

# 신뢰성이론의 필요성과 효과적인 교육시스템 구축\*

박동호†

한림대학교 산학협력단

## Necessity of Reliability Theory and Establishment of Effective Education System

Dong Ho Park†

Industry Academic Cooperation Foundation, Hallym University, Chuncheon, Korea

### Abstract

Recently, the subject of reliability attracts a great deal of domestic and international attentions and the extensive research activities are being conducted as well. Such trend exists mainly due to the fact that the research on the subject of reliability not only contributes to the theoretical developments, but also may find a wide range of applications in practice over several fields. In particular, the research regarding the maintenance policy incorporating certain types of warranty for repairable system and its application is being performed extensively by many researchers, and their efforts seem more concentrated on developing new maintenance policies which minimize the expected operating cost incurred for replacement and repair of the system, while keeping the system at high reliability. Effective maintenance policy may reduce the operating cost and decrease the downtime of the system during its mission period and consequently, increase the productivity of the system. In this article, the major areas of interest in the field of reliability and its historic perspectives are given briefly and the theoretical aspects in several fields of reliability including the maintenance and warranty policies is also discussed. Furthermore, the current domestic situation regarding the education and research on reliability is presented, along with the importance of reliability theory and the difficulty of training reliability personnel. Finally, the author's opinion for effective education system is proposed.

### 1. 서론

제품의 글로벌화가 급속도로 진행되고 있는 현재의 국제적 상황에서의 시스템의 신뢰성 향상은 국가의 경제발전을 위한 필수적인 요인이 되었으며 이러한 요건을 만족시키기 위한 각국의 치열한 경쟁이 전개되고 있다. 시스템의 신뢰성은 일정한 조건하에서

일정한 기간 동안 고장 없이 제품이 가동되는 특성으로 정의되고 있으며 일부에서는 미래의 품질로도 이해되고 있다. 이러한 정의에서도 알 수 있듯이 신뢰성 학문은 현재 가동 중인 시스템이 미래에 어떻게 될 것인지에 대한 의문을 대답해보려는 학문으로 제품의 노화(aging)에 따르는 시스템의 성능변화를 예측하고 이에 대처하는 방법을 연구함으로써 미래의 시스템

\* This work(2016R1A2B4010080) was supported by Mid-career Researcher Program through NRF grant funded by MEST.

† 교신저자 dhpark@hallym.ac.kr

고장을 최소화하고 고 신뢰도를 유지시키려는 학문적인 노력이라고 할 수 있다. 여기에서 시스템은 복잡한 생산설비나 장비에서부터 생산된 제품에 이르기까지의 모든 것을 포괄적으로 의미하고 있다. 또한 하드웨어 시스템뿐만 아니라 소프트웨어 시스템까지도 포함하고 있으며 최근의 대부분의 하드웨어 시스템은 운용소프트웨어를 내장하는 임베디드 시스템으로 구성되어 있어 하드웨어와 소프트웨어의 신뢰성을 함께 고려하는 신뢰성분석이 필요하다.

신뢰성학문의 여러 분야 중에서 특히 본 논문에서는 수리가능 시스템의 보전·보증정책에 관해서 집중적으로 살펴보고 하며 신뢰성이론 교육의 필요성을 강조하려고 한다. 하드웨어 시스템의 최적 보전정책에 관한 연구는 Marshall and Proschan[23]이 시스템의 보전정책에 관한 포괄적인 논문을 발표한 이후에 본격적으로 시작되었으며 보증정책에 관해서는 Blischke[10] and Blischke and Murthy[11]에서 다양한 형태의 보증정책이 소개되었다. 그 이후 광범위한 응용범위와 현실적인 필요성에 의하여 시스템의 보전·보증정책에 관한 연구가 현재까지 국내외적으로 매우 활발하게 진행되어 왔으며 미국, 유럽, 한태평양 지역에서 신뢰성 분야의 가장 중요한 연구 분야 중의 하나로 간주되고 있고 보전·보증정책을 주제로 하는 다수의 국제 학술대회가 매년 개최되고 있다. 시스템의 보전·보증정책은 시스템의 노화가 진행됨에 따라 성능이 저하되는 경우에 의미를 가지며 미래의 고장발생을 줄임으로서 신뢰도 저하를 방지하는 것을 목적으로 한다. 이러한 목적을 위하여는 시스템의 수명분포에 대한 분석이 선행되어야 함은 물론 특히 확률 및 통계학에 대한 깊은 이론적인 지식이 절대적으로 요구된다고 볼 수 있다. 제2장에서는 신뢰성분야의 발전과정에 대하여 간단하게 기술하고 제3장은 최근의 시스템 보전·보증정책에 관한 몇 가지 사례를 소개한다. 제4장에서는 국내 신뢰성 연구 및 교육 현황을 살펴보고 책장에서는 국내의 효과적인 신뢰성 교육 시스템의 구축을 위한 필자의 의견을 담으려고 한다.

