한국철도학회논문집
제8권 제6호 2005년 | pp. 597-601

# 한국형경량전철시스템(K-AGT) 신뢰성 성장 평가에 관한 연구

# A study of evaluation reliability growth for Korea-Automated Guideway Transit system

이호용† · 한석윤* · 이안호** · 하천수***
Ho-Yong Lee · Seok-Youn Han · Ahn-Ho Lee · Chen-Soo Ha

**Abstract**

Korea Railroad Research Institute(KRRI) developed the Driverless Rubber Tired Korea-AGT(Model: K-AGT) from 1999 to 2004. We have finished the safety and performance tests of K-AGT. Data obtained from this testing can be used to evaluate the growth of reliability. The most widely used traditional growth tracking model is included as IEC International standard. With the tracking model all corrective actions are incorporated during test, called test-fix-test. In the test-fix-test strategy problem modes are found during testing and corrective actions for these problems are incorporated during testing. In this paper, we demonstrated reliability analysis using growth model of driverless rubber tired K-AGT system to prove reliability of development system. Therefore, we introduce the well-known NHPP model and analyze a reliability growth using ReliaSoft's RGA software.

**Keywords :** the light rail transit system(경량전철), test-fix-test(TFT), reliability growth test(RGT)

## 1. 서 론

본 연구에서 개발한 경량전철은 기계부품, 전기, 전자 및 제어, 정보통신, 재료, 토목 등의 종합적인 기술이 연계되어 있을 뿐만 아니라 무인운전을 전제로 한 시스템이다[1]. 시스템 개발에 있어서 특히 안전성과 신뢰성은 중요한 고려 대상이다. 이러한 중요성의 이유는 다양하지만 다음과 같은 목적을 포함하고 있다. ① 희망하는 기간 동안 심각한 고장 없이 기능상의 레벨 유지보수를 하는 것 ② 시스템을 유지하고(support) 관리하는 비용을 줄이는 것 ③ 고장 결과에 의해서 주된 안전을 관리하는 것이며 이런 목적을 얻기 위한 노력으로써 신뢰성 요구나 목적은 전반적으로 확립되어져야 한다. 시스템이 개발되는 동안 여러 가지 신뢰성 업무가 수행되어야 하는 시스템 엔지니어링 기술의 적용이 우선적으로 요구된다.

† 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원 경량전철연구팀 선임연구원
E-mail : hylee@krri.re.kr
TEL : (031)460-5715 FAX : (031)460-5749
* 정회원, 한국철도기술연구원 경량전철연구팀 수석연구원
** 정회원, 한국철도기술연구원 경량전철연구팀 책임연구원
*** 비회원, 한국철도기술연구원 경량전철연구팀 Post-Doc.

시스템 엔지니어링은 개념설계에서 시작하여 그 시스템에 주어지는 요구 조건을 파악하고 상세 설계에 이르기까지 반복적으로 하부 시스템을 결합해 가는 과정이며, 이것은 구성부품에 대한 체계적인 품질관리와 목표하는 성능의 종합시스템 기술체계에 대한 요소 및 시스템 해석기술의 결과물을 최대한 활용하여야만 구현될 수 있다. 따라서 전체 시스템의 개념 설계로부터 기술체계에 따라 하부 시스템의 기본사양을 결정하고 설계·제작 과정에서 발생할 수 있는 상호간의 인터페이스 요소를 도출과 관리하여 문제를 해결하는 역할이 매우 중요하다. 효과적인 시스템 엔지니어링으로부터 얻을 수 있는 이점은 위험 요소들을 사전에 파악하여 관리함으로써 설계 변경에 의한 비용 증가 및 공기 지연의 위험을 최소화할 수 있다는 것이다.

새롭게 개발되는 복합 시스템의 성능을 정확히 평가하기 위해서는 시스템 사양선정, 구현기술 및 개발내용·범위가 정확히 산정되고 구분되어야 한다. 그러나 이에 앞서 적정한 사양과 기술이 구현된 시스템을 완성하기 위해서는 효율적인 시스템엔지니어링 기술의 접목과 개발의 성패를 좌우하게 되는 것이다.

