

## [ 요약문 ]

소비자의 요구수준 향상으로 제품의 구조 및 성능이 점점 복잡해지고 부품수는 증가함에 따라, 시스템을 구성하는 부품의 고장발생으로 인한 경제적 손실예방, 안전성 확보 등을 위하여 신뢰성 중심의 종합적인 품질보증에 대한 요구가 점점 증대되고 있다. 본 글에서는 이러한 구성부품의 신뢰성 제고를 위하여 신뢰성평가센터가 2000년부터 현재까지 약 10년 동안 지속적으로 수행하고 있는, 기본 성능시험을 비롯한 내환경성시험, 안정성시험, 수명시험 등의 종합적이고 체계적인 신뢰성 시험평가와 신뢰성인증 시스템에 대하여 고찰하고, 그 과정에서 독창적으로 정립한 13단계의 한국적 신뢰성 인증기법에 대해 설명하고자 한다.

## 1. 서론

과학기술의 급속한 발전은 제품의 다기능화, 고성능화, 고정밀화를 가져와 사용 편리성은 증가되었지만 구조 및 성능이 복잡해지고 부품수가 많아짐에 따라 제품 및 부품의 고장 기능성은 증가하였다. 따라서 구성부품에 대하여 규정된 사용조건에서 의도된 기간 동안 고장 없이 요구된 기능을 수행할 수 있는 능력을 나타내는 신뢰성에 관한 요구가 시스템 전체의 품질보증에 있어 큰 비중을 차지하게 되었다. 또한 고장 발생으로 인한 경제적 손실 발생의 대처, 제품책임(PL)법의 시행에 따른 안전성 확보, 제품개발 기간의 단축, 보증수명의 증대를 통한 시장 확대 등을 위하여 신뢰성 평가를 중심으로 한 체계적이고 종합적인 신뢰성인증 시스템이 절실히 필요하게 되었다.

이를 위하여 한국기계연구원 신뢰성평가센터는 지난 10년(2000년 5월~2009년 6월) 동안 정부주도하에 추진하여온 신뢰성향상기반구축사업을 성실히 수행하여 왔으며, 이의 결과로 핵심 기계류부품 272종을 평가 할 수 있는 신뢰성 평가기준을 개발하였고, 164종의 평가 장비 구축, 198건의 신뢰성 인증을 통하여 종합적인 신뢰성평가 및 인증 시스템을 구축하였다. 이를 바탕으로 2009년 7월부터는 정부로부터 '기계류 및 메카트로닉스 부품'에 대한 신뢰성 인증기관으로 지정 받아 정부인증에서 민간인증 체제로의 전환을 가져왔다. 따라서 신뢰성 시험평가를 수행하고 직접 인증을 부여함으로써 업체의 요구조건에 신속하게 대응할 수 있는 시스템을 갖추게 되었다.

현재 신뢰성평가센터에서 수행하는 신뢰성평가 기법은 종합적인 품질을 평가하는 것으로 기본성능, 내환경성, 안전성, 수명 시험을 수행하고, 고장분석을 통하여 문제점을 개선하는 과정으로서 기계공학, 산업공학, 전기·전자공학, 환경공학, 고장 물리학, 통계학 등이 융합된 기술이라 할 수 있다. 본 글에서는 이러한 신뢰성평가의 개념을 고찰하고, 이를 수행하기 위한 절차와 방법으로 세계유명 규격 조사를 통한 시험항목 결정, 수명평가의 종류 및 수명시험 설계, 내환경성 시험조건 결정, 안전성시험 항목 결정 등에 대하여 그림 1과 같이 신뢰성평가센터에서 독창적으로 정립한 13단계의 한국적 신뢰성인증 기법을 소개하고자 한다.

Step 1	신뢰성평가 품목에 대한 세계유명 품질인증규격 조사
Step 2	보증수명(Qualification Life) 결정
Step 3	신뢰성 척도(Reliability Measure) 결정
Step 4	주요 고장모드 및 시험항목 도출
Step 5	형상모수(Shape Parameter) 결정
Step 6	샘플수(Sample Size) 결정
Step 7	신뢰수준(Confidence Level) 결정
Step 8	합격판정기준(Failure Acceptance Rule) 결정
Step 9	가속수명시험(Accelerated Life Test) 방법 결정
Step 10	수명시험 시간의 계산
Step 11	시험 효과성(Test effectiveness) 분석
Step 12	내환경성 시험항목(Environment Test Items) 결정
Step 13	안전성 시험항목(Safety Test Items) 결정

그림 1. 한국적 신뢰성인증을 위한 13단계의 신뢰성평가 기법

## 2. 한국적 신뢰성 인증체계 개념

### 2.1 한국적 신뢰성평가 개념

인간에 있어서 육체적으로 건강한 사람이란 심장, 폐, 위 등 신체를 이루고 있는 모든 기능조직이 건강한 사람을 의미한다. 마찬가지로 시스템도 이를 구성하고 있는 모든 부품이 고장 없이 원활하게 작동되어야지만 그 시스템이 잘 작동한다고 할 수 있다. 따라서 한국적 신뢰성평가는 그림 2와 같이 모든 부품의 요구 성능, 내환경성, 내구성(수명), 안전성 등을 종합적으로 평가하는 “종합품질 보증” 시험으로 정의하였다. 또한 신뢰성평가센터는 이 과정에서 발생하는 고장 및 수명 미달 부품에 대해서는 분석을 통하여 설계 및 성능 개선을 지원하는 종합건강검진센터와 같은 역할을 수행하고 있다.

