

신뢰성 공학의 발전사적 고찰

이 성 경 *

요 약

목 차

- I. 신뢰성 공학의 출범 /
- II. 발전체계와 활동분석 /
- III. 신뢰도 평가와 소프트웨어의 도전 /
- IV. 신뢰성 공학의 활동방향 /

신뢰도를 높이는데 별도의 비용이 든다는 생각은 이미 퇴색하고 있다. 좋은 제품을 만들어 잘 수록 원가는 떨어진다.

초기 신뢰성공학은 부품의 고장에서 출발하였지만, 지금은 결함을 줄이는 방향으로 개념이 바뀌고 있다. 결함이란 요구분석, R / D, 생산활동 전반에서 일어나는 모든 불완전요소를 포함한다. 가능하다고 해서 신뢰도를 올릴 필요는 더더욱 없다. 그래서 사용환경, 요구조건, 기술배경 등을 감안한 비용의 효용성이 활발히 거론되고 있다.

신뢰성활동은 물리적대상에서 인간의 사고가 집약된 소프트웨어, 나아가서는 인간자체도 그의 영역으로 되고있다.

본고에서는 신뢰성공학의 성장과정을 발전사적 관점에서 재조명하고, 개념의 변천과 앞으로의 움직임 그리고 당면문제들을 분석한다.

I. 신뢰성공학의 출범

* 품질공학연구실 실장

2차세계대전을 승리로 이끄는데는 전자시스 텁이 결정적인 역할을 하였음은 주지된 사실이다.

당시 미해군은 16만대의 전자장비를 보유하고 있었는데 이들을 작전가능상태로 유지관리하는데는 년간 100만개의 수리용 부품을 공급해야만 했다. 부품의 고장은 능동소자(Active element) 측이 월등히 많았는데, 이중에서도 진공관은 타부품의 5배 이상의 고장률을 기록하고 있었다.

전후 이 경험을 바탕으로 미국방성(DOD)은 신뢰성공학(Reliability Engineering)이라는 새로운 학문을 탄생시키고, 1950년 12월 전자장비의 신뢰성에 관한 특별조직인 Ad hoc group을 창설하였다. 초기의 Ad hoc group은 진공관의 신뢰성향상 연구와 냉전(Cold War)에 대비한 전자장비의 장기보관시의 신뢰성유지문제, 신뢰성의 평가척도와 계량화문제를 주된 업무로 하였다.

1948년에 개발된 트랜지스터가 진공관을 대체시키면서 어느 정도 고장률문제가 해결되자 여타의 부품고장률이 상대적으로 커져 전자장비에 사용되는 모든 부품의 고장률을 다루어야 할 필요성이 대두되어, 1952년 8월 위원회성격인 Advisory group(AGREE : Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment)으로 승격, 영구조직화 함으로써 조직적인 신뢰성공학 활동의 기반을 마련하였다.

II. 발전체계와 활동분석

1950년대에는 주로 부품의 신뢰성분야에 주력하였다.

진공관에 대하여는 AGET(Advisory Group

on Electronic Tubes) 와 ARINC(Aeronautical Radio Inc.) 가, 비전공관류는 VITRO와 Bell 연구소가 군수품을 대상으로 연구하였다. 민수장비에 대해서는 1953년부터 개시되었는데 RETMA(Radio Electronics and Television Manufacturers Association) 가 그 효시이다.

신뢰성과 품질관리에 관한 전문기술지도는 IRE(International Reliability Engineering)의 Transaction이 1952년에 첫 발간되었고, 1954년 11월 처음으로 심포지움이 개최되었다. 이들 학술활동은 후에 IEEE의 신뢰도 협회(Reliability Society)가 관장하게 된다.

군사·산업체간의 공동연구는 1955년 유도탄(Missile)에 대한 신뢰성 심포지움을 기점으로 일련의 신뢰성 핸드북, 텍스트북 등의 공동발간까지 확장되었다. 어쨌든 1957년 이전까지의 신뢰성 기술자료는 대부분이 진공관에 관한 것이었다.

