2000 춘계학술 발표회 논문집
한국원자력학회

전자 기기의 하드웨어 신뢰도 예측 방법 조사
A Survey of Methodologies for the Hardware Reliability Prediction of Electronic Equipment

정환성, 성태용, 박진희, 이기영, 박종균
한국원자력연구소

요약

디지털 계측제어 시스템의 사용이 확산되고 규제의 방향이 위험도 기반으로 정착되면서 디지털 계측제어 시스템의 확률론 적 안전성 분석의 필요성이 대두되었다. 소프트웨어와 하드웨어를 통합한 시스템에 대한 신뢰도 예측 방법은 아직까지 확립된 것이 없다. 따라서 우선 디지털 계측 시스템에 사용되는 전자 기기의 하드웨어 정량적 신뢰도 평가에 사용될 수 있는 예측 방법들을 조사하였다. 하드웨어의 신뢰도 예측방법은 이미 많이 개발되어 있고 각 방법에 따른 예측 결과가 서로 다르게 나타나므로 사용자는 적용 목적에 따라 알맞는 방법을 선택하여야 한다. 본 조사에서는 신뢰도 예측 방법들의 특징과 장단점을 분석하고, 특히 대표적인 신뢰도 예측 방법인 MIL-HDBK-217 과 Bellcore TR-332 방법을 집중 비교 검토하였다.

Abstract

Digital I&C systems are being used widely in the non-safety systems of the NPP and they are expanding their applications to safety critical systems. The regulatory body shifts their policy to risk based and may require Probabilistic Safety Assessment for the digital I&C systems. But there is no established reliability prediction methodology for the digital I&C systems including both software and hardware yet. This survey includes a lot of reliability prediction methods for electronic equipment in view of hardware. Each method has both the strong and the weak points. This report provides the state-of-art of prediction methods and focus on Bellcore TR-332 method and MIL-HDBK-217 method extensively.

1. 서론

전자 기술의 발달과 더불어 계측제어 시스템에서 디지털 기술로 대표되는 컴퓨터의 사용은 필수적이 되었다. 이러한 추세는 일반 산업계에서 분산 컴퓨터 시스템 또는 프로그래머블 제어기 형태의 제어 시스템으로 개발되어 쓰이고 있다. 그리고 일반 산업계에서는 그 사용 범위와 적용의 대상이 광범위하여 그 성능을 인정받고 있다. 그리고 원자력 발전소의 계측

제어 계통에서도 비 안전 계통에서는 널리 사용하고 있다. 다만 보호계통 등 안전과 직접 관련되는 계통에서는 성능 검증 및 입증 과정의 어려움으로 일반화되어 있지는 않다. 그러나 규제의 방향이 위험도 기반으로 변화되면서 디지털 계측제어 계통의 규제도 정량 분석을 이용하는 방향으로 정착되고 있다.[1] 디지털 시스템은 특성상 기존의 아날로그 기기의 정량 분석방법을 따르는데 어려움이 있다. 아날로그 시스템에서는 신뢰도 모델링 시 하드웨어만을 고려하면 되었으나 디지털 시스템은 하드웨어만으로는 그 기능을 모델 할 수 없다. 하드웨어는 소프트웨어가 주어진 기능을 수행하기 위한 기반만을 제공한다. 따라서 전체 시스템의 신뢰도를 분석하기 위해서는 이 두 가지가 복합된 것을 다루어야 한다. 물론 하드웨어와 소프트웨어를 나누어 각각의 신뢰도를 계산하는 방법은 많이 개발되어 있다. 물론 이들 방법도 아직 전형적인 방법으로서 자리잡고 있지 못한 실정이다. 그리고 역시 이들을 통합하여 다루는 분야도 현재 논의가 활발하게 이루어지고 있다.[2]
본 조사에서는 디지털 계측제어시스템의 하드웨어만을 고려하여 이의 신뢰도를 정량적으로 평가하는 방법들을 검토하고 비교한다.

2. 부품의 신뢰도 예측 방법

미국의 Reliability Analysis Center 에 의하여 조사된 전자 시스템의 고장률 분포는 그림 1과 같다.[3]

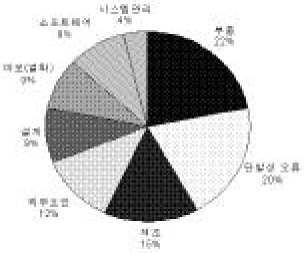

그림 1 전자 시스템의 고장율 분포

여기서 부품은 마이크로회로나 트랜지스터, 저항, 연결 단자 등의 부품 고장으로 인한 것을 말한다. 단발성 오류는 고장으로 발견되었으나 재현할 수 없는 경우로서 실제 고장이 아닌 경우일 수도 있다. 제조는 제조상의 결함으로 인한 경우이다. 외부 요인은 전기적 충격이나 잘못된 보수로 인한 고장을 의미한다. 설계는 허용 한계 누적, 로직 불 합리, 내환경 미비 등의 설계상의 오류로 인한 것을 의미하고 마모는 기기의 열화로 인한 고장을 의미한다. 소프트웨어는 소프트웨어로 인한 고장을 의미하고 시스템 관리는 시스템 요건 해석 오류나 설계, 구축에 필요한 자원을 공급하지 못한 경우 등을 말한다. 이와 같이 대부분의 고장이 부품의 고장으로 발생되나 그 이외에 설계, 제조, 외부요인, 미확인 단발성 요인도 중요한 요인이다. 그리고 이 조사에서는 소프트웨어에 의한 경우는 9 %로 비중은 작지만, 최근의 추세는 응용 연구비의 60%이상을 소프트웨어 신뢰성 연구에 투자하여야할 정도로 소프트웨어 고장이 시스템 신뢰도에 많은 영향을 주는 것으로 알려져 있다.

