

Solid State Drive(SSD)에 대한 가속열화시험 데이터 모델링 및 분석*

문병민¹ · 최영진¹ · 지유민² · 이용중² · 이근우² · 나한주² · 양중섭² · 배석주^{1†}

¹한양대학교 산업공학과, ²SK하이닉스 NAND개발사업총괄

Modeling and Analysis of Accelerated Degradation Testing Data for a Solid State Drive (SSD)*

Byeong Min Mun¹ · Young Jin Choi¹ · You Min Ji² · Yong Jung Lee² · Keun Woo Lee² ·
Han Joo Na² · Joong Seob Yang² · Suk Joo Bae^{1†}

¹Department of Industrial Engineering, Hanyang University

²NAND&Solution Development, SK Hynix

Purpose: Accelerated degradation tests can be effective in assessing product reliability when degradation leading to failure can be observed. This article proposes an accelerated degradation test model for highly reliable solid state drives (SSDs).

Methods: We suggest a nonlinear mixed-effects (NLME) model to degradation data for SSDs. A Monte Carlo simulation is used to estimate lifetime distribution in accelerated degradation testing data. This simulation is performed by generating random samples from the assumed NLME model.

Conclusion: We apply the proposed method to degradation data collected from SSDs. The derived power model is shown to be much better at fitting the degradation data than other existing models. Finally, the Monte Carlo simulation based on the NLME model provides reasonable results in lifetime estimation.

Keywords: Accelerated Degradation Test, Degradation Model, Non-Linear Mixed-Effects Model, Raw Bit Error Rate, Solid State Drive

1. 서론

SSD(Solid State Drive)는 기존 HDD(Hard Disk Drive)보다 발열, 소음 및 전력소모 등이 적으며, 소형화 및

경량화를 할 수 있다는 장점으로 데스크탑, 노트북 및 태블릿 등의 저장장치로 널리 사용되고 있다. SSD의 성능을 향상시키기 위한 다양한 기술들이 적용되면서 SSD는 높은 신뢰성을 확보하게 되었으며, 이에 따라

* 본 논문은 2017년도 에스케이하이닉스 주식회사에서 주관하는 산학연구인 '가속 수명 테스트를 통한 모델링 Setup으로 MTBF 예측력 향상과 최적 RDT 조건 도출' 과제의 일환으로 수행되었습니다

† 교신저자 sjbae@hanyang.ac.kr

2018년 1월 5일 접수; 2018년 1월 12일 게재 확정.

SSD의 수명을 평가하기 위한 많은 시도가 이루어져 왔다. Pinheiro *et al.*[1]와 Prabhakaran *et al.*[2]는 대용량 저장장치에 대하여 SMART(Self-Monitoring Analysis and Reporting Technology) 기술을 이용하여 신뢰성을 평가하기 위한 연구를 진행하였으며 최근 Kim *et al.*[3]은 SMART 기술을 기반으로 SSD에서 블록들의 평균 삭제 횟수, I/O 응답 시간, 배드 블록 개수 등의 다양한 속성 정보를 측정하여 SSD의 신뢰성 분석 방법론을 제안하였다. 하지만 이와 같은 방법들은 많은 시간이 소요되기 때문에 SSD와 같은 제품의 수명을 단기간 내에 평가하기 위해서는 일반적으로 가속수명 시험(accelerated life test, ALT) 또는 가속열화시험(accelerated degradation test, ADT)을 실시할 수 있다. 하지만 가속수명시험의 경우 SSD의 높은 신뢰성으로 인하여 단기간 내에 고장 획득이 어려우며, 가속열화시험의 경우 열화특성(degradation characteristic)을 정의해야 하지만 현재까지 알려진 열화특성이 없다.

