제 9 장

신 뢰 성 공 학

1. 신뢰성의 기초

1.1 신뢰성의 기본개념

1.1.1 신뢰성의 정의 및 특징

* 신뢰성(reliability)이란 일반적으로 “시스템이나 장치가 정해진 사용조건하에서 의도하는 기간 동안 만족하게 동작하는 시간적 안정성”을 뜻함.
  즉, 품질관리에서 제품의 품질은 일정시점에서의 정적인 품질인 것에 비해, 신뢰성은 시간의 변화에 따른 동적인 품질을 나타냄.

* 품질관리와 대비하여 본 신뢰성의 차이점으로서, 품질관리는 모수 영역에서 부적합의 분포를 다루나, 신뢰성은 시간의 영역에서 고장의 분포를 다룬다는 점임.

* 제품의 시간적 품질인 신뢰성을 나타내기 위해서는 이것을 정량적으로 표시하는 척도가 있어야 하는데, 이를 위해 “신뢰도”라는 용어를 사용함.
  신뢰도 의미는 “시스템·기기·부품 등이 정해진 사용조건 하에서 의도하는 기간 동안, 정해진 기능을 발휘할 확률”로 정의됨. 즉, 신뢰도는 고장나지 않을 확률, 잔존확률(또는 생존확률)을 말함.

* 이러한 신뢰성을 나타내는 필요한 조건으로는 ① 소요 제품기능, ② 제품 사용조건, ③ 사용기간 중 기기 작동횟수(혹은 연속운전시간) 등의 3가지가 필요함.

1.1.2 신뢰성 사고의 필요성 및 중요성 1994

* 신뢰성이 중요시 되는 이유는 다음과 같음.
  ① 시스템이나 제품이 고도화, 복잡화, 대규모화로 고장이 발생하기 쉽게 되었음.
  ② 시스템이나 제품에 가해지는 임무 혹은 기능이 고도화되어 인간생활과 밀착하게 됨으로써 일상생활이나 사회적 영향이 크게 되고, 그의 고장이 커다란 손해와 직결되게 됨.
  ③ 시스템이나 제품의 기능상의 요구를 실현시키기 위해 옛날과 같이 안전계수를 필요이상으로 추산하는 설계를 허용치 않게 됨으로써 경제적으로나 기술적으로도 합리적인 신뢰성 기술이 필요하게 되었음.
  ④ 기술개발의 속도가 빨라 신기술, 신재료 등의 출현으로 위험이 묵과되거나 미평가분야가 확대되어 불신뢰 또는 불안전의 근원이 되고 있음. 이로 인해 가급적 시간에 쫓기지 않고 보증이 가능한 기술이 요구되고 있다는 점임.
  ⑤ 사물의 복잡화에 수반되어 조직도 복잡하게 되고 인간·기계계에 있어서 인간에게 가해지는 일이 과중해져서 인간의 실수가 고장이나 사고에 큰 요인이 되고 있는 점임.
  ⑥ 소비자주의(consumerism)의 대두로 안전·공해문제가 기업의 제품책임(PL ; product liability)을 가중하게 되고, 이에 대처하여 기술에 의한 저지의 필요성이 증대되었음.
  ⑦ 결국 이런 문제들을 해결하고 시스템이나 제품의 품질 특히 시간적 품질을 보증하려고 하면 일시적인 대책이 아니고 제품개발부터 사용까지의 전 수명을 통해서 끊임없는 기술의 축적과 그에 대한 적극활용을 측정하여 여러 기술의 유기적 종합관리가 불가피하게 된 점임.

1.2 신뢰성 이론의 발전

* 제2차 세계대전 중 통신기와 레이더 등 전자기기의 빈번한 고장으로 군의 작전수행에 막대한 지장을 받게 되자 미국에서는 신뢰성에 대한 조직적인 연구에 착수하게 되었음.

* 신뢰성 이론의 발전을 주요 년도별로 살펴보면 다음과 같음.
  ① 1943 VTDC(Vacuum Tube Development Committee) 결성
  ② 1946 ARINC(Aeronautical Radio Incorporated) 설립
  ③ 1952 AGREE(Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment) 구성
  ④ 1957 AGREE 연구보고서 발간
  ⑤ 1958 NASA(National Aeronautics and Space Administration) 창설
  ⑥ 1961 Bell전화연구소에서 FTA(고장나무분석)수법 개발
  ⑦ 1965 MIL-STD-785(R 프로그램), MIL-STD-690(고장률 발취법) 제정
  ⑧ 1966 MIL-STD-470(보전성 프로그램)
  ⑨ 1968 MIL-STD-883(집적회로 시험법)
  ⑩ 1969 MIL-STD-882(시스템 안전성)

* 주로 전자부품의 신뢰성 이론은 1950년대에 발전되었고, 기계부품에 대한 신뢰성은 1960년대에 발전하였음.

1.3 신뢰성의 척도 2011 등 총3회

1.3.1 신뢰성 척도의 계산 : $R(t)$, $F(t)$, $f(t)$, $\lambda(t)$ 2020 등 총2회

* 신뢰성의 척도 중 대표적인 것은 신뢰도 함수임. 이것은 신뢰도를 사용시간 t 의 함수로 나타낸 것으로, 그의 값은 시점 t 에 있어서의 잔존(또는 생존)확률이 됨.

* 이제 초기의 총수를 N, 시점 t 에 있어서의 잔존수를 $n(t)$ 라 하면 시점 t 에서의 잔존확률 $R(t)$ 는 다음과 같음.

$$R(t) = \frac{n(t)}{N} \tag{9.1}$$

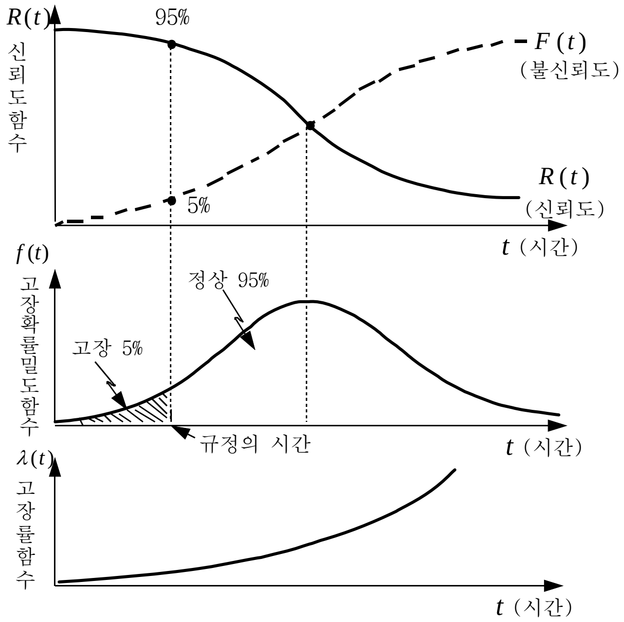
* 그리고 시점 t 까지의 고장난 것의 누적고장확률(불신뢰도) $F(t)$ 는 다음과 같음.

$$F(t) = 1 - \frac{n(t)}{N} \tag{9.2}$$

* 그러므로 $t = \infty$ 에서 전수가 모두 고장난다고 하면 $F(t=\infty) = 1$이 되므로

$$R(t) + F(t) = 1 \tag{9.3}$$

* [그림 9.1]에서 볼 수 있는 바와 같이 $F(t)$ 는 $R(t)$ 를 뒤집어 놓은 모양을 하게 됨. 그림에서 규정된 시간 t 에서의 신뢰도 $R(t)$ 는 95%, 불신뢰도 $F(t)$ 는 5%가 됨.



[그림 9.1] 신뢰도함수, 고장밀도함수와 고장률

* 단위시간당 어떤 비율로 고장이 발생하고 있는가를 알려면 다음과 같이 $F(t)$를 미분하여 조사하면 됨.

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \tag{9.4}$$

여기서 $f(t)$는 고장확률밀도함수가 되기 때문에 누적고장확률 $F(t)$와 신뢰도함수 $R(t)$를 고장확률밀도함수 $f(t)$로 나타내면 다음과 같이 됨.

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \tag{9.5}$$

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt = 1 - F(t) \tag{9.6}$$

* 또한 식 (9.4)에서 $F(t)$ 대신에 $1-R(t)$를 대입하여 미분하면 $f(t)$는 다음과 같이 됨.

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \tag{9.7}$$

* 어떤 시점 t와 $t+\Delta t$ 시간 사이에 발생한 고장률을 "구간고장률"이라고 부르며, 이것을 Δt로 나누어 단위시간당 고장률로 환산한 것을 "단위시간당 고장률"이라 부름.

따라서 단위시간당 고장률 $\lambda(t)$를 식으로 나타내면 다음과 같음.

$$\text{단위시간당 고장률} = \frac{R(t) - R(t+\Delta t)}{\Delta t \cdot R(t)} \tag{9.8}$$

여기서, 단위시간은 주행거리(km) 또는 사용횟수가 될 수도 있음.

* 순간고장률은 Δt가 0으로 수렴할 때의 고장률의 극한값임. 그러므로 순간고장률을 고장률 함수라고도 부르며, 이것을 $\lambda(t)$로 놓으면 다음과 같이 됨.

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{R(t) - R(t+\Delta t)}{\Delta t \cdot R(t)} = \frac{1}{R(t)} \cdot \left(-\frac{d}{dt} R(t) \right) \text{로부터}$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \tag{9.9}$$

여기서 $\lambda(t)$는 시간당 얼마씩 고장이 나고 있는가를 나타내는 장치의 고장률로서, 그의 단위는 시간의 역수가 됨. 그러나 고장률의 단위는 경우에 따라 시간뿐만 아니라 주행거리나 사용횟수가 사용되는 경우도 있음.

* 그런데 일반적으로 수명데이터로부터 $f(t)$, $\lambda(t)$를 구할 경우에는 식 (9.4) 또는 식 (9.7)과 식 (9.9) 대신에 다음 식에 의하여 $f(t)$와 $\lambda(t)$를 계산함.

$$f(t) = \frac{\text{시간 } t\text{와 } (t+\Delta t) \text{ 간의 고장개수}}{\text{샘플수}} \cdot \frac{1}{\Delta t} = \frac{n(t) - n(t+\Delta t)}{N \cdot \Delta t} \tag{9.10}$$

$$\lambda(t) = \frac{\text{시간 } t\text{와 } (t+\Delta t) \text{ 간의 고장개수}}{t\text{시점의 생존개수}} \cdot \frac{1}{\Delta t} = \frac{n(t) - n(t+\Delta t)}{n(t) \cdot \Delta t} \tag{9.11}$$

예제 9.1 46대의 차량에 대하여 주행거리(km)당 drive shaft의 고장개수(잡음이 규정된 값보다 큰 경우 고장으로 봄)를 조사한 결과 다음의 데이터를 얻었다고 할 때, 동일 로트로 만들어진 어떤 제품에 대하여 일정수의 제품을 랜덤하게 샘플링 한 후 이 샘플에 대해 고장이 날 때까지 조사하여 그 결과로부터 신뢰성 척도인 $f(t), F(t), R(t)$ 및 $\lambda(t)$를 구하라.

주행거리(km)	고장개수
0～20,000	19
20,000～40,000	11
40,000～60,000	7
60,000～80,000	5
80,000～100,000	4

해설 2021 1회차

☞ 먼저 t=20,000km에서의 $R(t), F(t), f(t)$ 및 $\lambda(t)$는 다음과 같이 계산됨.

$$R(t=20{,}000) = \frac{n(t)}{N} = \frac{(46-19)}{46} = \frac{27}{46} = 0.587$$

$$F(t=20{,}000) = 1 - \frac{n(t)}{N} = \frac{N - n(t)}{N} = \frac{46-(46-19)}{46} = \frac{19}{46} = 0.413$$

$$f(t=20{,}000) = \frac{n(t) - n(t+\Delta t)}{N \cdot \Delta t} = \frac{46-(46-19)}{46(20{,}000)} = 0.207 \times 10^{-4}$$

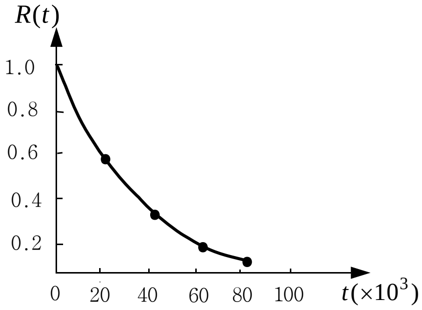
$$\lambda(t=20{,}000) = \frac{n(t) - n(t+\Delta t)}{n(t) \cdot \Delta t} = \frac{46-(46-19)}{46(20{,}000)} = 0.207 \times 10^{-4}$$

위와 같은 방법으로 지정된 각 시점에서의 $R(t), F(t), f(t)$ 및 $\lambda(t)$를 계산하여 종합하면 다음 [표 1]과 같음.

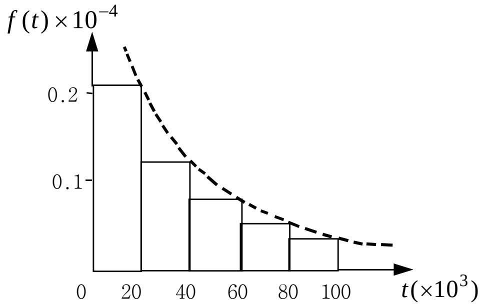
[표 1] 신뢰성척도 $R(t), F(t), f(t)$ 및 $\lambda(t)$의 계산

t	고장개수	$R(t)$	$F(t)$	$f(t) \times 10^{-4}$	$\lambda(t) \times 10^{-4}$
20,000	19	0.587	0.413	0.207	0.207
40,000	11	0.348	0.652	0.120	0.204
60,000	7	0.196	0.804	0.076	0.219
80,000	5	0.087	0.913	0.055	0.278
100,000	4	0.000	1.000	0.044	0.500

[표 1]의 데이터를 그림으로 나타내면 $R(t)$는 [그림 1], $f(t)$는 [그림 2]와 같이 되며, 이 차량 드라이브 샤프트의 고장확률밀도함수 $f(t)$와 신뢰도함수 $R(t)$는 지수분포가 됨을 알 수 있음.



[그림 1] $R(t)$ 곡선



[그림 2] $f(t)$ 곡선

1.3.2 확률지를 이용한 신뢰성 척도의 계산

* 확률지는 어떤 특정한 수명분포를 따르는 확률변수의 값(t)과 이 변수의 누적분포함수 $F(t)$의 값의 타점이 도표상에서 직선이 되도록 가로축과 세로축을 도안한 도표로서, 수명분포에 따라 지수확률지, 정규확률지, 와이블확률지, 대수정규확률지 등이 있음.
* 지수확률지를 이용한 신뢰성 척도의 계산방법은 주어진 고장시간이 지수분포를 따르면 고장시간 t_i와 그 누적분포함수 $F(t_i)$가 직선관계를 보이는 성질을 이용한 것임.

(1) 메디안 랭크(Median Rank)법 2011

* 앞에서 본 경우는 샘플수가 비교적 많은 경우이지만, 만일 샘플수가 적은 경우에는 달리 Benard가 고안한 메디안 랭크(median rank)법인 다음 공식들을 사용하여 신뢰성의 척도를 계산하는 것이 합리적임. 이는 지수확률지를 이용한 신뢰성척도의 계산 방법임.

$$F(t_i) = \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \tag{9.12}$$

$$R(t_i) = 1 - F(t_i) = \frac{n - i + 0.7}{n + 0.4} \tag{9.13}$$

$$\lambda(t_i) = \frac{f(t_i)}{R(t_i)} = \frac{1}{(n - i + 0.7)(t_{i+1} - t_i)} \tag{9.14}$$

$$f(t_i) = \frac{1}{(n+0.4)(t_{i+1}-t_i)} \tag{9.15}$$

여기에서, n 은 샘플수, i 는 고장순번, t_i 는 i 번째 고장발생시간임.

그리고 t_{i+1} 은 $i+1$번째, 즉 다음 번 고장발생시간임.

(2) 평균순위(Average Rank)법

* 이는 정규확률지를 이용한 신뢰성척도의 계산 방법임.

구체적 방법은 본 장의 신뢰성 시험과 추정에서의 정규확률지에 의한 방법에서 보도록 함.

$$F(t_i) = \frac{i}{n+1} \tag{9.16}$$

$$R(t_i) = 1 - F(t_i) = 1 - \frac{i}{n+1} = \frac{n+1-i}{n+1} \tag{9.17}$$

$$f(t_i) = \frac{1}{(n+1)(t_{i+1}-t_i)} \tag{9.18}$$

$$\lambda(t_i) = \frac{f(t_i)}{R(t_i)} = \frac{1}{(n+1-i)(t_{i+1}-t_i)} \tag{9.19}$$

(3) 선험적(Empirical) 방법

* 이는 지수확률지를 이용한 경험적 방법에 따른 신뢰성척도의 계산 방법임.

$$F(t_i) = \frac{i}{n} \tag{9.20}$$

$$R(t_i) = 1 - \frac{i}{n} = \frac{n-i}{n} \tag{9.21}$$

$$f(t_i) = \frac{1}{n(t_{i+1}-t_i)} \tag{9.22}$$

(4) Midpoint Rank법

* 이는 지수확률지를 이용한 Midpoint(50%) 방법에 의한 신뢰성척도의 계산 방법임.

$$F(t_i) = \frac{i-0.5}{n} \tag{9.23}$$

1.4 신뢰도함수 $R(t)$ 2015 등 총4회

* 식 (9.9)의 $\lambda(t) = f(t)/R(t)$ 에 의하면 고장률함수는 다음과 같이 될 수 있음.

$$\lambda(t) = \frac{1}{R(t)} \cdot \left(-\frac{dR(t)}{dt}\right) = \frac{-R'(t)}{R(t)}$$

* 따라서 상기 식을 t 로 적분하면 다음과 같이 됨.

$$\int_0^t \lambda(t)dt = \int_0^t \frac{-R'(t)}{R(t)}dt = -\int_0^t \frac{R'(t)}{R(t)}dt$$
$$= -[\ln R(t)]_0^t = -[\ln R(t) - \ln R(0)] = -\ln R(t) + \ln R(0)$$

* 여기서 t=0, 즉 사용초기에는 언제나 100%가 생존해 있기 때문에 $R(t=0)$는 1.0이 됨. 그리고 $\ln 1.0$은 0이기 때문에 윗 식은 다음과 같이 됨.

$$\int_0^t \lambda(t)dt = -\ln R(t) \qquad (9.24)$$

윗 식에서 역대수(Anti-log)를 취하면 다음과 같이 $R(t)$ 를 구할 수 있음.

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \qquad (9.25)$$

* 윗 식은 다음 식과 같이 표현되기도 함.

$$R(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t)dt\right]$$

윗 식이 바로 고장률로 나타낸 신뢰도함수이며, 시점 t 에 있어서의 제품의 생존확률이 됨.

여기서 "$\lambda(t) = \lambda =$ 일정"이라면 신뢰도함수 $R(t)$ 는 다음 식으로 됨.

$$R(t) = e^{-\lambda t}[= \exp(-\lambda t)] \qquad (9.26)$$

윗 식에서 t 는 제품의 사용시간을 나타내고, λ 는 일정한 고장률(평균고장률)을 나타냄.

예제 9.2 평균고장률 λ =0.002(/시간)인 지수분포에 따르는 기기를 10시간 사용할 경우 이 기기가 고장날 확률을 구하라.

해설

☞ 고장날 확률$= F(t=10) = 1 - R(t=10) = 1 - 0.98 = 0.02$

여기서, 신뢰도함수 $R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-0.002\times 10} = e^{-0.02} = 0.98$

예제 9.3 어떤 부품의 수명이 평균고장률 λ =0.002(/시간)인 지수분포를 따르는 신뢰도를 0.95로 유지하기 위한 사용시간을 구하시오. [기사 기출]

해설

☞ $R(t) = e^{-\lambda t}$ 에서 $0.95 = e^{-0.002\times t}$ $\rightarrow$ $\ln 0.95 = -0.002 \times t$ $\therefore$ $t = 25.6$ (시간)

2. 고장률과 고장확률밀도함수

2.1 고장률과 고장확률밀도함수의 종류 2011

* 시간당 어떤 비율로 고장이 발생하고 있는가를 나타내는 고장확률밀도함수 $f(t)$ 의 종류로는 와이블(Weibull)분포, 지수분포, 정규분포의 3가지가 있음.

* 단일부품의 고장확률밀도함수는 대부분의 경우 정규분포가 되며 사용시간이 증가함에 따라 그의 고장률은 증가하게 됨.

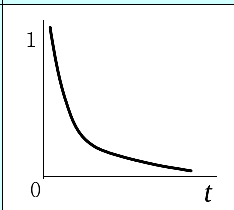
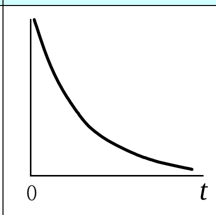
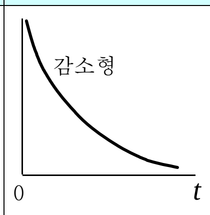
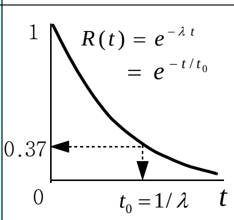
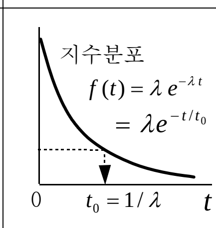
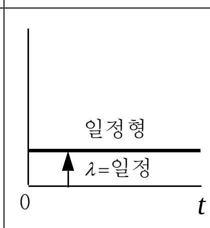
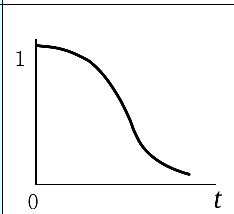
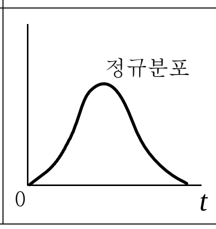
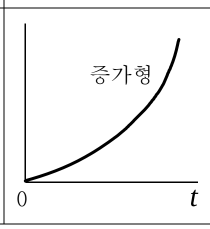
* 그러나 여러 개의 부품이 조합되어 만들어진 기기나 시스템의 고장확률밀도함수는 지수분포에 따르게 됨. 이는 고장률이 상이한 여러 개 부품이 조합되어 있기 때문에 기기나 시스템 전체의 고장률은 이들의 평균이 되므로 기기나 시스템의 고장률은 일정하게 되기 때문임.

* 고장률 $\lambda(t)$ 가 일정시 고장확률밀도함수 $f(t)$ 는 지수분포, 고장률 $\lambda(t)$ 가 증가시 고장확률밀도함수 $f(t)$ 는 정규분포를 함.

* 한편 와이블분포는 일반적인 수명분포를 나타내는데 편리하게 고안된 분포임.
  ① 형상모수(Shape parameter) m 의 값이 1보다 작으면 DFR(Decreasing Failure Rate)인 경우의 고장확률밀도함수를 나타낼 수 있음.
  ② 형상모수 m 의 값이 1보다 크면 IFR(Increasing Failure Rate)인 경우의 고장확률밀도함수인 정규분포에 근사하게 됨.
  ③ 형상모수 m 의 값이 1이면 CFR(Constant Failure Rate)인 경우의 고장확률밀도함수인 지수분포가 됨.

* 위와 같이 고장률함수 $\lambda(t)$ 는 감소형(DFR), 일정형(CFR), 증가형(IFR)의 3종류가 있으며, 고장률의 형(pattern)과 고장확률밀도함수와는 일정한 관계를 가지고 있는데 이들의 관계를 종합하면 <표 9.1>과 같음.

<표 9.1> 고장률의 형과 $f(t)$ 와의 관계

고장률 형태	신뢰도함수 $R(t)$	고장확률 밀도함수 $f(t)$	고장률함수 $\lambda(t)$	와이블 분포의 형상 모수 m	보전 대책
감소형 (DFR)				$m < 1$	예방보전은 하지 않음. 디버깅이 유효
일정형 (CFR)				$m = 1$	예방보전은 효과없음. 예지보전 또는 계획 사후보전이 유리
증가형 (IFR)				$m > 1$	고장나기 전 예방보전으로 부품교환이 유효

2.2 고장률의 형태별 대응 분포

2.2.1 CFR과 지수분포 2014 등 총7회

* 개개의 부품에 대한 고장시간의 분포(수명분포)는 지수분포에 따른다고 알려져 있음. Drenick의 정리에 따르면 "개개 부품의 수명분포가 지수분포가 아니더라도 시스템의 수명분포는 비교적 넓은 조건 하에서 근사적으로 지수분포가 된다."로 됨.

* 그리고 고장확률밀도함수 $f(t)$가 지수분포에 따르면 고장률함수 $\lambda(t)$는 일정형, 즉 CFR이 됨. 고장까지의 시간 분포가 지수분포인 경우의 고장확률밀도함수 $f(t)$는 다음 식과 같음.

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t} \tag{9.27}$$

여기서 λ는 평균고장률로서 다음 식과 같은 관계가 있음.

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \tag{9.28}$$

* MTBF는 평균고장간격시간(Mean Time Between Failure)으로서, 평균수명이 됨. 평균수명을 θ로 표시하면 θ =MTBF가 되고, 식 (9.27)은 다음 식으로 표시되기도 함.

$$f(t) = \frac{1}{\theta} \cdot e^{-t/\theta}, \quad t > 0 \tag{9.29}$$

* 지수분포인 경우의 신뢰도함수 $R(t)$, 누적분포함수 $F(t)$, 고장률함수 $\lambda(t)$는 다음과 같은 식으로 됨.

$$R(t) = e^{-\lambda t} \tag{9.30}$$

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda t} \tag{9.31}$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\lambda \cdot e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda = \frac{1}{MTBF} = \frac{1}{\theta} \tag{9.32}$$

* 지수분포의 $f(t), F(t), R(t)$의 관계 곡선은 <표 9.1>을 참조하도록 함.

예제 9.4 평균고장간격시간(MTBF) 6,000시간을 갖는 기구가 360시간에서의 신뢰도는 얼마인가를 구하라. 이 분포는 지수분포를 한다.

해설 2020 등 총2회

☞ 지수분포의 경우 λ =1/MTBF의 관계이므로

신뢰도 $R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-\frac{t}{MTBF}} = e^{-\frac{360}{6,000}} = e^{-0.06} = 0.942$

따라서 t =360시간에서 신뢰도는 94.2%가 됨.

예제 9.5 고장률이 일정하다고 생각되는 시스템의 고장시간간격을 측정한 결과를 보였다.

