

# 곡선부 주행성능 향상을 가진 틸팅 열차의 DCU(Door Control Unit)의 신뢰성 분석

## Reliability Analysis of Door Control Unit of Korean Tilting Train

송용수\*  
Song, Yongsoo

한성호\*\*  
Han, Sung-ho

김남포  
Kim, Nam-po

### ABSTRACT

In this paper, as the step to assess and enhance the reliability of Korean Tilting Train eXpress (T.T.X), Door system is selected and reliability analysis is carried out. The door system is classified into subsystems and functional block diagrams and reliability block diagrams are drawn. Expressions for evaluating the reliability are derived and Mean Kilometer between Service Failure is calculated using the trial track test results. The calculation result show reliability growth of proposed system. This paper developed RAMS to make a door system of T.T.X. (Tilting Train eXpress) with maximum operation speed of 180 km/h.

**Key Words** : R.A.M.S (Reability Data Management), T.T.X (Tilting Train eXpress)

### 1. 서 론

본 연구는 국내 기존선로에서의 열차의 주행속도향상에 주요 문제점으로 대두되고 있는 열차의 곡선부 주행시 원심력에 의한 차량 탈선방지와 승차감 감소대책으로서 틸팅기술을 적용하는 180km/h급 틸팅 전기차량(TTX: Titing Train Express)의 개발에 관한 것입니다.

한국형 틸팅 열차의 개발은 2006년 12월 6량 전체 조립을 완료했습니다. 한국형 틸팅열차는 궤도의 부담력을 최소화 할 수 있도록 차체의 경량화와 기기배치의 최적화가 중요하며 일반차량에 없는 대차에 틸팅메카니즘과 틸팅판토그래프 메카니즘, 틸팅전기장치 등이 추가로 설계 되었습니다. 틸팅기술은 차량 내에서도 대차, 차체, 전기장치, 판토그래프 등과 긴밀하게 인터페이스가 이루어 져야 성능을 만족할 수 있습니다. 본 논문에서는 이런 틸팅 열차의 측 출입문의 신뢰성 평가에 관해 DCU(Door Control Unit)을 중심으로 알아보도록 하겠습니다. Door 시스템은 영업 운전 시 출 도차에 영향을 미치는 중요 부품으로 도어 시스템의 신뢰성을 평가함으로써 영업 운전에 필요한 데이터를 충족해 보고자 한다.

또한 안전관련 전기전자 프로그래머블 제어기의 국제규격인 IEC 61508에서 제공하는 최고수준의 안전대책이 반영된 시스템의 평균고장확률을 근거로 하여 시스템 목표를 평균고장시간(MTBF, Mean Time Between Failure) 100,000시간으로 설정하였다[1].

도어제어시스템의 신뢰도는 시스템을 구성하는 부품의 고장률에서부터 출발한다[2]. 따라서 랜덤하게 발생하는 전자부품의 고장률을 정량적으로 예측하기 위해 본 논문에서 미국방성 전자부품고장률의 예측 지침인 MIL-DHBK-217[5]을 사용하여 하부시스템단위 고장률을 정량화한다. 예측된 고장률을 토대로 MTBF 만족여부를 판단하고, 시스템 고장률증가의 주요원인을 분석하여 시스템 고장률을 감소시킨다.

\* 책임저자 : 한국철도기술연구원 시스템엔지니어링팀      \*\*공동저자 : 한국철도기술연구원 시스템엔지니어링 팀장  
E-mail : adair@krri.re.kr    Tel. (031) 460- 5668      \*\*\*공동저자 : 한국철도기술연구원 시스템엔지니어링팀

또한 가용도는 시스템고장 특성을 지수고장모델로 모델링하여 신뢰도함수를 도출하고 시간에 따른 시스템의 신뢰도를 계산한다. 따라서 본 연구에서는 Relx 7.7 을 기반으로 둔 신뢰성 기술을 기반으로 도어 시스템의 신뢰성 평가에 역점을 두고자 한다.

## 2. 본론

본 연구는 철도기술연구 개발사업에서 시제품으로 개발된 도어장치의 상용화를 위한 안정화연구이다. 측 출입문은 차량 운행 중 역에 정차해 승객이 승하차 할 수 있는 시스템으로서 정확한 작동이 열차의 시간에 많은 영향을 미친다. 또한 승객의 안전을 위해 열차의 속도 5km/h초과 시는 동작 되지 않아야 한다.

