

## 제 9 장

---

# 신뢰성공학

- 
1. 신뢰성의 기초 / 9-02
  2. 고장률과 고장확률밀도함수 / 9-08
  3. 신뢰성시험 및 신뢰성추정 / 9-19
  4. 신뢰성 샘플링검사 / 9-41
  5. 시스템의 신뢰도 / 9-47
  6. 스트레스·강도 모델 및 안전계수 / 9-53
  7. 보전성과 가동성 / 9-56
  8. 고장해석기법으로서의 FMEA·FTA / 9-62
  9. 신뢰성 설계기술 및 신뢰성관리 / 9-76
  10. 기출문제 및 착안점 / 9-85
-

## 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 **정적**인 품질인 것에 비해, 신뢰성은 시간의 변화에 따른 **동적**인 품질을 나타냄.
- \* 품질관리와 대비하여 본 신뢰성의 차이점으로서, 품질관리는 **모수** 영역에서 **부적합**의 분포를 다루나, 신뢰성은 **시간**의 영역에서 **고장**의 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.

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

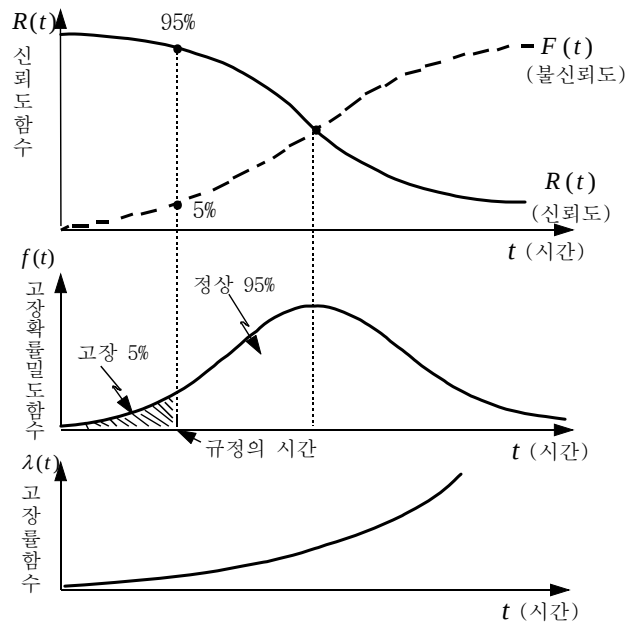
- \* 그리고 시점  $t$ 까지의 고장난 것의 누적고장확률(불신뢰도)  $F(t)$ 는 다음과 같음.

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

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

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (9.3)$$

- \* [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.

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

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

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (9.5)$$

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt = 1 - F(t) \quad (9.6)$$

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

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

\* 어떤 시점  $t$ 와  $t + \Delta t$ 시간 사이에 발생한 고장률을 “구간고장률”이라고 부르며, 이것을  $\Delta t$ 로 나누어 단위시간당 고장률로 환산한 것을 “단위시간당 고장률”이라 부름.

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

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

여기서, 단위시간은 주행거리(km) 또는 사용횟수가 될 수도 있음.

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

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

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

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.

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

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

**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

먼저  $t=20,000\text{km}$ 에서의  $R(t)$ ,  $F(t)$ ,  $f(t)$  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.

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

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.

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

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

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

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

## (3) 선형적(Empirical) 방법

\* 이는 지수확률지를 이용한 경험적 방법에 따른 신뢰성척도의 계산 방법임.

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

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

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

## (4) Midpoint Rank법

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

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

## 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.

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

\* 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 위 식은 다음과 같이 됨.

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

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

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

\* 위 식은 다음 식과 같이 표현되기도 함.

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

위 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.

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

위 식에서  $t$  는 제품의 사용시간을 나타내고,  $\lambda$  는 일정한 고장률(평균고장률)을 나타냄.

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

**해설**

$$\Rightarrow \text{고장날 확률} = F(t=10) = 1 - R(t=10) = 1 - 0.98 = 0.02$$

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

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

**해설**

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

## 2. 고장률과 고장확률밀도함수

### 2.1 고장률과 고장확률밀도함수의 종류 2011

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

## 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 수명 분포는 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.

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

여기서  $\lambda$ 는 평균고장률로서 다음 식과 같은 관계가 있음.

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (9.28)$$

\* MTBF는 평균고장간격시간(Mean Time Between Failure)으로서, 평균수명이 됨.

평균수명을  $\theta$ 로 표시하면  $\theta = MTBF$ 가 되고, 식 (9.27)은 다음 식으로 표시되기도 함.

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

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

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

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

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

\* 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  $\lambda = 1/MTBF$ 의 관계이므로

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

따라서  $t=360$ 시간에서 신뢰도는 94.2%가 됨.

**예제 9.5** 고장률이 일정하다고 생각되는 시스템의 고장시간간격을 측정한 결과를 보았다.

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

고장률  $\lambda$ 와 MTBF를 추정하시오. [기사 기출]

**해설**

☞ 지수분포를 따르므로

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

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

**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  $F(t=100) \leq 0.1$  이기 때문에 평균수명을  $\theta$  라 하면  $R(t=100) = e^{-100/\theta} \geq 0.9$  가 됨. 따라서 위 식의 양변에 자연대수를 취하면 다음과 같음.

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

## 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.

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

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

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

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

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

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

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

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.

$\phi(z)$  는 <부표 19> 정규확률분포표,  $\Phi(z)$  는 <부표 20> 정규누적확률분포표를 이용하여 구할 수 있음.

\* 한편  $F(t)$  는 다음 식으로도 표현되어 구해질 수 있음.

$$F(t) = \Phi(z) = \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right) \quad (9.37)$$

\* 그리고  $R(t)$  는 다음과 같이 됨.

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

**예제 9.7** 어떤 부품의 고장시간의 분포가  $\mu=20,000$ 사이클,  $\sigma=2,000$ 사이클인 정규분포를 한다면  $t=19,000$ 사이클일 때의 신뢰도  $R(t)$  와 순간고장률  $\lambda(t)$ 는 얼마인가.

