

# 신뢰성성장시험 중 발생한 신뢰성성장률 변화를 고려한 고장 평가과정 및 평가방법 개선에 대한 연구

소영국<sup>1\*</sup> · 전영록<sup>2</sup> · 류병진<sup>3</sup>

<sup>1</sup>경남대학교/볼보건설기계, <sup>2</sup>경남대학교 기계공학과, <sup>3</sup>볼보건설기계

## Assessing Process and Method Improvement of Reliability Growth Test Data with Growth Rate Changing During Testing

Young-Kug So<sup>1</sup> · Young-Rok Jeon<sup>2</sup> · Byeong-Jin Ryu<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Kyungnam University/Volvo Construction Equipment,

<sup>2</sup>Mechanical Engineering, Kyungnam University,

<sup>3</sup>Volvo CE

Reliability test is focusing to detect the unexpected reliability failure and solve them for the high quality of products. The test data should be used to assess and project the current level of interesting product reliability and so it is very important to have the accurately assessing methodology with test data. There are two type of trend for test data as constant and changing one during testing and this paper shows the difference in the assessing results of these two cases. There is less information how to define the existence of reliability growth rate changing and calculate the parameters of the reliability growth models to make an accurate assessment with such condition, so i established the process and mathematical model to calculate the parameters at such condition to make reliability growth curve with high Goodness of Fit. I validated the new method with the data made from Monte Carlo Simulation and case from Demko (1993). Even the assessed result with the new methodology may be different with the case by case because of very diversity in test condition and testing product quality, but the process and method founded in this research can be applied to any case using Duane and AMSAA model for their test data assessment. I also present the evaluation method to see the effectiveness with new one which is a conventional knowledge and not popular to use, so it is possible to compare the results with the newly presented and conventional method for better business decision.

**Keywords:** Reliability Growth Test, Reliability Growth Rate, Regression, Least Square Method, Duane Model, AMSAA Model, Maximum Likelihood Estimation

### 1. 서론

제품개발을 위한 신뢰성성장과정은 소영국(2013)과 RADC-TR-84-20(1984)에서 기술되었듯 시험, 고장분석, 시정조치(Test-Analysis-And-Fix : TAAF)로 구성되며, 제품설계 및 공정설계에서 예측하지 못했던 고장을 신뢰성성장시험을 통해 확인 및 해결하면서 목표한 신뢰성 수준에 도달해가는 과정이다. 신뢰성성장시험에서 고장정보를 보다 정확히 평가할 수 있어야

정확한 개발방향을 잡을 수 있다. 신뢰성성장시험의 고장정보를 분석해 보면 크게 두 가지 유형이 있는데, 시험 진행 중에 일정한 성장률을 유지하는 경우와 성장률이 변하는 경우이다. 성장률이 변하는 경우는 고장정보에 대한 신뢰성성장모형곡선의 적합도(Goodness of Fit)가 낮아져, 그 곡선을 이용한 신뢰도평가 및 예측결과에 많은 오차가 발생하게 된다. Codier (1968)와 Dwyer(2009)는 위와 같은 성장률변화가 일반적인 것이고, 또한 많은 문제점을 갖게 됨을 지적하였다. 본 연구에서

\* 교신저자 youngkug.so@volvo.com

2014년 3월 14일 접수; 2014년 4월 23일 수정본 접수; 2014년 5월 15일 게재 확정.

분석한 건설장비의 신뢰성성장시험들의 90% 이상이 유사한 경향을 보여주었다. 본 연구는 수리계 제품에 대표적으로 적용되는 Duane 모형(1964) 및 AMSAA 모형(1974)을 이용하여 고장정보를 보다 정확히 평가하는 분석과정과 방법을 찾고자 하였으며, 특히 성장률이 변하는 경우에 중점을 두었다

일정한 성장률을 신뢰성성장시험에 대한 연구 결과들로 Kumaraswamy(2002)는 헬기개발결과를 Duane 모형으로 평가 및 성장률이 일정하게 유지됨을 확인하였고 이호영 외(2005)는 한국형경량전철시스템의 신뢰성성장의 고장정보에 AMSAA 모형을 적용하여 신뢰성성장 여부를 판단하였다. 이영은 외(2010)는 KA-1 항공기개발의 고장정보를 Duane과 AMSAA 모형으로 평가 및 신뢰성성장을 확인하였다.

성장률이 변하는 경우의 사례연구로는 Petit(1982), Peck(1985), Barringer(2002)가 있었으며, 최성훈 외(2006)는 한국형고속열차의 차량시스템개발결과의 평가에서 Duane 모형이 초기 고장에 영향을 많이 받는 한계를 지적하였다. Donovan과 Murphy(1999)도 동일한 지적과 개선책을 제시하였다. MIL-STD-1635(1978)는 성장률이 변하는 경우에 Duane 모형의 적용상의 한계점과 그 대안으로 이동평균법(Moving Average)을 제시하였다. Demko(1993)의 경우 Duane과 AMSAA 모형을 이용하여 성장률이 변하는 경우에 초기의 고장을 하나씩 제거해 가면 적합도를 높이는 방법을 제시하였으나, 성장률변화가 크거나 변화가 여러 번 있는 경우에 적용의 어려움이 있다 Dwyer(2009)는 시험 후반부 고장에 가중치를 주는 방식을 제안하였으나, Demko(1993)의 연구 결과와 같은 한계를 보인다. 이와 같이 성장률변화가 있는 경우에 고장정보의 평가방법을 개선하기 위한 많은 연구가 있었으나, 성장률변화의 확인 방법 및 신뢰성성장모형 곡선의 적합도를 높일 수 있는 방법이 구체적으로 제시되지는 않았다.

