

## 부품부하분석을 이용한 발전소 제어모듈의 신뢰도 예측

김대웅 · 강희정

전국대학교 산업공학과

### Parts Stresss Analysis for Reliability Prediction of Control Module in Plant

Dae Woong Kim and Hee Jung Kang

Department of Industrial Engineering Kon-kuk University

**Abstract**—The objective of this study is to predict the reliability of the electronic control module at ROD control system in nuclear power plant. Maintaining of the reliability is important issue in the complex system like nuclear power plant, military equipment, satellite system, etc., because the failure of reliability brings extravagant economic loss and deteriorates public acceptance. In addition to the prediction of reliability, the factors affect the reliability including operating conditions, environment, temperature and quality factors were analyzed and simulated. The result shows that the quality factors are more critical for the higher reliability than the other two factors.

## 1. 서 론

오늘날 기술의 발전으로 시스템의 기계화와 자동화의 정도가 보다 고도화됨에 따라 시스템의 부분적인 고장은 전체 시스템의 중단을 초래할 수 있기 때문에 이들 시스템의 신뢰도 문제는 더욱 중요시되고 있다. 고도로 정밀하고 복잡한 현대의 전자제품은 시스템화, 다기능화, 고밀도화함에 따라 제품의 개발단계에서 그 제품의 신뢰성을 충분히 고려한 설계가 이루어져야 함은 말할 필요도 없고 생산 및 운영단계에 이르는 제품수명(Life Cycle)에 걸쳐 체계적인 신뢰도 관리계획이 수립되어야 한다.

이 가운데 설계 시작단계에서의 신뢰도 예측은 초기에 설계제품의 신뢰도를 확인할 수 있으므로 설계의 시행착오를 줄이고, 조기에 설계품질을 확보할 수 있다는 점에서 반드시 거쳐야 할 중요한 단계이다.

발전소, 고도의 자동화 생산설비, 군용장비, 인공위성 등에서 사용되고 있는 시스템들은 많은 전기·전자부품들로 구성되어 있는 제어모듈의 집합으로 이루어져 있으며, 다른 상업용 전자제품에 비하여 상대적으로 높은 신뢰도를 요구하고 있다. 특히 원자력 발전소의 불시정지는 막대한 경제적 손실 뿐만 아니라 일반 대중에게 미치는 영향이 매우 크기 때문에 발전소는 다른 상용 전자시스템과는 달리 더욱 높은 신뢰도를 요구한다. 따라서 신뢰

도 관리자는 원자로 뿐만 아니라 발전소의 보호계통, 제어계통 그리고 기타 설비에 대한 지속적인 신뢰도 예측 및 평가를 통해서 이와 같은 요구를 충족시켜야 한다.

전자시스템의 신뢰도를 예측하는 방법은 일반적으로 부품의 고장율을 집계하여 계산하며<sup>1)</sup>, 예측 기법으로는 MIL-HDBK-217, Bellcore RPP, NTT Procedure, British telecom HRD4, CNET Procedure, Simens Procedure 등 현재 6가지 정도가 사용되고 있다<sup>2)</sup>. 이중 MIL-HDBK-217F(미국방성 전자기기 신뢰도 예측 지침서)는 부품의 고장율 데이터로서 공표되어 있는 것 중에는 데이터로서의 확실성이 높고 설계 개선이 용이한 정보를 많이 포함하고 있어 가장 널리 쓰이고 있다.

본 연구에서는 MIL-HDBK-217F NOTICEL을 기초로 한 부품부하분석(Parts Stress Analysis)을 이용하여 원자력 발전소의 제어계통(Control System)에서 사용하고 내고장성 제어모듈에 대한 신뢰도 예측을 실시하고, 제어모듈의 신뢰도에 미치는 여러 요인의 영향을 분석하였다.