1,670	50	3,400	790	630	2,300	(단위 : 시간)

고장률 λ와 MTBF를 추정하시오. [기사 기출]

해설

☞ 지수분포를 따르므로

$$\lambda = \frac{r}{T} = \frac{6}{1{,}670+50+3{,}400+790+630+2{,}300} = \frac{6}{8{,}840} = 6.79\times 10^{-4} \ \ (/시간)$$

$$\mathrm{MTBF} = \frac{1}{\lambda} = \frac{8{,}840}{6} \approx 1{,}473 \ \ (시간)$$

예제 9.6 수명분포가 지수분포에 따르고 있는 기기의 월간 연사용시간은 100시간이다. 이 기기의 월고장을 10%이내로 억제하기 위해서는 평균수명이 얼마가 되도록 설계해야 되는가?

해설 2017

☞ 고장확률 $F(t=100)\le 0.1$ 이기 때문에 평균수명을 θ 라 하면 $R(t=100)=e^{-100/\theta}\ge 0.9$ 가 됨. 따라서 윗 식의 양변에 자연대수를 취하면 다음과 같음.

$$-\frac{100}{\theta}\ge \ln 0.9 \text{ 로부터 } 0.105\ge\frac{100}{\theta} \ \rightarrow\ \theta\ge\frac{100}{0.105}=952.4\ (시간)$$

2.2.2 IFR과 정규분포 2014 등 총3회

* 계량치의 분포는 정규분포를 한다고 알려져 있음. 따라서 재료의 인장강도와 같이 사용시간 또는 사용횟수의 증가에 따라 고장수가 증가하게 되는 부품 또는 시스템의 고장(즉, 증가형 고장률 또는 IFR인 경우의 고장)확률밀도함수도 정규분포를 하게 됨.

* 고장확률밀도함수 $f(t)$ 가 정규분포를 따르는 경우 고장률함수 $\lambda(t)$ 는 증가형이 됨.

* 정규분포인 경우의 고장확률밀도함수 $f(t)$ 와 누적분포함수 $F(t)$ 및 신뢰도함수 $R(t)$ 는 다음과 같음.

$$f(t)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\cdot\sigma}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \tag{9.33}$$

$$F(t)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\cdot\sigma}\int_{-\infty}^{t}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right]dt \tag{9.34}$$

$$\left[\because\ F(t)=\int_{-\infty}^{t} f(t)dt\right]$$

$$R(t)=1-F(t)$$

* 또한 $\mu=0,\sigma^2=1$인 표준화 정규분포의 경우 $f(t), F(t), R(t)$ 는 다음과 같이 되는데, 일반적으로 이것을 많이 사용함.

$$f(t)=\phi(z)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\cdot\exp\left(-\frac{1}{2}\cdot z^2\right) \tag{9.35}$$

$$F(t)=\Phi(z)=\int_{-\infty}^{z}\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{1}{2}z^2\right)dt=\int_{-\infty}^{z}\phi(z)dt \tag{9.36}$$

여기서, $z=(t-\mu)/\sigma$는 $t=\mu+z\sigma$로 되고, $\mu=0,\sigma^2=1$이면 $t=z$로 되어 $-\infty$부터 z 까지의 적분으로 됨.

2.2.3 와이블분포 2019 등 총2회

* 고장확률밀도함수 $f(t)$ 가 지수분포를 따르는 경우 고장률함수 “$\lambda(t) = \lambda =$일정”이 되고, 고장확률밀도함수가 정규분포를 따르는 경우 고장률함수 $\lambda(t)$는 증가형이 됨. 즉, 고장확률밀도함수 $f(t)$ 에 따라 고장률함수 $\lambda(t)$ 의 분포가 달라짐.

* 고장률함수 $\lambda(t)$ 의 분포에는 ① 감소형 고장률(DFR-decreasing failure rate), ② 일정형 고장률(CFR ; constant failure rate), ③ 증가형 고장률(IFR ; increasing failure rate)의 3가지가 있음.

* 따라서 고장률함수의 분포상태에 따라 적절하게 고장확률밀도함수를 표현할 수 있도록 하는 확률분포가 필요한데 이것이 스웨덴의 Waloddi Weibull이 고안한 와이블분포임.

* 와이블분포는 다음 식들과 같이 표현되며, m 은 형상모수(shape parameter), η 는 척도모수(scale parameter), γ 는 위치모수(position parameter)라 부름.

$$f(t) = \frac{m}{\eta}\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{m-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^m} \tag{9.39}$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^m} \tag{9.40}$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^m} \tag{9.41}$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{m}{\eta}\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{m-1} \tag{9.42}$$

* 한편 척도모수 η 에 대해 다른 표현방법으로서, $t_0 = \eta^m = 1/\lambda$ 의 관계로부터

$$\eta = (t_0)^{\frac{1}{m}} = \left(\frac{1}{\lambda}\right)^{\frac{1}{m}} \tag{9.43}$$

로 변형되므로, 윗 식 (9.39)~(9.42)들은 아래와 같이 변형된 식으로 될 수 있음.

$$f(t) = \frac{m(t-\gamma)^{m-1}}{t_0} \cdot e^{-\frac{(t-\gamma)^m}{t_0}} \tag{9.44}$$

$$F(t) = 1 - e^{-\frac{(t-\gamma)^m}{t_0}} \tag{9.45}$$

$$R(t) = e^{-\frac{(t-\gamma)^m}{t_0}} \tag{9.46}$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{m(t-\gamma)^{m-1}}{t_0} \tag{9.47}$$

* 형상모수 m 은 분포의 형을 결정하는 모수로서

① $m < 1$이면 고장률함수 $\lambda(t)$ 는 감소형 고장률(DFR)에 대응함.

예제 9.9 어떤 자동차부품의 수명분포는 $m=2$, $t_0=250\times10^8$(km), $\gamma=0$인 와이블분포에 따르고 있다. 이 부품의 80,000(km) 주행시 생존할 확률을 구하라.

해설

☞ 생존확률은 신뢰도이므로 $R(t=80{,}000)$을 구하면

$$R(t=80{,}000)=e^{-\frac{t^m}{t_0}}=e^{-\frac{(80{,}000)^2}{250\times10^8}}=e^{-0.256}=0.774$$, 즉 77.4(%)가 생존함.

2.2.4 대수정규분포

① 대수정규분포는 $\ln T\sim N(\mu,\sigma^2)$일 때 T의 분포를 말함. 즉 고장수명 T가 대수정규분포를 따르면, $\ln T$는 정규분포를 따르게 됨.

$$f(t)=\left(\frac{1}{\sigma\cdot t}\right)\cdot\phi\left(\frac{\ln t-\mu}{\sigma}\right)\quad (\text{단, } 0<t<\infty,\ -\infty<\mu<\infty,\ \sigma>0)\qquad(9.53)$$

$$R(t)=1-\Phi\left(\frac{\ln t-\mu}{\sigma}\right)\qquad(9.54)$$

$$\lambda(t)=\frac{f(t)}{R(t)}=\frac{\phi\left(\frac{\ln t-\mu}{\sigma}\right)}{\sigma\cdot t\left[1-\Phi\left(\frac{\ln t-\mu}{\sigma}\right)\right]}\qquad(9.55)$$

② 성질

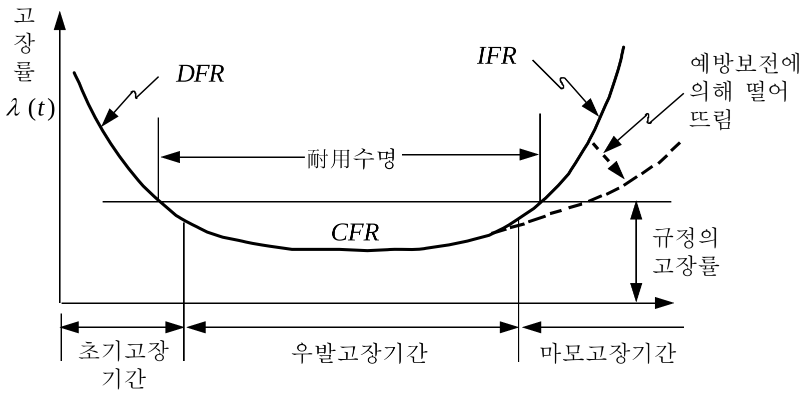
㉠ 평균값이 항상 중앙값보다 크다. ㉡ 시간에 따라 $\lambda(t)$가 증가하다가 감소함.

㉢ 대수변환된 수명은 정규분포를 따름.

2.3 시스템의 수명곡선인 욕조곡선 2015

2.3.1 욕조곡선의 형태 2010 등 총7회

* 여러 가지 부품으로 구성된 제품이나 시스템의 가장 전형적인 고장률 패턴은 [그림 9.3]과 같은 욕조곡선(bath-tub curve)을 따름.



[그림 9.3] 제품의 전형적 고장률 패턴 (욕조곡선)

* 이 욕조곡선은 고장률의 3가지 기본형인 DFR, CFR, IFR이 혼합되어 그려짐.
  ① 초기고장기간(debugging기간, burn-in기간)은 제품에서 최초의 고장률이 시간적으로 감소하는 DFR의 부분임.
  ② 우발고장기간에는 고장률은 시간적으로 거의 일정하며 안정되는 CFR의 부분임. 이 기간의 길이를 내용수명(longevity)이라 함.
    * 내용수명은 $\lambda(t)$가 미리 규정된 고장률의 값보다 낮은 기간에서 정해지는 길이로서, 실제로는 경제적인 면에서 정해짐.
    * 우발고장기간의 신뢰도 $R(t)$는 지수분포에 따름. 즉, $R(t)=e^{-\lambda t}$이 됨. 여기서 λ는 평균고장률인 상수임.
  ③ 우측에서 고장률이 증가되는 IFR의 부분을 마모고장기간(또는 노화고장기간)이라 함.

2.3.2 고장률의 패턴별 고장대책 2020 등 총4회

* 고장률의 패턴별 고장에 대한 대책으로서는 다음과 같이 행함.
  ① 초기고장기간의 고장대책으로서는 debugging을 철저히 행함.
  ② 우발고장기간의 고장대책으로서는 ㉠ 사용 및 보전을 잘 수행하며, ㉡극한상황을 고려한 설계, ㉢ 안전계수를 고려한 설계, ㉣ degrading 등이 사용됨.
  ③ 마모고장기간의 고장대책으로서는 예방보전에 의해서만 감소시킬 수 있으므로 예방보전을 잘 수행할 필요가 있음.

2.4 평균수명과 평균고장률 2014 등 총2회

2.4.1 평균수명 $E(t)$ 2012 등 총4회

(1) 평균수명의 의의

* 평균수명 $E(t)$=MTBF (Mean Time Between Failure, 평균고장간격시간)
  → 시스템을 수리해 가면서 사용하는 경우에 해당

* 평균수명 $E(t)$=MTTF (Mean Time To Failure, 고장까지의 평균시간)
  → 시스템을 수리하여 사용할 수 없는 경우에 해당

* 평균수명 $E(t)$의 계산

$$E(t)=\int_0^t t\cdot f(t)dt=\int_0^\infty R(t)dt \tag{9.56}$$

(2) 고장확률밀도함수 $f(t)$가 지수분포인 경우 2014

$$E(t)=\int_0^\infty R(t)dt=\int_0^\infty e^{-\lambda t}dt=\frac{1}{\lambda} \tag{9.57}$$

$$V(t)=\frac{1}{\lambda^2} \tag{9.58}$$

(2) 고장확률밀도함수 $f(t)$ 가 정규분포나 Weibull분포에 따르는 경우

$$\text{누적고장률 } H(t) = \int_0^t \lambda(t)dt = -\ln R(t) \tag{9.67}$$

* 시간 t_1 과 t_2 간의 구간고장률 $FR(t_1, t_2)$ 은

$$FR(t_1, t_2) = H(t_2) - H(t_1) = -\ln R(t_2) + \ln R(t_1) \tag{9.68}$$

여기서, $H(t_1) = -\ln R(t_1)$, $H(t_2) = -\ln R(t_2)$

* 시간 t_1 과 t_2 간의 구간평균고장률 AFR(Average Failure Rate)은

$$AFR(t_1, t_2) = \frac{\ln R(t_1) - \ln R(t_2)}{t_2 - t_1} \tag{9.69}$$

여기서, $f(t)$ 가 $\gamma = 0$ 인 와이블분포에 따르면

$$AFR(t_1, t_2) = \frac{(t_2 / \eta)^m - (t_1 / \eta)^m}{t_2 - t_1} \tag{9.70}$$

여기서, $H(t_2) = -\ln R(t_2) = (t_2 / \eta)^m$, $H(t_1) = -\ln R(t_1) = (t_1 / \eta)^m$

* 사용초기인 t =0에서부터 T 시간까지 총평균고장률 $AFR(T)$ 은

$$AFR(T) = \frac{\ln R(t)}{T} \tag{9.71}$$

예제 9.10 100개의 시료에 대해 수명시험을 500시간 실시하였더니 다음 표와 같이 12개가 고장이 났다.

고장순번(i)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
고장시간(t_i)	6	21	50	84	95	130	205	260	270	370	440	480

그리고 와이블확률지에 의거 와이블분포의 모수를 추정하였더니 m =0.7, η =8,667, γ =0이었다. 이 시료의 평균수명을 구하고, 평균고장률을 구하라.

해설

☞ m =0.7, η =8,667, γ =0이므로 와이블분포인 경우 평균수명과 평균고장률은

$$E(t) = \eta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) = \eta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{0.7}\right) = \eta \cdot \Gamma(2.429) = 8{,}667 \times 1.266 = 10{,}972 \text{ 시간}$$

여기서, 감마함수의 값은 <부표 21> 감마함수표를 활용하여 구함.

$$\text{AFR(0, 10,972)} = \frac{(t_2 / \eta)^m - (t_1 / \eta)^m}{t_2 - t_1} = \frac{(10{,}972 / 8{,}667)^{0.7}}{10{,}972} = \frac{1.1795}{10{,}972} = 1.075 \times 10^{-4} \text{ (/시간)}$$

3. 신뢰성시험 및 신뢰성추정

3.1 신뢰성시험

3.1.1 신뢰성시험의 의의

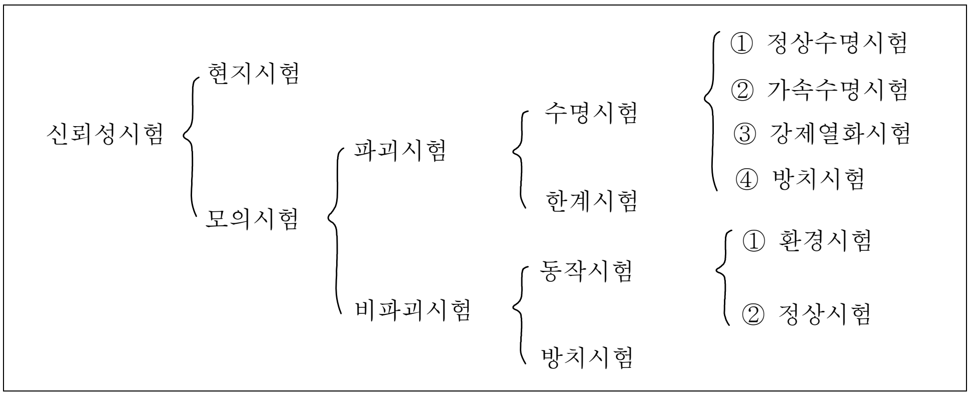
* 신뢰성시험(reliability test)이란 “신뢰성 결정시험 및 신뢰성 적합시험의 총칭”을 말함.

* 여기서 신뢰성 결정시험은 신뢰성 특성치를 결정(추정)하는 것을 목적으로 하는 것이며, 신뢰성 적합시험은 신뢰성 특성치가 정해진 규정치에의 합치여부를 판정(추정)하는 것을 목적으로 하는 것으로서, 신뢰성시험은 이 두 가지의 목적을 가지고 있다고 할 수 있음.

3.1.2 신뢰성시험의 종류 2006

(1) 신뢰성시험의 분류

* 신뢰성시험은 신뢰성시험의 실시장소, 목적, 가하는 스트레스에 따라 [그림 9.4]와 같이 여러 가지로 구분됨.



[그림 9.4] 신뢰성시험의 분류

(2) 신뢰성시험의 종류별 응용사례

(가) 개발단계의 신뢰성시험

* 이 시험에는 부품, 아이템 레벨 또는 엔지니어링 모델을 이용한 벤치시험 등과 시스템 시험, 실지로 행하는 field시험 등이 있음.

(나) 환경시험 2007

* 환경시험은「아이템에 대한 환경 영향을 조사하는 시험」으로서, 환경시험에는 변화를 시키는 환경조건에 따라서 ① 온도시험(고온, 저온), ② 기계특성시험(진동·충격시험 등), ③ 염수분무시험, 내부식시험(耐水시험 등), ④ 내방사시험, ⑤ 특수시험 등이 있음.

(다) 수명시험 2007

* 수명시험은 수명특성을 추정하는 시험으로서, 구체적으로는 “어떤 특정조건 하에서 아이템의 수명에 관한 시험”이며, 가속수명시험은 시험시간 단축으로써 시간의 벽을 없애는데 유효함.

(라) 출하전시험

* 출하전에 행하는 품질평가 또는 출하가부를 위한 시험으로서, 이 경우 시스템 및 제품을 여러 개 중에서 1, 2개 추출하여 이것을 철저히 분해해서 행하는 시험으로서, 비파괴시험(NDT)에 해당함.
* 비파괴시험으로로는 RT(방사선시험), PT(액체침투탐상), UT(초음파탐상), MT(자분탐상), ET(와전류시험) 등이 있음.

(마) 한계시험

* 이 시험은 스트레스를 점점 높여 시스템 및 기기를 파괴시켜 이것의 견디는 한계를 알아내는 시험임. 통상의 조건으로는 발생하지 않는 불합리도 약간 가혹한 상태로 되었을 때 취약부품이 어디에 있는지를 알 수 있음.

(바) 재료시험

* 재료시험으로서의 인장시험, 압축시험, 경도시험, creep시험, 충격시험 등과, 재료부품시험, 전자부품시험 등이 있음.

3.1.3 신뢰성시험 데이터의 취급방법 2019 2회차

* 신뢰성시험 데이터의 취급방법으로서는 다음과 같은 점에 유의하도록 함.
  ① 신뢰성시험에는 정시중단시험과 정수중단시험을 주로 하므로 데이터도 이 중단 데이터를 이용하여 해석하지 않으면 안됨.
  ② 총시험시간이 누적됨에 따라 축차 이 시점까지의 총고장수에 따라 합격, 불합격, 시험계속 여부를 결정해 가는 신뢰성적합시험, 즉 축차시험방식임.
  ③ 시험시간을 단축할 목적으로 기준조건보다 엄한 조건으로 행하는 가속시험을 행함.
  ④ 시험시간 데이터 외에 시험조건, 고장모드 및 고장메카니즘 등을 상세하게 기록할 필요가 있음. 신뢰성시험 데이터를 취하기 위해서는 "①의 데이터↔②의 데이터↔③의 데이터"와 같은 형태로 이 3자의 특성에 대한 상관을 잘 파악하는 것이 중요함.

3.1.4 가속수명시험 2021 등 총4회

(1) 가속수명시험의 가정

* 가속인자인 기계적 부하나 온도, 습도, 전압 등 사용조건을 강화하여 고장시간을 단축시키는 수명시험을 가속수명시험이라고 함.
* 정상사용조건을 n, 정상조건에서의 고장시간을 t_n, 강화된 사용조건을 S, 강화된 사용조건에서의 고장시간을 t_s라고 하면 스트레스와 고장시간은 [그림 9.5]와 같은 선형관계를 주게 됨.

$\eta_n = A \times \eta_s$을 사용하여 $\lambda_n(t)$를 나타내면

$$\lambda_n(t) = \frac{m}{A \cdot \eta_S}\left(\frac{t}{A \cdot \eta_S}\right)^{m-1}$$

$$= \frac{1}{A^m}\left(\frac{m}{\eta_S}\right)\left(\frac{t}{\eta_S}\right)^{m-1} = \frac{1}{A^m}\lambda_S(t) \qquad (9.85)$$

* 만일 $m=1$, 즉 지수분포이면

$$\lambda_n(t) = \frac{1}{A}\lambda_s(t)$$

가 되므로 $\lambda_s(t)$에 $1/A$만 곱하면 되고, m이 1이 아닌 경우에는 $1/A^m$을 곱하면 $\lambda_n(t)$를 구할 수 있음.

* 와이블분포의 경우 수명은 $\theta_n = A \cdot \theta_s$의 관계에 있음.

(3) 아레니우스(Arrhenius) 모델

* 온도가 중요한 영향을 미치는 가속모델로서, 50%가 고장나는 시간 T_{50}은 다음과 같이 표현되며, 이것을 아레니우스(또는 알헨니우스라고도 불림) 모델이라고 함.

$$T_{50} = A \cdot e^{\Delta H/kT} \qquad (9.86)$$

여기서, A와 ΔH : 미지의 상수

k : Boltzman 상수 $(k = 8.617 \times 10^{-5} EV/^0 K = 1.380 \times 10^{-16} ergs/^0 K)$

T : Kelvin도로 측정된 온도 ($Kelvin$도= 섭씨$(Celsius)$도+273.16)

* T_{50}은 와이블분포인 경우 척도모수 η로, 지수분포의 경우 $1/\lambda$로 나타낼 수 있음.

* 상수 A의 값은 변하지만 이것은 가속계수에 영향을 미치지 않음. 왜냐하면 가속계수(AF)는 다음과 같이 구할 수 있기 때문임.

$$AF = \frac{T_{50}\ (at\ T_1)}{T_{50}\ (at\ T_2)} = \frac{A \cdot e^{\Delta H/kT_1}}{A \cdot e^{\Delta H/kT_2}} = e^{\frac{\Delta H}{k}\left(\frac{1}{T_1}-\frac{1}{T_2}\right)} = e^{\Delta H \cdot TF} \qquad (9.87)$$

여기서, T_1은 정상조건 온도, T_2는 가속조건 온도

* 윗 식에 ΔH의 값만 알면 어느 두 온도간의 가속계수(AF)를 구할 수 있음.

(4) 아일링(Eyring) 모델

* 아일링 모델은 가속인자로서 온도 뿐만 아니라 다른 스트레스까지도 포함시킨 가속모델임.

$$T_{50} = A \cdot T^{\alpha} e^{\Delta H/kT} \cdot e^{[B+(C/T)]S_1} \qquad (9.88)$$

여기서, 첫 번째 지수 항은 온도에 관한 것이고, 두 번째 지수 항은 추가로 고려하는 스트레스에 관한 것임.

* 만일 추가로 고려하는 스트레스가 또 하나 있을 경우에는 다음과 같이 됨.

$$T_{50} = A \cdot T^{\alpha} e^{\Delta H/kT} \cdot e^{[B+(C/T)]S_1} \cdot e^{[D+(E/T)]S_2} \qquad (9.89)$$

* 윗 식에서도 앞에서와 마찬가지로 T_{50} 은 η(와이블분포인 경우) 또는 MTTF로 대치될 수 있음. 그리고 온도 T 는 Kelvin으로 측정된 온도임.
* 예를 들어 만일 온도(단위는 Kelvin)와 전압(단위는 Volt)을 고려하는 가속모델인 경우 위의 아일링 모델에서 $\alpha = 0,\ C = 0,\ S_1 = \ln V$ 가 되기 때문에 다음과 같이 됨.

$$T_{50} = A \cdot e^{\Delta H/kT} \cdot V^{-B} \qquad (9.90)$$

따라서 $A,\ \Delta H$ 및 B 의 3가지 미지의 모수값만 추정하면 T_{50} 이 구해짐.

(5) 기타의 가속모델

(가) 10⁰C 법칙

* 정상적 사용온도보다 10^{0}C를 증가시켜 가속수명시험을 하면 그의 수명은 반으로 감소됨.
* 정상온도에서의 수명을 θ_n, 가속수명시험온도에서의 수명을 θ_a, 정상온도로부터의 10^{0}C 단위의 온도차의 수를 α 라고 하면, 가속수명 θ_a는 식 (9.91)과 같이 되며, 이를 10^{0}C 법칙이라 함(단, 가속수명 θ_a는 θ_s로 표기하기도 함).

$$\theta_n = 2^{\alpha} \cdot \theta_a \qquad (9.91)$$

여기서, α =(가속온도-정상온도)/10

가속계수 $AF = 2^{\alpha} = \theta_n / \theta_a$

(나) α승 법칙

* 이것은 압력 또는 전압을 가속조건으로 하는 경우 사용할 수 있는 법칙으로서 식 (9.92)와 같은 관계를 가짐(단, 가속수명 θ_a는 θ_s로 표기하기도 함).

$$\theta_n = V^{\alpha} \cdot \theta_a \qquad (9.92)$$

여기서, V 는 전압 또는 압력이고, V^{α} 는 가속계수임. $AF = V^{\alpha} = \left(\dfrac{V_s}{V_n}\right)^{\alpha}$

① 콘덴서인 경우 α =5이고, $\theta_a = \theta_n / V^5$ 이 됨. 여기서, V 는 직류전압임.

② 전구나 진공관의 필라멘트인 경우에는 α =13이고, $\theta_a = \theta_n / V^{13}$ 이 됨.

③ 폴리에틸렌과 같은 유기절연물인 경우 α =13이고, $\theta_a = \theta_n / V^{13}$ 이 됨.

여기서, V 는 교류전압임.

④ 볼베어링인 경우 $\alpha = 3$이고, $\theta_a = \theta_n / V^3$ 가 되는데 이 경우 V 는 압력임.

(다) 전압(V)만 관계되는 경우

* 아일링 모델에서 온도를 일정하게 하고 전압만 변화시키는 경우임.

$$T_{50} = AV^{-B}$$

$$T_{50} = A \cdot e^{-BV} \tag{9.93}$$

(라) 습도(RH)만 관계되는 경우

$$T_{50} = A(RH)^{-B}$$

$$T_{50} = A \cdot e^{-B(RH)} \tag{9.94}$$

여기서, RH는 상대습도(relative humidity)임.

3.2 신뢰성추정 2010 등 총3회

3.2.1 신뢰성추정의 개요 2021 2회차

* 수명시험의 일반적 방법은 정상수명시험을 이용하고, 신뢰성을 정확히 파악하기 위해서는 전수시험을 행함. 검사비용을 줄이는 경제성 고려와 검사데이터수의 감소화를 위해서는 중도중단시험, 가속수명시험을 행함.

* 중도중단시험은 정수중단시험과 정시중단시험이 있음.

* 제품의 신뢰성추정은 고장확률밀도함수가 지수분포, 정규분포 또는 와이블분포의 어느 하나를 따른다는 것을 알면 샘플 data에 의거 그 확률분포의 모수만 추정하면 신뢰성척도인 $F(t)$, $R(t)$, $f(t)$, $\lambda(t)$ 및 평균수명을 구할 수 있음.

