

# 고 신뢰성 확보를 위한 가속시험의 연구동향 분석 Research Results and Trends Analysis on Accelerated Testing for Ensuring High Reliability

김 종 곁\* · 송 정 무\*\*

Jong-Gurl Kim\* · Jung-Moo Song\*\*

## Abstract

제품의 신뢰성에 대한 소비자의 인식이 높아짐에 따라 기업에서는 높은 품질과 신뢰성 있는 제품을 만들기 위해 많은 노력을 하고 있다. 신뢰성은 기기, 부품, 재료 등 시스템이 규정된 조건하에서, 의도하는 기간 동안 규정된 기능을 고장 없이 수행할 수 있는 성질로 규정된다[1]. 높은 신뢰성의 확보를 위한 제품의 신뢰성 시험은 많은 시간과 비용이 소모되기 때문에 현대의 빠른 시장 흐름에 따라가지 못한다. 특히, 최근 기술발전 속도가 빨라지고 제품 수명주기(Life Cycle)와 개발 기간이 짧아지고 있는 추세에 있으므로 이에 대응할 수 있는 신속한 시험방법의 실시가 반드시 필요한 시점이다. 위와 같은 신뢰성을 갖는 제품의 시험의 한계를 극복하고 시험시간을 단축하기 위한 여러 가지 방법이 연구되어 왔고, 그 중 가속 시험(Accelerated Test)에 대한 필요성과 요구가 계속 증가하고 있는 추세다. 본 연구에서는 단순부품과 재료의 신뢰도 정보를 신속하게 얻는데 매우 유용한 신뢰성 시험방법 중에 하나인 가속시험의 연구동향과 적용 현황을 분석하고 이의 효과적인 적용과 활용방안을 모색 하고자 한다.

**Keywords** : 가속시험(Accelerated Testing), 가속수명시험(Accelerated Life Testing), 가속스트레스시험(Accelerated Stress Test), 초가속수명시험(Highly Accelerated Life Test), 가속열화시험(Accelerated Degradation Test), 초가속스트레스스크리닝(High Accelerated Stress Screening), Reliability

\* 성균관대학교 시스템경영공학과

\*\* 성균관대학교 산업공학과

## 1. 서 론

최근 소비자들의 생활수준의 향상에 따라 가격보다는 품질을 더 중요시하는 경향을 보이고 있고 이러한 소비자들의 요구사항을 위해 기업에서도 높은 품질과 신뢰성 있는 제품을 만들고자 항상 노력하고 있다. 특히, 정보화 사회가 고도화됨에 따라 더욱 복잡해지고 정밀해져가고 있는 제품들에 대한 신뢰성확보의 문제가 크게 대두되고 있다. 제품의 신뢰성은 가장 중요한 품질 특성 중 하나로, 신뢰성은 시간의 측면에서 본 품질로서 제품이 의도된 기능을 특정 조건 하에서 정해진 시간동안 만족스럽게 수행할 수 있는 능력으로 정의된다[17][18]. 이렇게 제품의 범위가 확대되고 모델이 다양화됨에 따라 기술개발로 인한 신규부품이 속출하고 있고, 좋은 부품이 공급되지 않으면 좋은 제품을 기대할 수 없으므로, 부품신뢰도의 확보는 매우 중요한 과제가 된다. 부품신뢰도의 확보방법 중 하나는 신뢰성시험을 통해 낮은 신뢰도 수준의 부품을 제거하는 것이다. 그러나 신뢰성시험에 허용되는 시간이나 시험설비의 제약과 시료수의 한계, 비용 등을 고려 해 볼 때, 좀 더 효과적으로 높은 신뢰성을 확보할 수 있는 신뢰성 시험기법이 필요하게 되었고, 이러한 필요성에 의해 정상사용조건보다 엄격한 조건에서 시험을 수행하는 가속시험이 등장하게 되었다.

가속시험(Accelerated Testing)이란 부품의 신뢰도가 높아질수록 길어지는 시험시간과 시료수의 증가 및 이로 인한 시험비용의 상승 문제를 극복하기 위해 인위적으로 부품의 수명을 단축시키는 시험방식을 말한다[2]. 오늘날 많은 부품들은 오랜 기간 동안 고장이 발생하지 않도록 설계되고 있다. 그러므로 사용조건에서 시험을 하는 경우에 긴 시간이 지나도 고장이 드물게 발생한다. 따라서 개발단계에서 짧은 기간에 부품에 대한 신뢰성을 평가하고 예측하는 것이 쉽지 않다. 이러한 경우에 부품의 신뢰도를 평가하고 예측하기 위해서 가속시험이 사용되고 있다. 가속시험에 대한 중요성이 날로 증가하고 있는데 이러한 이유는 급속한 기술발전과, 높은 신뢰도를 원하는 고객의 기대, 그리고 짧은 개발기간을 들 수 있다. 가속시험을 통해서 적은 시험비용으로 단기간에 부품에 대한 신뢰성평가를 수행 할 수 있다. 이러한 이유들로 인해 가속시험은 부품이나 재료의 신뢰성에 대한 적절한 정보를 얻기 위해 제조 산업에서 광범위하게 사용되고 있는 실정이다.

본 연구는 위와 같은 배경에 따라 가속시험에 대한 연구동향을 살펴보고, 이론체계를 정리함으로써, 향후 심도 있게 추진되어야 할 연구 분야를 제시하고, 가속시험의 활용 방안에 대한 연구 방향성을 제시하여 국내의 신뢰성 시험 수준을 향상하는데 기여하고자 한다.