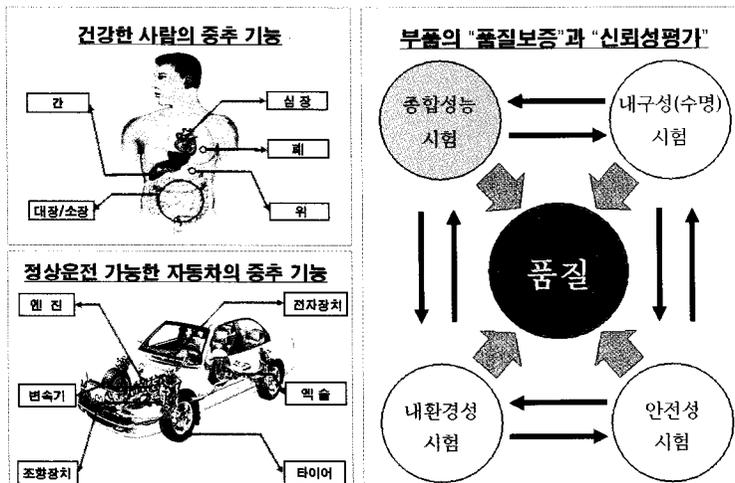


그림 2. 한국적 신뢰성 평가시험의 정의

이러한 신뢰성평가를 수행하기 위해서는 시험규격 및 절차가 필요하다. 그런데 대부분의 경우에는 신뢰성평가에 대한 공식화되어 있는 시험규격이나 평가규격이 없는 경우가 많다. 따라서 신뢰성평가센터는 평가기준 및 방법을 수립하기 위해서 ISO, IEC, EN, ANSI, DIN, JIS, ASTM, SAE, MIL 등의 각종 세계 유명 규격 및 관련 전문자료 등을 조사하고, 산업계의 현장작동 조건(사용 환경, 사용 조건, 수명 등)과 고장분석을 통하여 평가기준을 만들고 있다. 이 평가기준은 그림 3과 같이 요구하는 기능 및 성능을 만족하는지를 평가하는 기존의 품질인증 시험에 수명시험, 내환경성시험, 안전성시험이 보강된 종합규격의 형태이다.

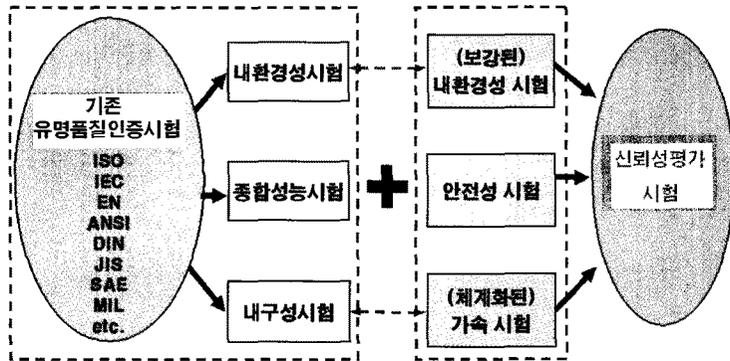


그림 3. 유명 품질인증시험과 신뢰성 평가시험의 차이

## 2.2 신뢰성인증 추진 절차

신뢰성인증 추진절차는 그림 4와 같이 업체로부터 신뢰성인증에 대한 요청이 들어오면 시험대상 부품의 시험규격인 신뢰성 평가기준을 개발하고, 장비를 설계/제작 또는 변경하여 신뢰성평가 및 인증수여 업무를 수행한다. 한국 기계연구원 신뢰성평가센터에서 수행하는 신뢰성인증의 가장 큰 장점 중에 하나는 인증 받은 부품의 수출 지원을 위하여 세계 유명인증기관과 신뢰성 상호인증을 맺음에 따라 인증 마크를 취득할 수 있는 비용 및 시간을 절약할 수 있다는 것이다. 현재 TUV Rheinland(독일), Wyle Lab.(미국), BV(프랑스), Lloyd(영국), AEM(미국), UL(미국), DNV(노르웨이) 등 7개 기관과 신뢰성인증에 대한 상호인증 협약이 체결된 상태이다.

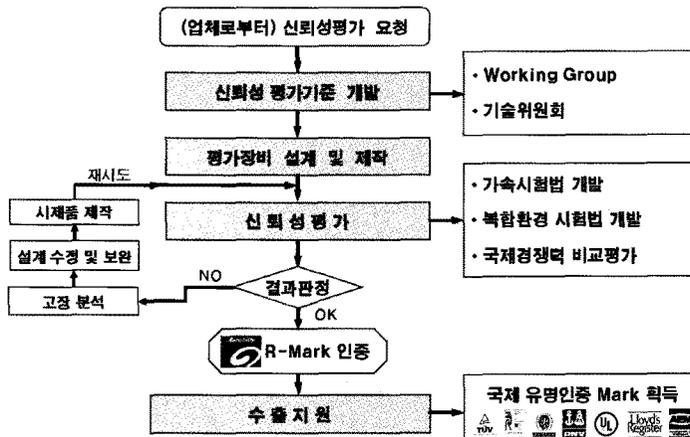


그림 4. 신뢰성인증의 추진 절차



### 2.3 신뢰성인증(R-Mark) 시험내용

신뢰성평가는 소비자의 신뢰성 요구조건에 만족함을 시험평가를 통하여 보장하기 위한 것으로, 궁극적으로 신뢰성 인증(R-Mark)을 위하여 실시된다. 종합 성능시험, 내환경성시험, 수명시험, 안전성시험을 그림 5와 같은 절차에 따라 모두 수행하고, 각각의 시험 중간에는 성능평가를 실시하여 평가기준의 합격치를 만족하는지 평가한다.

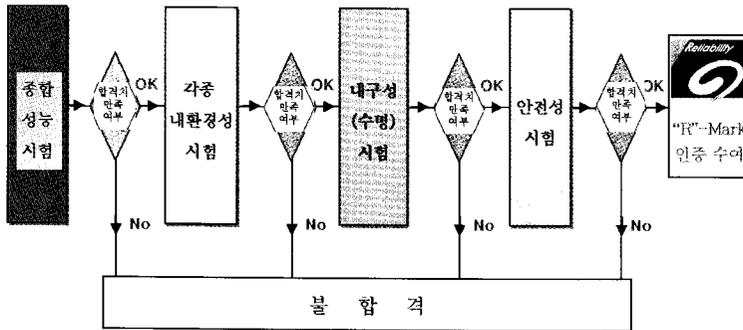


그림 5. 신뢰성 인증을 위한 신뢰성 시험 순서

#### 2.3.1 종합 성능시험

부품이 가져야할 기본 성능을 만족하는지를 평가하는 시험으로 수명시험, 내환경성시험, 안전성시험의 시작 전, 중간, 종료 후에 실시한다. 내환경성시험, 수명시험, 안전성 시험 전과 수명시험이 종료된 후에는 모든 항목의 종합 성능 시험을 실시하고, 내환경성 시험 및 수명시험 중간에는 종합 성능시험 중 일부 열화 특성을 갖는 시험 항목을 선택하여 실시한다. 시험 전, 시험 중간, 시험 후에 측정한 성능시험 데이터는 사용시간이 경과함에 따른 성능의 열화 (Degradation)를 비교·검토하는 중요한 지표로 사용된다.

