

가속모델의 가속계수 조사

박현중* · 김성준** · 박범식*** · 박소미*** · 성시일*†

* 경기대학교 산업시스템공학과

** 조선대학교 산업공학과

*** 국방기술품질원 국방신뢰성연구센터

Investigation of the Acceleration Coefficient in Acceleration Models

Hyunjong Park* · Sungjun Kim** · Beomsik Park*** · Somi Park*** · Siil Sung*†

* Department of Industrial and Systems Engineering, Kyonggi University

** Department of Industrial Engineering, Chosun University

*** Defense Reliability Research Center, Defense Agency for Technology and Quality

ABSTRACT

Purpose: This study is to investigate the literature on accelerated tests based on the acceleration model and to provide a compilation of results on the parameters applied in the acceleration model and the test conditions.

Methods: This research is conducts a literature review on accelerated tests using the acceleration model, with a focus on test targets, test conditions, and parameter values. The study is organizing the results of this literature review to facilitate their application in the design of reliability tests.

Results: A literature review investigated a variety of test targets, test conditions, and parameter values.

Conclusion: The results of the literature research conducted revealed various acceleration model parameter. Such literature research on accelerated tests can establish the foundation for reliability test design and contribute to future product development and quality improvement

Key Words: Arrhenius, Inverse Power Law, Generalized Eyring, Peck, Accelerated Life Test

● Received 4 March 2024, 1st revised 10 March 2024, accepted 12 March 2024

† Corresponding Author(sisung@kgu.ac.kr)

© 2024, The Korean Society for Quality Management

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-Commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

최근 4차 산업혁명의 등장으로 기업은 질 높은 서비스를 제공하기 위해 새로운 기술을 도입하고 있다(김일중 등, 2022). 이러한 새로운 기술의 도입으로 제품에 적용되고 있는 기술도 발전하고 있으며 과거에 비해 구조가 매우 복잡해지고 있는 추세이다. 이와 동시에 다양한 구성품의 품질 수준이 과거에 비해 비약적으로 발전하고 신뢰성도 개선된 상태이다(김민준, 2023). 하지만 기술이 발전함에 따라 역설적으로 제품의 신뢰도를 평가하기 위해 필요한 정보가 많아지고 요구되는 시험시간이 늘어나게 되며 필수적으로 시험해야 할 시편이 많아지게 되어 쉽게 신뢰성 정보를 획득하기 어려워지고 있다(김승현 등, 2020). 이러한 한계점을 극복하기 위해 다양한 산업에서는 가속시험의 개념을 적극적으로 활용하고 있다(Nelson and Wayne B, 2009). 가속시험은 제품을 정상적인 사용조건 보다 가혹한 조건에서 평가하여 제품 개발 및 품질 보증 단계에서 신뢰성 정보를 수집하는 업무에 도움을 준다. 이러한 가속시험은 제품의 특성과 고장 메커니즘에 따라 다양한 스트레스를 인가하는데 대표적으로 온도를 스트레스 인자로 사용하는 가속시험의 경우 아레니우스(Arrhenius) 모델을 활용하여 분석하고 온도 외 전압과 전류 그리고 압력 등의 스트레스 인자의 경우에는 역거듭제곱(inverse power law) 모델을 활용하여 분석하고 있다. 다음으로 아레니우스와 역거듭제곱 모델을 결합한 형태인 일반화 아이링(Generalized eyring) 모델은 온도 외 스트레스 인자를 추가한 형태이고 이 모델에서 온도 외 스트레스 인자가 습도로 적용될 경우에는 펙(Peck) 모델이라고 명명하여 분석하고 있다(William Q. Meeker et al., 2022). 이러한 가속모델들은 제품의 신뢰성과 수명을 평가하기 위해 보편적으로 활용되고 있으며, 주요 목적은 제품이 가혹한 조건에서 얼마나 견디고 요구하는 성능을 유지하는지를 평가하는 것이다. 이러한 평가는 제품의 정상적인 운영 조건에서 예상되는 수명을 예측하는 데 중요한 요소로 작용하며, 가속시험으로 얻은 데이터는 제품 설계나 구성 재료의 결정 그리고 제조 과정 등을 최적화하는 데 중요한 역할을 한다(조성우 등, 2022). 앞서 소개한 가속모델들은 온도를 단일 스트레스 인자로 적용하거나 스트레스 인자가 두 개 이상인 경우에도 온도는 필수적으로 스트레스 인자로 적용하는데 온도에 대한 기초적인 분석 모델인 아레니우스 모델은 가속시험 개념에서 중요한 이론적 기반이다. 이 모델은 온도가 화학 반응 속도에 미치는 영향을 설명하며, 가속시험에서 온도가 제품의 수명에 미치는 영향을 예측하는 데 사용된다. 이때 이 모델의 고유 파라미터값인 활성화 에너지(Activation energy)에 따라 정상사용조건 대비 가속 조건에서 제품의 노화가 일어나는 수준이 달라질 수 있는데, 이러한 활성화 에너지 같은 가속 모델의 파라미터값을 상수로 취급하여 고정값으로 사용하여 분석하면 제품의 신뢰성을 과대 또는 과소 추정하여 의도치 못한 고장이 발생할 수 있다.

이러한 가속시험의 중요성을 인지하여 최근 수행된 연구를 살펴보면 방진홍 등(2023)은 자동차 현가장치용 부싱 고무의 수명을 추정을 위해 아레니우스식 기반의 비선형 열화 모델을 사용하여 시험 결과를 분석하고, 모델의 변수를 최적화하기 위해 유전 알고리즘과 경사 하강법을 적용하고 있다. 최현석(2022)은 수도 밸브용 세라믹디스크의 고장메커니즘을 조사한 결과 열충격이 주요 스트레스 인자임을 파악했고, 이를 커피-맨슨(Coffin-manson)모델로 분석하고 있다. 특히, 동일 조건에서의 열충격이나 마모와 같은 가속시험의 패턴은 머신러닝 기법으로 더 많은 정보를 취득할 수 있다고 시사하고 있다. 김현성 등(2022)은 수소전기차의 주요부품 인증규격인 EC 79를 획득하기 위해 시험시간을 단축하고자 가속시험을 수행하여 비금속 소재인 합성고무(EPDM, Ethylene propylene diene monome)의 가속효과 즉, 가속계수(Acceleration factor)를 확인하고 있다. 김윤철과 최경민(2023)은 필드 고장을 단기간에 검출하기 위해 가속시험방법을 선택하고 있으며, 2019년부터 2022년까지 도어모듈의 클레임 데이터를 분석한 결과 대표적인 고장 모드가 케이블 절손임을 파악하고 있다. 이때 무고장시험법과 역거듭제곱모델을 바탕으로 도어 모듈의 가속시험을 분석한 결과 도어 모듈이 목표수명을 충족함을 시사하고 있다. 정재한 등(2013)은 의료용 할로겐램프

에 대한 가속수명시험을 수행하고 있으며, 품질기능전개를 이용하여 할로겐램프는 전압 스트레스에 민감함을 확인하고 있다. 하지만 가속시험을 수행하기 어려운 여건으로 3 수준의 가속조건에서 예비시험을 수행하여 시험시간을 줄이고 실험을 통해 스크류 타입 대비 핀 타입 램프의 수명이 3배 이상임을 서술하고 있다. 선행 연구를 살펴보면 주로 제품의 신뢰성을 향상하거나 수명을 예측하고 시험시간을 감소하는데 목적을 두고 있음을 알 수 있다. 하지만 가속 모델의 활성화 에너지 같은 가속 계수를 정리하는 연구와 시험 과정, 시험 상황 그리고 시험 환경에 관한 문헌 연구가 부족한 상황이다. 따라서 이 연구는 가속시험을 다룬 문헌을 연구하여 시험 상황과 과정 등에 대한 정보를 정리하고 가속 모델의 파라미터 값을 중심으로 정리한다는 점에서 차별성을 가진다.