여러 참고 자료와 본 연구자가 참여한 SUV, 버스, 트럭, 각종 건설장비의 개발 경험에 따르면 개발 초기의 고장정보보다는 최근에 발생하는 고장들이 후속 개발 과정 및 양산품 품질에 지대한 영향을 주는 것을 확인하였고, 초기 고장 보다는 최근에 발생하는 고장정보를 바탕으로 시장의 품질을 예측한 경우가 오차가 적다는 것을 경험과 여러 연구 결과를 통해서 확인할 수 있다

본 연구에서는 일반적인 신뢰성성장시험에서 나타날 수 있는 성장률변화가 발생하였을 경우에 수리계 시스템에 대표적으로 쓰이는 Duane 및 AMSAA 모형을 이용한 고장정보의 평가방법에 대해서, 두 모형을 가지고 최근의 고장정보를 반영한 평가방법을 제시한 논문으로 기존 연구 사례의 시험결과를 이용함으로써 본 연구의 결과의 개선점에 대한 객관성을 확보하였다. 특히 성장률(또는 기울기)이 변하는 경우에 대해서 기존의 신뢰성성장시험의 평가방법보다 체계적인 분석과정과 평가방법을 포함한다. 제 2장은 신뢰성성장의 시험정보에 대한 기본적인 평가방법을 소개하고, 제 3장에서는 본 연구를 통해서 개선된 고장정보의 분석과정 및 평가과정을 제안한다. 제 4장에서는 본 연구 결과의 적용 사례를 소개한다.

## 2.2 신뢰성성장시험정보(또는 시험결과)에 대한 평가방법

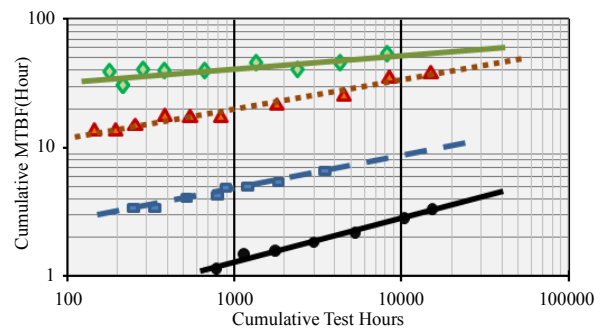
MIL-HDBK-189C(2009)에 의하면 신뢰성성장시험에서의 가장 중요한 항목은 고장정보를 보다 정확히 평가할 수 있어야 하며, 그 평가결과를 바탕으로 개발 과정이 계획대로 진행되고 있는지를 판단한다. 또한 그 결과는 개발제품의 신뢰성 수준을 예측하는 데 이용되기 때문에 고장정보에 대한 정확한 평가방법을 갖는 것은 매우 중요하다. 이 절에서는 기존의 신뢰성성장 평가방법을 이용한 성장률이 고정인 경우와 변하는 경우의 고장정보를 분석한 결과와 그 한계를 보여줄 것이다

### 2.1 신뢰성성장모형

신뢰성성장시험에서 얻은 고장정보를 평가하기 위해서는 먼저 신뢰성성장모형이 선정되어야 한다 Hall(2008)과 MIL-STD-189C(2009)에 따르면 제품의 고장특성 및 적용목적에 따라 30여 개의 모형이 존재한다. 본 연구에서는 자동차나 건설장비 등의 수리계 제품에 대표적으로 사용되는 Duane 모형과 AMSAA 모형을 고장정보 분석을 위한 기본 모형으로 선정하였다

#### 2.1.1 Duane 모형

GE에서 근무하던 Duane이 제안한 Duane 모형(1964)은 <그림 1>에서와 같이, 여러 전자 제품의 개발결과가 누적 고장간 평균시간(MTBF, Mean Time Between Failures)과 누적시험시간의 축에서 대수선형관계를 이루고 있음을 확인하고 이를 식 (1)의 형태로 나타내었다.



<그림 1> Duane 모형을 적용한 신뢰성성장시험 평가결과

그 모형은 고장이 포아송 과정에 따라 발생하는 시스템에 적합하며 누적 MTBF인,  $M_c$ ,

$$M_c(T) = bT^\alpha \quad (1)$$

가 된다. 여기서 T는 누적시험시간, b는 초기성장시작 MTBF와 관련한 상수이며,  $\alpha$ 는 신뢰성성장률(또는 성장곡선의 기울기)로써 MIL-STD-1635(1978)과 O' Connor(2007)는 정상적

인 신뢰성성장인 경우 0.2에서 0.6까지가 적정함을 기술하였다. 식 (1)의 양변에 대수를 취하면

$$\ln[M_c(T)] = \ln(b) + \alpha \ln(T) \quad (2)$$

이 되어 MTBF와 누적시험시간이 대수선형관계임을 확인된다. T에서 순간MTBF인,  $M_i(T)$ 는

$$M_i(T) = M_c(T)/(1-\alpha) \quad (3)$$

로 구하고, 그 값이 신뢰성성장목표와 비교되며 평가시점에서의 신뢰성 수준 예측 값이다. 위 모형의 매개변수인 신뢰성성장률(a)과 상수(b)를 구하는 데는 MIL-STD-189A(1981)에서와 같이 그래프를 이용하는 방법과 회귀추정을 이용하는 방법이 있다. 먼저 그래프를 이용하는 방법은 누적 MTBF를 대수-대수 용지에 타점한 점들을 대표할 수 있는 최적의 직선을 찾고, 그 선의 기울기와 직선과 y-축이 만나는 점으로 한다. 회귀추정에 의한 방법은 최소제곱법을 사용하여 매개변수인

$$\hat{\alpha} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \{\ln(T_i) \ln(M_{ci})\} - \left\{ \sum_{i=1}^n \ln(T_i) \sum_{i=1}^n \ln(M_{ci}) \right\} / n}{\sum_{i=1}^n \ln(T_i)^2 - \left\{ \sum_{i=1}^n \ln(T) \right\}^2 / n} \right] \quad (4)$$

$$\hat{b} = e^{\left[ (1/n) \left\{ \sum_{i=1}^n \ln(M_{ci}) - \hat{\alpha} \sum_{i=1}^n \ln(T_i) \right\} \right]} \quad (5)$$

가 되고. 여기서 n은 총 고장수,  $M_{ci}$ 와  $T_i$ 는 각 고장까지의 누적 MTBF와 누적시험시간이다.

