

기능 중심의 신뢰성 예측 모델링 방법론

정용호¹ · 박지명¹ · 장중순¹ · 박상철^{1†}

A methodology for creating a function-centered reliability prediction model

Yong-ho Chung · Ji-Myoung Park · Joong-Soon Jang · Sang-Chul Park[†]

ABSTRACT

This paper proposes a methodology for creating a function based reliability prediction model. Although, there are various works for reliability prediction, one of the features of their research is that the research is based on hardware-centered reliability prediction. Reliability is often defined as the probability that a device will perform its intended function, under operating condition, for a specified period of time, there is a profound irony about reliability prediction problem. In this paper, we proposed four-phase modeling procedure for function-centered reliability prediction. The proposed modeling procedure consists of four models; 1) structure block model, 2) function block model, 3) device model, and 4) reliability prediction model. We performed function-centered reliability prediction for electronic ballast using the proposed modeling procedure and MIL-HDBK-217F which is the military handbook for reliability prediction of electronic equipment.

Key words : Modeling, Function-centered reliability prediction, Hardware-centered reliability prediction

요약

본 논문은 시스템에 대한 기능 중심의 신뢰도 예측을 수행하기 위한 모델링 방법론을 제안한다. 신뢰도 예측에 대한 다양한 기존 연구들이 있지만, 이 연구들의 공통점은 하드웨어 중심으로 신뢰도 예측을 수행하였다는 점이다. 신뢰성이 제품이 주어진 사용 조건 아래서 의도하는 기간 동안 정해진 기능을 성공적으로 수행하는 능력이라고 정의되는 점에서 보았을 때, 하드웨어 중심의 신뢰도는 논리적 모순을 가진다. 본 논문에서는 기능 중심의 신뢰도 예측을 위해 4-단계 모델링 절차(four-phase modeling procedure)를 제안하였다. 제안되는 모델링 방법론은 네 개의 모델로 구성된다; 1) 구조적 블록 모델(structure block model), 2) 기능 블록 모델(function block model), 3) 장치 모델(device model), 그리고 4) 신뢰성 예측 모델(reliability prediction model). 본 논문에서는 제안하는 모델링 방법론을 이용하여 전자식 안정기에 대한 기능 중심의 신뢰도 예측을 수행하였으며, 하드웨어의 신뢰도를 결정하기 위해 신뢰도 예측 규격 중 하나인 MIL-HDBK-217F를 이용하였다.

주요어 : 모델링, 기능 중심의 신뢰도 예측, 하드웨어 중심의 신뢰도 예측

1. 서론

신뢰도 예측이란 운용 및 사용 조건을 고려하여 고장률 또는 MTBF(Mean Time Between Failures)와 같은 신뢰도 척도를 추정하는 과정이다. 그동안 우리 군에서는 신뢰도 예측을 수행하기 위해 미국에서 개발된 MIL-HDBK 217F, NPRD, EPRD, FIDES, RiAC-HDBK-217Plus, Telcordia SR-332 등의 규격을 주로 활용하여 왔다^[1,2,3,4,5]. 신뢰도 예측을 통해 우리는 아래와 같은 효과를 기대할 수 있다.

* 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소(UD100009DD, UD080042AD), 한국학술진흥재단(2010-0021040)의 지원으로 수행되었습니다.

Received: 23 February 2016, **Revised:** 12 October 2016,

Accepted: 13 October 2016

1) 아주대학교 산업공학과

주저자: 정용호

교신저자: 박상철

E-mail: scpark@ajou.ac.kr

- 제품의 설계 신뢰도에 대한 달성 가능성 여부판단 및 목표에 대한 예측 신뢰도 비교 가능
- 잠재적인 신뢰도 설계 문제를 식별하거나 순위를 부여 가능
- 설계, 부품, 재료 및 공정상의 대안을 수립하거나 평가 가능
- 시험 없이 설계 절충연구를 위한 정량적인 기초자료로 활용함으로써 제품 개발의 비용 절감