* 즉, 고장률의 형태에 따른 신뢰성 척도의 추정이 가능하게 됨.
  ① CFR, 즉 고장확률밀도함수가 지수분포를 따르는 경우 지수분포의 모수인 평균수명 θ(혹은 MTBF), 평균고장률 λ 의 추정이 가능함.
  ② IFR, 즉 고장확률밀도함수가 정규분포를 따르는 경우 정규분포의 모수인 평균수명 μ, 표준편차 σ 추정이 가능함.
  ③ 고장률이 CFR인지, IFR인지, DFR인지 확실히 모르는 경우에는 와이블분포로 가정하고 샘플로부터 m, η, γ 추정에 의한 μ, σ 의 추정이 가능함.

3.2.2 신뢰성추정 (전수고장시) 1982

* 전수고장시의 신뢰성추정으로서 고장이 지수분포에 따르는 경우 중도중단이라고 볼 수 없는 경우 평균수명 θ 의 점추정은 다음 식에 의함.

$$\hat{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i}{n} = \frac{T}{n} \tag{9.95}$$

여기서, n : 샘플수, T : 총시험시간, t_i : i 번째 고장발생시간

그런데 평균수명은 θ 대신에 MTBF(혹은 MTTF)를 사용하기도 함.

* 고장이 지수분포를 따르고 전수고장(완전시료)일 때 평균수명(θ)의 구간추정은 정수중단 규정을 따라 실시됨.

* 한편 얻어진 데이터가 가정한 모집단의 분포에 적합한가의 검정방법을 적합도검정이라고 하는데, 적합도검정 방법으로서는 다음과 같은 방법 등이 있음.

① χ^2 검정 : $\chi_0{}^2 = \sum\{(O-E)^2/E\} = \sum\{(\text{관측치}-\text{기대치})^2/\text{기대치}\}$

② 고루모고로프-스미르노프 검정 $(d-test)$

③ Bartlett 검정

④ 확률지타점법 : 타점된 점들이 직선이면 고장데이터가 가정된 분포를 따른다고 판정.

* 이들 중에서 Bartlett 검정 방법은 $n \geq 20$인 경우에 적용하며, 검정통계량(B_r)으로서 다음 식을 사용함.

$$B_r = \frac{2r\left[\ln\left(\frac{t_r}{r}\right) - \frac{1}{r}\sum \ln x_i\right]}{1 + \frac{(r+1)}{6r}} \tag{9.96}$$

여기서, x_i : 고장발생시간간격을 나타내는 확률변수, r : 고장개수,

$t_r = \sum_{i=1}^{r} x_i$: r번째 고장까지의 고장발생시간 합

위의 공식에 의거 검정통계량 B_r을 구한 후, 검정통계량 B_r이 다음의 기각역 조건인

$B_r < \chi^2_{\alpha/2}(\nu)$ 또는 $B_r > \chi^2_{1-\alpha/2}(\nu)$ (여기서, $\nu = r-1$)

을 만족하면 H_0(지수분포로 가정해도 좋다)를 기각하고, 그렇지 않으면 H_0를 채택함.

3.2.3 신뢰성추정 (지수분포의 경우) 2011 등 총4회

* 확률분포의 모수추정 방법에는 점추정과 구간추정의 2가지 방법이 있음.

* 본 항에서는 공식에 의한 점추정 및 구간추정 방법을 알아보기로 함.

(1) 점추정

(가) 정시중단시험의 경우

* 샘플 n개를 채취하여 미리 정해진 시험중단시간인 t_c 시간까지 시험하고, t_c 시간이 되면 중단하는 정시중단시험(type Ⅰ censored test)의 경우는 다음과 같은 공식에 의거 평균수명의 점추정치를 구함.

① 도중에 교체하지 않는 경우

$$\hat{\theta} = \frac{\sum t_i + (n-r)t_c}{r} \tag{9.97}$$

여기서, $T = \sum t_i + (n-r)t_c$, t_c : 미리 정해진 시험중단시간

② 도중에 교체하는 경우

$$\hat{\theta} = \frac{n \cdot t_c}{r} \tag{9.98}$$

여기서, $T = n \cdot t_c$

(나) 정수중단시험의 경우 2012

* 샘플 n 개를 채취하여 r 개가 고장날 때까지 시험하고, r 개가 고장나면 시험을 중단하는 정수중단시험(type Ⅱ censored test)의 경우 샘플 중 고장난 것을 교체하느냐, 교체안하느냐에 따라 평균수명의 점추정치를 구분하여 구함.

① 도중에 교체하지 않는 경우 (수리하지 못하는 제품)

$$\hat{\theta} = \frac{\sum t_i + (n-r)t_r}{r} \tag{9.99}$$

여기서, $T = \sum t_i + (n-r)t_r$

② 도중에 교체하는 경우 (수리하면서 사용하는 제품)

$$\hat{\theta} = \frac{n \cdot t_r}{r} \tag{9.100}$$

여기서, $T = n \cdot t_r$, t_r : r 번째(또는 마지막) 고장발생시간

(다) 고장개수 r =0인 경우 2009

* 이는 총시험기간 중 고장이 발생하지 않는, 즉 r =0인 경우임. 단위시간간격 중 발생하는 고장개수는 포아송분포를 따르기 때문에, 고장개수가 c개 이하일 확률은 다음 식으로 됨.

$$\sum_{r=0}^{c} \frac{e^{-m} \cdot (m)^r}{r!} = \alpha \quad (\text{단, } m = \lambda T) \tag{9.101}$$

여기서 r =0이면 $e^{-m} = e^{-\lambda T} = \alpha$가 되고, 신뢰수준 90%, 즉 $\alpha = 0.10$ 이면 $e^{-\lambda T} = 0.1$에서 $-\lambda T = \ln 0.1 = -2.3$이고, $\lambda_U = 2.3/T$ 이 되므로 $\lambda = 1/MTBF = 1/\theta$의 관계에서 다음과 같은 식으로 됨.

$$\text{신뢰수준 90\%일 때, } \theta_L = \frac{T}{2.3} \tag{9.102}$$

* 만일 신뢰수준을 95%로 하면 평균수명 추정치의 하한치 θ_L은 다음 식으로 됨.

$$\text{신뢰수준 95\%일 때, } \theta_L = \frac{T}{2.99} \tag{9.103}$$

(라) 구간점검으로 고장난 것과 고장날 만한 것을 모두 새 것으로 교체한 경우 2005

* 이 경우의 평균수명은 다음 공식에 의거 추정함.

$$\hat{\theta} = \frac{\sum t_i r_i + \sum t_i k_i}{r} \tag{9.104}$$

여기서, t_i : i 번째 점검시간, r_i : i 시간에서의 구간고장개수

k_i : i 시간에서의 고장날 만하기 때문에 교환한 구간교체수

r : 전체고장개수($r = \sum r_i$)

(2) 구간추정

* 고장발생이 지수분포를 따를 때 $2r\hat{\theta}/\theta$ 가 자유도가 $2r$ 인 χ^2분포를 하므로

$$P_r\left[\chi^2_{\alpha/2}(2r) \le \frac{2r\hat{\theta}}{\theta} \le \chi^2_{1-\alpha/2}(2r)\right] = 1-\alpha \qquad (9.105)$$

$\hat{\theta} = T/r$ 이므로 $T = r\cdot\hat{\theta}$가 됨.

* 이것을 대입하고 정리하면 신뢰수준 $1-\alpha$ 에서의 θ 의 구간추정치는 다음 식과 같이 됨.

(가) 양쪽구간 추정 1997 등 총2회

① 정수중단의 경우

$$\frac{2r\hat{\theta}}{\chi^2_{1-\alpha/2}(2r)} \le \theta \le \frac{2r\hat{\theta}}{\chi^2_{\alpha/2}(2r)} \quad (\text{단, } r\hat{\theta} = T) \qquad (9.106)$$

② 정시중단의 경우

$$\frac{2r\hat{\theta}}{\chi^2_{1-\alpha/2}\{2(r+1)\}} \le \theta \le \frac{2r\hat{\theta}}{\chi^2_{\alpha/2}(2r)} \quad (\text{단, } r\hat{\theta} = T) \qquad (9.107)$$

(나) 한쪽구간 추정

① 정수중단의 경우

$$\theta_L = \frac{2T}{\chi^2_{1-\alpha}(2r)} = \frac{2r\cdot\hat{\theta}}{\chi^2_{1-\alpha}(2r)} \qquad (9.108)$$

② 정시중단의 경우

$$\theta_L = \frac{2T}{\chi^2_{1-\alpha}\{2(r+1)\}} = \frac{2r\cdot\hat{\theta}}{\chi^2_{1-\alpha}\{2(r+1)\}} \qquad (9.109)$$

예제 9.12 n =10에 대하여 50시간에 걸쳐 수명시험을 하였더니 다음과 같은 고장시간 데이터가 얻어졌다. 그리고 샘플 중 고장난 것은 새 것으로 교체하지 않았다. 평균수명의 점추정치를 구하라.

i	1	2	3	4
t_i	13	25	32	44

해설

☞ 단위시간 구간으로 점검하여 고장난 것(r_i)와 고장날 만한 것(k_i)을 새 것으로 교환한 경우로서 $r=\sum r_i = 11,\ \sum k_i = 19,\ \sum t_i r_i = 2{,}064,\ \sum t_i k_i = 2{,}962$ 이므로, 식 (9.104)에 대입하면 평균수명의 추정치는 다음과 같이 됨.

$$\hat{\theta} = \frac{\sum t_i r_i + \sum t_i k_i}{r} = \frac{2{,}064 + 2{,}952}{11} = 456\,(\text{시간})$$

예제 9.16 다음 데이터는 설계를 변경한 후 만든 어떤 전자기기장치 10대를 가속수명시험에 걸어 $r=7$ 에서 정수중단한 시험결과이다. 이 데이터를 와이블확률지에 타점해 보니 형상파라미터가 $m=1$이었다. 다음 물음에 답하시오.

(데이터) 3, 9, 12, 18, 27, 31, 43 (시간)

(1) 이 장치의 MTBF를 추정하시오. (2) 고장률을 추정하시오.
(3) 이 장치의 시간 t =10에서의 신뢰도를 구하시오.
(4) 신뢰수준 90%에서의 MTBF의 신뢰구간을 구하시오.
(5) MTBF가 28이라고 하면, 변했다고 할 수 있는가? (α =0.05) [기사 기출]

해설 2019 등 총2회

☞ 정수중단시험에서 교체하지 않는 경우임. $m=1$이므로 지수분포를 따르는 경우임.

(1) $$\widehat{MTBF} = \hat{\theta} = \frac{\sum t_i + (n-r)t_r}{r} = \frac{143 + (10-7)\times 43}{7} = 38.86\,(\text{시간})$$

(2) $\lambda = \dfrac{1}{MTBF} = \dfrac{1}{38.86} = 0.0257$ (/시간) (3) $R(t=10) = e^{-\lambda t} = e^{-(1/38.86)\times 10} = 0.773$

(4) <부표 23> MTBF 구간추정의 계수표(정수중단)에서 $r=7$, 신뢰수준 90%일 때의 상한이 2.131, 하한이 0.546이므로

$$\widehat{MTBF_U} = \hat{\theta}\times 2.131 = 38.86\times 2.131 = 82.81(\text{시간})$$

$$\widehat{MTBF_L} = \hat{\theta}\times 0.546 = 38.86\times 0.546 = 22.97(\text{시간})$$

(5) 검정

① 가설설정 : H_0 : $MTBF=28,\quad H_1$: $MTBF \neq 28$ ② 유의수준 : α =0.05

③ 검정통계량의 값(χ_0^2) 계산 : $\chi_0{}^2 = \dfrac{T}{MTBF} = \dfrac{272}{38.86} = 7$

여기서, $T = \sum t_i + (n-r)t_r = 143 + (10-7)\times 43 = 272$

④ 기각역 : $\chi_0{}^2 \geq \chi^2_{1-\alpha/2}(2r) = \chi^2_{0.975}(14) = 26.1$ 또는

$\chi_0{}^2 \leq \chi^2_{\alpha/2}(2r) = \chi^2_{0.025}(14) = 5.63$ 이면 H_0 기각

⑤ 판정 : $\chi^2_{0.025}(14) < \chi_0{}^2(=7) < \chi^2_{0.975}(14)$ 가 성립하므로 H_0 를 채택함.

즉, MTBF가 28이라고 할 수 있음.

이것을 정규분포표에서 구하고 [표 2]의 우단에 기입하였음.

[표 2]에서 $\sum t_i = 29{,}667,\ \sum y_i = -11.61,\ r = 11$ 이므로,

$\sum t_i = r\mu + \sigma \sum y_i$ 에서 $29{,}667 = 11\mu - 11.61\sigma$

$\sum t_i y_i = \mu \sum y_i + \sigma \sum y_i^2$ 에서 $-27{,}062.8 = -11.61\mu + 15.77\sigma$

위의 두 식을 연립시켜 풀면 $\sigma = 1{,}208,\ \mu = 3{,}972$ 가 얻어짐.

[참조] 식 (9.113)과 식 (9.114)에 의거하여 $\sigma,\ \mu$ 를 계산해도 동일한 결과를 얻을 수 있음.

예제 9.18 수명분포가 평균치 200, 표준편차 50인 정규분포를 하는 제품이 있다. 이미 250시간 사용한 이 제품이 앞으로 50시간이상 더 작동될 신뢰도는?

해설

☞ $$R(300/250) = \frac{P_r(T \ge 300)}{P_r(T \ge 250)} = \frac{P_r\left(U \ge \dfrac{300-200}{50}\right)}{P_r\left(U \ge \dfrac{250-200}{50}\right)} = \frac{P_r(U \ge 2.0)}{P_r(U \ge 1.0)} = \frac{0.0228}{0.1587} = 0.1437$$

예제 9.19 샘플 10개에 대한 수명시험 결과 고장시간 데이터가 5, 7, 16, 11, 11, 9, 15, 13, 10, 11시간으로 얻어졌다. 이 고장시간 데이터가 정규분포에 따른다고 보고 통계적 방법에 의거 평균수명과 표준편차를 추정하라.

해설

☞ 중도중단이 아닌 경우로서, 전수고장 시료(완전 시료)일 때 통계적 방법에 의하면

$$\mu = \frac{\sum t_i r_i}{\sum r_i} = \frac{108}{10} = 10.8 \text{ (시간)}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(\sum r_i)(\sum t_i^2 \cdot r_i) - (\sum t_i r_i)^2}{\sum r_i (\sum r_i - 1)}} = \sqrt{\frac{(10)(1{,}268) - (108)^2}{10(10-1)}} = 3.36 \text{ (시간)}$$

예제 9.20 어떤 제품의 수명이 450시간, 표준편차 50시간의 정규분포에 따른다고 한다. 이 제품 200개를 새로 사용하기 시작하였다면 지금부터 500~600시간 사이에는 평균 몇 개가 고장나겠는가?

해설

☞ $t = 500$ 과 $t = 600$ 에서의 누적고장확률 $F(t) = \Phi(z) = \Phi\left(\dfrac{t-\mu}{\sigma}\right)$ 의 관계식을 사용하면

$$F(t = 500) = \Phi\left(\frac{500-450}{50}\right) = \Phi(1.0) = 0.8413$$

$$F(t = 600) = \Phi\left(\frac{600-450}{50}\right) = \Phi(3.0) = 0.9987$$

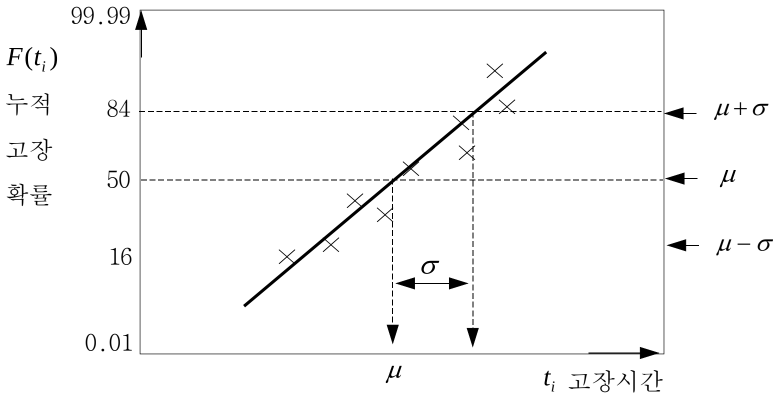
그리고 500시간과 600시간 사이에서의 고장확률은

$$F(t=600)-F(t=500)=0.9987-0.8413=0.1574$$

따라서 평균고장개수=200×0.1574=31.48 → 32개 (소수점이하는 올림처리)

(2) 정규확률지에 의한 방법 2008 등 총2회

* 고장시간의 데이터가 정규분포를 따르는 경우 이 데이터를 정규확률지에 플로팅(타점)하면 직선이 됨. 따라서 고장시간의 분포가 정규분포를 하는 경우에는 정규확률지를 사용하여 평균수명 μ와 표준편차 σ 를 구할 수 있음.



[그림 9.7] 정규확률지에 의한 μ와 σ 를 구하는 개략도

① 정규확률지의 횡축에는 t_i, 종축에는 다음 식에 의거 계산되는 누적고장확률 $F(t_i)$를 눈금으로 기입하고, 고장시간 t_i 로부터 $F(t_i)$를 정규확률지에 타점함.

$$F(t_i)=\frac{i}{n+1}\times 100(\%)$$ (여기서, n 은 샘플수, i 는 고장순번)

② 타점된 점을 통과하는 직선을 그림.

③ 직선과 $F(t_i)$=50% 선과의 만나는 점의 고장시간 t_i 가 μ가 됨.

④ 직선과 $\mu+\sigma$ (또는 $F(t_i)=84\%$) 또는 $\mu-\sigma$ (또는 $F(t_i)=16\%$)선과 만나는 점의 고장시간 t 를 구한 후 ③항의 μ와의 차가 고장시간의 표준편차 σ가 됨.

3.2.5 신뢰성추정 (와이블분포의 경우)

* 와이블분포인 경우의 신뢰성추정은 ① 통계적 방법, ② 간편법, ③ 와이블확률지에 의한 방법의 3가지가 있음. 이들에 대하여 순차적으로 알아보기로 함.

(1) 통계적 방법 2016

* 이는 회귀선의 계수를 최소자승법으로 구하는, 즉 m, η 로부터 μ,σ 를 구하는 방법임. 와이블분포의 경우에 확률밀도함수는 다음과 같음.

$$f(t)=\frac{m}{\eta}\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{m-1}\cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^m}$$

* 한편 고장시간 t_i에 대한 누적고장확률 $F(t_i)$를 구하는 방법은 평균순위법이나, 메디안순위법 중 하나를 택하여 구할 수 있음. 우선 평균순위법은

$$F(t_i) = \frac{i}{n+1} \times 100(\%) \tag{9.121}$$

에 의해, 그리고 메디안순위법은 다음 식에 의거 누적고장확률 $F(t_i)$를 구함.

$$F(t_i) = \frac{i-0.3}{n+0.4} \times 100(\%) \tag{9.122}$$

예제 9.21 샘플 100개에 대하여 500시간 수명시험을 한 결과 12개가 고장났으며, 고장순위별 고장시간은 다음 표와 같다. 와이블분포의 형상모수 m, 척도모수 η 및 평균수명 μ를 추정하라.

고장순번 (i)	고장시간 (t_i)(시간)	$F(t_i)$	x_i	y_i	x_i^2	$x_i y_i$
1	6	0.005	1.79	-5.30	3.20	-9.48
2	21	0.015	3.04	-4.20	9.24	-12.76
3	50	0.025	3.91	-3.68	15.28	-14.38
4	84	0.035	4.43	-3.33	19.62	-14.75
5	95	0.045	4.55	-3.08	20.70	-14.01
6	130	0.055	4.87	-2.87	23.72	-13.97
7	205	0.065	5.32	-2.70	28.30	-14.36
8	260	0.075	5.56	-2.55	30.91	-14.17
9	270	0.085	5.60	-2.42	31.36	-13.55
10	370	0.095	5.91	-2.30	34.92	-13.59
11	440	0.105	6.09	-2.20	37.08	-13.59
12	480	0.115	6.17	-2.10	38.06	-12.95
계	-	-	57.24	-36.73	292.39	-161.36

해설

☞ m, η를 구한 후 μ를 추정함.

(1) 형상모수 m의 추정

* 상기 표에서 $F(t_i)$는 일반적으로 많이 사용되는 평균순위법을 사용하지 않고, 여기서는 메디안순위법을 사용하였고, x_i, y_i는 $x_i = \ln t_i$, $y_i = \ln\ln[1/\{1-F(t_i)\}]$에 의거 계산됨.

* 상기 표의 계산결과를 가지고 m을 다음과 같이 구함.

$$m = \frac{r\sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{r\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = \frac{(12)(-161.36)-(57.24)(-36.73)}{(12)(292.39)-(57.24)^2} = 0.71$$

(2) 척도모수 η의 추정

* $t_0 = \eta^m$에서 $\eta = (t_0)^{1/m}$이므로 $\eta = (626.4)^{1/0.71} = 8{,}694$ (시간)

여기서, $t_0 = e^{-b} = e^{6.44} = 626.4$

단, $b = \frac{\sum y_i}{r} - m \cdot \frac{\sum x_i}{r} = \frac{-36.73}{12} - (0.71)\frac{57.24}{12} = -6.44$

(3) 평균수명 μ 의 추정

* 평균수명은 $\mu = (t_0)^{1/m} \cdot \Gamma[1+(1/m)] = \eta \cdot \Gamma[1+(1/m)]$

$= 8{,}694 \cdot \Gamma[1+(1/0.71)] = 8{,}694 \times \Gamma(1+1.4)$

$= 8{,}694 \times 1.2422 = 10{,}799.68 \approx 10{,}800$ (시간)

여기서, 감마함수 $\Gamma(1+1.4)$ 의 값은 $\Gamma(1+n) = n \cdot \Gamma(n)$ 이므로, $\Gamma(1.4)$ 를 감마함수표에서 찾으면 0.8873이고, $\Gamma(1+1.4) = 1.4\Gamma(1.4) = (1.4)(0.8873) = 1.2422$

(2) 와이블확률지에 의한 방법

* 고장확률밀도함수를 와이블분포로 가정한 경우의 신뢰성척도의 추정은 통계적 추정방법보다 와이블확률지를 이용하여 추정하는 편이 훨씬 간편함.

* 그리고 와이블확률지는 횡축은 $\ln t_i$, 종축은 $\ln\ln[1/\{1-F(t_i)\}]$로 만든 확률지임.

이 방법 적용을 위해 실제로 수명시험을 하게 되면 고장시간 데이터인 t_i 를 얻게 됨.

따라서 횡축에는 t_i 와 이에 대응한 $\ln t_i$를 위아래로 하여 눈금을 만들고, 종축에는 고장시간 데이터로부터 계산된 $F(t_i)$ 와 이에 대응하는 $\ln\ln[1/\{1-F(t_i)\}]$를 좌우로 하여 눈금을 만듦으로써 사용에 편리하도록 [그림 9.8]과 같이 만든 것을 와이블확률지라고 함.

* 와이블확률지는 $\ln\ln[1/\{1-F(t)\}] = m\ln t - \ln t_0$에서 $y = mx + b$ 형태로 그린 것임.

* 와이블확률지에 의한 와이블분포의 모수인 m, t_0, η 와 평균수명 μ 및 표준편차 σ 의 추정 순서는 다음과 같음.

▶(순서 1) 수명시험 결과의 고장시간 데이터 t_i 를 작은 것부터 크기 순으로 나열함.

▶(순서 2) 고장시간 t_i 로부터 누적고장확률 $F(t_i)$ 를 계산후 t_i 에 대응한 $F(t_i)$ 를 와이블확률지상에 타점함.

* $F(t_i)$ 는 다음의 두 식 중에서 하나를 택해 계산하나, 구간 데이터인 경우에는 두 번째의 식을 이용하여 계산함.

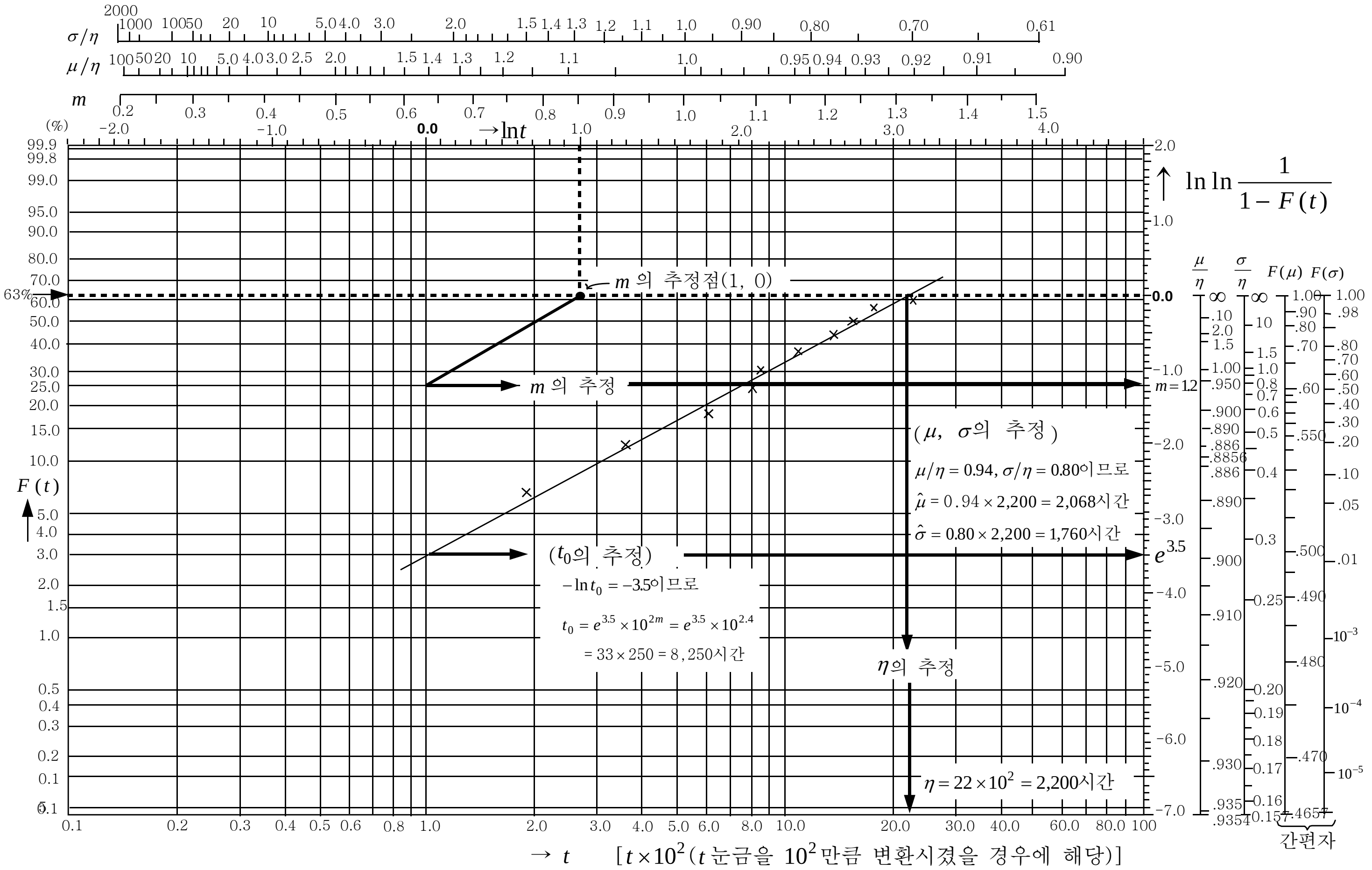
$$F(t_i) = \frac{i}{n+1} \times 100\%$$: 평균순위법인 경우

$$F(t_i) = \frac{i-0.3}{n+0.4} \times 100\ (\%)$$: 메디안순위법인 경우

▶(순서 3) 모든 타점을 관통하는 직선을 그린다. 만일 타점을 관통하는 선이 직선이 아닐 때는 시간지연이 있음을 나타냄. 따라서 이런 경우는 위치모수 γ 의 값이 0이 아님.