**해설**

☞ 정규분포의 경우  $R(t)$  와  $\lambda(t)$  의 계산

\*  $R(t)$  와  $F(t)$  의 관계는  $R(t) = 1 - F(t) = 1 - \Phi(z)$  와 같음.

$$\text{여기에서 } z \text{ 는 } z = \frac{t-\mu}{\sigma} = \frac{19,000-20,000}{2,000} = -0.5$$

\*  $\Phi(z) = \Phi(-0.5)$  이고, <부표 19>의 정규확률분포표와 <부표 20>의 정규누적확률분포표에 의거하면  $\phi(-0.5) = 0.3521$ ,  $\Phi(-0.5) = 0.3085$  가 됨.

\*  $t=19,000$ 사이클일 때의 신뢰도는 다음과 같음.

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \Phi(z) = 1 - 0.3085 = 0.6915$$

\*  $t=19,000$ 사이클일 때 순간고장률  $\lambda(t)$  는  $\lambda(t) = f(t) / R(t)$  의 관계로부터 구함.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\phi(z)}{\sigma \cdot R(t)} \quad (9.38)$$

그런데 이 경우는  $\sigma$  값이 1이 아닌  $\sigma=2,000$ 이므로  $f(t) = \phi(z) / \sigma$  의 관계에서  $\sigma$  값을 사용한  $f(t)$  값을 구해야 함.

여기에  $\phi(z)$ ,  $\sigma$ ,  $R(t)$  값을 대입하면

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\phi(z)}{\sigma \cdot R(t)} = \frac{0.3521}{2,000 \times 0.6915} = 0.000254 \text{ (/사이클)}$$

**예제 9.8** 어떤 기계부품이 수명은  $\mu=200$ 시간,  $\sigma=10$ 시간인 정규분포를 따르고 있다. 이 부품을 180시간 사용하였을 때의 신뢰도를 구하라.

**해설**

☞  $R(t) = 1 - F(t) = 1 - \Phi(z)$  이므로

$$R(t) = 1 - \Phi(z) = 1 - \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right) = 1 - \Phi\left(\frac{180-200}{10}\right) = 1 - \Phi(-2.00) = 1 - 0.02275 = 0.97725$$

여기서,  $\Phi(-2.00)$  은 <부표 20> 정규누적확률분포표로부터  $\Phi(2.00) = 0.97725$  이므로

$$\Phi(-2.00) = 1 - 0.97725 = 0.02275$$

### 2.2.3 와이불분포 2019 등 총2회

\* 고장확률밀도함수  $f(t)$  가 지수분포를 따르는 경우 고장률함수 “ $\lambda(t) = \lambda = \text{일정}$ ”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 와이불분포임.

\* 와이불분포는 다음 식들과 같이 표현되며,  $m$  은 형상모수(shape parameter),  $\eta$  는 척도모수(scale parameter),  $\gamma$  는 위치모수(position parameter)라 부름.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

\* 형상모수  $m$  은 분포의 형을 결정하는 모수로서

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

②  $m=1$ 이면 고장률함수  $\lambda(t)$  는 일정형 고장률(CFR)이 되고, 고장확률밀도함수  $f(t)$  는 지수분포에 대응함.

③  $m>1$ 이면 고장률함수  $\lambda(t)$  는 증가형 고장률(IFR)이 되고, 고장확률밀도함수  $f(t)$  는 정규분포( $m=3.5$ 일 때)에 대응함.

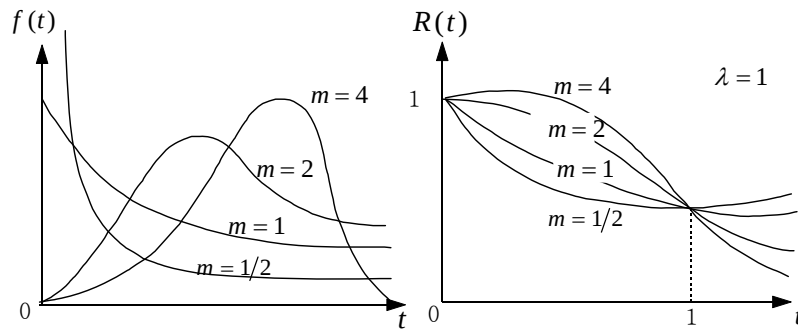
\* 한편  $m=1, \gamma=0$ 이면

$$R(t) = e^{-\frac{t}{\eta}}, \quad F(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\eta}} \text{ 이고, 사용시간 } t = \eta \text{ 이면 } m \text{ 에 관계없이}$$

$$R(t = \eta) = e^{-1} = 0.37, \quad F(t = \eta) = 1 - e^{-1} = 0.63$$

즉, 사용시간  $t = \eta$  만큼 사용되면 37%가 잔존하고, 63%는 이미 한 번 이상 고장을 경험한 것이 됨. 여기서 37%가 잔존하는 시간을 “특성수명”이라 함.

\* 한편 와이블분포의  $f(t)$  와  $R(t)$  에 대해서 각종의  $m$  의 값에 따라 그래프로 그려보면 다음 [그림 9.2]와 같음.



[그림 9.2] 와이블분포의  $f(t)$  와  $R(t)$

\* 평균수명  $E(t)$  와 평균수명의 분산  $V(t)$  는 와이블분포에 의거하여 구하면 다음과 같이 됨.

$$E(t) = \eta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad (9.48)$$

$$V(t) = \sigma^2 = \eta^2 \cdot \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{m}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{m}\right) \right] \quad (9.49)$$

\* 상기 식들을  $\eta = (t_0)^{1/m} = (1/\lambda)^{1/m}$ 를 써서 바꾸어 표현하면 다음 식으로 됨.

$$E(t) = (t_0)^{\frac{1}{m}} \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) = \left(\frac{1}{\lambda}\right)^{\frac{1}{m}} \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad (9.50)$$

$$V(t) = (t_0)^{\frac{2}{m}} \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{m}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{m}\right) \right] \quad (9.51)$$

$$= \left(\frac{1}{\lambda}\right)^{\frac{2}{m}} \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{m}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{m}\right) \right] \quad (9.52)$$

\* 여기서 감마함수의 값  $\Gamma(x)$  는 <부표 21> 감마함수표를 활용하여 구함.