## 2. 신뢰성 발전과정

신뢰성이론이 학문적으로 본격적인 발전을 시작한 시점은 일반적으로 제2차 세계대전에서 복잡한 군사

장비들의 신뢰도문제를 해결하기 위한 노력에서 비롯되었던 것으로 알려져 있다. 1980년 이전의 신뢰성이론의 발달과정에 관한 역사적 배경을 자세하게 기술한 Barlow[2]에 의하면 그 이전에도 신뢰성에 관한 연구가 수행되었음을 알 수 있다. 수학적 이론을 처음으로 신뢰성에 적용한 분야는 Khintchine[21]와 Palm[25]에 의한 기계설비의 보전에 관한 것으로 전화의 중계회선 문제를 해결하는데 사용되었던 기술이 보전에 응용되었으며 전화회선에 대한 포아송 분포의 정당성이 그 이후 복잡한 시스템의 고장에 대한 지수분포 사용의 배경이 되었다. 또한 재생이론이 Lotka[22]와 Campbell[12]에 의하여 처음으로 시스템의 교체정책에 적용되었으나 재생이론을 수학적 학문 분야로 발전시킨 것은 일반적으로 Feller[16, 17]의 공로로 인정되고 있다. Weibull[29]은 소재의 파괴강도를 묘사하기 위한 수명분포를 제안하여 와이블 분포로 명명하였으며 현재 신뢰성 분야에서 가장 널리 응용되고 있는 분포이다.

1950년대에 들어와서 이론학자와 엔지니어들로부터 가장 많은 각광을 받았던 신뢰성분야는 수명시험과 전자제품의 신뢰도 문제이다. 이러한 문제들에 대한 연구는 상업용 비행기회사에서 처음으로 시작되었으며 특히 튜브 신뢰성 향상에 많은 노력이 주어졌다. 그 이후 미국의 국방성이 군사시설의 신뢰성 연구에 본격적으로 참여하였으며 1957년도에는 신뢰성 전반에 관한 최초의 논문집이 발간되었다. 신뢰성이론의 가장 핵심적인 수명분포인 지수분포가 Epstein and Sobel[15]에 의하여 제안되었으며 수명시험 분야에서 매우 중요한 역할을 하게 되었다. 그 이후 Birnbaum and Saunders[9]는 상업용 제트 비행기에서의 진동에 의한 수명을 묘사하기 위한 감마분포를 제안하였고 시스템의 응집구조(coherent structure)에 관한 연구가 Birnbaum, Esary, and Saunders[8]에서 시작되었다. Barlow and Proschan[5]의 “Mathematical Theory of Reliability”는 수명분포와 고장률함수 등을 다룬 신뢰성이론 분야에서의 첫 번째 대학원 수준의 책으로 간주되고 있다.

1970년대에 신뢰성 엔지니어들의 주요 응용 관심 분야는 FTA 이었다. 이것은 주로 안전성과 관련된 분야로서 원자력발전의 영향을 많이 받았던 것으로 보이며 Fussel and Vesely[18], Worrel[30], Esary *et al.*[14] 등이 FTA 분석을 위한 최소 컷 세트, Boolean 방법, 알고리즘, 등에 관한 연구결과를 발표하였으며 Barlow