이 연구의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 아레니우스 기반의 문헌 연구를 수행하여 요약하고 시험 대상과 시험 온도, 활성화 에너지를 중심으로 서술한다. 다음으로 3장은 역거듭제곱 모델을 기반의 문헌 연구를 수행하여 시험 대상과 스트레스 종류 그리고 가속시험조건을 중심으로 정리하고 있다. 4장은 일반화 아이링과 펙 모델 기반의 문헌 연구를 수행하며 시험 대상과 스트레스 인가 방법 그리고 가속 모델의 파라미터 값을 중심으로 정리하고 있다. 마지막으로 5장은 이 연구의 결론으로 구성되어 있다.

2. 아레니우스 모델 기반 문헌 연구

가속시험에서 아레니우스 모델은 제품이나 재료의 수명을 예측하기 위해 널리 사용하고 있다. 특히, 온도가 스트레스 인자로 적용될 때 활용되고 정상사용조건보다 더 가혹한 온도에서 제품을 노출해 제품의 수명을 비교적 빠르게 예측할 수 있도록 한다. 아레니우스 일반식은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 파라미터값인 E_a 는 활성화 에너지를 의미하며, 시험 조건이 변동되어도 활성화 에너지는 물질 고유특성으로 가속 계수에 직접적인 영향을 주게 되므로 아레니우스 모델 기반 문헌 연구는 시험 대상품과 시험 온도 그리고 활성화 에너지를 중심으로 서술하고 있다.

$$v = \gamma \times \exp\left(-\frac{E_a}{K \times T}\right), AF_{Arrhenius} = \exp\left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{used}} - \frac{1}{T_{test}}\right)\right]$$

Qi li et al.(2015)은 수중 전자 부품의 신뢰성 검증 시험 설계를 위해 HD 사의 규격을 제시하고 있다. 해당 규격에 포함되는 부품들은 수중 및 밀봉 상태에서 운영되는데 특히, 수중 환경 같은 유지관리가 어려운 작업 환경에서는 고장 조치가 어렵기 때문에 전자 부품의 신뢰성 정보는 중요한 정보이다. 정상사용조건에서 제품을 시험하는 것은 시험시간이 오래 걸리고, 비용이 많이 들기 때문에 이 연구에서는 가속수명시험 방법을 수행하는 것을 제시하고 있다. 시험 대상품들을 살펴보면 변속기와 축전기, 저항기, 다이오드(Diode), 트라이오드(Triode), MOS 장치 그리고 포토다이오드(Photodiode)이다. 이 연구에서 제시하고 있는 부품들의 시험 규격을 살펴보면 모두 정상사용조건이 5°C이고 시험 조건은 65°C로 제시하고 있다. 또한, 활성화 에너지는 각각 0.5와 0.6, 0.56, 1.5, 1, 1.2 그리고 1 eV로 밝히고 있다. 이 연구에서는 실제 현장에서 임의의 수중 전자 부품에 대해 신뢰성 검증 시험 설계를 할 때 활성화 에너지는 이 연구에서 제시한 부품들의 평균값인 0.9 eV로 평가하는 것이 적절하다고 언급하고 있으며 아레니우스 일반식을 활용하여 가속시험조건 대비 정상사용조건에서의 수명을 추정하는 연구를 하고 있다.

Paul Ellerman(2012)은 마이크로세미(Microsemi)에서 작성한 신뢰성 가이드북이다. 이 문헌에서는 고장률과 가속 계수(Acceleration factor) 그리고 활성화 에너지에 대한 자세한 계산 과정을 제시하고 있다. 이 문헌에서는 아레니우스 일반식을 바탕으로 다이오드 타입의 반도체에 대한 고온 작동 수명 시험(High temperature operation test)을 수행했을 때, 고장률과 고장시간 그리고 평균고장시간(Mean time to failure)의 도출 방법을 제시하고 있다. 이

문헌에서는 다이오드 기반 반도체의 정상사용조건은 55℃이고 시험 조건은 125℃로 설정했으며, 활성화 에너지는 0.7 eV로 적용하여 평가하는 과정을 제시하고 있다.

Lakshminarayanan. V and Sriraam. N(2014)은 기술이 발전함에 따라 전자 제품에 고성능이 요구되고 전자 제품을 구성하고 있는 부품은 소형화가 되고 있기에 다양한 환경에서 전자 제품의 신뢰성 확보는 중요하다고 언급하고 있다. 이 연구에서는 다양한 환경 요인 중에 높은 온도가 반도체에 미치는 영향을 설명하고 높은 온도로 인해 발생할 수 있는 고장을 최소화하기 위한 방법을 다루는 연구를 하고 있다. 이 연구에서 제시하고 있는 반도체에 발생할 수 있는 고장메커니즘을 살펴보면 부식(Corrosion)과 전자 마이그레이션(Electromigration), 오염(Contamination), 산화물 결함(Oxide defects), 전하 주입(Charge injection), 마스크 결함(Mask defects), 조립 결함(Assembly defects)을 제시했다. 고장메커니즘별로 활성화 에너지는 0.45와 0.6, 1.0, 0.3~0.5, 1.3, 0.7 그리고 0.5~0.7 eV로 밝히고 있다.

C-K, Hu et al.(1995)은 반도체 회로에서 구리소재 부품의 개발과 신뢰성 향상에 초점을 두고 있다. 구리(Cu)와 폴리마이드(Polyimide) 결합하여 반도체 칩 내부에 다층구조를 제작하여 적용한 사례를 다루고 있다. 이때 구리를 사용하여 칩을 제작하면 전자 마이그레이션으로 회로의 연결 부위에 고장을 일으킬 수 있는 가능성을 제기하고 해당 고장메커니즘의 분석과 신뢰성을 측정하기 위해 실험한 결과, 구리로 인한 전자 마이그레이션의 활성화 에너지는 0.7 ± 0.05 eV로 제시하고 있다.