**예제 9.9** 어떤 자동차부품의 수명분포는  $m=2$ ,  $t_0=250 \times 10^8$  (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

$$R(t=80,000) = e^{-\frac{t^m}{t_0}} = e^{-\frac{(80,000)^2}{250 \times 10^8}} = e^{-0.256} = 0.774, \text{ 즉 } 77.4(\%) \text{가 생존함.}$$

## 2.2.4 대수정규분포

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

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

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

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

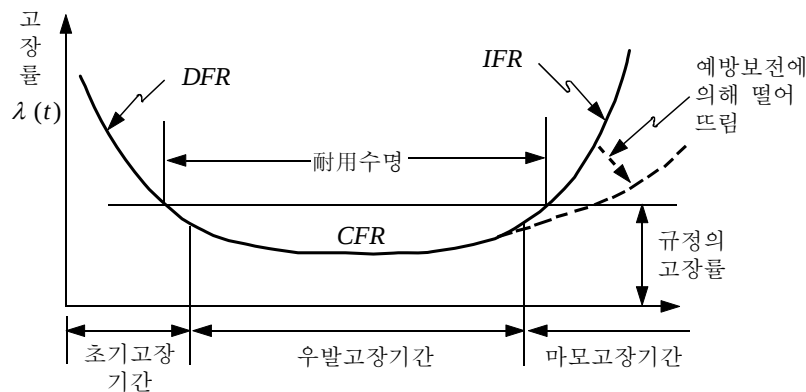
② 성질

- ㉠ 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 육조곡선은 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  $\lambda$ 는 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 의미

\* 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

$$E(t) = \int_0^t t \cdot f(t)dt = \int_0^\infty R(t)dt \quad (9.56)$$

#### (2) 고장확률밀도함수 $f(t)$ 가 지수분포인 경우 2014

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

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

이것을 정규분포표에서 구하고 [표 2]의 우단에 기입하였음.

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

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

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

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**

$$\begin{aligned} R(300/250) &= \frac{P_r(T \geq 300)}{P_r(T \geq 250)} = \frac{P_r\left(U \geq \frac{300-200}{50}\right)}{P_r\left(U \geq \frac{250-200}{50}\right)} = \frac{P_r(U \geq 2.0)}{P_r(U \geq 1.0)} = \frac{0.0228}{0.1587} = 0.1437 \end{aligned}$$

**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  $F(t) = \Phi(z) = \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)$  의 관계식을 사용하면

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

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

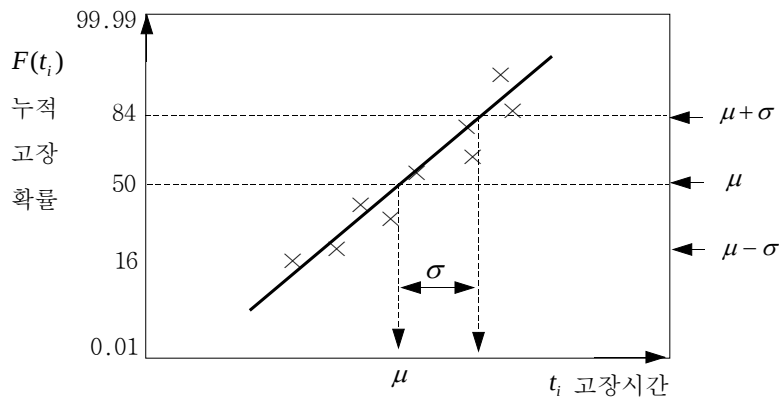
그리고 500시간과 600시간 사이에서의 고장확률은

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

따라서 평균고장개수 =  $200 \times 0.1574 = 31.48 \rightarrow 32$ 개 (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  $\mu$ 와 표준편차  $\sigma$ 를 구할 수 있음.



[그림 9.7] 정규확률지에 의한  $\mu$ 와  $\sigma$ 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.

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

- ② 타점된 점을 통과하는 직선을 그림.  
 ③ 직선과  $F(t_i)=50\%$  선과의 만나는 점의 고장시간  $t_i$ 가  $\mu$ 가 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  $\mu$ 와의 차가 고장시간의 표준편차  $\sigma$ 가 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  $m, \eta$ 로부터  $\mu, \sigma$ 를 구하는 방법임.  
 와이블분포의 경우에 확률밀도함수는 다음과 같음.

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

여기서 위치모수인  $\gamma$  를  $\gamma=0$ (보통은  $\gamma=0$ 이 됨),  $\eta^m = t_0$ 으로 대치하면 다음 식이 됨.

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

\* 그리고  $R(t)$  는  $R(t) = e^{-\frac{t^m}{t_0}}$ 이 되는데, 이를 변형하면 다음과 같은 과정으로 됨.

$$\begin{aligned} R(t) = e^{-\frac{t^m}{t_0}} &\rightarrow \left[ \ln R(t) = -\frac{t^m}{t_0} \right] \rightarrow \left[ -\ln R(t) = \frac{t^m}{t_0} \right] \\ &\rightarrow \left[ \ln \frac{1}{R(t)} = \frac{t^m}{t_0} \right] \rightarrow \left[ \ln \ln \frac{1}{R(t)} = m \ln t - \ln t_0 \right] \end{aligned}$$

윗 식에서  $R(t)$  대신에  $1-F(t)$ 를 대입하면

$$\ln \ln \frac{1}{1-F(t)} = m \ln t - \ln t_0 \quad (9.116)$$

상기 식은  $y = \ln \ln \frac{1}{1-F(t)}$ ,  $x = \ln t$ ,  $-\ln t_0 = b$ 로 보면  $y = mx + b$ 형의 직선이 됨.

\* 이 회귀선의 계수  $m, b$ 를 최소자승법(least square method)에 의해 구하도록 함.

$y = mx + b$ 형에서 다음과 같은 2개의 식이 얻어짐.

$$\sum y = m \sum x + b \cdot r \quad \sum xy = m \sum x^2 + b \sum x$$

여기서,  $r$ 은 샘플  $n$ 개 중 고장개수임.