Fig. 1. Cases for reliability problem

Fig. 1에서와 같이, 최근 민수차량의 리콜 문제, 방산 장비의 문제 및 해외 수출량 증대 등으로 인해 신뢰성에 대한 중요성이 증대되고 있다⁶⁾. 안전 및 고객과의 신뢰에 대한 강조가 지속되면서, 신뢰도 예측에 대한 많은 연구가 수행되어왔다. 전태보는 MIL-HDBK-217을 이용하여 저출력 전자식 안정기에 대한 신뢰도 예측 모형을 수립하였다⁷⁾. 이상용 외 2명은 일체형 원자로의 디지털 신호 처리 모듈에 대하여 디지털 기기가 가지는 감시 및 자가진단이라는 특징적인 신뢰도 향상 기법을 고려하면서 신뢰도 예측을 수행하였다⁸⁾. 하술 외 2명은 신뢰성 블록

도와 DEVS(discrete event system specification) 방법을 이용하여 시스템을 모델링하고 GPU 가속 기술을 이용하여 신뢰성 블록도의 단점을 보완하였다⁹⁾. 이승우와 이화기는 신뢰성 예측 규칙서인 PRISM을 분석하고, 이를 이용하여 CNC 장치의 인터페이스 카드에 대한 신뢰도 예측을 수행하였다¹⁰⁾. 김주년 외 2명은 KSLV-I 상단부 원격측정 데이터 장치에 대해 MIL-HDBK-338B를 기반으로 구성 부품레벨의 신뢰도 예측을 수행하였다¹¹⁾. 김기태 외 5명은 고 신뢰성이 요구되는 우주용 하이브리드 DC-DC 컨버터를 대상으로 MIL-HDBK-217F를 활용한 신뢰성 예측 분석 사례 연구를 수행하였다¹²⁾. 이와 같이, 신뢰도 예측에 대한 기존 연구들은 대부분 하드웨어를 중심으로 신뢰도 예측을 수행하였다는 공통점을 가지고 있다.

“신뢰성이란 제품이 주어진 사용 조건 아래서 의도하는 기간 동안 정해진 기능을 성공적으로 수행(고장을 일으키지 않는)하는 능력 또는 성질이다¹³⁾”

신뢰성에 대한 정의에서 알 수 있듯이, 신뢰도 예측은 요구기능에 대한 수행 가능성을 평가하는 것이다. 하드웨어 중심의 신뢰도 예측은 요구 기능에 대한 신뢰도 예측을 수행할 수 없으며, 이러한 점은 신뢰도 예측의 목적과 다른 논리적 모순을 발생시킨다. 본 논문에서는 기능 중심의 시스템 신뢰도 예측을 위한 모델링 방법론을 제안한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 기능 중심의 시스템 모델링 방법론을 설명하고, 3장에서는 사례 연구를 소개한다. 마지막으로 4장에서 결론을 맺는다.

2. 기능 중심의 시스템 모델링 방법론

본 장에서는 기능 중심의 신뢰성을 예측하기 위한 시스템 모델링 방법을 설명한다. 본 논문에서 제안하는 시스템 모델링 방법론은 네 가지 모델로 구성된다: 1) 구조적 블록 모델 (structure block model), 2) 기능 블록 모델 (function block model), 3) 장치 모델 (device model), 그리고 4) 신뢰성 예측 모델 (reliability prediction model). Fig. 2에서 알 수 있듯이, 구조적 블록 모델과 기능 블록 모델이 생성되면 이를 이용하여 장치 모델을 생성할 수 있다. 그리고 기능들에 대한 장치 모델이 생성되면 신뢰도 예측 모델을 생성하여 신뢰도를 예측할 수 있다.