#### 2.3.2 내환경성시험

내환경성시험은 사용 환경에서 고장이 발생하는지, 환경변화에 따른 충분한 내성을 갖는지를 평가하는 시험이다. 기계류 부품의 경우 MIL-STD-810F의 시험방법 및 절차를 주 참고 자료로 하여 실시되며, 시험조건 및 항목은 사용되는 지역, 실제 사용 환경, 관련 참고 규격 등을 조사하고 종합적으로 검토하여 결정한다. 각각의 내환경성 시험 항목의 시험전과 후에는 육안검사 및 대표적인 성능을 평가하여 성능변화가 있는지 확인한다.

#### 2.3.3 수명시험

부품의 보증수명을 보증하기 위하여 규정된 시험시간을 시험하여 고장이 발생하는지를 평가하는 시험이다. 현재 신뢰성평가센터에서 실시하는 수명시험은 신뢰성 입증시험(Substantiation test) 방식으로 규정된 시험시간 동안 시험 시료들 중 고장이 하나도 발생하지 않으면 합격시키는 무고장 시험방식을 따르고 있다. 또한 시험시간이 너무 긴 부품에 대하여는 가속수명시험 방법을 병행하여 수행하고 있다.

#### 2.3.4 안전성시험

고장이 시스템 및 인체에 치명적인 영향을 줄 가능성이 큰 부품에 대하여는 기계분야와 전기분야에 대한 안전성 시험을 실시한다. 안전성 시험은 성능 열화의 측면보다는 파괴 또는 치명적 고장에 대한 평가이므로 모든 시험항목의 평가가 완료된 후 실시한다.

### 3. 한국적 신뢰성 인증 기법

#### 3.1 정량적 수명평가의 개념

수명을 정량적으로 평가하는 방법에는 기존 수명관련 데이터베이스를 활용한 예측방법, 시험에 의한 방법, A/S 고장데이터의 분석방법이 있다. 이 중에 시험에 의한 방법에는 그림 6처럼 통계적 추정개념에 기반을 둔 고장시험(Failure testing)과 통계적 가설검정에 기반을 둔 입증시험(Substantiation testing or Success-run testing)의 2가지 접근방법이 있다. 고장시험은 수명데이터를 분석하여 수명분포가 무엇인지, 수명분포의 모수(평균수명, B<sub>10</sub> 수명, 형상모수, 척도모수 등)가 얼마인지에 대하여 추정하는 방식이며, 입증시험은 시험 대상 부품의 수명분포 및 모수를 가정한 후 신뢰성 요구수준(보증수명; B<sub>10</sub> 수명, MTTF, 고장률 등)을 만족하는지 시험시간을 통계적으로 계산하여 평가하는 방법이다.

입증시험은 허용 고장 개수에 따라 방식이 나누어지며 시험시료들 중 고장을 하나도 허용하지 않은 무고장 시험 방식, 1개 이하 고장을 허용하는 시험방식, 2개 이하 고장을 허용하는 시험방식 ... (N-1)개 이하 고장을 허용하는 시험 방식 등이 있다. 이 중 신뢰성평가센터의 한국적 신뢰성 인증기법에서는 무고장 시험방식을 사용하고 있으며 전 세계적으로 가장 많이 사용되어지는 방법으로 적용이 쉽고 시험시간 및 샘플수를 줄일 수 있다는 많은 장점을 가지고 있는 방식이다.

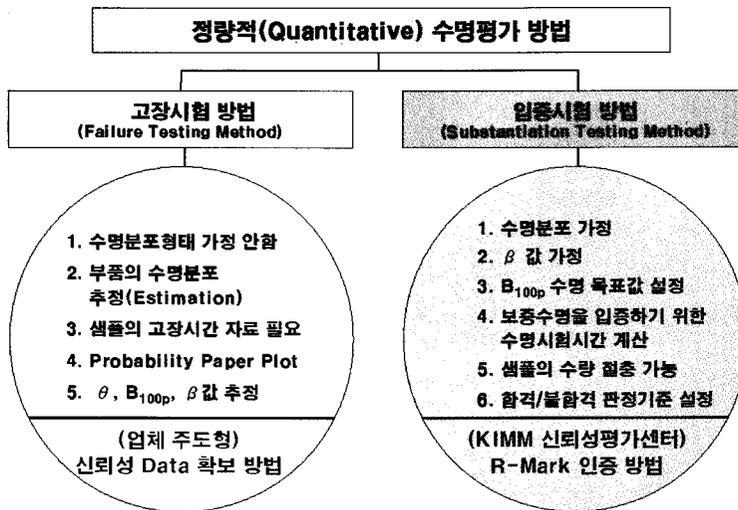


그림 6. 정량적 수명평가 방법

#### 3.2 한국적 신뢰성 인증을 위한 13단계의 신뢰성평가 기법

##### Step 1 : 신뢰성평가 품목에 대한 세계유명 품질인증규격 조사

신뢰성평가의 절차 및 방법을 규정한 신뢰성 평가기준을 작성하기 위한 준비 단계로 시험 대상 부품관련 국제규격(ISO, IEC 등), 지역규격(EN, CEE 등), 국가규격(ANSI, BS, DIN, JIS, NF 등), 단체규격(SAE, NFPA, ASME, AGMA 등) 등을 조사·분석하여 시험항목 및 방법에 대해 표 1의 조사표를 작성한다. 또한 평가 대상품의 현장 작동조건, 환경조건, 보증수명, 주요 고장모드 등을 분석하여 조사된 규격 조사표와 비교·검토하는 과정을 거쳐 신뢰성 평가 시험항목 및 시험조건을 결정한다.



표 1. 세계유명 품질인증 규격 시험항목 조사 비교표(사례 : 기어커플링)

No	시험항목	세계 유명 품질인증 규격												신뢰성 평가기준
		KS	JIS	AGMA	ISO	EN	BS	ANSI	JGMA	API	SAE	ASME	MIL (810F)	
1	평행변위시험	△	△	○	○	○	○	○	×	△	×	○	×	○
2	각도변위시험	△	△	○	○	○	○	○	×	△	×	○	×	○
3	축변위시험	△	△	○	○	○	○	○	×	△	×	○	×	○
4	백래시시험	△	×	△	△	△	△	△	△	×	×	△	×	○
5	최대토크시험	△	△	○	○	○	△	△	○	○	△	△	×	○
6	최대회전수시험	×	×	○	○	○	×	×	○	○	×	×	×	○
7	가진시험	×	×	△	△	△	×	×	△	×	×	×	○	○
8	저온시험	×	×	×	△	△	×	×	×	×	×	×	○	○
9	고온시험	×	×	×	△	△	×	×	×	×	×	×	○	○
10	습도시험	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○
11	수명시험	×	×	△	△	△	△	×	×	×	×	×	×	○