## 2. MIL-HDBK-217F의 신뢰도 예측 모델

### 2-1. 개요

MIL-HDBK-217은 1956년 RCA가 "TR-1100"(Reliability Stress Analysis for Electronic Equipment)이라는 책자를

**Table 1. Historical updates of MIL-HDBK-217 series.**

Year	1965	1974	1976	1978	1979	1980
Version	A	B	B(N.1)	B(N.2)	C	C(N.1)
Year	1982	1983	1986	1990	1991	1992
Version	D	D(N.1)	E	E(N.1)	F	F(N.1)

발간하여 부품의 고장을 계산을 위한 모델로 개발한 것을 미국방성에서 30년 동안 축적된 부품의 고장율 데이터를 바탕으로 군사용 전자기기 및 시스템의 고장율 예측용으로 발행한 핸드북으로서 정밀화, 고도화 추세를 치닫고 있는 각종 전자기기의 신뢰도 예측을 위한 고장율 데이터로서 널리 사용되고 있다.

MIL-HDBK-217은 신부품의 출현, 기존 부품의 품질 향상에 따라 각 부품의 고장율 모델식 및 데이터가 2-3년을 주기로 변경되고 있다. Table 1은 RADC(Rome Air Development Center)에 의해 개정, 발간된 MIL-HDBK0217의 변천과정을 나타내 주고 있다.

MIL-HDBK-217은 신뢰도 예측을 위하여 두가지 방법을 적용하고 있다<sup>3)</sup>.

- 1) 부품수 분석(Parts Count Method)
- 2) 부품 부하 분석(Patrs Stress Analysis)

부품수분석은 적은 양의 정보를 요구하고 개요설계에 사용할 수 있으며, 부품부하분석은 많은 양의 정보와 상세설계시 사용되며 부품종류에 따라 고장율 산출식이 다르다.

Table 2에서는 부품수분석과 부품부하분석의 차이점을 항목별로 나타내었다.

설계 초기 아직 시스템의 상세설계가 이루어지지 않아 부품부하에 대한 정확한 판단 또는 자료가 없을 때에는 대개 부품수에 의한 예측이 이루어지며 설계가 진행됨에 따라 부품에 미치는 세부적인 부하조건이 해석될 때 부품부하분석을 이용한다.

MIL-HDBK-217의 고장율 모델은 Arrhenius관계에 기초하여 서로 다른 부품형태에 대하여 고장율 모델을 유도하였다. 또한 MIL-HDBK-217에 사용된 대부분의 데이터는 수리가능한 시스템에 적용된 것이기 때문에 시스템 고장시 그것을 수리한 후에는 새로운 시스템이 된다<sup>4)</sup>.

MIL-HDBK-217에서 전자부품의 신뢰도 예측에 대한 가정은 다음과 같다<sup>5)</sup>.

- 1) 각 부품들은 직렬구조를 한다.
- 2) 각 부품의 수명분포는 잘 알려져 있다(지수분포).
- 3) 각 부품은 통계적으로 독립이다.
- 4) 각 부품은 일정고장율을 가진다.

**Table 2. Difference between parts stress and part counts analysis.**

	parts stress analysis	part counts analysis
Ap-plication field	개요설계	상세설계
Ac-curacy	부정확	정 확
Model equation	부품종류에 관계없이 일정	부품종류에 따라 다름
Input data	부품종류, 부품수량, 품질수준, 환경수준, 부품종류, 부품수량, 품질수준, 스트레스 정격치, 주위온도, 사용환경	

**2-2. 부품수분석**

부품수분석은 부품부하분석을 이용하기에는 정보가 불충분한 개요설계 단계나 입찰 단계에서 신뢰도 예측을 하는데 유용한 방법으로 고장율 산출에 필요한 제반 요소 및 수치를 평균적으로 대입하여 설정된 기본 고장율에 부품의 품질요인을 곱하면 각 부품별 예상 고장율이 산출된다.