et al.[3]은 FTA에 관한 신뢰성 이론학자들과 엔지니어들의 논문을 다수 포함하고 있다. 이론적인 연구는 1975년도에 출판된 Barlow and Proschan[6]의 “Statistical Theory of Reliability and Life Testing”의 영향을 크게 받은 것으로 생각되며 이 책은 시스템의 응집구조의 신뢰성, 다 변량 수명분포를 포함한 수명분포들의 성질, FTA 및 시스템 보전정책 등을 다루었으며 이론 연구자들에게 필수적인 내용을 제공하게 되었다. 1980년대에 와서는 컴퓨터의 발전에 따르는 망 신뢰성(Network Reliability)에 대한 연구가 응용신뢰성분야에서 중요한 연구 분야로 등장하게 되었으며 Satyanarayana and Prabhakar[28]은 망의 신뢰도 계산을 위한 그래프 이론을 처음으로 소개하였으며 Agrawal and Satyanarayana[1]는 망의 신뢰도 계산을 위한 알고리즘을 개발하였다. 또한 신뢰성이론에 베이지안 접근방법이 시작되었으며 Barlow and Wu[7]은 평균 수명에 대한 베이지안 추정값을 제안하였고 그 이후 Martz and Waller[24]는 베이지안 기법을 적용한 논문들을 함께 모은 매우 유익한 참고도서이다.

1970년대 후반부터 1990년도 초반까지의 신뢰성 이론연구는 수명분포에 집중되었으며 새로운 수명분포의 개발, 수명분포의 모수적, 비모수적 분류, 비모수적 가설검정 및 수명분포 추정 등에 관한 수많은 연구 결과가 발표되었다. 필자도 NBU- $t_0$ 라는 새로운 비모수적 수명분포 군을 1986년에 제안하였고 그 이후 Reneau and Samaniego[27]은 NBU- $t_0$  수명분포에 대한 추정값을 개발하였다. 비모수적 가설검정은 주로 지수분포를 귀무가설로 설정하고 IFR, IFRA, NBU, DMRL 등의 수명분포 군을 대립가설로 설정하였으며 완전고장자료 및 불완전 고장자료를 이용한 다수의 검정방법이 제안되고 성질이 규명되었다. 그러나 1990년대에 들어와서는 신뢰성기술의 응용에 보다 많은 노력이 주어지면서 수명분포에 대한 연구는 현격하게 줄어들어 가는 경향을 보였으며 현재에는 소수의 연구결과만 발표되고 있는 실정으로 수명분포가 모든 응용분야의 기초가 된다는 점을 고려할 때 보다 많은 연구가 수행되었으면 하는 바램을 가지고 있다.

### 3. 시스템 보전 · 보증 정책

시스템의 보전에 관한 연구는 제2장에서 언급된 것

과 같이 신뢰성에서 수학적 이론이 적용된 최초의 분야로서 1930년대 초기부터 관심을 가졌던 분야로 생각되며 재생이론이 시스템의 교체와 관련된 문제에 적용되었다. 시스템의 보전정책은 고장발생을 최소화하여 일정기간 동안의 시스템의 가동을 최대화 할 뿐만 아니라 시스템의 고장발생시 적용되는 교체나 수리 등에 관한 포괄적인 관리방법을 의미한다. 가장 기본적인 보전정책으로는 연령교체, 블록교체 및 고장교체, 등이 있다. 연령교체는 시스템이 일정한 연령에 도달하거나 고장발생시 새로운 시스템으로 교체하는 보전정책이고 블록정책은 시스템의 나이에 상관없이 정해진 시점에서 교체하는 정책이다. 한편으로 고장정책은 계획이 없는 보전으로 시스템의 고장이 발생하였을 때 교체하는 정책으로 Marshall and Proschan[23]에서 이와 같은 세 가지 보전정책을 시스템의 비모수적 수명분포 군을 고려하여 비교하는 연구결과를 발표하였으며 일정기간 동안의 고장횟수는 고장교체인 경우 확률적으로 가장 크다는 것을 이론적으로 증명하였다. 그 이후 보전정책에 대한 많은 연구가 과거 40여 년 이상 계속되어 오고 있으며 고장이 발생하였을 때의 보전정책 뿐만 아니라 고장을 미리 예방하기 위한 예방보전, 예지보전, 등의 다양한 형태의 새로운 보전정책들이 개발되고 확대되어 왔다. 또한 Blischke and Murthy[11]에서 소개된 것과 같은 다양한 형태의 보증정책이 거의 대부분의 제품에 제공되고 있는 현재에는 새로운 제품뿐만 아니라 중고제품에 대해서도 일정한 보증이 주어지고 있다. 보증정책은 무료보증과 비례보증의 구분에서부터 보증기간의 길이, 교체시의 재생 여부, 등에 따라 여러 가지 형태로 구분되며 따라서 판매자나 사용자 입장에서 최선의 보증정책을 찾아내는 것이 매우 중요한 과제가 되었다. 이러한 보증정책을 기존의 시스템 보전정책과 연계시켜 최적의 시스템 보전·보증 정책을 개발하는 것은 비용절감과 함께 제품의 경쟁력향상에도 결정적인 영향을 미치게 되어 학계의 연구자와 엔지니어뿐만 아니라 산업체의 경영자들에게도 커다란 관심을 불러일으키게 되었다. 이러한 관점에서 시스템 보전·보증정책은 최근에 와서 신뢰성분야의 가장 중요한 연구 분야중의 하나로 대두되었으며 앞으로도 실용화가 가능한 학문으로 학계와 산업체의 지속적인 관심을 받게 될 것으로 기대된다.