○ : 직접인용, △ : 간접인용, × : 관련 없음

### Step 2 : 보증수명(Qualification Life)의 결정

제품의 보증수명이란 고장 없이 요구된 기능을 발휘될 수 있는 최소한의 기간으로 10년/16만km, 2,000시간, 100만 Cycle 등으로 표현된다. 또한 보증수명을 정의하기 위해서는 어떤 범위까지 고장으로 판단할 것인가(최대 허용 기준치; Threshold level)에 대한 고장정의가 필수적이다. 보증수명의 결정은 많은 시험을 통하여 부품의 수명이나 고장시간에 대한 분포를 찾고 전체 부품 중(모집단) 고장발생이 몇 % 이하인 시점을 보증수명으로 결정하는 방법이 가장 이상적이다. 하지만 이러한 방법은 많은 시료와 시험시간이 필요하므로 현실적으로 매우 힘든 방법이다. 따라서 현실적으로는 해당 부품의 현장 작동조건을 바탕으로 기술수준, 업체의 보증(Warranty) 기간, 세계유명 규격의 내구성 시험조건 등을 조사·분석하고, 세계 기술수준 및 국내의 기술수준을 고려하여 생산자와 수요자의 협의에 의해 보증수명을 최종 결정하는 방법을 사용하고 있다. 표 2는 현장작동 조건을 고려한 보증수명 산출 예제이다.

표 2. 현장작동 조건을 고려한 디젤 차량의 수동변속기의 보증수명 산출 예제

1) 소형 디젤 차량의 연중 작동거리 계산	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 휴가 및 주말 제외 출퇴근 : 35 km 35 km/일 × 5 일/주 × 50 주/년 = 9,000 km/년</li> <li>• 휴가 및 주말 사용거리 : 60 km (주말 52 주/년 × 2 일/주 + 휴가 13일) × 60 km/일 = 약 7,000 km/년</li> <li>• 연중 작동거리 : 16,000 km/년</li> </ul>
2) 소형 디젤 차량의 작동거리	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 보증수명 : 10년(160,000 km) (16,000 km/년 × 10년)</li> </ul>
3) 소형 디젤 차량용 수동변속기의 보증수명	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 차량의 작동거리 : 160,000 km(10년)</li> <li>• 차량의 작동거리와 등가 되는 수동변속기의 작동거리 : 160,000 km (10년)</li> </ul>

### Step 3 : 신뢰성 척도 결정

신뢰성 척도란 신뢰성을 정량적으로 표현하고 측정하기 위한 척도를 말한다. 예를 들면 “우리 회사 제품의 보증수

명은 1,000시간이다”라고 말한다면 1,000시간 동안 고장이 하나도 발생하지 않는 것을 의미하는지, 아니면 평균수명이 1,000시간이라는 것을 의미하는지 알 수 없을 것이다. 이 때 이것을 명확히 해주는 역할을 하는 것이 신뢰성 척도라 할 수 있다.

통상 기계류부품의 신뢰성 척도는 B<sub>10</sub> 수명이 널리 사용되어지고 있다. 예를 들어 어떤 부품의 보증수명이 B<sub>10</sub> 수명 1,000시간이라면 1,000시간이 사용될 때까지 고장 나는 부품의 비율이 10% 이하임을 보증한다는 뜻이다. 또한 고장의 치명도와 신뢰성 보증수준 등에 따라 B<sub>1</sub> 수명, B<sub>5</sub> 수명 등도 사용되어지며, 고장률, MTTF(Mean Time To Failure), MTBF(Mean Time Between Failure) 등도 사용된다.

#### Step 4 : 고장분석 및 시험항목 도출

고장분석은 물리적, 화학적 분석기술을 이용하여 고장발생 후 고장모드 또는 메커니즘을 밝히기 위한 것으로 FTA(Fault Tree Analysis), CMA(Criticality Matrix Analysis), FMECA(Failure Mode Effects & Criticality Analysis) 등의 분석기법이 있다. 이러한 기법들은 고장이 제품 및 시스템에 미치는 영향을 분석하여 고장 치명도를 분석하고, 주요 고장모드를 찾는 데 목적이 있다.

또한 이렇게 분석한 고장분석 자료는 주요 시험항목을 결정하는 중요한 척도로도 제공된다. 그림 7은 고장분석 기법과 QFD(Quality Function Deployment) Level 1 & 2를 이용하여 주요 고장모드와 제품의 신뢰성 요구조건과의 상관관계를 분석하고, 고장모드와 시험항목간의 시험효과를 분석하여 주요 시험항목을 결정하는 추진체계를 설명하고 있다. 또한 이를 요약하면 시험항목 결정절차는 FTA → FMECA → QFD Level 1 → QFD Level 2 순으로 추진된다.

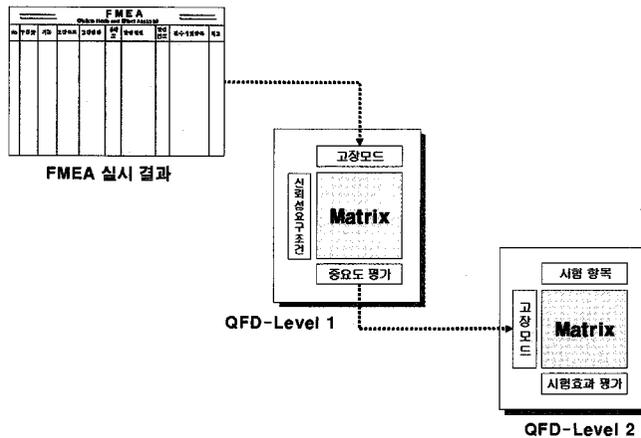


그림 7. 고장분석을 통한 주요 시험항목 결정 절차

#### Step 5 : 형상모수 결정

기계류부품의 수명분포는 와이불(Weibull) 분포가 주로 사용되고 있으며, 분포의 형태를 결정하는 형상모수와 수명을 반영하는 척도모수를 갖는다. 이 중 형상모수는 수명시험 시간 계산에 있어서 매우 중요한 모수로서 고장특성이나 재료특성에 따라 결정되고 동일한 유형의 부품일 경우 유사한 값을 갖는 특성이 있다.

