

2006년 이후 발표된 가속수명시험 계획에 관한 문헌 연구

성 시 일[†]

국방기술품질원

A Review on the Accelerated Life Test Plan: 2006~2015

Si-Il Sung[†]

Defense Agency for Technology and Quality

Accelerated life tests are widely used to evaluate the product reliability within a reasonable amount of time and cost. This article provides literature review about accelerated life test plans between 2006~2015. The literature on planning accelerated life tests are reviewed with respect to the test scenario, assumed accelerated model and estimation method and optimization criteria. Finally, recommendations for the future research are presented.

Keywords: Accelerated Life Test, Test Scenario, Accelerated Model, Optimization Criteria

1. 서론

제품의 개발 주기는 현대 사회의 치열한 시장 경쟁에 맡겨져 있어 과거에 비해 더욱 짧아지고 있다. 이러한 상황에서 개발 중인 제품에 사용 조건의 스트레스 수준을 인가하는 수명시험을 적용하는 것은 시간의 측면에서 비현실적이다. 따라서 사용 조건보다 가혹한 스트레스 조건에서 시험하여 상대적으로 빠른 시간에 신뢰성 정보를 획득할 수 있는 가속시험(accelerated test)이 자주 사용되고 있다. 이러한 가속시험은 가속수명시험(accelerated life test)과 가속열화시험(accelerated degradation test)으로 나눌 수 있다. 가속수명시험은 제품의 고장을 관측하여 신뢰성 정보를 획득하는 시험 방법이며 가속열화시험은 제품의 수명과 밀접한 관계가 있는 특성치를 선정하여, 선정된 특성치의 열화량을 관찰함으로써 제품의 수명을 추정하는 방법이다. 가속열화시험의 경우 특성치의 열화량을 측정하기 어려우며, 열화량의 측정에 많은 비용이 소모되는 단점이 있다. 반면, 가속수명시험의 경우 고장 관측이 특성치의 열화량을 측정하는 것보다 상대적으로 쉬우며 적은 비용이 소모되는 장점이 있다.

Nelson(2005a, 2005b)은 2005년 159편의 가속시험 계획에 관한 문헌 정리를 제시하고 있으며 Yum *et al.*(2007)은 22편의 열화 및 가속열화시험 계획 문헌에 대해 심도 있는 정리를 제공하고 있다. 하지만 2005년 발표된 Nelson(2005a, 2005b)의 문헌 이후로 약 10여 년 동안 가속수명시험 계획을 정리한

문헌이 발표되지 않고 있으므로, 이 연구에서는 이에 대한 정리를 제공하고자 한다.

이 연구의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 가속수명시험 계획 문헌을 시험 상황(test scenario), 가속 모형(accelerated model) 그리고 추정 및 최적화 방법(estimation method and optimization criteria)의 3가지 분류 기준으로 나누고 각 범주에 따른 세부 분류 기준을 소개한다. 제 3장에서는 2006년 이후 발표된 23편의 영문 문헌을 각 범주별 세부 분류 기준으로 정리한 결과를 제시하며, 마지막으로 제 4장에서는 결론 및 향후 연구 방향을 제안한다.

2. 가속수명시험 계획 문헌의 분류 기준

가속수명시험 계획 문헌은 다음과 같이 크게 3가지로 나눌 수 있다. 우선 가속수명시험을 계획하기 위해서는 시편에 어떠한 방식으로 스트레스를 인가할 것인지 그리고 몇 개의 스트레스 변수를 사용할 것인지 등을 포함한 시험 상황을 결정해야 한다. 이렇게 시험을 진행해야 하는 상황을 하나의 범주로 고려할 수 있다. 두 번째로 가속수명시험은 사용 조건보다 가혹한 스트레스를 인가하는 시험 방법이므로, 가혹한 조건에서 얻은 시험 자료를 적절하게 가공하지 않을 경우 사용 조건의 수명을 추정할 수 없다. 따라서 가속 조건에서 얻은 자료를 처리하기 위해 수명 분포, 스트레스-모수 관계 그리고

[†] 교신저자 siil0710@dtq.re.kr

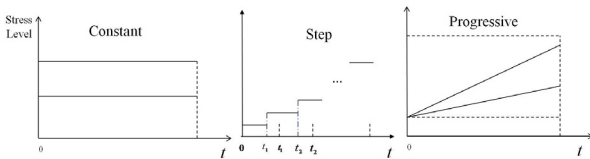
2015년 3월 26일 접수; 2015년 5월 23일 수정본 접수; 2015년 5월 25일 게재 확정.