이 시기에 나온 기술논문으로서는 1951년 W. Weibull이 발표한 「통계적 분포함수」의 수학적 모델, B. Epstein과 M. Sobel이 미국통계학회에 기고한 「수명시험」 그리고 Epstein이 1954년에 제시한 「지수분포*시의 간이수명시험」을 들 수 있는데, 이들이 지금도 사용되고 있는 신뢰성시험의 기본이론을 형성하고 있다.

신뢰성기술을 체계화시킨 기술자료로서는 1956년 RADC(Rome Air Development Center)의 후원하에 Mc Grawhill사가 발간한 지상전자장비와 「신뢰성요소」의 RCA가 발표한 「신뢰성 Stress 분석」이 있다. 신뢰성요소에서는 임의 시점에서 부품이 고장을 일으키지 않고 살아있을 확률, 즉

주* 지수분포의 고장형태를 널리 사용하는 주된 이유는 시스템의 신뢰도계산이 구성품 개개의 고장률

의 합으로 간단히 이루어진다는 점과 고장률 데이터를 쉽게 정리할 수 있다는 점에 있다.

신뢰도 $R = \exp(-\lambda t)$ 의 Bathtub 형태를 취한다는 사실을, Stress분석에서는 부품고장률의 계산방법을 제시하였다. 이 둘을 종합한것이 전자부품의 신뢰성 모델 표준으로 사용되고 있는 MIL-HDBK-217 (1962년 발간)이다.

현재는 5차수정판인 MIL-HDBK-217D이다. 1960년대에 들어서는 RADC가 주장한 「고장 물리학」, Bayes의 「통계적처리기법」, 「Markov Chain」등의 수학적이론이 강화되고, 전자공학을 기초로 한 물리적분석법이 가미되었다.

이로써 저항류(Resistors)에 대한 신뢰성평가 방법을 EIA (Electornic Industry Association) 가 완성하여 1963년 MILSTD-690으로 발간하였고, 1964년에는 이들 모든 부품에 확대 적용한 「전자부품의 품질보증계획」이 MIL-STD-790으로 간행되었다. 신뢰성을 설정한 부품규격 (ER : Established Reliability) 의 기술적기초는 이때 마련된 것이다.

이후 미공군의 ICBM (Minuteman) 개발계획에서는 고신뢰성 부품규격의 적용을 시도하였고, F-111개발에서는 반도체의 screening test에 TX (Testing Extra) 기법을 도입하였다.

군사용 반도체규격의 기본은 JAN (Joint Army & Navy)이다. 여기에 TX가 추가된것을 JAN TX, X-ray등을 이용한 특수시각검사를 포함한 것을 JANTXV라 하고, 산업계에서도 고신뢰성 부품규격으로 자주 이용하고 있다. 미세회로(Microcircuit)에 대한 신뢰성시험은 radar digitizer를 대상으로 RADC가 1966년에 작성하였는데 MIL-STD-883으로 규격화되어 현재 미공군과 연방항공협회(FAA)에서 다같이 사용하고 있다.

1960년대 초반에 개발된 기술중 부품의 가속 수명시험기술(Accelerated Life Testing)은 RADCA가 항공기의 경보제어시스템을 대상으로 만

든 수준에서 크게 진전하지를 못하고 있으나, 이와는 대조적으로 시스템의 효용성을 평가하기 위해 임시방편으로 제안된 가용도(Availability)는 여러분야에서 광범위하게 사용되고 있다.

- 가용도란 임의시점에서 작동가능상태에 있을 확률을,
- 신뢰도란 임의시점까지 고장없이 작동이 보장될수있는 확률을 의미한다.

가용도는 WSEIAC (Weapon System Effectiveness Industry Advisory Committee)에서 발표한 것인데 1960년대 후반에 큰 관심을 불러 일으켜 수명주기비용(Life cycle cost)의 기초를 형성하게 되었다.

1960년대의 주된 논문으로서는 J. Duane의 「고장률의 시간적 변화」, E. Codier의 「수명기간중의 신뢰도성장」, J. Selby와 S. Miller의 「신뢰도의 계획관리」를 들 수가 있다. 신뢰도성장시험은 1978년 MIL-STD-1635로, 신뢰도성장관리는 1981년 MIL-HDBK-189로 문서화되었다.