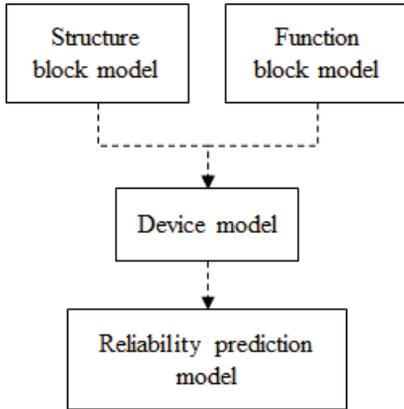


Fig. 2. Four-phase modeling procedure

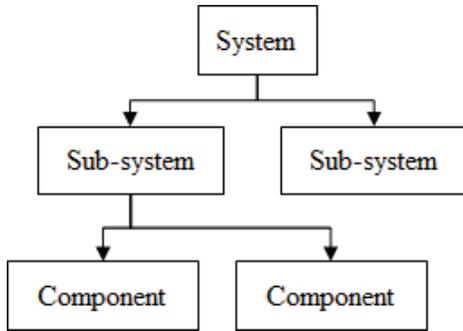


Fig. 3. Structure block model

Fig. 3에서 볼 수 있듯이, 구조적 블록 모델은 시스템을 하드웨어 관점에서 구조적으로 표현하는 것을 목적으로 한다. 1장에서 언급한 바와 같이 시스템의 신뢰성을 예측하기 위한 방법을 개발하기 위한 기존 연구들이 대부분 구조적 블록 모델을 기반으로 신뢰성을 예측하였다. 이를 수행하기 위해 가장 전통적으로 사용되는 방법으로는 고장 나무 분석법(fault tree analysis, FTA)과 신뢰성 블록도(reliability block diagram, RBD)가 있다. 고장 나무 분석법은 논리합(OR)이나 논리곱(AND) 등의 간단한 논리 게이트(logical gate)를 이용하여 시스템이 고장나는 원인에 대해 하향식 방법의 트리(tree) 구조로 분석하는 방법이다. 이 방법에서는 시스템의 고장을 야기하는 최하위 사건들을 논리 연산자를 이용하여 조합함으로써 상위 시스템의 고장을 표현한다. 신뢰성 블록도는 고장 나무 분석법과는 달리 시스템을 구성하는 하위 장비들의 연관 관계를 그대로 이용하는 방식이다. 따라서 고장 나무 분석법에 비해 적은 노력과 짧은 시간으로 신뢰도 분석을 위한 모델을 생성할 수 있다. 본 논문에서는 오직 하드웨어 관점에서의 시스템의 구조 정보만 필요로 하기 때문

에 신뢰성 블록도를 이용하여 구조적 블록 모델을 생성하였다.

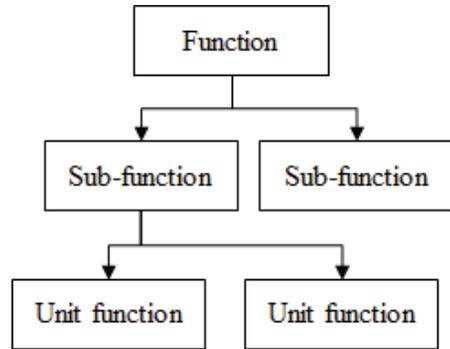


Fig. 4. Function block model

두 번째로, 기능 블록 모델은 앞서 언급한 구조적 블록 모델과 유사하지만 이것은 시스템에 대하여 서브기능으로 분류하고 이를 블록도로 표현하며, Fig. 4이 기능 블록 모델의 구조를 보여준다. 이를 통해, 컴포넌트 간의 기능의 흐름을 이해할 수 있으며, 고장모드의 영향 및 원인 메커니즘을 구조화 및 도식화된 형태로 체계적이고 치밀하게 분석할 수 있다. 기능 블록 모델을 생성하기 위해서는 제품의 시스템이나 하위 시스템의 기능을 이해하고 있어야 한다. 구조적 블록 모델과 같이 기능 블록 모델 또한 신뢰성 블록도를 이용하여 표현할 수 있다.

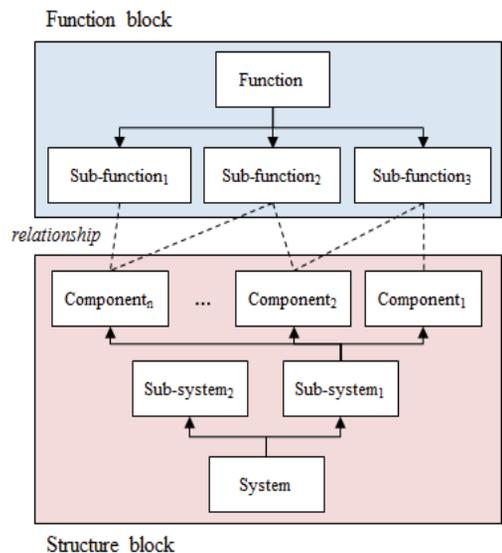


Fig. 5. Definition for relationships between functions and components

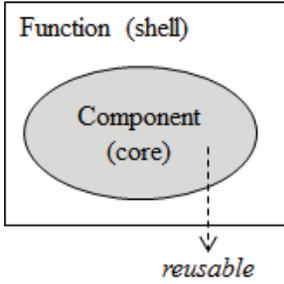


Fig. 6. Device model that consists of function(shell) and component(core)