▶(순서 4) 형상모수 m 의 추정

* m 의 추정점[$\ln t_i = 1.0$ 과 $\ln\ln\{1/R(t_i)\} = 0$과의 교점]으로부터 타점된 직선과 평행선을 긋고, 이 평행선이 $\ln t_i = 0$인 선과 만나는 점의 우측 눈금을 읽고, 이 값의 부호를 바꾸면 이것이 m 의 추정치가 됨.



[그림 9.8] 와이블확률지의 구조도

▶(순서 5) 특성수명 η의 추정

* 타점된 직선이 $F(t_i)$=63%선과 만나는 점의 하측 눈금(t 눈금)을 읽으면 이것이 특성수명 η의 추정치가 됨.

▶(순서 6) 척도모수 t_0의 추정 : 이는 두 가지 방법이 있음.

(방법 1) 타점의 직선을 연장하여 이것이 $\ln t_i = 0$인 선과 만나는 점의 우측 눈금을 읽으면 이것이 $-\ln t_0$의 값이 됨. 따라서 만일 우측 눈금의 값이 b이면 다음과 같이 이의 역대수를 취하면 t_0를 구할 수 있음.

$-\ln t_0 = b$에서 $t_0 = e^{-b}$

(방법 2) $\eta = t_0^{1/m}$에서 $t_0 = \eta^m$이 됨. 따라서 (순서 4)의 m과 (순서 5)의 η값을 $t_0 = \eta^m$의 식에 대입하고 계산하면 t_0를 구할 수 있음.

▶(순서 7) μ, σ 의 추정

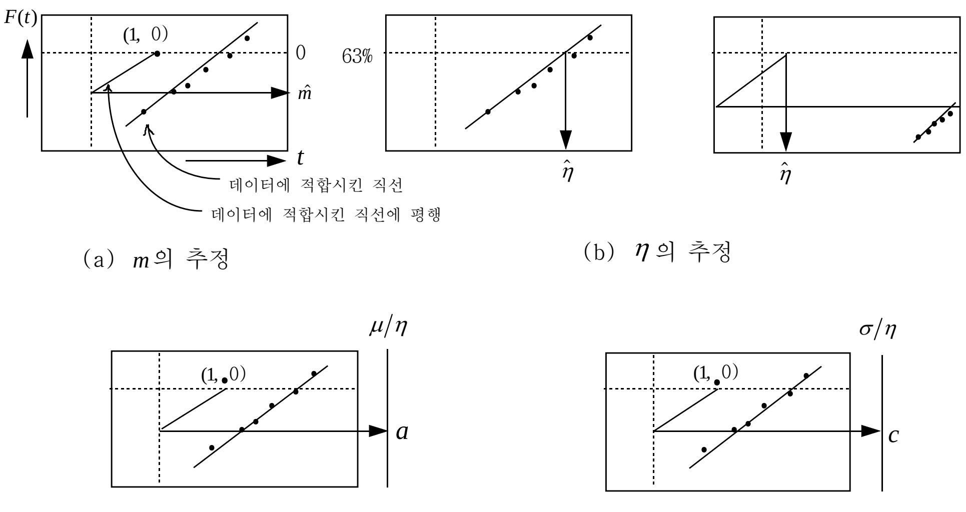
(방법 1) 우측 눈금에 $-m$의 값을 취하고, 이것을 우측으로 연장하여 (μ/η)와 (σ/η)의 값을 읽은 후 이에 의거 다음과 같이 하여 μ와 σ를 구함.

$$\hat{\mu} = \left(\frac{\mu}{\eta}\right) \times \eta, \quad \hat{\sigma} = \left(\frac{\sigma}{\eta}\right) \times \eta$$

(방법 2) 감마함수의 값을 감마함수표에서 구하고, 이것을 다음의 식에 대입하여 μ, σ를 구함.

$$\mu = \eta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right), \quad \sigma^2 = \eta^2 \cdot \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{m}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{m}\right)\right]$$

* 이상의 와이블확률지에 의한 m, η, μ, σ 의 추정방법에 대한 이해를 돕는 개요도를 간략하게 도시하면 다음 [그림 9.9]와 같음.



(a) m의 추정

(b) η의 추정

(c) μ의 추정: $\hat{\mu} = \hat{\eta} \times a$

(d) σ의 추정: $\hat{\sigma} = \hat{\eta} \times c$

[그림 9.9] 와이블확률지에 의한 m, η, μ, σ 의 추정 개요도

예제 9.22 샘플 15개에 대하여 10개가 고장날 때까지 수명시험을 실시한 결과 다음 표의 상단과 같은 고장시간 데이터를 얻었다. 와이블확률지에 의거 와이블분포의 모수인 m, t_0, η 와 평균수명 μ 및 표준편차 σ 를 추정하라. (시간의 단위는 $t\times10^2$ 시간임)

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t	1.9	3.6	6.1	8.0	8.5	11.0	13.4	15.7	17.9	22.4
$F(t)$%	6.3	12.5	18.8	25.0	31.3	37.5	43.8	50.0	56.3	62.5

해설

☞ 와이블확률지에 의거 와이블분포의 모수의 추정

① 고장시간에 대한 누적고장확률을 평균순위법 $F(t_i)=i/(n+1)\times100\%$ 식에 의거 상기 표의 세 번째 줄과 같이 계산하고, 확률지의 횡축 t 에 대응한 종축 $F(t)$ 의 값을 플로팅함. (그림 9.8 참조)

② 모든 타점을 통과하는 직선을 작도함.

③ $(\ln t=1)$ 인 선과 횡주축 $(\ln\ln\{1/R(t)\}=0$ 인 선)과의 교점(이것을 “m 의 추정점”이라 함)으로부터 타점의 직선과 평행선을 긋고, 이것이 종주축($\ln t=0$)과 만나는 점을 구하고, 이 점과 횡축에 평행으로 선을 그어 우측 종축인 $\ln\ln\{1/R(t)\}$ 의 눈금을 읽은 후, 이 값의 부호를 바꾸면 이것이 m 의 값이 되므로, [그림 9.8]에 의거 m=1.2가 됨.

④ 타점의 직선 연장으로 종주축($\ln t=0$인 선)과 만나는 점에 대한 우측 종축 $\ln\ln\{1/R(t)\}$ 의 눈금을 읽음. 그러면 이것이 $-\ln t_0$의 값이 됨. 그 다음 이 값의 역대수(anti-log)를 취하면 t_0 의 값을 구할 수 있음.

* 본 예제의 경우로서 [그림 9.8]에서 $-\ln t_0=-3.5$ 이므로, 이의 역대수를 취하면 $t_0=e^{3.5}\times10^{2m}=e^{3.5}\times10^{2.4}=33\times250=8{,}250$시간이 됨.

* 여기서 10^{2m}을 곱한 것은 t 의 눈금을 10^2 만큼 변환해서 플로팅한 때문임. (단, t 의 눈금을 변환하지 않은 경우에는 $-\ln t_0=b$ 에서 $t_0=e^{-b}=e^{-(-3.5)}=e^{3.5}$, 즉 $t_0=e^{3.5}$가 됨.)

⑤ 특성수명 $(\eta=t_0^{\frac{1}{m}})$ 의 값은 타점의 직선이 $F(t)=63\%$ 인 선과 만나는 점의 하측 눈금(t 눈금)을 읽으면, [그림 9.8]에서 $\eta=22\times10^2=2{,}200$ 시간이 됨.

⑥ $\ln\ln\{1/R(t)\}$ 의 축상에 $-m$ 의 값을 취하고 이것을 옆으로 연장하여 μ/η 와 σ/η 의 값을 읽음. 그리고 이 η 의 값을 대입하여 μ 와 σ 를 계산함.

* [그림 9.8]에서 $\mu/\eta=0.94$ 이고, $\sigma/\eta=0.80$ 이므로 $\hat{\mu}=0.94\times2{,}200=2{,}068$ 시간이 되고, $\hat{\sigma}=0.80\times2{,}200=1{,}760$ 시간이 됨.

4. 신뢰성 샘플링검사

* 앞에서 살펴 본 신뢰성시험은 고장시간분포에 대한 데이터를 얻고, 이에 의거 제품의 신뢰성 모수인 평균수명(MTBF)와 고장률(λ)를 추정하는 것이었음.
  신뢰성시험에 있어서 비파괴적으로 시험할 수 있으나 오히려 파괴적 성격의 것이 많기 때문에 전수검사가 아닌 샘플링검사로서 인정시험이나 수입시험 및 품질보증시험을 실시함.
* 본 항에서는 신뢰성 샘플링검사들에 대해 고찰하여 봄으로써 제품의 신뢰성시험 및 신뢰성 검사를 통한 제품의 합리적인 신뢰성관리를 하고자 함을 목적으로 한 것임.

4.1 신뢰성 샘플링검사의 개요

4.1.1 신뢰성 샘플링검사의 특징 2005

* 신뢰성 샘플링검사의 특징은 다음과 같은 4가지로 요약할 수 있음.
  ① 신뢰성시험은 고장시간분포에 대한 데이터를 얻고, 이에 의거 제품의 신뢰성 척도로서 평균수명 MTBF와 평균고장률 λ 를 추정하는 것임.
  ② 약간의 위험이 있더라도 위험율 α, β 의 값을 크게 취함(30~40%).
  ③ 지수분포 또는 와이블분포를 가정한 방식이 주류를 이룸.
  ④ 정시중단방식이나 정수중단방식을 사용함(중도중단방식 채용).

4.1.2 일반 샘플링검사 방식과의 비교

* 품질관리의 샘플링검사 방식과 비교하여 신뢰성의 샘플링검사 방식의 다른 점은 다음과 같이 비교할 수 있음.
  ① 부적합품률(P) ↔ 고장률 λ
  ② P_0, P_1 ↔ λ_0, λ_1
  고장률을 척도로 하는 경우 λ_0를 ARL(Acceptable Reliability Level, 합격신뢰성 수준), λ_1 은 LTFR(lot tolerance failure rate, 로트허용고장률)이라 함.
  ③ AQL ↔ ARL 또는 AFR(Acceptable Failure Rate)
  ④ LTPD ↔ LTFR, ⑤ 부적합품수 ↔ 고장수, ⑥ 시료의 크기 ↔ 시간×시료의 크기

4.1.3 고장분포의 가정에 따른 샘플링검사

* 신뢰성 샘플링검사 방식의 시험기간이나 샘플수의 크기는 제품의 고장시간이 어떠한 분포를 하느냐에 따라 다르기 때문에 현재 발표되어 있는 분포의 가정에 따른 신뢰성 샘플링검사 방식의 대표적인 것을 종합하면 다음 <표 9.2>와 같음.
* 샘플링검사 방식, 즉 샘플수와 시험중단시간(정시중단의 경우) 또는 시험중단고장개수(정수중단의 경우)는 제품의 고장분포에 따라 다르며, 제품의 고장패턴은 지수분포를 따르는 경우가 많음. 따라서 지수분포를 가정한 샘플링검사표가 보편화되어 있음.

<표 9.2> 분포의 가정에 따른 샘플링검사 방식의 대표적인 예

분류	샘플링검사명	가정한 고장분포
계수 1회	DOD-Hand Book H108 MIL-STD-690B	지수분포 지수분포
	Good와 Kao의 표 GE사의 샘플링검사표	와이블분포 와이블분포
계량 1회	DOD-Hand Book H108	지수분포
계수 축차	MIL-STD-781A	지수분포

4.2 계수 1회 샘플링검사 (MIL-STD-690B)

* 이 계수 샘플링검사는 λ_1(LTFR)을 소비자위험 β로 보증하기 위한 샘플수 n과 시험시간 t 및 합격판정고장개수 C를 결정하는 검사방식임.

* 즉, 총시험시간 T 사이에 발생한 고장개수 r이 합격판정고장개수 C보다 적으면 그 로트는 신뢰수준(1-β)로 합격시킴.

  여기서 T는 각 샘플(n개)의 시험시간(또는 고장날 때까지의 시간) t의 누계이고, r이 적을 때 $T = nt$임.

* <표 9.3>은 포아송분포에 의거 신뢰수준 90%(β=0.10)로 고장률 LTFR=λ_1의 보증을 위한 합격판정개수 C와 $\lambda_1 t$가 주어졌을 때 샘플크기 n을 나타낸 것임.

* <표 9.3>의 샘플수 n은 다음 식 (9.123)을 만족하도록 계산한 값임.

$$L(\lambda_1) = \sum_{r=0}^{C} \frac{e^{-(\lambda_1 T)}(\lambda_1 T)^r}{r!} \le \beta \qquad (9.123)$$

* <표 9.4>는 β=0.1이외에 여러 가지의 β값[혹은 신뢰수준(1-β)%]과 합격판정개수 C에 대하여 λ_1=1%/10^3시간을 보증하기 위한 총시험시간 T($T = nt$)의 값을 나타낸 것임.

<표 9.3> 계수 1회 샘플링검사표 MIL-STD-690B

[신뢰수준 90%(β=0.1)에서의 샘플의 크기 n]

C \ $\lambda_1 t$	1.0	0.5	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01	0.005
0	3	5	12	23	47	116	231	461
1	5	9	20	40	79	195	390	778
2	7	12	28	55	109	266	533	1065
3	9	15	35	69	137	333	688	1337
4	11	16	42	83	164	398	798	1599

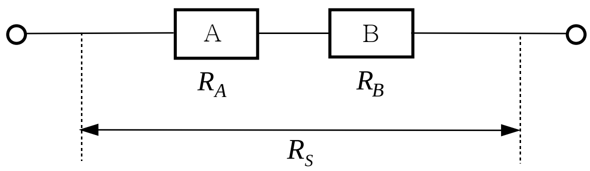
단, λ_1은 LTFR(%/10^3시간), t는 시험시간이고, 표 내는 샘플의 크기 n임.

5. 시스템의 신뢰도 2010 등 총3회

* 일반적으로 소자(素子)나 부품이 결합되어 조립품(보조기계)가 되고, 조립품(Ass'y)이 결합되어 컴포넌트(단위설비)가 됨. 그리고 컴포넌트들이 모여 서브시스템(단위공정)이 되며, 이들 서브시스템이 모여 시스템(공정)이 되는 것임.
* 신뢰성은 개개의 소자나 부품에 대해서도 중요하나, 이들이 결합된 조립품이나 컴포넌트, 나아가 서브시스템·시스템의 신뢰성은 더욱 중요함.
  그러므로 소자나 부품의 신뢰성이 이들의 조합으로 구성된 상위 레벨인 시스템의 신뢰성에 어떠한 관계를 가지는가를 알아 둘 필요가 있음.
* 시스템을 구성하고 있는 여러 개의 소자나 부품의 결합방법은 크게 직렬결합모델과 병렬결합모델로 나누어지지만 특수한 결합모델도 있음.

5.1 직렬결합모델의 신뢰도 2020 등 총6회

* 조립품이나 컴포넌트·시스템 등을 구성하고 있는 여러 개의 소자나 부품 중 어느 하나라도 고장이 나게 되면 시스템 전체가 기능을 상실하게 되도록 소자나 부품이 결합된 것을 직렬결합모델이라고 함.
* [그림 9.11]과 같이 A, B 2개의 부품이 직렬결합모델로 되어 있으면 이 기기가 제대로 기능을 발휘하기 위해서는 A와 B 2개의 부품이 모두 정상작동하여야 함.



[그림 9.11] 직렬결합모델

* 직렬결합모델의 전체 시스템이 작동하는 전체 신뢰도 R_S는 다음과 같음.

$$R_S = P_r(A \ \ AND \ \ B) = P_r(A \cap B)$$

* 만일 A, B가 서로 독립사상이면

$$R_S = P_r(A) \cdot P_r(B) = R_A \cdot R_B \qquad (9.129)$$

  여기서, $P_r(A)$는 부품 A의 신뢰도 R_A, $P_r(B)$는 부품 B의 신뢰도 R_B를 의미함.

  일반적으로 n개 부품이 직렬결합시의 시스템의 신뢰도 R_S는 다음 식과 같이 됨.

$$R_S = R_1 \cdot R_2 \cdots R_n = \prod_{i=1}^{n} R_i = e^{-(\lambda_1+\lambda_2+\cdots+\lambda_n)t} \qquad (9.130)$$

* 전체의 고장률 λ_S는 각 부품의 고장밀도함수가 지수분포에 따르는 경우

$$R_S = e^{-(\lambda_1+\lambda_2+\cdots+\lambda_n)t} = e^{-\lambda_S \cdot t}$$

의 관계로부터 λ_S 는 다음의 식으로 구해짐.

$$\lambda_S = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i = \lambda_1 + \lambda_2 + \cdots + \lambda_n \tag{9.131}$$

* 한편, 시스템의 신뢰성을 구할 때 중요한 것은 t 시간 후의 잔존확률인 신뢰성 $R(t)$ 로서, 다음의 근사식에 의해 $R(t)$ 의 값을 구하면 편리함.

$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-\frac{t}{\mathrm{MTBF}}} \fallingdotseq 1 - \frac{t}{\mathrm{MTBF}} \tag{9.132}$$

여기서, t =사용시간, λ =1/MTBF

* 또한, 고장률 λ_i 인 부품이 여러 개 직렬연결된 시스템의 MTBF는 다음과 같이 구함.

$$\mathrm{MTBF_S} = \frac{1}{\lambda_S} \tag{9.133}$$

여기서, $\lambda_S = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i = \lambda_1 + \lambda_2 + \cdots + \lambda_n$

예제 9.26 각 부품의 평균고장률이 0.002(/시간)인 부품 7개가 동시에 모두 작동해야만 기능을 발휘하는 기기가 있다. 이 기기의 평균수명을 구하라.

해설

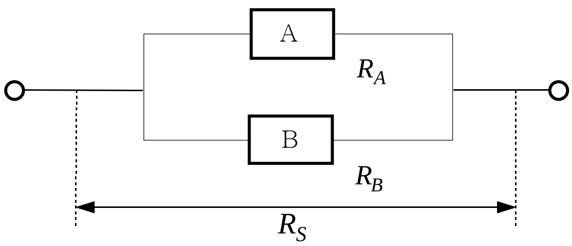
☞ 기기의 평균수명 $\mathrm{MTBF_S}$ (혹은 θ_S)는 $\mathrm{MTBF_S} = \frac{1}{\lambda_S} = \frac{1}{0.014} = 71.4$ (시간)

여기서, 부품 7개의 직렬결합모델이므로 $\lambda_S = \lambda_1 + \lambda_2 + \cdots + \lambda_7 = 7 \times 0.002 = 0.014$ (/시간)

5.2 병렬결합모델의 신뢰도 2021 등 총6회

* [그림 9.12]는 부품을 여분으로 한 개 더 부가시켜서 부품 2개 중 어느 한 개만 작동하면 전체가 기능을 발휘할 수 있도록 결합한 것임.

* 이와 같은 설계를 병렬설계라 하며, 용장(冗長)설계, redundancy설계, 여유설계, 과잉설계 등으로도 불림. 병렬설계를 하면 전체의 신뢰도를 크게 증대시킬 수 있음.



[그림 9.12] 병렬결합모델

* 병렬결합모델의 전체 시스템이 작동하는 전체 신뢰도 R_S는 다음과 같음.

$$R_S = P_r(A \ \ OR \ \ B) = P_r(A \cup B)$$
$$= P_r(A) + P_r(B) - P_r(A) \cdot P_r(B)$$
$$= R_A + R_B - R_A \cdot R_B \tag{9.134}$$

* 또한, $R(t) + F(t) = 1$의 관계에서 다음 식으로 될 수 있음.

$$R_S = (1-F_A) + (1-F_B) - (1-F_A)(1-F_B)$$
$$= 1 - F_A F_B = 1 - (1-R_A)(1-R_B) \tag{9.135}$$

* 일반적으로 n개의 부품이 병렬결합시 시스템 전체의 신뢰도 R_S는 다음과 같음.

$$R_S = 1 - \prod_{i=1}^{n} F_i = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1-R_i) \tag{9.136}$$

* 병렬결합모델의 시스템 MTBF는 식 (9.134)에서 다음 식들

$$R(t) = e^{-\lambda t}, \ R_1(t) = e^{-\lambda_1 t}, \ R_2(t) = e^{-\lambda_2 t}$$

의 지수분포를 따를 때, 이것으로 대치하고 양변을 적분하여 MTBF를 구함.

$$\int_0^\infty R(t)dt = \int_0^\infty R_1(t)dt + \int_0^\infty R_2(t)dt - \int_0^\infty R_1(t)R_2(t)dt$$

$$\int_0^\infty e^{-\lambda t}dt = \int_0^\infty e^{-\lambda_1 t}dt + \int_0^\infty e^{-\lambda_2 t}dt - \int_0^\infty e^{-(\lambda_1+\lambda_2)t}dt$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2}$$

* 이에 의거 병렬결합시스템의 $\mathrm{MTBF_S}$는 다음과 같이 구함.

$$\mathrm{MTBF_S} = \frac{1}{\lambda_S} = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} \tag{9.137}$$

* 상기 식에서 $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_0$라면 $\mathrm{MTBF_S}$는 다음과 같이 주어짐.

$$\mathrm{MTBF_S} = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{\lambda_0} \tag{9.138}$$

* 일반적으로 $\lambda_1 = \lambda_2 = \cdots = \lambda_n = \lambda_0$인 n개 구성부품의 병렬결합시스템의 $\mathrm{MTBF_S}$는 다음 식으로 구해짐.

$$\mathrm{MTBF_S} = \frac{1}{\lambda_0} + \frac{1}{2\lambda_0} + \cdots + \frac{1}{n\lambda_0} \tag{9.139}$$

* 또는, 평균수명 $\theta_0 = 1/\lambda_0$이라면 시스템의 $\mathrm{MTBF_S}$는 다음과 같음.

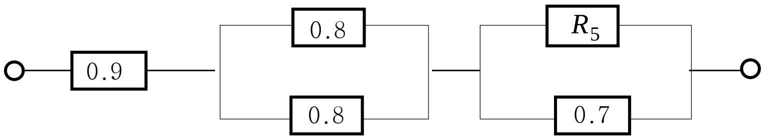
$$\mathrm{MTBF_S} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\theta_0}{i} \tag{9.140}$$

* 그리고, 시스템의 고장률 λ_S 는 다음 식으로 구해짐.

$$\lambda_S = \frac{1}{\mathrm{MTBF_S}} = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_0} + \frac{1}{2\lambda_0} + \cdots + \frac{1}{n\lambda_0}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{\theta_0}{i}} \qquad (9.141)$$

여기서, $\theta_0 = 1/\lambda_0$ 인 경우임.

예제 9.27 다음과 같이 구성된 시스템이 있다. 전체 신뢰도 R_S =0.85로 하고자 할 때 R_5 의 신뢰도는 얼마인가?



해설 [기사 기출]   2005 등 총4회

☞ 시스템의 신뢰도 : $R_S = R_1 \times R_{S1} \times R_{S2} = 0.9 \times 0.96 \times (0.7 + 0.3R_5) = 0.85 \rightarrow R_5 = 0.946$

여기서, 신뢰도 0.8의 부품 2개로 병렬결합된 부분의 신뢰도 : $R_{S1} = 1-(1-0.8)^2 = 0.96$

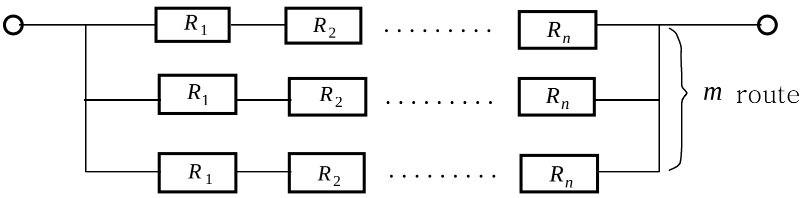
신뢰도 R_5, 0.7의 부품 2개로 병렬결합된 부분의 신뢰도 :

$$R_{S2} = 1-(1-R_5)(1-0.7) = 0.7 + 0.3R_5$$

5.3 특수결합모델의 시스템 신뢰도

5.3.1 m route 시스템 신뢰도

* 병렬결합모델의 특수한 경우인 m route 시스템 신뢰도는 다음 그림과 같은 구조로 됨.



[그림 9.13] m route의 서브시스템 결합

* 직렬인 경우의 서브시스템에서의 신뢰성은 다음과 같음.

$$R_{SS} = R_1 \cdot R_2 \cdots R_n = \prod_{i=1}^{n} R_i \qquad (9.142)$$

* 병렬인 경우의 m route에서의 신뢰성은 다음과 같음.

$$R_S = 1-(1-R_{SS})^m = 1-(1-\prod_{i=1}^{n} R_i)^m \qquad (9.143)$$

여기서, $R_1 = R_2 = \cdots = R_n = R$ 일 경우에는 다음 식으로 됨.

$$R_S = 1-(1-R^n)^m \qquad (9.144)$$

예제 9.28 λ=0.002(/시간)인 부품 3개가 병렬결합되어 있다. 전체 평균고장률 λ_S는 얼마인가?