1970년대는 대량소비주의(Mass Consumerism) 성향이 두드러져 군수품보다는 민수품 시장이 기술을 주도하였다. 소비자의 구매력은 커진 반면 월남전의 반대여론으로 국방예산의 삭감이 큰 영향을 준 것이다. 소비자는 고장이 적고 안전한 제품을 찾았으며 제조업체는 불량품으로 인한 소송제기를 피하는 수단으로 신뢰성공학을 도입하기 시작했다. WSEIAC는 1973년 신뢰성의 경제적 이점을 구매비용의 효용성(ACE : Acquisition Cost Effectiveness) 연구과제를 통해 발표하였다. 이 연구결과를 바탕으로 신뢰도개선 보증(RIW : Reliability Improvement Warrantees) 제도가 만들어져 TACAN(무선행법장치)과 UHF무선장비에 처음 시도되었고 이후 ARC-

- 164와 ARN - 118에서 큰 성과를 거두자 계속하여 장거리 무선향법장치인 OMEGA 시스템, F - 16 항공기등에 적용하였다. 1984년에는 모든 국방장비 구매에 이 제도를 도입할 것을 국회의 요구사항으로 제안되기에 이르렀다.

하드웨어 위주로 발전한 신뢰성공학이 이렇듯 성공을 거두자 이때부터 소프트웨어의 신뢰성이 거론되기 시작한다.

1975년 P. Morando가 발표한 「소프트웨어의 신뢰성 모델」과 1967년 Boeing사가 NASA를 위해 개발한 「Sneak Circuit 분석」 기술이 소프트웨어 신뢰도를 분석하는데 이용되기 시작했다. 모델은 여러분야를 대상으로 개발이 되었는데 일반적인 성향은 주어진 시간내에 발견하지 못한 소프트웨어 에러수를 추정하는 방법에 관한 것들이었다.

학술활동으로는 1970년대 초반에 나온 고장계 통분석(FTA : Fault Tree Analysis)과 후반에 원자로의 안전성을 보증하려는 노력에서 나온 Minimum Cut Sets를 이용한 네트워크분석기법을 들 수가 있다. 신뢰성공학과의 직접적인 연관을 떠나 이 시기에 나온 새로운 학문으로서는 정전기방전(ESD : Electrostatic Discharge)이 있다. 포장에서 일어나는 α 분자나 우주선이 점차 소전력화 되어가는 IC에는 치명타가 될수가 있고 경우에 따라서는 고전적인 열문제(Thermal problem)보다 더 심각한 것으로 받아들여져 ESD는 새로운 포장기술에서 년 50억 \$ 이상의 시장을 형성해 오고 있다.

1980년대에 들면서 세계의 교역량은 크게 증가되고 생산업체는 품질과 생산성을 동시에 높일수 있는 수단으로 신뢰성공학의 가치를 재인식 한다. 지금까지는 신뢰성공학을 품질개념에서만 파악하고 생산성과는 관련이 없는 것으로 생각했었다. 그러나, 신뢰성을 높임으로써 제품의 손실(Loss)을 줄이고, 재조립비용(Rework cost)과 사후관리비용(소송, 보상비용포함)을 낮추며 기타 생산비용요소를 경감시킨다는 사실을 발견한 것이다.

1980년대의 주된 경향은 신뢰도를 분석·예측 할수 있는 소프트웨어 패키지의 개발이다. Desktop으로부터 mainframe에 이르기 까지 모든 종류의 컴퓨터에 응용할 수 있는 각종의 소프트웨어가 속속 쏟아져 나오고 있다. 신뢰도 분야에서 소프트웨어 패키지의 발전은 여러목적의 또는 여러 단계에서 사용되는 모든 프로그램들이 동일한 데이터베이스를 이용할 수 있도록 통합시키는 방향으로 나아가고 있다. 이러기 위해서는 각각의 설계용 프로그램은 최소한의 신뢰도 항목을 다루는 기능이 추가되어야 한다고 보고 있다.