2.1 부품 고장율 예측 방법

부품의 고장률을 추정하는데 가장 직접적인 접근 방법은 기술적인 변수와 신뢰도 변수의 관계 즉, 모델을 얻기 위해 수집된 고장 자료를 이용하는 것이다. 부품의 고장율을 계산하는 방법은 그 목적과 사용 주체에 따라 여러 가지가 개발되어 사용되고 있다. 전자 기기의 고장율 데이터를 갖추고 있는 방법들은 다음과 같은 것들이 있다.

- MIL-HDBK-217 (revision F) [4]
- HRD4 [5]
- Siemens (SN29500) [6]
- CNET [7]
- Bellcore (TR-TSY-000332, issue 6) [8]
- Italtel IRPH93 [9]
- NTT [10]

신뢰도 예측을 위해 사용되는 데이터 가운데 가장 널리 알려지고 사용되는 핸드북은 MIL-HDBK-217이다. 이는 전자 장비의 신뢰도 예측을 위한 군사 핸드북으로 Rome 연구소와 신뢰도 분석 센터(Reliability Analysis Center: RAC)의 연구를 기반으로 미 국방성에서 편찬하였다. 신뢰도 예측을 위한 또 다른 방법은 Bellcore 방법 TR-332 이다. Bellcore는 벨 통신 연구소의 이름을 인용한 것으로서 이전에는 신뢰성 예측을 위해 MIL-HDBK-217을 많이 사용하였으나 1985년 그들의 현장 경험을 보다 더 잘 반영시키기 위해 모델을 수정하였고, 상업적인 전자 제품들에 보다 더 응용 적절한 Bellcore 신뢰도 예측 절차를 개발하였다. 이밖에도 HRD(영국), Siemens(독일), NTT(일본), Italtel(이탈리아), CNET(프랑스) 등의 신뢰도 예측 방법들이 있고 각 나라마다 그들에게 맞는 방법을 적용하고 있다.

따라서 본 조사에서는 가장 많이 사용하는 두 가지 방법인 MIL-HDBK-217 와 Bellcore TR-332 방법을 자세히 검토한다.

2.2 MIL-HDBK-217

MIL-HDBK-217은 전자 시스템에서 사용되는 다양한 전자 부품에 대한 고장률을 포함하고 있다. 이러한 전자 부품의 고장률 모델은 다양한 시스템과 부품들에 대해 얻어질 수 있는 최상의 현장 데이터를 기반으로 하고 있으며 이용 가능한 모델을 생성하기 위해서 많은 단순화된 가정들을 기반으로 하고 있다. MIL-HDBK-217은 설계 단계의 지침을 제공해 주며 일정한 시스템 신뢰도에 개개 부품의 고장률을 결합하는 것을 가능하게 해준다. 가장 최근의 개정판인 MIL-HDBK-217F는 군사 전자 장비의 신뢰성을 추정하기 위한 것으로 군사 전자 시스템에 대한 신뢰도 예측과 비교를 위한 기본 토대를 확립하고 있다. 신뢰도 예측을 위해 부품 스트레스 분석법(part stress analysis)과 부품 카운트 분석법(part count analysis)을 적용한다. 이 분석법들은 적용 할 때 요구되는 정보의 수준에 따라 구분된다. 부품 스트레스 분석법은 상당량의 상세 정보가 필요하고 하드웨어와 전자 회로가 실제로 설계되는 설계 후반부에 적용 가능하다. 부품 카운트 분석법은 설계 초반에 적용 가능한 방법으로 다소 적은 량의 정보를 필요로 하는데 부품량, 부품 품질 그리고 적용 환경에 관한 정보가 필요하다. 일반적으로 부품 카운트 분석법은 부품 스트레스 분석법에 비해 보수적 추정치(conservative estimate), 즉 보다 높은 고장률을 유발한다. MIL-HDBK-217F에서 지원하는 전자 부품 고장률 부품 종류는 집적회로, 트랜지스터, 다이오드, 저항, 커패시터, 릴레이,

스위치, 커넥터 등 19종 84 타입이다. 부품 카운트 법에 적용하는 고유 고장율 데이터는 부품 스트레스 법의 공식(모델) 에 기본 값(default value)를 적용한 것으로서 일반적인 경우로 볼 수 있다. 따라서 스트레스나 환경 조건이 다르게 되면 부품 스트레스 분석법에 의한 고유 고장율 값이 부품 카운트에 의한 값보다 크거나 작을 수 있다.

2.2.1 부품 스트레스 분석법

부품 스트레스를 포함한 부품에 관한 상세 정보 즉, 부품명, 부품 설명, 사용 개수, 제조업자 등의 공통 데이터와 품목 고유의 중요 데이터 즉, 집적회로의 경우엔 LSI, MSI, SSI 등의 집적도, TTL, LIN, MOS 등의 로직, 게이트, 트랜지스터 개수, 리드(lead) 수, 최대 전압, 최대 전류, 접합 온도에 관한 정보, 커패시터의 경우 정격 전압, 품질 수준, 정전 용량에 관한 데이터, 개별 반도체의 경우 온도 특성, 재질, 정격 전압, 정격 전력, 품목 등에 관한 데이터가 사용 가능할 때 적용 가능하다. 이것은 부품 선택, 스트레스와 신뢰성간의 절충을 위해 설계 후반부에 사용될 수 있다. 제시된 고장률은 전원이 켜진 상태에서 주어진 환경에서 주어진 기능을 수행하는 등의 정상적인 동작을 수행하는 장비에 적용된다. 보드 레벨(혹은 시스템 레벨)의 고장률을 결정하기 위한 일반적인 절차는 각 소자 단위로 개별적으로 계산된 고장률을 모두 합하는 것이다. 이러한 합은 회로 보드에 대한 고장률, 납땜된 점프선의 고장률, 커넥터에 대한 고장률에 더해진다. 부품 고장 모델은 부품의 형태에 따라 서로 다르게 변하나 일반적인 형태의 부품 전체의 고장률(λ_p)은 다음과 같다.