구조적 블록 모델과 기능 블록 모델이 생성되었다면, 우리는 이를 이용하여 각 모델의 최하위 노드들 간의 관계를 정의하고, 이를 기반으로 신뢰성 예측을 위한 준비를 해야 한다. 장치 모델은 시스템의 기능과 컴포넌트의 관계를 표현한다. Fig. 5에서 볼 수 있는 것처럼, 하나의 컴포넌트는 하나 이상의 기능에 중복되어 사용될 수 있다. 또한 유사한 제품의 경우 제조에 필요한 컴포넌트가 유사한 경우가 많다. 따라서 장치 모델을 생성하는데 있어서 가장 중요한 것은 재사용성이다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이, 우리는 재사용성을 높이기 위해 shell-core 구조를 이용하여 장치 모델을 표현하였다. core는 컴포넌트에 대한 정보를 담고 있다. 예를 들어, 컴포넌트의 고장률이 있다. 이 고장률 정보는 후에 신뢰성 예측 모델에서 시스템의 신뢰성을 예측하기 위해 필요로 하는 정보이다. 이러한 고장률 정보는 MIL-HDBK-217F, FIDES, RiAC-HDBK-217Plus, Telcordia SR-332, EPRD/NPRD와 같은 신뢰도 예측 규격을 이용하여 입력할 수 있다.

본 논문에서는 MIL-HDBK-217F를 이용하여 컴포넌트에 대한 고장률을 결정하였다.

신뢰성 예측 모델의 역할은 장치 모델과 기능 블록 모델을 이용하여 시스템의 기능 중심의 신뢰성을 예측하는 것이다. 신뢰성 예측 모델은 기능 블록 모델과 같이 트리 구조로 표현될 수 있지만 각 노드가 장치 모델이라는 것에서 기능 블록 모델과 다르다. Fig. 7에서 나타내는 것처럼, 하향식으로 생성하는 구조적 블록 모델이나 기능 블록 모델과는 달리 신뢰성 예측 모델은 가장 하위 레벨의 신뢰도를 기반으로 최상위 노드의 신뢰도를 계산하는 상향식 방법으로 접근한다. 최하위 레벨의 장치 모델의 고장률을 기반으로 수리적 모델을 생성하여 신뢰성을 계산할 수 있다. 본 논문에서는 신뢰성 예측 모델의 신뢰도를 계산하기 위해, Fig. 8에서 보여주는 수리적 모델을 이용하였다^[14,15,16].

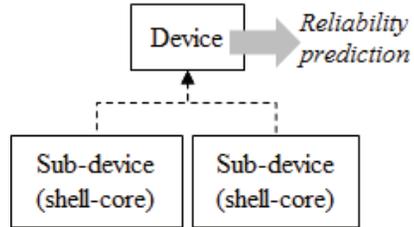


Fig. 7. Reliability prediction model

3. 사례연구

제 3장에서는 제안하는 모델링 방법론을 이용하여 전자식 안정기의 신뢰성을 예측하였다. 전자식 안정기는 예

Type	Reliability model	Mathematical model
Series		$R_s = R_1 R_2 \dots R_n = \prod_{i=1}^n R_i$
Parallel		$R_s = \prod_{i=1}^n (1 - R_i)$
Mixed system		$R_s = R_x (1 - (1 - R_y)(1 - R_z))$

Fig. 8. Mathematical models for reliability prediction

너지 절감, 효율성 증대, 수명보장 등을 목표로 안정기의 자체손실은 최소화 하고 고주파 점등으로 발광효율을 향상시킨 형광등용 안정기이다¹⁷⁾. 본 연구에서는 기능 중심의 신뢰성 예측과 하드웨어 중심의 신뢰성 예측 간의 차이를 보여주기 위해 기존 전자식 안정기에 대한 기능과 컴포넌트 간의 관계를 수정하였다.

하드웨어 관점에서 전자식 안정기는 크게 퓨즈(fuze)&TNR(transient non-linear resistance), EMI(electromagnetic interference) filter 회로, 정류 회로(Rectifier), 역률 개선 회로(PFC : power factor correction), 그리고 인버터(inverter)로 구성된다. 또한, 각 모듈은 또 하나 이상의 컴포넌트로 구성된다. 예를 들어, 역률 개선 회로는 두 개의 캐패시터(capacitor)와 세 개의 다이오드(diode)로 구성된다. 우리는 전자식 안정기의 회로도를 이용하여 구조적 블록 모델을 생성하였다. Fig. 9이 전자식 안정기에 대한 회로도 및 구조적 블록 모델의 일부를 보여준다.