이와 같이 SSD에 대한 수명 평가가 어렵기 때문에 일반적으로 SSD의 수명 보증여부를 판정하기 위한 신뢰성 입증시험(reliability demonstration test)을 실시한다[4]. 신뢰성 입증시험은 제품의 설계 및 개발단계에서 규정된 수명 요건을 충족하는지 여부를 판정하기 위한 시험이며, 신뢰성 입증시험 계획을 통해 산출된 시험시간 동안 신뢰성 입증시험을 실시하여 $(1-\alpha)\%$ 신뢰수준에서 r 개 이하의 고장이 발생할 경우 목표 수명을 보증한다고 판단할 수 있다. SSD의 주요 신뢰성 척도가 $MTTF$ (Mean Time To Failure)인 경우 가속 온도조건에서 지수분포(exponential distribution) 가정 하에 $(1-\alpha)\%$ 신뢰수준에서 목표 $MTTF$ 를 보증할 수 있는 시험시간은 다음과 같다.

$$t = \frac{MTTF \cdot \chi_{\alpha}^2(2r+2)}{2n} \cdot \frac{1}{AF}, \quad (1)$$

$$AF = \exp\left[-\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_u}\right)\right]$$

$\chi_{\alpha}^2(2r+2)$ 는 자유도가 $2r+2$ 인 카이스퀘어 분포, r 은 허용 고장 수, n 은 사전에 정의한 시료 수, AF 는 아레니우스 모델(Arrhenius model)에 대한 가속계수(accelerated factor)이다. AF 에서 E_a 는 활성화 에너지(activation energy), k 는 볼츠만 상수(Boltzmann constant, 8.617385×10^{-5}), T_u 는 정상조건의 절대온도

T_a 는 가속조건의 절대온도이다. 식 (1)에서 시험시간을 산출하기 위해서는 활성화 에너지 E_a 가 필요하며, 일반적으로 JEDEC JEP122G[5] 표준에서 제공하고 있는 가장 보수적인 활성화 에너지(activation energy) $0.7eV$ 를 사용한다. 예를 들어, SSD 생산업체에서 일반적으로 사용하는 조건인 시료 수 $n=512$, 허용 고장 수 $r=1$, 정상 온도조건 $T_u=35^{\circ}C$, 가속 온도조건 $T_a=70^{\circ}C$, 활성화 에너지 $E_a=0.7eV$ 를 사용하여 95% 신뢰수준에서 목표 $MTTF=1,500,000$ 시간을 보증할 수 있는 시험시간은 식 (1)을 통하여 $t=944.6272$ 시간으로 산출할 수 있다. 따라서 512개의 시료에 대하여 $70^{\circ}C$ 온도조건에서 944.6272시간 동안 가속시험을 실시하여, 고장이 1개 이하로 발생할 경우 95% 신뢰수준에서 목표 $MTTF=1,500,000$ 시간을 보증한다고 판단할 수 있다.

하지만 신뢰성 입증시험으로는 정확한 SSD의 수명을 추정할 수 없으며, 단지 특정 목표수명의 보증 여부만을 확인할 수 있다. 또한 가속시험으로부터 추정된 활성화 에너지가 아닌 JEDEC JEP122G[5] 표준에서 제공하는 가장 보수적인 활성화 에너지(activation energy)를 사용하였기 때문에 목표수명을 보증하기 위한 정확한 시험시간을 산출할 수 없다.

본 논문에서는 Schroeder *et al.*[6]가 제안한 SSD의 신뢰도를 결정하는 주요 척도인 RBER(raw bit error rate)을 열화특성으로 하는 가속열화 데이터에 대한 모델링 및 분석 방법을 제안한다. SSD에 대한 고장 메커니즘을 촉진하기 위하여 정상 온도조건보다 가혹한 온도조건에서 가속열화시험을 실시하고 선형 모델(linear model), 지수모델(exponential model) 및 역수모델(power model)에 대하여 Meeker *et al.*[7]가 제안한 가속열화 데이터 분석 방법을 적용하여 정상 온도조건에서의 수명을 추정한다. 제안된 방법은 $80^{\circ}C$, $90^{\circ}C$ 조건에서 각각 시료 15개에 대하여 가속열화시험을 실시한 데이터에 적용하였으며, 그 결과를 비교·분석하였다.

제2장에서는 SSD의 열화특성을 정의하고 열화모델 및 가속열화시험 데이터 분석 방법을 소개한다. 제3장에서는 SSD에 대한 가속열화시험 결과 및 제안된 방법을 적용하여 정상 온도조건에서의 수명추정 결과를 제시한다. 마지막으로 제4장에서는 결론 및 향후연구에 대하여 제시한다.