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_E \pi_A \pi_Q \pi_T \cdots \pi_n$$

여기서

λ_b : 기본 고장률

π_Q : 품질 인자

π_E : 환경 인자

π_n : 반복인자

π_A : 적용 인자

π_T : 온도 인자 이다

2.2.2 부품 카운트 법

부품 스트레스 분석을 적용하기에 정보량이 불충분할 경우에 사용 가능한 방법으로서 시스템 초기 설계 과정, 제안 단계에서 적용 가능하다. 이 방법을 적용하기 위해 필요한 정보로는 일반적인 부품 타입과 부품 량, 부품 품질, 장비가 사용되는 환경에 관한 내용이다. 전자 시스템의 고장률은 ML-HDBK-217F (issue 2)에서 테이블로 주어진 각 소자들의 고유 고장률(generic failure rate)과 부품 품질 인자를 곱한 값을 장비의 다른 소자들의 고장률에 단순히 더해줌으로써 얻어질 수 있다. 이 분석 기법은 이용 가능한 기술적 정보를 사용하며, 개개 부품의 부하와 설계에 관련된 상세 자료를 요구하지 않는다.

일반적인 수학적 모델은 다음과 같다.

$$\lambda_{EQUIP} = \sum_{i=1}^{i=n} N_i (\lambda_g \pi_Q)_i$$

여기서 각각의 변수는 다음과 같다.

λ_{EQUIP} : 기기의 총 고장율 (고장/10^6 시간)
λ_g : i 번째 부품의 고유 고장율 (고장/10^6 시간)
π_Q : i 번째 고유 부품의 품질 인자
N_j : i 번째 고유 부품의 숫자
n : 기기 내에 있는 고유 부품 카테고리의 수

이 계산식은 전체 기기가 동일한 환경에 놓이는 것으로 간주한다. 만약 기기가 서로 다른 환경에서 작동되는 여러 단위기기가 모여서 구성된 경우에는 계산을 각각의 환경 조건별로 수행하여야 한다. 따라서 기기의 총 고장율을 구하기 위해서는 이와 같은 "환경-기기" 고장율들을 더해야 한다. 품질 인자도 표에 나타나있으나 부품 스트레스 분석법에서 사용하는 값과 같은 것은 아니다. 집적 회로에 대하여는 λ_g 외에 π_L 이라는 인자를 곱한다. 이 인자는 공정의 성숙도를 나타내는 것으로서 생산한지 2년 이상인 경우에는 보정이 필요 없다(π_L=1). 생산 이력이 2 년 이하인 경우의 해당 기간별로 표에 있는 값을 고려한다. 특별히 전형 화된 설계가 없는 하이브리드 마이크로 회로에 대하여는 일반적인 고장율자료가 없다. 따라서 이런 경우에는 부품 스트레스 분석법에 있는 방법을 적용한다.

부품 카운트 법에 쓰이는 고장율 자료는 부품스트레스 법에서 사용하는 모델에 변수의 기본값을 대입하여 계산되었다. 따라서 기본 환경 조건과 기본 스트레스 조건에서는 부품 스트레스 분석법과 부품 카운트법의 계산 결과가 같다. 이 기본 값들은 부품 스트레스 분석법의 기본(고유) 고장율인 λ_g 자료에 나타나 있다. 그러나 기본 값과 상이한 부품이나 많은 량의 부품을 고려할 경우에는 부품 스트레스 분석 방법을 따를 수 있다.

2.3 Bellcore TR-332

Bellcore 방법 역시 MIL-HDBK-217 과 같이 직렬연결 시스템을 대상으로 하고 있고, 소프트웨어에 의한 고장은 고려하지 않고 있다. 가장최근에 발행된 Bellcore 자료는 TR-332 로서 6번째 개정판이다. 기본적으로 Bellcore 방법은 정상상태 고장율 예측과 첫해승수 값을 예측하는 방법이다. Bellcore 에서는 신뢰도 예측 방법으로 3가지를 제안하였다. 이 방법들은 다음과 같다.

- 방법 I : 부품 카운트 법
- 방법 II : 부품카운트 법에 burn-in 시험 결과를 복합한 방법
- 방법 III : 현장자료 추적을 근거로 한 통계적 예측법

Bellcore 에서는 특정방법의 선택을 강요하지는 않으나 방법 II, III을 선택할 때는, 비교를 위하여 방법I 에 의한 결과를 첨부하도록 하고 있다. 그리고 Bellcore 은 기술적으로 뒷받침되는 근거가 있는 고장 자료를 사용토록 하고 있다. 이들은 현장 자료, 실험실 자

료, ML-HDBK-217, 기기 제작자 자료, 기기 공급자의 자료, 공학적 분석 등이다. 각 방법에 대하여 살펴보면 다음과 같다.

2.3.1 방법I : 부품 카운트 법

이 방법은 ML-HDBK-217의 부품카운트 법과 동일하며, 유닛의 고장율을 계산하기 위하여 개별기기의 고장율을 더한다. 개별 기기의 신뢰도를 결정하는 변수는 기기의 운전 환경, 품질 요건, 적용 조건(온도와 전기적인 스트레스) 이다. 이 방법 적용을 위한 지침으로 사용조건과 burn-in 취급방법에 따라 3가지로 분류하였다.