예로서, CAD는 종전의 회로구성과 제도기능에서 더 나아가 열분포, 예측신뢰도등이 감안된 설계자료를 데이터베이스로 넘기어 CAM이나 다른 신뢰성분야 소프트웨어 패키지가 직접 데이터를 처리할 수 있어야 함을 강조하고 있다. 실제 AFWAL(Air Force Wright Aeronautical Labs)에서는 이러한 기능을 모두 갖춘 ITAD(Integrated Thermal Avionic Design)라고 하는 신

주 * Fault tolerance란 시스템의 일부 구성품이나 기능 불력이 고장났을때 이를 우회하여 성능이 지속적으로 유지되도록 하는 새로운 신뢰성설계 방식이

다. 고신뢰성이 요구되는 원자력발전 시설이나 고속 칩적소자인 VHSIC(Very High Speed IC)등의 설계에 응용된다.

형 CAD의 개발을 발표하고 있다.

이제는 민수품이 군수품보다 더 많은 전자장비를 사용한다. 통신시스템이 그러하고, 자동차산업, 교통제어 시스템, 원자력 발전소의 고신뢰성 및 Fault Tolerance*등이 그 좋은 예이다. 기능의 고도화에 따른 시스템의 복잡성(Complexity)과 소프트웨어의 비중이 점차 커짐에 따라 그래픽 이론(Graphic theory)에 기초한 네트워크 신뢰도의 연구와 고장형태와 영향도 분석의 FMEA(Fault Modes and Effects Analysis), 소프트웨어의 신뢰성과 효용성을 위한 STARS(Software Technology for Adaptable Reliable System) 등의 개발에 박차가 가해지고 있다.

III. 신뢰도평가와 소프트웨어의 도전

신뢰도평가에서 최종관심은 시스템의 신뢰도이다.

시스템의 신뢰도는 하드웨어와 소프트웨어 그리고 경우에 따라서는 오퍼레이터가 적절히 주어진 기능을 수행하는지의 여부로서 결정된다.

하드웨어의 신뢰도를 R_{HW} , 소프트웨어는 R_{SW} , 오퍼레이터는 R_{OP} 라고 한다면, 시스템의 신뢰도 R_{SYS} 는,

$$R_{SYS} = R_{HW} \cdot R_{SW} \cdot R_{OP}$$

로 표현될 수가 있다.

신뢰도평가에 있어서 하드웨어분야는 수많은 경험과 방대한 자료, 거의 완벽한 기술이 구사되고 있다. 대부분의 전자제품에 대한 고장률 데이터가 집대성되고 정부 표준문서(MIL-HDBK-217)화 된 것도 벌써 25년의 오랜 역사를 지닌 1962년의 일이다.

신뢰도의 예측이나 평가이론은 각종 시스템과 구성부품의 고장률에 관한 source data로부터

개발되므로, 자료가 적다면 데이터베이스가 형성되어 있지 않으면 정확한 이론은 찾아 낼 수가 없다. 이러한 측면에서 볼 때 단지 15년여의 경험밖에 없는 소프트웨어 분야는 신뢰성공학이 개척해야 할 신천지라 할 수 있다.

1. 소프트웨어분야의 접근방향

신뢰도예측에서 소프트웨어는 하드웨어와 동일한 개념을 지닌다는 생각은 점차 보편화되고 있다. 동원되는 수단이나 기술은 서로 다를지언정, 설계방법론이나 시스템의 개발관리, 고장요소와 취약점의 조기진단, 현장운용계획, 운용신뢰도의 예측업무 등은 모두가 같이 적용받기 때문이다.

하드웨어의 신뢰도를 평가하기 위해서는 먼저 구성요소에 의한 시스템의 구조적 모델을 작성한다. 구성요소는 전기적, 기계적 소자와 집적회로, 어셈블리 등으로 분류한다. 각각의 구성요소별 고장률은 환경조건을 감안하여 계산한 후, 구조적 모델에 대응시키는데 이것이 소위 말하는 신뢰도 모델인 것이다.