Fig. 10는 전자식 안정기에 대한 기능 블록 모델을 보

여준다. 전자식 안정기의 기능은 크게 다섯 가지로 구성된다. RS(removing surge) 기능은 전원라인의 서지 전압을 제거하기 위한 것이다. FE(filtering EMI) 기능은 전자파 장애를 제거하여 연결되어 있는 다른 컴포넌트에 악영향을 미치는 것을 방지한다. CAD(converting AC to DC) 기능은 교류전압을 직류전압으로 변환하며, CDA(converting DC to AC) 기능은 그 반대의 역할을 수행한다. 마지막으로 CD(counteracting the distortion) 기능은 전력 효율을 향상시키는 역할을 하며, 안정된 전류의 공급으로 전자파를 줄일 수 있다.

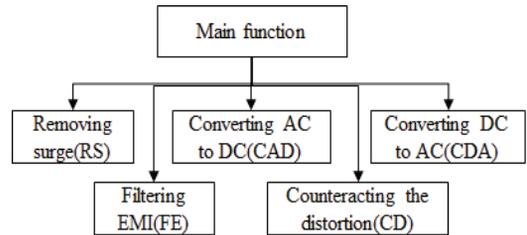
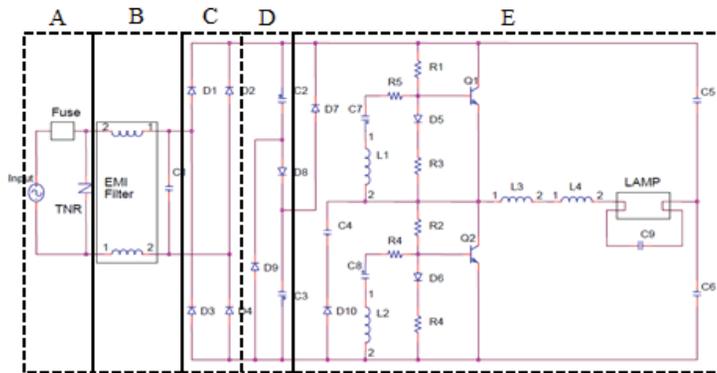


Fig. 10. Function block model of electronic ballast



- A : Fuse & TNR(transient non-linear resistance);
- B : EMI(electromagnetic interference) filter
- C : Rectifier
- D : PFC(power factor correction)
- E : Inverter

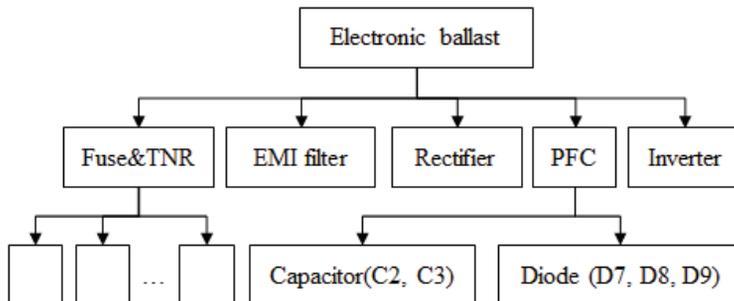


Fig. 9. Circuit diagram of structure block diagram of electronic ballast

구조적 블록 모델과 기능 블록 모델을 생성한 후, 두 블록 모델의 최하위 노드간의 관계를 분석한 결과 전자식 안정기의 경우 기능과 컴포넌트가 일대일로 연결된다는 것을 알 수 있었다. 우리는 기능 중심의 신뢰도 예측과 하드웨어 중심의 신뢰도 예측 결과의 차이점을 나타내기 위해 실제 제품에는 없는 관계를 추가로 정의하였다. Fig. 11에서 실선은 실제 연결 관계를 의미하고, 점선은 실험을 위해 가상으로 만든 연결 관계를 의미한다. 이를 통해 전자식 안정기의 5가지 세부 기능에 대한 장치 모델들을 생성할 수 있다.