연령교체 정책의 경우를 고려해보자 Barlow and

Hunter[4]는 새로운 시스템이 일정한 연령에 도달하거나 또는 고장이 발생하면 새로운 것으로 교체하는 보전정책을 제안하고 일정한 비용모형을 고려한 최적의 교체연령을 결정하는 연구결과를 발표하였다. 그 이후 수많은 연구자들에 의하여 이 연구결과가 확대되거나 수정된 연령교체정책이 발표되었으며 그 중에서도 특히 Yeh *et al.*[31]은 무료 재생보증을 고려하여 시스템의 수명주기 동안의 평균운용비용을 최소화하는 최적 교체연령을 결정함으로써 Barlow and Hunter[4]의 연구결과와 보증정책을 연계시키는 연구를 수행하였고 이러한 연구결과를 일반화시키는 후속 연구결과들이 다수 발표되었다. 기존의 보증정책은 고장발생시의 연령에만 의존하여 보증의 책임범위가 결정되는 1차원 보증정책이 대부분이었다. 그러나 2000년도 후반에 들어오면서 일부 연구자들에 의하여 고장발생시의 연령과 실제 사용기간의 두 가지 요인을 고려한 2차원 보증정책이 제안되었으며 그 예로는 Iskandar *et al.*[20]과 Chukova *et al.*[13] 등이 있다. 현재 제공되는 대부분의 자동차보증의 경우 “3년 또는 50,000km”와 같이 연령(3년)과 실제사용기간(50,000km)에 의존하는 2차원 보증이 제공되고 있다. 그러나 자동차 보증의 경우와 같은 몇 가지 경우를 제외하면 실제 사용기간에 대한 자료는 수집하기가 매우 어렵거나 불가능하기까지 한 경우가 많아서 실제 응용되기에는 한계가 있는 것으로 간주되었다. 이러한 결점을 보완하기 위한 새로운 2차원 보증정책이 최근에 Park *et al.*[26]에서 제안되었다. 여기에서는 보증을 결정하는 두 가지 요인으로 고장발생시의 연령과 실제 사용기간 대신에 연령과 고장수리에 걸리는 시간을 고려하였으며 고장 수리시간에 한계를 설정하여 교체와 최소 수리를 결정하는 정책을 제안하였다. 이러한 정책은 고장발생시의 수리시간에 대한 자료수집이 용이하며 과도한 수리시간 대신에 교체를 제공함으로써 판매자나 사용자에게 보다 바람직한 정책으로 평가될 수 있다. 실제로 미국의 몇 개 주에서는 자동차에 대하여 “Lemon Law”가 시행되고 있어 자동차의 수리에 30일이상이 걸리는 경우에는 새 자동차로 교체하는 것을 규정하고 있는 매우 실제적인 정책이라고 할 수 있다.

위의 예에서 볼 수 있듯이 기존의 시스템 보전·보증정책에 대한 연구는 지속적으로 진행되고 있으며 특히 광범위한 실제적인 적용범위 때문에 앞으로도 국내외적으로 지속적인 발전과 관심을 받을 것으로 기대된다.