## 2. 유관 논문 조사 방법

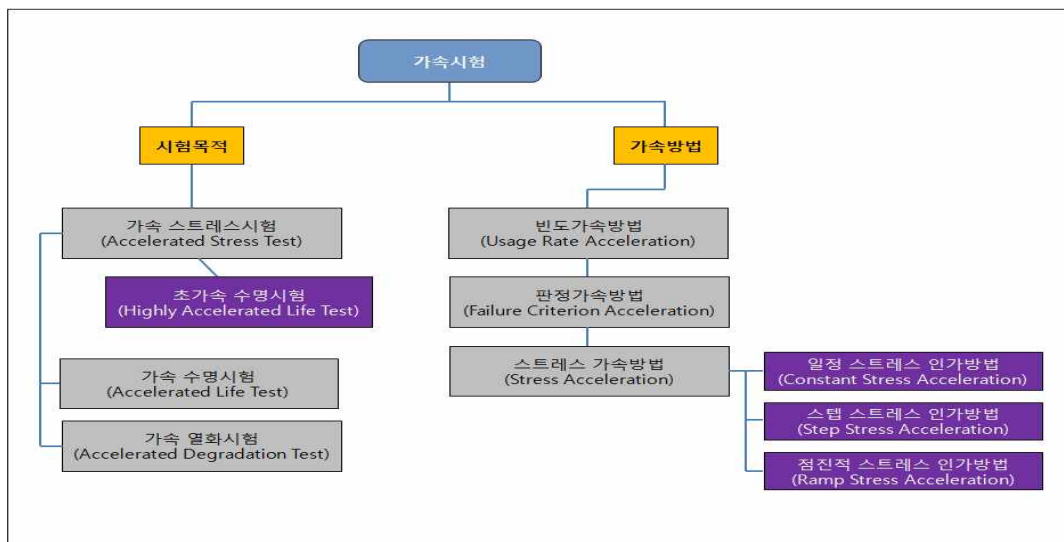
### 2.1 연구 영역

부품 또는 제품의 고 신뢰도 확보를 위한 가속시험기법의 연구 영역 중 본 논문에서는 가속수명시험과 가속스트레스시험, 가속열화시험의 연구 동향을 분석하고자 한다. 이 세 가속시험이 현재 제조 기업에서 널리 활용되고 있고 단순부품과 재료의 신뢰도 정보를 신속하게 얻는데 매우 유용한 신뢰성 시험방법 중에 하나이기 때문이다.

### 2.2 조사 방법

가속시험의 이론 체계와 연구동향을 정리하고자 NDSL을 포함한 총 9곳(Science Direct, IEEE Xplore, Emerald, Springer Link, DBPIA, Informaworld, ACM Digital Library, Wiley Inter Science, ASQ)의 논문검색 Web-Site에서 해외 유관 논문을 수집하였으며 주요 저널(Technometrics, Journal of the Royal Statistical Society, Journal of Quality Technology, Biometrika, Journal of the American Statistical Association)에 게재된 유관논문을 함께 참고 하였다. 이론 체계를 정리하고 자하는 작업이므로 최초 1950년대의 논문부터 현재까지의 논문들을 고루 조사 하였고, 중복이 되는 연구주제는 배제하였다.

## 3. 가속시험의 고찰



[그림 1] 가속시험의 분류

수명을 결정하는 시험시간을 단축시킬 목적으로 사용조건보다 가혹한 조건에서 수행하는 시험을 총칭하여 가속시험이라 한다[5]. 가속시험은 시험 목적에 따라 가속수명 시험 및 가속스트레스시험, 가속열화시험으로 구분할 수 있다.

최근 적용추세를 살펴보면 가속수명시험이 주로 활용되다가 시험시간을 더 단축하기 위해 복합 스트레스를 이용한 가속수명시험과 초가속스트레스시험이 더 많이 사용되고 있으며 더 나아가 제품의 열화자료를 이용한 가속열화시험이 적용되는 추세이다. 그리고 제품 생산 및 양산과정에서의 산포성 및 잠재결함을 체크하는 초가속스트레스스크리닝(High Accelerated Stress Screening)이라는 개념도 많이 사용하고 있다.

### 3.1 가속수명시험(Accelerated Life Test)

가속수명시험은 주로 부품 또는 간단한 어셈블리를 대상으로 하며, 전압, 온도, 진동 압력 등 제품의 수명에 큰 영향을 미치는 변수의 스트레스 수준을 실 사용조건 보다 높은 스트레스 수준에서 수명 데이터를 관측하고 이를 이용해 수명분포(대수정규, 와이블 분포 등)와 수명 스트레스 관계(아레니우스, 역거듭 제곱 등)를 분석하고, 이로부터 사용 조건에서의 수명을 추정하기 위한 시험이다[5]. 따라서 시험시간과 시료 수가 많을수록 통계적 추정치의 정밀도는 높아진다. 하지만 많은 시간과 시료는 현실적으로 제품 제조업체에서 적용하기에는 많은 부담이 되고 있다.

가속수명시험은 스트레스의 인가방법에 따라 일정형(constant stress ALT: CS-ALT)과 계단형(step stress ALT: SS-ALT), 그리고 점진적형(progressive stress ALT: PS-ALT)이 있다[6]. 일정형은 몇 개의 스트레스 수준을 선택하여 각 스트레스 수준에 적합한 시험품 수량을 할당하여 시험하는 방식이고, 계단형은 경우 모든 시험품을 낮은 단계의 스트레스 수준에서 시작하여 일정시간이 지난 후, 또는 일정 수의 고장 발생 후 고장 나지 않은 전 제품을 보다 높은 단계의 스트레스 수준으로 시험한다[6]. 점진형은 시간에 따라 스트레스 수준을 연속적으로 증가시키는 시험으로 선형적으로 증가하는 경사형(ramp stress ALT: RS-ALT)을 많이 이용한다[6].