누적효과 모형이 필요하며 이러한 모형들을 가속 모형이라는 범주로 고려할 수 있다. 마지막으로 효율적인 시험 계획을 선택하기 위한 최적화 기준들이 필요한데 이를 추정 및 최적화 방법이라는 범주로 간주할 수 있다. 이 장의 제2절에서는 시험 상황을 소개하고, 제2절에서는 가속 모형 그리고 제3절에서는 추정 및 최적화 방법의 세부적인 분류 기준을 소개한다

2.1 시험 상황

시험 상황의 세부 분류 기준은 1) 스트레스 인가 방법(stress loading method)과 2) 스트레스 변수의 수, 3) 고장을 관측하는 방법(inspection method) 그리고 4) 관측을 중도절단(censoring) 하는 방법으로 구성된다

우선 스트레스 인가 방법은 일반적으로 일정형(constant), 계단형(step) 그리고 점진형(progressive)이 사용된다(<그림 1> 참조). 일정형 인가 방법은 시험 시작 시점부터 종료 시점까지 시험(test unit)에 일정하게 스트레스를 인가하는 방법이고 계단형 인가 방법은 시험 시작 후 일정 시간 동안 동일한 수준의 스트레스를 인가하다가 특정 시점에서 인가하는 스트레스 수준을 증가시키는 방법이다. 다음으로 점진형 인가 방법은 시험 시작 시점부터 종료시점까지 스트레스를 계속 증가시키는 방법이다. 이 때 스트레스 증가율이 일정할 경우에는 램프(ramp)형 시험이라고 부른다. 추가적으로 일정형 혹은 계단형 인가 방법이 적용된 시험 계획에서 시험에 인가되는 스트레스 수준 중 하나를 사용 조건으로 설정하고 시험하는 방법이 있는데 이를 부분가속시험(partially accelerated test)이라고 부른다.

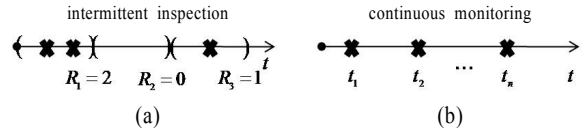


<그림 1> Stress Loading Method

다음으로 시험에 사용하는 스트레스 조건의 수를 분류 기준으로 고려할 수 있다. 오늘날 제품의 신뢰성이 향상됨에 따라 하나의 스트레스 조건으로는 가속시험을 수행해도 고장이 관측되지 않는 경우가 종종 발생하기 때문이다. 이러한 때에는 좀 더 빠른 시간에 고장을 관측할 수 있도록 시험에 여러 종류의 스트레스(예: 온도, 습도를 동시에 가속하게 인가)를 동시에 인가할 수 있다.

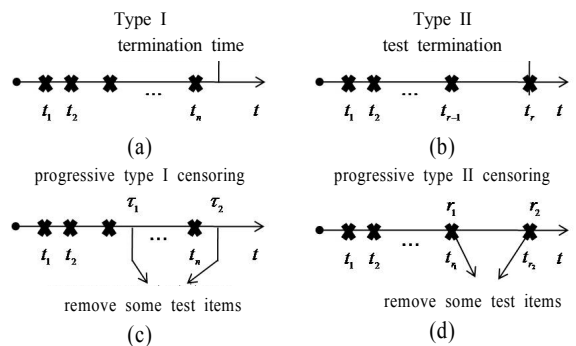
세 번째로 고장을 관측하는 방법을 분류 기준으로 채택할 수 있다. 일반적으로 가속시험은 시험을 시험 장비(chamber)에 장착하고 스트레스를 인가한다. 센서 등을 통해 시험 중인 시험편의 고장 유무를 실시간으로 확인할 수 있는 경우가 아니라면 시험편의 고장 유무를 확인하기 위해 시험 장비에서 시험편을 제거한 후 관측해야 한다. 따라서 시험편의 정확한 고장 시

간을 관측하기 어려운 경우가 존재하는데 이러한 때에는 주어진 관측 시점에서 각 관측 구간 내에 몇 개의 시험편이 고장났는지를 관측(intermittent inspection)하게 된다(<그림 2> (a) 참조). 반면 센서 등을 부착하여 시험편의 고장유무를 연속적으로 관측할 수 있을 때(continuous monitoring)에는 정확한 고장 시간을 획득할 수 있으며 이 정보를 이용해 수명을 추정할 수 있다(<그림 2> (b) 참조).