본 연구에서는 신뢰성 관리체계의 신뢰성 관리업무와 관련한 규격서를 검토하였다. 철도분야의 RAMS(Reliability, Availability, Maintainability and Safety) 적용을 지정한 규격서인 IEC 62278을 비롯하여 IEC 60300-2 그리고 MIL Std 785B에서 기술하고 있는 신뢰성 관리업무를 비교한 결과 신뢰성 관리에 대한 지침은 MIL Std의 내용보다 IEC 62278 또는 IEC 60300의 내용이 경량전철시스템의 신뢰성 관리업무의 기준으로 하는 것이 더 적절하였다. 그 이유는, MIL Std에서 요구하는 많은 부분들은 과거 고 신뢰성이 요구되는 무기체계 또는 신뢰성 관리체계에 대한 기술적인 발전이 없는 상황에서 참조할 수 있는 유일한 기준이었지만 최근 들어 보다 진보된 규격서 또는 기술수준이 발달하여 IEC 규격서를 많이 사용하는 추세이기 때문이다. 군수분야에서도 이제는 MIL Std 또는 핸드북(Handbook)에 대한 실효성을 재검토하여 점차적으로 폐기하는 경우도 많아 IEC 기준을 따르는 것이 현실적인 접근으로 간주하고 있다. 이를 기준으로 1999년도부터 수행해온 경량전철시스템 개발의 신뢰성 관리업무에 검증이 필요하고 업무 요소들이 충분히 수행되었는지 그러지 못했는지 평가를 수행해야 한다.

개발된 시스템 특징으로 고무차륜형 AGT 시스템이며 기존 철도차량시스템과는 달리 무인운전과 자동운전 운행이 가능하도록 개발되어 이에 따른 신뢰성과 안전성의 확보에 대한 평가가 이루어져야 한다. 한국철도기술연구원(이하 KRRI)은 경량전철시스템 기술개발을 완료하여 2004년 8월에는 경북 경산시에 국내 최초로 2.37km 노선의 고무차륜 AGT 시스템 전용 시험선을 건설하여 2005년 현재까지 시험운행을 통한 신뢰성평가를 실시하고 있다. 본 시험선은 차량시스템, 전력공급시스템, 신호통신시스템, 선로구축물 등의 하위 시스템들이 유기적으로 결합된 것으로서 정밀한 종합성능시험을 수행하여 개발기술의 신뢰성과 안전성을 확보하는데 그 목적이 있다. 이러한 신뢰성 확보를 위해 초기 신뢰성 평가를 실시하고 초기 신뢰성 목표보다 낮다고 판단되어 개선 활동이 이루어졌다. 개선활동이 효과적이었는지 해석하고 신뢰성 성장시험을 실시한다. 본 연구에서는 기본신뢰성 업무 효과분석과 그에 따른 개선모델을 선정하여 평가를 수행하였다.

## 2. 신뢰성 업무 주요변수

신뢰성 기본업무 완료 후에 Prototype의 MKBF는 초기 MKBF이다. 이것은 기본 신뢰성 업무의 중요한 결과 변수이다. 만약 기본 신뢰성 업무가 완료된 후 시스템이 시험되었다면 실제 데이터에서 얻어지는 초기 MKBF이다. 초기 MKBF은 기본 신뢰성 업무로 인해서 얻어지는 신뢰성이고 기본신뢰성프로그램이 완료된 후 신뢰성 프로그램이 정지하였다면 시스템 MKBF이다. 만약 초기 MKBF가 GP(Growth Potential) MKBF보다 작다라는 의미는 경영전략에 따른 기본 신뢰성 업무 경영동안 문제 고장모드가 전혀 발견되지 않았다는 것이다. 초기 MKBF는 기본 신뢰성 업무의 중요한 변수이다.

만약 시스템이 RDGT(Reliability Development and Growth Test)에 놓여 있다면 초기 MKBF는 시험의 시작점에서 시스템 신뢰성이다. 기본 신뢰성 업무가 완료된 후에 RDGT는 실행된다. RDGT 시작에서 초기 MKBF는 경영기대치와 목적보다는 낮다. RDGT 시험은 고장이 발견되고 실행된다. 시험동안 새로운 고장모드가 발견 되었을 때 경영은 경영전략에 따라 고장모드를 개선하지 말아야 할지(type A), 개선해야할지(type B)를 결정해야 한다. 만약 FF가 Type B에 대해 0보다 크다면 고장에 대한 고장률은 감소한다. 만약 RDGT 시험에서 충분하다면 매우 드물게 개선 활동이 발생하는 Mature MKBF로 성장하게 된다. Mature MKBF는 GP이다. 만약 경영 전력에 따라서 초기 설계와 개선하에서 경영을 위한 모든 고장 모드가 발견되었다면 기본 신뢰성 업무 끝에 도달하는 값 시스템 GP MKBF은 Mature RDGT MKBF 값이다.