소프트웨어의 경우에서도 마찬가지 방법론이 성립한다. 매크로 모델(Macro model)을 구조적모델에, 마이크로모델(Micro model)은 구성요소적 성격으로 대응시킨다는 개념이다. 다만 하드웨어에서는 구성요소별 정의가 잘 되어 있으나 소프트웨어에서는 아직 그렇지 못하다는 것이 차이점이다. 예로서 CRT display driver module, schedule module 등으로 명명된 소프트웨어들은 주기능에 의한 개념적 명칭이지 어느 하나 동일한 규격이 없다는 점에서, 설사 소프트웨어의 고장률데이터가 모아져 있다손 치더라도 하드웨어처럼 쉽게 곧바로 적용될 수가 없다. 따라서, 소프트웨어 신뢰도평가에서는 데이터의 분석기

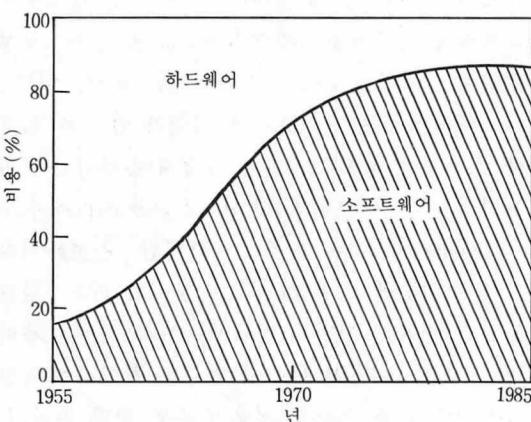
법이 추가적으로 개발될 필요성이 여기서 발생한다.

소프트웨어가 가지고 있는 또 다른 근본적인 특성은 복잡성(Complexity)이다. 동일한 것이라곤 하나도 없다. 소프트웨어를 과학적 예술이라 부르는 연유에 공감이 간다. 예술에서처럼 소프트웨어의 개발기술은 설계하고, 검사하는 기술을 항상 앞지를 뿐만아니라 기술의 존적이기 보다는 노동집약적인 성격으로 인해 일정한 표준도 없다는 점이다.

소프트웨어개발에 소요되는 인력은 프로그램의 크기에 근사적으로 비례하는데, 대개의 신뢰도 모형이나 비용모형의 기본으로 되고 있다.

소프트웨어의 복잡성은 해마다 증가하고 개발인건비도 계속 상승함으로써, IC의 기술진보가 하드웨어비용을 경감시키는 현상과는 반대로 시스템의 개발비용에서 차지하는 소프트웨어 개발비의 비중은 급격히 커지고 있다.

(그림 1)에서 알 수 있는 바와 같이 1955년 20% 이하를 점유하던 소프트웨어의 개발비용이 1985년에 이르러서는 80%를 웃돌고 있어, 개발비의 효용성과 생산성향상을 추구하는 신뢰성공학은 새로운 도전을 맞이하고 있는 것이다.



(그림 1) 하드웨어와 소프트웨어의 비용추세

2. 소프트웨어신뢰도의 개념

하드웨어의 신뢰성은 완벽한 제품을 대상으로 그의 시간적 특성변화와 고장발생, 수명기간 등을 분석하고 평가하게 되나, 소프트웨어 신뢰성은 처음부터 불완전한 제품에서 출발하므로 자연 평가방법은 달라진다. 신뢰도라기 보다는 오히려 가용도 개념이 강하게 작용하는 것이다.

소프트웨어 신뢰도는 「임의 기간중 에러 없이 동작하게 될 확률」로 논하는 것이다. 현재로서는 에러라는 말의 정의조차 문제화되어 3 가지의 결합기준- 치명적결합, 중결합, 경결합- 을 만들어 사용한다. 예로서, 3 개의 시간함수값을 계산하는 프로그램이 있다고 하자. 시간변수 t에 대해 $a(t)$, $b(t)$, $c(t)$ 값을 구해 t값을 포함한 3 개의 계산값을 찍는다고 할 때, 계산이 잘못되었거나 결과가 나오지 않았다면 시스템고장이라고 간주할수가 있겠으나, 인쇄된 숫자간의 간격이 잘못 배열된 경우도 고장이라고 할 수 있느냐는 견해이다.