민경찬 등(2011)은 공항 유도도로에 설치되어 야간 또는 악천후 시 항공기의 안전한 항행을 돕는 발광 다이오드(LED) 조명의 신뢰성과 수명을 평가하는 연구를 하고 있다. 최근에는 할로겐램프를 발광 다이오드로 교체하고 있으며, 이러한 발광 다이오드 조명은 낮은 전력 소비와 할로겐램프보다 긴 수명을 보유하고 물리적 측면에서 안정적인 장점이 있다. 이에 따라 발광 다이오드 램프의 신뢰성 검증이 필요함을 제시하고 있다. 신뢰성 검증을 위해 수행한 시험 과정을 살펴보면 시험 온도는 70℃와 90℃를 사용했으며, 이때 활성화 에너지는 0.4835 eV로 밝히고 있다. 해당 시험 데이터를 로그 정규(Log-normal) 분포에 적합 시키고 정상사용조건인 30℃에서, B_5 , B_{10} , 중앙 수명을 추정하고 있다. 결국, 발광 다이오드 조명을 이용한 항공등화는 매우 효율적이고 경제적인임을 알 수 있으며, 다만 과전류로 인한 발광 다이오드 칩의 손상을 주의해야 한다고 언급하고 있다.

Gan, C. L. and U. Hashim(2013)은 반도체 패키징에서 사용되는 볼 본드 부품의 소재인 금(Au)과 팔라듐 코팅 구리(PdCu)를 고온저장수명(High temperature storage life) 시험을 수행하여 더 높은 수명을 가지는 볼 본드를 제시하는 연구를 하고 있다. 금과 팔라듐 코팅 구리 소재가 높은 온도 조건에서 반도체 패키징 부분에 미치는 영향과 더 나아가 반도체 장치의 신뢰성에 미치는 영향을 조사하고 있다. 시험 과정을 살펴보면 금과 팔라듐 코팅 구리의 시험 온도는 150℃와 175℃ 그리고 200℃로 세 수준이 적용되었다. 시험을 통해 얻은 결과를 로그 정규(Log-normal) 분포 그래프와 아레니우스 그래프에 적합시켜 활성화 에너지는 각각 0.85와 1.00~1.26 eV로 제시하고 있다. 실험 결과를 살펴보면 팔라듐 코팅 구리 소재의 볼 본드가 금 소재 볼 본드보다 수명이 높게 나타나고 있으며, 이 연구를 통해 반도체 패키징에서 사용되는 와이어 유형 부품의 신뢰성 측정 방법에 방향을 제시하고 있다.

Forrest. S. R et al.(1988)은 핀 접합 다이오드(Pin-diode)의 신뢰성을 측정하기 위한 연구를 하고 있다. 실험 결과를 살펴보면 측정 데이터의 고장 확률은 로그 정규분포에 적합하며, 시험 온도는 170℃와 200℃ 그리고 230℃에서 수행하고 있다. 또한, 핀 접합 다이오드의 활성화 에너지는 1.5 ± 0.2 eV로 제시하고 있으며, 정상사용조건인 70℃에서 평균고장시간이 높은 수치로 나타나 핀 접합 다이오드의 신뢰성이 매우 높음을 제시하고 있다.

김형민 등(2011)은 타이어 공기압 센서의 신뢰성 평가와 수명 예측을 하기 위해 가속수명시험을 수행하고 있다. 여러 자동차 부품 중에 타이어 공기압 센서는 사용자의 안전에 영향을 미치는 중요한 부품이기 때문에 제품 보증

수명을 결정하기 위해 이 연구를 수행하고 있다. 시험 과정을 살펴보면 시험 온도는 95℃와 105℃로 두 수준을 사용하고 있으며, 활성화 에너지는 0.15 eV로 제시하고 있다. 실험 결과를 바탕으로 예상 수명을 예측한 결과 정상사용 조건인 60℃에서 타이어 공기압 센서는 선진사 수준의 7년 이상임을 시사하며 온도 조건을 고려한 예상 수명은 충분하다고 제시하고 있다.

Hao, Jian et al.(2016)는 긴 수명과 에너지 절약 그리고 환경 보호의 장점을 가진 발광 다이오드는 다양한 분야에서 활용하고 있지만, 긴 수명과 신뢰성 확보 차원의 연구는 부족하기 때문에 발광 다이오드 기반의 광원 모듈(Light source)을 사용하여 발광 다이오드 기반 제품의 신뢰성을 측정하고자 이 연구를 수행하고 있다. 전반적으로 광원 모듈(LED Light source)의 수명 예측과 광원 모듈을 기반으로 하는 제품의 신뢰성을 측정하기 위한 방법을 제시하고 있다. 이 연구에서는 광원 모듈을 높은 온도에서 가속수명시험을 수행했으며, 이때 시험 조건은 60℃와 80℃ 그리고 85℃에서 수행하고 있다. 아레니우스식을 사용하여 분석한 결과 광원 모듈의 활성화 에너지는 0.217 eV로 제시하고 있다.

Gu, H. S and Y. Itoh(2010)은 교량용 고무 베어링에 사용되는 고무의 신뢰성 향상과 수명을 예측하기 위한 연구를 하고 있다. 교량용 고무 베어링의 사용 환경을 분석한 결과, 고온과 자외선, 오존, 저온, 소금물 그리고 산성비와 같은 환경 요인으로 인해 고장이 발생할 수 있다고 분석하고 있다. 이러한 환경 요인으로 인해 교량의 내구성과 안정성에 영향을 미칠 수 있음을 언급하고 있다. 여러 환경 요인 중 열로 인한 산화가 대표적인 고장 메커니즘으로 나타나 높은 온도에서 가속시험을 수행하고 있다. 이때, 시험 온도는 70℃로 설정했고 생존시간은 1,536시간으로 도출되어 활성화 에너지는 0.9949 eV로 밝히고 있다. 이 시험 수치는 일본의 연간 평균 기온을 정상사용조건이라고 가정할 때, 100년이 넘는 수명임을 제시하여 충분한 신뢰성을 확보했다고 언급하고 있다.

Davis, Yevtte A(2011)는 군용 광학 장비가 작동하면서 발광하는 셀(LEC)의 일시적인 동작을 측정함으로써, 셀의 동작에 대한 이해를 높이는 데 중점을 두고 있다. 이 연구는 셀의 전기 용량을 온도나 전압 스트레스를 고려하여 측정하고, 동시에 일시적인 빛 출력과 전류를 모니터링하여 셀 내부의 접합 형성을 관찰하는데 목적을 두고 있다. 이때 셀의 용량 변화율에 온도 의존성이 강하게 나타났고 활성화 에너지는 1.27 eV로 제시하고 있다.

Jin, Dan et al.(2010)은 데이터 통신 장비의 부품으로 사용되는 전기광학 폴리머 변조기(EO polymer modulators)의 신뢰성을 입증하기 위한 연구를 하고 있다. 전기광학 폴리머 변조기는 85℃의 정상사용조건에서 25년 동안 안전성을 입증해야 한다고 제시되어 있다. 신뢰성 입증을 위해 수행한 실험 결과를 살펴보면 시험 온도는 140℃와 170℃로 두 수준이며, 활성화 에너지는 1.1 eV로 밝히고 있다.