상기 두 식을 연립시켜 풀어  $m, b$ 를 구하면 다음과 같음.

$$\left. \begin{aligned} m &= \frac{r \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{r \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \\ b &= \frac{\sum y_i}{r} - m \cdot \frac{\sum x_i}{r} \end{aligned} \right\} \quad (9.117)$$

\* 그리고 척도모수  $\eta$ 는 다음과 같이 하여 구해짐.

$b = -\ln t_0$ 에서  $t_0 = e^{-b}$ 이고, 또한  $t_0 = \eta^m$ 이므로  $\eta = t_0^{\frac{1}{m}}$ 이 됨.

\* 그러므로  $m, \eta$ 를 알면 다음 식들에 의해  $\mu, \sigma^2$ 을 구할 수 있음.

$$\mu = (t_0)^{\frac{1}{m}} \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) = \eta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad (9.118)$$

$$\sigma^2 = (t_0)^{\frac{2}{m}} \cdot \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{m}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{m}\right) \right] \quad (9.119)$$

\* 혹은  $t_0^{1/m} = \eta$ 이므로  $t_0^{1/m}$  대신에  $\eta$ 를 써서  $\sigma^2$ 을 구하면 다음과 같음.

$$\sigma^2 = \eta^2 \cdot \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{m}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{m}\right) \right] \quad (9.120)$$

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

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

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

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

**예제 9.21** 샘플 100개에 대하여 500시간 수명시험을 한 결과 12개가 고장났으며, 고장순위별 고장시간은 다음 표와 같다. 와이블분포의 형상모수  $m$ , 척도모수  $\eta$  및 평균수명  $\mu$  를 추정하라.

| 고장순번<br>(i) | 고장시간<br>( $t_i$ ) (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

☞  $m, \eta$  를 구한 후  $\mu$  를 추정함.

(1) 형상모수  $m$  의 추정

\* 상기 표에서  $F(t_i)$  는 일반적으로 많이 사용되는 평균순위법을 사용하지 않고, 여기서는

\* 메디안순위법을 사용하였고,  $x_i, y_i$  는  $x_i = \ln t_i, y_i = \ln \ln[1/\{1-F(t_i)\}]$  에 의거 계산됨.

\* 상기 표의 계산결과를 가지고  $m$  을 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  $\eta$  의 추정

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

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

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

(3) 평균수명  $\mu$ 의 추정

$$\begin{aligned}
 * \text{ 평균수명은 } \mu &= (t_0)^{1/m} \cdot \Gamma[1 + (1/m)] = \eta \cdot \Gamma[1 + (1/m)] \\
 &= 8,694 \cdot \Gamma[1 + (1/0.71)] = 8,694 \times \Gamma(1+1.4) \\
 &= 8,694 \times 1.2422 = 10,799.68 \approx 10,800 \text{ (시간)}
 \end{aligned}$$

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  $m, t_0, \eta$ 와 평균수명  $\mu$  및 표준편차  $\sigma$ 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 와이블 확률지상에 타점함.

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

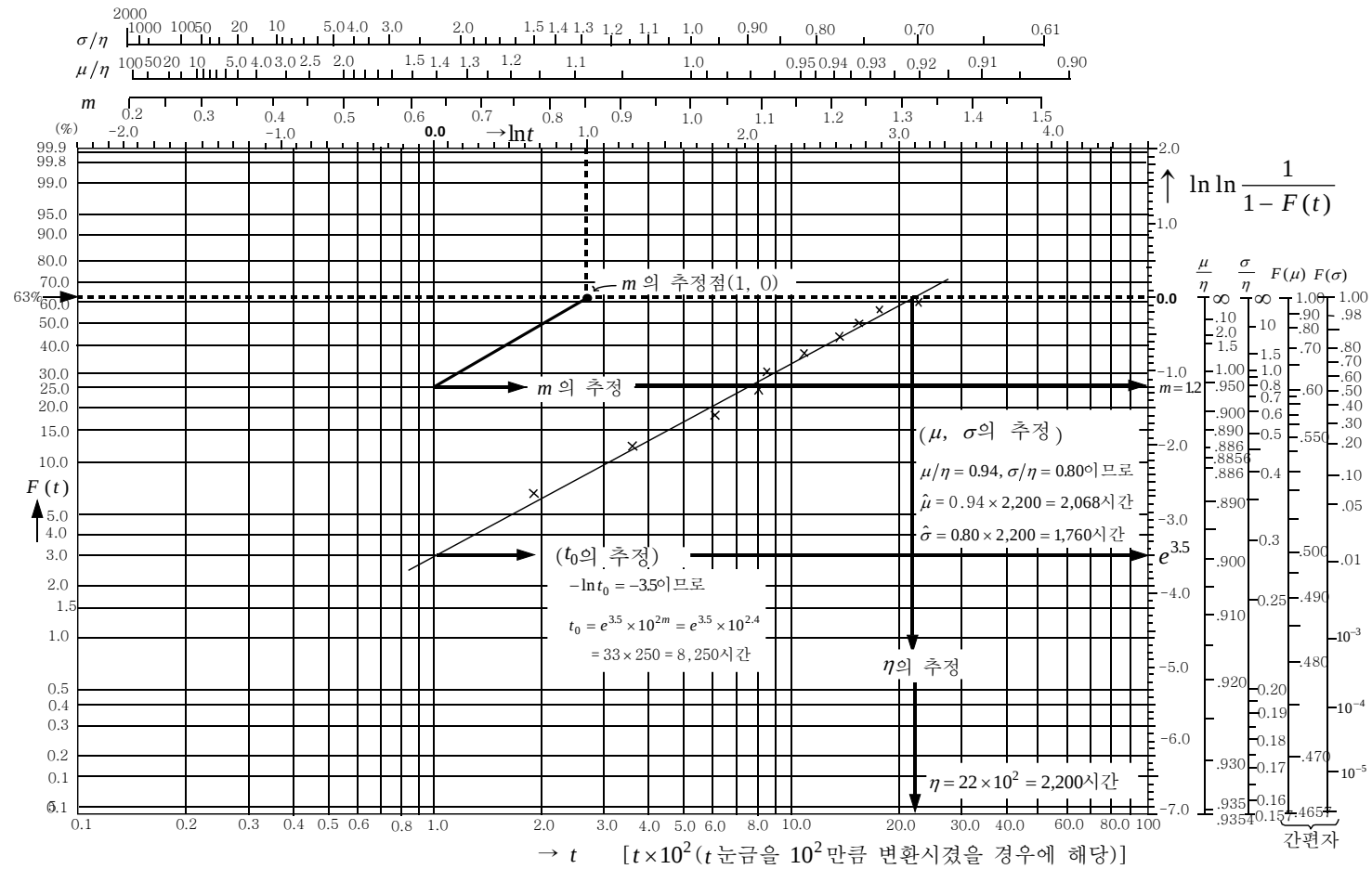
$$F(t_i) = \frac{i}{n+1} \times 100\% \quad : \text{평균순위법인 경우}$$