형상모수에 대한 정보를 획득하기 위한 방법은 참고문헌의 조사, 기계류부품에 대한 필드 데이터 분석, 기존의 시험자료의 분석, 수명시험의 설계·실시·분석 등을 통해 가능하다. 현재 신뢰성평가센터에서는 일부 수명시험에 의해 산출한 형상모수를 사용하는 경우도 있지만, 대부분 문헌조사를 통해 조사된 형상모수를 이용하여 수명시험을 설계하고 있다. 또한 신뢰성 인증시험 이후에도 별도로 고장이 발생할 때까지 시험을 추가로 실시하여 수명 데이터를

획득하고, 이를 이용하여 수명분포 및 형상모수 등을 추정하고 있다. 그리고 분석된 형상모수는 문헌을 통해 가정한 형상모수와 비교 검토하고 지속적으로 수정보완하고 있으며, 신뢰성 정보(수명분포, 수명, 형상모수, 척도모수 등)에 대한 데이터베이스를 구축하고 있다.

그림 8은 보증수명과 설계수명을 시험에 의해 규명하는 개념을 설명한 것으로서 보통 형상모수의 획득을 위해서는 보증수명 시험의 2~3배의 시간이 더 소요되는 설계수명 시험을 수행해야 한다. 따라서 시료와 시간이 제한된 신뢰성 인증을 위한 수명시험에서는 현실적으로 많은 어려움이 있다.

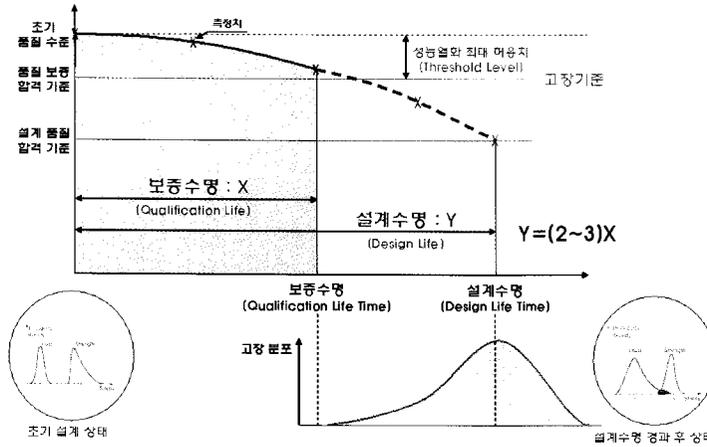


그림 8. 설계수명과 보증수명의 시험적 규명

Step 6 : 샘플수의 결정

시험 샘플수는 수명분석 결과의 정확도와 관련되는 문제로 샘플수가 많으면 분석결과가 정확하지만 시험비용이나 시험시간이 증가하는 문제가 발생할 수 있다. 최적 시험 샘플수를 결정은 시험비용, 시험시간, 샘플의 가격, 샘플의 크기, 시험 가능한 시험장비의 수 등의 현실적 기준에 따라 다르게 설정되어야 할 것이다. 따라서 기계류부품의 신뢰성 인증을 위한 샘플수는 아래의 이론적 공식에 의해 구하기가 매우 어려운 경우가 많으며, 대부분 경제적·시간적 제약으로 인하여 불가피하게 소수의 시료만으로 한정된 시간 동안에 시험을 종료해야 하는 것이 현실이다.

다음은 이론적으로 샘플수를 결정하는 방식이다.

(1) 보증수명과 시험시간에 따른 샘플수의 결정방법 :

$$n \geq \left[ \frac{B_{100p}}{t_n} \right] \cdot \left[ \frac{\ln(1-CL)}{\ln(1-p)} \right]$$

여기에서 n은 샘플수,  $B_{100p}$ 는 보증수명(예  $B_{10}$  수명),  $\beta$ 는 와이블분포의 형상모수, CL은 신뢰수준, p는 불신뢰도(Unreliability)로써  $B_{10}$  수명이면 p가 0.1이 된다.

(2) Bogey testing method에 의한 방법 : (1)번 항목에서 시험시간과 보증수명을 동일한 경우이다.

$$n \geq \left[ \frac{\ln(1-CL)}{\ln(1-p)} \right]$$

(3) 중앙순위법에 의한 방법 : n개 시료 중 i번째의 고장시간에서의 불신뢰도를 추정하는 중앙순위법(Median rank method)을 이용하여 샘플수는 구하는 방법이다. 예를 들어  $B_{10}$  수명(불신뢰도=0.1) 이전에 고장 데이터를 1

개 이상 얻기 위한 최소 샘플수는 아래의 식으로 구하며, 이므로 최소 샘플은 7개 이상이 되어야 한다.

$$F(t) = \frac{i-0.3}{n+0.4} < 0.1$$

여기에서 F(t)는 i번째 고장시간에서의 불신뢰도, i는 고장순번, n은 전체 시험 샘플수이다.

Step 7 : 신뢰수준(C Confidence Level)의 결정

수명시험 설계를 위하여거나 시험 데이터를 분석할 때에 신뢰수준을 고려하게 되는데 신뢰성평가센터에서는 고장 분석 기법을 응용하여 신뢰성수준 결정방법을 개발하였다. 신뢰수준을 결정하는 절차는 그림 9와 같이 첫 번째 신뢰수준을 결정하기 위한 조건(고려사항)을 결정하고, 두 번째 발생빈도 및 심각도의 상관관계에 분석, 세 번째 발생빈도 및 심각도 관계 분석에 의한 치명도의 정량적 분석, 네 번째 치명도의 누적 점수에 따른 신뢰수준의 결정의 순서로 이루어진다.

신뢰수준을 결정을 위해서는 아래의 4개 항목의 조건을 고려하여 결정한다.

- (1) 샘플비용(Sample cost) : 업체가 제공할 수 있는 샘플 가격 및 샘플수
- (2) 시험비용(Test money) : 시험에 소요되는 장치 및 시간에 따른 비용
- (3) 경제적 손실(Economical damage effect) : 부품의 고장이 발생했을 경우 시스템에 미치는 영향
- (4) 안전성(Safety) : 고장이 발생했을 경우 사람의 생명에 미치는 위험성

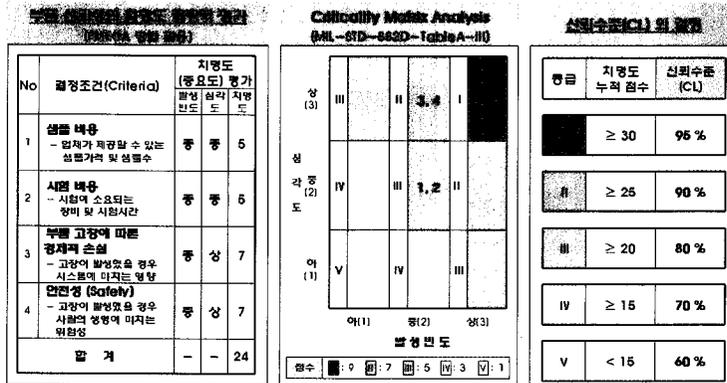


그림 9. 신뢰수준의 결정 절차 및 방법

Step 8 : 수명시험의 합격판정 기준의 결정

신뢰성 인증에서의 수명시험은 신뢰성 입증시험 방법을 사용하고 있으며, 보증수명을 만족할 수 있는 시험시간 동안 시험을 수행하여 시험시료 중 몇 개의 고장을 허용할 것인가가 중요한 관건이 된다.