### 3.2 가속스트레스시험(Accelerated Stress Test)

가속스트레스시험은 설계 및 제조단계에서의 가속시험으로 최소의 시간으로 설계 및 제조상의 결함을 찾아 제거하고 생산 이전에 설계상의 약점을 보완함으로써 신뢰성을 개선하며, 결함 없는 제품을 제조하는데 있다[3]. 가속스트레스시험은 초가속수명 시험(Highly Accelerated Life Test)으로 더욱 잘 알려져 있다. 초가속수명시험은 PCB(Printed Circuit Board), 어셈블리, 유닛(unit)에 사용조건보다 가혹한 스트레스를 인가하여 약점과 설계마진을 확인하여 강건설계(design ruggedization)를 하기 위해 사용된다[9]. Hobbs가 제안한 5가지 기본적인 시험방법이 있고 그 이후에도 많은 발전이 있어서 다른 종류의 방법들이 많이 생겨났다.

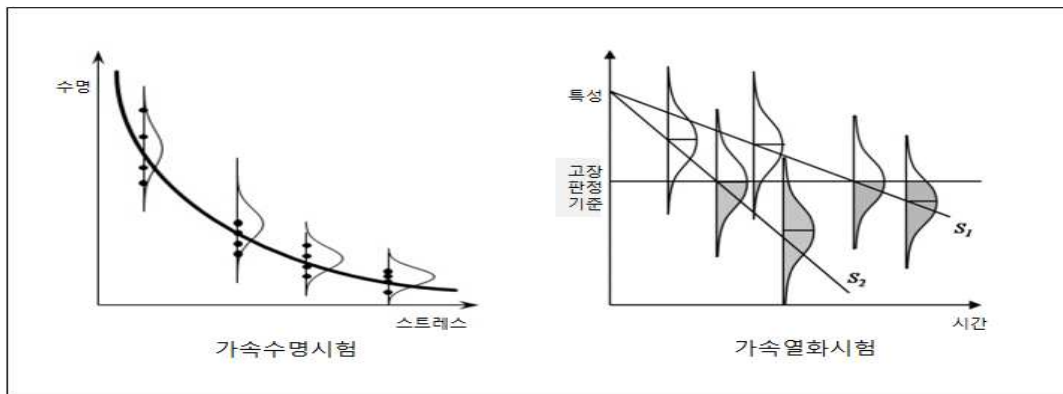
우리나라의 경우 1980년대 말 대학을 중심으로 가속수명시험에 대한 이론적 연구가 이루어졌고, 1990년대 초부터 현장 적용 및 교육이 이루어졌다. 초가속수명시험은 1990년대 말에 소개되어 현재 많은 기업에 활발히 적용되고 있는 추세이다.

초가속수명시험은 매우 빠른 시간에 설계 및 제조상의 결함을 찾아 제거함으로써 제품의 신뢰성을 개선할 수 있지만, 제품의 수명을 예측하지는 못한다. 따라서 기업의 보증 수명보다 지나치게 높은 설계마진을 확보함으로써 기업 측면에서 불필요한 비용과 시간이 소요될 가능성이 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해서는 초가속수명시험을 근거로 하는 적절한 수명 평가 방법이 필요한 실정이다.

[표 1] 가속수명시험과 초가속수명시험의 비교 [9]

시험 종류	가속수명시험 (Accelerated Life Test)	초가속수명시험 (Highly Accelerated Life Test)
시험 시간	장기(1,000 Hr 전후)	단기(단기)
시험 목적	고장률 및 수명 예측	한계 마진 평가를 통한 Week Point 검출
시료수	보통 40개 이상 목표 고장률, 가속 Factor 고장수, 신뢰 수준 고려	보통 6개
시험 대상	회로/기구 Unit Unit 별 시험/Set 시험 병행	주로 회로 Unit
적용 단계	개발 단계	개발 단계
시험 방식	가속 조건 (정상 사용 조건 이상 실시)	Step Stress 방식으로 조건 변화 (한계 까지)

### 3.3 가속열화시험(Accelerated Degradation Test)



[그림 2] 가속수명시험과 가속열화시험 [4]

수명시험과는 달리 열화시험에서는 수명에 관련된 성능특성치(performance characteristics)의 관측을 통해 열화자료를 획득한다. 이러한 열화자료는 다양한 열화 모형을 통해 정상 사용조건에서의 고장시간을 예측하는데 이용된다. 열화시험은 고장이 잘 발생되지 않는 고 신뢰도 제품의 신뢰성을 확인하고 보증하는데 유용하게 사용된다. 가속열화시험은 [그림 2]와 같이 가속수명시험과 같이 정상 사용조건보다 높은 스트레스 조건하에서 성능 특성이 시간에 따라 열화 되는 정도, 즉 열화량을 측정하여 시간에 따른 열화량 변화에 대한 모형(열화량 분포, 열화량의 시간과 스트레스에 대한 의존성)의 모수를 추정하고, 추정된 모형으로부터 정상 사용조건에서의 수명을 추정하는 시험방법이다[4].

가속열화시험에서 각 시험단위에 스트레스를 가하는 방법으로는 대체적으로 스트레스를 고장이 발생할 때까지 혹은 시험 종결시까지 고정적으로 가하는 일정스트레스 방법이 거의 사용되고 있다. 그리고 이용되는 수명분포로는 대수정규(lognormal)분포가 주로 사용되며 Weibull, 정규분포도 사용된다. 모수 추정방법으로는 주로 최우추정법(Maximum Likelihood Estimator ; MLE)이 널리 쓰이고 있다[8].