본 연구에서는 이러한 측출입문시스템 기술을 확보하였으며, 기술 확보의 입증을 위해 측 출입문 경우 현재 내구성 시험과 인증 시험을 완료 하였으며, 100만회 내구성 시험 중이며 2007년 5월 그 시험을 완료할 예정이다. 이러한 도어 시스템의 기술의 확보는 향후 추진되는 신규철도망의 건설이나 기존 고속선 및 일반선의 개량 또는 유지 보수시에 국내기술로 개발된 시스템의 공급이 가능하게 하였으며, 본 연구 성과의 일부 실용화 사례에서 알 수 있듯이 외국 시스템과의 경쟁력도 상당부분 확보된 상태이다.

측출입문에서 고장이 발생하는 경우 서비스제공의 중단으로 인해 대규모 운행지연이 발생할 수 있으므로, 출입문 시스템의 고장을 분석하여 발생빈도를 최소화하고 발생된 고장에 대해서는 기능복귀시간을 최소화 하는 것이 매우 중요하다.

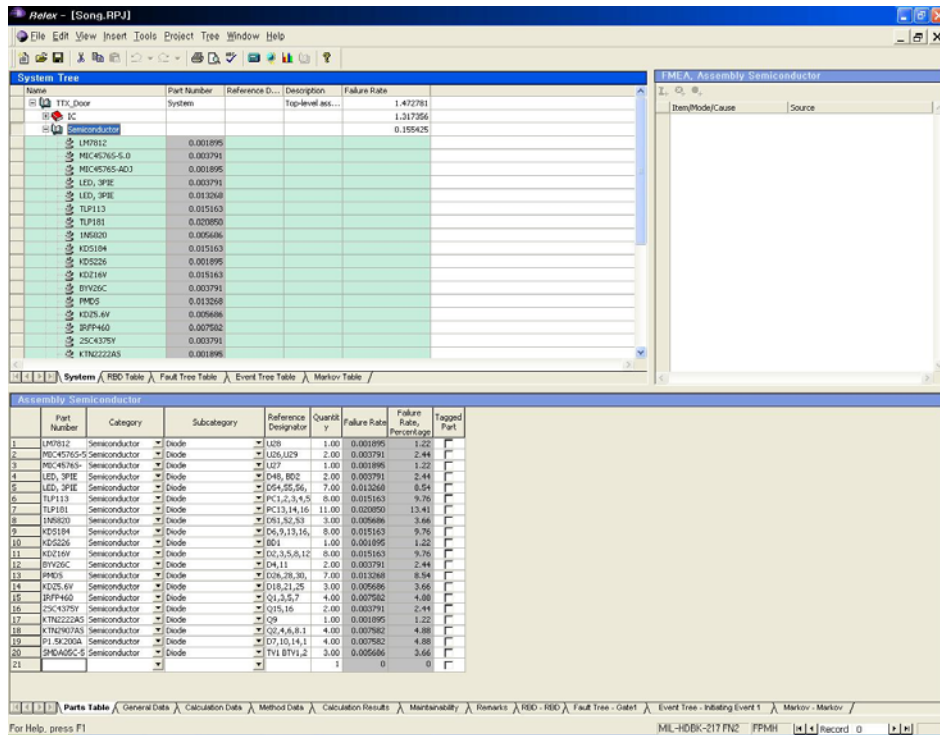


그림 1 자동화도구를 사용한 고장률예측

출입문 시스템의 신뢰성을 향상시키기 위한 연구는 각각의 장치를 결합허용구조로 설계하여 단일고장에 대하여 시스템기능상실이 발생하는 것을 최소화 하였으며, 정량적으로는 하부구성요소단위 평균고장시간(MTBF)를 100,000시간 이상 확보하도록 개발수명주기 전반을 관리하였다. 이러한 관리를 위해 출입문 시스템을 구성하는 장치를 부품단위로 미국방규격에 의해 고장률을 예측하여 목표신뢰도와 비교하였으며, MTBF예측치의 비교결과를 분석하였다. 또한, 예측치와 실제 제작된 장치의 실제 고장률오차를 최소화하기 위해 하부구성요소단위 신뢰성시험을 통한 MTBF의 입증을 수행하였다. 출입문 시스템 신뢰성 확보를 위한 일련의 절차는 높은 신뢰성을 요구하는 유사 응용분야인 원자력, 항공, 군수, 화학플랜트, 금융 등의 제어분야에 적용이 가능하다.

