

## AMSAA 모델을 이용한 일회성 체계의 신뢰도성장 예측

김명수<sup>1\*</sup> · 정재우<sup>2</sup> · 이종신<sup>2</sup>

<sup>1</sup>수원대학교 산업공학과, <sup>2</sup>LIG넥스원 ILS 연구센터

### A Reliability Growth Prediction for a One-Shot System Using AMSAA Model

Myung Soo Kim<sup>1\*</sup> · Jae Woo Chung<sup>2</sup> · Jong Sin Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Industrial Engineering, Univ. of Suwon, <sup>2</sup>ILS R&D Center, LIGNexOne

A one-shot device is defined as a product, system, weapon, or equipment that can be used only once. After use, the device is destroyed or must undergo extensive rebuild. Determining the reliability of a one-shot device poses a unique challenge to the manufacturers and users due to the destructive nature and costs of the testing. This paper presents a reliability growth prediction for a one-shot system. It is assumed that 1) test duration is discrete(i.e. trials or rounds); 2) trials are statistically independent; 3) the number of failures for a given system configuration is distributed according to a binomial distribution; and 4) the cumulative expected number of failures through any sequence of configurations is given by AMSAA model. When the system development is represented by three configurations and the number of trials and failures during configurations are given, the AMSAA model parameters and reliability at configuration 3 are estimated by using a reliability growth analysis software. Further, if the reliability growth predictions do not meet the target reliability, the sample size of an additional test is determined for achieving the target reliability.

**Keywords:** Reliability Growth, One-Shot System, AMSAA Model, Sample Size

#### 1. 서론

무기체계는 과거 단순 기능의 저비용 무기체계에서 최근 첨단화, 정밀화, 장사정화, 은밀화, 복합 기능화의 특징을 가진 고비용 무기체계로 변화하고 있다 이에 따라 신뢰도가 높은 무기 체계를 획득하고 운용하는 것은 경제적 군 운용과 사용자의 안전을 보장하는 측면에서 중요한 요소이다 체계개발 단계에서 신뢰도 목표를 효과적으로 달성하기 위해서는 신뢰성시험을 통해 잠재 고장모드와 원인을 발견하고, 시험 중 발견된 고장을 분석하여, 개선방안을 찾아 실천함으로써 신뢰성이 향상되는 과정을 추적할 필요가 있다. 이와 같이 시험, 분석 및 개선을 통해 체계 또는 장비의 신뢰성이 시간에 따라 점진적으로 개선되는 것을 신뢰성성장(reliability growth)이라고 한다(김명수 외, 2013).

신뢰성성장 프로그램은 미국, EU 등 선진국의 군수 및 민수산업에서 오래 전부터 제품개발 기간 단축과 신뢰성 향상을

위해 적용하여 왔고, 국내에서는 주로 철도산업을 중심으로 신뢰성성장 모델을 적용하는 연구가 수행되었다. 신뢰성성장 사례연구로 한석윤 외(2005)는 무인운전 고무차륜형식 경량전철(Model : K-AGT(Automated Guideway Transit)) 시스템의 주행시험 자료를 AMSAA(Army Materiel Systems Analysis Activity) 모형을 적용하여 분석하여 성장률, 적합성검정, 10,000 km에서의 순간 및 누적 MTBF(Mean Time Between Failures), 목표 도달까지의 누적주행거리 등을 추정하였다. 박찬경 외(2006)는 한국형 고속열차 시운전 시험 고장률을 이용하여 서브시스템과 차량시스템의 고장간 평균 주행거리(Mean Kilometers Between Failures: MKBF) 변화추이를 구하고, Duane 모델을 이용하여 성장률을 추정하였다. 한편, 해외 적용사례로 Sun and Kee(2005)는 상업용 원자력 발전소에서 AMSAA 방법을 적용, 시간 종속적인 고장률을 계산하고 미래의 고장 또는 비가용 사건 수를 예측하여 경제적 성과 부품 추이, 정비 불가용도를 산출하였다. Spinato *et al.*(2007)은

\* 교신저자 mskim@suwon.ac.kr

2014년 9월 9일 접수; 2014년 10월 26일 수정본 접수; 2014년 10월 30일 게재 확정.