- 경우 1 : 사용온도 40℃이고 전기적 스트레스가 50% 로 가정하고 기기burn-in 은 없고, 유닛/시스템 burn-in 이 1시간 이하인 블랙 박스로 취급
- 경우 2 : 사용온도 40℃이고 전기적 스트레스가 50% 로 가정하고 기기burn-in 은 없고, 유닛/시스템 burn-in 이 1시간 이상인 블랙 박스로 취급
- 경우 3 : 위의 두 경우가 아닌 모든 경우 (예를 들면 사용온도가 사용온도 40℃ 이상이고 전기적 스트레스가 50% 이상)

경우 1이 가장 단순하고 경우 3이 가장 복잡하다. 따라서 첫해 승수와 정상상태 고장율을 계산하는 방법도 복잡도가 다르다. 경우 2를 사용하는 이유는 경우1이 burn-in 결과를 반영하지 못하므로, burn-in 시험결과를 반영하여 초기의 고장율을 줄이고자 하는 것이다. 경우 3은 그보다 더 시험조건을 반영하여 고장율을 최적으로 반영하기 위한 것이다. 먼저 정상상태 고장율은 다음과 같이 계산한다.

(1) 정상상태 고장율

경우 3이 일반적인 형태이고 이에 대한 모델은 다음과 같다.

$$\lambda_{SS_i} = \lambda_{G_i} \pi_{Q_i} \pi_{S_i} \pi_{T_i}$$

여기서

λ_{G_i} : i 번째 부품의 고유 고장율

π_{Q_i} : i 번째 부품의 품질 인자

π_{S_i} : i 번째 부품의 스트레스 인자

π_{T_i} : i 번째 부품의 온도 인자 (정상 상태의 운전 온도) 이다.

부품의 고유 고장율은 ML-HDBK-217에서 인용하거나, Bellcore에서 자체적으로 구하여 고장율 자료 표 (TR-332 Table 11) 에 정리하였다.

경우 1이 가장 단순하고 경우 3이 가장 복잡하다. 따라서 첫해 승수와 정상상태 고장율을 계산하는 방법도 복잡도가 다르다. 경우 2를 사용하는 이유는 경우1이 burn-in 결과를 반영하지 못하므로, burn-in 시험결과를 반영하여 초기의 고장율을 줄이고자 하는 것이다. 경우 3은 그보다 더 시험조건을 반영하여 고장율을 최적으로 반영하기 위한 것이다. 경우 3이 일반적인 형태이고 이에 대한 모델은 다음과 같다.

$$\lambda_{SS_i} = \lambda_{G_i} \pi_{Q_i} \pi_{S_i} \pi_{T_i}$$

여기서

λ_{G_i} : i 번째 부품의 고유 고장율

π_{Q_i} : i 번째 부품의 품질 인자

π_{S_i} : i 번째 부품의 스트레스 인자

π_{T_i} : i 번째 부품의 온도 인자 (정상 상태의 운전 온도) 이다.

부품의 고유 고장율은 MIL-HDBK-217에서 인용하거나, Bellcore에서 자체적으로 구하여 고장율 자료 표 (TR-332 Table 11) 에 정리하였다. Bellcore 절차서 에서 고장율을 제공하는 기기의 종류는 주로 통신에 관련된것으로 16 종류이다. 따라서 사용자는 고장률 자료 표에서 사양에 알맞은 것을 선정하여 계산에 이용하면 된다.

온도가 40 ℃ 이고 스트레스가 50% 일 때는 경우 1, 2 는 $\pi_T = \pi_S = 1.0$ 이므로 공식은 간단해진다.

$$\lambda_{SS_i} = \lambda_{G_i} \pi_{Q_i}$$

유닛의 정상상태 고장율은 유닛 내의 모든 기기의 고장율의 합에 유닛의 환경인자를 곱하여 계산한다.

$$\lambda_{SS} = \pi_E \sum_{i=1}^{n} N_i \lambda_{SS_i}$$

여기서

n = 유닛내의 서로 다른 기기의 종류

N_i = i 번째 종류의 기기 수

π_E = 유닛의 환경 인자이다.

단 하이브리드형의 집적 회로는 일반적인 유형으로 구분이 어렵고 이름만으로 구성의 복잡도 등을 알 수 없으므로 MIL-HDBK-217 의 식을 변형한 다음과 같은 별도의 고장율 모델이 있다.

$$\lambda_{HIC} = \sum(\lambda_G \pi_Q \pi_S \pi_T) + (N_I \lambda_I N_C \lambda_C N_R \lambda_R)(\pi_F)$$

2.3.2 방법 II : 부품 카운트 법과 실험 자료를 복합한 예측 방법

방법II 는 실험 자료를 이용하여 신뢰도를 예측하는 방법이다. 이 절차의 목적은 기기 제작자가 현실적이고 유용한 실험실 시험(laboratory test)을 수행하도록 체계를 확립하는데 있다. 실험실 시험은 비용이 수반되므로 이 결과가 방법 I 에 의한 고장율에 미치는 효과를 고려하여 비교검토후 실시하는 것이 바람직하다. 방법 II 는 부품 카운트 법에 의한 고유 고장율과 실험실 시험 고장 자료의 가중 평균을 계산하는 것이다. 물론 가중치는 실험실 시험의 결과에 의하여 결정된다. 기기의 고유 고장율 값은 TR-332의 표 A에서 구하고, 유닛의 고장율 값은 $\lambda_{SS}/(\pi_E \pi_T)$ 이다. 실험실 자료가 유용하면 방법 II 에 의한 고장율은 실험실 시험 결과에 좌우되고, 그렇지 않으면 방법 II 의 결과는 고유고장율에 좌우된다. 방법 II에 의한 결과를 이용하면 기기(device)나 유닛(unit)의 기초 고장율은 부품 카운트 법의 고유 고장율을 대신한다. 이 기초 고장율은 방법 II 의 정상상태 고장율을 계산하는데 사용된다. 또한 이 기기 기초 고장율은 유닛 수준의 부품 카운트 법에 사용하는 표 A 의 고유 고장율을 대치한다. 유닛 수준의 고장율이 시스템의 신뢰도 모델에 입력으로 사용될 때는 방법 II 에 의한 유닛의 정상상태 고장율이 부품 카운트 법에 의한 고장율을

대체한다. 단 방법 II 는 표 A 에 기기에 대한 고유 고장율 자료가 없는, 품질 등급 II 나 III 에 따라 구매하거나 제작된 기기에도 적용 가능하다. 표 A 에 자료가 없는 품질 등급 I 에 해당되는 기기의 고장율은 기타 다른 자료를 사용할 수 있다.