## 2.1 신뢰도예측

MIL-HDBK-217에서는 전자부품의 종류를 그림1과 같이 분류하고, 고장형태에 따른 고장률예측 방정식을 제공하여, 방정식을 구성하는 Pi값에 사용된 부품의 특성 및 환경조건을 대입하여 부품단위 고장률을 예측한다.

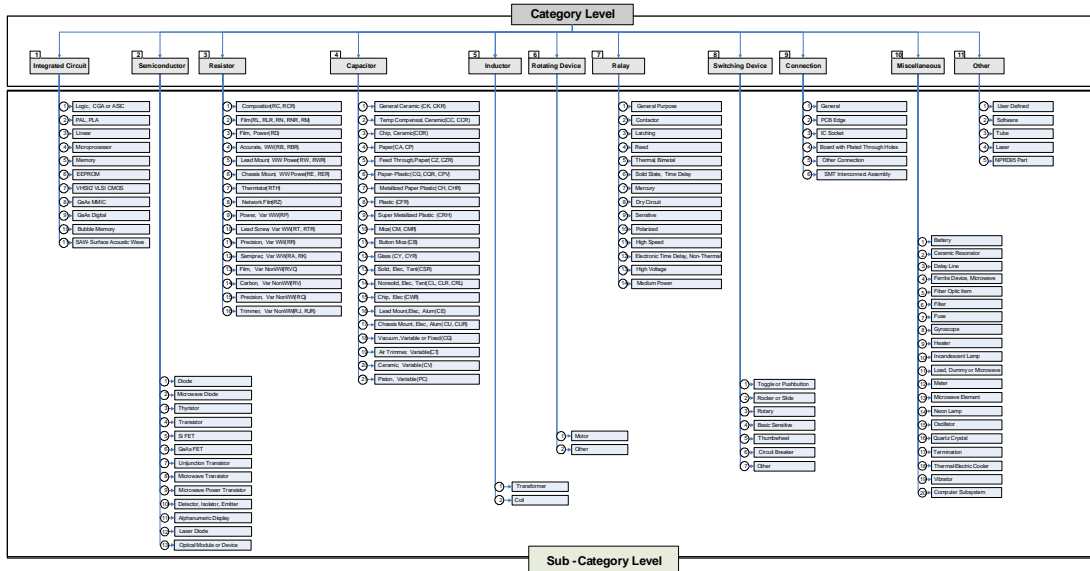


그림 2. 고장률예측을 위한 전자부품의 분류체계(Relex 7.7)

본 논문에서는 하부시스템 고장률예측을 위해 자동화도구인 Relex7.7을 사용한다. Relex7.7은 식(1)과 같은 메모리소자의 고장률방정식과 같이 하부시스템별 고장률수식을 사용부품관련 정보에 따라 계산하는 자동화 도구이며, 항공우주, 철도, 원자력 등에서 사용하는 MIL규격 외에도 가전에서 사용하는 Telcordia 또는 Bellcore기준을 사용할 수 있다. 또한, 시스템 사용온도조건에 따른 고장률예측 등을 지원하여, 시스템 설계단계에서 고장률의 최소화를 위한 설계보완을 지원한다.

$$\lambda_P = (C_1 \pi_T + C_2 \pi_E + \lambda_{cyc}) \pi_Q \pi_L \quad (1)$$

표1은 식(1)에 사용된 Pi값의 의미이다.

하부시스템 고장률예측을 위해서는 표2와 같이 하부시스템 부품정보(BOM, Bill of Material)를 그림2와 같이 자동화도구(Relex7.7)를 사용하여 하부시스템단위로 고장률과 MTBF를 예측한다.

따라서, 고장률의 예측을 위한 BOM의 작성은 설계자와 RAM엔지니어가 함께 작업을 수행해야 한다.

RAM엔지니어는 MIL-HDBK-217의 입력요건에 적합한 설계자의 BOM작성을 지원해야 하며, 작성된 BOM에 의한 하부시스템 또는 전체시스템의 고장률 예측치를 토대로 설계목표 만족을 위한 자문을 수행한다. 표2는 도어시스템 고장률예측을 위해 작성한 BOM의 예이다. 본 논문에 사용된 도어시스템의 BOM은 국내 도어시스템 제작사로부터 제공받았다.