2. 가속열화시험 데이터 모델링 및 분석

Schroeder *et al.*[6]은 구글 데이터 센터에서 6년간 필드에서 수집한 SSD 데이터를 분석하여 SSD의 신뢰도를 결정하는 주요 척도로서 RBER을 제안하였다. RBER은 읽어 들인 총 비트 당 오류 수를 의미하며 기존에 널리 사용되던 UBER(uncorrectable bit error rate)이 오류 정정 코드(error correcting code, ECC)에 의한 데이터 오류 복구 이후 오류 발생률을 나타낸다면 RBER은 오류 복구 이전의 오류 발생률을 나타낸다. 본 논문에서는 SSD에 대하여 고장 메커니즘을 촉진하기 위하여 정상 온도조건보다 가혹한 온도조건에서 가속열화시험을 실시하고, SSD의 열화특성으로 P/E cycle(program/erase cycle)에 따른 RBER을 측정하는 가속열화시험을 제안한다.

열화특성치인 RBER을 모델링하기 위하여 <Table 1>과 같이 선형모델, 지수모델 및 역수모델 등 3가지 열화모델을 가정하였으며, 정상 온도조건에서 수명을 추정하기 위하여 Meeker *et al.*[7]가 제안한 가속열화 데이터 분석 방법을 적용하였다. Meeker *et al.*[7]는 비선형 혼합효과 모델(non-linear mixed-effects model)을 가정하여 열화모델의 기울기에 가속계수를 결합하여 몬테카를로 시뮬레이션(Monte-Carlo simulation)을 통하여 정상 온도조건의 수명을 추정하였다.

가속열화시험 데이터를 분석하는 방법으로 가장 널리 알려진 2단계 접근법(2-stage approach)은 각 시료에 독립적인 개별 열화모델을 가정하여 열화특성치가 사전에 정의한 고장판정기준(failure threshold)에 다다른 시점을 모사고장(pseudo failure)으로 정의하고, 가속모델 및 수명분포를 통하여 정상 온도조건 수명을 추정한다. Bae[8]는 VFD(Vacuum Fluorescent Display)에 대한 가속열화 데이터를 대상으로 2단계 접근법을 적용하여 수명을 추정한 바 있다. 하지만 2단계 접근법은 시료마다 독립적인 열화모델을 가정하기 때문에 시료 간의 가변성(between individual variability)을 반영할 수 없다는 단점이 있다. 반면, 비선형 혼합효과 모델은 시료 간의 가변성을 반영할 수 있기 때문에 열화모델로써 널리 사용되어 왔다. 특히, Bae *et al.*[9, 10]은 PDP와 연료전지의 열화 데이터에 대하여 이중지수모델(bi-exponential model)을 가정하여 비선형 혼합효과 모델을 제안한 바 있다. 본 논문에서는 <Table 1>과 같은 3가지 열화모델에 대하여 비선

Table 1 Degradation model for a raw bit error rate

Model	Formula
Linear	$f(x) = \phi_1 + \phi_2 x$
Exponential	$f(x) = \phi_1 e^{\phi_2 x}$
Power	$f(x) = \phi_1 x^{\phi_2}$

형 혼합효과 모델을 가정하였으며 열화모델의 기울기에 아레니우스 모델의 가속계수를 결합하여 몬테카를로 시뮬레이션을 통하여 정상 온도조건 수명을 추정한다.

Lindstorm and Bates[11]에 기반하여 i 번째 시료의 j 번째 열화특성치 y_{ij} 에 대한 비선형 혼합효과 모델은 다음과 같다.

$$y_{ij} = f(x_{ij}, \phi_i) + e_{ij}, \quad i = 1, \dots, m, \quad j = 1, \dots, n_i \quad (2)$$

$f(\cdot)$ 은 <Table 1>과 같이 관측시점 x_{ij} 모수벡터 ϕ_i 를 가지는 열화모델이며, e_{ij} 는 정규분포를 따르는 오차항이다. 시료 간의 가변성을 고려하기 위하여 모수벡터 ϕ_i 는 다음과 같이 고정효과(fixed effects) β 및 i 번째 시료의 랜덤효과(random effects) b_i 로 표현할 수 있다.

$$\phi_i = A_i \beta + B_i b_i, \quad b_i \sim MN(0, \Sigma), \quad (3)$$

행렬 A_i , B_i 는 각각 고정효과와 랜덤효과에 대한 설계행렬(design matrix)이며, 랜덤효과 b_i 는 평균벡터 0 , 분산-공분산 행렬(variance-covariance matrix) Σ 인 다변량 정규분포(multivariate normal distribution)를 가정한다.