#### 4. 가속시험(Accelerated Testing)의 연구 영역

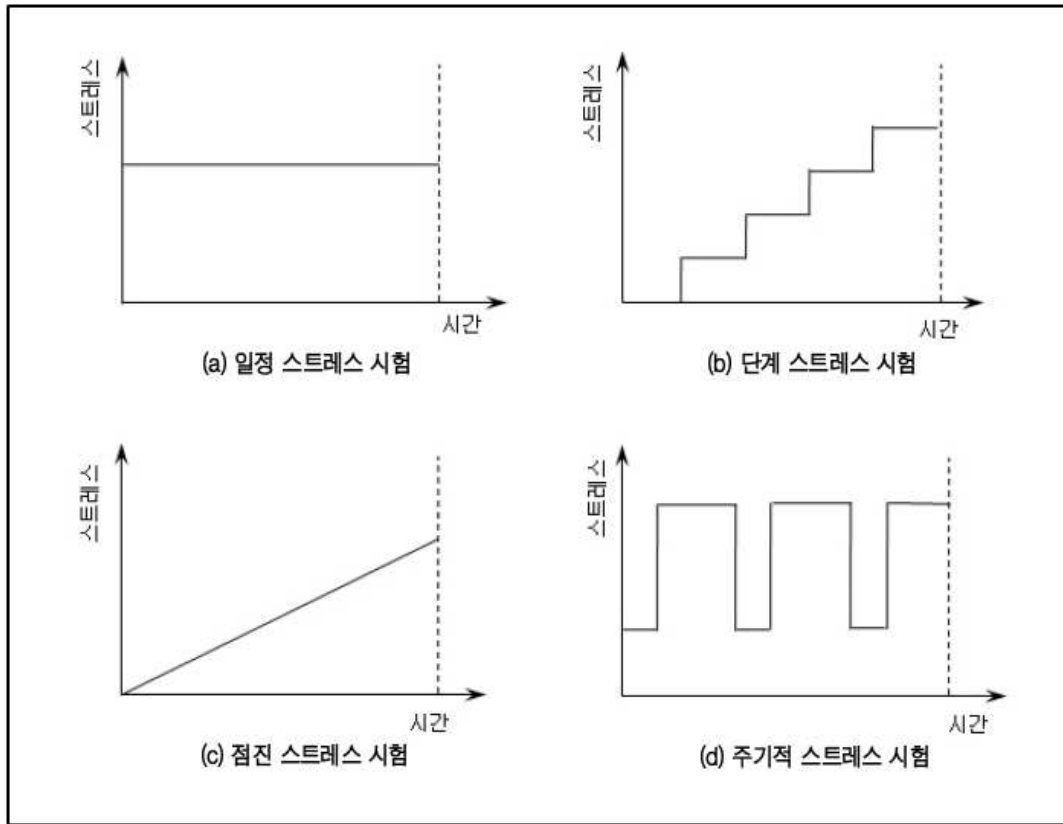
본 논문에서는 가속시험 관련 논문 중 대표적인 논문 60여 편을 조사하여 세 가속시험의 연구영역을 6가지로 분류 하여 조사하였다. 6가지 연구 영역은 다음과 같다.

1. 스트레스 가속방법에 관한 연구
2. 가속시험의 최적 설계에 대한 연구
3. 가속수명시험 데이터를 이용한 신뢰성 분석에 대한 연구
4. 수명 분포와 모형에 대한 연구

본 논문에서는 위의 각 영역의 대표적인 논문들을 조사하여 가속수명시험, 초가속수명시험, 가속열화시험의 동향을 정리하였다.

##### 4.1 스트레스 가속방법에 관한 연구

가속시험 방법의 종류에는 시험제품에 스트레스를 가하는 방법에 따라 사용 조건보다 높은 수준의 스트레스를 시간에 따라 변화시키지 않고 일정하게 가하는 일정한 스트레스 방법(Constant Stress Method), 시간에 따라 단계적으로 변화시키는 단계 스트레스 방법(Step-Stress Method), 그리고 시간에 따라 연속적으로 증가시키는 방법(Progressive Stress Method) 등이 있다.



[그림 3] 4가지 스트레스 부과방법 [5]

일정한 스트레스시험 방법에 대한 연구는 Chernoff(1962)를 시작으로, Singpurwalla(1972), Nelson(1982) 등에 의해 연구되었으며, 단계스트레스 방법은 DeGroot와 Goel(1976), Nelson(1986), Shaked와 Singpurwalla(1978), Miller와 Nelson(1984), Bai(1986) 등에 의해 연구되었으며, 연속적으로 증가시키는 스트레스 방법은 Endicott와 Zoellner(1977) Yin과 Sheng(1982) 등에 의해 연구되어 DeGroot와 Goel(1976)이 사용 조건에서 시험을 시작하여 높은 시험 수준으로 스트레스를 증가시키는 시험 방법에서 추정 방법과 스트레스를 변경시키는 시점을 베이지안 접근 방식으로 다루었고, Nelson(1989), Shaked와 Singpurwalla(1988)는 다 단계 스트레스 시험에서의 데이터 분석에 대하여 연구 되었다. Hobbs(1999) 등에 의하여 복합가속시험에 대한 연구가 진행되었다[21].

## 4.2 가속시험의 최적 설계에 대한 연구

### 4.2.1 통계적인 설계방법에 대한 연구

신뢰성 시험에 있어서 시료의 크기나 시험시간과 같은 설계인자들을 결정하기 위한 대표적인 방법이 통계적인 방법이다. 설계인자들을 통계적으로 최적화하기 위해서는 기본적인 가

정과 제약조건들이 요구된다. 시료의 크기를 최적화하기 위해 시험시간이 기본적인 가정이 되기도 하고, 시험시간을 최적화하기 위해서는 시료의 크기가 기본 가정이 되기도 한다[7].