<그림 2> Monitoring Method

마지막으로 중도절단(censoring) 방법을 분류 기준으로 고려할 수 있다. 동일한 고장 모드를 유지하는 상태에서 모든 시험편이 고장 날 때까지 시험할 때에는 완전 자료(complete data)를 얻을 수 있지만 이는 시간의 측면에서 비효율적이다. 따라서 시간을 정해놓고 고장을 관측하는 Type-I 중도절단 방법과 미리 정해진 고장 개수만큼 고장이 발생할 경우 중단하는 Type-II 중도절단 방법이 있다(<그림 3> (a), (b) 참조). 또한 시험편의 고장 관측을 점진적으로 중단하는 점진형 중도절단(progressive censoring) 방법이 있다. <그림 3>의 (c)는 사전에 주어진 시점(τ_1, τ_2)에서 시험편의 일부분을 제거하는 점진형 Type-I 중도절단 방법을 보여주고 있으며, <그림 3>의 (d)는 시험 계획을 통해 사전에 결정된 고장 개수(r_1, r_2)만큼 고장이 발생하면 시험편의 일부분을 제거하는 점진형 Type-II 중도절단 방법을 나타내고 있다.



<그림 3> Censoring Method

2.2 가속 모형

가속 모형의 세부 분류 기준은 1) 수명 분포(lifetime distribution)와 2) 스트레스-모수 관계(stress-parameter relationship), 그리고 계단형 혹은 점진형 스트레스를 인가할 경우 필요한 3) 누적 효과 모형(cumulative effect model)으로 구성된다.

우선 시험편이 따르는 수명 분포를 분류 기준으로 고려할 수 있다. 수명 분포로 자주 사용되는 분포는 지수(exponential), 와이블(Weibull), 대수정규(lognormal) 분포 등이 있다.

다음으로 사용 조건보다 가혹한 스트레스 수준을 인가하기 때문에 수명 분포의 모수를 변화시켜 가속의 영향을 나타내는 관계식이 필요하다. 문헌에서 자주 사용하는 모형은 선형, 아레니우스(Arrhenius), (역)거듭((inverse) power), 지수(exponential), 대수선형(loglinear) 모형 등이 있다.

마지막으로 일정형 스트레스 인가 방법이 아닌 계단형 혹은 점진형 스트레스 인가 방법을 적용한 가속수명시험의 경우, 동일한 시편에 인가되는 스트레스 수준이 시험 도중에 변화하므로 이를 모형에 반영할 수 있는 누적 효과 모형(cumulative effect model)이 필요하다. 대표적인 누적 효과 모형으로 누적 노출(cumulative exposure, CE), 확률간섭변수(tampered random variable, TRV), 고장률간섭(tampered failure rate, TFR) 모형 등이 있다. Cox의 비례위험(proportional hazard) 모형은 고장률간섭 모형의 특수한 경우이므로 이 연구에서는 비례위험 모형을 고장률간섭 모형에 포함하여 정리하였다.

2.3 추정 및 최적화

추정 및 최적화의 세부 분류 기준은 1) 모수의 추정 방법(estimation method)과 2) 결정 변수(decision variable), 그리고 최적화 기준(optimization criteria)으로 구성된다. 우선 모수 추정 방법으로는 최소자승추정법(least square estimation)과 최우추정법(maximum likelihood estimation)이 있다. 최소자승추

정법은 가속수명시험에 자주 사용되는 방법은 아니며 중도절단 자료에 적용하기 어려운 단점을 가진다. 반면 최우추정법은 가속수명시험 계획에 자주 사용되는 방법으로 일치성 효율성 등과 같은 대표본 특성을 만족한다.

다음으로 결정 변수는 효율적인 가속수명시험을 계획하기 위해 사용되는데, 스트레스 수준, 스트레스 인가 시간, 스트레스 변경 시간(고장 개수), 스트레스 증가율, 시료 배분 비율 등이 있다.