**2.1.2 AMSAA 모형**

AMSAA 모형은 Duane 모형의 확률적 확장형으로 Crow(1974)에

<표 1> 일정한 성장률을 갖는 고장정보

Failure Number	Test Time	Cumulative Failure Number	ln(Tc)	ln(Tc)^2	Mc	ln(Mc)	ln(Tc) × ln(Mc)	Duane Value	AMSAA Value	Duane Error	AMSAA Error
1	33	1	3	12.1	32.6	3.5	12.1	19.9	23.9	12.7	8.7
1	88	2	4	20.0	44.0	3.8	16.9	35.5	42.3	8.4	1.7
1	92	3	5	20.5	30.7	3.4	15.5	36.5	43.4	-5.8	-12.7
1	193	4	5	27.7	48.2	3.9	20.4	56.2	66.4	-8.1	-18.2
1	261	5	6	31.0	52.3	4.0	22.0	67.2	79.1	-14.9	-26.8
1	449	6	6	37.3	74.9	4.3	26.4	92.2	108.1	-17.3	-33.1
1	838	7	7	45.3	119.7	4.8	32.2	132.7	154.6	-13.0	-34.9
1	916	8	7	46.5	114.5	4.7	32.3	139.8	162.7	-25.3	-48.2
1	1,408	9	7	52.6	156.4	5.1	36.6	179.7	208.2	-23.3	-51.9
1	2,445	10	8	60.9	244.5	5.5	42.9	248.1	286.0	-3.7	-41.6
1	3,490	11	8	66.5	317.2	5.8	47.0	305.5	351.0	11.8	-33.7
1	4,805	12	8	71.9	400.4	6.0	50.8	368.2	421.8	32.1	-21.4
1	6,122	13	9	76.0	470.9	6.2	53.7	424.2	484.8	46.7	-13.9
1	8,860	14	9	82.6	632.9	6.5	58.6	526.5	599.6	106.3	33.3
1	9,178	15	9	83.3	611.9	6.4	58.5	537.5	611.9	74.4	0.0
Sum	9,178	15	101.6	734.2	3,350.9	73.7	526.0				
								Average		12.1	-19.5

의해서 발견되었으며, 각 고장간시간이 비동질적 포아송과정으로 발생하는 경우의 모형이다. 그 모형의 누적 MTBF,  $M_c$ 는

$$M_c(T) = T^{(1-\beta)}/\lambda \quad (6)$$

이다. 여기서 T는 누적시험시간이며,  $\lambda$ 와  $\beta$ 는 각각 와이블과정을 따르는 분포의 척도모수와 형상모수이다. Crow(1974)과 MIL-HDBK-189A(1981)을 참고하면 식 (6)의 양변에 대수-대수를 취하면 AMSAA 모형의 곡선은 직선이 되고,  $(1-\beta)=\alpha$ 와  $1/\lambda=b$ 의 관계가 수립될 수 있다. 식 (6)으로부터 순간MTBF,  $M_i(T)$ 는

$$M_i(T) = T^{(1-\beta)}/(\lambda\beta) \quad (7)$$

가 된다. AMSAA 모형의 매개변수는 Crow(1974)과 MIL-HDBK-189A(1981)에 의하면 형상모수와 척도모수는 그래프를 이용한 방법과 최우추정법을 이용할 수 있으며 최우추정법을 이용하면

$$\hat{\beta} = n / \left[ n \ln(T) - \sum_{i=1}^n \ln(T_i) \right] \quad (8)$$

$$\hat{\lambda} = n / T^{\beta} \quad (9)$$

가 된다.

**2.2 신뢰성성장시험결과 평가방법**

**2.2.1 일정한 성장률을 갖는 고장정보의 평가결과**

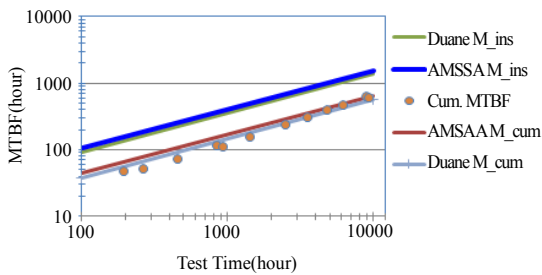
MIL-STD-1635(1978)에서 일정한 성장률을 갖는 조건을 참고하여 <표 1>과 같은 고장정보를 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 만들었다. 그 조건은 성장률과 형상모수가 0에서 1