앞서 언급했듯이, 본 논문에서는 신뢰도를 예측하기 위해 MIL-HDBK-217F를 이용하였다. Fig. 12가 수리적 모형을 통해서 계산된 전자식 안정기에 대한 기능 중심의 신뢰도를 보여준다. 전자식 안정기의 경우 각 기능에 연결된 컴포넌트들이 모두 직렬로 연결되어 있으며, 기능도 모두 직렬로 연결되어 있다. 그러므로 전자식 안정기에 대한 기능 신뢰도의 수리적 모델은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$R(t) = R_{RS}(t) * R_{FE}(t) * R_{CAD}(t) * R_{CD}(t) * R_{CDA}(t)$$

전자식 안정기의 신뢰도는 지수분포를 따른다는 가정 하에 신뢰도가 계산되었다. Table 2에서 보여주듯이, 전자식 안정기에 대한 기능 중심의 신뢰도는 약 91.4%가 나온다. 만약 하드웨어 중심으로 전자식 안정기의 신뢰도를 예측하였다면, 그 결과는 92.5%가 나온다. 본 논문의 결과만으로 기능 중심의 신뢰도 예측 방법이 하드웨어 중심 신뢰도 예측 방법보다 실제 제품의 신뢰도를 더 잘

예측한다고 말할 수는 없다. 하지만 앞서 언급했듯이, 기능 중심의 신뢰도 예측 방법은 요구기능에 대한 신뢰도를 확인 할 수 있는 방법이기 때문에, 어떠한 임무를 수행함에 있어서 반드시 고려되어야 한다.

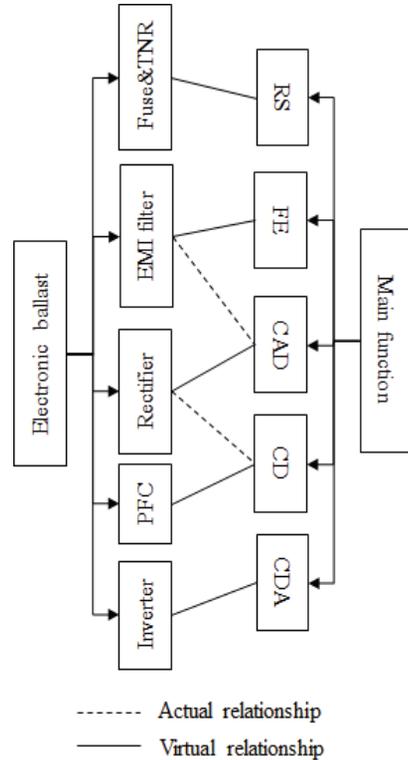


Fig. 11. Relationship between structure block and function block for electronic ballast

Function	Component	Failure rate/(10 ⁶ hrs)	R(10000 hrs)
RS	Fuse & TNR	0.02	1.000
FE	EMI filter	0.56325	0.994
CAD	EMI filter	0.56325	0.994
	Rectifier	0.58806	0.994
CD	Rectifier	0.58806	0.994
	PFC	0.371	0.996
CDA	Inverter	6.1527	0.940
Function based reliability			0.915

Fig. 12. Experimental results

4. 결론

본 논문에서는 기능 중심의 신뢰도 예측을 위한 4-단계 모델링 절차를 제안하였다. 제안하는 방법론은 네 가지 모델로 구성된다; 1) 구조적 블록 모델; 2) 기능 블록 모델; 3) 장치 모델; 그리고 4) 신뢰성 예측 모델. 구조적 블록 모델은 시스템을 하드웨어 관점에서 구조적으로 표현한다. 기능 블록 모델은 시스템에 대하여 서브기능으로 분류하여 블록도로 표현한다. 장치 모델은 시스템의 기능과 컴포넌트의 관계를 표현하며, 재 사용성을 위해 shell-core 구조로 생성된다. 신뢰성 예측 모델은 장치 모델을 기반으로 시스템의 신뢰도를 예측하는 역할을 수행한다. 본 논문은 제안하는 모델링 방법론을 이용하여 전자식 안정기에 대한 신뢰도 예측을 수행하였다.