소프트웨어의 신뢰도를 논할 때는 일반적으로 에러 모델을 사용하며, 에러의 발생위치는 따지지를 않는다. 즉, 에러가 어디서 발생했던 간에 시스템이 고장을 일으키면 에러인 것이다. 이 개념을 매크로 모델이라고 하는데 근본 생각의 발생은 원래 소프트웨어는 수량 E_T 만큼의 에러를 가진 블랙-박스(Black-box)로 간주한다는 생각이다.

이보다 더 세부적으로 원인규명을 하는 것을 마이크로 모델이라고 지칭하나 데이터의 수집이나 분석이 어려워 아직 정형화 되어있지 못한 실정이다.

또 다른 개념으로는 소프트웨어가 원인이 되어 발생된 고장은 모두 시스템 신뢰도로 포함시켜 일괄적으로 처리하자는 개념이다. 이 취지로 최근

개발된 것으로는 RADC가 시도한 하드웨어와 소프트웨어를 종합하여 시스템의 신뢰도 척도로 사용하는 이론을 들 수가 있다.

하드웨어의 신뢰성은 미국방성이 주도해 온 반면 소프트웨어공학은 NATO가 주도한 것으로 평가되고 있다. 소프트웨어공학에 대한 국제회의를 NATO의 과학분과위원회에서 1차는 1968년 10월 독일의 Garmisch에서, 2차는 1969년 10월 이탈리아의 Rome에서 개최했기 때문이다.

초기의 소프트웨어 신뢰성 모델 개발은 Jelenski 와 Moranda 그리고 Shooman이 많은 공헌을 했다. 지금까지의 주된 업적은 소프트웨어의 신뢰도를 계량적으로 분석하여 1976년에 발표한 Bell 연구소 J. Harr의 논문인 「ESS의 Downtime 조건」과 소프트웨어 신뢰도의 최초 모델로 평가되는 1976년의 「Markov birth-death model」 그리

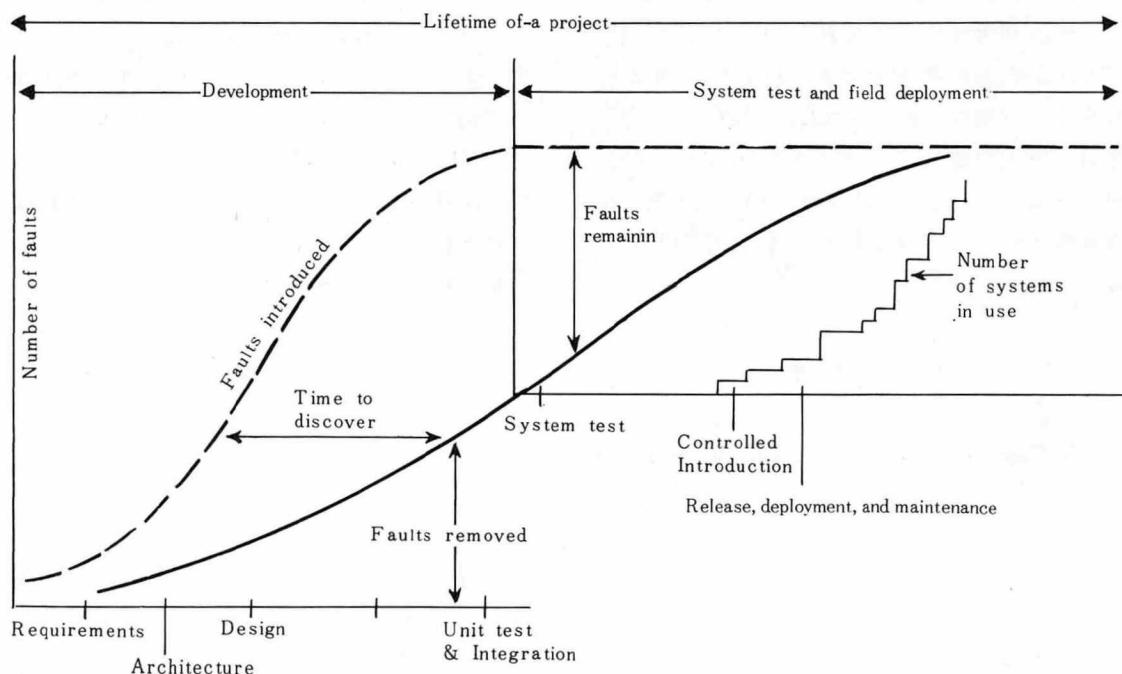
고 1960년에 나온 「에러제거의 누적 성장곡선」 등이 손꼽힌다.