방법 II를 적용하기 위한 경우는 4가지 나누어지며 다음과 같다.

- 경우 L1 : 이전에 기기 burn-in 이 없는 기기의 실험실 시험
- 경우 L2 : 이전에 기기/유닛 burn-in 이 없는 유닛의 실험실 시험
- 경우 L3 : 이전에 기기 burn-in 이 있는 기기의 실험실 시험
- 경우 L4 : 이전에 기기/유닛 burn-in 이 있는 유닛의 실험실 시험

각각의 경우의 방법 II에 의한 기초 고장율 (λ_{G_i})과 각 식에 나타나는 기호는 다음과 같다.

n = 실험실 시험에서의 고장 횟수

λ_{G_i} = TR- 332 에 있는 기기 고유 고장율 [FITS]

N_0 = 시험한 기기/ 유닛 숫자

T_1 = 유효 시험 시간

π_Q = 기기 품질 인자

λ_G = 유닛 고유 고장율($\lambda_{SS}/(\pi_E\ \pi_T)$)

$\lambda_{G_i}^*$ = 기기 기초 고장율

λ_G^* = 유닛 기초 고장율

4가지 경우 중에서 경우 3에 대한 절차는 다음과 같다.

(1) 우선 총 유효 burn-in 시간을 정의한다.

$T_e = A_{b,d}\ t_{b,d}$

여기서

$A_{b,d}$ =기기 burn-in 온도에 대응되는 온도 가속 인자 (표 G 의 커브 7)

$t_{b,d}$ = 기기 burn-in 시간 (시간) 이다

(2) 방법 II 에 의한 기초 고장율($\lambda_{G_i}^*$)은 다음과 같다.

$$\lambda_{G_i}^* = [2 + n]/[(2/\lambda_{G_i}) + (4\times 10^{-6})N_0 W \pi_Q]$$

(3) W는 다음과 같이 계산한다.

만약 $T_1 + T_e \leq 10,000$ 이면

$$W = (T_1 + T_e)^{0.25} - T_e^{0.25}$$

만약 $T_1 + T_e > 10,000 \geq T_e$ 이면

$$W = ((T_1 + T_e)4000) + 7.5 - T_e^{0.25}$$

만약 $T_e > 10,000$ 이면

$W = T_1/4$ 이다.

(4) 그리고 방법 II 에의한 유니트의 정상상태 고장율은 다음과 같이 방법 I에서 λ_{G_i} 를 $\lambda_{G_i}^*$ 로 대치하면 된다.

$\lambda_{SS_i} = \lambda_{G_i}^* \pi_{Q_i} \pi_{S_i} \pi_{T_i}$ (경우 3)

$\lambda_{SS_i} = \lambda_{G_i}^* \pi_{Q_i}$ (경우 1,2)

2.3.3 방법 III : 현장 추적 자료를 이용한 통계적 예측

현장에서 발생된 고장을 추적하여 수집한 자료를 이용하여 기기나 유닛의 현장 고장율을 계산할 수 있다. 그리고 계산된 값으로 기기나 유닛의 방법 III 정상상태 고장율을 계산하는데 사용하고, 이 결과는 시스템 수준의 신뢰도 모델에 적용할 수 있다. 이 방법에 적용되는 용어의 정의는 다음과 같다.

- 대상 시스템 : 유닛 수준의 고장율 예측이 특정 시스템의 분석에 이용될 때 이 대상 시스템을 말한다.
- 대상 유닛 : 대상 시스템에 속한 유닛이다.
- 추적 시스템들 : 현장 추적자료가 수집된 가동중인 계통들의 특정한 표본으로 대상 시스템과 다를 수 있다.
- 추적 유닛 : 추적 시스템에 속한 유닛으로서 신뢰도 자료가 수집된 것을 말한다. 이 것 역시 대상 유닛과는 다를 수 있다.

또한 방법 III에 적용되는 식에 포함된 기호는 다음과 같다.

t = 추적 시스템 내에 있는 기기나 유닛의 총 운전 시간

f = t 시간 내에 추적 시스템 내에서 관측된 고장의 숫자

ϕ = 미지의 숫자로 정상 상태 고장율

ϕ' = 현장 고장율($\frac{f}{t}$) [FITs]

N_i = i 번째 기기의 숫자

λ_{SS_1} = 방법 I 에 의한 유닛이나 기기의 고장율 예측값

$\lambda_{SS_1} = \lambda_{SS}$ -- 대상 유닛

$\lambda_{SS_1} = \lambda_{SS_i} \pi_E$ -- 대상 기기

λ_{SS_2} = 방법 I, 경우 3 에 의한 유닛의 고장율 예측값

$\lambda_{SS_2} = \lambda_{SS}$

Θ_{SS_i} = 방법 III 에 의한 i 번째 기기의 고장율 예측값

Θ_{SS} = 방법 III 에 의한 유닛의 고장율 예측값

Θ_{SS_3} = 방법 III 에 의한 유닛이나 기기의 고장율 예측 값을 나타내는 일반적 기호

π_{T_1}, π_{T_2} = 대상(1) 과 추적(2) 시스템의 온도 인자 (TR-332,표 11-7)

방법 III 은 현장 자료의 출처에 따라 다음과 같이 3가지로 분류된다.