사이이며, 1만의 시험시간 동안 15개의 고장이 있는 경우다. 고장정보와 식(4), 식(5), 식(8), 식(9)를 이용하여 각 모형의 매개변수들을 구해보면,  $\hat{\alpha} = [526.0 - \{101.6 \times 73.7\} / 15] / [734.2 - \{101.6\}^2 / 15] = 0.584$ ,  $\hat{b} = e^{\{(1/15)\{73.7 - 0.584 \times 101.6\}\}} = 2.600$ ,  $\hat{\beta} = 15 / [15 \times 9.1 - 101.6] = 0.425$ ,  $\hat{\lambda} = 15 / 9178^{0.425} = 0.310$  이 된다. 다음으로 그 값들을 식(1), 식(3), 식(6), 식(7)에 넣으며 Duane 모형의 누적/순간 MTBF는  $M_c(T) = 2.6 T^{0.584}$ ,  $M_i(T) = M_c(T) / (1 - 0.584)$  가 되고, AMSAA 모형은  $M_c(T) = T^{(1-0.425)} / 0.310$ ,  $M_i(T) = T^{(1-0.425)} / (0.310 \times 0.425)$  가 된다. 각 식의 T에 시험중단 시간인 9178을 넣으면 <표 2>와 같은 결과를 얻을 수가 있다. 또한 이를 바탕으로 <그림 2>와 같은 그래프를 구할 수 있으며,

<표 2> 일정 성장률의 고장정보 평가결과

Duane 모형				AMSAA 모형			
$\alpha$	b	$M_c$	$M_i$	$\beta$	$\lambda$	$M_c$	$M_i$
0.584	2.6	537	1293	0.425	0.292	612	1439

두 모형의 곡선들이 상당히 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.



<그림 2> 일정한 신뢰성성장률의 고장정보 대한 Duane 및 AMSAA 모형 곡선

<표 3> 변하는 성장률을 갖는 고장정보

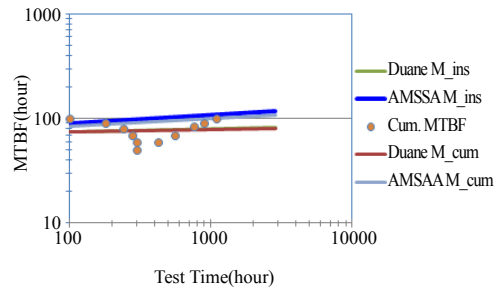
Failure Number	Test Time	Cumulative Failure Number	$\ln(T_c)$	$\ln(T_c)^2$	$M_c$	$\ln(M_c)$	$\ln(T_c) \times \ln(M_c)$	Duane Value	AMSAA Value	Duane Error	AMSAA Error
1	100	1	4.6	21.2	100.0	4.6	21.2	73.7	83.3	26.3	16.7
1	180	2	5.2	27.0	90.0	4.5	23.4	74.7	87.1	15.3	2.9
1	240	3	5.5	30.0	80.0	4.4	24.0	75.2	89.1	4.8	-9.1
1	280	4	5.6	31.8	70.0	4.2	23.9	75.4	90.1	-5.4	-20.1
1	300	5	5.7	32.5	60.0	4.1	23.4	75.5	90.6	-15.5	-30.6
1	300	6	5.7	32.5	50.0	3.9	22.3	75.5	90.6	-25.5	-40.6
1	420	7	6.0	36.5	60.0	4.1	24.7	76.1	92.9	-16.1	-32.9
1	560	8	6.3	40.0	70.0	4.2	26.9	76.6	95.0	-6.6	-25.0
1	760	9	6.6	44.0	84.4	4.4	29.4	77.1	97.2	7.3	-12.8
1	900	10	6.8	46.3	90.0	4.5	30.6	77.4	98.5	12.6	-8.5
1	1,100	11	7.0	49.0	100.0	4.6	32.3	77.8	100.0	22.2	0.0
Sum	11,000	11	65.1	390.9	854.4	47.6	282.1		Average	1.8	-14.5

2.2.2 성장률이 변하는 경우의 고장정보 평가결과

Codier(1968), MIL-STD-1635(1978), Donovan과 Murphy (1999), Dwyer(2009)에 의하면 신뢰성성장시험 중에 성장률이 변하는 것은 일반적이고, 본 연구자가 참여한 수십여 차례의 차량 및 건설장비 개발결과와 80% 이상이 위와 같은 경향을 보였다. 본 연구에서는 그 사례로 Demko(1993)의 연구에서 <표 3>와 같은 고장정보를 가지고 왔다. 해당 정보가 보여주는 경향은 현재 산업 현장에서도 볼 수 있는 대표적인 사례이다. 그 분석방법은 앞선 제 2.1.3절의 내용을 따르며, <표 4>와 같은 결과를 얻을 수 있으며, 그 결과로 <그림 3>과 같은 그래프를 구할 수 있다.

<표 4> 변하는 성장률의 고장정보 평가결과

Duane 모형				AMSAA 모형			
$\alpha$	b	$M_c$	$M_i$	$\beta$	$\lambda$	$M_c$	$M_i$
0.022	66	78	80	0.924	0.017	100	108



<그림 3> 변하는 신뢰성성장률 고장정보 대한 Duane 및 AMSAA 모형 곡선

그 그래프를 보면 육안으로 확인해 보면 앞선 제 2.1.3절의 결과와 다르게 두 모형의 곡선들과 고장정보의 점들이 많이

떨어져 있는데, 즉 두 모형의 곡선들이 고장정보를 충분히 반영하지 못함을 의미하며, 신뢰성성장모형곡선들의 적합도가 많이 떨어짐을 말하기도 한다. 만일 그와 같이 적합도가 많이 떨어지는 성장모형곡선을 가지고 개발제품의 품질을 평가 및 시장품질을 예측한다면 많은 오류를 유발할 가능성이 커지기 때문에 그 결과들을 신뢰하기 어렵다. 위의 문제를 해결하기 위해서는 성장률의 변화를 갖는 고장정보에 대해서 성장모형곡선의 적합도를 높일 수 있는 방법을 찾아야 한다.

### 3. 신뢰성성장률이 변하는 경우의 평가과정과 방법

이 절에서는 본 연구를 통해서 얻어진 신뢰성성장률 변화의 발생 여부를 확인하고 처리해 나가는 일련의 과정과 성장률이 변하는 경우에 적용할 수 있는 개선된 평가방법을 제안할 것이다. 특히 성장률변화가 있을 시에 고장정보에 대한 신뢰성성장모형곡선의 적합도를 끌어 올리는 방법 및 그 결과의 효과를 확인할 수 있는 기준 제시를 포함한다.