따라서 고장율 산출에 다량의 정보가 필요없이 간단하게 부품의 예상 고장율을 산출할 수 있고, 이 예상 고장율로 부터 시스템의 전체 고장율이 산출되어 MTBF를 구할 수 있다. 이 방법은 새로운 설계의 신뢰성에 대한 이해를 하는데 매우 유용하며, 이 방법 적용시 필요 자료는 부품형태와 수량, 품질요인, 환경요인 등이 파악되어야 한다.

일반적인 예측절차는 다음과 같다.

- 1) 주어진 기능에 따른 각 부품의 종류, 부품의 형태와 수량을 파악한다.
- 2) 부품종류와 부품형태에 따른 품질요인을 결정한다.
- 3) 부품의 운용환경을 파악한다.
- 4) 부품수량에 기본 고장율과 품질요인을 곱하여 전체 부품의 고장율을 산출한다.

시스템이 동일 운용환경에서 사용자 시스템의 고장율을 계산하는 방법은 다음과 같다<sup>6)</sup>.

$$\lambda_{\text{EQUIP}} = \sum_{i=1}^n N_i (\lambda_{\text{F}} \pi_0)$$

- 여기서,  $\lambda_{\text{EQUIP}}$ =전체 시스템 고장율(Failure/10<sup>6</sup> hours)
- $\lambda_{\text{F}}$ =i번째 부품의 기본 고장율(Failure/10<sup>6</sup> hours)
- $\pi_0$ =i번째 부품의 품질요인
- $N_i$ =i번째 부품의 수량
- $n$ =시스템에서 부품 종류의 수

만일 시스템이 서로 다른 운용환경에서 사용되는 여러 부품들로 구성되어 있다면 시스템의 고장율은 각 운

영향권이 고려된 고장율을 계산하여 산출한다.

**2-3. 부품부하분석**

부품부하분석은 많은 양의 상세한 정보가 필요하고 시스템의 상세설계 단계에서 적용 가능하며, 각 부품이 받는 부하에 따라 고장율을 달리 적용하여 준다. 이 방법은 가장 정확한 예측을 할 수 있는 반면 작업시간과 노력이 많이 소요된다.

이 방법에 대한 부품 고장율 산출식은 부품종류에 따라 다르나, 기본적으로 기본 고장율, 환경요인, 품질요인 및 기타의 요인으로 구성되어 있다. 각 부품의 고장율을 산출하는 일반적인 예측 절차는 다음과 같다.

- 1) 각 부품에 대한 기본 고장율을 부품형태, 운용온도, 운용부하가 적용된 MIL-HDBK-217F의 표로부터 얻는다.
- 2) 산출식에 들어 있는 요인( $\pi$  Factor)를 계산한다.
- 3) 부품 고장율을 기본 고장율과  $\pi$  Factor를 사용하여 계산한다.

예를 들어, Discrete Semiconductor에 대한 전형적인 고장율 모델식은 다음과 같다.

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_t \pi_A \pi_R \pi_C \pi_Q \pi_E$$

- 여기서,  $\lambda_p$ =전체 부품 고장율  
 $\lambda_b$ =부품 기본 고장율  
 $\pi_t$ =온도요인(Temperature Factor)  
 $\pi_A$ =적정요인(Application Factor)  
 $\pi_R$ =정격전류요인(Power Rating Factor)  
 $\pi_C$ =전압부하요인(Voltage Stress Factor)  
 $\pi_Q$ =구조복합성요인(Contact Construction Factor)  
 $\pi_Q$ =품질요인(Quality Factor)  
 $\pi_E$ =환경요인(Environment Factor)

**2-3-1. 품질요인**

MIL-HDBK-217F는 미군의 시방서 등에서 규정된 군용부품에 대한 고장율이 주어지기 때문에 그 이외의 부품 고장율을 예측하는 경우에는 고장율 산출 모델 중에 정의되어 있는 품질요인의 값을 어떻게 설정하는가가 항상 문제가 된다.