- 방법 III(a) : 대상 시스템의 일부분으로서 사용되는 기기, 유닛, 하부시스템의 운전 성능에 기초한 고장율 예측 방법
- 방법 III(b) : 다른 시스템의 일부분으로서 사용되는 기기, 유닛, 하부시스템의 운전 성능에 기초한 고장율을 근거로 대상 시스템의 기기, 유닛, 하부시스템의 고장율 예측 방법 (서로 다른 시스템간의 운전 조건/ 환경의 차이가 고려됨)
- 방법 III(c) : 동일 제작자가 만든 재료나 기술이 비슷하고 유사한 환경과 적용이 비슷한 유사 부품으로부터 수집된 자료를 이용하여 유닛이나 하부 시스템의 고장율을 예측하는 방법 (기기간의 차이점이 고려됨)

방법 III는 어떠한 품질등급이나 환경등급에도 적용이 가능하다. 단 대상 시스템의 품질등급이 추적시스템의 등급보다 같거나 높아야 한다. 그리고 대상 시스템의 환경도 추적시스템의 환경보다 같거나 온화해야 적용이 가능하다. 따라서 지상 온화, 지상 고정, 지상 이동 (Ground benign, Ground fixed, Ground mobile) 환경에서 적용이 가능하다. 방법 III 을 적용하기 위한 기본 현장 추적 시간은 최소한 3000 시간이 넘어야 하고 총 운전 시간 t 는 다음 조건(표 1)을 만족시켜야 한다.

표 1 운전 시간 기준

방법 III(a) 및 III(b)	$t \geq \dfrac{2\times 10^9}{\lambda_{SS_1}}$
방법III(C)	$t \geq \dfrac{2\times 10^9}{\lambda_{SS_2}}$

방법 III 의 수행 절차는 다음과 같다.

(1) 추적 시스템에서 기기나 유닛의 고장율 f 과 총 운전 시간 t 를 결정한다.

(2) 방법 III(b) 또는 III(C) 인 경우에는 주어진 표에서 대상(1), 추적(2) 시스템의 운전 온도에 따른 인자 π_{T_1}, π_{T_2} 를 결정한다.

(3) 대상 기기의 고장율 데이터가 주어진 고장률 표에 있는 경우에는 다음과 같이 λ_{SS_1} 을 구한다.

- 방법 III(a) 및 III(b) : 방법 I , 경우 1 또는 경우 3 으로 λ_{SS_1} 을 계산
- 방법III(C) : 방법 I , 경우 3 으로 λ_{SS_1} 을 계산

(4) 추적 기기가 대상 기기와 다를 때는 방법 I 을 적용하여 λ_{SS_2} 를 계산한다.

(5) 조정 값을 다음(표 2)과 같이 계산한다.

표 2 조정 값

V =	1.0	방법III(a)
	$\dfrac{\pi_{T_2}}{\pi_{T_1}}$	방법III(b)
	$\dfrac{\lambda_{SS_2}}{\lambda_{SS_1}}$	방법III(c)

(6) 방법 III에 의한 고장률을 다음(표 3)과 같이 구한다.

표 3 방법 III 의 고장률

λ_{SS_1} 이 있는 경우	$\Theta_{SS_3} = \dfrac{2+f}{\dfrac{2}{\lambda_{SS_1}} + (V \times t \times 10^9)}$
λ_{SS_1} 이 없는 경우(방법 III(a) 및 III(c))	$\Theta_{SS_3} = \dfrac{10^9 \times U}{t \times V}$

여기서 U 는 f 고장이 관측된 Poisson 변수의 평균에 대한 95% 확신도 의 상한 값이다. Bellcore 방법에 의한 직렬 시스템에 대한 전체 시스템 수준의 신뢰도는 모든 유닛의 정상상태 고장율을 다음과 같이 합산하여 계산한다.

$$\lambda_{SYS} = \sum_{j=1}^{M} \lambda_{SS(j)}$$

여기서 $\lambda_{SS(j)}$ 은 유닛 j 의 정상상태 고장율이고, M 은 유닛의 숫자이다. 그리고 직렬 시스템의 첫해 승수는 다음과 같이 구한다.

$$\pi_{FYSYS} = \frac{\sum_{j=1}^{M} \lambda_{SS(j)} \, \pi_{FY(j)}}{\lambda_{SYS}}$$

여기서 $\pi_{FY(j)}$ 는 j 번째 유닛의 첫해 승수이다.

3. 부품 신뢰도 예측 방법 비교

앞에서 자세히 검토한 ML-HDBK-217 과 Bellcore TR-332 방법을 포함한 여러 가지 방법은 거의 같은 다음과 같은 신뢰도 식을 사용한다.

$$\lambda_{PART_i} = \lambda_{G_i} \sum_{i=1}^{n} \pi_{F:_i}$$

$$\lambda_{EQIP} = \pi_E \sum_{i=1}^{n} N_i \, \lambda_{PART_i}$$

즉 정상상태에서 기기의 고장율은 부품의 고장율과 π 인자에 의하여 결정된다. 각 방법별로 영향이 두드러지는 인자들이 있는데 이를 살펴보면 다음 표 4 와 같다. [11]

그러나 이들 방법의 직접적인 비교는 신중하여야 한다. 예를 들면 같은 품질인자라도 그에

해당되는 기준은 해당 방법에서 독특하게 정의하기 때문이다. 따라서 각 방법에 따른 신뢰도 데이터는 핸드북형태로 출판되어 사용되고 있는데 그 값이 서로 달라 직접 비교하기는 어렵다. 가장 좋은 방법은 사용자로부터 직접 얻은 현장의 고장데이터를 사용하는 것이다.