마지막으로 효율적인 시험 계획을 선택하기 위해 자주 사용되는 최적화 기준은 사용 조건에서 수명 분포의 q 분위수 수명의 점근분산을 최소화하는 기준과 D-optimality 조건이 있다. D-optimality 기준을 적용한 시험 계획은 가속수명시험을 통해 모형의 모수 추정을 정확하게 하는 것이 목적이며 사용 조건에서 수명 분포의 q 분위수 수명의 점근분산을 최소화하는 기준은 사용 조건의 수명을 정확하게 추정하는 것이 목적이다.

3. 가속시험계획 문헌의 분류

제2장에서 소개한 분류 기준을 이용해 23편의 문헌을 아래의 <표 1>부터 <표 3>에 정리하였다. <표 1>은 시험 상황의 세부 분류 기준에 따른 정리를 보여주며, 가속 모형의 세부 기준을 적용한 문헌 분류는 <표 2>에 나타나 있다. 마지막으

<표 1> Test Scenario

Author	Stress Loading Method	Number of Stress Variable	Inspection Method	Censoring Method
Ismail(2006)	(p)step	single	continuous	Type-I
Kim(2006)	constant	single	continuous	complete
Elsayed and Zhang(2007)	constant	multiple	continuous	Type-I
Li and Fard(2007)	step	multiple	continuous	Type-I
Xu and Fei(2007)	step	multiple	continuous	Type-I
Wu <i>et al.</i> (2008)	step	single	intermittent	Prog. Type-I
Fard and Li(2009)	step	single	continuous	Type-I
Ismail(2009)	(p)constant	single	continuous	Type-II
Ismail and Sarhan 2009)	step	single	continuous	Prog. Type-II
Liao(2009)	constant	single	continuous	Type-I
Kim(2010)	step	single	continuous	Type-II
Pascual(2010)	constant	single	continuous	Type-I
Liu and Qiu(2011)	step	single	continuous	Type-I
Shen <i>et al.</i> (2011)	step	single	intermittent	Prog. Type-I
Hassan and Al-Thobety (2012)	pstep	single	continuous	Type-II
Hunt and Xu(2012)	step	single	continuous	Type-I
Srivastava, and Mittal (2012)	progressive	single	continuous	Type-I
Tang <i>et al.</i> (2012)	step	single	continuous	Type-I
Hassan(2013)	(p)step	single	continuous	Type-I
Yang and Pan(2013)	constant	single	intermittent	Type-I
Zhu and Elsayed(2013)	constant	multiple	continuous	Type-I, II
Anwar and Islam(2014)	(p)constant	single	continuous	Type-I
Haghighi(2014)	step	single	continuous	Type-I

(p): 부분가속, complete: 완전관측, prog.: 점진형 중도절단.

<표 2> Accelerated Model

Author	Lifetime Distribution	Stress-Parameter Relationship	Cumulative Effect Model
Ismail(2006)	two-parameter Gompertz	TRV	linear
Kim(2006)	exponential	-	linear
Elsayed and Zhang(2007)	PH	TFR	Arrhenius
Li and Fard(2007)	Weibull	TFR	loglinear
Xu and Fei(2007)	log-location-scale	CE	loglinear
Wu <i>et al.</i> (2008)	exponential	CE	loglinear
Fard and Li(2009)	Weibull	TFR	linear
Ismail(2009)	Weibull	-	linear
Ismail and Sarhan(2009)	exponential	TRV	linear
Liao(2009)	Weibull	-	Arrhenius
Kim(2010)	exponential	TFR	loglinear
Pascual(2010)	Weibull	-	Arrhenius
Liu and Qiu(2011)	Weibull	CE	loglinear
Shen <i>et al.</i> (2011)	exponential	CE	loglinear
Hassan and Al-Thobety(2012)	inverse Weibull	TRV	linear
Hunt and Xu(2012)	Weibull	TFR	loglinear
Srivastava, and Mittal(2012)	Burr type-XII	CE	(inverse)power
Tang <i>et al.</i> (2012)	Weibull	TFR	loglinear
Hassan(2013)	exponentiated inverse Weibull	TRV	linear
Yang and Pan(2013)	PH	TFR	loglinear
Zhu and Elsayed(2013)	Weibull	-	linear
Anwar and Islam(2014)	Gompertz	-	linear
Haghighi(2014)	extension of exponential	CE	loglinear

PH: 비례위험, TRV: 확률간섭변수, TFR: 고장률간섭, CE: 누적노출.