표 2. 도어시스템 DCU에 사용된 IC류

표 1. 메모리의 고장률예측을 위한 입력변수

기호	입력변수의 의미
$C_1$	Die Complexity Failure Rate
$\pi_T$	Temperature Factor
$C_2$	Package Failure Rate
$\pi_E$	Environment Factor
$\lambda_{cyc}$	EEPROM Read/Write Cycling Induced Failure Rate
$\pi_Q$	Quality Factor
$\pi_L$	Learning Factor

Part Number	Description	Qty	Ref.	Manufacturer	Operating Power
74HC00	Quad 2Input NAND	1	U12	Ti/Philips	8mW
74HC125	Quad buffer/Line driver; 3-State	1	BU2	Ti/Philips	-
74HC14	Hex inverting Schmitt trigger	3	Bu6,20,U23	Ti/Philips	8mW
74HC245	Octal Bus Transceivers	2	U1,20	Ti/Philips	20mW
74hc573	Octal D-type transparent latch	2	U5,BU1	Ti/Philips	20mW
74HC574	Octal D-type flip-flop	3	U3,8,25	Ti/Philips	20mW
74HC86	Quad 2Input Exclusive-OR	1	BU7	Ti/Philips	8mW
ATmega64	CPU 8bit RISC	2	U7,BU3	Atmel	40mW
HCTL2016	Quadrature Decoder/Counter	1	U2	Agilent Tech	20mW

\*Cat-부품의 대분류, Sub Cat-부품의 소분류, Part Num-부품의 개발단계명칭, Description-부품사양, Qty-수량, Ref-PCB상의 번호, Man-제작사, Oper Pow(동작전력), Power Rat-사용중 소모전력, Case Temp-동작중 표면온도

신뢰도의 예측은 기 설정된 신뢰도 목표인 하부구성요소별 MTBF 100,000시간을 만족하도록 부품단위 고장률분석을 근거로 시스템의 고장률을 예측하는 과정으로써, 연차별로 수행되는 설계보완사항을 반영하여 지속적으로 요구사항에 대한 만족여부를 확인 해야 한다.

시스템의 신뢰도 목표인 MTBF 100,000시간을 분석해 보면, MTBF는 평균고장수명(MTTF)과 평균수리시간(MTTR)의 합으로써, MTTF는 고장률의 역수이므로 MTTR은 MTTF에 비해 무시할 수 있는 수준의 작은 값이라고 가정할 때, MTBF는 MTTF와 동일한 함수로 사용할 수 있다. 따라서 MTBF는 열차제어시스템 하부구성요소 각각의 고장률이 1E-6이하로 억제되어야 함을 의미한다.

전자부품으로 구성된 출입문 시스템은 그림 3과 같은 신뢰성관리 흐름에 따라 예측과 입증의 연차별로 반복 수행된다.