해설

☞ $\mathrm{MTBF_S} = \dfrac{1}{\lambda_S} = \dfrac{1}{\lambda} + \dfrac{1}{2\lambda} + \dfrac{1}{3\lambda} = \dfrac{11}{6\lambda} \rightarrow \lambda_S = \dfrac{6\lambda}{11} = \dfrac{6 \times 0.002}{11} = 1.09 \times 10^{-3}$ (/시간)

5.3.2 n 중 k (k out of n) 시스템 신뢰도 2006

* n개 중 k개만 작동하면($1 \le k \le n$) 시스템이 작동하는 경우 각 구성품의 신뢰도를 R이라 하면 시스템의 신뢰도 R_S는 다음과 같음.

$$R_S = \sum_{i=k}^{n} \binom{n}{i} R^i (1-R)^{n-i} \tag{9.145}$$

* 만일 $R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-t/\theta}$의 지수분포에 따른다면 시스템의 $\mathrm{MTBF_S}$는 다음과 같이 됨.

$$\mathrm{MTBF_S}(=\theta_S) = \sum_{i=k}^{n} \frac{\theta_0}{i} = MTBF_0\left(\frac{1}{k} + \cdots + \frac{1}{n}\right) \tag{9.146}$$

예제 9.29 신뢰도가 0.99인 미사일 4개가 설치된 미사일발사 시스템이 있다. 그런데 4개의 미사일 중 3개만 작동하면 이 미사일발사 시스템은 임무수행이 가능하다. 이 4 중 3개 미사일 시스템의 신뢰도를 구하여라.

해설

☞ $n = 4, k = 3, R = 0.99$이므로, 이 4 중 3개 미사일 시스템의 신뢰도 R_M은 다음과 같음.

$$R_M = \sum_{i=3}^{4} \binom{4}{i} (0.99)^i (1-0.99)^{4-i} = \binom{4}{3} (0.99)^3 (0.01)^1 + \binom{4}{4} (0.99)^4 (0.01)^0$$

$$= (4)(0.970)(0.01) + (1)(0.960) = 0.0388 + 0.960 = 0.9988$$

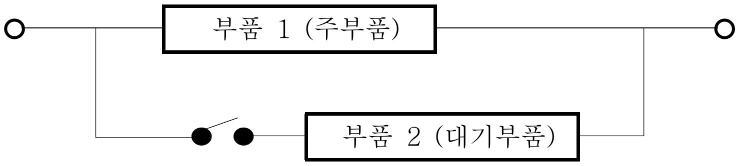
여기서, $\binom{4}{3} = {}_4C_3 = \dfrac{4!}{3!(4-3)!} = \dfrac{4 \times 3 \times 2 \times 1}{3 \times 2 \times 1 \times 1} = 4$

5.3.3 대기결합구조의 시스템 신뢰도 2021 2회차

(1) 대기결합구조의 의의

* 여분의 부품이 처음부터 병렬로 연결되어 있지 않고 처음에는 주부품이 그의 기능을 수행하다가 이것이 고장나면 여분의 부품인 대기부품이 그의 기능을 이어받아 계속 수행하도록 결합되어 있는 것을 말함.

* 그리고 대기결합구조로 시스템을 구성하면 신뢰도가 증가하게 되는 성질을 대기리던던시(stand-by redundancy)라고 함.



[그림 9.14] 대기결합구조

(2) 대기결합구조의 시스템 신뢰도

* 대기결합구조 시스템 신뢰도에 대해 증명결과로서 알려진 결과 식만을 간단히 보도록 함.

① 주부품인 부품 1의 신뢰도 R_1과 대기부품인 부품 2의 신뢰도 R_2가 각각 평균고장률이 λ_1과 λ_2인 지수분포에 따르고, 이 시스템의 임무기간(mission time)이 T라 할 때

$$R_S = e^{-\lambda_1 T} + \int_0^T \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} \cdot e^{-\lambda_2 (T-t)} dt = \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2}[\lambda_1 e^{-\lambda_2 T} - \lambda_2 e^{-\lambda_1 T}] \quad (9.147)$$

② $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$인 경우는 주부품 한 개일 경우보다 MTBF_S는 2배, 신뢰도 R_S는 $(1+\lambda T)$ 배가 증가함. 즉,

㉠ $R_S = e^{-\lambda T} + \int_0^T \lambda e^{-\lambda t} \cdot e^{-\lambda (T-t)} dt = e^{-\lambda T}(1+\lambda T)$ (9.148)

㉡ 전환스위치 신뢰도 R_{SW}를 고려할 경우 $R_S = e^{-\lambda T}(1+R_{SW} \cdot \lambda T)$ (9.149)

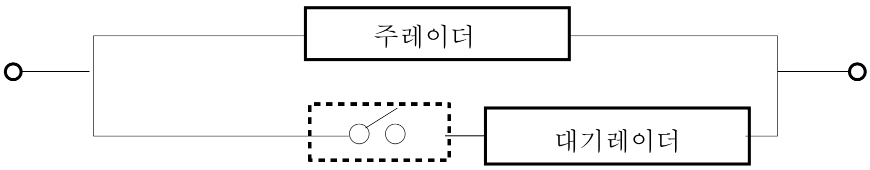
㉢ $\text{MTBF}_S = \int_0^T e^{-\lambda T}(1+\lambda T)dt = \frac{2}{\lambda}$ (9.150)

③ 일반적으로 $\lambda_1 = \lambda_2 = \cdots = \lambda_n = \lambda$인 n개의 부품이 대기결합구조로 구성된 경우

$$R_S = e^{-\lambda t}\left[1 + \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \cdots + \frac{(\lambda t)^{n-1}}{(n-1)!}\right] \quad (9.151)$$

$$\text{MTBF}_S = \underbrace{\left(\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\lambda} + \cdots\right)}_{n\text{개}} = \frac{n}{\lambda} \quad (9.152)$$

예제 9.30 평균고장률이 0.001이고 T=24일 때 신뢰도가 0.9763인 주레이더가 그림과 같이 대기결합구조로 결합되어 있다. 이 대기결합 레이더 시스템의 신뢰도를 구하라.



해설

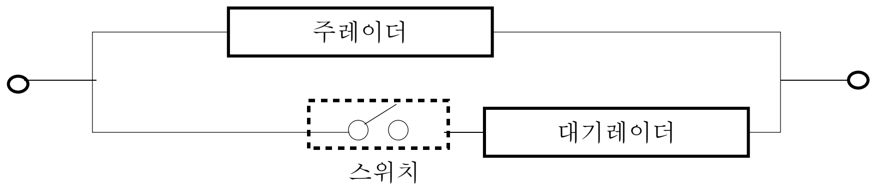
* λ=0.001, T=24이므로 대기결합 레이더 시스템의 신뢰도 R_{S1}은 다음과 같음.

$$R_{S1} = e^{-\lambda T}(1+\lambda T) = e^{-0.001 \times 24}(1+0.001 \times 24) = 0.9763(1+0.024) = 0.9997$$

예제 9.31 [예제 9.30]의 대기결합 레이더 시스템에서 스위치 시스템을 고려한 전체시스템의 신뢰도를 구하라. 단, 스위치의 신뢰도는 0.95라 본다.

해설

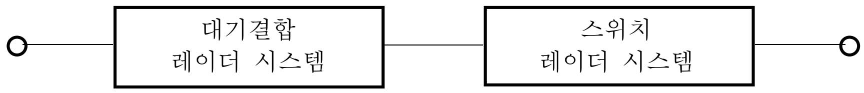
* 주레이더가 대기레이더로 대치되는 경우는 주레이더가 고장나고, 스위치가 반드시 작동하여야만 함. 따라서 주레이더와 스위치는 주레이더가 고장나고 스위치가 작동하여야만 이 부분의 기능이 제대로 발휘되는 병렬결합구조로 볼 수 있음.



* 따라서 스위치 신뢰도를 0.95로 보므로 주레이더와 스위치와의 병렬결합구조 신뢰도 R_S는

$$R_S = 1 - (1 - 0.9763)(1 - 0.95) = 1 - (0.0237)(0.05) = 0.9988$$

* 전체 시스템은 다음 그림과 같은 직렬결합구조가 됨.



$R_{S1} = 0.9997$ $R_{SW} = 0.9988$

따라서 전체 시스템의 신뢰도 R_S는 $R_S = (0.9997)(0.9988) = 0.9985$와 같음.

5.3.4 교차결합구조의 시스템 신뢰도

① 사상공간법(Event Space Method) : 시스템의 유닛들에 대해 모든 가능한 경우(작동, 고장)들을 나열하여 신뢰도를 구하는 방법

② 경로추적법 : 시스템이 작동하는 모든 경로를 찾아서 그 합집합의 확률로써 신뢰도를 구하는 방법

③ 분해법 : 먼저 한 유닛을 선정하고 그 유닛 부품의 작동, 고장에 따른 조건부 확률을 통해 시스템의 신뢰도를 계산하는 방법.

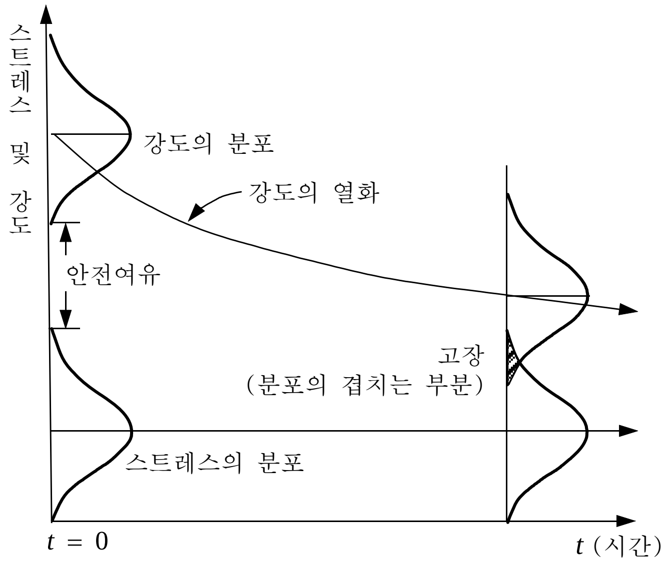
④ 최소절단(cut)집합 : 시스템이 고장나게 되는 최소한의 유닛들의 고장 집합

⑤ 최소경로(path)집합 : 시스템이 작동되도록 하는 최소크기의 작동유닛의 집합

6. 스트레스·강도 모델 및 안전계수 2020 등 총2회

* 부품이나 제품은 항상 열화나 고장의 원인이 될 만한 여러 가지 스트레스(응력)를 받게 됨. 스트레스를 분류해 보면, 그 제품을 움직이고 기능을 발휘하기 위하여 부득이 가해지는 스트레스(전구에 가해지는 전력 등), 즉 기능 스트레스와 외부 환경으로부터 가해지는 환경 스트레스(진동, 온도 등)로 나뉘어 짐.

* 제품의 고장은 스트레스가 제품의 강도를 초과하였을 때 일어남. 이 관계가 [그림 9.15]에 나타나 있음.



[그림 9.15] 스트레스·강도 모델

* 이 스트레스·강도 모형은 재료역학적(물성론적) 모형이라고 볼 수 있음. 이와 반면에 앞에서 취급된 직렬모형과 병렬모형은 부품의 구성론적 모형이라 할 수 있음.
* 스트레스·강도 모형에서는 제품에 고장이 일어나지 않도록 하려면 스트레스와 강도의 차이, 즉 안전여유가 있어야 함. 그러나 이것을 지나치게 크게 잡으면 필요이상으로 튼튼해 지고 경제적으로 낭비가 따르게 됨.
* 스트레스·강도 모형에서의 불신뢰도는 시간이 지남에 따라 강도의 열화로 인하여 스트레스가 강도보다 커졌을 때 일어나므로 스트레스와 강도의 분포가 겹치는 부분으로 생각할 수 있음. 그러나 강도나 스트레스는 각각 어떤 분포에 따르는 확률변수이므로, 어느 순간에 있어서의 강도와 스트레스의 차를 생각하면, 이 차 또한 하나의 확률변수로서 어떤 확률분포를 따름.
* 강도(S)와 스트레스(Q)가 모두 독립적으로 정규분포에 따르고, 강도는 $N(\mu_s,\ \sigma_s^2)$, 스트레스는 $N(\mu_q,\ \sigma_q^2)$ 의 분포를 한다고 가정하면 강도와 스트레스의 차인 $D=S-Q$의 분포는 평균 $\mu_d=\mu_S-\mu_q$이고, 표준편차 $\sigma_d=\sqrt{\sigma_S{}^2+\sigma_q{}^2}$ 인 정규분포를 하게 됨.
* 여기서 $D>0$이면 제품은 살아있게 되므로, 제품의 신뢰도는 다음 식으로 구해짐.

$$R(t)=P(D>0)=\int_0^{\infty}\frac{1}{\sqrt{2\pi}\cdot\sigma_d}\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu_d}{\sigma_d}\right)^2\right\}dt \qquad (9.153)$$

* 한편, 만일 "$D=X-Y$=스트레스(부하)-강도"라면 $D>0$일 때 스트레스가 강도보다 크기 때문에 고장이 발생함.

  따라서 $\mu_d=\mu_x-\mu_y,\ \sigma_d=\sqrt{\sigma_x{}^2+\sigma_y{}^2}$라 하면, 스트레스와 강도의 차이인 D의 분포는 평균 $\mu_d=\mu_x-\mu_y$ 이고, 표준편차 $\sigma_d=\sqrt{\sigma_x{}^2+\sigma_y{}^2}$ 인 정규분포를 하게 되며, 고장발생확률은 $P_r(D>0)$에 의해 다음과 같이 됨.

$$P_r(D>0)=P_r\left(\frac{D-\mu_d}{\sigma_d}>\frac{0-\mu_d}{\sigma_d}\right)$$

$$=P_r\left(U>\frac{0-(\mu_x-\mu_y)}{\sqrt{\sigma_x{}^2+\sigma_y{}^2}}\right) \qquad (9.154)$$

* 이 스트레스·강도 모형에서 중요한 것은 설계할 때에 평균치 뿐만 아니라 산포를 고려하여야 한다는 것임. 따라서 제품의 설계시에 일률적으로 다음과 같은 안전률을 사용하여 줌.

$$\text{안전률}=\frac{\text{평균강도}}{\text{기대되는 스트레스의 최대치}} \qquad (9.155)$$

* 통상 항공기에서는 안전율을 1.25(군용)~1.50(민간용), 자동차에서는 1.3~1.6, 고층건물의 철골구조물에는 2.5~3.0 정도의 안전율을 채택하여 주고 있음.

* 기계에 걸리는 스트레스와 강도의 비인 안전계수(safety factor)는 다음과 같이 구함.

  이제 기계의 강도평균이 μ_y, 표준편차가 σ_y인 정규분포 $N(\mu_y, \sigma_y{}^2)$에 따르고, 이 기계에 걸리는 스트레스의 평균이 μ_x, 표준편차가 σ_x인 정규분포 $N(\mu_x, \sigma_x{}^2)$에 따른다면 안전계수 m은 다음과 같이 계산됨. 여기서 n_y, n_x는 각각 표준화정규분포의 분위점값을 나타냄.

$$m=\frac{\mu_y-n_y\cdot\sigma_y}{\mu_x+n_x\cdot\sigma_x} \qquad (9.156)$$

예제 9.32 스트레스는 평균 μ_x=1.13, 표준편차 σ_x=0.4이고, 재료강도는 표준편차 σ_y= 0.4, $n_x=n_y=2$일 때, 안전계수 m=1.31로 하고 싶다면 재료의 평균강도 μ_y는 얼마이며, 이러한 평균강도의 재료를 사용하였을 경우 스트레스가 강도를 초과할 확률은 얼마인가?

해설

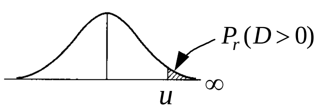
(1) $m=\dfrac{\mu_y-n_y\sigma_y}{\mu_x+n_x\sigma_x} \rightarrow 1.31=\dfrac{\mu_y-2(0.4)}{1.13+2(0.4)} \quad \therefore\ \mu_y=(1.31)(1.93)+0.8=3.33$

재료의 평균치는 3.33이 되어야 함.

(2) 스트레스(X)가 강도(Y)를 초과할(또는 고장날) 확률을 구하기 위해

$$P_r(D>0)=P_r\left(\frac{D-\mu_d}{\sigma_d}>\frac{0-\mu_d}{\sigma_d}\right)=P_r\left(U>\frac{0-(\mu_x-\mu_y)}{\sqrt{\sigma_x^2+\sigma_y^2}}\right)=P_r\left(U>\frac{0-(1.13-3.33)}{\sqrt{(0.4)^2+(0.4)^2}}\right)$$

$$=P_r(U>3.86)=0.0001$$



즉, 표준화 정규분포표에서 확률변수 U 값이 3.86보다 클 확률은 0.0001이 됨.

예제 9.33 어떤 부품의 강도와 스트레스는 시간 t 에서 각각 정규분포에 따르고, 그 평균치와 표준편차는 다음과 같다. 시점 t 에서 부품의 신뢰도를 구하라. [기사 기출]

	강도(S)	스트레스(Q)
평균치	4,200kgf/cm²	3,000kgf/cm²
표준편차	200kgf/cm²	400kgf/cm²

해설

☞ 강도(S)와 스트레스(Q)의 차를 D라 하면

$$R(t) = P_r(D > 0) = P_r\left(U > \frac{0-\mu_d}{\sigma_d}\right) = P_r\left(U > \frac{0-1{,}200}{447.21}\right)$$

$$= P_r(U > -2.68) = 1 - P_r(U \le -2.68) = 1 - 0.0037 = 0.9963$$

여기서, 평균치의 차 : $\mu_d = \mu_S - \mu_Q = 4{,}200 - 3{,}000 = 1{,}200$

표준편차 : $\sigma_d = \sqrt{{\sigma_S}^2 + {\sigma_Q}^2} = \sqrt{(200)^2 + (400)^2} = 447.21$

7. 보전성과 가동성

7.1 보전성 (Maintainability)

7.1.1 보전성의 의의 2012

* 신뢰성은 시간의 경과에 따라 저하함. 그 이유는 사용시간이나 또는 사용횟수에 따른 피로나 마모에 의한 것과 노화나 부식 등 열화(劣化)현상에 의한 것을 들 수 있음.
  이와 같은 "마모나 열화현상에 대하여 수리가능한 시스템을 사용가능한 상태로 유지시키고, 고장이나 결함을 회복시키기 위한 제반 조치 및 활동"을 보전(保全 ; maintenance)이라 함.

* 보전을 행하기 위한 작업에는 다음과 같은 것들이 있음.
  ① 점검 → 설비를 분해하지 않고 설비나 장비의 상태를 파악하는 것으로, 사용자에 의한 일상점검과 전문보전요원에 의한 정기점검으로 나뉜다.
  ② 정비 → 설비나 장비의 분해를 수반한 보전으로서, 분해, 청소, 검사(정밀점검이라고도 함), 수리 혹은 교환, 조립, 설치정도(精度)검사, 시운전 등으로 업무가 구성됨.

* 보전은 고장 또는 결함의 발생을 미연에 방지하고 사용가능 상태로 유지하기 위해 계획적으로 일정한 사용기간마다 보전을 실시하며, 항시 또는 정기적으로 동작상태를 감시하여 고장 및 결함을 사전에 검출하는 예방보전(PM)과 고장이나 결함이 발생한 후에 이것을 수리하여 회복시키는 사후보전(BM)으로 대별됨.

* 또한 보전성(maintainability)이란 "주어진 조건에서 규정된 기간에 보전을 완료할 수 있는 성질"을 말하며, 보전성의 척도로서는 MTTR(평균수리복구시간 ; mean time to repair)이 쓰이고 있음.

7.1.2 보전도, 평균수리복구시간, 평균정지시간

(1) 보전도[$M(t)$] 및 평균수리복구시간[MTTR] 2020 1회차

* 보전도란 "수리가능한 시스템, 기기, 부품 등이 규정의 조건에 있어서 보전이 실시될 때 규정의 시간내에 보전을 완료할 확률"을 말하며, 이와 같이 보전성을 확률로 나타낸 것을 보전도라 하고 $M(t)$로 표현함.

* 보전도 $M(t)$는 시스템이 고장났을 때 되도록 빨리 정상상태로 되돌리는 능력임. 즉 고장에 따른 복구보전을 필요로 할 때 t=0에서 시간 T까지 보전을 완료하는 확률임.

* 보전성을 나타내는 밀도함수 $m(t)$와 수리율 $\mu(t)$는 다음과 같이 정의됨.

$$m(t) = \frac{dM(t)}{dt} \tag{9.157}$$

$$\mu(t) = \frac{m(t)}{1 - M(t)} \tag{9.158}$$

* 보전도함수 $M(t)$가 평균수리율 μ인 지수분포에 따른다고 하면 $M(t)$는 다음과 같음.

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} \tag{9.159}$$

* 보전도함수 $M(t)$가 식 (9.159)와 같고, 수리시간이 평균수리율 μ인 지수분포에 따르면 평균수리복구시간 MTTR(mean time to repair)은

$$MTTR = \int_0^\infty [1 - M(t)]dt = \int_0^\infty e^{-\mu t} dt = \frac{1}{\mu} \tag{9.160}$$

* 실무에서의 MTTR 계산은 고장발생시 수리하는데 소요되는 시간 t_i (여기서 i 는 고장의 순번)를 합계한 후 총수리횟수 n으로 나누어 다음과 같이 구함.

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i}{n} \tag{9.161}$$

* 그리고 n개의 구성부품으로 조립된 기계의 경우의 MTTR은 다음과 같이 구함.

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^{n} \lambda_i t_i}{\sum_{i=1}^{n} \lambda_i} \tag{9.162}$$

여기서, n : 기계의 구성부품 수, λ_i : 각 구성부품의 평균고장률(/시간)

t_i : 각 부품이 고장난 경우의 평균수리시간

* 또한 n_i개의 부품으로 구성된 N개의 부분으로 된 시스템인 경우의 MTTR은 다음과 같이 구함.

$$MTTR = \frac{\sum n_i \lambda_i t_i}{\sum n_i \lambda_i} \tag{9.163}$$

여기서, n_i : 각 부분의 구성부품 수, $\sum n_i \lambda_i$ 단위는 (/시간)

예제 9.34 5대 장치의 수리시간을 조사하였더니 50, 70, 130, 270, 300(시간)이었다. 장치의 수리시간이 지수분포를 따른다면 t =400시간에서 이 장치의 추정 보전도는? [기사 기출]

해설

☞ $M(t=400) = 1 - e^{-\mu t} = 1 - e^{-t/MTTR} = 1 - e^{-(1/164)\times 400} = 1 - 0.0872 = 0.9128$ (91.28%)

여기서, $MTTR = \frac{\sum t_i}{n} = \frac{50+70+130+270+300}{5} = 164$ (시간)

예제 9.35 수리율 μ =2.0(/시간)으로 일정할 때 3시간이내에 보전을 완료할 확률은?

해설

☞ $M(t) = 1 - e^{-\mu t} = 1 - e^{-2.0\times 3} = 0.9975$ (99.75%)

여기서, $M(t)$: 고장난 시스템이 t 시간이내에 회복될 확률, μ =2.0(/시간)

예제 9.36 만일 n_i 개의 부품으로 구성된 5개의 부분으로 된 시스템이 있으며, 각 부분의 구성부품수 n_i 와 각 구성부품의 평균고장률 λ_i 및 각 부품이 고장난 경우의 평균수리시간 t_i가 다음 표와 같다고 한다. 이 시스템의 MTTR을 구하라.

부분	n_i	$\lambda_i(\times 10^{-3})$ (/시간)	$n_i\lambda_i(\times 10^{-3})$ (/시간)	t_i (시간)	$n_i\lambda_i t_i(\times 10^{-3})$
1	4	10	40	0.10	4.0
2	6	5	30	0.20	6.0
3	2	8	16	1.00	16.0
4	1	15	15	0.50	7.5
5	5	12	60	0.50	30.0
계			161		63.5

해설

☞ 식 (9.163)을 이용하여 계산하면 $\text{MTTR} = \frac{\sum n_i \lambda_i t_i}{\sum n_i \lambda_i} = \frac{63.5}{161} = 0.394$ (시간)

(2) **평균정지시간** (MDT)

* 장치의 평균예방보전시간(M_{pt})를 구하는 방법은 다음과 같음.

$$M_{pt} = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i}{f_p} \tag{9.164}$$

여기서, t_i 는 장치의 예방보전시간, f_p는 예방보전횟수

(나) 필요예비품수 C

$$C \geq n \cdot \lambda \cdot T + K_{\alpha}\sqrt{n \cdot \lambda \cdot T} \qquad (9.168)$$

여기서, n : 부품수, λ : 고장률, T : 작동시간, α : 품절률(%)

$n \cdot \lambda \cdot T \geq 5$, $K_{\alpha} = u_{1-\alpha}$

(다) 최적점검주기 T

$$T = \sqrt{\frac{2C_i}{\lambda C_e}} \qquad (9.169)$$

여기서, λ : 고장률(λ=1/MTBF), C_i : 점검 1회당 코스트

C_e : 설비 다운타임당 손해액

7.2 가동성 (Availability)

7.2.1 가동성의 의의 2021 등 총6회

* 신뢰도함수 $R(t)$가 평균고장률이 λ(평균수명 θ의 역수)인 지수분포에 따르고, 보전도함수 $M(t)$가 평균수리율 μ인 지수분포에 따른다고 하면 신뢰도함수 $R(t)$와 식 (9.159)에 의거 보전도함수 $M(t)$는 다음과 같음.

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t}$$

* 윗 식에서 신뢰도란 시스템이 t시간 이후 생존할 확률을 의미하고, 보전도는 고장난 시스템이 t시간 이내에 회복될 확률을 의미함.

* 한편, 시스템의 가동성 $A(t)$는 다음과 같이 되는 것으로 증명되어져 있음.

$$A(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} + \frac{\lambda}{\mu + \lambda} e^{-(\mu + \lambda)t} \qquad (9.170)$$

* 상기 식에서 t를 ∞로 수렴시키면

$$A = \lim_{t \to \infty} A(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} \qquad (9.171)$$

* 윗 식의 우변의 분모와 분자를 각각 $\lambda\mu$로 나누면 다음과 같이 됨.

$$A = \frac{1/\lambda}{1/\lambda + 1/\mu} \qquad (9.172)$$

* 지수분포인 경우 MTBF=1/λ, MTTR=1/μ이므로 이를 이용해 다시 쓰면 다음 식에 의해 가동성(A)이 구해짐.

$$A = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} \qquad (9.173)$$

7.2.2 시간이용도(A_t) 및 장치이용도(A_E) 2019 등 총4회

* 식 (9.173)을 시간의 이용도(A_t)라고도 하는데, 신뢰도와 보전도가 다 같이 지수분포에 따를 때 보전계수 ρ를 써서 나타내면 다음과 같음.

$$A_t = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF}+\text{MTTR}} = \frac{1/\lambda}{1/\lambda + 1/\mu} = \frac{\mu}{\mu+\lambda} = \frac{1}{1+\rho} \tag{9.174}$$

여기서, 보전계수 $\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{1/\mu}{1/\lambda} = \frac{\text{MTTR}}{\text{MTBF}}$, 즉 $\rho = \frac{\text{MTTR}}{\text{MTBF}}$

* 한편 시스템을 구성하는 모든 유니트가 사명시간 T안에서 고장이 나지 않든가 고장이 나도 각각 t시간 내에 수리되는 확률을 사명 availability $[A_M(T;t)]$라 하며 식 (9.175)와 같이 나타냄.

$$A_M(T;t) = e^{-\lambda T} \cdot e^{-\mu t} \tag{9.175}$$

* 또한 장치(equipment)의 이용도는 $A_E(T;t)$의 기호를 쓰며, 다음 식으로 되는 것이 증명되어져 있음(이순요 저, 설비관리론)

$R(T) = e^{-\lambda T}$, $M(t) = 1 - e^{-\mu t}$이면(지수분포로 주어진다면)

$$A_E(T;t) = e^{-\lambda T} + (1-e^{-\lambda T})(1-e^{-\mu t})$$
$$= 1-(1-e^{-\lambda T})e^{-\mu t} \tag{9.176}$$

여기서, λ는 고장률(/시간), μ는 수리율(/시간), t는 수리제한시간(시간), T는 전동작시간(시간)을 의미.