#### 4. 국내 신뢰성 연구 및 교육 현황

신뢰성 학문은 최근에 와서 국가적으로도 강조되고 있는 융·복합학문의 대표적인 분야라고 할 수 있다. 수학이나 통계학뿐만 아니라 산업공학 컴퓨터공학, 기술경영 분야 등을 포함하며 특히 공학 분야의 지식이 절대적으로 요구되는 복합학문이다. 또한 신뢰성 기술의 발전에 따르는 제품의 신뢰성 향상은 국내 수요뿐만 아니라 수출의 경쟁력 증진에 커다란 직접적인 요인이 되고 있어 국가경제에도 막대한 영향을 미치고 있다고 생각된다.

국내 산업체의 신뢰성기술에 대한 관심과 학문적 연구는 1990년대에 들어와서부터 시작된 것으로 보이며 1990년대 초기만 하더라도 소연구회 모임 등을 통한 비교적 제한적인 연구와 교육이 진행되었다고 할 수 있다. 그러나 1999년 한국 신뢰성학회가 설립되어 신뢰성 분야의 이론과 산업체의 신뢰성문제 및 적용사례 등에 대한 발표 및 토론의 장이 제공되었으며 국가에서도 2000년경에 신뢰성기반구축사업을 시작으로 신뢰성기술의 발전에 지원과 관심을 가지게 되었다. 그 이후에도 2001년에 제정된 부품·소재 특별법을 비롯하여 제품의 신뢰성향상을 위한 정부주도의 많은 사업이 수행되어 왔으며 제품의 신뢰성평가와 인증을 위한 다수의 연구기관이 신뢰성 전문 평가기관으로 지정되었으며 현재에도 신뢰성업무를 활발하게 수행하고 있다. 이러한 정부의 지원과 함께 학계나 산업체에서도 분야별 연구회를 조직하고 신뢰성 기술향상을 위한 매우 적극적인 노력을 경주하고 있으며 그 결과 국내 신뢰성분야의 연구수준과 신뢰성기술에 커다란 발전을 이룩한 것으로 생각된다. 최근에 와서 신뢰성분야의 주요 국제학술대회인 Asia-Pacific International Symposium on Advanced Reliability and Maintenance Modeling(APARM2016)을 국내에 유치한 것도 국내 신뢰성분야의 높아진 국제적 위상을 나타낸 것으로 간주된다.

그러나 본 논문에서 필자가 보다 많은 관심을 기울이고 싶은 분야는 국내 신뢰성기술의 교육에 관한 현황이다. 앞에서 언급한 것과 같이 신뢰성 학문은 융·복합학문으로서 여러 분야의 지식이 복합적으로 요구되고 있으며 따라서 신뢰성분야의 전문 인력 양성을 위해서는 체계적인 교육이 무엇보다도 필요한 학문이다. 현재 국내에서의 신뢰성 교육은 몇몇 대학교

의 통계학과, 산업공학과 및 공과대학에서 강의가 개설되어 있고 평가기관이나 산업체의 자체교육 및 표준협회를 비롯한 몇몇 교육기관에서의 신뢰성 전문 교육을 제외하면 신뢰성 교육에 대한 체계적인 대학 교육이 결여되어 있다는 것은 부인할 수 없는 현실이며 최근에 와서 순천향대학교에 신뢰성 전공이 설립된 것은 매우 반가운 현상이나 현재로서는 대부분의 대학교에서 소수의 신뢰성학자들에 의하여 연구와 교육이 수행되고 있으며 그 결과 석·박사급 전문 인력의 양성에는 분명한 한계가 있는 매우 안타까운 상황이라고 할 수 있다. 외국의 예를 들어본다면, 중국의 경우 베이징에 소재한 Beihang University에는 School of Reliability and System Engineering이 설립되어 있어 석·박사급 이상의 전문 인력을 체계적으로 양성하고 있을 뿐만 아니라 산업체와의 산학협력체제를 갖추고 교육 및 연구를 제공하고 있다. 그 이외에도 여러 대학교에서 신뢰성분야의 연구 센터 등을 설립하여 전문 인력을 양성하고 있는 것으로 알고 있으며 이러한 국외의 신뢰성 활동은 국내의 상황과 크게 대비되는 매우 부러운 현상이다. 국내의 부족한 교육 인프라 현상은 결과적으로 국제학술대회에의 참석인원이나 발표자 수에서도 자명하게 나타나고 있으며 이러한 지속적인 현상은 궁극적으로 국내 신뢰성 기술의 발전에 저해요인이 될 것이다.

신뢰성분야의 교육 중에서도 특히 우려를 주고 있는 분야는 신뢰성이론에 대한 교육이다.