아동든 소프트웨어 신뢰도에 대한 평가기술의 성장은 고장을 데이터베이스, 고장데이터의 분석 기술, 수학적 모델, 마이크로-모델, 하드웨어-소프트웨어 모델 등의 발전에 크게 좌우될 것으로 전망된다.

IV. 신뢰성공학의 활동방향

통신장비를 구성하는 부품의 수는 대개 천~십만개 범위로 되나 요즈음은 이보다 훨씬 큰 시스템이 많이 나오고 있다. 제품의 대형화, 복잡화는 고장의 원인을 증가시킨다.

고장에 대한 사용자의 불만을 해소하고 보다



(그림 2) 결함의 발생과 치유곡선

경쟁력있는 제품을 만들려면 결함요인을 최소화 시켜야 한다. 조악한 설계로 좋은 품질을 기대할 수가 없고 제조과정에서의 결함치유도 효과적이지 못하므로 신뢰성활동은 R/D 단계에서 더욱 강조되고 있다. 제조과정에서 강조되던 Do-it-right 개념이 Design-it-right 개념으로 변모하고 있다.

(그림 2) 에서와 같이 결함의 발생은 개발단계에서 압도적으로 많다.

요구사항을 잘못 이해하는 것에서부터 구조설계, 회로설계과정을 거치면서 계속 증가해 가나, 결함치유는 운용단계에 까지 연장된다. 후기로 갈수록 결함의 발견도 힘들고 결함치유 비용은 기하적으로 증가한다.

부품의 고장률을 줄이려는 의도에서 출발한 신뢰성공학이 이제는 제품의 경쟁력향상과 R/D의 효용성을 키우는데도 많은 관심이 집중되고 있으며 그의 가치도 새로운 각도에서 평가받고 있다. 초기에는 미국방성이 주도권을 가지고 있었지만, 1970년대에 들면서 민간업체, 연구소, 학회로 넘어가기 시작했다. 현재는 IEEE, IEC, ASQC 등의 신뢰성그룹이 매우 활동적이다. 성장기에 들어선 신뢰성공학은 소프트웨어분야의 신천지를 개척하면서 성숙된 새로운 면모를 들어내리라 본다

참 고 문 헌

1. A. Coppola, 「Reliability Engineering of Elect-

- ronic Equipment, A Historical Perspective」, IEEE trans on reliability, Vol. R-33, NO. 1, April 1984.
2. M. Shooman, 「Software Reliability - A Historical Perspective」, IEEE trans. on reliability, Vol. 33, NO. 1, April 1984.
3. J. Dickson et al, 「Quantitative analysis of software reliability」, Proceeding, Annual Rel & Maint Symposium, January 1972.
4. J. Musa, 「A theory of Software reliability and its application」, IEEE trans. on Software engineering, Vol. SE-1, September 1975.
5. E. Codier, 「Reliability growth in real life」, Proceeding on Annual Reliability Symposium, 1968.
6. G. Moffatt, 「New Initiatives in Quality Assurance」, Bell Labs records, 1984.
7. B. Retterer, 「Maintainability, A Historical Pespective」, IEEE trans. on reliability, Vol. R-33, NO. 1, April 1984.
8. R. Barlow, 「Mathematical theory of Reliability」, IEEE trans. on reliability, Vol. R-33, NO. 1, April 1984.