#### 3.1 신뢰성성장률

대수-대수의 누적시험시간 및 누적 MTBF 그래프에서 Duane 이나 AMSAA 모형으로 그린 직선의 기울기가 신뢰성성장률이다. 앞선 제 2.1.2절에서 설명하였듯이 두 모형은 동일한 형태를 취하고 있으며, 그 기울기에 관여하는  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 선형 관계를 갖는다. 그 기울기에 영향을 주는 인자들에 대해서 MIL-STD-1635(1978)는 고장모드를 완전히 제거하는 능력과 제거 속도, 고장 제거 효율 등을 제시하였고 신뢰성성장시험 중에 성장률이 변하게 하는 인자들에 대해서 Codier(1968)는 고장 분포의 비대칭성, 고장 해결책 불완전성, 여러 장비를 시험할 시에 각 고장 발생 시간의 불일치와 각 고장의 해결책 적용 시점의 차이, 시험 중에 발견하지 못한 고장들을 그 원인으로 삼았다. 이처럼 성장률(기울기)을 변화시키는 요인은 현실적으로 너무나 많으며, 개발 기간 단축 및 비용감축 등의 어려움 속에 그 발생 가능성은 더욱 높아지고 있다.

#### 3.2 신뢰성성장률이 변하는 경우의 개선된 분석과정 및 방법

이 절에서는 본 연구를 통해서 수립된 신뢰성성장률이 변화 확인 방법과 기준, 성장률변화가 있을 시에 변화시점의 선택방법, 그리고 그 점을 기준으로 적합도가 높은 신뢰성성장모형곡선들을 만들기 위한 방안을 제시하고 있다. 또한 그 효과를 판단하기 위한 기준도 정리하였다.

(1) 성장률변화 발생 판단 및 변화시점 선택 : 누적 MTBF와 누적시험시간의 대수-대수 그래프 상에 실제 고장정보를

타점하고, 식 (1)에서 식 (9)까지를 이용하여 두 모형의 매개변수와 누적/순간MTBF를 계산한다. 다음으로는 대수-대수 그래프 상에 각 성장모형곡선들을 그린다. <그림 3>과 같이 시간에 따른 고장정보의 추세(또는 기울기)가 특정 시점을 기준으로 바뀌면 그 점을 일단 변화시점으로 간주하고 그 시점을 기준으로 설계변경 및 고장들의 해결책 적용 여부, 그리고 그 지점 이후로 최소 3개 이상의 고장정보가 일정한 기울기보여준다면 최종적으로 변화시점으로 간주한다. 추가적으로 아래 부분의 [4]에서 보여줄 적합도 평가결과도 포함하여 변화시점을 고려한 고장정보 분석의 필요성을 결정한다.

(2) 영역 1에서 신뢰성성장모형들의 매개변수 및 MTBF 계산 : 본 연구에서는 변화점이 하나인 경우를 고려하였다. 비록 시험 중에 여러 번의 변화점이 존재할 수 있으나, 현재 개발품의 품질상태에 대한 정확한 판단은 고장정보의 후반부(최근)의 정보만이 필요하기 때문에 정확한 변화시점 선택은 매우 중요하다. 영역 1의 Duane 모형 매개변수들은 식 (4)와 식 (5)를 그대로 적용하면

$$\hat{\alpha}_1 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^{n_1} \{\ln(T_{1i})\ln(M_{cli})\}}{\left\{ \sum_{i=1}^{n_1} \ln(T_{1i}) \sum_{i=1}^{n_1} \ln(M_{cli}) \right\} / n_1} \right] \quad (10)$$

$$/ \left[ \frac{\sum_{i=1}^{n_1} \ln(T_{1i})^2 - \left\{ \sum_{i=1}^{n_1} \ln(T_{1i}) \right\}^2 / n_1} \right]$$

$$\hat{b}_1 = e^{\left[ (1/n_1) \left\{ \sum_{i=1}^{n_1} \ln(M_{cli}) - \hat{\alpha}_1 \sum_{i=1}^{n_1} \ln(T_{1i}) \right\} \right]} \quad (11)$$

와 같다. 여기서  $n_1$ ,  $T_{1i}$ ,  $M_{cli}$ 은 변화시점까지의 누적고장수, 각 고장 시점의 누적시험시간과 누적 MTBF이다. 또한 AMSAA 모형을 위한 매개변수를 구하는 식들은 식 (8), 식 (9)를 그대로 사용하면

$$\hat{\beta}_1 = n_1 / \left[ n_1 \ln(T_1) - \sum_{i=1}^n \ln(T_{1i}) \right] \quad (12)$$

$$\hat{\lambda}_1 = n_1 / T_1^{\beta_1} \quad (13)$$

가 된다. 여기서  $T_1$ 은 변화시점까지의 누적시험시간이다. 이 매개변수들을 식 (1), 식 (3), 식 (6), 식 (7)에 넣어서 각 모형들의 누적/순간MTBF 구한다.