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

▶(순서 3) 모든 타점을 관통하는 직선을 그린다. 만일 타점을 관통하는 선이 직선이 아닐 때는 시간지연이 있음을 나타냄. 따라서 이런 경우는 위치모수  $\gamma$ 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  $\eta$ 의 추정

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

▶(순서 6) 척도모수  $t_0$ 의 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  $b$ 이면 다음과 같이  $b$ 의 역대수를 취하면  $t_0$ 를 구할 수 있음.

$$-\ln t_0 = b \text{에서 } t_0 = e^{-b}$$

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

▶(순서 7)  $\mu, \sigma$ 의 추정

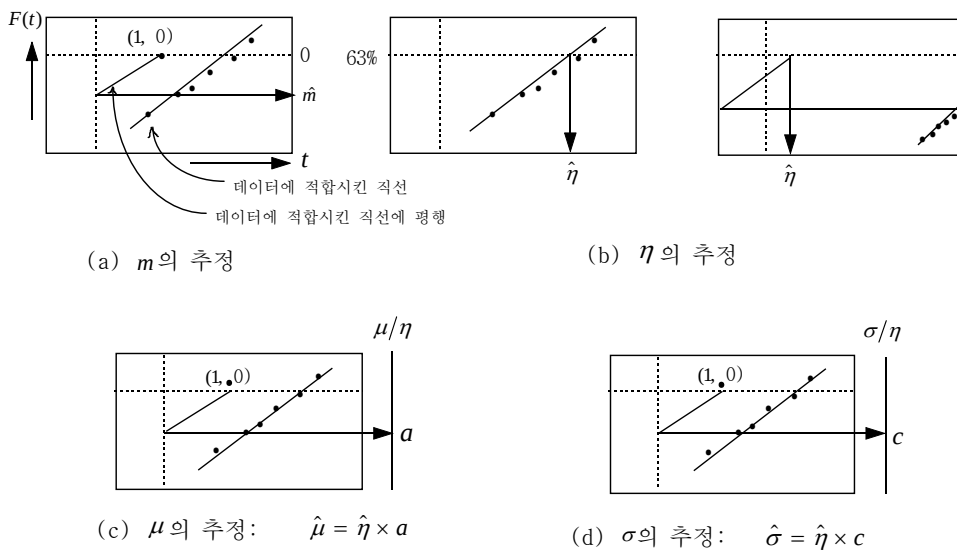
(방법 1) 우측 눈금에  $-m$ 의 값을 취하고, 이것을 우측으로 연장하여  $(\mu/\eta)$ 와  $(\sigma/\eta)$ 의 값을 읽은 후 이에 의거 다음과 같이 하여  $\mu$ 와  $\sigma$ 를 구함.

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

(방법 2) 감마함수의 값을 감마함수표에서 구하고, 이것을 다음의 식에 대입하여  $\mu, \sigma$ 를 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  $m, \eta, \mu, \sigma$ 의 추정방법에 대한 이해를 돕는 개요도를 간략하게 도식하면 다음 [그림 9.9]와 같음.



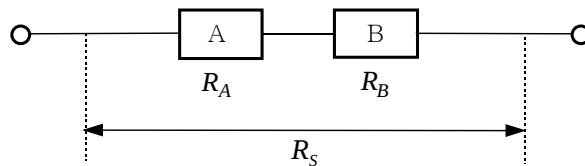
[그림 9.9] 와이블확률지에 의한  $m, \eta, \mu, \sigma$ 의 추정 개요도

## 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  $R_S$ 는 다음과 같음.

$$R_S = P_r(A \text{ AND } B) = P_r(A \cap B)$$

- \* 만일 A, B가 서로 독립사상이면

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

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

일반적으로  $n$ 개 부품이 직렬결합시의 시스템의 신뢰도  $R_S$ 는 다음 식과 같이 됨.

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

- \* 전체의 고장률  $\lambda_S$ 는 각 부품의 고장밀도함수가 지수분포에 따르는 경우

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

의 관계로부터  $\lambda_S$  는 다음의 식으로 구해짐.

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

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

$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-\frac{t}{MTBF}} \doteq 1 - \frac{t}{MTBF} \quad (9.132)$$

여기서,  $t$  = 사용시간,  $\lambda = 1/MTBF$

\* 또한, 고장률  $\lambda_i$  인 부품이 여러 개 직렬연결된 시스템의 MTBF는 다음과 같이 구함.

$$MTBF_S = \frac{1}{\lambda_S} \quad (9.133)$$

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

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

**해설**

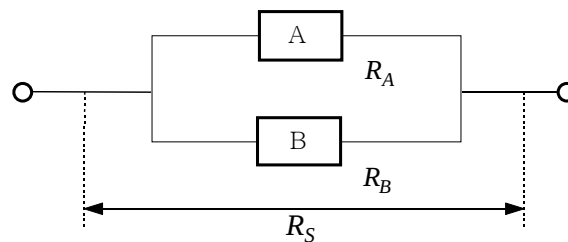
기기의 평균수명  $MTBF_S$  (혹은  $\theta_S$ )는  $MTBF_S = \frac{1}{\lambda_S} = \frac{1}{0.014} = 71.4$  (시간)

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

## 5.2 병렬결합모델의 신뢰도 2020 등 총5회

\* [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  $R_S$  는 다음과 같음.

$$\begin{aligned} R_S &= P_r(A \text{ OR } B) = P_r(A \cup B) \\ &= P_r(A) + P_r(B) - P_r(A) \cdot P_r(B) \\ &= R_A + R_B - R_A \cdot R_B \end{aligned} \quad (9.134)$$

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

$$\begin{aligned} R_S &= (1 - F_A) + (1 - F_B) - (1 - F_A)(1 - F_B) \\ &= 1 - F_A F_B = 1 - (1 - R_A)(1 - R_B) \end{aligned} \quad (9.135)$$

\* 일반적으로  $n$  개의 부품이 병렬결합시 시스템 전체의 신뢰도  $R_S$  는 다음과 같음.