현재 신뢰성평가센터에서는 시험시간 동안 고장의 발생이 하나도 없어야 합격시키는 무고장 시험 방식을 사용하고 있다. 하지만 적용방법이 쉽고, 시험시간과 샘플수를 줄일 수 있는 장점이 있는 반면, 불량품 등이 샘플에 혼입되었을 경우 신뢰성 입증시험에서 불합격되는 위험성이 매우 큰 단점이 있다. 이러한 위험성을 감소시키기 위하여 1개 이하의 고장을 허용하는 수명시험방식과 2단계 수명시험 방식 등 고장을 일부 허용하는 수명시험의 설계방법을 계속 연구 중에 있다. 2단계 수명시험 방식은 1단계로 무고장 합격판정기준을 만족하는 시험시간 동안 시험을 수행하여 고장이 발생하지 않으면 합격시키고, 만일 고장이 1개가 발생하면 2단계 시험방식으로 전환하여 연장된 시험시간까지 시험을 실시하여 추가 고장이 발생하지 않으면 합격시키는 방식이다.

Step 9 : 가속수명시험 방법 결정

가속수명시험이란 시험시간을 단축하기 위한 목적으로 사용조건보다 가혹한 조건에서 실시하는 시험을 의미한다. 신뢰성 인증 시험에서는 시험시간에 따른 시험비용 및 업체의 인증서에 대한 요청 일정으로 인하여 참고문헌, 관련 논문 등의 선행 연구에서 사용한 가속모델을 인용하여 가속수명시험을 적용하고 있다. 표 3은 대표적인 가속모델에 대한 내용이다.

또한 신뢰성평가센터는 인용된 가속모델의 확인 및 재정립을 위하여 일부 핵심부품에 대해 가속수명시험을 수행 중에 있으며, 어떠한 가속 스트레스를 선정할 것인가, 몇 개의 스트레스 수준으로 시험 할 것인가, 각 스트레스 수준은 얼마로 설정할 것인가 등에 대한 시험가속시험 개발을 위한 절차 및 방법론에 대해 지속적으로 연구를 수행하고 있다.

표 3. 대표적인 가속모델

가속 모델	가속 모델식	기호 설명
역승 모형 (Inverse power law model)	$L(V) = \frac{A}{V^m}$	L : 수명 V : 스트레스 A, m : 재료, 구조 등에 따른 상수
아레니우스 모형 (Arrhenius model)	$L(T) = A \exp[E/\kappa T]$	E : 활성화 에너지(activation energy) $\kappa$ : 볼츠만 상수 ( $8.6171 \times 10^{-5}$ ) T : 절대온도 (섭씨온도 + 273.16) A : 재료와 시험조건에 따른 상수
아이링 모형(Eyring model)	$L(V, T) = \left(\frac{A}{T}\right) \cdot \exp\left[\frac{B}{\kappa T}\right] \cdot \exp\left[V\left(C + \frac{D}{\kappa T}\right)\right]$	T : 절대온도 V : 온도 이외의 스트레스 A, B, C, D : 재료, 구조 등에 따른 상수

Step 10 : 수명시험시간 계산

기계류부품의 신뢰성 입증시험에서의 시험시간( $t_n$ )의 계산은 다음과 같이 함수로 표현할 수 있다. 보증수명( $B_{100p}$ ), 형상모수( $\beta$ ), 샘플수( $n$ ), 신뢰수준( $CL$ ), 허용 고장개수( $r$ ), 가속계수( $AF$ ) 등의 인자에 의해 수명시험 시간이 결정되며, 이항분포에 의해 유도되는 방식과 수명분포의 신뢰하한을 이용하여 계산하는 방식의 2가지 방식이 있다.

$$t_n = f(B_{100p}, \beta, n, CL, r, AF)$$

(1) 이항분포를 이용한 시험시간 계산 방식

현재 신뢰성평가센터에서 활용하고 있는 대표적인 무고장 시험 방식의 시험시간 계산 방법이다. 여기에서  $t_n$ 는 무고장 시험 시간,  $B_{100p}$ 는 보증 수명,  $CL$ 은 신뢰 수준,  $n$ 은 시료수,  $p$ 는 불신뢰도( $B_{10}$  수명이면  $p = 0.1$ ),  $\beta$ 는 형상 모수이다.

$$t_n = B_{100p} \cdot \left[ \frac{\ln(1-CL)}{n \cdot \ln(1-p)} \right]^{\frac{1}{\beta}}$$

(2) 수명분포의 신뢰하한을 이용한 방식

수명 분포에서 보증하고자 하는 수명의 신뢰하한 값을 보증하는 방식을 이용한 시험시간 계산방법으로 허용 고장개수  $r$ 에 따라 무고장 시험시간, 1개 이하의 고장을 허용하는 시험시간, 2개 이하의 고장을 허용하는 시험시간 ... (N-1)개 이하의 고장을 허용하는 시험시간을 모두 계산할 수 있는 수식이다. 여기서  $\alpha$ 는 유의수준,  $\chi^2$ 은 Chi Square

분포,  $r$ 은 허용고장개수이다.

$$t_n = B_{100p} \cdot \left[ -\frac{1}{\ln(1-p)} \cdot \frac{\chi^2_{(\alpha, 2r+2)}}{2n} \right]^{\frac{1}{\beta}}$$

### Step 11 : 시험 효과성 분석

시험 효과성 분석(Test Effectiveness Analysis; TEA)은 엔지니어가 신뢰성평가를 하기 위하여 시험비용이 적게 드는 시험방법을 선택할 것인가, 시험시간이 짧은 것을 시험방법으로 선택할 것인가, 가장 중요한 고장원인을 찾는 방법을 선택할 것인가, 시험의 순서는 어떻게 결정할 것인가 등에 대한 시험 계획의 수립 및 시험 효과를 분석하기 위해 개발된 하나의 신뢰성공학 기법이다.