정상 온도조건에서의 수명을 추정하기 위하여 온도에 대한 가속모델로써 가장 빈번하게 사용되는 아레니우스 모델을 가정하였으며, 아레니우스 모델의 가속계수는 다음과 같다.

$$AF = \exp \left[- \frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_u} \right) \right], \quad (4)$$

E_a 는 활성화 에너지, k 는 볼츠만 상수(Boltzmann constant, 8.617385×10^{-5}), T_u 는 정상조건 절대온도, T_a 는 가속조건 절대온도이다. 열화모델의 기울기에 아레니우스 모델의 가속계수를 결합하여 몬테카

를로 시뮬레이션을 통하여 정상조건 수명을 추정한다. 몬테카를로 시뮬레이션은 랜덤효과 b_i 가 다변량 정규분포를 가정하였기 때문에 평균벡터 β , 분산-공분산 행렬 Σ 인 다변량 정규분포로부터 난수(random number)를 발생하여 실시한다. 예를 들어, 지수모델인 경우 비선형 혼합효과 모델은 $y_{ij} = (\beta_1 + b_{1i})e^{(\beta_2 + b_{2i})x_{ij}} + e_{ij}$ 이며, 기술기에 아레니우스 모델의 가속계수를 고려하면 다음과 같다.

$$y_{ij} = (\beta_1 + b_{1i})e^{(\beta_2 + b_{2i}) \exp\left[-\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_u}\right)\right] x_{ij}} + e_{ij} \quad (5)$$

식 (5)에서 고정효과 β 및 i 번째 시료의 랜덤효과 b_i 는 first-order method[12] 또는 Lindstrom and Bates method[11]와 같은 근사적 방법(approximation method)을 사용하여 추정한다. 추정된 모수를 통하여 다변량 정규분포 $MN(\hat{\beta}, \hat{\Sigma})$ 로부터 난수를 발생하여 몬테카를로 시뮬레이션을 실시하여 정상조건에서의 B_p 수명 및 $MTTF$ (mean time to failure)를 추정한다.

3. SSD에 대한 사례연구

본 논문에서는 SSD에 대하여 고장 메커니즘을 촉진하기 위하여 정상 온도조건 35°C보다 가혹한 온도

조건인 80°C, 90°C 조건에서 각각 시료 15개에 대하여 가속열화시험을 실시하였으며, P/E cycle(program/erase cycle)에 따른 RBER과 유사한 속성을 가지는 R-R count(ready-retry count)를 측정하였다. <Table 1>과 같이 3가지 열화모델을 고려하였으며, 고장판정기준은 기존의 경험을 토대로 R-R count가 24,000회가 되는 시점으로 설정하였다. <Fig. 1>은 SSD에 대한 P/E cycle(program/erase cycle)에 따른 R-R count를 도시한 결과이며, <Table 2>는 열화모델을 선택하기 위하여 3가지 열화모델에 대하여 식(6)을 통하여 RMSE (Root Mean Square Error)를 산출한 결과이다.

$$RMSE = \sqrt{E[(\hat{y}_{ij} - y_{ij})^2]} \quad (6)$$

3가지 열화모델 중 역수모델의 RMSE가 789.7880으로 가장 작기 때문에 역수모델을 열화모델로 결정하였으며, 가속열화시험 데이터에 열화모델을 적용한 결과는 <Fig. 2>와 같다.