표 4 신뢰도 예측 방법별 민감 인자

예측방법	최대 민감 인자
Bellcore	Electrical stress
CNET	Quality
HRD4	Quality
MIL-HDBK-217	Environment, Quality
Siemens	Temperature

신뢰도 엔지니어들의 일부는 핸드북의 자료에 현장 경험 자료를 복합시켜서 사용하기도 한다. 따라서 각각의 방법에 의한 결과가 서로 상이하다. 그리고 각 방법의 편차는 현재보다 과거가 더 심하였다. 그 예로서 64K DRAM 부품의 고장율 예측 결과를 표 5 에 나타내었다.[12]

표 5 64K DRAM의 고장율 예측 비교

핸드북	고장율 [FIT]	
	1986년	1994년
MIL-HDBK-217D/F	11250	49
HRD 3/4	10	8
CNET	541	22
NTT	542	14
Bellcore TR-332	550	45

같은 사양의 부품에 대한 고장율을 8년뒤의 데이터를 근거로 예측한 결과는 이전의 값과 상당히 다르다. 물론 최근의 값이 보다 현장 자료에 근접한다. 이 결과는 최근의 방법이 보다 정확하고 방법들간의 편차가 적음을 나타낸다. 이것은 부품 고유의 신뢰도를 예측하는 모델과 현장 이력이 반영된 " 지식인자"(learning factor)를 나타낸다. 즉 과거에 모델에 있어서 부적합하거나 불확실한 것은 제거하고, 현장 이력을 반영하여 고장 자료를 갱신 한 결과이다.

다른 관점은 예측한 결과와 실측한 고장율과의 비교이다. 예측 자체만으로 제품의 우열을 가리거나 하는 등의 설계나 개발단계에서의 목적을 이룰 수는 있겠지만 보다 근본적인 것은 사용자가 감지하는 신뢰도인 것이다. 예로서 프린트 회로 기판을 대상으로 9개의 제작자의 설계를 비교하기 위한 고장율 예측 결과를 표 6 에 나타내었다. 이 결과에서 보면 한 제작자를 제외하고는 예측 값이 관측 값보다 낙관적(고장율이 적음)으로 평가되었다.

또 다른 예를 표 7에 나타내었다.[11] 이 예는 영국의 국제 전자 신뢰도 연구소(The International Electronic Reliability Institute)에 연구 결과인데 주목할 점은 각 방법별 차이와 실제 현장에서 수집한 신뢰도와의 차이이다. 현장에서 측정한 고장율이 예측한 값보다 낮거나 높다. 이것은 방법 선택과 고장 자료의 중요성을 의미한다.

많은 예측 방법 중에서 실제 현재 세계적인 전자 부품제작자나 신뢰도 엔지니어들이 가장 많이 사용하는 것은 MIL-HDBK-217 과 Bellcore 방법이다. MIL-HDBK-217 과 Bellcore에 의한 평균 고장 시간(MTBF) 비교 테스트에 의하면 Bellcore 결과가 일반적으로 상업적 전자 장비들에 대해 더 나은 결과를 추정해 냄을 알 수 있으며 많은 상업적 고객들에 의하면 Bellcore에 의해 추정된 평균 고장 시간(MTBF)이 실제 현장 경험과 매우 일관된 결과를 나

타낸다고 보고하고 있다.

표 6 예측값과 관측값 (1987)

기판 제작자	MIL-HDBK-217 예측 (FIT/1000)	관측결과 (FIT/1000)
A	400	19607
B	400	460
C	800	2119
D	138	862
E	173	13513
F	500	947
G	286	1600
H	625	277
I	714	10200

표 7 CB #1 부품별 신뢰도 예측값과 현장 신뢰도와의 비교 (**단위**=no/FIT)

Device	Bellcore	CNET	HRD4	MIL217	Siemens
ceramic multilayer capacitor	210	45	3	4	35
pn_junctiondiode	125	300	300	9	25
Bipolar digital IC	936	390	168	50	60
Metal oxide resistor	1590	596	51	52	795
Discrete bipolar transistor	7812	20937	4000	1225	1250
Tantalum electrolytic capacitor	1350	3780	40	594	180
TOTAL failure rate	12023	26048	4562	1934	2345
Field failure rate	4274				
Deviation	7749	21774	288	-2340	-1929

그러나 Bellcore **도 부품의 기본 고장율**(basic failure rate) **는** MIL-HDBK-217**의 자료를 토대로 하고 있다.** MIL-HDBK-217**과** Bellcore TR-332**를 상세히 비교하면 다음과 같다.** [13]

(1) Bellcore**는 단지 그라운드 기반의** 3**개의 환경 조건만 고려하는 반면에** MIL-HDBK-217**는 그라운드와 대기, 수중에서의** 14**가지 환경 조건을 고려한다. 이렇듯, 만일 실제 제품이 대기중이나 수중에서 사용된다면 보다 더 정확한 신뢰도 예측을 위해서** MIL-HDBK-217**을 사용하여야한다.**

(2) Bellcore**는 모든 부품 고장률을 주변 온도**(ambient temperature)**를 토대로 함으로써 모델을 단순화시키고 있다. 반면에** MIL-HDBK-217 **은 집적회로와 반도체 소자들의 부품 접합 온도를 기반으로 고장률을 계산한다.** Bellcore **방법이 빠르고 쉽지만 고 전력 소모 부품에 대해서는 부정확할 수도 있다.**

(3) Bellcore**는** SMT(smalltalk)**소자를 포함하지 않는다. 다시 말해서 기존의 일반적인 소자 고장률과** SMT**소자 고장률 사이의 중요한 차이를 반영하지 못한다.** MIL-HDBK-217**은** SMT **모델을 평가하도록 개발되었고** SMT **소자를 더욱 더 상세히 평가할 수 있다.**

(4) Bellcore**는 정상 상태에서의 고장률뿐만 아니라 초기 고장률도 계산할 수 있으나** MIL-HDBK-217**은 유효 수명 기간의 전자 부품 고장률만 계산할 수 있다.**

(5) Bellcore**는 미국이외의 지역에서는 광범위하게 사용되지 않는다. 전 세계적으로** 80

%이상이 MIL-HDBK-217 자료를 사용하고 있다.