Yum과 Kim(1990)은 가속수명시험을 위한 샘플링 방식에 대한 연구로 지수분포에 기초하여 두 수준에서 시험하는 샘플링 검사방식을 연구하였다[46]. Bai(1991) 등은 와이블분포와 대수정규분포에 기초한 두 수준 가속수명시험샘플링검사방식을 연구하였고, 각 스트레스 수준에서의 시험 종료시점의 기댓값이 동일하도록 하는 샘플링 방식도 제안하였다[13]. 한편, 가속열화시험을 위한 샘플링 방식에 대한 연구도 진행되었는데 Sohn과 Jang(2001)이 가속열화시험에 있어서 계수치에 의한 합격판정 샘플링 방법을 제안하기도 했다[34]. Boulanger와 Escobar(2004)는 열화량의 확률분포를 찾아서 사용조건하의 분위수의 점근적 분산을 이용하여 가속열화시험을 설계하는 연구를 진행하였다[15]. 가속열화시험과 대응되는 가속수명시험 계획을 직접 설계하는 연구되었고, 박종인(1993), 이낙영(1995), 최규명&이낙영(1996)은 열화된 성능자료를 이용해서 가속열화시험을 설계하는 연구를 진행하였다[8][11][12].

추정치에 분산을 최소화하는 방식은 주로 가속수명시험의 설계에 사용되었다. 관측중단이 있는 두 수준의 일정형스트레스의 가속수명시험에서 Nelson과 Kielpinski(1976)은 대수정규분포인 경우에[31], 그리고 Nelson과 Meeker(1987)는 와이블분포인 경우에 대한 추정치의 점근분산을 최소로 하는 스트레스 수준과 제품의 비율을 결정하였다[32].

Meeker(1984)는 표준화된 스트레스 수준과 설계 특성값을 정의하고, 시험수준의 수가  $k=3$ 인 경우에 사용조건에서 제 10백분위수의 최우추정량의 점근분산을 최소화하는 최량표준시험방법을 와이블분포와 대수정규분포의 각 경우에 대해서 표로 제시하였다[27]. Meeker와 Hahn(1985)은 시간외삽을 고려하여 4 : 2 : 1 할당비 시험방법을 제안함과 동시에 스트레스외삽과 시간외삽을 동시에 고려한 조정된 4 : 2 : 1 할당비 시험방법을 제안하였다[28].

Yum과 Choi(1989)와 Seo와 Yum(1991)은 시험제품의 고장관측이 시간에 따라 연속적으로 이루어지지 못하고 간헐적 또는 주기적으로 이루어지는 경우의 일정형 가속수명시험방법을 제안하였다[45][33]. Bai와 Chung(1991)은 제품수명이 지수분포를 따르는 경우의 가속수명시험의 설계에 대해서 다루었으며[13], Barton(1991)은 사용조건에서의 평균수명의 최우추정량의 분산에 대한 제약하에서 높은 시험수준을 최소화하는 시험계획을 제안하였다[14]. 그리고 Meeter와 Meeker(1994)는 와이블분포의 형상모수가 스트레스 수준에 영향을 받는 경우의 최적시험설계방법을 제안하였다[29].

가속열화시험의 설계의 문제에 있어서 추정치의 점근분산을 최소화하는 샘플크기와 관측시간을 결정하기 위한 연구는 Boulanger와 Escobar(1994), Yu와 Tseng(1999)에 의하여 수행되었으며[15][43], 특히 Boulanger와 Escobar(1994)는 신뢰구간을 이용한 방식의 변형으로서 추정치 오차의 상대적 비율에 따라 샘플크기를 결정하는 방법도 제안하였다[15]. Yu(2003), Li와 Kececioglu(2004)에 의하여 추정치의 평균제곱오차를 점근분산을 최소화하는 설계방법들이 연구되었다[41][22].

통계적인 시험 설계방법들은 일반적인 신뢰성 시험, 가속수명시험 그리고 가속열화시험에 걸쳐 많은 연구가 되었으나, 그 방법을 실무에 적용하기에는 너무 이론적이면서 어렵기 때문에 기업에서 활용이 되지 못하고 있다.



#### 4.2.2 경제적인 설계방법에 대한 연구

경제적인 설계방법은 평가비용의 제약 하에서 평가에 소요되는 평균 비용의 목적함수를 최소화하거나 추정치의 분산에 대한 목적함수를 최소화하기 위한 방법이다. 주로 가속수명시험과 가속열화시험에 대한 연구가 진행되었다.

가속수명시험을 위한 경제적 설계방법에는 Chernoff(1962)는 수명분포가 지수분포인 경우에 비용이 평균수명에 비례할 경우의 최적화 방법을 연구하였다[16]. 윤원영과 박한석(1994)은 지수분포를 가정하고 일정형 스트레스의 가속수명시험을 최적화하여 관측중단시점을 결정하였다[10].

가속열화시험의 경우, Yu와 Tseng(2002)은 생산자위험과 소비자위험을 동시에 만족시키기 위한 비용의 최적화 방법을 제안하였고[44], 이 문제를 비선형 정수계획법에 의하여 최적화하는 연구를 Yu(2002)가 발표하였다[42]. 시험시간, 검사회수와 시료수를 결정하기 위하여 Tang과 Yang(2004)는 최우추정량의 점근추정치에 대한 분산을 최소화하기 위한 평가 비용의 최적화 문제를 해결하였다[35]. 또한 평가비용의 제약 하에서 추정치의 분산에 대한 목적함수를 최소화하기 위한 방법은 Yu와 Tseng(2002)이 연구하였다[44]. Wu와 Chang(2002)은 비선형 혼합 정수계획법을 이용하여 평가 비용의 제약 하에서 점근적 분산을 최소화하기 위한 시험을 설계하여 시험시간, 검사회수와 시료수를 결정하였다[38].