기본 신뢰성 업무 동안 시스템 설계가 결정되기 때문에 GP는 중요한 기본 신뢰성업무의 결과 Parameter이다. 초기 MKBF는 기본 신뢰성 업무에 의해서 실질적으로 얻을 수 있는 값이다. Fig. 1에서와 같이 GP는 신뢰성에서 얻을 수 있는 것이다.

만약 시스템이 RDGT가 실시된다면 신뢰성 시험의 끝은 Final MKBF라고 한다. 만약 MKBF가 완료되었다면 GP MKBF는 Final MKBF와 같다. 그러므로 RDGT 동안 완성된 시스템을 위해서는 GP MKBF를 측정할 수 있다. 적당한 데이터라면 RDGT 시작점인 초기 MKBF를 측정할 수 있다. RDGT로부터 전반적인 데이터를 가지고 두 개의 중요한 신뢰성 업무 변수(initial MKBF, Growth Potential), 즉 BRTE

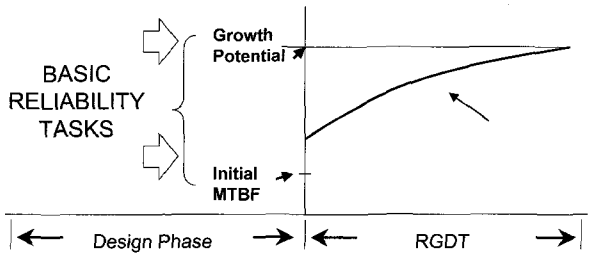


**Fig. 1.** Key Basic Reliability Tasks Output Parameters

(Basic Reliability Tasks Effectiveness)를 측정할 수가 있다. 본 논문에서 BRTE 측정을 식 (1)와 같은 비율로 나타낸다[2].

BRTE = Initial MKBF/Growth Potential MKBF (1)

## 3. 신뢰성 성장 CROW(AMSAA) 모형 (Test-Fix-Test)

일반적으로 새로운 철도차량의 고장률은 다른 수송 시스템과 같이 운행 초기 단계에는 높으나 운행시간 증가에 따라 서서히 낮아져 일정한 시간 또는 주행거리가 경과하면 비교적 일정하게 안정화되어 목표 고장률에 도달하게 된다. 이렇게 일정 수준의 목표 고장률, 즉 신뢰도가 확보될 때까지의 시간을 신뢰성 성장(reliability growth) 기간이라 한다[7,8]. 본 연구에서 개발된 AGT 시스템에도 신뢰성 성장 모형을 이용하여 신뢰성 분석을 실시한다. 신뢰성 성장은 개발초기단계에 설정된 신뢰성 목표와 현시점에서 평가된 신뢰성 수준과 비교하여 목표를 달성하기 위한 체계적인 계획을 수립하고 성장률을 통제하는 것이다. 최근 국내외에서 대상 시스템에 신뢰성 분석을 위해 성장모형을 적용할 경우에는 NHPP 모형인 AMSAA 모형을 주로 활용하고 있으므로 본 연구에서도 최근 그 활용도가 높은 AMSAA 모형을 적용하여 신뢰성 성장모형 분석을 실시한다.

NHPP 또는 AMSAA(Army Materials Systems Analysis Activity) 모형은 고장률 대 시간을 모니터링하는 연속모형이며, 비동질 포아송과정 중에서 Weibull process이고, 다음 식 (2)을 이용한다. 그리고 모수추정은 최우추정법을 이용한다. 이 모형은 완전자료 및 관측중단자료에 대한 모수 추정이 가능하다.

신뢰성 성장시험은 촉박한 계획, 제한된 시험에서 새로운 설계에 있어서 신뢰성 결함 개선과 증명하는 것이 주된 목적이다. 잠재적 문제 모드에 대해 우선적인 개선 활동을 기본으로 하는 개발 시험 전에 추적시스템 신뢰성 측정은 논의 되어져야 한다. 전통 신뢰성 성장 모드는 시험하는 동안 고장모드 개선이 표면화 되었을 때 평가를 제공한다. 시험하는 동안 Test-Fix-Test 전략 문제 모드는 발견되어지고 시험하는 동안 이러한 문제에 대한 개선 활동이 해결되어 진다. 신뢰성 성장을 위해 Test-Fix-Test 개발 시험동안 순간 시스템 MKBF에서 누적되는 식 (2)에서와 같이 시험 시간 MKBF를 나타낸다.