* 장치가 무보전으로 된다면 t=0이므로 식 (9.177)가 얻어짐.

$$A_E(T;0) = e^{-\lambda T} = R(T) \tag{9.177}$$

예제 9.38 고장률 λ=0.063(/시간), 수리율 μ=0.4(/시간)일 때 시간의 이용도를 구하라.

해설

☞ $A_t = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF}+\text{MTTR}} = \frac{1/\lambda}{1/\lambda+1/\mu} = \frac{\mu}{\mu+\lambda} = \frac{0.4}{0.4+0.063} = 0.864$ (86.4%)

예제 9.39 현장실험 결과 아래 표와 같은 데이터를 얻었음. 평균수리시간, 평균수리율, 그리고 5시간에 대한 보전도를 산출하라.

횟수	5	2	4	3	4
수리시간	3	6	4	2	5

해설

☞ ① $\text{MTTR} = \frac{\sum t_i}{n} = \frac{\sum (t_i r_i)}{\sum r_i} = \frac{3\times5+6\times2+\cdots+5\times4}{5+2+\cdots+4} = \frac{69}{18} = 3.83$ 시간

② $\text{MTTR} = \dfrac{1}{\mu} = 3.83$ 으로부터 μ=0.26(/시간)

③ $M(t=5) = 1 - e^{-\mu t} = 1 - e^{-0.26 \times 5} = 0.73$

8. 고장해석기법으로서의 FMEA·FTA 2014 등 총2회

8.1 고장해석

* 고장해석(failure analysis)은 설비의 신뢰성을 높이기 위한 기본적인 업무가 되며, 대상의 신뢰성에 대해서 개발·설계로부터 시작하는 일련의 라이프사이클에 대한 활동이 됨.

* 고장해석은 PDCA 측면에서 보면 C에 대응함. 개발·설계, 시작(試作), 제조, 사용 등의 단계에서 발생하는 이상 및 고장은 그 원인을 조사해서 필요한 대책을 취하고 대상의 신뢰성을 향상시킬 필요가 있음.

* 고장해석이 없는 신뢰성개선 및 관리활동은 생각할 수가 없다고 볼 수 있음.

* 설비 및 제품의 고장해석을 위한 고장해석법의 방법 및 특징은 일반적으로 <표 9.7>과 같이 정리할 수 있음.

* 고장문제의 해석을 위한 원인분석단계에서 자주 쓰이는 기법으로서는 FMEA, 신뢰성블록도 및 FTA, 신뢰성분석 및 가동성계산, PM분석 등이 있음.

<표 9.7> 각종 고장해석법의 특징

방법	특징	적용		
		사전	도중	사후
신뢰성블록도, FTA(고장나무분석)	* 부분과 전체의 기능적 연관의 이해 * Top사상에서 하위사상으로 고장원인 분석	●	○	○
FMEA, FMECA	* 부분의 고장에서 전체고장으로(귀납적)	●	○	○
신뢰성[신뢰도, 고장률, MTBF]분석, 가동성(A)	* 시스템·장치의 신뢰성 설계 및 예측	●	○	○
기술계산, 스트레스해석, 시뮬레이션, 환경·내구시험	* CAD/CAM, 유한요소법 등 * 각종 수학모델, 지식공학적 진단 * 스크리닝에의 응용	●	○ 한계 여유도 체크	● 재현 실험
통계적·확률론적 해석	* 통계분포, 실험계획법, 다변량해석	●	○	●
설계심사(DR)	* 각 방법의 결과 리뷰시 철저평가 및 개선	●		
상태감시, 비파괴검사, 고유기술적 해석, 고장물리	* 고장메카니즘의 특징, 파라메타 계측 * 비파괴시험으로 해석 * 기계, 전기 등의 고유기술에 의한 해석 * 전자현미경 등 각종 표면해석법, 계측방법	○ 테스트 데이터 해석	● 예지 파라 메타 감시	● 고장, 파괴 원인 추구
데이터뱅크, 과거사례 활용	* 기술데이터, 사례집, 고장에 관한 데이터, 체크리스트, 고장표	●	○	●
PM분석	* 미결함이나 만성로스에 대한 원인분석 수법(연역적)	○	●	○

8.2 FMEA(Failure Mode & Effect Analysis) 2015 등 총7회

8.2.1 FMEA의 발전과 의의 2006 등 총3회

* FMEA(Failure Mode & Effect Analysis ; 고장영향 및 유형분석)는 1950년대 초 미국 구라망항공社가 개발한 것이 시초로서, Bottom-up에 의한 분석을 하는 것이 특징이 되며, FMEA 양식은 MIL-STD-1629-101에 따라 실시됨. FMEA는 "(기능, 품질)실패유형 및 영향분석"으로 불리고 있음.
* FMEA의 목적은 설계의 약점을 미리 발견하여 대책을 마련하고, 나아가 개발비의 절감과 개발기간의 단축 등을 실현하는데 있음.
* FMEA의 종류로는 ① 개념 FMEA, ② 설계 FMEA, ③ 공정 FMEA 등이 있음.
* FMEA의 효과는 시스템의 신뢰성 향상, 고장감소, 불량감소, 비용절감 등에 기여함.

8.2.2 FMEA 실시절차 2020 2회차

* FMEA 실시절차는 다음과 같음.
  ▶(순서 1) 시스템·서브시스템의 구성과 임무의 확인
  ▶(순서 2) 시스템·서브시스템의 분석레벨 결정
  ▶(순서 3) 기능별 블록의 결정
  ▶(순서 4) 신뢰성블록도 작성
  ▶(순서 5) 블록별 고장모드의 열거 및 검토
  ▶(순서 6) FMEA에 효과적인 고장모드의 선정
  ▶(순서 7) 선정된 고장모드에 대한 추정원인 열거
  ▶(순서 8) FMEA 용지에 요약 기입
  ▶(순서 9) 고장등급 평가 및 결과 정리(C_S, 등급)
  ▶(순서 10) 고장등급이 높은 것에 대한 대책 및 개선제안 (설계변경, 고신뢰성 부품 채용, 신뢰성관리절차의 변경, 시험 및 검사절차의 변경 등)
* (순서 1)에서 시스템 구성은 "시스템→서브시스템→컴포넌트→조립품→부품"의 5단계로 됨.
* (순서 8)에서의 FMEA표는 ① 번호, ② 대상품목, ③ 기능, ④ 고장모드, ⑤ 추정원인, ⑥ 영향(서브시스템, 시스템), ⑦ 고장검지법, ⑧ 고장등급평가(C_S, 등급), ⑨ 대책 등으로 구성되며, FMEA표 실시사례는 <표 9.11>에 제시하였음.

8.2.3 고장등급 결정방법

* 고장등급 결정방법에는 ① 고장평점법, ② 치명도평점법의 2가지가 있음.

(1) 고장평점법

* 고장평점법의 평가항목으로는 5개의 평가항목인 $C_1 \sim C_5$가 있고, 이들의 평가항목에 의거 시스템의 평가등급 C_S는 다음 식으로 구해지며, C_1, C_2, C_3의 평가점은 <표 9.8>이 됨.

$$C_S = \sqrt[5]{C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5} \quad (9.178)$$

<표 9.8> C_1, C_2, C_3 의 평가점

C_1 의 평가점		C_2 의 평가점		C_3 의 평가점	
고장영향의 크기 (기능적 고장영향의 중요도)	평가점	시스템에 영향을 미치는 범위	평가점	고장발생의 빈도 (시간 또는 횟수)	평가점
임무달성불능	10	실외 및 공장 외에서의 사망사고	10	10^{-2} 이상	10
임무달성불능, 대체방법에 의해 일부만의 임무달성가능	9	실외 및 공장내에서의 사망사고, 가옥 및 공장외에 피해	9	10^{-2} ~ 3×10^{-3}	9
임무의 중요한 부분 달성불능	8	실외 및 공장내에서의 사망사고, 가옥 및 공장내에 피해	8	3×10^{-3} ~ 10^{-3}	8
임무의 중요 부분 달성불능, 보조수단을 쓰면 달성가능	7	중상, 가옥 및 공장내에 피해	7	10^{-3} ~ 3×10^{-4}	7
임무의 일부 달성불능	6	중경, 가옥 및 공장내에 피해	6	3×10^{-4} ~ 10^{-4}	6
임무의 일부 달성불능, 보조수단을 쓰면 달성가능	5	인재(人災)없음, 가옥 및 공장내에 피해	5	10^{-4} ~ 3×10^{-5}	5
임무의 경미한 부분 달성불능	4	인접한 설비 및 장치에 피해	4	3×10^{-5} ~ 10^{-5}	4
임무의 경미한 부분 달성불능, 보조수단을 쓰면 달성가능	3	접속된 장치의 일부에 피해	3	10^{-5} ~ 10^{-6}	3
외관기능을 저하시키는 경미한 고장	2	외벽의 진동, 고온, 외관변색	2	10^{-6} ~ 10^{-7}	2
임무에 전혀 영향이 없음	1	전혀 피해없음	1	10^{-7} 이하	1

* 이상과 같은 방법에 의거 시스템의 고장평점 C_S 를 계산한 다음에 <표 9.9>에 의거 고장평점에 대응한 고장등급을 결정함.
  여기서, C_4 는 고장방지 가능성, C_5 는 신규설계의 정도를 나타냄.

<표 9.9> C_S 에 따른 고장등급

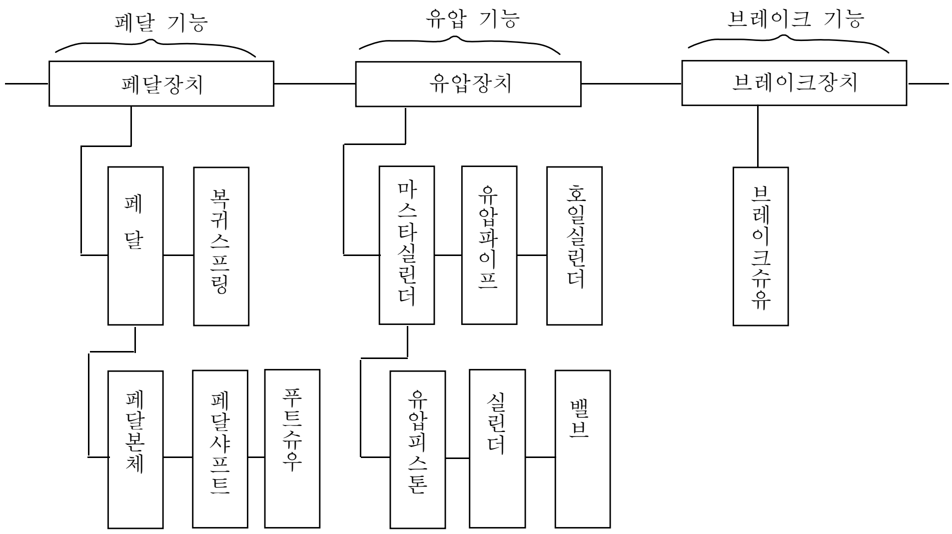
C_S	고장등급
7점이상~10점	Ⅰ
4점이상~7점미만	Ⅱ
2점이상~4점미만	Ⅲ
2점미만	Ⅳ

* 한편, 이상과 같이 고장평점을 계산하지 않고 간단히 임무달성에 중점을 두어 <표 9.10>와 같이 고장등급을 결정하는 경우, 즉 "간단평가방법"이 있는데, 고장등급으로서는 Ⅰ~Ⅳ등급이 있으며, Ⅰ은 치명고장, Ⅱ는 중고장, Ⅲ은 경고장, Ⅳ는 미소고장으로 됨.

<표 9.10> 임무달성에 중점을 둔 고장등급

고장등급	고장구분	판단기준	대책내용
Ⅰ	치명고장	임무수행불능, 인명손실	설계변경이 필요
Ⅱ	중대고장	임무의 중대부분 달성불가	설계의 재검토가 필요
Ⅲ	경미고장	임무의 일부 달성불가	설계변경은 불필요
Ⅳ	미소고장	영향이 전혀 없음	설계변경은 전혀 불필요

* FMEA의 이해를 돕기 위해 브레이크시스템을 대상으로 상세히 시스템을 분해하여 시스템에 잠재해 있는 불합리 및 트러블을 적출하는 것을 FMEA 실시사례에 의거하여 예를 들어 설명해 보기로 함.



[그림 9.16] 기능별 신뢰성블록도

<표 9.11> 브레이크 시스템의 FMEA (일부)

F M E A

시스템 : ○○수송시스템
서브시스템 : 브레이크시스템

날짜: 2007년 02월16일
작성자: 반영식
승인자: 권오운

번호	대상품목	기능	고장모드	추정원인	영향		고장검지법	고장평점		고장등급	대책
					서브시스템	시스템		기능 C_1	빈도 C_3		
1	페달	유압장치 (마스타 실린더) 작동시킴	페달을 밟아 누를 수 없음	1. 페달 그랭크 절손 2. 페달 아래에 이물질 축적 3, 마스터 실린더 로드 절손	제동 불능	정지 불능		10	1 2 5	Ⅲ Ⅱ Ⅰ	로드재 변경
			페달복귀 불능	스프링 절손	제동해제 불가	브레이크 기능정지		8	5	Ⅱ	
2	유압 파이프	유압전달	파이프연 결부파손	1. 과대응력 2. 용접불량 3. 부식	제동력 감소	정지 지연	오일 누설	7	2 3 2	Ⅲ Ⅱ Ⅲ	
			파이프의 크랙발생	1. 피로 2. 과대응력	제동력의 점차감소	정지 불충분	오일 스밈	4	1 2	Ⅳ Ⅲ	
3	브레 이크 슈우	차륜의 제동	슈우의 미끄러짐	1. 표면재 불량 2. 표면재 피로	제동 불량	정지거리 가 크게 됨		3	7 7	Ⅱ Ⅱ	
			슈우의 소음	1. 재질불량 조립불량	소음 발생	불쾌감		1	7 5	Ⅲ Ⅲ	

* 우선 브레이크 시스템은 크게 나눠 페달, 유압장치, 브레이크의 3가지 부분으로 되어 있음. 페달을 밟음에 따라 유압장치가 작동하고, 이어서 브레이크가 걸려 시스템이 정지함. 이것을 신뢰성블록도로 나타낸 것이 [그림 9.16]이 됨.

다시 FMEA 실시절차에서 기술한 순서에 따라 <표 9.11>에 FMEA표를 작성하였음.

* 제시된 사례의 FMEA의 실시는 다음의 순서로 진행되었음.
  ▷(순서 1) 시스템·서브시스템의 구성 및 임무 확인
  ▷(순서 2) 시스템·서브시스템의 분석레벨 결정 → 여기서는 컴포넌트 레벨로 함.
  ▷(순서 3) 기능별 블록 결정 → 다음 3가지의 기능별 블록도로 나눔. 브레이크 페달의 기능, 유압장치 기능, 브레이크 기능으로 3구분함.
  ▷(순서 4) 신뢰성블록도 작성 → [그림 9.16]에 도시하는 바와 같이 기능별 신뢰성 블록도를 상세하게 나타냄.
  ▷(순서 5) 블록별 고장모드 열거 → 다수의 고장모드 중 여기서는 일부만 나타냈음.
  ▷(순서 6) FMEA에 효과적인 고장모드로서 중요 항목을 선별후 <표 9.11>에 기입함.
  ▷(순서 7) 선정된 고장모드에 대한 추정원인 열거 → 고장모드에는 다수의 추정원인이 있을 수 있음. 이 중에서 주요한 추정원인을 FMEA의 추정원인 란에 기입함.
  ▷(순서 8) FMEA 용지에 요약 기입 → <표 9.11>은 FMEA표의 일부로서, 페달(페달장치), 유압파이프(유압장치) 및 브레이크 슈우(브레이크장치)만 나타냈음.
  ▷(순서 9) 고장등급 평가 및 결과 정리(C_S, 등급) → FMEA표의 해당 난에 기입함.
  ▷(순서 10) 고장등급이 높은 것의 대책 및 개선 제안 → FMEA표의 해당 난에 기입함.

* 이 (순서 1)~(순서 10)에 따라 작성된 FMEA표 사례는 <표 9.11>이며, 이 표에서 고장평점은 C_1, C_3 평가점에 의한 $C_S = \sqrt{C_1 \times C_3}$ 를 이용함.

참조 RPN(위험우선수) = 심각도×발생도×검출도 2009 등 총5회

☞ RPN은 ① 심각도(S ; Severity, 영향도라고도 함)는 고장영향, ② 발생도(O ; Occurrence, 발생빈도라고도 함)는 고장 원인·메카니즘, ③ 검출도(D ; Detection)는 현재의 설계관리(고장검출법)에 관하여 각각 평가하는 것임.

☞ 심각도, 발생도, 검출도를 각각 1~10점으로 점수를 부여하고, 이를 곱한 수를 RPN(위험우선수)이라 함. RPN 수치가 높으면 개선의 우선순위가 높음.
특히 RPN이 100을 넘는 경우는 개선을 우선적으로 실시하여 100이내로 떨어지도록 함.

☞ 실무에 쉽게 적용하기 위해 원래의 FMEA를 응용하여 RPN에 의한 개선방향을 추구하는 방법도 있음.

(2) 치명도 평점법

* <표 9.12>와 같이 "고장영향의 크기"에 따라 평점을 구하고, 다음 식 (9.179)에 의해 치명도 평점(C_E)를 계산한 후에 이 점수에 대응하여 고장등급을 결정하는 방법임.

$$C_E = F_1 \times F_2 \times F_3 \times F_4 \times F_5 \quad (9.179)$$

<표 9.12> 고장영향의 크기에 따른 평점

항목	내용	계수
F_1 (고장영향의 크기)	치명적인 손실을 주는 고장	5.0
	약간의 손실을 주는 고장	3.0
	기능이 상실되는 고장	1.0
	기능이 상실되지 않는 고장	0.5
F_2 (시스템에 미치는 영향의 정도·범위)	시스템에 2가지 이상의 중대한 영향을 줌	2.0
	시스템에 한 가지 이상의 중대한 영향을 줌	1.0
	시스템에 미치는 영향은 그리 크지 않음	0.5
F_3 (발생빈도)	발생빈도가 높음	1.5
	발생가능성이 있음	1.0
	발생가능성이 적음	0.7
F_4 (방지의 가능성)	불능	1.3
	방지가능	1.0
	간단히 방지됨	0.7
F_5 (신규설계 여부)	약간 변경된 설계	1.2
	유사한 설계	1.0
	동일한 설계	0.8

* 치명도평점 C_E에 대응하는 고장등급은 <표 9.13>에 의해 결정됨.

<표 9.13> 치명도평점 C_E에 대응하는 고장등급

고장등급	치명도평점 C_E
Ⅰ	3이상
Ⅱ	1.0초과~3미만
Ⅲ	1.0
Ⅳ	1.0미만

8.2.4 치명도해석법 (FMECA)

* 치명도해석(criticality analysis)이란 FMEA를 실시한 결과 고장등급이 높은 고장모드가 시스템이나 기기의 고장에 어느 정도로 기여하는가를 정량적으로 계산하고, 고장모드가 시스템이나 기기에 미치는 영향을 정량적으로 평가하는 방법임.
* 치명도해석법은 MIL-STD-1629-102 규격으로 제정되어 있음. 그리고 FMEA에다 치명도해석을 포함시킨 것을 FMECA(Failure Mode, Effect and Criticality Analysis)라고 함.
* 고장등급이 Ⅰ 또는 Ⅱ인 고장모드의 일람표를 작성하고, 이들 각각의 고장모드별의 치명도지수를 다음 식 (9.180)에 의거 계산함.

치명도지수 $C_r = \sum_{i=1}^{n} (\alpha \cdot \beta \cdot \kappa_A \cdot \kappa_E \cdot \lambda_G \cdot t)_i$ (9.180)

여기서, C_r : 치명도지수, i : 구성품의 치명적 고장모드의 번호($i = 1, 2, \cdots, n$)

κ_A : 운용시의 고장률 보정계수, κ_E : 운용시의 환경조건의 수정계수

λ_G : 기준고장률(시간 또는 사이클당)

t : 임무당 동작시간(또는 횟수), 운용시간(또는 횟수)

α : λ_G 중에 당해 고장이 차지하는 비율(고장모드 차지비율)

β : 당해 고장이 발생하는 경우 치명적 영향이 발생할 확률(영향확률)

( )내 : 기여율을 나타냄

* 윗 식을 보아도 알 수 있는 바와 같이 치명도해석을 실시하기 위해서는 정량적 데이터가 필요하기 때문에 이 방법을 활용하기 위해서는 고장데이터를 수집하여 고장률을 명확히 알고 있지 않으면 안됨.
  따라서 신규로 설계된 설비나 제품의 평가에는 데이터가 빈약한 문제로 인해 FMEA만 사용하고, FMECA는 잘 사용하지 않음.

8.3 FTA (Fault Tree Analysis) 2011 등 총4회

8.3.1 FTA(고장나무분석)의 발전과 의의 2018 2회차

* FTA(Fault Tree Analysis ; 고장나무분석)는 고장수(故障樹)분석 또는 결함수(缺陷樹)분석이라고도 하며, FMEA나 FMECA와 마찬가지로 시스템의 고장해석 방법이며, FMEA나 FMECA와는 달리 고장나무분석 FTA는 하향식(top-down)으로 분석하는 방법임.

* 정상사상으로부터 시스템의 고장을 야기하는 기본사상까지 원인과 인과관계를 논리게이트로 표현한 그림으로 나타낸 고장나무(결함수)을 작성하고, 이에 의하여 시스템의 고장확률을 구함으로써 문제가 되는 부분을 찾아내어 시스템의 신뢰성을 평가·개선하는 계량적 고장해석 및 신뢰성평가 방법임.

* FTA는 1962년 Bell전화연구소의 W. A. Watson에 의해 미니트맨 미사일의 발사제어 시스템 연구에 관한 공군계약에서 처음 고안된 후, 1965년 Kolodner의 안전성 정량화에 대한 논문에서 FTA와 신뢰성블록도(block diagram) 등을 소개했고, 1965년 보잉항공회사의 D. F. Hassl에 의해 보완됨으로 실용화가 되었으며, ICBM 계획에 처음으로 사용된 기법임.

8.3.2 FTA 실시절차

* FTA를 실시하는 경우에 고장의 해석 목적이나 정도 등에 차이가 있지만, FTA의 실시절차는 통상 다음과 같은 순서로 됨.

▶(순서 1) 평가대상 설정 및 기능의 명확화 (기능블록 다이어그램 작성)

▶(순서 2) 불량 사실·현상에 대한 정의의 명확화

▶(순서 3) 톱 event(최상위 고장)의 상정

▶(순서 4) 하위레벨의 논리기호에 의한 결합으로 고장나무 작성

▶(순서 5) 기본사상인 최하위의 고장원인까지 고장나무 완성

▶(순서 6) 정량적 평가를 위한 고장확률을 구함

(최하위인 기본사상에서부터 고위인 톱 event까지 고장확률을 계산)

① 먼저 최하위의 고장원인인 기본사상에 대한 고장확률을 추정함.

② 기본사상에 중복이 있는 경우에는 “불(Boole) 대수 공식”에 의거 고장나무를 간소화함. 그렇지 않으면 ③항으로 감.

③ 서브시스템 및 시스템의 고장확률을 계산하고 문제점을 찾음.

▶순서 7 : 문제점의 개선 및 신뢰성 향상책 강구

8.3.3 고장나무(Fault Tree)의 작성

* FT는 각종 사상(event)과 그것을 연결하는 논리게이트로써 구성됨.

① 해석하려는 시스템의 최상위고장(top event), 즉 頂上사상(목표사상)을 규정함.

② 정상사상의 고장상태를 일으킬 수 있는 직접원인, 즉 기계, 설비의 불량상태나 작업자의 에러 등(결함사상)을 규명하고 나열하여 정상사상과의 사이를 논리게이트를 사용하여 나무가지 모양으로 결합시킴.

③ 위 ②의 각 결합사상의 직접원인이 되는 결함사상을 각각 확정한 후, ②와의 사이를 논리게이트로 연결함.

④ ③을 최하위의 고장원인이 될 때 까지 순차적으로 반복함.

* FT의 최하위사상은 통상 다음 중의 하나임.

① 통상 행해지는 작업이나 기계설비의 通常상태 (통상사상)

② 기본적으로 볼 수 있는 기계 등의 고장이나 인간의 에러 (기본사상)

③ 그것 이하는 정보부족으로 분석할 수 없거나 또는 분석을 생략해도 좋은 결함사상 (생략사상)

④ 그것 이하는 이 고장나무(FT)의 다른 부분과 동일해지는 경우로서, 이것은 다른 부분으로부터의 전이(轉移)로서 취급함.

8.3.4 고장나무(결함수)의 논리게이트

* 기본적으로 결함사상은 AND게이트와 OR게이트를 사용하여 표시하나, 여러 종류의 논리게이트 또는 수정기호(modifier)를 사용함으로써 시스템을 더 정확히 또는 간결하게 표현할 수 있음(그림 9.17 참조).