이러한 경제적 설계 방안은 목적함수와 제약식을 구성하기 위하여 가정되는 상황이 발생하고, 현실적으로 소요되는 비용 산정에 어려움이 있어 모델링에 한계가 있다. 또한 모델링 문제의 해법을 찾는 것 역시 통계적인 설계방법과 마찬가지로 너무 이론적이어서 실무적용이 쉽지 않다.

#### 4.3 가속수명시험 데이터를 이용한 신뢰성 분석에 대한 연구

가속시험은 제조업에서 넓게 사용되고 있으며, 주로 소재와 컴포넌트의 신뢰성에 관한 정보를 얻기 위해 이용된다. 일반적으로 높은 스트레스 수준에서 시험된 제품의 특성치 정보를 가지고 사용수준의 스트레스에서 제품의 수명이나 성능을 추정한다. 가속시험의 결과는 컴포넌트와 하부시스템의 신뢰성을 분석하고 고장모드를 찾으며 다른 제조업체의 제품과 비교하는 등의 제품 신뢰성 설계과정을 평가하는데 사용된다. 다음으로 가속수명시험 데이터를 이용한 신뢰성 분석을 연구한 내용들을 정리해 보았다.

Tyoskin와 Krivolapor(1996)은 단계 스트레스 가속시험 데이터로부터 예측 할 수 있는 비모수 접근방법을 연구하였다[36]. Meeker와 Escobar(1993)은 다양한 가속시험의 최적시험계획을 조사했고[25], Yang(1994)은 일정 스트레스 가속수명시험에서 스트레스를 4수준으로 하는 최적 시험계획을 연구하였다[40]. Watkins(1991)은 Nelson(1990)의 내용을 확장한 가속수명시험의 실험의 분석을 다루고 근사값을 구하는 수치 기법의 접근방법을 시도하였다[37][30].

Xiong와 Milliken(1999)는 스트레스 변화시간이 임의로 진행되는 경우에 그 스트레

스가 어떤 분포에 따라 변할 때, 단계 스트레스 가속시험에 의한 수명기간 분포를 고려한 연구를 진행하였다[39]. Ginebra와 Sen(1998)은 가속시험설계에서 대수정규와 와이블분포의 모수 추정에 최소최대 방법을 적용하였다[19].

McLinn(1998)는 다 수준 가속시험 분석방법을 개선하기 위한 6가지의 다 수준 가속시험에서 나타날 수 있는 문제점과 다 수준 가속시험을 실시하는데 필요한 12가지 기본규칙을 제안하고 있다[24].

Meeker와 Escobar(1998)은 가속시험을 하는 데에 주요하게 생각하여야 할 9가지 함정중 하나는 제품정보가 정확하게 구분되지 않는다는 것이고, 다른 하나는 사용현장의 신뢰성을 예측하는데 가속시험을 사용하기가 어렵다는 것을 기술하였다[26]. McLinn(1998)와 Meeker와 Escobar(1998)는 가속수명시험을 할 경우 주의해야 할 사항들을 연구하고 있고 내용은 다음 [표 2]와 같다[24][26].

[표 2] 단계 스트레스 가속 수명시험에서 고려되어야 할 사항 [24][26]

가속시험에서 고려되어야 할 사항
사용 환경 조건과 같은 조건에서의 고장이 발생되지 않기 때문에 고장모드가 정확히 인지되지 않는다.
통계적 방법을 적용한 고장정보의 점추정치만 가지고는 제품의 고장을 정확히 알 수가 없는 불확실성이 있다.
여러 시간척도와 다 요인에 의해 열화가 발생한다는 것을 간과하고 있다.
고장모드가 정확하게 밝혀지지 않는 사용현장 조건의 데이터가 기록되기 때문에 단일 고장모드라고 가정 할 수는 없다.
가속시험의 정보는 다른 동일하거나 비슷한 제품별 결함 비교의 자료로 이용되어야 한다.
제품 사용조건에서의 환경은 어느 하나의 인자로만 주어지지 않는다. 실험실에서 수행되는 시험은 온도가 올라갈수록 습도는 낮아지게 된다. 따라서 두 인자를 다 관리되는 시험조건을 맞추어야 한다.
제품의 특성을 시험을 통해 알아보지 않고 설계와 생산의 변화를 기하지 마라.
가속 시험 후 주어진 정보를 가지고 만들어진 시제품의 특성을 생산의 모든 과정에 적용할 수 없다.
사용현장의 신뢰성을 분석하기 위해 가속 수명시험을 이용하는 것은 어렵다. 만병통치약은 아니다.

#### 4.4 수명 분포와 모형에 대한 연구

정규분포나 대수 정규분포를 따르는 경우에 대하여 Nelson과 Kielpinski(1976)는 중도 절단 데이터에 대해, 정규분포나 대수 정규분포를 따르는 제품의 평균수명과 스트레스 단순 선형 관계(simple linear relationship)를 추정하기 위한 최적 가속 수명 설계 방법을 제시하였는데, 최우추정법(maximum likelihood estimation)을 사용하여 회귀직선의 파라미터를 추정하였다[31].