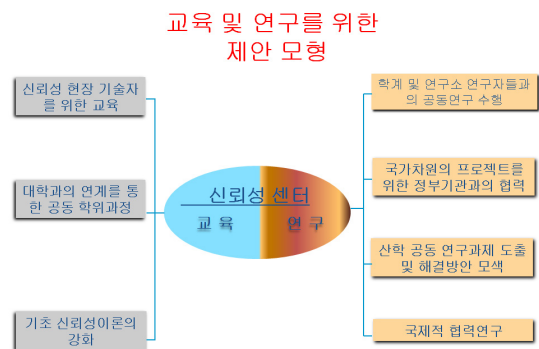
위에서 언급한 시스템의 보전·보증 정책의 경우만 하더라도 시스템의 수명분포나 재생이론 등의 수학적 이론이 기본이 되고 있으며 이러한 이론에 대한 깊은 지식이 없이는 새로운 보전·보증 정책의 개발이나 현장에서의 적용이 매우 어려워지는 것이 사실이다. 최근에 와서는 학계나 정부에서도 학문의 실용화가 특히 강조되고 있어 모든 학문분야에서의 교육이나 연구가 지나치게 응용분야에 집중되고 있는 것은 아닌지를 조심스럽게 검토할 필요성이 있으며 이론분야에 대한 보다 많은 관심이 요구되고 있다.

### 5. 체계적인 신뢰성 교육을 위한 제안

신뢰성 교육은 국내뿐만 아니라 대부분의 외국에서도 커다란 어려움을 겪고 있는 분야이다. 가장 큰

원인으로는 “무엇을 어디에서 교육할 것인가?”에 대한 명확한 해답이 어렵기 때문이다. 신뢰성은 수리통계적인 이론뿐만 아니라 고장 물리적 요소와 비용절감을 포함한 경영기법의 요소까지를 포함하는 복합적인 학문으로 전통적인 학문분야인 수학 물리, 등의 교육과는 또 다른 어려운 문제들을 가지고 있다. 실제로 대학교에서 이러한 여러 분야의 강의를 학과단위로 개설하는 것은 극히 어려운 과제일 뿐만 아니라 수강생들 개개인에게도 여러 분야의 지식을 함께 습득하는 것은 무리한 요구일 것이다. 따라서 한 개인이 여러 분야의 지식을 모두 습득하는 것 보다는 각 분야에서 교육받은 인력이 함께 그룹으로 신뢰성활동을 하는 것이 보다 효과적인 방법일 것이며 중국의 경우에도 우수한 대학에서 신뢰성센터를 설립하여 여러 분야의 전문가들이 연구와 교육을 함께 담당하는 시스템을 구축한 것으로 생각된다. 이러한 연구센터가 국내 대학교와의 협력을 통하여 공동으로 석·박사급 전문 인력을 양성함과 동시에 정부와 산업체와의 업무협력을 통한 신뢰성기술 향상, 국외협력을 통한 경쟁력 향상 등을 선도하는 기관으로 육성될 수 있다면 국내 신뢰성 분야의 발전에 커다란 기여를 할 수 있을 것으로 기대되며 장기적인 신뢰성 전문 인력의 양성을 도모할 수 있을 것으로 생각된다.

필자의 신뢰성센터 역할에 대한 제안은 다음과 같이 요약된다.



### References

[1] Agrawal, A. and Satyanarayana, A. (1984). “Source to K terminal reliability analysis of rooted communication networks”. Networks.