$$MKBF_c = \frac{1}{\lambda} T^{1-\beta},\ \lambda_c = \lambda T^{\beta-1},$$

$$MKBF_i = \frac{1}{\lambda\beta T^{\beta-1}} \quad (2)$$

여기서 $0<\lambda$ : 척도모수, $0<\beta$ : 성장률,
$T$ : 누적시험시간 매개변수

Crow는[3] Duane postulate의 강도 식 (3)과 같이 확률적으로 모형화 하였다.

$$r(t) = \lambda\beta t^{\beta-1} \quad (3)$$

신뢰성 증가에 관한 이 과정을 기초로 한 통계학상의 절차들의 적용을 분석하여 이 모델은 Test-Fix-Test 데이터에 적용할 수 있다. 매개변수 $\lambda$는 scale parameter이고 $\beta$는 shape parameter를 반영한다. $\beta=1$ 인 동안은 신뢰성 향상이 없다. $\beta<1$ 대해서는, 신뢰성이 증가한다. 즉, 시스템 신뢰성은 개선활동들 때문에 개선된다. $\beta>1$ 대해서는 신뢰성향상은 감소한다[4,5].

Crow(AMSAA) 기본 모델에서 시험 마지막의T 시간대에서 얻었거나 demonstrated 고장율은 r(T)에서 주어졌다.

얻어진 고장율은 식 (4)와 같이 나타낸다.

$$\lambda_{CA} = r(T) \quad (4)$$

개발시험 프로그램(development testing program)은 시간 0에서 시작해서 시간 T까지 실행되고 멈춘다고 가정한다. N을 전체 고장 기록 수라고 두고, $0<X_1<X_2<...X_N<T$는 누적된 time scale의 N번째 연속적인 고장시간이라 한다. Crow(AMSAA) NHPP 가설을 이 자료들에 적용하는 것을 가정한다. Crow(AMSAA) 기본모델 하에서 $\lambda$와 $\beta$에 대한 최대 값(likelihood)(MLEs)은 식 (5)과 같이 나타낼 수 있다[6].

$$\hat{\lambda} = \frac{N}{T^{\hat{\beta}}} \quad , \quad \hat{\beta} = \frac{N-1}{\sum_{i=1}^{N} T} \quad (5)$$

## 4. 신뢰성 성장 해석

### 4.1 성능 시험결과

시험차량의 운행조건을 1일 9시간 평균주행거리 150km 이상으로 2량 1편성으로 5,000km 시험결과 Table 1과 같은 고장 데이터 값을 얻었다.

시험선은 2.37km이고 4개역을 정차한다. 운행지연 기준인 열차운행은 무인 DIA 운행을 하고 있으며 1회 DIA 기준으로 시험평가를 실시하였습니다. 따라서 1회 DIA운전인 4.74km로 운행했을 때 운행기준이다.

일반적으로 신뢰성장 시험을 효과적으로 관리하기 위해서는 기본적인 신뢰성 관리업무를 통해 초기 MKBF를 설정

**Table 1.** 고장자료 현황 운행거리 : 5000km

| 구분 | 고장구분 | | | | 계 | MKBF |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | I (NF) | II (MIF) | III (MAF) | IV (SF) | | |
| 전체시스템 | 16 | 6 | 0 | 1 | 23 | 217.39 |
| 차량시스템 | 10 | 5 | 0 | 1 | 16 | |
| 전력시스템 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | |
| 신호시스템 | 2 | 0 | 0 | 0 | 2 | |
| 선로구축물 | 2 | 0 | 0 | 0 | 2 | |
| 통신시스템 | 2 | 0 | 0 | 0 | 2 | |

비고 : 운행정지 또는 30분 이상 지연(SF), 10분~30분 이내 지연(MAF), 2분~10분 이내 지연(MIF), 정상운행 또는 2분 이내 지연 (NF)

해 주어야 한다. 본 논문에서는 5,000km를 설계개선 없이 운행하여 초기 MKBF를 설정하였다. 시험운행을 실시한 후 초기 MKBF를 계산하면 217.39km를 얻을 수 있다. 신뢰성 업무에서 얻을 GP MKBF는 2000km이며 전체시스템의 고장 중 70%가 차량 시스템에서 일어나고 있으며 고장이 중복적으로 발생하였으며 이를 간략하게 설명하면, ① TCMS 고장, ② HCR/TCR 릴레이 고장, ③ 열차무선 단말기 전원 장치 결함, ④ Null Command 후퇴검지시의 비상브레이크 명령 등이 있다. 이러한 고장이력 중에 중요한 설계 3가지를 선정하여 설계 개선하였으며 이 결과를 분석하여 성장시험을 실시하였다. 3가지 설계 개선으로는 TCMS 제어알고리즘, BOU LRU 및 CBTC 프로그램 등을 설계 변경하여 시스템 신뢰성 미치는 영향을 분석하였다.