역수모델의 기술기에 아레니우스 모델의 가속계수를 결합하여 비선형 혼합효과 모델을 가정하였다. 역수모델의 모수 ϕ_1, ϕ_2 는 고정효과 및 랜덤효과를 가정하였으며, 활성화 에너지 E_a 는 고정효과만 가정하였다. Lindstrom and Bates method를 사용하여 고정효과는 $\hat{\phi}_1 = 0.0942, \hat{\phi}_2 = 1.2992, \hat{E}_a = 0.7334$ 로 추정되었으며, 추정된 활성화 에너지는 $0.7334eV$ 로써

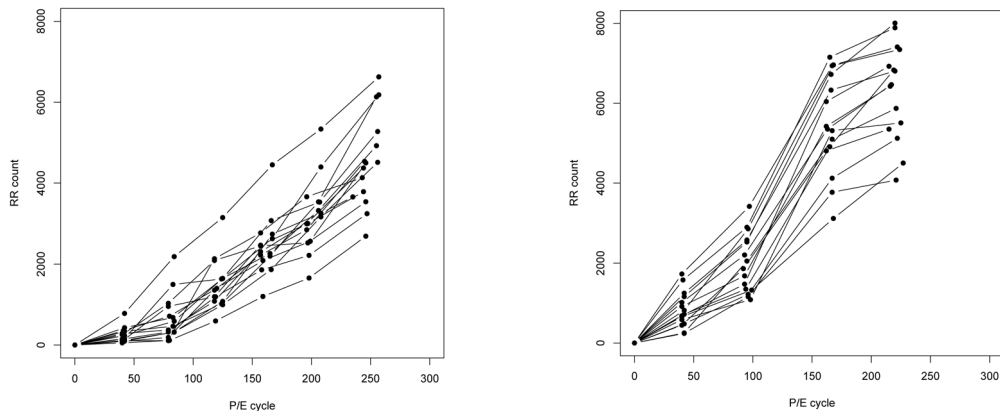


Fig. 1 Observed degradation paths(left : 80°C, right : 90°C)

Table 2 Root mean squared errors between observed and estimated degradation characteristics

Linear model	Exponential model	Power model
815.5113	958.9185	789.7880

JEDEC JEP122G[5] 표준에서 제공하는 가장 보수적인 활성화 에너지 $0.7eV$ 보다 약간 높게 추정되었다. 랜덤효과 $b_i = (b_{i1}, b_{i2})$ 에 대한 분산-공분산 행렬 Σ 은 $(1.5792 \times 10^{-13}, -1.5293 \times 10^{-8}; -1.5293 \times 10^{-8}, 1.4823 \times 10^{-3})$ 으로 추정되었다. 추정된 모수를 통하여 몬테카를로 시뮬레이션을 실시하기 위하여 다변량

정규분포 $MN((\hat{\phi}_1, \hat{\phi}_2)^T, \Sigma)$ 로부터 100,000개의 난수를 발생시켰으며, 난수를 통하여 <Fig. 3>과 같이 정상온도 조건 $35^\circ C$ 에서의 열화경로를 추정하였다. 열화경로가 고장판정기준인 24,000회까지 도달하는 시점의 P/E cycle에 대한 수명분포를 추정하였으며, 이를 히스토그램으로 도시한 결과는 <Fig. 4>와 같다.