풍력 터빈 선단(fleet)의 필드데이터에 대하여 AMSAA 모델을 적용하여 서버어셈블리 고장강도 추이를 분석하였다. Panchangam and Naikan(2012)은 위성추진시스템에 사용되는 압력 센서의 스트레인 게이지 시험자료를 Duane, AMSAA 모델 등을 사용하여 분석하였고, Evans *et al.*(2012)은 그룹데이터와 AMSAA 모델에 기초하여 위성시스템의 신뢰도 추이와 성장분석 방법을 제안하였다(김명수 외, 2013).

신뢰도성장 예측에 관한 기존의 연구들은 대부분 연속적으로 사용되는 체계에 대한 것이다. 그러나 장기간 저장 상태로 유지된 후 한 번의 운용을 통해 임무를 완료하는 유도무기와 같은 일회성(one-shot) 체계는 화학적 반응 또는 물리적 파괴와 같은 비가역적 반응을 수반하므로 사용 전에 충분한 시험이 불가능하고, 고가의 장비가격 등으로 인하여 시료 확보에 어려움이 있어 신뢰도성장 예측에 어려움이 있다.

본 연구에서는 시험시간이 시행 또는 발수와 같이 이산형으로 측정되는 일회성 체계에 대해 신뢰도성장을 예측하는 문제를 다룬다. 각 시행은 통계적으로 독립이고, 특정 형상에서 체계의 고장개수는 이항분포를 따르며, 신뢰도성장은 형상별로 이루어지며 AMSAA 모델을 따른다고 가정한다. 체계 개발은 3개의 형상으로 구성되며, 각 형상별 시험 횟수가 주어졌을 때, AMSAA 모델의 모수와 체계의 신뢰도성장을 예측한다. 또한, 신뢰도성장 예측 결과가 목표 신뢰도를 만족하지 못하는 경우, 목표 신뢰도 달성을 위한 추가 시험 횟수(발수)를 추정한다.

## 2. 일회성 체계의 AMSAA 모델 모수추정

본 절에서는 AMSAA 모델과 시험시간이 시행 또는 발수와 같이 이산형으로 측정되는 일회성 체계의 형상별 시험 데이터에 대한 AMSAA 모델 모수추정 방법을 소개한다(AMSAA, 2011; <http://reliawiki.org>).

### 2.1 AMSAA 모델

Duane(1964)은 개발과정에서 수집된 서로 다른 체계의 고장 데이터로부터 누적MTBF(cumulative MTBF)와 누적 가동시간(cumulative operating time)이 log-log 용지에 타점되었을 때, 직선으로 나타나는 것을 알게 되었다. AMSAA 모델은 non-homogeneous Poisson process(NHPP)와 와이불 고장률함수(Weibull failure rate function)를 이용하여 Duane(1964) 모델을 확률적으로 설명한 모형이다. 즉, 시간  $t$ 에서의 고장강도(failure intensity)  $\rho(t)$ 는 (1)과 같이 와이불 고장률함수(Weibull failure rate function)로 근사될 수 있다고 가정한다.

$$\rho(t) = \lambda \beta t^{\beta-1}, \lambda > 0, \beta > 0 \quad (1)$$

따라서 시험기간  $[0, T]$ 에서의 기대 고장개수는 식(2)와 같다.

$$E[N(T)] = \int_0^T \rho(t) dt = \lambda T^\beta \quad (2)$$

식 (1)에서 ①  $\beta = 1$ 이면  $\rho(t) = \lambda$ 로 상수함수, ②  $\beta > 1$ 이면  $\rho(t)$ 는 증가하여 신뢰성 저하, ③  $\beta < 1$ 이면  $\rho(t)$ 는 감소하여 신뢰성이 성장함을 알 수 있다 만일  $t_0$  이후 더 이상 개선이 이루어지지 않는다면, 일정 고장강도  $\rho(t_0) = \lambda \beta t_0^{\beta-1}$ 로 고장이 발생한다고 할 수 있으므로 고장시간은 평균이  $m(t_0) = \frac{1}{\rho(t_0)}$ 인 지수분포를 따르며, 시간  $t_0$ 에서 체계의 MTBF는 식 (3)과 같다.