Drandova, Gergana. I and Kenneth. D. Decker(2010)의 연구는 전자 부품 산업이 발전함에 따라 전자 부품은 크기가 작아지고 고성능을 요구하기 때문에 전자 부품 구성 요소의 신뢰성 평가의 필요성을 언급하고 있다. 이 연구에서는 전자 부품의 여러 구성 요소 중에 박막(TaN) 저항기의 신뢰성을 평가하기 가속수명시험을 수행한 사례를 제시하고 있는데, 이때 시험 온도는 383℃와 400℃ 그리고 420℃에서 수행하여 활성화 에너지를 2.3 eV로 제시하고 있다. 이러한 시험 과정과 연구를 통해 높은 온도 조건에서 전자 부품의 내구성과 성능의 유지를 보장하기 위해 신뢰성 시험의 중요성을 언급하고 있다.

Nikolic, Valentino, and Radek, Polansky(2020)는 절연 재료가 없이는 전자 장비가 작동할 수 없으며, 전자 장비가 의도한 대로 작동하고 사용자의 안전성을 확보하기 위해서는 절연 재료의 신뢰성 확보는 필수적이라고 언급하고 있다. 하지만 일부 절연 재료는 전기적인 환경과 기계적 그리고 고온 환경에서 내구성이 없음을 지적하고 이를 조사하기 위해 대표적으로 사용하는 절연 재료(BTSI oil)의 신뢰성을 평가하기 위해 높은 온도에서 가속수명시험을 수행하고 있다. 해당 시험 절차는 관련 표준서인 IEC 60216과 ASTM E 1641-07의 시험 방법을 기반으로 수행했으며, 전기 절연 재료를 90℃와 180℃ 두 수준에서 시험을 수행하여 활성화 에너지를 0.69 eV로 밝히고 있다.

Espinet-González, Pilar et al.(2015)은 광전지 시스템은 전기를 생산하는 여러 방법 중에 유용한 방법임을 언급하고 있다. 광전지 시스템 구축을 위해 태양전지의 확보는 필수적이지만 획득비용이 높기 때문에 태양전지의 신뢰성 확보는 필수적이라고 언급하고 있다. 신뢰성 확보를 위해 이 연구에서는 상업용 삼중접합 태양전지의 수명과 신뢰성을 평가하기 위해 가속수명시험을 수행하고 있다. 시험 과정을 살펴보면 시험 온도는 80℃와 100℃에서 수행했고 이때 활성화 에너지는 1.59 eV로 제시하고 있다. 두 시험 조건에서 신뢰성과 수명을 평가하였으며, 활성화 에너지가 높은 수치로 온도에 민감하게 반응함을 보여주고 있다. 80℃에서 예상 수명은 113년인 반면 100℃에서는 7년으로 감소하여 제품의 개발 단계에서 정상사용조건 결정의 중요성을 언급하고 있다.

유건성 등(2015)은 현재 군에 보급되는 전투화의 품질 보증 기간은 1년으로 설정되어 있으며, 사용자 불만 발생 시 2년 동안 업체의 자발적인 사후관리가 적용되고 있는 상황이다. 하지만 사용자 불만 수가 많을 경우, 전체적인 품목의 사후관리 처리가 어렵기 때문에 근본적인 해결 방안이 필요하여 전투화용 고무의 수명평가를 하고 있다. 전투화에 사용되는 고무에 열 노화로 인한 영향 조사와 전투화의 수명 예측을 위해서 가속수명시험 방법을 사용하고 있다. 가속시험 조건을 살펴보면 시험 온도는 60℃와 80℃ 그리고 100℃이며, 인장강도와 신장률 그리고 내 마모도 등을 수명 한계로 설정하고 있다. 수명 한계 항목별 활성화 에너지는 0.73과 0.75 그리고 1.19 eV로 제시하고 있다. 시험 결과를 바탕으로 수명을 예상 수명을 도출한 결과, 세 가지 물성 모두 예상 수명이 10년 이상임을 제시하며, 일반 병사의 전투화 보급 이후부터 예비군의 완료까지 열 노화로 인한 전투화용 고무의 신뢰성이 입증됨을 밝히고 있다.

Koh et al.(2013)의 연구는 실내 전구를 대상으로 하는 가속시험에 대해 다루고 있는데, 기존 수행하던 6,000시간의 시험이 효율적이지 않기 때문에 새로운 모델을 제시하여 시험시간을 2,000시간 미만으로 단축하는 데 목적을 두고 있다. 이 연구에서 제시하는 모델은 아레니우스 모델에 기반을 두고 있다. 가속시험 온도를 55℃와 85℃에서 수행하여 활성화 에너지는 0.4eV로 제시하고 있으며, 기존 수행하던 시험 결과와 이 연구에서 제시한 모델로 분석한 시험 결과를 비교해 보면 통계적으로 차이가 없으므로, 제시한 모델의 효율성을 강조하고 있다.

M, Yazdan Mehr et al.(2014)은 고온으로 인해 폴리카보네이트(BPA-PC)로 만든 렌즈에 미치는 영향을 조사하고 신뢰성을 평가하는 데 목표를 두고 있다. 폴리카보네이트는 발광 다이오드 기반 제품에서 광학 렌즈에 널리 사용되는 소재로, 온도가 증가함에 따라 렌즈의 손상 속도가 증가함을 이용하여 100℃와 140℃에서 시험을 수행하고 있다. 실험 결과를 살펴보면 활성화 에너지는 0.333eV로 밝히고 있으며, 정상사용조건인 40℃에서 폴리카보네이트 렌즈의 예상 수명은 100,000으로 추정하여 폴리카보네이트 소재 렌즈의 신뢰성을 입증하고 렌즈 계열 제품의 신뢰성 평가 방법을 소개하고 있다.

N, Núñez et al.(2013)은 최근 전기를 생산하는 방식 중 떠오르는 기술인 태양 전지 기술의 필요성을 강조함과 동시에 태양전지의 신뢰성 확보 또한 중요한 연구임을 언급하고 있다. 이 연구에서는 비소화갈륨(GaAs) 태양전지의 신뢰성과 보증 기간을 분석하기 위해 가속수명시험을 수행하고 있다. 시험 조건을 살펴보면 130℃와 150℃ 그리고 170℃에서 수행했으며, 이때 활성화 에너지는 1.02 eV로 밝히고 있다. 이 실험 결과를 바탕으로 태양전지의 정상사용조건인 65℃에서 30년 이상의 수명을 보증하는 결과를 제시하고 있다.

Kim, K. C. et al.(2020)은 2018년 통계자료를 바탕으로 한국에서 전기 콘센트로 인한 화재가 빈번히 발생하고 있는 점을 지적하며, 화재로 인해 사용자 안전에 영향을 미칠 수 있는 전기 콘센트의 신뢰성에 관한 연구를 하고 있다. 전반적으로 사용 기간에 따른 전기 콘센트의 절연 저항과 재료 특성을 평가하여 전기 콘센트의 신뢰성을 평가하는 계획을 세우고 있으며, 신뢰성 평가 방법은 비교적 시험시간이 적게 소요되는 가속수명시험을 사용하고 있다. 아레니우스 모델을 기반으로 시험을 수행하여 10년과 20년 그리고 30년 동안 사용된 콘센트를 대상으로 시험하고 있다. 시험 온도는 110℃에서 수행하고 있으며, 이때 활성화 에너지는 0.87 eV로 밝히고 있다.