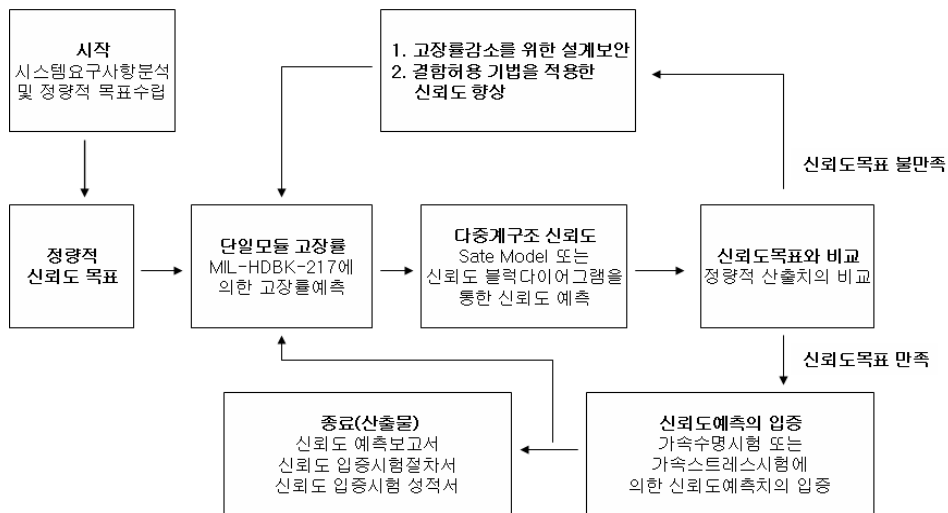


그림 3. 도어시스템 신뢰성관리 흐름도

전자부품의 고장은 랜덤하게 발생하므로 확률 및 통계적 접근방식에 따라 신뢰도를 예측하고 입증한다. 본 연구에서는 전자부품으로 구성된 제어시스템의 신뢰도를 부품의 고장빈도에 대한 분석을 통해 함수형태로 제시하여, 부품의 종류, 사용 환경, 제작사 등의 정보에 따라 고장률을 상수화 시키는 미국 방규격인 MIL-HDBK-217FN2를 기준으로 산출하였다.

## 2.2 신뢰도 입증

시작품 수명의 입증방법 중 가속시험은 시작품이 동작하는 동안 작용하는 스트레스 요인 중 장치의 수명에 가장 영향이 큰 요소들을 선택하여 실제운영환경과의 가속계수를 도출하고, 가속계수에 의해 시험시간을 단축시키는 방법이다.

도어시스템은 구성하는 전자부품은 그림 2와 같이 온도에 가장 민감하게 수명이 좌우된다는 것을 관련 논문 및 문헌을 통해 확인하고 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 따라서, 온도스트레스를 출입문 시스템 신뢰성시험의 스트레스요인으로 선정하기 이전에 아래 그림과 같이 도어장치의 하부구성요소별 온도에 따른 MTBF의 변화 추이를 미국방 지침 MIL-HDBK-217FN2를 근거로 추정하였다.

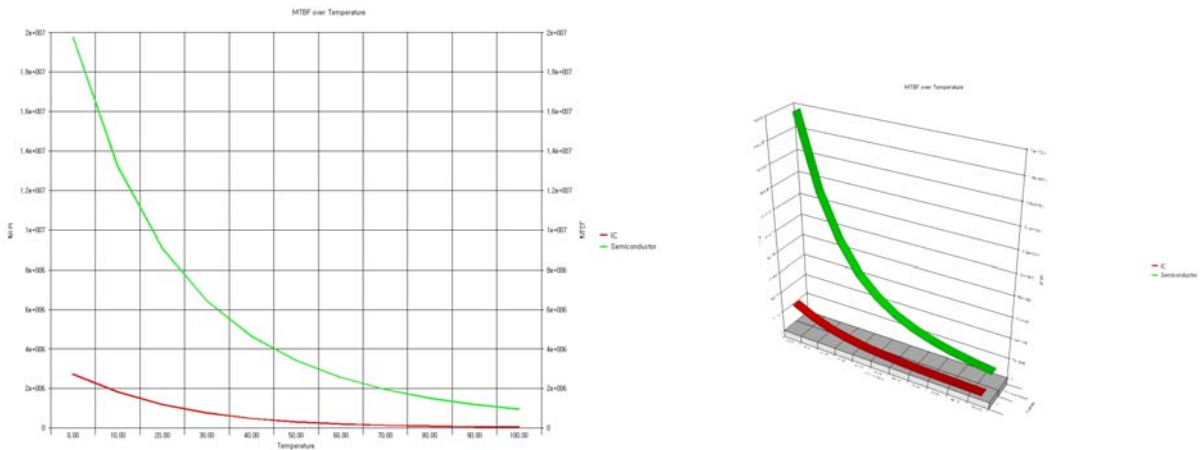


그림 4. 출입문 시스템 하부구성요소의 온도에 따른 MTBF

따라서, 출입문 시스템 신뢰성시험은 온도스트레스에 대하여 시스템에 사용된 부품의 설계마진인 10°C이하를 고려하여 신뢰성시험을 그림 5과 같은 절차를 수립하여 수행하였다.

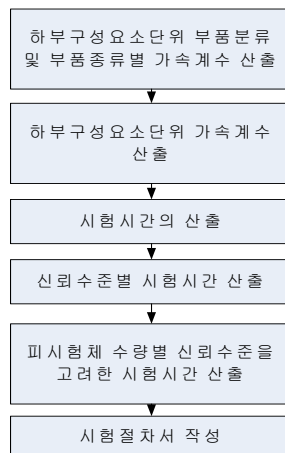


그림 5. 신뢰성시험 모델링 절차

온도스트레스를 이용한 출입문시스템 신뢰성시험을 위해서는 시료의 수, 시험기간, 시험결과의 유효수준에 대한 분석이 선행되어야 한다.