(3) 영역 2에서 신뢰성성장모형들의 매개변수 및 MTBF 계산 : 영역 2에서의 매개변수들을 계산하기 위해서는 영역 1의 시험결과를 제거하지 않는다. 그 결과가 영역 2의 계산에 반영되어야 변화시점을 기준으로 연속적인 곡선을 만들 수가 있다. 영역 2에서 Duane 모형의 매개변수들은 변화시점 이후의 각 고장시간 및 고장수를 식(10)과 식 (11)에 대입해주면

$$\hat{\alpha}_2 = \frac{\sum_{2i=1}^{n_2-n_1} \{\ln(T_{2i})\ln(M_{c2i})\} - \left\{ \sum_{2i=1}^{n_2-n_1} \ln(T_{2i}) \sum_{2i=1}^{n_2-n_1} \ln(M_{c2i}) \right\} / (n_2-n_1)}{\left[ \sum_{2i=1}^{n_2-n_1} \ln(T_{2i})^2 - \left\{ \sum_{2i=1}^{n_2-n_1} \ln(T_{2i}) \right\}^2 / (n_2-n_1) \right]} \quad (14)$$

$$\hat{b}_2 = e^{\left\{ 1/(n_2-n_1) \left[ \sum_{2i=1}^{n_2-n_1} \ln(M_{c2i}) - \hat{\alpha}_2 \sum_{2i=1}^{n_2-n_1} \ln(T_{2i}) \right] \right\}} \quad (15)$$

와 같이 구할 수 있다. 여기서,  $n_2, T_{2i}, M_{c2i}$ 은 변화시점 이후의 전체 고장수, 누적시험시간과 누적 MTBF 이다. AMSAA 모형을 위한 매개변수는 구하는 식들은 기존의 식 (8)과 식 (9)에, 영역 2에서의 고장수, 영역 1의 누적시험시간 대비 영역 2에서의 누적시험시간 등을 기입해 주면

$$\hat{\beta}_2 = (n_2 - n_1) / \left[ n_1 \ln(T_2/T_1) + \sum_{2i=1}^{n_2-n_1} \ln(T_2/T_{2i}) \right] \quad (16)$$

$$\hat{\lambda}_2 = n_2 / T_2^{\hat{\beta}_2} \quad (17)$$

과 같은 수식들을 얻을 수 있다. 여기서  $T_2$ 은 변화시점 이후 시험이 끝날 때까지의 누적시험시간이다. 매개변수들을 식 (1), 식 (3), 식 (6), 식 (7)에 넣어서 각 모형들의 누적순간 MTBF 구한다.

(4) 신뢰성성장모형의 적합도 평가단계 : 이 단계에서는 고장정보에 대한 성장모형곡선의 적합도를 계산하는 단계로 본 연구 결과 결정계수( $R^2$ )와 평균 MTBF 오차값이 가장 적합한 방법으로 확인됐다. 여기서 결정계수를 사용한 이유는 제 2.1.2절에 기술했듯이 대수-대수의 그래프에서 AMSAA 및 Duane 모형의 곡선은 직선의 형태로 동일하기 때문이다. 결정계수는 성장모형곡선이 시험결과를 얼마나 잘 대변하는지를 의미하며, 1(100%)에 가까울수록 적합도가 높다. 평균 MTBF 오차값은 Dwyer(2009)에 의해서 정립된 방법으로 각 고장의 누적 MTBF와 각 성장모형곡선의 값의 차에 대한 전체 평균을 구하는 것으로 그 오차값을 비교 평가할 수 있으며 그 값이 적을수록 오차가 적고 적합도가 높다고 볼 수 있다. <표 5>는 제 2.1.3절에서 예로 들었던 성장률변화가 없는 경우의 결과이다. 본 연구 결과 두 모형의  $R^2$ 이 평균 65% 이상이고, 평균 MTBF 오차의 평균이 30보다 적을 경우는 성장률 변화를 고려하지 않아도 되었다.

<표 5> 일정한 성장률의 고장에 대한 적합도 평가결과

Duane 모형		AMSAA 모형	
$R^2$	평균 MTBF 오차	$R^2$	평균 MTBF 오차
72%	12.06	79%	28.84

<표 6>은 제 2.1.4절에서 보여주었던 성장률이 변하는 경우의 분석결과이며, 앞선 사례보다 적합도가 매우 낮음을 확인할 수 있다. 그 이유는 시험 중에 성장률변화가 크게 발생하였기 때문이며, 이러한 경우 앞선 절차에 따라 적합도를 올리는 과정을 걸쳐야 한다.

<표 6> 변화는 성장률의 고장에 대한 적합도 평가결과

Duane 모형		AMSAA 모형	
$R^2$	평균 MTBF 오차	$R^2$	평균 MTBF 오차
2%	1.175	90%	-14.55

(5) 변화시점 전후의 신뢰성성장 곡선 도시화 : 위의 방법으로 얻어진 성장곡선을 고장정보 위에 그려서 그 적합도를 육안으로 확인해 본다. 특히 영역 2에서의 적합도가 높아야 한다.

#### 4. 적용 사례

이 절에서는 본 연구에서 가장 관심이 되는 신뢰성성장시험 중에 신뢰성성장률이 변하는 경우에 대해서 제 3장에서 기술한 성장률변화의 확인에서부터 적합도를 올리고 그 효과를 확인하는 과정과 방법을 실제 사례를 통해 보여줄 것이다. 여기서 사용된 사례는 제 2.1.4절의 <표 3>에 기술된 Demko (1993)의 연구 사례를 이용하였다.

(1) 성장률변화 발생 판단 및 변화시점 선택 : 대수-대수의 누적 MTBF와 누적시험시간 그래프에 고장정보를 찍은 <그림 3>을 보면 시험시간이 300시간에서 추세가 크게 변하는 것을 확인할 수 있으며, 고장정보를 분석해서 그런 신뢰성성장모형곡선들의 적합도가 많이 떨어져 보인다. 또한 평균  $R^2$ 를 계산한 <표 6>을 보면 평균 46%로 매우 낮기 때문에 성장률이 크게 변하고 있음을 알 수 있으며, 최근 고장정보에 대한 신뢰성성장모형곡선들의 적합도를 향상시키는 방법이 적용되어야 한다. 고장시간 300시간까지를 변화시점으로 간주하며, 그 시점을 기준으로 이전을 영역 1로, 이후를 영역 2로 구분한다. 기존의 고장정보를 <표 7>과 같이 정리할 수 있다.