부품의 고장율을 좌우하는 여러 요인 중에 품질요인에 의한 값이 고장율에 가장 큰 영향을 미치고 있으며, 품질요인의 등급이 낮을수록 부품의 고장율이 높아진다. 일반적으로 부품의 품질요인은 제조업체의 데이터 북에 표시되어 있는 품질등급을 적용한다. 동일한 부품이라 할지라도 부품에 적용되는 부하, 환경 그리고 제조업자의 기술적 성숙도에 따라 고장율은 다르게 나타난다. 군용장비와 원자력 발전소의 시스템은 높은 신뢰도를 요구하기 때문에 품질요인이 시스템의 신뢰도에 크

게 영향을 미치며, 고품질의 부품을 사용하기 위해서는 그에 따르는 업무의 질과 신뢰도 및 보전도를 향상시키는데 관계한 비용을 고려해야 한다.

**2-3-2. 환경요인**

모든 부품 신뢰성 모델은 환경요인  $\pi_0$ 를 통하여 환경 부하의 효과를 고려하고 있다. 환경요인은 각 부품 고장율 모델식에서 정량화된다. 이 환경요인은 시스템이 사용되는 주된 영역을 나타내고 있으나, 각 부품들은 본래의 환경보다 더 많은 곳에서 사용된다.

**2-3-3. 온도요인**

온도는 시스템의 고장에 큰 영향을 미치기 때문에 중요한 요인으로 고려된다. 즉, 부품신뢰도는 온도에 민감하기 때문에 신뢰도 예측시 사용된 부품의 주위온도(Ambient Temperature)를 정확히 제공해야만 하며, 설계시 부품이 필요로 하는 최적환경을 고려해야 한다.

**3. 제어모듈의 신뢰도 예측 및 분석**

**3-1. 기본조건하에서의 신뢰도 예측 및 분석**

예측의 기본적 업무는 시스템에서 주어진 고장형태가 얼마나 자주 발생할 것인가를 정량적으로 분석하는 것이다.

신뢰도 예측절차는 다음과 같다.

- 1) 시스템의 블럭선도(Block Diagram)를 작성한다.
- 2) 시스템의 블럭선도의 각 블럭에 포함되는 부품목록을 작성한다.
- 3) 각 부품별 요인(부품형태, 품질요인, 환경요인, 온도요인, 부품부하 등)을 작성한다.
- 4) 각 부품별 고장율과 제어모듈의 고장율을 계산한다.
- 5) 전체 시스템 고장율과 MTBF를 구한다.
- 6) 환경요인, 온도요인, 품질요인을 변화시키면서 시스템의 신뢰도에 미치는 영향을 분석한다.

본 연구에서 적용된 ROD Control(제어봉 제어)는 원자력 발전소의 원자로 제어계통에서 사용되는 시스템으로서, 총 28종의 제어모듈로 구성되어 있으나, 본 연구에서는 시스템이 6종의 제어모듈 -I/O AC AMPLIFIER, SLAVE CYAVE CYCLER DECORDER, BANK OVERLAP DECORDER, MASTER CYCLER LOGIC, SLAVE CYCLER LOGIC, SUPERVISORY LOGIC1-으로 구성되어 있다고 가정하였으며, 각 제어모듈에 대한 MTBF와 고장율을 계산하여 전체 시스템의 MTBF 및 고장율을 예측하였다.

예측에 필요한 데이터는 실제 현장에서 획득한 자료, 시험자료, 유사장비 사용 중 얻어진 자료를 사용해야 하나, 여기서는 극소 전자부품, 반도체소자, 저항기, 축전기 등과 같은 전자부품이 부품의 대부분을 이루고 있어

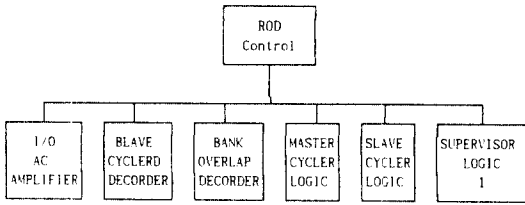


Fig. 1. Black diagram of ROD Control.

MIL-HDBK-217F를 이용하여 예측을 수행하였다.