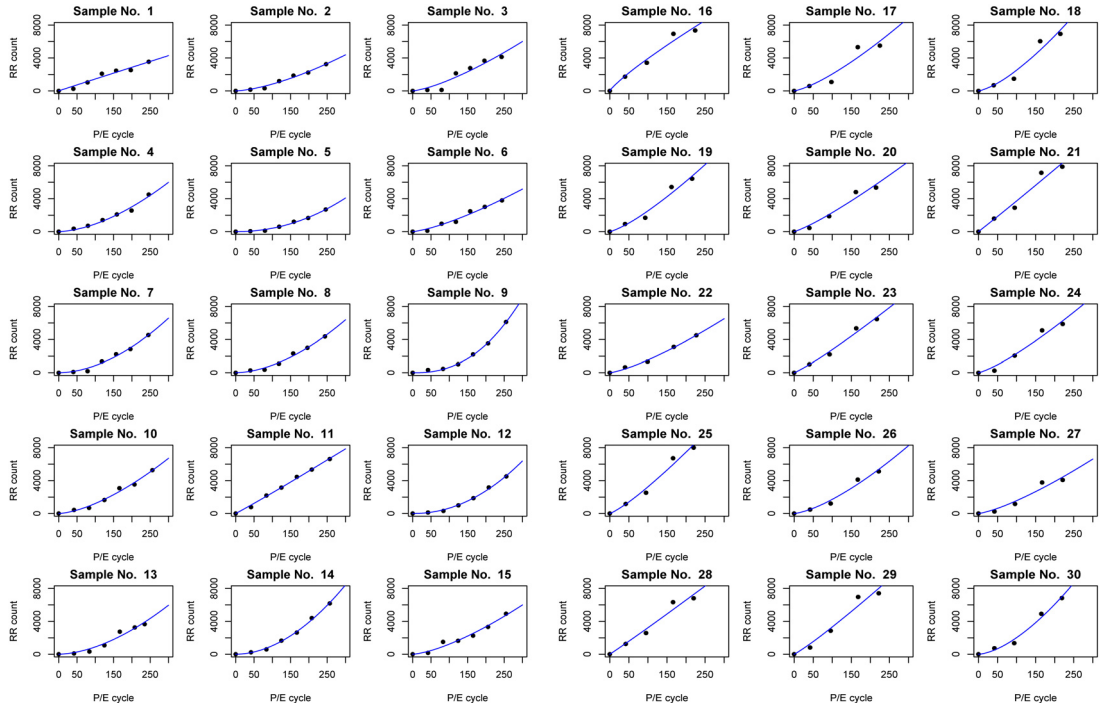


Fig. 2 Degradation modeling results(left : $80^\circ C$, right : $90^\circ C$)

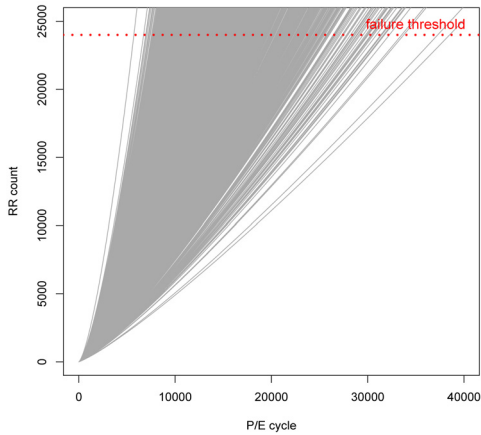


Fig. 3 Estimated degradation paths obtained from Monte Carlo simulation

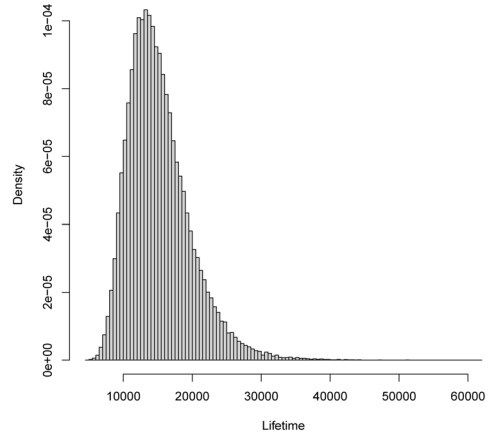


Fig. 4 Histogram of the estimated lifetime obtained from Monte Carlo simulation

Table 3 Lifetime estimates based on NLME models for SSDs

$B_{0.1}$	$B_{0.5}$	B_1	B_5	$MTTF$
5,719	6,213	7,821	9,269	15,220

추정된 정상온도 조건 35°C에서의 P/E cycle에 대한 수명분포로부터 수명을 추정 한 결과는 <Table 3>과 같다. $MTTF$ 는 15,220회로 매우 높게 추정되었으며, SSD 생산업체에서 일반적으로 보증하는 R-R count는 1,700회인 점을 고려할 때 $B_{0.1}$ 수명이 5,719회로 보증 횟수보다 높게 추정되었다.