References

1. MiL-HDBK-217F (1991), Military Handbook, Reliability Prediction of Electronic Equipment, Department of Defense.
2. MiL-HDBK-217F Notice 1 (1993), Military Handbook, Reliability Prediction of Electronic Equipment, Department of Defense.
3. MiL-HDBK-217F Notice 2 (1995), Military Handbook, Reliability Prediction of Electronic Equipment, Department of Defense.
4. RIAC-HDBK-217Plus (2006), HANDBOOK OF 217PlusTM RELIABILITY PREDICTION MODELS, RIAC.
5. Lee, D. (2005), "Reliability Prediction using Telcordia SR-332 in Electric Home Appliance," *Journal of Applied Reliability*, Vol.5, No.4, 427-437.
6. <http://www.asiatoday.co.kr/view.php?key=20160106010002840>
7. Jeon, T. B. (2007), "A Reliability Model of Electronic Ballasts for Fluorescent Lamp," *Journal of Korean society for quality management*, Vol. 35, No. 2, pp. 27-36.
8. Lee, S.Y., Jung, J.H., Kong, M.B. (2008), "Reliability Prediction for the DSP module in the SMART Protection System," *IE interface*, Vol. 21, No. 1, pp. 85-95.
9. Ha, S., Ku, N., Roh, M.I. (2013), "GPU-accelerated Reliability Analysis Method using Dynamic Reliability Block Diagram based on DEVS Formalism," *Journal of the Korea Society for Simulation*, Vol. 22, No. 4, pp. 109-118.
10. Lee, S. W., Lee, H. K. (2008), "Reliability prediction of electronic components on PCB using PRISM specification," *Journal of Korea Safety Management & Science*, Vol. 10, No. 3, pp. 81-87.
11. Kim, J. Y., Jung, H. S., Lee, J. D. (2005), "Reliability Prediction of Prototype Model MDU," *Korea Aerospace Research Institute*, Vol. 4, No. 1, pp. 203-210.
12. Kim, K., Kim, D., Park, B., Ahn, J., Kim, J., Jang, J. (2010), "Reliability Prediction of Hybrid DC-DC Converter for Spacecrafts," *Journal of Applied Reliability*, Vol. 10, No. 13, pp. 171-182.
13. Guo, H., Honecker, S., Mettas, A. and Ogden, D. (2010), Reliability Estimation for One-Shot Systems with Zero Component Test Failures, *IEEE Reliability and Maintainability Symposium*, pp. 25-28.
14. Billinatton, R. and Allan, R. N. (2013), Reliability Evaluation of Engineering System: Concepts and Techniques, Springer.
15. Kuo, W. and Zuo, M. J. (2003), Optimal Reliability Modeling: Principles and Applications, John Wiley & Sons.
16. Lenz, M. and Rhodin, J. (2011), Reliability Calculations for Complex Systems, Linkoping University.
17. Yang, C. S. (2014), "Electronic Ballast of UV Lamp using Resonant Inverter to Variable Intensity of Light," Master Thesis, Chonnam National University.



정 용 호 (yongho1230@ajou.ac.kr)

2011 아주대학교 산업정보시스템공학부 학사
2011~2013 아주대학교 대학원 산업공학과 석사
2013~현재 아주대학교 대학원 산업공학과 박사과정

관심분야 : 모델링 및 시뮬레이션, 반도체 스케줄링, 신뢰성공학



박 지 명 (jmpark89@ajou.ac.kr)

2014 아주대학교 산업공학과 학사
2014~2016 아주대학교 대학원 산업공학과 석사
2016~현재 아주대학교 대학원 산업공학과 박사과정

관심분야 : 모델링 및 시뮬레이션, 제조 시스템, 신뢰성공학



장 중 순 (jsjang@ajou.ac.kr)

B.S. (1979) in Industrial Engineering, Seoul University, Korea
M.S. (1981) in Industrial Engineering, KAIST, Korea
Ph.D. (1986) in Industrial Engineering, KAIST, Korea
1984년 2월~현재 아주대학교 산업공학과, 교수

관심분야 : 신뢰성공학, 품질공학, 도요타 생산방식



박 상 철 (scpark@ajou.ac.kr)

B.S. (1994) in Industrial Engineering, Dept of I.E., KAIST, Korea
M.S. (1996) in Industrial Engineering, Dept of I.E., KAIST, Korea
Ph.D. (2000) in Industrial Engineering, Dept of I.E., KAIST, Korea
2000년 9월~2001년 12월 큐빅테크, 선임연구원
2002월 1년~2004년 2월 DaimlerChrysler ITM Dept. Research Engineer
2004년 2월~현재 아주대학교 산업공학과, 교수

관심분야 : 시뮬레이션, 제조 시스템, 이산사건 모델링, CAD/CAM, PLC, 신뢰성공학