(2) 영역 1에서 신뢰성성장모형들의 매개변수 및 MTBF 계산 : 고장시간 300시간까지의 고장정보와 식 (10)~식 (13)을 이용해 각 모형들의 매개변수들 값을 구하고, 그 결과들과 누적고장시간 300 시간을 식 (1), 식 (3), 식 (6), 식 (7)에 넣어서 MTBF를 구하면 <표 8>과 같다.

(3) 영역 2에서 신뢰성성장모형들의 매개변수 및 MTBF 계산 : 고장시간 300 시간 이후 종료되는 시점까지의 고장정보와 식 (14)~식 (17)을 이용해 영역 2에서의 Duane과 AMSAA 모형의 매개변수들은  $\hat{\alpha}_2 = [143,9 - \{32.8 \times 21.9\} / (11 - 6)] / [215.8 -$

<표 7> 변하는 성장률을 갖는 고장정보의 수정

	Failure Number	Test Time	Cumulative Failure Number	ln(T <sub>c</sub> )	ln(T <sub>c</sub> ) <sup>2</sup>	M <sub>c</sub>	ln(M <sub>c</sub> )	ln(T <sub>c</sub> ) × ln(M <sub>c</sub> )	Duane Value	AMSAA Value	Duane Error	AMSAA Error
Section 1	1	100	1	4.6	21.2	100.0	4.6	21.2	108.9	533.7	-8.9	-433.7
	1	180	2	5.2	27.0	90.0	4.5	23.4	80.6	150.4	9.4	-60.4
	1	240	3	5.5	30.0	80.0	4.4	24.0	69.6	80.9	10.4	-0.9
	1	280	4	5.6	31.8	70.0	4.2	23.9	64.3	58.0	5.7	12.0
	1	300	5	5.7	32.5	60.0	4.1	23.4	62.1	50.0	-2.1	10.0
	1	300	6	5.7	32.5	50.0	3.9	22.3	62.1	50.0	-12.1	0.0
	Sum 1	300	6	32.3	175.0	450.0	26.7	138.2		Average 1	0.4	-78.8
Section 2	1	420	7	6.0	36.5	60.0	4.1	24.7	60.3	61.8	-0.3	-1.8
	1	560	8	6.3	40.0	70.0	4.2	26.9	70.3	71.3	-0.3	-1.3
	1	760	9	6.6	44.0	84.4	4.4	29.4	82.7	83.1	1.7	1.3
	1	900	10	6.8	46.3	90.0	4.5	30.6	90.5	90.4	-0.6	-0.4
	1	1,100	11	7.0	49.0	100.0	4.6	32.3	100.7	100.0	-0.7	0.0
	Sum 2	11,000	11	32.8	215.8	404.4	21.9	143.9		Average 2	0.0	-0.4

$\{32.8\}^2 / (11 - 6) = 0.534$ ,  $\hat{b}_2 = e^{\{1 / (11 - 6)\} \{21.9 - 0.534 \times 32.8\}}$   
 $= 2.398$ ,  $\hat{\beta}_2 = (11 - 6) / [6 \times \ln(1100 / 300) + 2.2] = 0.500$ ,  
 $\hat{\lambda}_2 = 11 / 1100^{0.500} = 0.332$ 가 된다. 그 값들을 식 (1), 식 (3),  
 식 (6), 식 (7)에 넣으며 Duane 모형의 누적 및 순간 MTBF는  
 각각  $M_c(T) = 2.398T^{0.534}$ ,  $M_i(T) = M_c(T) / (1 - 0.534)$   
 가 되고 AMSAA 모형의  $M_c(T) = T^{(1 - 0.5000)} / 0.332$ ,  $M_i(T)$   
 $= T^{(1 - 0.500)} / (0.332 \times 0.500)$ 가 된다. 각 식의 T에 시험중단  
 시간인 1100시간을 넣으면 <표 9>와 같은 결과를 얻을 수가  
 있다.

<표 8> 영역 1의 고장정보에 대한 평가결과

Duane 모형				AMSAA 모형			
$\alpha$	b	M <sub>c</sub>	M <sub>i</sub>	$\beta$	$\lambda$	M <sub>c</sub>	M <sub>i</sub>
-0.51	1148	32	21	3.155	9.165E-08	3	1

<표 9> 영역 2의 고장정보에 대한 평가결과

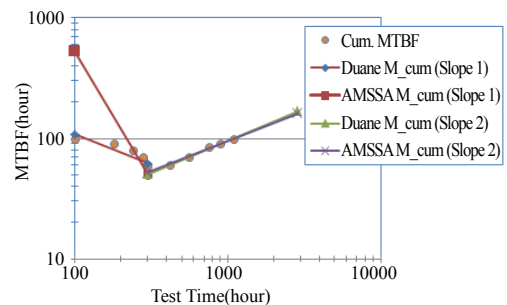
Duane 모형				AMSAA 모형			
$\alpha$	b	M <sub>c</sub>	M <sub>i</sub>	$\beta$	$\lambda$	M <sub>c</sub>	M <sub>i</sub>
0.534	2.398	101	216	0.500	0.332	100	200

(4) 성장률변화를 고려한 신뢰성성장모형곡선의 적합도 평가결과 : 영역 2에서의 고장정보와 새로이 만들어진 모형들의 곡선들의 결정계수 및 평균 MTBF 오차를 계산하면 <표 10>과 같으며, 변화점을 반영하기 전의 결과와 비교하여 그 개선 효과를 확인할 수 있다. 변화시점을 반영한 결과 곡선의 결정계수는 높아졌고, 평균 MTBF 오차는 낮아져 곡선의 적합도를 높인다.