2절에서 아레니우스 기반 문헌 연구 결과를 정리한 결과는 <Table 1>에 나타나고 있다. 정리한 주요 내용은 시험 대상품과 시험 온도 그리고 핵심 파라미터값인 활성화 에너지를 중심으로 구성하고 있다.

Table 1. Summary of literature review results based on the Arrhenius model

Author	Test target	Test temperatures/°C	Activation energy/eV
Qi li et al.(2015)	Transformer	65	0.5
	Capacitor		0.6
	Resistor		0.56
	Diode		1.5
	Triode		1.0
	MOS device		1.2
	Charge-coupled photodiode		1.0
Paul Ellerman(2012)	Diode type semiconductors	125	0.7
Lakshminarayanan V. and Sriraam N.(2014)	Semiconductor		Corrosin 0.45
			Electromigration 0.6
			Contamination 1.0
			Oxide defects 0.3~0.5
			Charge injection 1.3
			Mask defects 0.7
			Assembly defects 0.5~0.7
C-K Hu et al.(1995)	Electronic devices chip		0.7±0.05
Min et al.(2011)	LED lights	70, 90	0.4835
Gan. C. L. and U. Hashim(2013)	ball bond	150, 175, 200	Au : 0.85 Pdcu : 1.00~1.26
Forrest S. R. et al.(1988)	Pin-diode	170, 200, 230	1.5±0.2
Kim et al.(2011)	Tire pressure monitoring system sensor	95, 105	0.15
Hao Jian et al.(2016)	Light source	60, 80, 85	0.217
Gu. H. S. and Y. Itoh(2010)	Bridge Rubber Bearings	70	0.9949
Davis Yevtte A.(2011)	LEC		1.27
Jin Dan et al.(2010)	EO polymer modulators	140, 170	1.1
Drandova Gergana I and Kenneth D. Decker(2010)	TaN resistor	383, 400, 420	2.3
Nikolic Valentino, and Radek Polansky(2020)	BTSI oil	90, 180	0.69

Author	Test target	Test temperatures/°C	Activation energy/eV	
Espinet-González Pilar et al.(2015)	solar cells III-V CPV, photovoltaics	80, 100	1.59	
Yu et al.(2015)	Combat boots rubber	60, 80, 100	Tensile strength	0.73
			Elongation at break	0.75
			Abrasion resistance ratio : 1.19	1.19
Koh et al.(2013)	Indoor LED	55, 85	0.4	
M. Yazdan Mehr et al.(2014)	BPA-PC plastic lens	100, 140	0.333	
N. Núñez et al.(2013)	CPV solar cells	130, 150, 170	1.02	
Kim, K. C. et al.(2020)	Electrical Socket Outlets	110	0.87	

3. 역거듭제곱 모델 기반 문헌 연구

다음 가속 모델은 역거듭제곱(inverse power law) 모델로, 이 모델은 전기 절연체와 베어링 그리고 금속피로 등의 분야에 널리 활용하고 있다. 역거듭제곱 모델의 관계식은 일반적으로 분모에 멱함수가 포함되는 형태로 가속수명 시험을 수행할 경우 가속 계수는 다음과 같은 식을 통해 도출할 수 있다. 이때 스트레스 수준이 주어지게 된다면 가속 계수는 β_1 값에 영향을 받게 되는 형태이므로 역거듭제곱 모델의 문헌 연구는 시험 품 고유특성인 β_1 값과 시험 대상품 그리고 가속시험조건을 중심으로 서술하고 있다.

$$L = \frac{\beta_0}{S^{\beta_1}}, AF_{\in \text{verse power law}} = \frac{L_1}{L_2} = \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^{\beta_1}$$

Shin and Lee(2008)는 자동차에 사용하는 블로워(Blower) 모터를 위한 가속수명시험 방법을 개발하는 것에 목표를 두며, 자동차 탑승자의 안전과 편의성에 중요한 역할을 하는 소형 DC 모터의 신뢰성을 확보하는 연구를 하고 있다. 시험 과정을 살펴보면 가속수명시험의 분석을 위해 역거듭제곱 모델을 사용하고 DC 모터의 주요 고장 모드인 전압으로 인한 브러시 마모에 초점을 두고 실험을 설계하고 있다. 다음으로 실험 결과를 살펴보면 DC 모터의 수명분포는 와이블 분포를 따르고 가속시험조건인 16.2V와 13.5V를 인가한 결과, 역거듭제곱 모델의 파라미터값 β_1 은 9.4로 밝히고 있다.

Lee et al.(2003)은 농업용 트랙터 변속기의 신뢰성을 향상하는 연구를 하고 있다. 이 변속기에서 발생하는 주요 고장 메커니즘은 브러시와 커뮤테이터(Commutator) 사이의 마찰로 회전수가 증가함에 따라 마모가 많이 발생하고 있다. 이때 모터의 스트레스 인자는 회전 빈도로 설정하여 정상사용조건일 때 회전수를 15회와 가속시험조건을 90회로 설정한 후 시험을 수행하여 분석한 결과 β_1 값은 6으로 제시하고 있다.

Zhang, C. et al.(2002)은 실제 염수로 인한 부식 환경을 구성하여 베어링의 수명을 평가하고 있다. 스트레스 인가 방법은 단계형 스트레스 방식을 적용하고 소금물 무게 대 물 무게의 백분율로 소금의 함량을 정의하고 있다. 이때 실험하는 염수 수준은 1%와 8%, 16%, 26% 그리고 36.1%로 수행하고 소금물 온도는 $20 \pm 10^\circ\text{C}$ 로 제어하고 있다.

이러한 가속시험을 통해 역거듭제곱 모델의 β_1 값은 0.1445로 밝히고 있다.

Feilat, E. A. et al.(2000)은 AC와 DC 그리고 DC-AC 중첩 전압을 변압기에 인가하여 절연 시스템의 수명을 추정하는데 목표를 두고 있다. 모든 스트레스 수준에서의 수명분포는 와이블 분포를 따르며, AC 전압에서 주요 고장 메커니즘은 유전 손실과 부분 방전으로 나타났으며, 가속시험 조건은 30Kv이고 β_1 값은 4.9로 밝히고 있다. 다음으로 DC 전압에서는 열분해가 주요 고장메커니즘으로 나타났으며 가속시험 조건은 90Kv를 인가하고 β_1 값은 19.7로 제시하고 있다. 마지막으로 DC-AC 중첩 전압의 경우를 살펴보면 DC 고전압에 소량의 AC 성분이 있으면 절연 시스템의 고장이 크게 가속화되는 것을 관찰할 수 있는데 이때 DC 전압의 가속시험 조건은 70Kv이고 AC 전압의 가속시험 조건은 7Kv로 제시하고 있다.

정동수(2011)는 유압펌프를 사용하는 기계 장비의 가속시험방법에 관한 연구를 하고 있다. 유압펌프의 수명분포는 와이블 분포를 따르며 형상 모수가 3.0으로 가정하고 있다. 이때 보증수명인 B_{10} 수명이 10,000시간 이상을 요구하며 시료 수는 10개 그리고 신뢰 수준이 80%로 주어지면 시험시간은 11,516임을 설명하고 있다. 이렇게 가속시험 분석에 활용할 수 있는 정보를 수집한 후 유압펌프의 설계 사양을 고려하여 성능평가를 할 때 가속시험조건은 2,200MPa이고 정상사용조건은 1,800MPa이며 β_1 값은 8로 밝히고 있다.

