접수; 2015년 7월 13일 게재 확정.

- 1) 무상 보증 정책(Free Replacement Warranty(FRW) Policy)
 생산자가 고객의 최초 제품 구입시점부터 보증 기간까지 무료로 고장난 제품을 교체하거나 수리하는 보증정책
- 2) 비율 보증 정책(Pro-rata Replacement Warranty(PRW) Policy)
 재생과 비재생의 구분없이 최초의 판매에서부터 보증 기간(w_0)전에 고장난 제품에 대해, 제조자가 수리나 교체를 하지 않고 판매가격의 일부분을 환불하는 정책으로 제품 고장이 시간 t 에 발생시에 환불 금액은 $w_0 - t$ 의 선형 또는 비선형인 환불 함수 형태가 된다
- 3) 혼합 보증 정책(Hybrid or Combination FRW/PRW Policy)
 무상 보증 정책과 비율 보증 정책이 결합된 형태의 보증 정책으로, 예를 들면 생산자가 초기 판매로부터 특정 기간 내에 고장이 발생하면 무료로 수리나 교체를 해주며 그 이후부터 보증 기간 사이의 고장에 대해서는 비율 보증정책을 적용하는 정책을 들 수 있다.

최근의 생산자들은 자신들의 제품에 대한 품질이 우수하다는 것을 강조하기 위하여 고객들이 우선시 생각하고 있는 품질 및 사후 서비스에 대해 품질보증기간 내 자사 제품의 고장이 발생하면 무상으로 교체해주겠다는 정책을 고객들에게 강조하고 있다.

본 연구에서는 현실적으로 업체들이 제시하고 있는 보증 정책인 무상 보증 정책을 적용하여 신뢰도 목표치를 산출한다

2.2 무상 보증 정책하에서 보증 비용을 고려한 신뢰도 목표치 설정

생산자 또는 판매자는 보증 기간 내에 발생하는 재료비, 인건비, 폐기 비용 등을 포함한 모든 비용에 책임이 있다. 공정 제어기와 같이 복잡한 제품의 경우 수리당 비용과 하위 시스템별 고장률은 다르게 예측된다. 제품이 m 개의 하위 시스템이 직렬로 연결되어 있고, 하위 시스템의 수명이 지수분포를 따를 경우 제품을 무상으로 교체해주는 보증 정책(FRW Policy)을 적용한다면 n 개 제품에 대한 기대 보증비용 C_w 는 식 (1)과 같이 정리된다(Yang, 2007).

$$C_w = n t_0 \sum_{i=1}^m c_{0i} \lambda_i \quad (1)$$

여기서, t_0 는 보증기간, n 은 제품 수량, c_{0i} 와 λ_i 는 하위 시스템 i 의 수리당 소요되는 비용과 고장률을 나타낸다

많은 분야에서 하위 시스템 i 의 고장률이 생산 비용에 비례한다고 가정하는 것이 타당하므로 식(2)가 성립하고, 하위 시스템 i 의 고장률 λ_i 는 식 (3)과 같이 정리된다.

$$\lambda_i = K C_i \quad (2)$$

$$\lambda_i = \frac{C_i}{C} \lambda \quad (3)$$

여기서, K 는 상수, C_i 는 하위 시스템 i 의 생산 비용, 그리고 C 와 λ 는 제품의 생산 비용과 제품의 고장률이다. 즉, $C = \sum_{i=1}^m C_i$ 이고, $\lambda = \sum_{i=1}^m \lambda_i$ 이다.

식 (3)을 식 (1)에 대입하여 정리한 것이 식(4)이다.

$$C_w = \frac{\lambda n t_0}{C} \sum_{i=1}^m c_{0i} C_i \quad (4)$$

총 보증 비용 C_w 는 최대 허용할 수 있는 보증 비용 C_w^* 보다 크면 안되므로 제품의 최대 허용 가능 고장률 λ^* 는 식 (5)를 이용하여 산출할 수 있다.

$$\lambda^* = \frac{C_w^* C}{n t_0 \sum_{i=1}^m c_{0i} C_i} \quad (5)$$

따라서, 각 하위 시스템의 수명이 지수분포를 따르고 직렬로 구성되어 있을 경우 시스템의 수명분포는 지수분포를 따르므로 제품의 신뢰도 목표치 $R(t)^*$ 는 식 (5)의 목표 고장률 λ^* 값을 식 (6)에 대입하여 산출할 수 있다.

$$R(t)^* = e^{-\lambda^* t} \quad (6)$$

2.3 신뢰도 분석

대상 시스템의 신뢰도를 분석하기 위해서는 먼저 대상 시스템의 하위 시스템 및 구성 부품을 교체 가능한 단위까지 계층화하고, 고장이력자료 및 기준서 등을 적용하여 각 부품 및 보드에 대한 신뢰도 척도(고장률, 신뢰도 등)를 추정한다. 그 다음 신뢰성 블록도(Reliability Block Diagram; 이하 RBD로 지칭함)를 이용하여 구성 부품을 모델링하고 대상 시스템의 신뢰도를 산출한다.