신뢰성시험 모델링 절차에 따라 출입문시스템의 하부구성요소단위 시험시간이 시험결과의 유효수준 및 시료 수를 기준으로 다음과 같이 산출되었다.

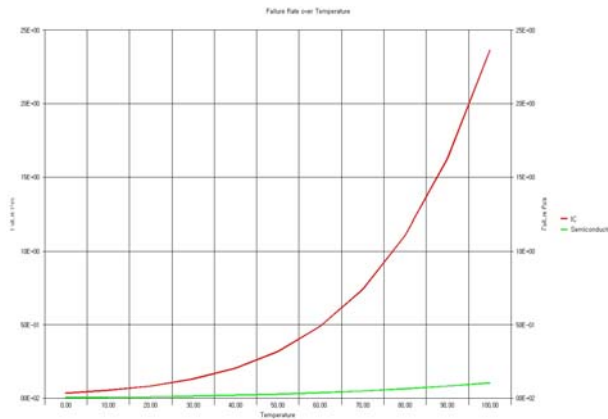


그림 6. 신뢰성시험 시간과 유효수준에 따른 시험시간 산출

도어 시스템 중 DCU(Door Control Unit) 안의 IC와 semiconductor류 위주로 신뢰성 분석을 하였으며 향후에는 도어시스템을 구성하는 모든 부품의 BOM을 통한 신뢰성 분석 및 시운전을 통한 필드 데이터 측정을 토해 신뢰성 수치에 어느 정도 근접 하는가에 대해 재고해 볼 예정이다. 도어장치의 하부구성요소 단위로 입출력의 기술사양을 제시하였고, 신뢰성 수치를 비교 분석 및 고장의 판단기준을 제시하였다.

### 3. 결론

출입문시스템 안정화 기술은 전자부품으로 구성된 제어기를 사용하여 높은 신뢰도가 요구되는 제어를 수행하는 원자력, 항공, 화학플랜트 등의 분야에 대하여 개발수명주기별로 신뢰도를 정량적으로 관리하는데 활용할 수 있다. 또한, 하부구성요소단위 신뢰성시험을 통합 예측신뢰도의 입증방법으로 열차제어 분야 기존설비의 잔존수명평가를 수행하면, 장치별 내구연안 할당의 적정성, 사용 중인 시스템의 현재 신뢰도를 평가하여 운영 및 유지보수의 효율성을 극대화 할 수 있다.

개발이 완료된 출입문시스템은 본선 시운전을 통해 시험·평가한 후 실용화를 목표로 하여, 개발된 시스템이 적용된 틸팅열차 및 일반 열차는 내수 시장과 수출 시장에 진출하여 경쟁력을 높일 수 있도록 한다. 본 연구는 기술개발의 초기단계부터 연구원이 공동으로 참여하였으며, 개발 후에도 협력 업체로 기술을 전수하는 방법을 채택하기 때문에 기업군별 기술 보호와 기술 파급이라는 두 가지 목적을 동시에 획득할 수 있다. 출입문시스템의 실용화 방안은 두 단계로 나눌 수 있으며, 1단계에서는 국내외 일반 철도와 틸팅열차는 물론 향후 건설되는 국가교통연계수단의 활용대상으로 하고 있다. 2단계에서는 높은 신뢰도를 갖는 출입문시스템의 핵심기술인 결합허용 설계기법을 철도분야 뿐만 아니라 항공, 원자력 등의 안전필수 응용분야의 핵심부분에 진출하고자 한다.

### 참고문헌

1. 한국철도기술연구원(2005), “고속철도기술개발사업 고속철도 열차제어시스템 안정화기술개발 단계 평가보고서”, 서론
2. IEC61508(1998), "Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems(Part1, General requirements)", pp.65
3. Barry W. Johnson(1989), "Design and analysis of fault-tolerant digital systems", pp170-175
4. Relex7.7(2005), "MIL-HDBK-217 Equation References"
6. MIL-STD-785B(1980), "Reliability Program for System and Equipment Development and Production"