Fig. 1은 ROD Control의 블럭신도<sup>①</sup>를 나타낸 것이다.

예측 기본조건에서 품질요인(2)은 집적회로 부품의 경우 Level B, 일반 반도체 부품(트랜지스터, 다이오드 등)은 JAN, 저항은 NER, 기타는 MIL-SPEC으로 가정하여 설정된 것이다. 시스템이 놓여 있는 환경요인은 GF(Ground Fixed)로 설정하였으며, 주위온도는 40°C로 정하였다.

고장율의 효과적인 계산을 위하여 MIL-HDBK-217F를 전산화한 Milstress<sup>②</sup>를 활용하였으며 분석 결과 시스템의 MTBF는 61,680시간, 고장율은 16.21259 fpmh (failures per million hours)로 계산되었다. 각 제어모듈은 Capacitor와 Diode가 고장율의 50% 이상을 차지하고 있다. 그러므로 Capacitor와 Diode의 품질을 향상시키면 시스템의 신뢰도를 크게 향상시킬 수 있다. 부품수가 많을수록 고장율이 더 높은 것은 각 부품들이 직렬구조로 구성되기 때문이다.

Table 3은 각 제어모듈 및 전체시스템의 MTBF와 백만시간당의 고장율을 나타낸 것이다.

3-2. 주요 요인의 수준변화에 따른 신뢰도에의 영향

MIL-HDBK-217F는 신뢰도의 비교와 민감도 분석의 관점에서 매우 유용하며, 이 신뢰도 예측기법을 통해 예측된 신뢰도의 값은 신뢰도의 목표치로 사용될 수 있다. 그러므로 기본 조건이 아닌 여러가지 요인들을 변화시켜 가면서 운용환경에 따른 차이점과 요인들의 영향을 분석하였다.

첫번째로 기본 환경요인 GF 이외에 MIL-HDBK-217F에서 사용되는 7가지 환경요인에 대해 신뢰도 예측을 하였으며, 두번째는 20°C, 40°C, 60°C 그리고 80°C에서 온도가 신뢰도에 미치는 영향을 분석하였으며, 마지막으로 품질요인의 변화에 따른 고장율을 관찰하였다.

3-2-1. 환경요인의 변화

앞서 설정한 환경요인은 GF이지만 ML(Missile, Launch), NU(Naval, Unsheltered), MF(Missle, Flight), AIF(Airborne, Inhabited, Fighter), GM(Ground, Mobile), NS(Naval, Sheltered), GB(Ground, Benign) 등 환경요인

Table 3. MTBF and failure rate of each control module.

control module	failure rate (fpmh)	MTBF (hrs)
I/O AC AMPLIFIER	7.55680	132,331
SLAVE CYCLER DECODER	1.72184	580,774
BANK OVERLAP DECODER	2.49807	400,309
MASTER CYCLER LOGIC	1.29116	774,500
SLAVE CYCLER LOGIC	1.75812	568,790
SUPERVISORY LOGIC 1	1.38660	721,188
Total system	16.21259	61,680

Table 4. Sensitivity of MTBF and failure rate in environmental factor.

	ML	NU	MF	AIF
MTBF(hrs)	5,781	11,080	14,688	14,304
F/R(fpmh)	172.97758	90.25540	68.07964	69.90835
	GM	NS	GF	GB
MTBF(hrs)	19,850	31,549	61,680	185,211
F/R(fpmh)	50.37888	31.69550	16.21259	5.39924

에 변화를 주면서 각 환경에 대해 MTBF를 계산하였다.

Table 4에 나타난 것과 같이 ML의 경우 MTBF는 5,781시간, GB는 185,211시간으로 큰 차이를 보이고 있으며, 가혹한 환경으로 변화함에 따라 시스템의 신뢰도는 저하하지만 그 영향이 그리 크지는 않았으며, 따라서 다른 요인에 비해 시스템의 신뢰도에 크게 영향을 미치지 않는다고 볼 수 있다.