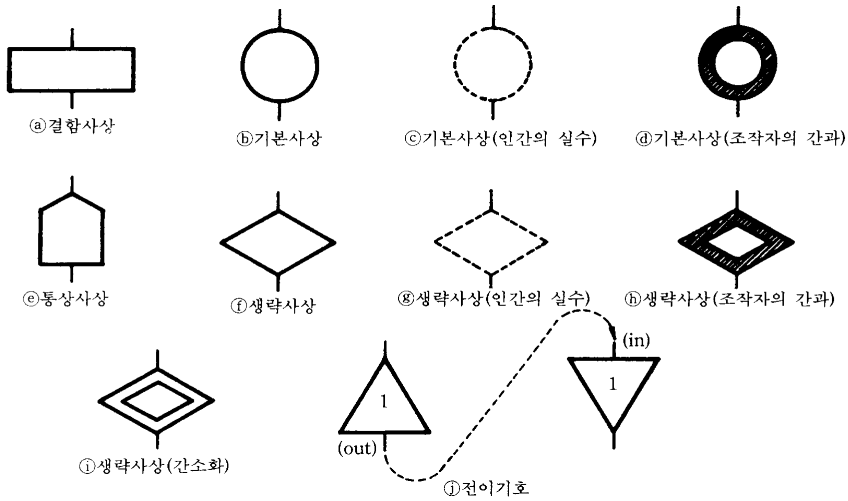
* 단, 너무 복잡한 논리게이트를 사용하는 것은 고장나무분석의 특징인 시각에 의한 이해나 연산의 용이성을 손상시킬 우려가 있으므로 주의하여야 함.

(1) 사상기호

① 직사각형 기호 → 정상사상을 시작으로 하는 결함사상을 나타내는 기호이다(그림 ⓐ)

② 원형기호 → 기본사상을 나타내는 기호(그림 ⓑ). 때로는 점선의 원으로 인간동작의 생략 또는 오류를 표시하고(그림 ⓒ), 사선부분이 포함된 이중원으로 조작자에 의해 결함의 누락이나 시정누락을 표시함(그림 ⓓ).

③ 집형기호 → 결함사상은 아니고 시스템 내의 상태로서 일어나는 통상사상을 나타내는 기호가 됨(그림 ⓔ).



[그림 9.17] 사상기호

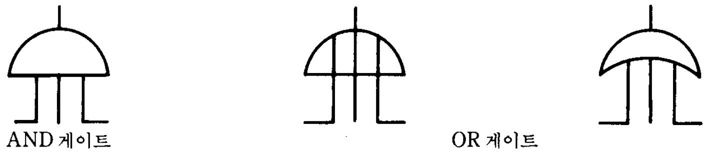
④ 마름모형기호 → 그것 이상은 분석할 수 없거나 또는 분석의 필요가 없는 생략사상을 나타내는 기호(그림 ⓕ).

* 때로는 점선의 마름모형 그리고 사선이 포함된 이중마름모형을 사용해서 인간의 에러와 조작자에 의한 결함이나 시정누락을 표시함(그림 ⓖ, ⓗ).
* 또 사선 없는 이중마름모형은 그것보다 앞의 관계가 명확하고 수량적 평가에 의해 고장나무을 간소화할 수 있는 경우에 사용함(그림 ⓘ).

⑤ 삼각형기호 → 동일한 FT안에 있고 내용이 같은 다른 부분과의 사이에 전이를 표시하는 기호로서, 삼각형 위쪽에 선이 나와 있는 경우는 다른 부분에서의 전입을, 또 아래쪽이나 측방에 선이 나와 있는 경우는 다른 부분으로의 전출을 표시하고 동일한 번호가 붙여짐(그림 ⓙ).

(2) 논리게이트

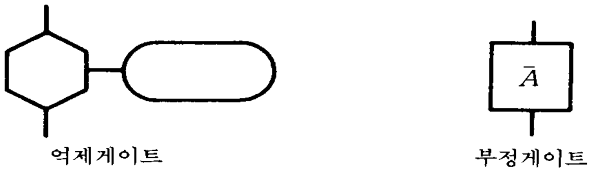
① AND게이트와 OR게이트



[그림 9.18] AND게이트와 OR게이트

② 억제게이트(inhibit gate) → 논리적으로는 수정기호(modifier)의 일종으로서 억제모디파이어(inhibit modifier)라고도 하지만 실질적으로는 수정기호를 병용해서 게이트의 역할을 함. 입력사상이 수정기호 안의 조건을 만족하면 출력사상이 생기고 만약 조건이 만족되지 않으면 출력은 생기지 않음.

③ 부정게이트(not gate) → 수정기호의 일종으로서 부정모디파이어(not modifier)라고도 하며 입력사상의 반대사상이 출력됨.



[그림 9.19] 억제게이트와 부정게이트

(3) 조건 게이트

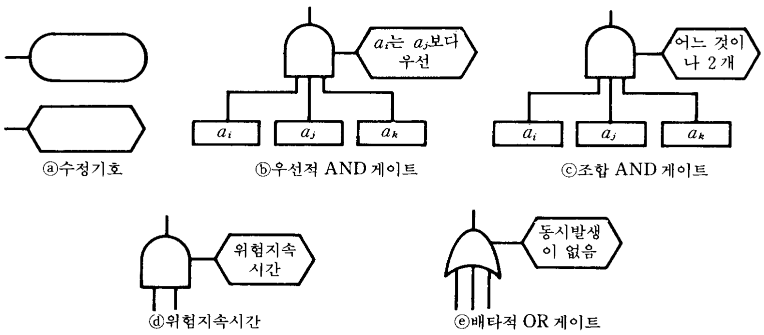
* AND게이트 또는 OR게이트 수정기호를 병용함으로써 각종 조건부 게이트를 구성함.

① 우선적 AND게이트 → 입력사상 중 어떤 사상이 다른 사상보다 앞에 일어났을 때 출력사상이 생김.

② 조합 AND게이트 → 3개 이상 입력사상 중 어느 것이나 2개가 일어나면 출력이 생김.

③ 위험지속기호 → 입력사상이 생겨 어떤 일정한 시간 동안 지속하였을 때 출력이 생김. 만약 지속되지 않으면 출력은 생기지 않음.

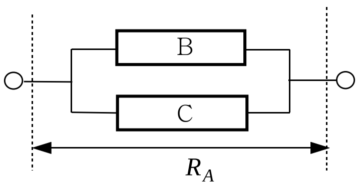
④ 배타적 OR게이트 → 2개 이상의 입력이 존재하는 경우에는 출력이 생기지 않음.

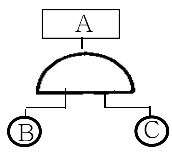


[그림 9.20] 수정기호와 조건 게이트

8.3.5 고장확률 계산방법

(1) AND Gate의 경우





[그림 9.21] 병렬계 신뢰성 블록도 [그림 9.22] AND게이트에 의한 FT도

① $F_A = F(B\ AND\ C) = F(B \cap C)$

여기서, B와 C가 서로 독립이면

$$F_A = F_B \cdot F_C \qquad (9.181)$$

② 혹은 ①과 달리 계산하는 방법으로

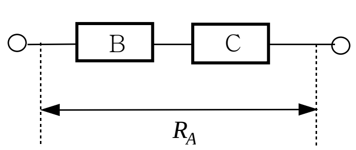
$$F_A = 1 - R_A = 1 - \left[1 - (1 - R_B)(1 - R_C)\right]$$

$$= (1 - R_B)(1 - R_C) = F_B \cdot F_C$$

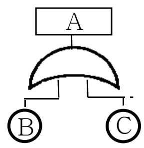
③ 한편, n 개의 기본사상의 AND 결합시에는 다음과 같이 됨.

$$F_S = F_1 \cdot F_2 \cdots F_n = \prod_{i=1}^{n} F_i \qquad (9.182)$$

(2) OR Gate의 경우



(직렬계)



(OR gate)

[그림 9.23] 직렬계 신뢰성 블록도 [그림 9.24] OR 게이트에 의한 FT도

① $F_A = F\ (B\ OR\ C) = F(B \cup C)$

(B와 C가 독립사상이면) $F_A = F_B + F_C - F_B \cdot F_C$ (9.183)

② 위 ①과 다른 방법으로 계산하면

$$F_A = 1 - R_A = 1 - R_B \cdot R_C$$

$$= 1 - (1 - F_B)(1 - F_C) \qquad (9.184)$$

$$= F_B + F_C - F_B \cdot F_C$$

③ 한편, n 개의 기본사상의 OR 결합시에는

$$F_S = 1 - (1 - F_1)(1 - F_2)\cdots(1 - F_n)$$

$$= 1 - \prod_{i=1}^{n}(1 - F_i) \qquad (9.185)$$

(3) 사상의 고장확률을 구하는 방법 1998

* 톱사상 A의 고장확률 F_A를 구하기 위해서는 먼저 하위사상인 B, C의 고장확률 F_B, F_C를 구하는 것이 중요한 데, 그 중 하나의 예로서 F_B 의 고장확률 산출 방법은 다음과 같음.

$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-t/\mathrm{MTBF}} \fallingdotseq 1 - \frac{t}{\mathrm{MTBF}} \quad (\text{단, } t\ :\ \text{사용시간}) \qquad (9.186)$$

이므로, 사상 B가 고장날 확률 F_B 는

$$F_B = 1 - R_B = 1 - (1 - \frac{t}{MTBF}) = \frac{t}{MTBF} \quad (<1) \qquad (9.187)$$

여기서, t 는 사용(가동)시간, R_B 는 B의 신뢰도이고,

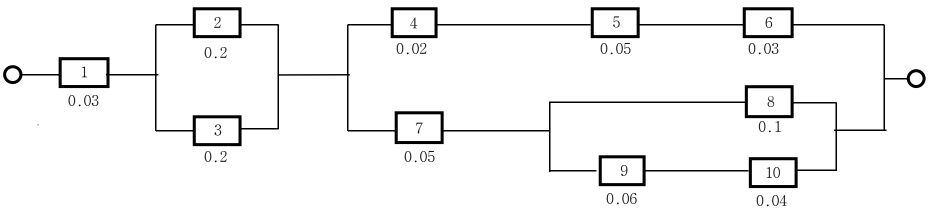
MTBF는 평균고장간격시간(평균수명)으로서 다음과 같음.

$$\text{MTBF} = \frac{1}{\lambda} = \frac{\text{총 동작시간 } (T)}{\text{그 기간 중의 고장개수 } (r)} \qquad (9.188)$$

(4) MTBF와 시스템이 고장날 확률(F_S)와의 상관관계

* MTBF와 F_S 의 관계는 MTBF(↑) → $R(t)$(↑) → $F(t)$(↓) → F_S(↓)의 관계로 됨.

예제 9.40 신뢰성 블록도가 [그림 1]과 같고 사상의 고장날 확률이 주어졌을 때, 시스템의 고장확률을 계산하고, FT도에 고장확률을 나타내어라.



[그림 1] 신뢰성 블록도

해설 2017

☞ 시스템의 고장확률은 하위사상에서부터 상위사상으로 순차적으로 계산함.

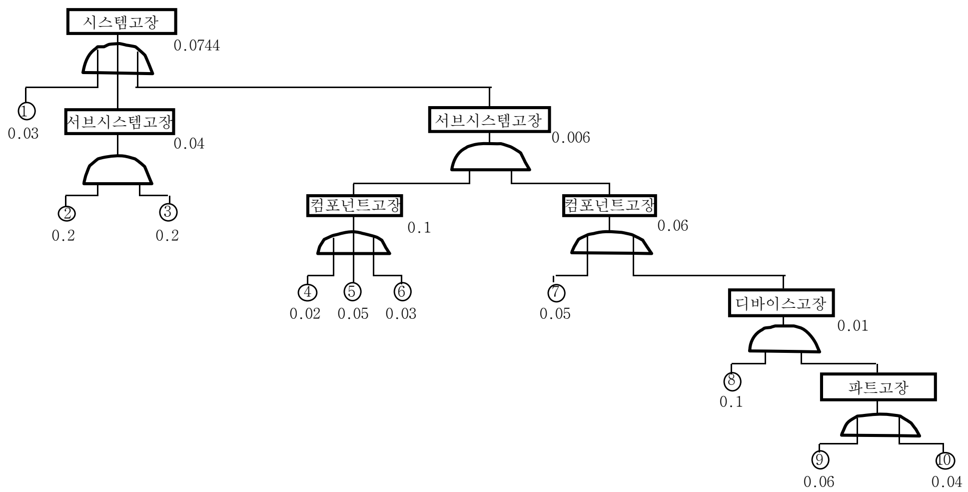
(1) 파트 고장확률 (⑨, ⑩) : $F_{S1} = 1 - (1 - F_9)(1 - F_{10}) = 1 - (1 - 0.06)(1 - 0.04) = 0.098$

(2) 디바이스 고장확률 (⑧, ⑨, ⑩) : $F_{S2} = F_8 \cdot F_{S1} = 0.1 \times 0.098 = 0.01$

(3) 우측의 서브시스템 고장확률 :

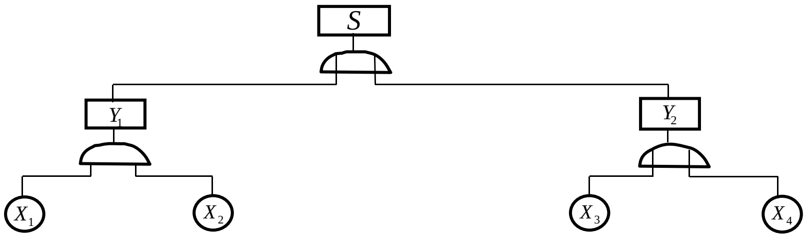
$$F_{S3} = \{1 - (1-0.02)(1-0.05)(1-0.03)\} \times \{1 - (1-0.05)(1-0.01)\} = 0.1 \times 0.06 = 0.006$$

(4) 시스템 고장확률 : $F_S = 1 - (1-0.03)(1-0.2 \times 0.2)(1-0.006) = 0.0744$



[그림 2] FT도

예제 9.41 $X_1 \sim X_4$가 고장날 확률은 각각 0.1, 0.2, 0.4, 0.5라 할 때 시스템의 신뢰도는 얼마인가?



해설

☞ 시스템의 신뢰도 $R_S = 1 - F_S = 1 - 0.706 = 0.294$

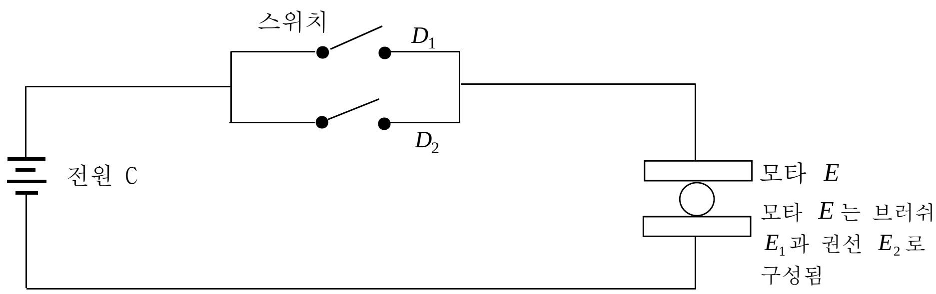
여기서, $F_S = F_{Y_1} + F_{Y_2} - F_{Y_1} \cdot F_{Y_2} = 0.02 + 0.7 - 0.02 \times 0.7 = 0.706$

단, $F_{Y_1} = F_{X_1} \cdot F_{X_2} = 0.1 \times 0.2 = 0.02$

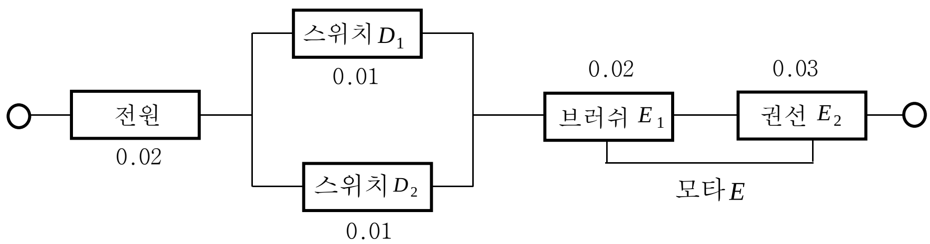
$F_{Y_2} = F_{X_3} + F_{X_4} - F_{X_3} \cdot F_{X_4} = 0.4 + 0.5 + 0.4 \times 0.5 = 0.7$

여기서, $F_{X_1} = 0.1$, $F_{X_2} = 0.2$, $F_{X_3} = 0.4$, $F_{X_4} = 0.5$

예제 9.42 첫 번째 [그림 1]과 같은 회로도와 두 번째 [그림 2]와 같은 신뢰성블록도로 표현되는 시스템에 대하여 “모타가 시동안됨”을 정상사상으로 한 FTA를 실시해 보아라(숫자는 각 요소의 고장확률이다).



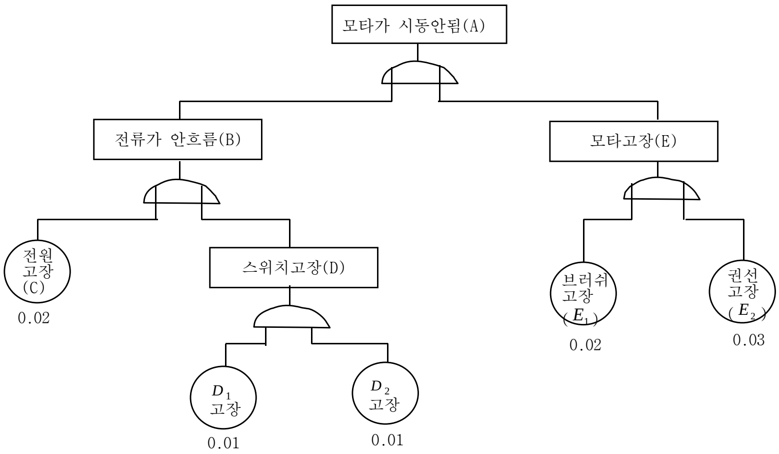
[그림 1] 회로도



[그림 2] 신뢰성블록도

해설 2021 1회차

☞ [그림 2] 신뢰성블록도에 의거 FT도(고장나무)를 작성하면 [그림 3]과 같음.



[그림 3] FT도

그리고 “모타가 시동안됨” 의 정상(頂上)사상의 고장발생확률을 구하면 다음과 같음.

$$F_A = 1-(1-F_B)(1-F_E) = 1-(1-0.0201)(1-0.0494) = 1-0.9315 = 0.0685$$

여기서, $F_B = 1-(1-F_C)(1-F_D) = 1-(1-0.02)(1-0.0001) = 1-0.9799 = 0.0201$

$$F_E = 1-(1-F_{E_1})(1-F_{E_2}) = 1-(1-0.02)(1-0.03) = 1-0.9506 = 0.0494$$

단, $F_D = F_{D_1} \cdot F_{D_2} = 0.01 \times 0.01 = 0.0001$

8.3.6 FMEA와 FTA의 적절한 선택 2018 2회차

* FMEA와 FTA의 적절한 활용 및 선택을 위해 차이점에 대해 요약하면,

① FMEA는 기입용지에 의한 차트(chart)해석법이고 고장나무분석(FTA)은 고장나무에 의한 도식해석법으로서, 해석도구의 모양이 다름.

② FMEA는 부품의 고장으로부터 전체 시스템(또는 제품)의 고장을 예측하고, FTA는 제품의 고장으로부터 고장원인의 부품을 추정하는 방법임.
즉, FMEA는 상향식, FTA는 하향식으로 상반되게 접근함.

예제 9.43 FMEA(또는 FMECA)와 FTA의 차이점을 비교하라. 2000 등 총4회

해설

FMEA	FTA
① Bottom-up 방식 ② 정성적 해석 방법 ③ 표를 사용한 해석 ④ 종합(또는 전체)적 해석 ⑤ 하드웨어의 고장해석	① Top-down 방식 ② 정량적 해석 방법 ③ 논리기호를 사용한 해석 ④ 특정사상에 대한 해석 ⑤ 소프트웨어나 인간의 과오까지도 포함한 고장해석이 가능

9. 신뢰성 설계기술 및 신뢰성관리

* 복잡한 구성 제품의 품질불량 원인은 설계불량이 40%, 제조원인이 30%, 사용조건이 30%라는 J. M. Juran과 F. M. Gryna에 의한 조사결과가 있으며, 칼라TV의 경우 설계오류가 20~40%라는 조사결과와 같이 설계단계의 신뢰성이 제품품질보증에 중대한 영향을 끼치고 있음.
* 설계단계의 신뢰성확보가 중요하며, 신뢰성 설계기술들을 차례로 알아보기로 함.

9.1 신뢰성 설계기술 2020 등 총9회

* 제품의 고유 신뢰도는 설계시 선택된 제품 구조, 부품 구성 및 각 부품의 신뢰도 등에 의하여 결정되는 값임.
* 일반적으로 제품은 그 제품의 기능을 수행하는데 꼭 필요한 부품들로만 구성되기 때문에 그의 신뢰도는 직렬결합 모델로 표현됨.
* 따라서 제품의 신뢰도를 R, 각 구성부품의 신뢰도를 $r_i\ (i=1,2,\cdots,n)$, 제품의 고장률을 λ, 각 구성부품의 고장률을 λ_i, 구성부품의 수를 n이라고 하고, 지수분포형 신뢰도를 가정하면 다음과 같은 관계가 성립함.

$$\left.\begin{aligned} R &= \prod_{i=1}^{n} r_i \\ \lambda &= \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \end{aligned}\right\} \qquad (9.189)$$

* 만약 $\lambda_i = \lambda_0$이면 다음과 같이 됨.

$$\left.\begin{aligned} \lambda &= n\lambda_0 \\ R &= e^{-n\lambda_0 t} \end{aligned}\right\} \qquad (9.190)$$

윗 식에서 알 수 있는 바와 같이 구성부품수 n이 증가(또는 복잡)할수록 제품의 고장률은 증가하고, 신뢰도가 저하됨.

* 그런데 n의 값은 제품의 요구기능에 의해서 결정되는 값이기 때문에 설계시 이것을 적게(또는 단순화)하는 데에는 한계가 있음.
* 이와 같은 원리적 상반점을 극복하는 신뢰성 설계기술을 최적 리던던시(redundancy) 설계법이라고 하는데, 신뢰성 설계기술에는 설계구조에 관련된 리던던시 설계법 이외에도 구성부품이나 재료의 선택에 관계된 방법 등 여러 가지 방법이 있음.

(1) 리던던시 설계 2007 등 총2회

* 구성품의 일부가 고장나더라도 그 구성부분이 고장나지 않도록 설계되어 있는 것을 리던던시(용장, 병렬, 과잉, 여유)설계라고 함.
* 이러한 리던던시 설계의 특징은 구성품이 여분의 구성요소를 가지고 있기 때문에 그 구성품의 고장이 반드시 전체의 고장을 일으키지는 않는다는 데 있음.

* 이와 같이 고도의 신뢰도가 요구되는 특정 부분에 여분의 구성품을 더 설치함으로써 그 부분의 신뢰도를 높이는 방법을 리던던시 설계라고 함.

* 이 방법에는 ① 처음부터 여분의 구성품이 주구성품과 함께 작동을 하게 하는 병렬 리던던시(parallel redundancy)설계, ② 여분의 구성품은 대기상태에 있다가 주 구성품이 고장나면 그 기능을 인계받아 계속 수행하게 하는 대기 리던던시(stand-by redundancy)설계가 있음.

(2) 부품의 단순화와 표준화

* 식 (9.189)와 식 (9.190)에서 알 수 있는 바와 같이 구성부품의 수 n이 증가하면 제품의 고장률은 증가하고, 신뢰도는 저하됨.

* 따라서 이것을 극복하고 신뢰성의 저하를 줄이기 위해서는 부품의 단순화와 표준화 대책이 요망됨.

(3) 최적재료의 선정 2016 등 총4회

* 신뢰성 설계기술 중 설계기술 못지 않게 중요한 것은 최적의 재료를 선정하여 제품의 제조에 사용하는 것임.

* 이러한 최적재료 선정에 고려할 요소는 다음과 같음.

① 기기특성 → 인장강도, 압축강도, 절단강도, 면압강도 등이 클 것

② 비중 → 가볍고 강한 재료를 사용함으로써 구조 전체를 가능한 한 가볍게 설계할 것

③ 가공성 → 기계가공이 필요한 것은 절삭이 용이하고, 용접 또는 접착성이 좋으며, 판인 경우에는 프레스 가공이 용이할 것

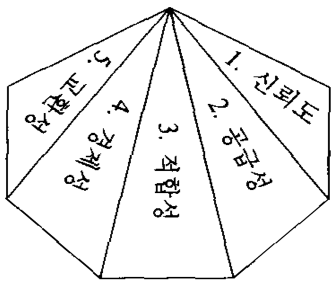
④ 내환경성 → 구조물의 임무 또는 용도에 따라 고온이나 극저온에서 사용되는 재료가 있을 수 있는데, 이런 경우 소요의 온도범위에서 강도의 저하가 적을 것.
또한 염분이나 온도 등의 환경에서 부식 등의 열화가 발생하지 않을 것 등이 요구됨.

⑤ 원가 → 재료의 구입가격 뿐만 아니라 제작, 가공 및 보전을 포함한 생애비용이 쌀 것

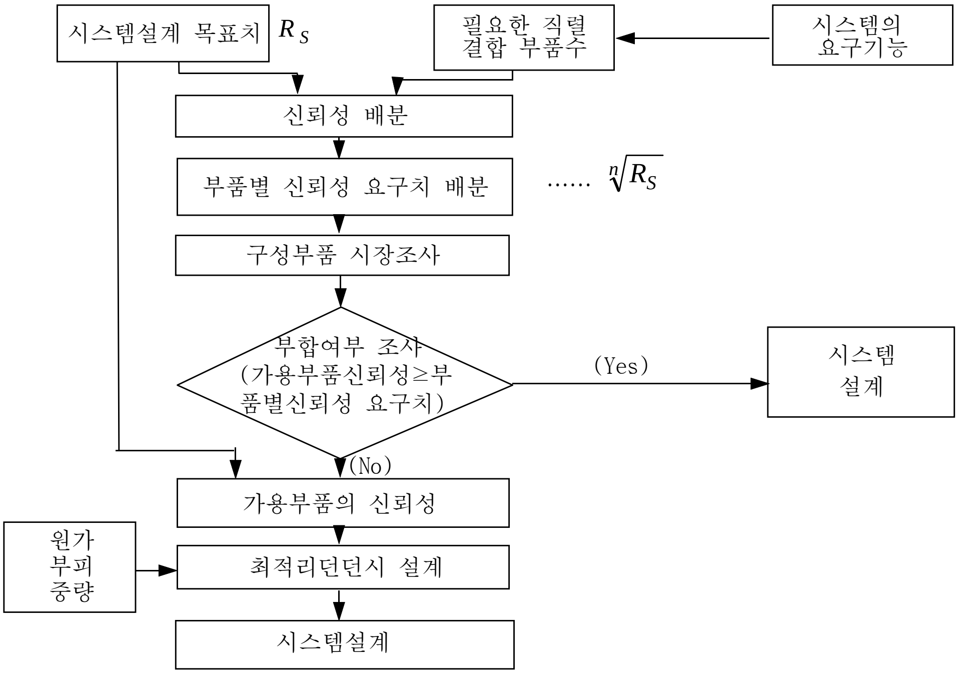
⑥ 내구성 → 피로, 마모, 열화 등의 손상이 급격히 진행되지 않을 것

⑦ 품질과 납기 → 품질이 균일하고, 수요에 대응한 소요량이 언제라도 확보될 수 있을 것

* 한편 최적재료의 선정을 위한 RACER법이 알려져 있으며, 이를 소개하면 다음과 같음.
RACER법은 웨스팅하우스(WH)사에서 레이팅시스템(rating system)이라는 방법으로 제안되어 제품 및 부품 선정법으로 활용되고 있음.