(6) Bellcore 는 상업용 제품의 신뢰도 평가가 주 대상이지만 MIL-HDBK-217 은 군사용은 물론 상업용 제품까지 포함하여 광범위하게 지원한다.

(7) 두 가지 방법의 계산은 비슷하지만 Bellcore 방법이 보다 낙관적으로 예측한다. 그리고 계산 시에 Bellcore 방법이 보다 적은 변수를 사용한다.

(8) Bellcore 방법은 burn-in, 실험실 시험, 현장 자료를 반영하여 계산할 수 있다. 이 방법은 경험자료를 이용하는 것으로 스트레스 인자만을 고려할 때보다 실질적이다. 또한 burn-in 자료를 이용하여 첫해승수(first year multiplier)를 계산할 수 있다.

(9) Bellcore 방법은 고장율을 FIT (Failure in time, in 10^9 hours)으로 나타내고, MIL-HDBK-217 은 FPM (Failure per million(10^6) hour)으로 나타낸다.

(10) Bellcore 는 gyroscope, battery, heater, cooler, computer 에 대한 자료가 있고, MIL-HDBK-217 은 PCB, laser, SAWS, magnetic bubble memory, tube 에 대한 자료가 있다.

(11) Bellcore 는 품질 등급을 4개로 나누고 이를 모든 부품에 다 적용하지만, MIL-HDBK-217 은 부품별로 품질 등급이 다르게 정의되어 있다.

4. 결론

디지털 계측 제어 시스템이 일반 산업계에서는 많이 사용되고 있지만 안전에 중요한 시스템 즉 원자력 발전소 보호계통과 같은 곳에서는 아직도 사용이 일반화되고 있지 않다. 그리고 안전과 관련된 분야에 적용하기 위해서는 정성적인 안전성 분석 외에 정량적인 분석이 요구된다. 본 조사에서는 이 경우 적용가능 한 여러 가지 방법들을 검토하였으나, 이를 실제로 적용하기 위해서는 기기의 사용조건과 환경을 정확히 고려하여야 하며 특히 신뢰도 자료가 정립된 가정과 조건에 유의하여야 한다. 기기 사용상의 조건 즉 온도, 전기적 강도, 부하, 습도 등의 요인에 대한 적절한 모델을 사용하여야 하고, 외부적인 요인 , 즉 화재, 전자기파, 지진, 방사선 등의 영향을 고려하여야 한다. 지금까지 대부분의 계측 제어(전자) 기기의 신뢰도 예측 시에 부품의 고장률 데이터는 MIL-HDBK-217 자료나 원자력 발전소의 고장율 데이터 베이스를 이용하고 있다.

그러나 MIL-HDBK-217 은 1991(version F) 이후 개정이 되지 않고 있고 또한 부품이 생산된 이후 수행하는 여러 단계의 초기 시험의 효과를 반영하지 못하고 있다. 원자력 발전소 고장율 데이터 베이스 많이 개발되어 운영중이지만 외국에서 개발되었고, 최근 디지털 계측 제어 시스템의 경험 자료가 많지 않고 발전소 고유의 사용 환경을 적절히 반영하지 못하여 정확도가 떨어진다. 그리고 디지털 계측제어 시스템의 경우 발전소 건설허가 단계 이후에 설계 나 제작이 되는 경우가 많으므로 그 고장률 데이터를 확보하기가 어렵다. 따라서 MIL 핸드북과 같은 자료를 이용하여야 하는데 , 이 경우 Bellcore TR-332 방법을 적용하면 비교적 최근의 자료를 사용할 수 있고, 초기 시험의 결과를 반영하여 보다 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이다.

5. 참고 문헌

[1] Jalal Zamanali, "Probabilistic Risk Assessment Applications in the Nuclear Power Industry", IEEE Transaction on the Reliability, Vol. 47 NO.3-Sp, pp SP-36, 1998 September

[2] **강현국 외** , "**확률론적 안전성 평가에서의 디지털 계측제어 계통 고유 현안 분석**", AR-560/2000, **한국원자력연구소**, 2000

[3] William Denson," The History of Reliability Prediction", IEEE Trans. on Reliability Vol. 47 No. 3-SP ,pp SP-321 1998, September

[4] US MIL-HDBK-217,"Reliability Prediction of Electronic Equipment", version F, DOD, USA, 1991

[5] British Telecom, "Handbook of reliability data for components used in telecommunications systems", Issue 4, 1987

[6] Siemens AG, SN29500, "Reliability and quality specifications failure rates of components", Siemens Technical Liaison and Standardization, 1986

[7] Centre National d'Etudes des Telecommunications, "Recueil de Donnees de Fiabilite du CNET", (National Centre for Telecommunications Studies, 'Compilation of CNET's reliability data"). 1983 edition

[8] Bellcore technical Ref. TR-TSY-000332, " Reliability prediction procedure for electronic equipment" issue 6, 1997

[9] Italtel, “Italtel Reliability Prediction Handbook", Italtel corporate quality department, Milano, 1993

[10] NTT, "Standard Reliability Tables for semiconductor devices", Nippon Telegraph and Telephone Public Corporation, 1982

[11] Jeff Jones and Joseph hayes, "A Comparison of Electronic -Reliability Prediction Models", IEEE Trans. on Reliability, Vol. 48, No. 2,pp127-134 1999 JUNE

[12] Finn jensen, "Electronic Component Reliability", pp245-247, John Wiley & Sons, England, 1995

[13] http://www.innovsw.com/models.htm