Fig. 2에서는 환경요인에 따른 시스템 MTBF의 변화를 보여주고 있다.

3-2-2. 주위온도의 변화

기본 주위온도는 40°C이지만, 주위온도를 20°C, 40°C, 60°C, 80°C로 변화시켜 각각의 MTBF를 계산하였다.

20°C의 경우 MTBF는 109,146시간으로 76.9%가 증가 하였음, 60°C에서는 34,715시간, 80°C에서는 19,511시간으로 각각 43.7%와 68.4%가 감소하였다.

주위온도가 증가함에 따라 시스템의 신뢰도는 현저하게 저하됨을 볼 수 있는데, 그 이유는 주위온도가 증가함에 따라 부품의 표면온도, 접합부 온도가 증가하여 부품의 기능이 현저하게 떨어지기 때문이다.

Table 5에 나타나 있는 고장율의 변화를 보면, 환경조건보다는 주위온도의 변화에 더 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다.

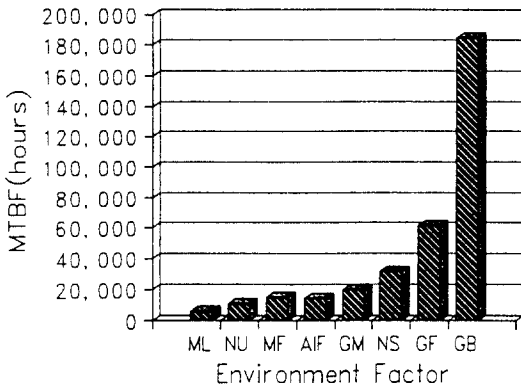


Fig. 2. Variation of MTBF in environmental factor.

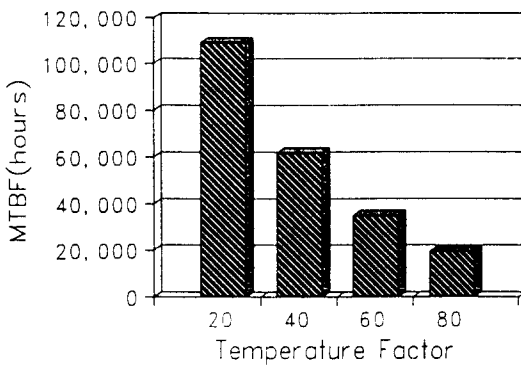


Fig. 3. Variation of MTBF in temperature factor.

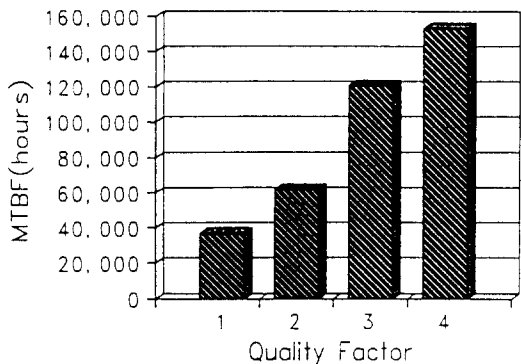


Fig. 4. Variation of MTBF in quality factor.

Fig. 3에서는 온도요인에 따른 시스템 MTBF의 변화를 나타낸 것이다.

3-1-3. 품질요인의 변화

기본조건하에서의 품질요인(2)에서 각 구성 부품의 품질요인을 한 단계씩 내리면 시스템의 MTBF는 37,127시간으로 39.8%가 감소하였고, 품질요인을 한 단계씩 올리

Table 5. Sensitivity of MTBF and failure rate in temperature factor.

	20°C	40°C	60°C	80°C
MTBF(hrs)	109,146	61,680	34,715	19,511
F/R(fpmh)	9.16201	16.21259	28.80611	51.25273

Table 6. Sensitivity of MTBF and failure rate in quality factor.

	1	2	3	4
MTBF(hrs)	37,127	61,680	120,776	152,796
F/R(fpmh)	26.93414	16.21259	8.27978	6.54469

면 시스템의 MTBF는 120,776시간으로 95.8%가 증가하였다.