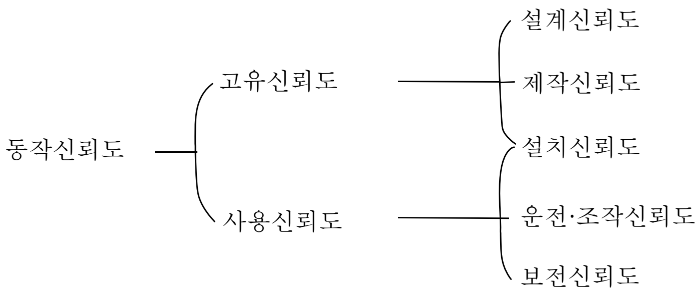
[그림 9.25] RACER법



[그림 9.26] 일반적인 신뢰성설계의 절차

9.3 고유신뢰성 및 사용신뢰성 향상 2021 등 총5회

* 신뢰성관리는 [그림 9.27]과 같이 크게 고유신뢰성(설계 및 제조의 신뢰성)과 사용신뢰성(출하 후의 신뢰성)으로 나눌 수 있음.



[그림 9.27] 신뢰도의 구성

9.3.1 고유신뢰성의 제고방법 2017 등 총3회

* 고유신뢰성은 제품의 수명을 연장하고 고장을 적게 하는 신뢰성설계와 공정관리나 공정해석에 의하여 기술적 요인을 찾아내고 이를 시정하는 품질관리활동으로 달성됨.

* 제품의 설계단계에서 고유신뢰성을 증대시키기 위하여 일반적으로 많이 사용되는 방법은 다음과 같음.

  ① 병렬 및 대기 리던던시(redundancy) 활용, ② 제품의 단순화, ③ 고신뢰도 부품 사용
  ④ 부품고장의 사후영향을 제한하기 위한 구조적 설계방안의 강구
  ⑤ 부품의 전기적, 기계적, 열적 및 기타 작동조건의 경감(derating)
  ⑥ 부품과 조립품의 단순화 및 표준화, ⑦ 시험의 자동화

* 이상의 방법은 신뢰도가 낮은 부품으로 신뢰도가 높은 제품을 만들 수 있게 할 뿐 아니라 제품의 고장률을 감소시키고, 평균수리시간도 감소시키며, 제품의 연속적인 작동시간을 증가시키게 됨.
* 제품의 제조단계에 있어서는 일반적으로 다음의 방법으로 제품의 고유신뢰도를 증대시킴.
  ① 제조기술의 향상, ② 제조공정의 자동화, ③ 제조품질의 통계적 관리
  ④ 부품과 제품의 burn-in
* 이상의 방법은 주로 제품의 고장률을 감소시킴으로써 제품 신뢰도를 증대시키게 됨.

9.3.2 사용신뢰성의 제고방법 2017

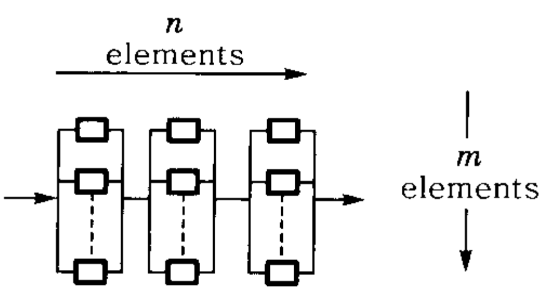
* 제품의 사용단계에 있어서는 제품의 신뢰도 증가보다는, 설계와 제조과정에서 형성된 제품의 고유신뢰도를 될 수 있는 한 장기간 보존하는 것이 필요함.
* 제품의 사용단계에서의 사용신뢰도를 높이기 위해서는 다음 사항들이 권장됨.
  ① 포장, 보관, 운송, 판매의 제 과정에서 품질관리에서 보증된 품질특성이 그대로 유지되고, 사용방법과 보전방법이 정해진 기준대로 준수되도록 사후관리를 철저하게 행함.
  ② 특히 출하 후의 신뢰성관리에 중요한 것은 예방보전(PM ; Preventive Maintenance)과 사후보전(BM, Breakdown Maintenance)의 체제를 확립하여 애프터 서비스를 행함.
  ③ 사용중의 열화정보를 수집함으로써 차기의 제품개발이나 설계에 이것을 반영함.
  ④ 적절한 연속작동시간(또는 일회 사용시간)의 결정
  ⑤ 사용자에게 기기나 시스템에 대한 제반지식을 주지시키기 위한 매뉴얼의 작성·배포와 조작방법에 대한 교육실시로 고장을 사전 방지하도록 함.

9.4 리던던시(Redundancy) 설계 2021 등 총2회차

* 고도의 신뢰도가 요구되는 특정부분에 여분의 구성품을 더 설치함으로써 구성품의 일부가 고장나더라도 그 구성부분이 고장나지 않도록 설계하여 그 부분의 신뢰도를 높이는 방법을 리던던시(용장, 병렬, 여유, 과잉)설계라 함.
* 리던던시 설계에는 ① 병렬 리던던시(parallel redundancy) 설계, ② 대기 리던던시(stand-by redundancy) 설계, ③ n 중 k(k out of n) 리던던시 설계 등이 있음.

9.4.1 병렬 리던던시 설계

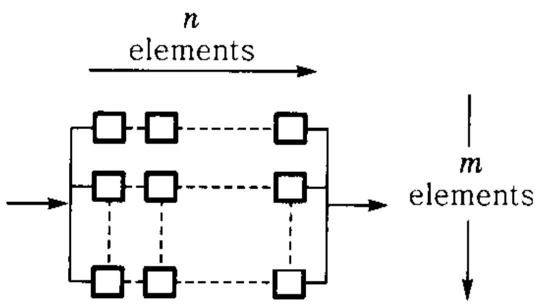
(1) 부품별 병렬 리던던시(부품중복) 방법



$$R_S = [1-(1-r)^m]^n$$

여기서, r : 각 부품의 신뢰도
n : 직렬결합 부품수
m : 병렬결합수(중복도)

(2) 부분(part)별 병렬 리던던시(시스템중복) 방법



$R_S = 1-(1-r^n)^m$

여기서, r : 각 부품의 신뢰도

n : 직렬결합 부품수

m : 병렬결합수(중복도)

(3) 병렬 리던던시 설계의 신뢰도 비교

* 부품별 병렬 리던던시(부품중복) 방법은 부분(part)별 병렬 리던던시(시스템중복) 방법보다 신뢰도가 더 높음.

9.4.2 대기(Stand-by) 리던던시 설계

* 대기 리던던시는 어떤 구성요소가 규정된 기능을 수행하고 있는 동안, 주부품으로 바뀔 때까지 예비로서 대기하고 있는 구성요소를 가진 리던던시를 말함.
  ① 냉대기시스템 : 대기유닛(unit)이 절환(switching)시까지 동작정지 또는 휴지상태로 있는 것을 말하며, 대기유닛이 고장 열화가 없고 항상 신품의 상태에 있음.
  ② 열대기시스템 : 대기유닛을 언제나 동작상태로 놓고 언제든지 절환할 수 있도록 되어 있는 것을 말함.
  ③ 온대기시스템 : 대기유닛은 전원만 연결된 상태이며, 고장나는 수도 있으나 그 신뢰성은 주된 유닛보다는 높음.

9.5 안전성 확보와 PLP 대책

* 신뢰성과 안전성은 서로 밀접한 관계를 가지고 있음. 신뢰성은 주로 시스템이나 기기 또는 부품이 정해진 기능을 수행하고 있는지의 유무를 추구하고 있고, 안전성은 주로 시스템이나 기기 또는 부품이 어떤 파괴적인 결과의 발생 유무를 추구하고 있음.

* 신뢰성이나 안전성을 추구하기 위해서는 시스템, 기기, 부품 등이 사용되는 환경과 이것을 사용하는 사람 등을 포함하여 그의 영향을 검토하고 대책을 강구할 필요가 있는데, 이와 같은 고장이나 안전성의 확보대책으로는 FMEA, FMECA, FTA 등이 많이 사용됨.

* 이상과 같은 고장해석기법에 의거 제품의 고장을 감소시킴과 동시에 고장으로 인한 사용자의 폐해를 감소시키는 것이 안전성 제고임.

* 제품의 안전성 결여로 사용자가 신체 및 재산상 피해를 입는 경우 이에 대한 보상책임은 제품의 제조 및 공급자에게 있는데, 이것을 제품책임(PL ; product liability)이라고 함.
  그러므로 신뢰성 보증 뿐만 아니라 제품책임예방(PLP ; product liability prevention)을 위해서도 철저한 신뢰성관리가 필요함.

10. 기출문제 및 착안점

01 정규확률지에 대하여 다음 사항을 설명하라. (30점) (1981년)

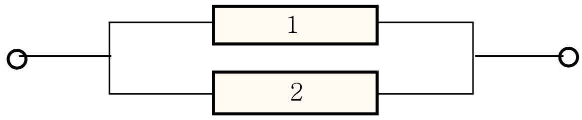
① 구성(정규분포 곡선의 확률밀도 함수식으로 설명을 요함)

② 사용방법상의 원리, ③ 도수분포 곡선의 형상과 정규확률지상의 Plot한 점과의 관계

☞ 힌트 : 본문 『신뢰성추정. 정규분포의 경우 → 정규확률지에 의한 방법』해설 참조

[참조] ①&② : 『고장률과 고장확률밀도함수 → IFR과 정규분포 → $f(t)$식 참조』

02 Reliability block diagram이 다음과 같이 주어지는 시스템이 있다. 부품 1과 2의 수명을 나타내는 확률변수를 각각 T_1, T_2 라 할 때 이 시스템 수명 T는 $T = \max(T_1, T_2)$가 된다.



① T_1, T_2 의 확률밀도함수를 각각 $f_1(t)$, $f_2(t)$ 라 할 때 T의 확률밀도함수를 구하라.

② $f_1(t) = f_2(t) = \begin{cases} \lambda \cdot e^{-\lambda t}, t \geq 0 \\ 0 \quad\quad Otherwise \end{cases}$ 일 때 T의 확률밀도함수는?

단, T_1과 T_2는 서로 독립이라고 가정하라. (1982년 1차)

☞ 힌트 : ① 병렬결합모델의 전체 신뢰성 $R(T)$ 식에서 $f(T) = -dR(T)/dt$ 를 구함.

② $f_1(t) = f_2(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t}$ (여기서, t는 음수가 될 수 없음)

03 A, B, C 세 종류의 부품으로 구성되어 있는 시스템이 있다. 이 시스템은 구성하는 각 부품의 수와 시간당 고장률은 다음 표와 같다.

부품	수량	시간별 고장률
A	40	5.0×10^{-6}
B	15	2.2×10^{-6}
C	30	0.5×10^{-6}

이 시스템을 구성하는 부품은 어느 한 개가 고장이 나더라도 시스템이 고장을 일으키는 결과를 가져온다. 모든 부품의 수명이 지수분포를 하여 어느 한 부품의 고장이 다른 부품에 영향을 안 미친다는 가정아래 이 시스템의 MTTF(Mean Time To Failure)를 구하라.

(20점) (1987년)

☞ 힌트 : 본문 『시스템의 신뢰도 → 직렬결합모델의 신뢰도』해설 참조.

MTTF=1/λ_S , 단, 직렬연결인 경우 $\lambda_S = \sum \lambda_i$

04 신뢰성 개선은 설계시에 행하는 것이 가장 효과적이다. 설계단계에서 신뢰성을 향상시킬 수 있는 방법에 대해 기술하시오. (8가지 이상) (25점). (2000년 1차)

☞ 힌트 : 본문 『신뢰성 설계』해설 참조

05 24대의 커피자판기 고장일수는 다음과 같다.

고장일수	고장대수	고장률
0~100	10	
100~200	6	
200~300	2	
300~400	2	
400~500	4	

신뢰도 함수와 고장률 함수를 계산하고 그래프를 그리시오. (25점) (2000년 1차)

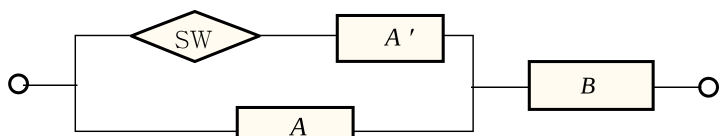
☞ 힌트 : 본문 『신뢰도 함수 $R(t)$, 고장률 함수 $\lambda(t)$』 해설 참조

06 제품의 전형적인 고장 패턴, 즉 Bath-tub에 대해 고장의 원인 및 대책을 기술하시오. (25점) (2000년 1차)

☞ 힌트 : 본문 『시스템의 수명곡선인 욕조곡선 → 고장률의 패턴별 고장대책』 해설 참조

07 A와 B의 부품으로 연결되는 직렬시스템이 있고, 이들의 신뢰도는 각각 80%, 95% 이다. 이 시스템의 고장손실비용이 250,000원일 때 귀하에게 부하가 신뢰성을 높이기 위하여 병렬용장방식(아래 그림)으로 설계한 설계도를 귀하에게 검토 의뢰하였다. 이때 경제성과 신뢰성을 고려하여 귀하는 어떤 방식을 채택할 것이며 그 이유는 무엇인가? (25점) (2000년 1차)

부품	신뢰도	부품값
A'	80%	15,000원
스위치	98%	20,000원



☞ 힌트 : 본문 『대기결합 구조의 시스템의 신뢰도』 해설 및 예제 참조.

[참조] 전체신뢰도는 B를 제외한 상태인 스위치 시스템의 신뢰도와 B의 신뢰도를 곱하여 구함. 경제성을 위해서는 부품값이 적게 들도록 $MTTF_S$ 직전까지 사용하고, 신뢰성을 위해서는 부품값이 들더라도 $MTTF_S$ 도달이전의 신부품을 사용함.

08 신뢰성 설계는 설계품질의 하나인 신뢰성을 실현하기 위한 설계로서 신뢰성의 결정 수단이 된다. 신뢰성 설계기법에는 고장예방 설계기법과 신뢰성 특유의 설계기법이 있는데 이를 설명하시오. (25점) (2000년 1차)

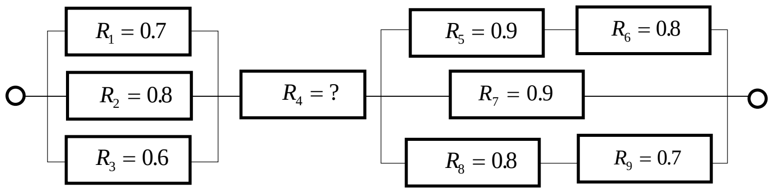
☞ 힌트 : 본문 『신뢰성 설계』 해설 참조

09 정성적인 신뢰성 예측법에는 고장모드 영향분석(FMEA)기법이 있다. 이 기법의 목적과 효과를 기술하시오. (25점) (2000년 1차)

(25) 초기고장기, 우발고장기, 마모고장기의 원인과 각 고장기간에 고장률을 감소시키기 위한 초기고장기, 우발고장기, 마모고장기의 조치를 각각 구분하여 설명하시오. (2005년 2회차)

☞ 힌트 : 본문『시스템의 수명곡선인 욕조곡선 → 고장률의 패턴별 고장대책』해설 참조

(26) 다음과 같이 9개 부품으로 구성된 시스템이 있다. 전체시스템의 신뢰도 R_S가 0.868이고, 각 부품의 신뢰도가 다음과 같을 때 부품4의 신뢰도 R_4는 얼마인가? (2005년 2회차)



☞ 힌트 : 본문『시스템의 신뢰성 → 직·병렬 결합 시스템 신뢰도』해설 참조

(27) 제품의 고장률 패턴인 욕조곡선(Bath-tub Curve)에 대해 설명하시오. (2006년 1회차)

☞ 힌트 : 본문『시스템의 수명곡선인 욕조곡선』해설 참조

(28) 시스템의 구조 중에서 n 중 k(k out of n)구조와 대기(stand-by) 구조에 대해 설명하시오. (2006년 1회차)

☞ 힌트 : 본문『시스템의 신뢰도 → n 중 k 구조, 대기결합 구조』해설 참조

(29) 개발, 설계, 생산, 출하 단계에서 실시되는 신뢰성시험에 대해 설명하시오. (2006년 1회차)

☞ 힌트 : 본문『신뢰성시험의 종류』해설 참조

(30) FMEA과 FTA에 대해 설명하시오. 그리고 설계 FMEA를 실무에서 적용할 때 사용하는 양식을 제시하고, 이의 활용 방법에 대해 구체적으로 설명하시오. (2006년 1회차)

☞ 힌트 : 본문『FMEA·FTA』해설 참조

(31) 제품의 신뢰성을 평가하는 과정에서 10개의 제품을 10시간 동안 가동하여 3시간, 5시간, 9시간에 각 하나씩 고장이 발생하고 나머지 7개 제품은 고장이 발생하지 않았다. MTBF를 구하시오. (제품의 고장은 지수분포를 한다고 가정) (2006년 2회차)

☞ 힌트 : 본문『신뢰성 추정(지수분포) → 정시중단의 경우』해설 참조. $MTBF = \hat{\theta}$

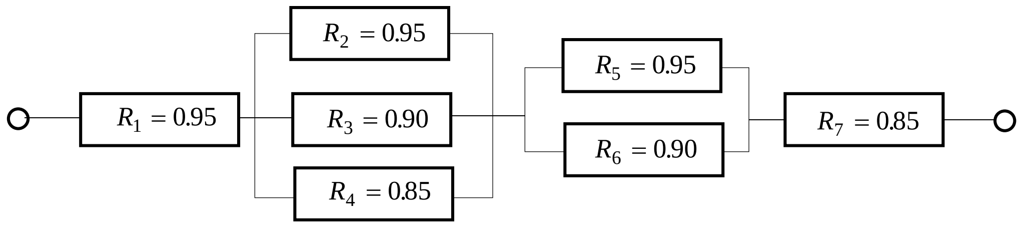
(32) 개발단계에서 DFMEA(Design FMEA)가 왜 필요하고 이의 활성화를 위해서 어떻게 접근해야 하는지를 설명하고 자사 제품을 기준으로 하나의 고장모드에 대해서 DFMEA를 작성하시오. (2006년 2회차)

☞ 힌트 : 본문『FMEA』의 실시절차 해설 참조

46 평균수명(MTTF ; Mean Time To Failure)이 1,000시간이고, 고장수명이 지수분포를 따르는 부품을 500시간 사용했을 때의 신뢰도(Reliability)를 구하시오. (2010년도 1회차)

☞ 힌트 : 본문 『신뢰도함수 $R(t)$ 계산』 해설 참조. $R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-t/MTBF} = 1 - \frac{t}{MTBF}$

47 시스템이 다음 신뢰성블록도와 같이 구성되었을 때 시스템의 신뢰도를 구하시오. (단, 각 부품의 고장은 서로 독립임.) (2010년도 1회차)



☞ 힌트 : 본문 『시스템의 신뢰도』 해설 및 예제 참조. 병렬 부분을 각각 계산 후 직렬 계산.

48 공작기계를 제작하는 회사에서 설비에 대한 수명을 합리적으로 관리하기 위하여 와이블 확률지로 형상모수($m = \beta$)를 추정하여 관리하고 있다. 형상모수의 변화에 따른 설비 고장률에 대하여 다음 각 물음에 답하시오. (2010년도 1회차)

(1) 욕조곡선을 작성하시오.

(2) 다음 표에 따라 고장기를 구분한 후, 관리/조치방법을 제시하시오.

형상모수 값	고장기 구분	관리방법	조치방법

☞ 힌트 : 본문 『시스템의 수명곡선인 욕조곡선』 해설 참조

49 FMEA(Failure Mode and Effect Analysis)와 FTA(Fault Tree Analysis)를 각각 설명하고, 그 차이점을 기술하시오. (2010년도 1회차)

☞ 힌트 : 본문 『고장해석기법으로서의 FMEA·FTA → FMEA·FTA 적절한 선택』 해설 참조

50 고장시간의 분포가 지수분포인 전자기기 12대에 대한 고장시간의 관측값이 다음과 같았다. 이 기기에 대한 MTBF의 신뢰구간을 신뢰율 95%로 구하시오. (2010년도 1회차)

(단, $\chi_{0.025}{}^2(24) = 12.40$, $\chi_{0.975}{}^2(24) = 39.36$, $\chi_{0.05}{}^2(24) = 13.85$, $\chi_{0.95}{}^2(24) = 36.42$ 이다.)

300,	450,	650,	950,	1700,	2600,	
4100,	5200,	6750,	9250,	12500,	15100	(단위 : 시간)

☞ 힌트 : 본문 『신뢰성추정』 지수분포의 경우 해설 및 예제 참조 응용

51 자동부품인 와이퍼시스템은 사용조건하에서 10년 동안 약 160만회 작동해야 한다. 내구성시험 규격에 고장수가 r =0일 때 신뢰도와 신뢰수준($R(t)$ & CL)을 0.90 & 0.95로 설정하면 표본시험대수가 증가하는데 시험기기 투자에 제약조건이 있으므로, 시험 시간을 320만회로 증가시키기로 의사결정이 되었다면 표본시험 대수는 얼마인지 구하시오. (2010년도 2회차)

(단, 와이블분포에 따르며, $m\,(\beta)$=2.7이고 λ=확장시험/보증시험을 의미함.)

☞ 힌트 : 본문 『(신뢰성 추정(와이블분포의 경우)』해설 참조 응용.

[참조] ① $\mu = \hat{\theta} = \eta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right)$ (단, $\eta = (t_0)^{1/m} = (320)^{1/2.7}$) → $\hat{\theta}$ 구함.

② 고장개수 $r = 0$ 인 경우 : (포아송분포) 신뢰수준 95%일 때

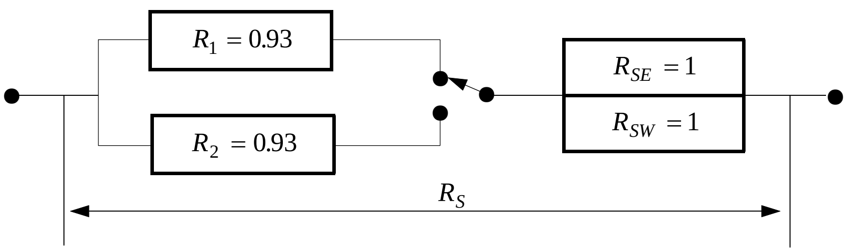
$$\theta_L = \frac{T}{2.99} = \frac{n \times 3{,}200{,}000}{2.99}$$ → n 을 구함.

52 수천 개의 형광등 수명이 평균(μ) 6,000시간, 분산(σ^2) 2,809시간인 정규분포에 따른다고 할 때 사용 중 고장나는 형광등이 5%이하가 되도록 하려면 교체주기를 몇 시간으로 해야 되는지 정수로 구하시오. (2010년도 2회차)

☞ 힌트 : 본문 『신뢰성 추정(정규분포인 경우) → 정규분포』해설 참조

$$Z = \frac{t-\mu}{\sigma} = \frac{t - 6{,}000}{\sqrt{2{,}809}} = 1.645$$ (단, $Z_{0.95}$=1.645) → t 를 구함.

53 전자제어시스템이 지수분포를 따르는 다음과 같은 대기(용장)시스템에서 100시간 작동 시 신뢰도 $R_1 = R_2 = 0.93$ 인 경우 전체신뢰도 R_S 를 소수점 3자리로 구하시오.
(2010년도 2회차)



☞ 힌트 : 본문 『대기결합 구조의 시스템 신뢰도』해설 및 예제 참조 응용.

R_S 는 스위치 시스템의 신뢰도(단, $R_{SW} = 1$)와 R_1 과 R_2 의 병렬결합구조 신뢰도의 곱으로 계산됨. R_{SE} 는 1이므로 R_S 계산에 고려하지 않음.

54 과거 어떤 장치의 평균수명은 48시간이었다. 설계를 변경한 후 만든 장치 10대를 수명시험에 걸어 고장수 r =8에서 정수중단하는 시험을 하여 다음의 데이터를 얻었다. 이 데이터를 와이블 확률지에 타점하여 보니 형상모수 m =1이고, 수리율이 0.05이었다.
다음 각 물음에 답하시오. (소수점 2자리로 하시오.)

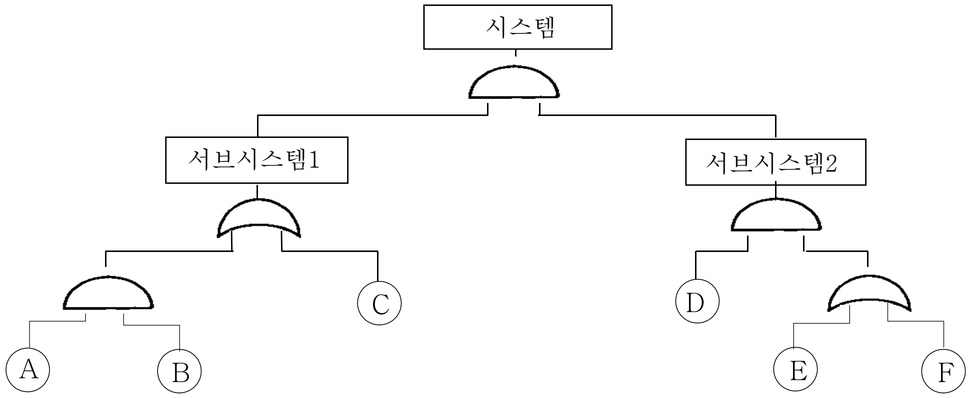
60 어느 회사의 시스템에 대한 고장해석을 위해 FTA를 실시하고자 한다. 다음 각 물음에 답하시오. (25점) (2011년 2회차)

(1) FTA(Fault Tree Analysis)의 정의를 설명하시오,

(2) FTA에서 FT도 작성에 사용되는 기본적인 기호를 4가지만 그리고 설명하시오.

(3) 다음 FT도에서 시스템의 신뢰도를 구하시오.

(단, F_A =0.1, F_B =0.2, F_C =0.2, F_D =0.3, F_E =0.2, F_F =0.1)



☞ 힌트 : 본문 『FTA(Fault Tree Analysis)에 의한 고장해석』 해설 및 예제 참조 응용

[참고] 제9장 관련 2012년부터의 SQC 기출문제 풀이힌트는 제11장부터 별도로 제공됨.

마음을 위대한 일로 이끄는 것은
오직 열정, 위대한 열정 뿐이다.
- 드니 디드로 -