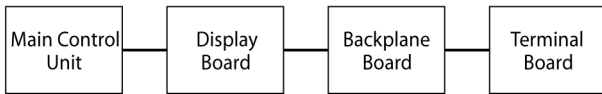
구성 부품 및 보드에 대한 신뢰도 척도는 현장에서 획득된 고장이력자료가 존재할 경우는 고장이력자료를 기초로 통계적 방법을 적용하여 추정할 수 있지만, 공정 제어기와 같이 운영 이력이 없는 신규 개발 시스템에 대해서는 고장자료를 획득하기 어려우므로 기준서(MIL-HDBK-217F, Telcordia 등), 데이터북(NPRD/EPRD), 제조사 정보를 적용하여 고장률을 예측한다.

본 연구에서는 공정 제어기내 구성 부품 및 보드별로 구분하고, 보드별 명세서를 정리한 후 원자력 발전소 내 설치되는 환경조건과 부품의 품질조건을 토대로 MIL-HDBK-217F 기준서를 적용하여 고장률을 예측한다

3. 공정 제어기에 대한 신뢰도 목표치 산출 및 신뢰도 분석 결과 비교

3.1 공정 제어기

공정 제어기는 계측 신호를 입력받아 처리하여 출력 신호를 생성하는 Main Control Unit, 정보를 표시하고 사용자 입력을 받는 Display Board, Main Control Unit과 Terminal Board를 연결하는 Backplane Board, 외부 케이블이 체결되는 Terminal Board로 구성되며, <그림 1>과 같이 초기 설계단계에서 직렬로 구성된다.



<그림 1> 공정 제어기의 RBD

3.2 신뢰도 목표치 산출

공정 제어기에 대한 신뢰도 목표치를 무상 보증 정책에서 보증 비용을 고려하여 제 2.2절에 설명한 방법을 적용한다. 공정 제어기를 보증하는데 소요되는 비용에 대한 정보는 제 조사 정보로 공유하기가 어려워 현재 적용되고 있는 상황을 참조하여 전체 생산비용 C 에 대한 비율로 다음과 같이 정의하여 산출하였다.

$$\begin{aligned}
 t_0 &= 2\text{년}(17,520\text{시간}), n = 600\text{대}, C_w^* = 0.15 \times n \times C, \\
 C_1 &= 0.7702 \times C, C_2 = 0.2011 \times C, C_3 = 0.0057 \times C, \\
 C_4 &= 0.0230 \times C, c_{01} = 0.8 \times C_1, c_{02} = 0.8 \times C_2, \\
 c_{03} &= 0.8 \times C_3, c_{04} = 0.8 \times C_4
 \end{aligned}$$

<표 1> 공정 제어기내 부품에 대한 고장률 예측 결과

아이디 ID	장치명	수량	기능	고장률 (failure/hour)	평균 수명 MTBF(hour)	고장 데이터 산출근거	
100000	1	Single Station Controller					
110000	1	Main Control Unit		8.45E-06	118,277		
111000	1	Analog Input(AI) Board	1	Analog 신호를 입력받아 Digital data로 변환함	9.55E-07	1,046,901	MIL-HDBK-217F
112000	1	Analog Output(AO) Board	1	CPU로 부터 신호를 받아 Analog 신호로 출력함	6.00E-07	1,665,556	MIL-HDBK-217F
113000	1	CPU Board	1	입출력 신호 처리, 제어 Algorithm을 수행함	6.15E-06	162,588	MIL-HDBK-217F
114000	1	Backup Display Board	1	LCD가 표시 불능 시 중요 정보를 표시 및 계속 제어를 수행할 수 있는 Key switch를 제공함	7.49E-07	1,335,827	MIL-HDBK-217F
120000	1	Display Board	1	정보의 표시 및 입력 기능	2.44E-06	409,769	MIL-HDBK-217F
130000	1	Backplane Board	1	Main, Backup control unit과 Terminal board를 연결함	4.29E-07	2,330,459	MIL-HDBK-217F
140000	1	Terminal Board	1	외부 Cable이 체결되는 Board	1.18E-06	844,452	MIL-HDBK-217F