$$m(t_0) = \frac{1}{\lambda \beta t_0^{\beta-1}} \quad (3)$$

### 2.2 AMSAA 모델의 모수추정

#### 2.2.1 가정

- 1) 시험시간은 시행 또는 발수와 같이 이산형이며 시험 결과는 성공 또는 실패로 나타난다.
- 2) 각 시행은 통계적으로 독립이다.
- 3) 특정 형상에서 체계의 고장개수는 이항분포를 따른다.
- 4) 신뢰도성장은 형상별로(configuration by configuration) 이루어진다.
- 5) 누적 기대 고장개수는 식(2)의 AMSAA 모델을 따른다.

#### 2.2.2 모수추정

개발 중인 형상 1의 체계에 대하여  $N_1$ 개 시체를 시험하고,  $N_1$ 회 시험 중 고장개수를  $M_1$ 이라 하자. 이때, 형상 1의 고장에 대하여 시정조치를 취하여 변경된 설계는 형상 2가 된다. 형상 2에 대해  $N_2$ 개의 시체를 제작하여 시험하고 관측된 고장개수를  $M_2$ 라 하고, 이러한 과정이  $K$ 개 형상들에 대하여 지속된다고 하자.

데이터  $N_i$ 와  $M_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, K$ 에 기초하여  $K$ 번째 형상의 신뢰도를 추정한다. 형상  $K$ 의 신뢰도는 체계의 현재 신뢰도를 나타낸다.  $i$ 번째 ( $i = 1, 2, \dots, K$ ) 형상까지 누적시행 회수를  $T_i$ 라 하면,  $T_1 = N_1$ ,  $T_2 = N_1 + N_2$ ,  $\dots$  이다. 이때,  $i$ 번째 형상의 고장확률  $f_i$ 는 식 (4)와 같고, 신뢰도  $R_i$ 는 식 (5)가 된다.

$$f_i = \frac{\lambda T_i^\beta - \lambda T_{i-1}^\beta}{N_i} \quad (4)$$

$$R_i = 1 - f_i \quad (5)$$

한편,  $N_i$ ,  $M_i$ ,  $T_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, K$ 가 주어졌을 때 우도함수(likelihood function)는 식 (6)과 같고, 식 (6)의 양변에 로그를 취한 대수우도함수  $L$ 는 식 (7)과 같다.

$$L(\lambda, \beta) = \prod_{i=1}^k \left( \frac{N_i}{M_i} \right)^{M_i} \left( \frac{\lambda T_i^\beta - \lambda T_{i-1}^\beta}{N_i} \right)^{M_i} \left( \frac{N_i - \lambda T_i^\beta + \lambda T_{i-1}^\beta}{N_i} \right)^{N_i - M_i} \quad (6)$$

$$A = \sum_{i=1}^K \left[ \ln \left( \frac{N_i}{M_i} \right) + M_i \{ \ln(\lambda T_i^\beta - \lambda T_{i-1}^\beta) - \ln N_i \} \right] + \sum_{i=1}^K \left[ (N_i - M_i) \{ \ln(N_i - \lambda T_i^\beta + \lambda T_{i-1}^\beta) - \ln N_i \} \right] \quad (7)$$

$\frac{\partial A}{\partial \lambda} = 0, \frac{\partial A}{\partial \beta} = 0$ 으로부터  $\lambda$ 와  $\beta$ 의 최우추정치  $\hat{\lambda}$ 와  $\hat{\beta}$ 은 식 (8)을 만족한다.

$$\sum_{i=1}^K (H_i \times S_i) = 0 \ \& \ \sum_{i=1}^K (U_i \times S_i) = 0, \quad (8)$$

여기서  $H_i = [T_i^\beta \ln(T_i) - T_{i-1}^\beta \ln(T_{i-1})]$ ,  $U_i = [T_i^\beta - T_{i-1}^\beta]$ ,  $S_i = \left[ \frac{M_i}{\hat{\lambda} T_i^\beta - \hat{\lambda} T_{i-1}^\beta} - \frac{N_i - M_i}{N_i - \hat{\lambda} T_i^\beta + \hat{\lambda} T_{i-1}^\beta} \right]$ 이다.