기계류부품의 신뢰성 입증시험에서는 이러한 시험 효과성 분석 개념을 이용하여 앞에서 설명한 Step 4의 그림 7과 같은 절차와 방법으로 고장모드 및 신뢰성 요구조건에 시험효과를 분석 평가하고, 효과성이 큰 시험항목을 선정하여 그림 10과 같이 전체 수명시험 시간을 3개 구간(수명시험 전, 50%, 수명시험 후)으로 나누고, 각각의 시점에서 선정된 시험 항목의 주요 성능을 측정하여 제품의 열화 특성 및 시험의 효과를 확인한다.

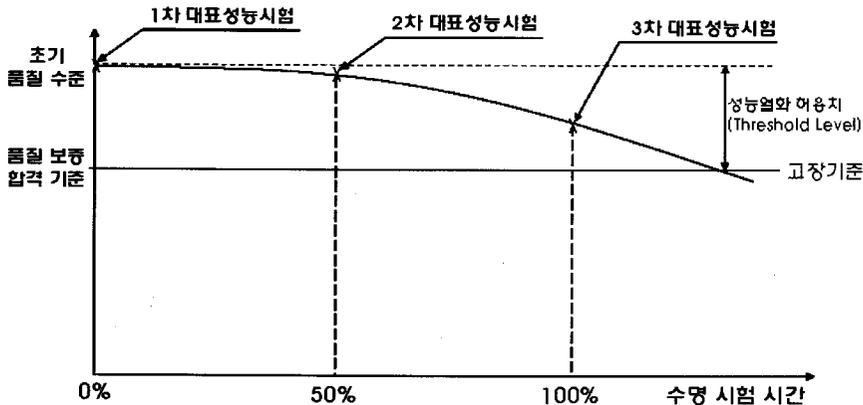


그림 10. 시험의 효과성 분석방법

### Step 12 : 내환경성시험 항목 결정

내환경성시험은 제품이 수송, 저장, 사용단계 등의 전천후 환경 조건에서의 환경 스트레스 수준은 어느 정도인가를 조사한 후, 그 스트레스 조건에서 어떠한 고장형태가 나타날 수 있는지를 분석하여 그 환경조건에서 충분한 기능을 발휘할 수 있는지를 시험하는 것이다.

신뢰성평가센터에서는 그림 11과 같이 내환경성시험 항목 및 시험조건에 대하여 전 세계 유명 규격(MIL, IEC, ISO, EN, DIN, JIS, SAE 등)을 조사하여, 각 시험규격들의 장단점을 평가하고 기계류분야에서 적용 가능한 시험항목을 선정하여 평가 대상품별 최적 내환경성시험 선정방안을 정립하고 있다. 또한 시험 조건에 대하여 명확히 규정되지 않은 것은 공작물을 이용한 확인 시험을 수행하고 있다.

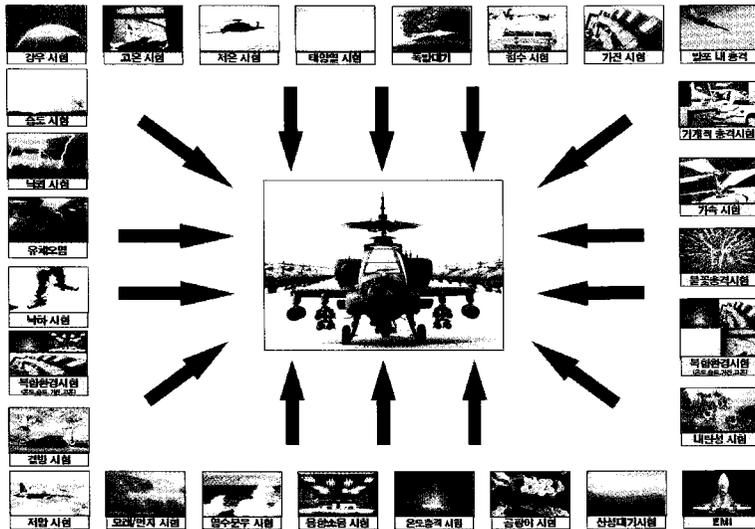


그림 11. 전천후 환경 하에서 운용가능성과 내환경성 시험항목

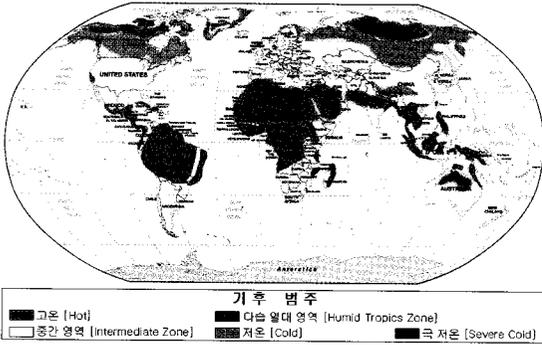
기계류부품의 내환경성시험의 시험절차 및 방법은 MIL-STD-810F를 기본 개념으로 활용하고 있으며, 각각의 시험항목별 시험조건은 평가 대상품의 환경조건에 따라 조정(Tailoring)하는 것을 원칙으로 하고 있다. 표 4는 세계 유명 규격별 중요 환경시험 항목이다.

표 4. (내환경성 시험관련) 세계 유명 규격별 중요 환경시험 항목

No	KSC-STD-164B (Kennedy Space Center)	No	IEC 60068	No	MIL-STD-810F
1	Electromagnetic interference	1	Cold	1	Acoustic noise
2	Low temperature	2	Dry heat	2	Vibration
3	High temperature	3	Damp heat (steady state)	3	Shock
4	Temperature shock	4	Damp heat (cyclic)	4	Immersion
5	Acoustic	5	Impact	5	Low pressure / Altitude
6	Vibration	6	Vibration	6	Low temperature
7	Shock	7	Acceleration	7	Solar radiation
8	Humidity	8	Mould growth	8	High temperature
9	Rain	9	Corrosive atmospheres	9	Temperature shock
10	Icing	10	Dust and sand	10	Acceleration
11	Solar radiation	11	Air pressure	11	Rain
12	Fungus	12	Change of temperature	12	Humidity
13	Salt fog	13	Sealing	13	Fungus
14	Sand and dust	14	Water	14	Salt fog
15	Explosion	15	Radiation	15	Dust / Sand
16	Lift - off blast	16	Soldering	16	Explosive atmosphere
		17	Rubustness of termination	17	Contamination by fluids
				18	Pyroshock
				19	Acidic Atmosphere
				20	Gunfire Vibration
				21	Temperature, Humidity, Vibration, and Altitude
				22	Icing/Freezing Rain
				23	Ballistic Shock
				24	Vibro-Acoustic/Temperature

\* Remark : 특수한 경우에는 순서가 다소 바뀔 수 있음

내환경성 시험조건 결정방법을 예를 들면 그림 12와 같이 저온, 고온, 습도 시험의 경우 전 세계의 기후범주를 조사하고, 평가 대상 부품이 수출용이냐 국내용이냐, 실내에서 사용하느냐 실외에서 사용하느냐에 따라 가장 적합한 내환경성 시험조건을 선택하고, 시험 대상품의 환경조건에 따라 시험조건을 조정(Tailoring)하여 온·습도 조건을 결정한다.