### 4.2 분석 자료

앞 절에서 설명한 신뢰성 성장 모형을 Table 2의 2005년 6월까지 주행시험자료를 활용하여 분석하였다. 추정값은 ReliaSoft사의 RGA 6.0(신뢰성 성장모형 분석 전용 소프트웨어)을 사용하였다[8].

### 4.3 NHPP(AMSAA) 모형 해석

Fig. 2에는 ReliaSoft RGA 프로그램을 이용하여 AMSAA 모형에 적합한 결과를 나타내고 있다. 각 도시된 적합결과에는 추정된 누적 및 순간 MKBF와 95% two-sided Confidence bound를 도시하였으며, 모형에 적절하게 적합함을 알 수 있다. 또한 Table 2에 NHPP(AMSAA)의 분석결과를 정리하였다.

### 4.4 신뢰성 성장 결과 검토

성능시험 테스트 5,000km 동안 일어난 고장을 FMEA업무를 통하여 고장원인 파악하여 개선 활동 후, 10,000km 시험테스트 한 결과 Fig. 3과 같이 시스템 누적 MKBF가 217.39km(before)에서 약 666km(after)로 3배정도 증가하였음을 알 수 있다. BRTE는 0.33으로 평가 할 수 있어 개선활동이 일어났다고 할 수 있다.

신뢰성 성장 시험결과 계산된 BRTE의 결과는 0.33로서 누적 MKBF 개선이 비교적 크게 이루어졌고 이러한 추세로 진행된다면 NHPP(AMSAA) 분석결과를 기준으로 전체 시스템의 목표 순간 MKBF는 향후 약 16,000km 추가주행 후 도달하게 됨을 알 수 있다. 또한 GP MKBF 2000km를 달성하기 위해 주행시험을 30,000km이상 운행해야 보증할 수 있을 것으로 해석되었다.

**Table 2.** 신뢰성 성장 분석자료(5,000km 이후 10,000km 운행)

| 누적고장 개수 | 누적거리 (km) | 누적 MKBF | 고장정의 |
|---|---|---|---|
| 1 | 114 | 114 | MIF |
| 2 | 168 | 84 | NF |
| 3 | 249 | 83 | NF |
| 4 | 252 | 63 | NF |
| 5 | 726 | 154.2 | NF |
| 6 | 904 | 150.67 | NF |
| 7 | 1,532 | 218.86 | NF |
| 8 | 1,838 | 229.75 | NF |
| 9 | 3,406 | 378.44 | SF |
| 10 | 5,795 | 579.50 | NF |
| 11 | 5,868 | 533.45 | NF |
| 12 | 8,375 | 697.92 | NF |
| 13 | 8,506 | 654.31 | SF |
| 14 | 9,189 | 656.36 | NF |
| 15 | 9,848 | 656.53 | SF |