3장에서는 역거듭제곱 모델을 활용한 문헌 연구를 수행하고 있으며 시험 대상품과 가속시험조건 그리고 파라미터 값을 중심으로 서술하고 있다. 역거듭제곱 모델을 활용한 문헌 연구를 정리한 결과는 <Table 2>에 나타나고 있다.

Table 2. Summary of literature review results based on the Inverse power model

Author	Test target	Test Conditions	β_1
Shin and Lee(2008)	Blower motor	16.2V and 13.5V	9.4
Lee et al.(2003)	Power train components	90 Cycle	6
Zhang, C. et al(2002).	Bearing	8%, 16%, 26% 32.1%	0.1445
Feilat, E. A. et al. (2000)	Transformer	AC : 30Kv	4.9
		DC : 90kv	19.7
		DC-AC : 70Kv, 7Kv	-
Jung(2011)	Hydraulic Pump	2,200 MPa	8

4. 일반화 아이링 및 펙 모델 기반 문헌 연구

일반화 아이링모형은 온도 외의 스트레스를 추가로 인가하여 스트레스 변수가 두 개 이상일 경우 분석하는 모델로 일반적으로 가속수명시험에서는 아레니우스와 역거듭제곱 모델이 결합한 구조로 다음과 같이 나타낼 수 있다. 이때 일반화 아이링 모델의 가속 계수는 활성화 에너지와 온도 외 스트레스인 S에 영향을 받게 되는데 이때 가속 계수는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있으며, 정상사용조건과 가속시험조건이 주어지면 활성화 에너지와 β_1 값에 따라 가속 계수는 영향을 받게 된다.

$$L = A \cdot \exp\left(\frac{E_a}{k \cdot T}\right) \cdot S^{-\beta_1}, AF_{Eyring} = \exp\left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{t_{used}} - \frac{1}{t_{test}}\right)\right] \cdot \left(\frac{S_{test}}{S_{used}}\right)^{\beta_1}$$

일반화 아이링 모델에서 온도 외 스트레스 인자가 습도로 적용될 때 가속시험 결과를 팩 모델을 활용하여 분석하고 있다. 팩 모델과 가속 계수를 도출하는 일반식은 다음과 같이 나타낼 수 있으며 일반화 아이링과 팩 모델의 가속 계수 또한 활성화 에너지와 β_1 값 그리고 n의 값에 따라 영향을 받기 때문에 4장의 문헌 연구는 가속 모델의 파라미터 값과 시험 대상품 그리고 가속시험조건을 중심으로 서술하고 있다.

$$L = A \cdot \exp\left(\frac{E_a}{k \cdot T}\right) \cdot (RH)^{-n}, AF_{Peck} = \exp\left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{t_{used}} - \frac{1}{t_{test}}\right)\right] \cdot \left(\frac{RH_{test}}{RH_{used}}\right)^n$$

M, Yazdan Mehr et al.(2015)은 인광 관의 신뢰성과 성능 향상을 위해 초가속시험(HAST, Highly accelerated stress test)을 수행하고 있다. 이 실험을 통해 인광 관에 높은 온도와 블루 라이트를 노출시켜 열 및 쿨링(Thermal and photonic quenching) 현상이 발광 다이오드에 사용되는 인광 관에 어떤 영향을 미치는지 조사하고 있다. 실험에 사용된 재료로는 3mm 두께의 리모트 인광 관을 사용하고 폴리카보네이트 소재로 제작되었다. 이러한 실험 샘플을 블루 라이트 방출기 아래에 위치시키고 온도 조건은 80°C와 100°C 그리고 120°C에서 수행되었으며, 블루 라이트는 13,300W/m²의 강도로 인광 관에 스트레스를 인가하고 있다. 실험 결과를 살펴보면 온도와 광도는 인광 관에 고장 속도를 가속시킴을 알 수 있으며, 이때 일반화 아이링 모델의 파라미터 값은 활성화 에너지가 0.33 eV이고 β_1 값은 0.2로 제시하고 있다.

손지훈 등(2022)은 자동차 도어 래치(Door latch)에 고장영향분석(FTA, Fault tree analysis)과 치명도 분석(FMECA, Failure mode, effects, and criticality analysis) 그리고 품질기능전개(QFD, Quality function deployment)를 적용하여 고장분석을 수행한 결과 섹터 기어의 마모가 주요 고장 메커니즘으로 나타나고 있다. 이때 주요 스트레스 인자는 온도와 전압으로 나타나고 있다. 자동차 도어 래치의 설계 조건에 맞추어 고장 판정기준은 구동과 구동 불가능 상태로 정의하고 온도와 전압을 스트레스 인자로 사용했기 때문에 분석 모델은 일반화 아이링 모델로 분석하고 있다. 가속시험 조건을 살펴보면 온도는 -45°C와 -30°C, 80°C 그리고 100°C에서 수행하고 전압은 24V와 18V 그리고 14V에서 수행하고 있다. 이렇게 시험 조건을 조합하여 가속수명시험을 수행한 결과 일반화 아이링 모델의 파라미터값인 활성화 에너지는 0.106938 eV이고 β_1 값은 7.43956으로 밝히고 있다.

Nogueira, Eduardo et al.(2009)은 교통 통제 분야와 야외 광고판 그리고 자동차 내부 및 외부의 조명에 사용되는 적색 발광 다이오드의 신뢰성을 측정하고자 가속수명시험을 수행하고 있다. 이 연구에서는 고장을 치명적 고장(Catastrophic failures)과 열화 고장(Degradation failures)으로 나누어 발광 다이오드에서 발생할 수 있는 고장의 종류를 정의하고 있으며, 이 실험에서의 고장 판정은 발광 다이오드의 광도가 70% 이하로 감소했을 때의 열화 고장을 관측 중단 시점으로 정의하여 시편을 처리하고 있다. 가속시험 조건을 살펴보면 온도는 110°C와 130°C 그리고 140°C이고 습도는 50%와 70% 그리고 85%의 조건에서 시험을 수행하고 있다. 가속수명시험의 분석 모델은 팩 모델을 활용하여 분석하고 있고 분석 결과를 살펴보면 파라미터값인 활성화 에너지는 0.97 eV이고 n은 2.02로 제시하고 있다.

Charruau, Stéphane et al.(2006)은 항공기용 전자 보드의 평균고장간격(Mean time between failure)을 추정하기 위해 항공기가 운용되는 임무를 바탕으로 신뢰성 함수를 정의하고 있다. 이 연구에서는 항공기의 작동모드를 크게 작동 정지 상태와 지상에서의 작동 그리고 공중에서 작동으로 정의하고 있다. 이러한 항공기의 작동은 전자 보드

를 거쳐 통제되기 때문에 중요 부품인 전자 보드의 신뢰성을 추정하고자 시험을 온도 순환 시험과 온도 및 습도 시험 그리고 무작위 진동 시험으로 나누어 수행하고 있다. 이 중 꺾 모델을 활용하여 분석하는 온도 및 습도 시험의 조건을 살펴보면 시험 조건은 세 가지로 60°C와 습도 90%와 70°C와 80% 그리고 90°C와 70%의 조건에서 시험을 수행하고 있다. 이때 꺾 모델의 파라미터값인 활성화 에너지는 0.14 eV이고 n은 5.375로 제시하고 있다.