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

\* 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.

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} R(t) dt &= \int_0^{\infty} R_1(t) dt + \int_0^{\infty} R_2(t) dt - \int_0^{\infty} R_1(t) R_2(t) dt \\ \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt &= \int_0^{\infty} e^{-\lambda_1 t} dt + \int_0^{\infty} e^{-\lambda_2 t} dt - \int_0^{\infty} e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} dt \\ \frac{1}{\lambda} &= \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} \end{aligned}$$

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

$$MTBF_S = \frac{1}{\lambda_S} = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} \quad (9.137)$$

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

$$MTBF_S = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{\lambda_0} \quad (9.138)$$

\* 일반적으로  $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_n = \lambda_0$  인  $n$  개 구성부품의 병렬결합시스템의  $MTBF_S$  는 다음 식으로 구해짐.

$$MTBF_S = \frac{1}{\lambda_0} + \frac{1}{2\lambda_0} + \dots + \frac{1}{n\lambda_0} \quad (9.139)$$

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

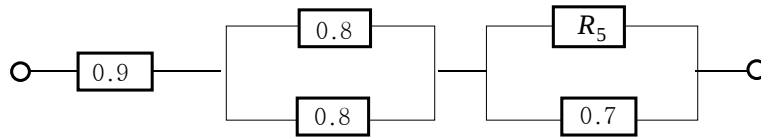
$$MTBF_S = \sum_{i=1}^n \frac{\theta_0}{i} \quad (9.140)$$

\* 그리고, 시스템의 고장률  $\lambda_S$  는 다음 식으로 구해짐.

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

여기서,  $\theta_0 = 1/\lambda_0$  인 경우임.

**예제 9.27** 다음과 같이 구성된 시스템이 있다. 전체 신뢰도  $R_S=0.85$ 로 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 :  $R_{S1} = 1 - (1 - 0.8)^2 = 0.96$

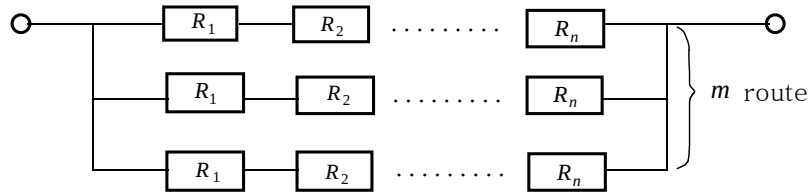
신뢰도  $R_5$ , 0.7의 부품 2개로 병렬결합된 부분의 신뢰도 :

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

### 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.

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

\* 병렬인 경우의 m route에서의 신뢰성은 다음과 같음.

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

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

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

**예제 9.28**  $\lambda = 0.002$  (/시간)인 부품 3개가 병렬결합되어 있다. 전체 평균고장률  $\lambda_s$  는 얼마인가?

**해설**

$$\text{MTBF}_s = \frac{1}{\lambda_s} = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{2\lambda} + \frac{1}{3\lambda} = \frac{11}{6\lambda} \rightarrow \lambda_s = \frac{6\lambda}{11} = \frac{6 \times 0.002}{11} = 1.09 \times 10^{-3} \text{ (/시간)}$$

### 5.3.2 n 중 k (k out of n) 시스템 신뢰도 2006

\*  $n$ 개 중  $k$ 개만 작동하면 ( $1 \leq k \leq n$ ) 시스템이 작동하는 경우 각 구성품의 신뢰도를  $R$  이라 하면 시스템의 신뢰도  $R_s$  는 다음과 같음.

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

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

$$\text{MTBF}_s (= \theta_s) = \sum_{i=k}^n \frac{\theta_0}{i} = \text{MTBF}_0 \left( \frac{1}{k} + \dots + \frac{1}{n} \right) \quad (9.146)$$

**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  $R_M$  은 다음과 같음.

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

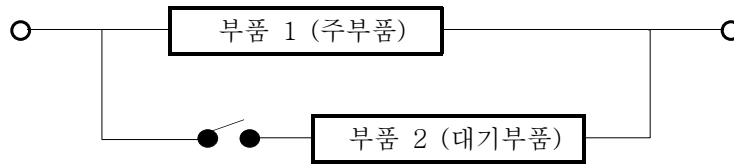
$$= (4)(0.970)(0.01) + (1)(0.960) = 0.0388 + 0.960 = 0.9988$$

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

### 5.3.3 대기결합구조의 시스템 신뢰도

#### (1) 대기결합구조의 의미

- \* 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  $R_1$ 과 대기부품인 부품 2의 신뢰도  $R_2$ 가 각각 평균고장률이  $\lambda_1$ 과  $\lambda_2$ 인 지수분포에 따르고, 이 시스템의 임무기간(mission time)이  $T$ 라 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<sub>S</sub>는 2배, 신뢰도  $R_S$ 는  $(1 + \lambda T)$ 배가 증가함. 즉,

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

$$\textcircled{2} \text{ 전환스위치 신뢰도 } R_{SW} \text{를 고려할 경우 } R_S = e^{-\lambda T} (1 + R_{SW} \cdot \lambda T) \quad (9.149)$$

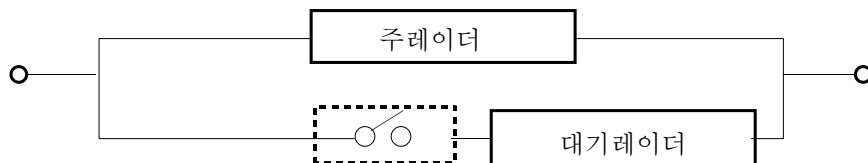
$$\textcircled{3} \text{ MTBF}_S = \int_0^T e^{-\lambda t} (1 + \lambda T) dt = \frac{2}{\lambda} \quad (9.150)$$