### 3. 일회성 체계의 신뢰도 성장 예측

개발 중에 있는 일회성 ○○○ 체계의 경우, 체계 단위의 시험이 FAT(factory acceptance test)에서 1발, DT/OT(development test/operational test)에서 각각 5발씩 총 11발의 시험이 예정되어 있다. 본 절에서는 FAT 및 DT/OT에서 나타날 수 있는 가능한 결과들에 대해 체계의 신뢰도 성장을 예측한다. 또한, 신뢰도성장 예측 결과가 목표 신뢰도(명중률)를 만족시키지 못하는 경우, 목표 신뢰도 달성을 위한 추가 시험 횟수(발수)를 추정한다.

#### 3.1 추가 가정

제 2.2절의 가정에 추가 가정은 다음과 같다.

- 1) 체계 단위의 신뢰도성장 시험을 수행한다.
- 2) 신뢰도성장 시험을 위해 FAT에서 1발, DT/OT에서 각 5

발씩 총 11발을 발사한다.

- 3) 목표 신뢰도(명중률)는 0.9이다.

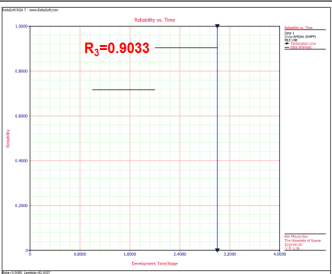
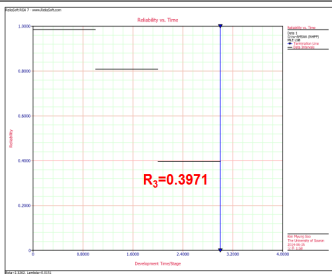
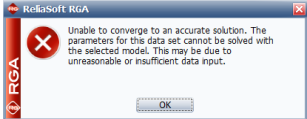
#### 3.2 예측범위 및 방법

$M_1, M_2, M_3$ 를 각각 FAT, DT/OT에서의 실패 횟수라 하자. FAT에서 1발( $M_1$ ), DT에서 5발( $M_2$ ), 그리고 OT에서 5발( $M_3$ )을 발사하므로  $M_1$ 은 2가지,  $M_2$ 는 6가지,  $M_3$ 는 6가지의 경우가 발생하며 이를 조합하면 총 72가지 경우가 발생한다. 한편,  $M_2, M_3 \geq 4$ 인 경우에 신뢰도성장 예측은 현실적으로 의미가 없다고 생각되어 본 연구에서는  $M_1 = 0, 1$ 이고,  $M_2, M_3 \leq 3$ 인 경우에 대하여 신뢰도성장을 예측한다. 신뢰도성장 예측은 Reliasoft RGA 7을 이용하였고, 적합한 Data Type으로 Developmental > Discrete Data > Grouped per Configuration을 적용하였다.

#### 3.3 신뢰도성장 예측 결과

본 절에서는 AMSAA 모델을 적용한 ○○○ 체계의 신뢰도 성장 예측 결과를 제시한다.  $M_1, M_2, M_3$  값을 조합한 경우에 대하여 AMSAA 모델의  $\beta$  및  $\lambda$ 와 성장률, 신뢰도성장 곡선을 추정하였다. <그림 1>은 대표적인 3가지 경우 ( $M_1, M_2, M_3$ ) = (1, 1, 1), (0, 1, 3), (0, 0, 2)일 때의 신뢰도성장 예측 결과를 예시한 것으로, 그 내용은 다음과 같다.

- 1) ( $M_1, M_2, M_3$ ) = (1, 1, 1)인 경우,  $\hat{\beta} = 0.0085, \hat{\lambda} = 92.004$ , 성장률은 0.9915로 추정되어 신뢰도가 성장되고 있다고 할 수 있다.
- 2) ( $M_1, M_2, M_3$ ) = (0, 1, 3)인 경우는  $\hat{\beta} = 2.3262, \hat{\lambda} = 0.015$ , 성장률은 -1.3262로 추정되어 신뢰도가 성장되지 않고 감소하고 있음을 알 수 있다.
- 3) ( $M_1, M_2, M_3$ ) = (0, 0, 2)인 경우는 AMSAA 모델 모수를 추정하기에 입력 데이터가 적합하지 않은 것으로 나타났다.