Hang, Chunjing, et al.(2013)은 유연 포장(Flexible packaged)한 발광 다이오드의 평균고장시간을 추정하기 위해 두 종류의 샘플을 네 가지 시험 조건에 할당하여 가속시험을 수행하고 있다. 각 시험조건을 살펴보면 첫 번째는 130°C 온도에서 수행하고 다음 조건은 130°C 온도와 85% 습도 조건에서 시험을 수행하고 있다. 다음으로는 85°C와 85%로 수행하고 있으며 마지막으로 85°C와 60%의 조건에서 시험을 수행한 결과 꺾 모델의 파라미터값인 활성화 에너지는 0.589 eV이고 n은 5.132로 밝히고 있다. 이러한 가속 모델의 파라미터값을 활용하여 정상사용조건인 45°C와 50% 조건에서의 평균고장시간을 추정한 결과 13,232시간으로 추정하고 있다.

4장에서는 일반화 아이링과 꺾 모델을 활용한 문헌 연구를 수행하고 있으며, 시험 대상품과 가속시험조건 그리고 파라미터값을 중심으로 서술하고 이를 정리한 결과는 <Table 3>에 나타나고 있다. 다른 모델들과 달리 4장에서 문헌 연구를 수행한 모델들은 스트레스 인자가 두 개가 적용되었기 때문에 가속모델의 파라미터값 또한 두 개로 제시하고 있다.

Table 3. Summary of literature review results based on the generalized eyring and peck model

Author	Acceleration model	Test target	Test Conditions		Activation energy/ β_1 or n	
M., Yazdan Mehr et al.(2015)	Generalized eyring	Phosphor plates	80°C, 100°C, 120°C	13,300 W/m ²	0.33eV	0.20
Son et al.(2022)	Generalized eyring	Door latch	-45°C, -30°C, 80°C, 100°C	14V, 18V, 24V	0.10eV	7.43
Nogueira, Eduardo. et al.(2009)	Peck	LED	110°C, 130°C, 140°C	50%, 70%, 85%	0.97eV	2.02
Charruau, Stéphane. et al.(2006)	Peck	aeronautic electronic board	60°C, 7 0°C, 9 0°C	70%, 80%, 90%	0.14eV	5.37
Hang, Chunjing. et al.(2013)	Peck	flexible packaging LED module	85°C, 135°C	60%, 85%	0.589eV	5.132

5. 결 론

이 연구는 온도를 스트레스 인자로 다루는 아레니우스 가속 모델과 전압 및 회전 빈도 등을 스트레스 인자로 다루는 역거듭제곱 모델 그리고 두 가지 스트레스 인자가 적용된 시험을 분석하는 모델인 일반화 아이링과 꺾에 대한 가속시험의 문헌 조사를 다루고 있다. 기존연구들은 가속 모델의 가속 계수에 밀접하게 관련된 시험 상황과 환경 조

건 등에 관한 문헌 연구가 부족하므로 이에 대한 정리를 제공하고 있다. 이 연구의 2장에서는 아레니우스 가속 모형을 적용한 문헌에 대해 시험 상황과 과정 등에 대해 간략하게 정리하여 제공하고, 3장에서는 역거듭제곱 모델의 문헌 연구 결과를 제공하고 있다. 그리고 4장에서는 두 스트레스 인자가 적용된 문헌을 조사하여 일반화 아이팅과 펙 모델이 적용된 연구 사례를 정리하고 있다. 이 결과를 바탕으로 2장과 3장 그리고 4장의 마지막 문단에는 가속 모델의 파라미터 값을 표로 정리하여 제시하고 있다. 이러한 가속시험에 관한 문헌 조사는 신뢰성 시험 설계의 기초를 마련하고 향후 제품 개발 및 품질 향상에 기여할 수 있으며 향후 수행할 연구 분야로는 지금까지 수집된 가속 모델의 시험 상황과 가속 계수에 대한 정보를 바탕으로 새로운 자료를 수집한 후, 시험 대상품과의 연관 관계를 정리하여 새로운 제품이나 기존에 신뢰성 입증 시험이 적용되지 않은 제품에 대한 참고자료로 활용할 수 있도록 확장하는 연구가 필요하다.

REFERENCES

- Bang, Jin Hong et al. 2023. Accelerated Life Testing Data-Based Lifetime Prediction of Rubber Material for Bushing Using Global-Local Optimization Technique. *Journal of Applied Reliability* 23(3):211-220
- Charruau, Stéphane et al. 2006. Reliability estimation of aeronautic component by accelerated tests. *Microelectronics reliability* 46.9(11):1451-1457.
- Cho, Seongwoo, Lee, Hansol, and Kang, Juyoung. 2022. A Study on the Common RPN Model of Failure Mode Evaluation Analysis(FMEA) and its Application for Risk Factor Evaluation. *Journal of Korean Society for Quality Management* 50(1):125-138.
- Choi, Hyoung Seuk. 2022. Accelerated Life Test and Life Model Development of Alumina Ceramic Disk for Water Valve. *Journal of Applied Reliability* 22(4):411-418
- C-K. Hu, B. Luther, F.B. Kaufman, J. Hummel, C. Uzoh, and D.J. Pearson. 1995. Copper interconnection integration and reliability. *Thin Solid Films* 262(1-2):84-92.
- Davis Yevtte A. 2011. Transient behavior of light-emitting electrochemical cells. California, Naval Postgraduate School.
- Drandova Gergana I and Kenneth. D. Decker. 2010. TaN resistor reliability studies. 2010 CS MANTECH Technical Digest. 69-72.
- Espinete-González Pilar et al. 2015. Temperature accelerated life test on commercial concentrator III-V triple-junction solar cells and reliability analysis as a function of the operating temperature. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 23(5):559-569.
- Feilat, E. A. et al. 2000. Accelerated aging of high voltage encapsulated transformers for electronics applications. *Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, IEEE*, 1(00CH36347).
- Forrest. S. R. et al. 1988. Reliability of vapor-grown planar In_{0.53}Ga_{0.47}As. *IEEE electron device letters*, 9(5):217-219.
- Gan, C. L. and U, Hashim. 2013. Reliability assessment and activation energy study of Au and Pd-coated Cu wires post high temperature aging in nanoscale semiconductor packaging. *J. of electronic packaging*, 135(2).
- Gu, H. S. and Y. Itoh. 2010. Ageing behaviour of natural rubber and high damping rubber materials used in bridge rubber bearings. *Advances in Structural Engineering* 13(6):1105-1113.
- Hang, Chunjing et al. 2013. The effects of humidity and temperature aging test on flexible packaging LED module. 2013 14th International Conference on Electronic Packaging Technology IEEE.