(a) 세계의 기후범주

사용 장소 환경 지역	실내			실외		
	고온	저온	상대습도	고온	저온	상대습도
수출품 중국, 아시아	30℃	0℃	95%	35℃	24℃	74~100%
중국, 미국, 유럽	39℃	-5℃	95%	44℃	-32℃	14~100%
중동	44℃	0℃	50%	49℃	31℃	8~59%
국내용	35℃	-5℃	95%	40℃	-32.6℃	89.2%

참고 규격  
 KC 6871-3-1 Classification of groups of environmental parameters and their severities - Section 1: Storage  
 KC 6871-3-3 Classification of groups of environmental parameters and their severities - Section 3: Stationary use at weather protected locations  
 KC 6895-3-2 Equipment reliability testing  
 Part 2: Preferred test conditions  
 - Equipment for stationary use in weather protected location  
 - High degree of stimulation

MIL-STD-883C Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests

KIMM 신뢰성평가센터 결정 조건	실내			실외		
	고온	저온	상대습도	고온	저온	상대습도
	45℃	-5℃	95%	50℃	-33℃	95%

\* 가장 가혹한 환경 조건을 선택하고, tailoring

(b) 온·습도 시험의 시험조건 결정방법

그림 12. 세계의 기후범주 및 내환경성 시험조건 결정방법

### Step 13 : 안전성시험 항목 결정

안전성시험은 고장발생이 인체 및 시스템에 치명적인 영향을 줄 가능성이 큰 부품에 대하여 충분한 안전성을 확보하고 있는지 평가하는 것으로 그림 13과 같이 기계분야와 전기분야로 나누어 시험하고 있다.

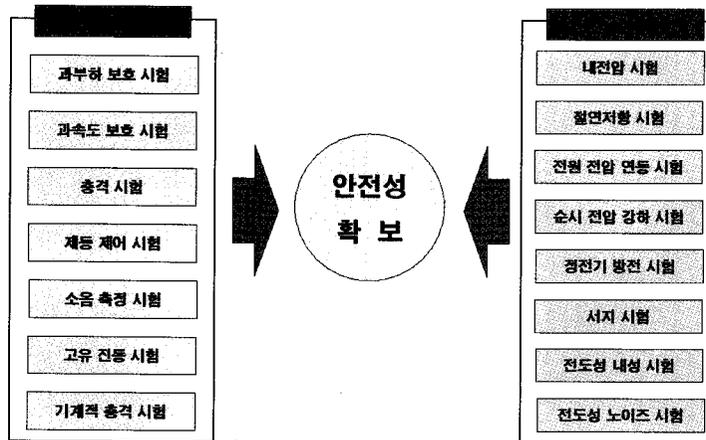


그림 13. 안전성 시험 항목

## 4. 결론

기계류부품의 종합적인 품질보증을 위한 신뢰성평가를 설계하고 수행하는데 있어서 보증수명은 어떻게 결정하는지, 신뢰성척도는 어떻게 표현하는 것인지, 어떠한 시험항목을 선정하고 시험할 것인지, 샘플은 몇 개로 시험할 것인지, 수명시험시간은 어떻게 계산할 것인지 등에 대한 의문을 해결하고 어려움을 극복할 수 있는 방향을 제시하기 위하여, 현재 신뢰성평가센터에서 수행하고 있는 독창적으로 정립한 13단계의 한국적 신뢰성 인증 기법에 대하여 설명하였다.

본 글에서 소개한 이러한 신뢰성평가 추진절차 및 기법들이 기업의 신뢰성향상을 위한 유용한 도구로 활용되길



기대하며, 현재 구축된 인적·물적 인프라를 바탕으로 체계적인 연구, 분석을 통하여 좀 더 발전된 내용의 평가기법이 될 수 있도록 계속적으로 연구를 수행할 계획이다.

## ❁ 참고 문헌

- [1] Kececioglu, D., 1993, "Reliability Engineering Handbook", Volume 1, Prentice Hall, New Jersey.
- [2] Wasserman, G. S., 2003, "Reliability Verification, Testing, and Analysis in Engineering Design", Marcel Dekker, Inc., New York.
- [3] Hobbs, G. K., 2000, "Accelerated Reliability Engineering : HALT and HASS", John Wiley & Sons Ltd., New York.
- [4] Bloch, H. P., 1998, "Practical Machinery Management for Process Plants Volume 1; Improving Machinery Reliability Third Edition", Gulf, Texas.
- [5] Bloch, H. P., and Geitner, F. K., 1994, "Machinery Failure Analysis and Troubleshooting", Gulf Publishing Company, Texas.
- [6] Knezevic, J., 1993, "Reliability, Maintainability and Supportability: a Probabilistic Approach", McGraw Hill, London.
- [7] Evans, J. W., and Evans, J. Y., 2001, "Product Integrity and Reliability In Design", Springer, London.
- [8] NSWC, 1998, "Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment", Naval Surface Warfare Center Carderock Division, Maryland.
- [9] Abernethy, R. B., 2000, "The New Weibull Handbook", Florida.
- [10] Reliasoft Corporation, "Life Data Analysis Reference", Reliasoft Corporation, Arizona.
- [11] Reliasoft Corporation, "Accelerated Life Testing Reference", Reliasoft Corporation, Arizona.
- [12] Nelson, W., 1990, "Accelerated Testing; Statistical models, test plans, and data analysis", Wiley, New York.



김 형 의

- 한국기계연구원 신뢰성평가센터장
- 관심분야 : 기계류부품 신뢰성평가, 가속수명시험, 유·공압 제어, Power Train 분야
- E-mail : khe660@kimm.re.kr



유 영 철

- 한국기계연구원 신뢰성평가센터 선임연구원
- 관심분야 : 신뢰성공학, 가속수명시험
- E-mail : ilike072@kimm.re.kr