경우	$(M_1, M_2, M_3) = (1, 1, 1)$	$(M_1, M_2, M_3) = (0, 1, 3)$	$(M_1, M_2, M_3) = (0, 0, 2)$
$\hat{\beta}$	0.0085	2.3262	-
$\hat{\lambda}$	92.004	0.015	-
성장률	0.9915	-1.3262	-
신뢰도 성장 곡선			

<그림 1> ○○○ 체계의 신뢰도성장 예측 결과 예시

AMSAA 모델을 적용한 신뢰도성장 예측 결과를 종합하면 <표 1>과 같다. 표에서  $\square$ 는 AMSAA 모델의 적용이 불가능한 경우를,  $\square$ 는 신뢰도가 성장하는 경우,  $\square$ 는 신뢰도가 성장하지 않는 경우를 나타내고, 각 셀의 숫자는 단계 3의 신뢰도 추정치이다. 모델 적용이 불가능한 경우는 입력 데이터가 모델 추정에 적합하지 않아서 그런 것으로 판단되며, 모델 적용이 불가능하다는 것이 목표 신뢰도(명중률)를 만족시키지 못함을 의미하지는 않는다.

<표 1> ○○○ 체계의 신뢰도성장 예측 결과 종합

$M_1$	$M_3 \backslash M_2$	0	1	2	3
0	0	$\square$	0.9241	0.8453	0.7634
	1	$\square$	0.7737	0.7111	0.6373
	2	$\square$	0.5914	0.5554	0.4995
	3	$\square$	0.3971	0.3808	0.3477
1	0	$\square$	0.9479	0.892	0.8298
	1	0.9528	0.9033	0.8505	0.7922
	2	0.9116	0.8643	0.8144	0.7593
	3	0.7387	0.8193	0.7715	0.6998

$\square$  모델적용불가    $\square$  성장    $\square$  비성장  
 ※ 표 안의 숫자 : 단계 3의 신뢰도 추정치

3.4 추가 시험 횟수 결정

신뢰도성장 시험 결과 목표 신뢰도를 만족하지 못하였을 때, 목표 신뢰도(명중률)를 만족할 수 있는 추가 시험 횟수(발수)를 결정하는 것이 필요하다.

1회의 추가시험으로 목표 신뢰도 만족을 위한 추가 시험 횟수(발수)를 결정하기 위해  $K=3$ 번째 형상까지의 성장 패턴이  $K+1=4$ 번째 형상까지 성립한다고 가정한다. 즉,  $R_3$  추정에 사용된  $\hat{\lambda}$ 와  $\hat{\beta}$ 을  $R_4$  추정에도 적용할 수 있다. 따라서  $\hat{\lambda}$ 와  $\hat{\beta}$  및  $T_3$ 가 주어졌을 때,  $R_4$ 는 추가 시험 횟수  $N_4$ 의 함수로 식(9)와 같이 표현된다.

$$R_4 = 1 - f_4 = 1 - \frac{\lambda(T_3 + N_4)^\beta - \lambda T_3^\beta}{N_4} \quad (9)$$

따라서 식(9)에서  $R_4$ 가 목표 신뢰도 0.9 이상이 되는 최소의  $N_4$ 가 추가 시험 횟수가 되며,  $N_4$ 를 변화시키면서  $R_4$ 의 값을 수치적으로 계산하여 구할 수 있다. <표 2>는 목표 신뢰도를 만족하기 위한 추가 시험 횟수를 요약한 것으로, 표에서  $\infty$ 는 시료 수가 30 이상임을 의미한다. 예를 들어, <표 1>에서  $(M_1, M_2, M_3) = (1, 1, 2)$ 인 경우 단계 3의 신뢰도  $R_3$ 의 추정치는 0.8643이다.  $R_4$ 가 0.9 이상이 되기 위한 추가 시험 횟수는 <표 2>에서 1이며, 단계 4에서 1발을 시험하여 성공하면 단계 4의 신뢰도가 0.9047로 0.90 이상이 됨을 확인할 수 있다.