다음으로 모형에 대한 연구를 살펴본다. 먼저 사용 온도에 대한 Arrhenius 모형에 대하여 Nelson(1990)은 컴퓨터 데이터이고 Arrhenius-lognormal 모형을 따르는 가속 수명 데이터에 대하여 그래픽 방법과 최소제곱법을 Class-H insulation 데이터를 가지고 설명하였는데, Arrhenius 모형의 파라미터의 추정치와 신뢰구간을 구하고, 모형과 데이터에 대한 가정에 대하여 여러 가지 진단 방법과 문제점을 자세히 설명하였다[30].

Mann, Schafer와 Singpurwalla(1974)는 Arrhenius, 파워 룰 모형 등 여러 가지 수명-스트레스 관계 모형에서의 모수적 추정 방법과 비모수적 추정 방법을 제시 하였으며[23], Härtler(1986)는 고장 분포가 지수분포를 따를 때 Arrhenius 모형에 대한 구간 추정 절차와 그에 따르는 시험 계획법을 제시하였다. 이때 추정 절차는 최소 제곱 회귀분석을 따르는 고장률에 대하여 수정된 최우추정법을 적용하는 두 단계 절차를 따른다[20].

### 5. 결 론

최근의 연구 동향을 살펴보면 더욱 높은 수준의 스트레스 시험을 함으로서 수명시간의 분포에 대해 좀 더 빠르게 정보를 획득하고 좀 더 일찍 고장을 파악하기 위한 연구가 많이 이루어지고 있다. 이는 급속한 기술발전과, 높은 신뢰도를 원하는 고객의 기대, 그리고 짧은 개발기간에 따라 신뢰성 시험에서 가속시험의 필요성이 증대되고 있다는 것을 의미한다.

가속시험의 통계적인 설계나 경제적인 설계에 있어 현실적으로 소요되는 비용 산정에 어려움이 있어 모델링에 한계가 있고, 모델링 문제의 해법을 찾는 것 너무 이론적이어서 실무적용이 쉽지 않은 문제점도 가지고 있다. 이와 함께 대부분의 연구는 단일 스트레스에 대한 가속시험의 적용 및 개선 연구가 많았다. 하지만 복합 스트레스를 적용한 가속시험에 대한 연구는 많이 미흡한 상태이다. 실무에서는 복합 스트레스에 대한 가속수명이 필요한 상황이며 이를 위해 복합 스트레스를 적용한 가속수명시험설계에 대한 연구가 활발히 진행되어야 될 필요성이 있다.

초가속수명시험은 매우 빠른 시간에 설계 및 제조상의 결함을 찾아 제거함으로써 제품의 신뢰성을 개선할 수 있지만, 제품의 수명을 예측하지는 못하는 단점이 있다. 이로 인해 기업의 보증 수명보다 지나치게 높은 설계마진을 확보함으로써 기업 측면에서 불필요한 비용과 시간이 소요될 가능성이 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해서는 초가속 수명시험을 근거로 하는 적절한 수명 평가 방법에 대한 연구도 진행되어야 할 것이다.

## 6. 참 고 문 헌

- [1] 강원호, 초가속수명시험과 Virtual Qualification을 통한 자동차용 공조제어장치의 수명 예측, 한양대학교, 석사학위논문, 2007.
- [2] 기형의, 장무성, “기계류 부품의 가속시험 방법론” 대한기계학회, 2009.
- [3] 김동철, 신뢰성 보증시스템에 관한 연구, 성균관대학교, 박사학위논문, 2006.
- [4] 김재중, 가속수명시험과 사례, 기계저널, 2009.
- [5] 김정현, 초가속수명시험에 의한 자동차 전장용 부품의 고장 메커니즘 연구, 아주대학교 산업대학원, 석사학위논문, 2009.
- [6] 김종근, 가속수명시험을 이용한 최적 번인 기간 결정, 창원대학교, 석사학위논문, 2009.
- [7] 박부희, 유효성 평가에 의한 효과적인 신뢰성 시험 설계, 아주대학교, 박사학위논문, 2008.
- [8] 박종인, 가속열화시험의 최적설계 및 가속수명시험과의 비교에 관한 연구, 한국과학기술원, 석사학위논문, 1993.
- [9] 송병석, 조재립, “초가속수명시험(HALT) 및 고장분석을 이용한 송풍기제어 모듈의 신뢰성 향상에 관한 연구” 한국부식 방식학회, 2005.
- [10] 윤원영, 반한석, “일정스트레스 가속수명시험의 경제적 설계”, 한국경영과학학회, 1994.
- [11] 이낙영, “Optimum Design of Accelerated Degradation Tests for Lognormal Distribution,” 품질경영학회지, 1995.
- [12] 최규명, 이낙영, “Optimum Design of Accelerated Degradation Tests for Weibull Distribution” 품질경영학회지, 1996.
- [13] Bai, D. S., Chung S. W., “An Optimal Design of Accelerated Life Test for Exponential Distribution”, Reliability Engineering & System Safety, 31, pp.57-64, 1991.
- [14] Barton, R. R., “Optimal Accelerated Life-Time Plans That minimize the Maximim Test-Stress”, IEEE Trans. On Reliability, 40, 166-172a, 1991.
- [15] Boulanger, M., Escobar, L. A., “Experimental Design for a Class of Accelerated Degradation Tests”, Technometrics, Vol.36, pp.260-272, 1994.
- [16] Chernoff, H., “Optimal Accelerated Life Designs for Estimation”, Technometrics, Vol.4 , pp.381-408, 1962.
- [17] Condra, L. W., Reliability Improvement with Design of Experiments, Marcel Dekker, Inc. 1993.
- [18] Fuqua, N. B., Reliability Engineering for Electronic Design, Marcel Dekker, Inc. 1987.
- [19] Ginebra, J., Sen, A., “Minimax Approach to Accelerated Life Tests”, IEEE Transactions on reliability, Vol. 47, No. 3, pp261-278, 1998.
- [20] Härtler, G., “Parameter Estimation for the Arrhenius Model,” IEEE Trans. Reliability, Vol.35, 1986.
- [21] Hobbs, Gregg K. Accelerated Reliability Engineering : HALT and HASS, John