4. 결론 및 향후연구

본 논문에서는 SSD에 대하여 RBER을 열화특성으로 정의하여 정상 온도조건보다 가혹한 온도조건에서 가속열화시험을 실시하였다. SSD의 시료 간의 가변성을 반영하기 위하여 비선형 혼합효과 모델을 가정하였으며, 3가지 열화모델에 대한 RMSE를 추정하여 최종모델을 선정하였다. 마지막으로 다변량 정규분포 가정 하에 몬테카를로 시뮬레이션을 실시하여 정상 온도조건에서의 수명을 추정하였다.

제안된 방법은 80°C, 90°C 조건에서 각각 시료 15개에 대하여 가속열화시험을 실시한 데이터에 적용하였으며, 3가지 열화모델을 적용하여 RMSE가 최소가 되는 멱수모델을 최종 모델로 선정하였다. 몬테카를로 시뮬레이션 결과 $MTTF$ 는 15,220회로 매우 높게 추정되었으며, SSD 생산업체에서 일반적으로 보증하는 R-R count는 1,700회인 점을 고려할 때 $B_{0.1}$ 수명이 5,719회로 보증수명보다 높게 추정되었다.

현재 70°C 온도조건에서 가속열화시험이 진행 중에 있으며, 70°C 온도조건을 추가적으로 고려할 경우 SSD에 대한 더 정확한 수명 추정 결과를 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 본 논문에서는 SSD에 대한 가속열화시험에 대한 모델링 및 분석방법을 제공하고 있지만, 향후에는 이에 따른 신뢰성 입증시험을 제안할 예정이다.

References

- [1] Pinheiro, E., Weber, W., and Barroso, L. A. (2007). "Failure Trends in a Large Disk Drive Population". In 5th USENIX Conference on File and Storage Technologies (FAST'07).
- [2] Prabhakaran, V., Balakrishnan, M., Davis, J. D., and Wobber, T. (2010). "Depletable Storage Systems". In 2nd USENIX Workshop on Hot Topics in Storage and File Systems (HotStorage'10).
- [3] Kim, S., Lee, S., Jeon, J., Choi, J., Yang, J., Mo, Y., and Shin, Y. (2011). "SMART based Dependability Analysis Methodology for SSD: Measurements and Implications". Journal of KIISE: Computer Systems and Theory, Vol. 38, No. 5, pp. 207-215.
- [4] Marquart, T. A. (2015). "Solid-State-Drive Qualification and Reliability Strategy". In Integrated Reliability Workshop (IIRW), pp. 3-6.
- [5] JEDEC JEP122G (2009). "Failure Mechanisms and Models for Semiconductor Devices". JEDEC Publication.
- [6] Schroeder, B., Lagisetty, R., and Merchant, A. (2016). "Flash Reliability in Production: The Expected and the Unexpected". Proceedings of the 14th USENIX conference, pp. 67-80.
- [7] Meeker, W., Escobar, L., and Lu, C. (1998). "Accelerated Degradation Tests: Modeling and Analysis". Technometrics, Vol. 40, No. 2, pp. 89-99.
- [8] Bae, S. J. (2005). "Application of Accelerated Degradation Testing for VFD (Vacuum Fluorescent Display)". Journal of Applied Reliability, Vol. 5, No. 4, pp. 413-425.
- [9] Bae, S. J., Kim, S. J., Kim, M. S., Lee, B. J., and Kang, C. W. (2008). "Degradation Analysis of Nano-contamination in Plasma Display Panels". IEEE Transactions on Reliability, Vol. 57, No. 2, pp. 222-229.
- [10] Bae, S. J., Kim, S. J., Um, S. K., Park, J. Y., Lee, J. H., and Cho, H. J. (2009). "A Prediction Model of Degradation Rate for Membrane Electrode Assemblies in Direct Methanol Fuel Cells". International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, No. 14, pp. 5749-5758.

[11] Lindstrom, M. J. and Bates, D. M. (1990), "Nonlinear Mixed Effects Models for Repeated Measures Data". *Biometrics*, Vol. 46, No. 3, pp. 673-687.

[12] Beal, S. L. and Sheiner, L. B. (1982). "Estimating Population Kinetics". *CRC Critical Reviews in Biomedical Engineering*, Vol. 8, pp. 195-222.