따라서, 상기 자료들을 식 (5)에 대입하여 목표 고장률 λ^* 를 구하면 식(7)과 같이 1.12497×10^{-5} 으로 산출된다.

$$\begin{aligned}
 \lambda^* &= \frac{0.15 \times n \times C^2}{n \times t_0 (0.47457 \times C^2 + 0.03235 \times C^2 + 0.00003 \times C^2 + 0.00042 \times C^2)} \quad (7) \\
 &= \frac{0.15}{0.50737 \times t_0} = \frac{0.15}{0.50737 \times 17,520} = 1.68746 \times 10^{-5}
 \end{aligned}$$

그리고 상기 목표 고장률 결과를 식 (6)에 대입하여 식 (8)과 같이 74.405%로 산출되어 공정 제어기의 신뢰도 목표치로 설정한다.

$$R^* = e^{-1.68746 \times 10^{-5} \times 17520} = 0.74405 \quad (8)$$

3.3 신뢰도 분석

<표 1>의 공정 제어기내 각 보드에 대한 고장률을 예측한 결과를 이용하여 <그림 1>과 같이 구성된 RBD에 각 보드 고장률을 입력하고 공정 제어기의 고장률과 2년(보증기간)에서의 신뢰도를 산출한 후 목표 고장률과 신뢰도를 비교하여 정리한 것이 <표 2>다.

<표 2> 공정 제어기의 신뢰도 분석 결과와 목표치 비교

척도	공정 제어기	
	신뢰도 분석 결과	목표치
고장률 (failures/hour)	1.25084×10^{-5}	1.68746×10^{-5}
신뢰도 (R(17,520))	80.30951%	74.4054%

<표 2>에서와 같이 공정 제어기가 연속적으로 계속 운행될 경우 고장률은 1.25084×10^{-5} 으로 1,000,000시간동안 고장이 1.25084건 발생하는 것으로 추정되었고, 보증 기간 2년시점에서 전체 출고된 제어기 중 약 80% 정도는 고장 없이 운행되는 것으로 추정되었다. 따라서, 공정 제어기의 목표 고장률과 신뢰도 결과를 비교해보면 초기 설계단계에서 분석한 고장률과 신뢰도 결과가 목표치보다 크므로 요구사항을 만족하고 있다고 판단할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 원자력 발전소 내에 설치된 계측기를 제어하는 공정 제어기를 대상으로 무상 보증 정책하에서 보증 비용을 고려한 신뢰도 목표치를 설정하는 방법과 신뢰도 분석을 통해 산출된 결과와 목표치를 비교하였다.

공정 제어기의 신뢰도 분석 결과 고장률은 1.25084×10^{-5} 로 신뢰도 목표치로 산출된 고장률 1.68746×10^{-5} 보다 작고, 보증 기간 2년 시점에서 신뢰도는 약 80%로 추정되어 신뢰도 목표치로 산출된 신뢰도 약 74%보다 크게 산출되어 요구조건을 만족하고 있다고 판단할 수 있었다.

본 연구에서 제시한 신뢰도 목표 설정 방법 및 신뢰도 분석 결과는 향후 유사 제품에 대한 신뢰도 요구사항 수립 및 신뢰도 분석시 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

추후 연구로 초기 설계단계에서는 하위 시스템들이 직렬로 구성하였으나 향후 시스템의 신뢰도를 향상시키기 위해 redundancy를 고려한 구조에서 신뢰도 목표치를 수립하고자 한다.

참고문헌

- [1] 김종운 외(2011), 철도시스템 정시성 요구조건을 만족하기 위한 서비스 신뢰도 목표값 설정, 한국철도학회지, 제14권, 제1호, pp. 6-10.
- [2] 서순근 (2015), Minitab 신뢰성 분석, 이레테크
- [3] 정인수 외(2008), 철도차량 정량적 신뢰성·가용성·유지보수성(RAM) 목표값 설정에 관한 연구, 한국철도학회지, 제11권, 제4호, pp. 390-397.
- [4] Carlier *et al.* (1996), Evaluation of Reliability, Availability, Maintainability and Safety Requirements for Manned Space Vehicles with Extended On-Orbit Stay Time, *Acta Astronautica*, Vol. 38, No. 2, pp. 115-123.
- [5] Lu, M. W. and Rudy, R. I. (2000), *Reliability Test Target Development*, Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp. 77-81.
- [6] Yang, G. (2007), *Life Cycle Reliability Engineering*, John Wiley and Sons, Inc.