<표 2> 목표 신뢰도 0.9를 만족하기 위한 추가 시험 횟수

$M_1$	$M_3 \backslash M_2$	0	1	2	3
0	0	$\square$	(0.9241)	$\infty$	
	1	$\square$			
	2	$\square$			
	3	$\square$			
1	0	$\square$	(0.9479)	1	
	1	(0.9528)	(0.9033)	3	
	2	(0.9116)	1	11	
	3				

$\square$  모델적용불가    $\square$  성장    $\square$  비성장  
 ※  $\infty$ 는 시료 수가 30 이상임을 의미함.  
 ※ ( )안의 숫자는 단계 3의 신뢰도 추정치임.

4. 결론

본 연구에서는 시험시간이 시행 또는 발수와 같이 이산형으로 측정되는 일회성 체계에 대한 신뢰도성장 예측을 다루었다. 체계 개발은 3개 형상으로 구성되며, 각 형상별 시험 횟수가 FAT에서 1발, DT/OT에서 각 5발씩 총 11발을 발사하는 경우, FAT 및 DT/OT에서의 실패 횟수를 상정하고 AMSAA 모델의 모수와 형상 3의 신뢰도를 예측하였다. 또한, 신뢰도성장 예측 결과가 목표 신뢰도(명중률)를 만족시키지 못하는 경우, 목표 신뢰도 달성을 위한 추가 시험 횟수(발수)를 결정하였다. 본 연구 결과는 신뢰도성장 시험에서 나타날 수 있는 모든 가능한 결과들을 시험 전에 고려함으로써 개발 중인 ○○○ 체계의 목표 신뢰도 달성을 위한 필요조건을 미리 확인할 수 있고, 목표 미달시 추가시험에 필요한 시험 횟수로부터 추가시제 제작에 필요한 부품조달, 예산 확보 등 개발 프로젝트 관리에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

- [1] 김명수 · 정재우 · 이종신(2013), MIL-HDBK-189C의 신뢰성 성장 평가 모델의 비교, 신뢰성응용연구, 제13권, 제3호, pp. 217-227.
- [2] 박찬경 · 서승일 · 이태형 · 최성훈 · 김기환(2006), 한국형고속열차 차량시스템의 신뢰성 성장 평가, 한국철도학회 논문집, 제9권, 제5호, pp. 606-611.
- [3] 한석윤 · 이안호 · 하천수 · 이호용 (2005), 한국형경량전철시스템(K-AGT) 신뢰성 성장 평가에 관한 연구, 한국철도학회 논문집, 제8권, 제6호, pp. 597-601.
- [4] AMSAA (2011), MIL-HDBK-189C: Reliability Growth

- Management.*
- [5] Duane, J. T. (1962), Learning Curve Approach To Reliability Monitoring, *IEEE Transactions on Aerospace*, Vol. 2, pp. 563-566, 1964.
- [6] Evans, J. W., Kaminskiy, M. P., and Gallo, L. D. (2012), Reliability Growth Analysis of Satellite Systems, *Annual Conference of Prognostics and Health Management Society*, pp. 1-7.
- [7] Panchangam, S. P. and Naikan, V. N. A. (2012), Application of Reliability Growth Models to Sensor Systems, *RT&A*, Vol. 7, pp. 19-30.
- [8] Spinato, F., Tavner, P., and Bussel, G. (2007), Reliability-Growth Analysis of Wind Turbines from Fleet Field Data, *ARTS Conference*, Loughborough.
- [9] Sun, A. and Kee, E. (2005), Application of CROW- AMSAA Analysis to Nuclear Power Plant Equipment Performance, *13th International Conference on Nuclear Engineering*, pp. 1-6.
- [10] [http://reliawiki.org/index.php/Crow-AMSAA\\_\(NHPP\)#Grouped\\_per\\_Configuration](http://reliawiki.org/index.php/Crow-AMSAA_(NHPP)#Grouped_per_Configuration).