<표 3> Estimation Method and Optimization Criteria

Author	Estimation Method	Decision Variable	Optimization Criteria
Ismail(2006)	MLE	SCT	Avar
Kim(2006)	MLE	SL, AR	Avar
Elsayed and Zhang(2007)	MLE	SL, AR	Avar
Li and Fard(2007)	MLE	SCT	Avar
Xu and Fei(2007)	MLE	SL, SCT	Avar
Wu <i>et al.</i> (2008)	MLE	MI	Avar, D-opt.
Fard and Li(2009)	MLE	SCT	Avar
Ismail(2009)	MLE	AR, SS	Avar
Ismail and Sarhan 2009)	MLE	SCT	D-opt.
Liao(2009)	MLE	SL	Avar
Kim(2010)	LSE	SCT	Avar
Pascual(2010)	MLE	SL, AR	Avar, D-opt.
Liu and Qiu(2011)	MLE	SL, SCT	D-opt.
Shen <i>et al.</i> (2011)	MLE	SCT	Avar, D-opt.
Hassan and Al-Thobety(2012)	MLE	SCF	Avar
Hunt and Xu(2012)	MLE	SCT	Avar
Srivastava, and Mittal(2012)	MLE	SIR	Avar
Tang <i>et al.</i> (2012)	MLE	SL, SCT	Avar
Hassan(2013)	MLE	SCF	D-opt.
Yang and Pan(2013)	MLE	SL, AR	Avar
Zhu and Elsayed(2013)	MLE	AR	D-opt.
Anwar and Islam(2014)	MLE	SL, AR	Avar
Haghighi(2014)	MLE	SCT	Avar

MLE: 최대우도추정, LSE: 최소자승추정, SCT: 스트레스 변경 시점, SL: 스트레스 수준, AR: 시료배분비율, MI: 관측간격, SCF: 스트레스 변경을 위한 고장 개수, SIR: 스트레스 증가율, Avar: 접근분산, D-opt.: D-optimality.

로 <표 3>에서는 추정 및 최적화의 세부 분류 기준에 따라 문헌을 정리한 내용을 보여주고 있다.

4. 결론 및 향후 연구 방향

이 연구는 2006년 이후 발표된 23편의 가속수명시험 계획에 관한 문헌을 정리하였다. 정리한 결과 및 향후 연구 방향은 다음과 같다.

- 점진형 스트레스 인가 방법을 적용한 연구가 1편으로 부족한 실정이다.
- 부분가속시험에 대한 연구가 4편으로 부족한 편이다.
- 추정방법으로 최소자승추정법보다는 최대우도추정법이 많이 적용되었다.
- 대부분의 문헌이 중도절단 방법으로 Type-I을 적용했다. 따라서 중도절단 방법이 Type-II인 연구가 부족한 편이며, 중도절단 방법이 Type-II이면서 구간 관측을 적용한 연구가 필요하다.
- 스트레스 변수가 2개 이상이면서 점진형 중도절단 방법이 적용된 연구가 필요하다.
- 가속수명시험 계획을 선택하기 위한 일반적인 가이드라인의 개발이 필요하다.