- Hao, Jian et al. 2016. Comparison of lifetime predictions with LED lamps and light source modules in accelerated aging tests. 2016 17th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, IEEE.
- Hyun Sung Kim, Jeong Jik Yang, and Seo, Ji Won. 2022. Temperature Acceleration-Based Life Data Analysis and Acceleration Test Method for EPDM in High-Pressure Fuel System Sealing Materials for Fuel Cell Electric Vehicles. *Journal of Applied Reliability* 22(3):211-218
- Jin Dan et al. 2010. EO polymer modulators reliability study. *Organic Photonic Materials and Devices XII*, SPIE, 7599.
- Jung, D. S. 2011. Reliability Test Assessment Technique for Pressure Compensation Type Hydraulic Pump. *Journal of Applied Reliability*. 11(4):371-385.
- Jung, Jae Han et al. 2013. A Study on Accelerated Life Test of Halogen Lamps for Medical Device,” *Journal of Korean Society for Quality Management*. 41(4):659-672.
- Kim Hyun Sung, Yang Jeong Jik, and Seo Ji Won. 2022. Temperature Acceleration-Based Life Data Analysis and Acceleration Test Method for EPDM in High-Pressure Fuel System Sealing Materials for Fuel Cell Electric Vehicles. *Journal of Applied Reliability* 22(3):211-218
- Kim, H. M., Wi, S. H., and Lee, H. B. 2011. Life Prediction through Accelerated Life Test of Tire Pressure sensor. *Conference of the Korean Reliability Society*. 41-48.
- Kim, Hyun Cheol and Choi, Kyung Min. 2023. Development of Life Prediction Model and Accelerated No-Failure Test Method for Durability Test of Door Module Rear. *Journal of Applied Reliability* 23(3):256-260
- Kim, Iljung et al. 2022. Discovering Essential AI-based Manufacturing Policy Issues for Competitive Reinforcement of Small and Medium Manufacturing Enterprises. *Journal of Korean Society for Quality Management* 50(4):647-664.
- Kim, K. C. et al. 2020. Analysis of thermal characteristics and insulation resistance based on the installation year and accelerated test by electrical socket outlets. *Safety and health at work* 11(4):405-417.
- Kim, Minjun. 2023. Understanding of the Overview of Quality 4.0 Using Text Mining. *Journal of Korean Society for Quality Management* 51(3):403-418.
- Kim, S. H., Yeom, J. S., Baek, I. S., Kim, J. S., and Sung, S. I. 2020. Determining the Statistical Sample Size for Reliability Testing. *Journal of Applied Reliability* 20(1):84-9.
- Koh, S. W. et al. 2013. Product level accelerated lifetime test for indoor LED luminaires. 2013. 14th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, IEEE.
- Lakshminarayanan, V. and Sriraam, N. 2014. The effect of temperature on the reliability of electronic components. 2014 IEEE international conference on electronics, computing and communication technologies.
- Lee, G. H., Kim, H. G., and Kim, D. S. 2003. Study of the accelerated life test method for power train components under cyclic loads using Weibull-IPL (inverse power law) model. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 37122
- M, Yazdan Mehr et al. 2015. Accelerated reliability test method for optics in LED luminaire applications. 2015 16th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems. IEEE.
- M, Yazdan Mehr., Willem D. van Driel., and Zhang, G. Q. 2014. Reliability and accelerated test methods for plastic materials in LED-based products. 15th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, IEEE.
- Min, K. C., Yun, Y. G., and Kim, M. S. 2011. An Accelerated Life Test of LED Lights for Aviation Taxiway. *Journal of Applied Reliability* 11(2):127-140.

- N, Núñez et al. 2013. Evaluation of the reliability of high concentrator GaAs solar cells by means of temperature accelerated aging tests. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 21(5):1104–1113.
- Nelson, Wayne B. 2009. *Accelerated testing: statistical models, test plans, and data analysis*. John Wiley & Sons.
- Nikolic Valentino and Radek Polansky. 2020. Assessing the reliability of electrical insulating materials using accelerated aging tests. 2020 International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering, IEEE.
- Nogueira, Eduardo et al. 2009. Evaluation of AlGaInP LEDs reliability based on accelerated tests." *Microelectronics Reliability* 49.9(11):1240–1243.
- Paul Ellerman. 2012. Calculating reliability using FIT & MTTF: Arrhenius HTOL mode. *MicroNote* 1002.
- Qi Li, Sa Wu, and Qian Zhang. 2015. Design of reliability qualification test for an underwater electronic device based on Arrhenius formula. 2015 Prognostics and System Health Management Conference (PHM), IEEE.
- Shin, W. G. and Lee, S. H. 2008. A development of accelerated life test method for blower motor for automobile using inverse power law model. *International J. of Modern Physics B* 22.09n11 1074–1080.
- Son, J. H., Shim, J. S., Bae, Y. H., Kim, W. Y., Kim, J. J., and Kim, C. S. 2022. A Study on the Regression Analysis Method for Predicting the Automobile Door Latch using Minimum Extreme Value Distribution. *J. Korean Soc. Mechanical Engineers* 2310–2313.
- William Q. Meeker, Luis A. Escobar, and Francis G. Pascual. 2022. *Statistical methods for reliability data*. John Wiley and Sons.
- Yu, G. S., Lee, N. R., Yeo, Y. H., and Lee, B. C. 2015. Accelerated Life Prediction of the Rubber for Combat Boots. *J. of the Korea Academia-Industrial cooperation Society* 16(12):8637–8642.
- Zhang, C. et al. 2002. Bearing life prognosis under environmental effects based on accelerated life testing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C: J. of Mechanical Engineering Science*, 216(5):509–516.

저자소개

- 박현종** 경기대학교 산업경영공학과 학사, 경기대학교 산업시스템공학과에서 석사과정을 진행하고 있다. 주요 관심분야는 무기체계 수명주기관리와 가속시험 그리고 RAM-C 등이다.
- 김성준** 한양대학교 산업공학과에서 졸업하여 동 대학원에서 석사와 박사학위를 받고 Georgia Institute of Technology, H. Milton Stewart School of Industrial & Systems Engineering 박사후 연구원을 하였다. 이후 두산중공업 DATA 분석팀에서 재직하고 현재는 조선대학교 산업공학과 부교수로 재직중이다. 주 연구 분야는 품질공학과 신뢰성공학이다.
- 박범식** 현재 국방기술품질원 국방신뢰성연구센터에서 재직 중이다. 주요 관심 분야로는 무기체계 품질보증과 품질경영 등이다.
- 박소미** 현재 국방기술품질원 국방신뢰성연구센터에서 재직 중이다. 주요 관심 분야로는 무기체계 신뢰도 검증과 품질경영 그리고 통계적 품질관리 등이다.
- 성시일** 고려대학교 산업시스템정보공학과에서 졸업하여 동 대학원에서 석사학위를 받았으며, KAIST 산업 및 시스템 공학과 박사 학위를 받았다. 이후 삼성전자와 국방기술품질원에서 재직한 후, 인제대학교 산업공학과 교수를 마치고 현재는 경기대학교 산업시스템 공학과에 부교수로 재직 중이다. 주 연구 분야는 국방품질경영과 가속수명시험계획법 그리고 RAM-C 분석 등이다.