<표 10> 영역 2의 고장정보에 대한 각 모형의 적합도 평가결과

Duane 모형		AMSAA 모형	
R <sup>2</sup>	평균 MTBF 오차	R <sup>2</sup>	평균 MTBF 오차
100%	0.002	99%	-0.448

(5) 변화시점 전후의 신뢰성성장 곡선 도시화 : 앞선 절차를 통해 얻어진 영역 1과 2에서의 신뢰성성장 곡선을 실제 고장정보 위에 그려보면 <그림 4>와 같이 적합도가 좋아졌음을 육안으로도 확인할 수 있다. 특히 변화시점 이후인 영역 2의 성장곡선이 고장정보를 매우 잘 대변하고 있다 실제 이와 같은 연구 결과를 바탕으로 시장의 품질을 예측한 경우 매우 높은 적중률을 확인할 있었다.



<그림 4> 성장률변화를 고려한 평가방법의 적용 결과

### 5. 결론

본 연구에서는 일반적인 신뢰성성장시험에서 나타날 수 있는 성장률변화가 발생한 경우에 대해 수리계 시스템에 대표

적으로 쓰이는 Duane 모형 및 AMSAA 모형을 이용한 고장정보의 평가방법에 있어서, 최근의 고장정보를 반영하지 못하는 한계를 극복할 수 방법을 제안하였다. 또한 기존의 연구 사례를 통한 분석 사례를 들어서 본 연구 결과의 객관성을 확보하였다. 특히 본 연구의 결과를 여러 실제 연구 사례에 적용해 본 결과 높은 정확도의 품질평가에 기여할 수 있음을 확인하였다.

본 연구 결과가 아주 새로운 이론까지는 아니지만 기존에 개념적으로만 이해하고 받아들였던 내용을 수식적으로 표현하고 모든 과정을 체계적으로 정리하였으며, 그 결과에 대한 평가방법을 수립함으로써 다음 단계로 도약할 수 있는 계기를 만들었다고 믿는다.

## 참고문헌

- [1] Barringer, P. (2002), *Crow/AMSAA Reliability Growth Plots*. Barringer and Associates, Inc. 2002-2004.
- [2] Choi, S. H., Park, C. K., Seo, S. L., Lee, T. H., and Kim, K. H. (2006), Reliability Growth Assessment for the Rolling Stock System of the Korea High-Speed Train, *The Korean Society for Railway*, Vol. 9, No. 5, pp. 606-611.
- [3] Codier, E. O. (1968), *Reliability Growth in Real Life*, Proceedings, 1968 Annual Symposium on Reliability, New York, IEEE, pp. 458-469.
- [4] Crow, L. H. (1974), Reliability analysis for complex, repairable systems, *Reliability and Biometry, Statistical Analysis of Life length*, SIAM, Philadelphia, pp. 379-410.
- [5] Demko, E. (1993), On Non-linear Reliability Growth, *IEEE Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium*, pp. 411-416.
- [6] Donovan, J. and Murphy, E. (1999), Reliability Growth-A New Graphical Model, *Quality and Reliability Engineering International, Qual. Reliab. Engng. Int.*, Vol. 15, pp. 167-174.
- [7] Duane, J. T. (1964), Learning curve approach to reliability monitoring, *IEEE Transactions on Aerospace*, Vol. 2, pp. 563-566.
- [8] Dwyer, D., Wolfe, E., and Cahill, J. (2009), Improvements in automated reliability growth plotting and Estimation, *Reliability and Maintainability Symposium*, pp. 377-382.
- [9] Hall, J. B. (2008), *Methodology for Evaluating Reliability Growth Programs of Discrete Systems*, Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, College Park.
- [10] Kumaraswamy, K. G. (2002), Reliability Growth Management during Prototype Development, *Defence Science Journal*, Vol. 52, No. 4, pp. 385-392.
- [11] Lee, Y. E., Kim, G. Y., and Lee, G. H. (2010), Reliability growth analysis for KA-1 Aircraft-Based on Duane and Crow-AMSAA Model. *The Korean Society for Aeronautical and Space Science*, April of 2010, pp. 871-874.
- [12] Lee, H. Y., Han, S. Y., Lee, A. H., and Ha, C. S. (2005), A study of evaluation reliability growth for Korea-Automated Guideway Transit system, *The Korean Society for Railway*, Vol. 8, No. 6, pp. 597-601.
- [13] MIL-HDBK-189A (1981), *Reliability growth management. U.S Army Communications Research and Development Command*, Fort Monmouth, NJ 07703.
- [14] MIL-HDBK-189C (2009), *Reliability growth management. U.S Army Communications Research and Development Command*, Fort Monmouth, NJ 07703.
- [15] MIL-STD-1635 (EC) (1978), *Reliability Growth Testing. U.S Army Communications Research and Development Command*, Fort Monmouth, NJ 07703.
- [16] Peck, D. S. (1985), Extension of the Duane Plotting Technique, *IEEE Transaction on Reliability*, Vol. R-34, No. 2.
- [17] Pentti, J. (1982), Reliability Growth and Duane Learning Curves. *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. R-31, No. 2.
- [18] RADC-TR-84-20 (1984), *Reliability Growth Testing Effectiveness*, Air Force Systems Command, NY 13441.
- [19] So, Y. K., Jeon, Y. R., and Rye, B. J. (2013), Application of Reliability Growth Management for Construction Equipment Development Process, *Korean Reliability Society*, Vol. 13, No. 3, pp. 175-190.
- [20] O' Connor, P. D. T. (2007), *Practical Reliability Engineering*, 5th edition. New York, John Wiley & Sons.