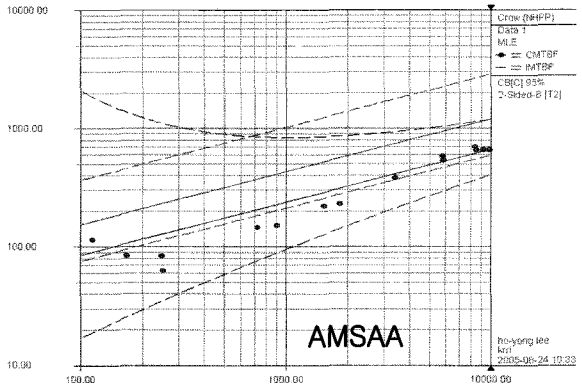


**Fig. 2.** AMSAA 모형 추정결과

**Table 3.** NHPP 모형 추정 결과

| 구 분 | NHPP(AMSAA) 모형 |
|---|---|
| 추정식 | $\widehat{MKBF}_c = \frac{1}{0.0921} T^{1-0.5530}$ |
| 성장률 | 0.4470 |
| 적합성검정<br>유의수준<br>(0.05) | Cramer-von-Mises 검정(정시종결, 고장수 15)<br>$C_M^2 = 0.0925 \leq CV_{0.05} = 0.215$<br>자료는 AMSAA 모형에 적합<br>$C_M^2 = \frac{1}{12M} + \sum_{i=1}^{M}\left[\left(\frac{X_i}{T}\right)^{\beta} - \frac{2i-1}{2M}\right]^2$<br>· $X_i$ : the failure times<br>· $M$ : the number of failures<br>· $T$ : terminated time |
| 10,000km에서의 순간 및 누적 MKBF | $MKBF_{c(10000)} = 666.41km$<br>$MKBF_{i(10000)} = 1,205.08km$ |
| 추정식에 의한 목표 도달까지 누적주행거리 | $T_{MKBF_{(2000)}} = 31,060.11km$ |
| BRTE | 0.33 |
| 비고 | 10,000km에서 정시종결로 가정하여 분석을 실시. |

## 5. 결 론

KRRI에서 개발한 무인운전 고무차륜형식 AGT (Model: K-AGT) 시스템을 약 2.37km의 전용 시험선에서 신뢰성 평가를 수행하였다. 신뢰성 평가를 위해 무선 네트워크를 이용한 신개념의 통합 계측시스템을 구축(280개 채널)하고, 신뢰성분석 DB 프로그램을 개발하였으며 하위시스템 별 및 하위시스템간 인터페이스에 대한 절차를 통하여 K-AGT의 신뢰성 분석, 평가 및 향상 등의 신뢰성 관리를 실시하였다. IEC 62278에 따른 신뢰성 업무를 통한 GP MKBF를 얻기 위해는 계속적인 신뢰성 성장 관리가 이루어져야 하며 향후 최근 대두되고 있는 신뢰성 성장모형을 Test-Fix-Find-Test인 확장형 모델로의 연구가 필요하다. 신뢰성 관리하의 초기 MTBF는 GP를 포함한 관리를 위해서 중요한 측정으로 향상된 시스템을 얻기 위해서는 개선활동이 GP에 수렴될 때까지 수행되어져야하며 선택적 고장 개선활동이 이루어지도록 신뢰성 관리가 되도록 수행되어야 한다.

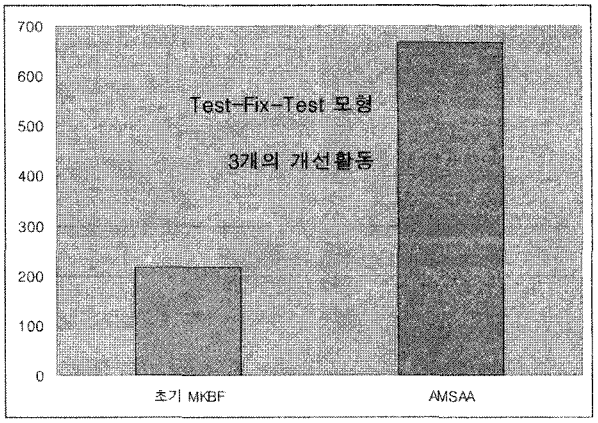


**Fig. 3.** 초기 MKBF와 성장해석결과 비교

## 참 고 문 헌

1. 건설교통부, 경량전철시스템 기술개발사업 6차년도 연구결과보고서(분야:종합시스템 엔지니어링), 2004.
2. G. J. Gibson, L. H. Crow, Reliability Fix Effectiveness Estimation, Proceedings 1989 Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp.171-177, Atlanta, GA. January 1989.
3. L. H. Crow, Reliability Analysis for Complex, Repairable Systems, in Reliability and Biometry, ed. by F. Proschan and R.J. Serfing, pp.379-410, 1974
4. L. H. Crow, Reliability Growth Projection from Delayed Fixes, Proceedings 1983 Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp.84-89.
5. L. H. Crow, On Tracking Reliability Growth, Proceedings 1975 Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp.438-443.
6. Parigi, P., and Vinello, M., "Experimental 'Reliability Growth' or 'Reliability Verification' Related with the Amount of Innovation in a New Car Model", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol.20, pp.167-184, 2004.
7. ReliaSoft, *ReliaSoft's RGA 6 : Reliability Growth & Repairable Systems Data Analysis Reference*, 2004.
8. ReliaSoft, *ReliaSoft's* RGA 6 : *User's Guide*, 2004.