이는 시스템의 신뢰도에 품질수준이 다른 요인에 비해 더 민감하게 영향을 미치는 것을 보여 주는 것이다. 또한 부품의 품질은 제조업자의 기술적 성숙도에 크게 좌우된다. 그러므로 시스템의 설계시 구성 부품의 품질요인을 신중하게 고려해야 하며, 적합한 품질요인의 설정을 위해서는 부품의 현장 데이터의 수집 및 분석과 더불어 비용을 고려한 경제성 분석을 행함으로써 설계에 최적 품질요인을 반영해야만 할 것이다.

Table 6에는 품질요인의 변화에 따른 시스템 MTBF와 고장율의 변화를 나타낸 것이다.

일반적으로 전자시스템에 사용되는 제어모듈은 본 연구에서 적용한 제어모듈과 비슷한 전기·전자부품들로 구성되어 있다. 만약 다른 시스템에 대해 신뢰도를 예측할 경우 사용환경이나 온도요인은 이미 정해져 있다. 그러므로 설계시 신뢰도 목표치를 설정한 후 비용을 고려한 적절한 품질요인을 사용하는 것이 중요하다.

시스템의 신뢰도에는 본 연구에서 적용한 품질요인, 온도요인, 환경요인 외에도 사용환경에 따라 인간, 습도, 진동 그리고 염분 등의 요인들이 작용한다. 따라서 설계시 이러한 요인의 영향을 반영함으로써 좀더 신뢰도 높은 시스템을 설계할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 MIL-HDBK-217F NOTICE 1의 신뢰도 예측 방법인 부품부하분석을 이용하여 원자력 발전소의 제어계통에서 사용하고 있는 내고장서 제어모듈에 대한 신뢰도 예측과 주요 요인들의 영향을 분석하였다.

예측 결과 시스템의 MTBF는 61,680시간으로 나타났으며, 주요 요인의 수준을 변화시켜 시스템의 신뢰도에

가장 영향을 많이 미치는 요인을 분석한 결과, 환경요인에서는 주어진 환경마다 고장율이 근소한 차이를 보였으나, 온도요인과 품질요인에서는 수준변화에 따라 50% 이상의 큰 차이를 나타내었다. 그러나 온도요인은 시스템이 사용되는 환경에 따라 주위온도(ambient temperature)가 거의 일정하기 때문에 실제적으로는 품질요인이 시스템 신뢰도에 가장 큰 영향을 주는 것으로 볼 수 있다. 그러므로 향후 생산 또는 사용제품이나 부품의 품질요인을 결정하기 위해서는 현장 데이터의 면밀한 분석이 절대적으로 필요하며, 설계시 신뢰도의 목표치를 결정하는데 기여할 것이다.

또한 본 연구에서는 현실적으로 시스템의 신뢰도를 수학적 모델이 아닌 경험에 의존하고 있는 상황에서 수학적 모델을 적용하여 시스템의 고장율을 계산하였는바, 이를 바탕으로 비용을 고려한 시스템의 경제성 분석을 병행함이 보다 더 만족스러운 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. E.E. Lewis, Introduction to Reliability Engineering, John Wiley & Sons, Inc., New York, (1987).
2. J.B. Bowles, A Survey of Reliability Prediction Procedure for Microelectronic Devices, IEEE TRANSACTION ON RELIABILITY, **41**, 2-12 (March, 1992).
3. MIL-HDBK-217F NOTICE 1, Reliability Prediction of Electronic Equipment, DOD, Washington DC, (1991).
4. P.D.T. O'Connor: Reliability Engineering, Hemisphere Publishing Corporation, (1988).
5. P.D.T. O'Connor, Microelectronic System Reliability Prediction, IEEE TRANSACTION ON RELIABILITY, **R-32**(1), 9-13 (April, 1983).
6. Technical Manual ROD Control System, Westinghouse Electric Corporation, (1980).
7. Milstress Manual, Item Software, (1992).