- ③ 일반적으로  $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_n = \lambda$ 인  $n$ 개의 부품이 대기결합구조로 구성된 경우

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

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

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

**해설**

\*  $\lambda = 0.001$ ,  $T=24$ 이므로 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 9.33** 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/cm <sup>2</sup> | 3,000kgf/cm <sup>2</sup> |
| 표준편차 | 200kgf/cm <sup>2</sup>   | 400kgf/cm <sup>2</sup>   |

#### 해설

강도( $S$ )와 스트레스( $Q$ )의 차를  $D$ 라 하면

$$\begin{aligned} R(t) &= P_r(D > 0) = P_r\left(U > \frac{0 - \mu_d}{\sigma_d}\right) = P_r\left(U > \frac{0 - 1,200}{447.21}\right) \\ &= P_r(U > -2.68) = 1 - P_r(U \leq -2.68) = 1 - 0.0037 = 0.9963 \end{aligned}$$

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

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

## 7. 보전성과 가동성

### 7.1 보전성 (Maintainability)

#### 7.1.1 보전성의 의미 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, 사용자에게 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  $t=0$ 에서 시간  $T$ 까지 보전을 완료하는 확률임.

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

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

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

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

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

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

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

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

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} \quad (9.161)$$

\* 그리고  $n$ 개의 구성부품으로 조립된 기계의 경우의 MTTR은 다음과 같이 구함.

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i t_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (9.162)$$

여기서,  $n$  : 기계의 구성부품 수,  $\lambda_i$  : 각 구성부품의 평균고장률(/시간)

$t_i$  : 각 부품이 고장난 경우의 평균수리시간

\* 또한  $n_i$ 개의 부품으로 구성된  $N$ 개의 부분으로 된 시스템인 경우의 MTTR은 다음과 같이 구함.

$$MTTR = \frac{\sum n_i \lambda_i t_i}{\sum n_i \lambda_i} \quad (9.163)$$

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  $t=400$ 시간에서 이 장치의 추정 보전도는? [기사 기출]

**해설**

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

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

**예제 9.35** 수리율  $\mu=2.0$ (/시간)으로 일정할 때 3시간 이내에 보전을 완료할 확률은?

**해설**

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

여기서,  $M(t)$  : 고장난 시스템이  $t$  시간 이내에 회복될 확률,  $\mu=2.0$ (/시간)

**예제 9.36** 만일  $n_i$  개의 부품으로 구성된 5개의 부분으로 된 시스템이 있으며, 각 부분의 구성부품수  $n_i$ 와 각 구성부품의 평균고장률  $\lambda_i$  및 각 부품이 고장난 경우의 평균수리시간  $t_i$ 가 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**

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

## (2) 평균정지시간 (MDT)

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

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

여기서,  $t_i$  는 장치의 예방보전시간,  $f_p$  는 예방보전횟수

- \* 그리고 장치의 사후보전(BM)은 보통 구간데이터로 주어지며, 사용개시후의 각 시간구간의 중앙값을  $t_i$ , 각 시간구간의 빈도(사후보전횟수)를  $f_b$ 라 하면 평균사후보전시간  $M_{bt}$ (이것은 MTTR과 동일함)는 다음과 같이 구함.

$$M_{bt}(MTTR) = \frac{\sum_{i=1}^n t_i f_i}{f_b} \quad (9.165)$$

- \* 장치의 보전(예방보전과 사후보전)을 위해 장치가 정지된 시간의 평균을 평균정지시간(MDT)이라고 부름. 따라서 평균정지시간(MDT)은 다음과 같음.

$$MDT = \frac{\text{총 보전작업 시간}}{\text{총 보전작업 건수}} \quad (9.166)$$

- \* 그리고 사후보전(BM)만으로 평균정지시간(MDT)을 표현하면 이는 평균수리시간(MTTR)과 같게 됨.

- \* 예방보전빈도(또는 건수)를  $f_p$ , 평균예방보전시간을  $M_{pt}$ , 사후보전빈도(또는 건수)를  $f_b$ , 평균사후보전시간을  $M_{bt}$ 라고 하면 식 (9.166)은 다음과 같이 됨.

$$MDT = \frac{f_p \cdot M_{pt} + f_b \cdot M_{bt}}{f_p + f_b} \quad (9.167)$$

여기서, 예방보전빈도  $f_p$ 는 예방보전계획에 의거하여 결정됨.

- \* 따라서 만일 2,000시간 간격으로 1회씩 예방보전을 실시하기로 계획하였다면 20,000시간 동안에는 10회의 예방보전을 하게 됨. 그러므로  $f_p = 10$ 이 됨.

- \* 그리고 사후보전빈도  $f_b$ 는 장치의 신뢰도로부터 결정됨. 따라서 만일 이 장치의 신뢰도가 평균고장률  $\lambda = 0.02$ (/시간)인 지수분포에 따른다면 20,000시간 동안의 사후보전빈도  $f_b$ 는 다음과 같음.

$$f_b = \lambda \cdot t = 0.02 \times 20,000 = 400 \text{ 회}$$

**예제 9.37** 평균예방보전시간  $M_{pt} = 630$ 시간, 예방보전빈도  $f_p = 10$ , 평균사후보전시간  $M_{bt} = 3.1$ 시간, 사후보전빈도  $f_b = 40$ 일 때 평균정지시간 MDT는 얼마인가?

**해설**

$$MDT = \frac{f_p \cdot M_{pt} + f_b \cdot M_{bt}}{f_p + f_b} = \frac{10(630) + 40(3.1)}{10 + 40} = \frac{6,300 + 124}{50} = 128.48 \text{ (시간)}$$

### (3) 보전성의 기타 척도

(가) MDT(Mean Down Time, 평균정지시간)  $1/\mu$

예방보전(PM)과 사후보전(BM)을 모두 실시할 때의 보전성의 척도

(나) 필요예비품수  $C$ 

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

여기서,  $n$  : 부품수,  $\lambda$  : 고장률,  $T$  : 작동시간,  $\alpha$  : 품질률(%)

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

(다) 최적점검주기  $T$ 

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

여기서,  $\lambda$  : 고장률( $\lambda = 1/\text{MTBF}$ ),  $C_i$  : 점검 1회당 코스트

$C_e$  : 설비 다운타임당 손해액

## 7.2 가동성 (Availability)

## 7.2.1 가동성의 의미 2020 등 총5회

- \* 신뢰도함수  $R(t)$  가 평균고장률이  $\lambda$  (평균수명  $\theta$  의 역수)인 지수분포에 따르고, 보전도함수  $M(t)$ 가 평균수리율  $\mu$ 인 지수분포에 따른다고 하면 신뢰도함수  $R(t)$  와 식 (9.159)에 의거 보전도함수  $M(t)$ 는 다음과 같음.