- [2] Barlow, R. E. (1984). "Mathematical theory of reliability: A historical perspective". IEEE Trans. Reliability, Vol. R-33, pp. 16-20.
- [3] Barlow, R. E., Fussel, J. B. and Singpurwalla, N. D. (1975). Reliability and Fault Tree Analysis, SIAM.
- [4] Barlow, R. E. and Hunter, L. (1960). "Optimum preventive maintenance policies". Operations Research, Vol. 8, pp. 90-100.
- [5] Barlow, R. E. and Proschan, F. (1965). Mathematical Theory of Reliability, John Wiley & Sons
- [6] Barlow, R. E. and Proschan, F. (1975). Statistical Theory of Reliability and Life Testing, Holt, Rinehart & Winston. Reprinted 1981 by: To Begin With, Silver Spring, MD, USA.
- [7] Barlow, R. E. and Wu, A. (1981). "Preposterior analysis of Bayes estimators of mean life". Biometrika, Vol. 68, pp. 403-411.
- [8] Birnbaum, Z. W., Esary, J. D. and Saunders, S. C. (1961). "Multi-component systems and structures and their reliability". Technometrics, Vol. 3, pp. 55-77.
- [9] Birnbaum, Z. W. and Saunders, S. C. (1958), "A statistical model for life-length of materials". J. Amer. Statist. Assoc., Vol. 53, pp. 151-160.
- [10] Blischke, W. (1994), Warranty Cost Analysis, CRC Press.
- [11] Blischke, W. and Murthy, D. (1996). Product Warranty Handbook, CRC Press.
- [12] Campbell, N. R. (1941). "The replacement of perishable members of a continually operating system". J. Roy. Statist. Soc., Vol. 7, pp. 110-130.
- [13] Chukova, S., Hayakawa, Y. and Johnson, M. (2007). "Optimal two-dimensional warranty repair strategy". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, Vol. 221, pp. 265-273.
- [14] Esary, J. D., Marshall, A. W. and Proschan, F. (1975). "Shock models and wear processes". Ann. Probability, Vol. 1, pp. 627-649.
- [15] Epstein, B. and Sobel, M. (1953). "Life testing". J. Amer. Statist. Assoc., Vol. 48, pp. 486-502.
- [16] Feller, W. (1941). "On the integral equation of renewal theory". Ann. Math. Statist., Vol. 12, pp. 243-267.
- [17] Feller, W. (1949). "Fluctuation theory of recurrent event". Trans. Amer. Math., Vol. 67, pp. 98-119.
- [18] Fussel, J. B. and Vesely, W. E. (1972). "A new methodology for obtaining cut sets for fault trees". American Nuclear Trans., Vol. 15, No. 1, pp. 262-263.
- [19] Hollander, M., Park, D. H. and Proschan, F. (1986), "A class of life distribution for aging". J. Amer. Statist. Assoc., Vol. 81, No. 393, pp. 91-95.
- [20] Iskandar, B. P., Murthy, D. P. and Jack, N. (2005). "A new repair-replace strategy for items sold with a two-dimensional warranty". Computers & Operations Research, Vol. 32, pp. 669-682.
- [21] Khintchine, A. Y. (1932). "Mathematisches uber die Erwartung von einen offentlicher Schalter". Matem Sbornik.
- [22] Lotka, A. J. (1939). "A contribution to the theory of self-renewing aggregates with special reference to industrial replacement". Ann Math. Statist., Vol. 10, pp. 1-25.
- [23] Marshall, A. W. and Proschan, F. (1972). "Classes of distributions applicable in replacement, with renewal theory implications". Proceedings of the 6th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Vol. 1, ed. L.Lecam, J. Neyman, and E.L.Scott. pp. 395-415.
- [24] Martz, H. F. and Waller, R. A. (1982). Bayesian Reliability Analysis, John Wiley and Sons.
- [25] Palm, C. (1947). "Arbetskraftens fordelning vid betjning av automatskinner". Industritidningen Norden, Vol. 75.
- [26] Park, M., Jung, K. M. and Park, D. H. (2013). "Optimal post-warranty maintenance policy with repair time threshold for minimal repair". Reliability Engineering & System Safety. Vol. 111, pp. 147-153.
- [27] Reneau, D. M. and Samaniego, F. J. (1990). "Estimating the survival curve when new is better than a specified age". J. Amer. Statist. Assoc., Vol. 85, pp. 123-131.
- [28] Satyanarayana, A. and Prabhakar, A. (1978). "New topological formula and rapid algorithm for reliability analysis of complex networks". IEEE Trans. Reliability, Vol. R-27, pp. 82-100.
- [29] Weibull, W. (1939). "A statistical theory of the strength of materials". Ing. Vetenskaps Akad. Handl., No. 151.
- [30] Worrel, R. (1975). "Using the set equation transformation system in fault tree analysis". Reliability and Fault Tree Analysis, pp. 165-185.
- [31] Yeh, R., Chen, G. and Chen, M. (2005). "Optimal age-replacement policy for nonrepairable products under renewing free-replacement warranty". IEEE Trans. Reliability". Vol. 54, pp. 92-97.