- Wiley & Sons LTD, NY, pp.31-74, 1999
- [22] Li, Qishan., Kececioglu, D. B., "Optimal Design of Accelerated Degradation Tests.", *International Journal of Materials and Product Technology*, Vol.20, pp.73-90, 2004.
- [23] Mann, N R., Schafer, R. E., and Singpurwalla, N. D., *Methods for Statistical Analysis of Reliability and Life Date*, Wiley, New York, 1974.
- [24] McLinn, J., "Ways to Improve the Analysis of Multi-Level Accelerated Life Testing", *Quality and Reliability Engineering International*, 14, pp393-401, 1998.
- [25] Meeker, W., Escobar, L., "A Review of Recent Research and Current Issues in Accelerated Testing", *International Statistical at Review*, pp147-168, 1993.
- [26] Meeker, W., Escobar, L., "Pitfalls of Accelerated Testing", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 47, No. 2, pp114-118, 1998.
- [27] Meeker, W. Q., "A Comparison of Accelerated Life Test Plans for Weibull and Lognormal Distribution and Type I Censoring", *Technometrics*, Vol.26, pp.157-171, 1984.
- [28] Meeker, W. Q., Hahn, G. H., "How to plan an Accelerated Life Test Some Practical Guidelines", *The ASQC Basic References in Quality Control*, Vol.10, 1985.
- [29] Meeter, C. A., Meeker, W. Q., "Optimal Accelerated Life Tests with a Nonconstant Scale Parameter", *Technometrics*, Vol.36, pp.71-83, 1994.
- [30] Nelson, W., *Accelerated Testing - Statistical Models, Test Plans, and Data Analyses*, New York ; John Wiley. 1990.
- [31] Nelson, W., Kielpinski, T. J., "Theory for Optimum Censored Accelerated Life Tests for Normal and Lognormal Life Distributions", *Technometrics*, Vol.18, pp.105-114, 1976.
- [32] Nelson, W., Meeker, W. Q., "Theory for Optimum Accelerated Censored Life Tests for Weibull and Extreme Value Distributions." *Technometrics*, Vol. 20, 171-177, 1987.
- [33] Seo, S. K., Yum, B. J., "Accelerated Life Test Plans under Intermittent Inspection and Type I Censoring: The Case of Weibull Failure Distributions", *Naval Research and Logistics*, Vol.38, pp.1-22, 1991.
- [34] Sohn, S. Y., Jang, J. S., "Acceptance Sampling Based on Reliability Degradation Data", *Reliability and System Safety*, 2001.
- [35] Tang, L. C., Yang, G. Y., Xie, M., "Planning of Step-stress Accelerated Dgradation test", *Reliability and Maintainability*, 2004
- [36] Tyoskin, O., Krivolapov, S., "Non-parametric Model for Step-Stress Accelerated Life Testing", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 45, No. 2, pp346-350, 1996.
- [37] Watkins, A., "On the Analysis of Accelerated Life-Testing Experiments", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 40, No. 1, pp98-101, 1991.
- [38] Wu. S. J., Chang, C. T., "Optimal Design of Degradation Tests in Presence of Cost Constraint", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol.76, pp.109-115, 2002.

- [39] Xiong, C., Milliken, G., "Step-Stress Life-Testing With Random Stress-Change Times For Exponential Data", IEEE Transactions on Reliability, Vol. 48, No. 2, pp141-148, 1999.
- [40] Yang, G., "Optimum Constant-Stress Accelerated Life-Test Plans", IEEE Transactions on Reliability, Vol. 43, No. 4, pp575-581, 1994.
- [41] Yu, H. F., "Optimal selection of the most reliable design whose degradation path satisfies a Wiener process", The International Journal of Quality & Reliability management, Vol.20, Issue 9, pp.1084-1095, 2003.
- [42] Yu, H. F., "Optimal Selection Of The Most Reliable Product With Degradation Data", Engineering Optimization, Vol.34, No.6, pp.579-590, 2002.
- [43] Yu, H. F., Tseng S.T., "Designing a Degradation Experiment", Naval Research Logistics, Vol.46, pp.689-706, 1999.
- [44] Yu, H. F., Tseng S.T., "Designing a screening experiment for highly reliable products", Naval Research Logistics, Vol.49, Issue 5, pp.514 - .526, 2002.
- [45] Yum, B. J., Choi, S. C., "Optimal Design of Accelerated Life Tests under Period Inspection", Naval Research Logistics Quarterly, Vol.36, pp.770-795, 1989.
- [46] Yum, B. J., Kim, S. H., "Development of Life-Test Sampling Plans for Exponential Distribution Based on Accelerated Life Testing", Communications in Statistics-Theory and Methods, Vol.17, pp.2735-2743, 1990.

## 저 자 소 개

### 김 종 결

서울대학교 계산통계학에서 석사  
 한국과학기술원 산업공학과에서 박사학위  
 현재 한국품질보증/PL 연구회 회장으로 활동  
 성균관대학교 시스템경영공학과 교수로 재직

주소:경기도 수원시 장안구 천천동 300번지 성균관대학교 시스템경영공학과 27416호

### 송 정 무

남서울대학교 산업공학과를 졸업  
 현 성균관대학교 산업공학과 석사재학  
 관심분야: 신뢰성공학, 통계적 공정관리

주소:경기도 수원시 장안구 천천동 300번지 성균관대학교 시스템경영공학과 26418B호