참고문헌

- [1] Anwar, S. and Islam, A. U. (2014), Estimation and Optimal Design of Constant Stress Partially Accelerated Life Test for Gompertz Distribution with Type I Censoring, *Reliability: Theory and Applications*, Vol. 9, No. 4, pp. 73-82.
- [2] Elsayed, E. A. and Zhang, H. (2007), Design of PH-based Accelerated Life Testing Plans under Multiple-stress-type, *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 92, No. 3, pp. 286-292.
- [3] Fard, N. and Li, C. (2009), Optimal Simple Step Stress Accelerated Life Test Design for Reliability Prediction, *Journal of Statistical Planning and Inference*, Vol. 139, No. 5, pp. 1799-1808.
- [4] Haghghi, F. (2014), Optimal Design of Accelerated Life Tests for an Extension of the Exponential Distribution, *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 131, pp. 251-256.
- [5] Hassan, A. S. (2013), On the Optimal Design of Failure Step-Stress Partially Accelerated Life Tests for Exponentiated Inverted Weibull with Censoring, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, Vol. 7, No. 1, pp. 97-104.
- [6] Hassan, A. S. and Al-Thobety, A. K. (2012), Optimal Design of Failure Step Stress Partially Accelerated Life Tests with Type II Censored Inverted Weibull Data, *Life*, Vol. 2, No. 3, pp. 3242-3253.
- [7] Hunt, S. and Xu, X. (2012), Optimal Design for Accelerated Life Testing with Simple Step-Stress Plans, *International Journal of Performability Engineering*, Vol. 8, No. 5, pp. 573-577.
- [8] Ismail, A. A. (2006), On the Optimal Design of Step-Stress Partially Accelerated Life Tests for the Gompertz Distribution with Type-I Censoring, *InterStat, Electronic Journal*, pp. 1-15.
- [9] Ismail, A. A. (2009), Optimum Constant-Stress Partially Accelerated Life Test Plans with Type II Censoring: the Case of Weibull Failure Distribution, *Bulletin of Statistics and Economics*, Vol. 3, pp. 39-46.
- [10] Ismail, A. A. and Sarhan, A. M. (2009), Optimal Design of Step-Stress Life Test with Progressively Type-II Censored Exponential Data, *International Mathematical Forum*, Vol. 4, No. 40, pp. 1963-1976.
- [11] Kim, I. H. (2006), Compound Linear Test Plan for 3-level Constant Stress Tests, *Journal of the Korean Data and Information Science Society*, Vol. 17, No. 3, pp. 945-952.
- [12] Kim, I. H. (2010), The least squares estimation for failure step-stress Accelerated Life Tests, *Journal of the Korean Data and Information Science Society*, Vol. 21, No. 4, pp. 813-818.
- [13] Li, C. and Fard, N. (2007), Optimum Bivariate Step-Stress Accelerated Life Test for Censored Data, *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 56, pp. 77-84.
- [14] Liao, H. (2009), Optimal Design of Accelerated Life Testing Plans for Periodical Replacement with Penalty, *Naval Research Logistics*, Vol. 56, No. 1, pp. 19-32.
- [15] Liu, X. and Qiu, W. S. (2011), Modeling and Planning of Step-Stress Accelerated Life Tests with Independent Competing Risks, *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 60, No. 4, pp. 712-720.
- [16] Nelson, W. B. (2005a), A Bibliography of Accelerated Test Plans, *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 54, No. 2, pp. 194-197.
- [17] Nelson, W. B. (2005b), A Bibliography of Accelerated Test Plans Part II-References, *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 54, No. 3, pp. 370-372.
- [18] Pascual, F. (2010), Accelerated Life Test Planning with Independent Lognormal Competing Risks, *Journal of Statistical Planning and Inference*, Vol. 140, No. 4, pp. 1089-1100.
- [19] Shen, K. F., Shen, Y. J. and Leu, L. Y. (2011), Design of Optimal Step Stress Accelerated Life Tests under Progressive Type I Censoring with Random Removals, *Quality and Quantity*, Vol. 45, No. 3, pp. 587-597.
- [20] Srivastava, P. W. and Mittal, N. (2012), Optimum Multi-Objective Ramp-Stress Accelerated Life Test with Stress Upper Bound for

- Burr Type-XII Distribution, *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 61, No. 4, pp. 1030-1038.
- [21] Tang, Y., Guan, Q., Xu, P. and Xu, H. (2012), Optimum Design for Type-I Step-Stress Accelerated Life Tests of Two-Parameter Weibull Distributions, *Communications in Statistics-Theory and Methods*, Vol. 41, No. 21, pp. 3863-3877.
- [22] Wu, S. J., Lin, Y. P. and Chen, S. T. (2008), Optimal Step-Stress Test under Type I Progressive Group-Censoring with Random Removals, *Journal of Statistical Planning and Inference*, Vol. 138, No. 4, pp. 817-826.
- [23] Xu, H. and Fei, H. (2007), Planning Step-Stress Accelerated Life Tests with Two Experimental Variables, *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 56, pp. 569-579.
- [24] Yang, T. and Pan, R. (2013), A Novel Approach to Optimal Accelerated Life Test Planning with Interval Censoring, *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 62, No. 2, pp. 527-536.
- [25] Yum, B. J., Lim, H. and Seo, S. (2007), Planning Performance Degradation Tests-A Review, *International Journal of Industrial Engineering*, Vol. 14, pp. 709-717.
- [26] Zhu, Y. and Elsayed, E. A. (2013), Design of Accelerated Life Testing Plans under Multiple Stresses, *Naval Research Logistics*, Vol. 60, No. 6, pp. 468-478.