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

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

- \* 위 식에서 신뢰도란 시스템이  $t$  시간 이후 생존할 확률을 의미하고, 보전도는 고장난 시스템이  $t$  시간 이내에 회복될 확률을 의미함.
- \* 한편, 시스템의 가동성  $A(t)$ 는 다음과 같이 되는 것으로 증명되어져 있음.

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

- \* 상기 식에서  $t$  를  $\infty$ 로 수렴시키면

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

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

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

- \* 지수분포인 경우  $\text{MTBF} = 1/\lambda$ ,  $\text{MTTR} = 1/\mu$ 이므로 이를 이용해 다시 쓰면 다음 식에 의해 가동성( $A$ )이 구해짐.

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

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  $\rho$ 를 써서 나타내면 다음과 같음.

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

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

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

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

\* 또한 **장치(equipment)의 이용도**는  $A_E(T; t)$ 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)

$$\begin{aligned} A_E(T; t) &= e^{-\lambda T} + (1 - e^{-\lambda T})(1 - e^{-\mu t}) \\ &= 1 - (1 - e^{-\lambda T})e^{-\mu t} \end{aligned} \quad (9.176)$$

여기서,  $\lambda$ 는 고장률(/시간),  $\mu$ 는 수리율(/시간),  $t$ 는 수리제한시간(시간),  
 $T$ 는 전동작시간(시간)을 의미.

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

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

**예제 9.38** 고장률  $\lambda=0.063$ (/시간), 수리율  $\mu=0.4$ (/시간)일 때 시간의 이용도를 구하라.

**해설**

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

**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**

$$\textcircled{1} \text{ MTTR} = \frac{\sum t_i}{n} = \frac{\sum (t_i r_i)}{\sum r_i} = \frac{3 \times 5 + 6 \times 2 + \dots + 5 \times 4}{5 + 2 + \dots + 4} = \frac{69}{18} = 3.83 \text{ 시간}$$

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

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

## 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<br>* 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<br>* 각종 수학적모델, 지식공학적 진단<br>* 스크리닝에의 응용                                    | ●                     | ○<br>한계<br>여유도<br>체크      | ●<br>재현<br>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<br>* 비파괴시험으로 해석<br>* 기계, 전기 등의 고유기술에 의한 해석<br>* 전자현미경 등 각종 표면해석법, 계측방법 | ○<br>테스트<br>데이터<br>해석 | ●<br>예지<br>파라<br>메타<br>감시 | ●<br>고장,<br>파괴<br>원인<br>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 구 라망항공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

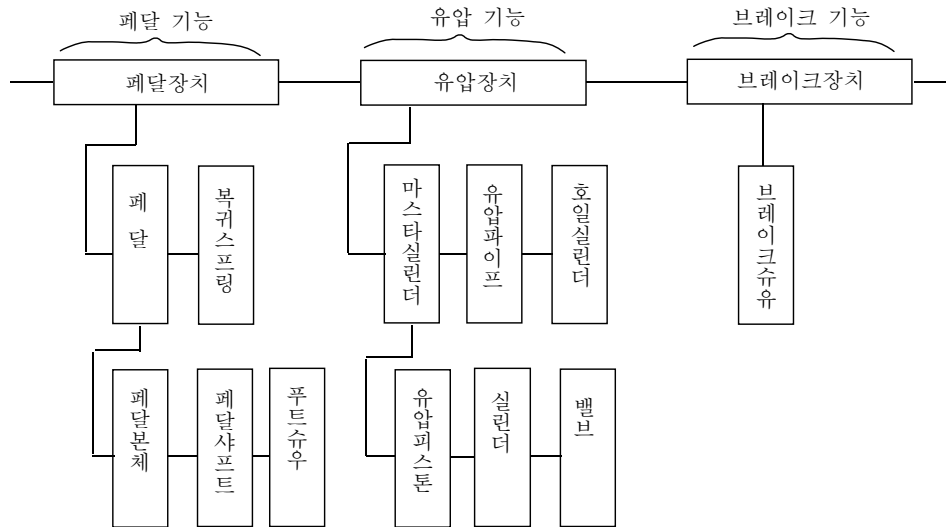
- \* 고장등급 결정방법에는 ① 고장평점법, ② 치명도평점법의 2가지가 있음.

#### (1) 고장평점법

- \* 고장평점법의 평가항목으로는 5개의 평가항목인  $C_1 \sim C_5$ 가 있고, 이들의 평가항목에 의거 시스템의 평가등급  $C_s$ 는 다음 식으로 구해지며,  $C_1, C_2, C_3$ 의 평가점은 <표 9.8>이 됨.

$$C_s = \sqrt[3]{C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5} \quad (9.178)$$

\* 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)

| <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>시스템 : ○○수송시스템</p> <p>서브시스템 : 브레이크시스템</p> </div> <div style="text-align: center;"> <h2 style="margin: 0;">F M E A</h2> </div> <div> <p>날짜: 2007년 02월16일</p> <p>작성자: 반영식</p> <p>승인자: 권오운</p> </div> </div> |         |                     |                |                                                      |           |            |        |                   |                   |                  |        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------------------|----------------|------------------------------------------------------|-----------|------------|--------|-------------------|-------------------|------------------|--------|
| 번호                                                                                                                                                                                                                                                                             | 대상 품목   | 기능                  | 고장 모드          | 추정원인                                                 | 영향        |            | 고장 검지법 | 고장평점              |                   | 고장 등급            | 대책     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                |         |                     |                |                                                      | 서브 시스템    | 시스템        |        | 기능 C <sub>1</sub> | 빈도 C <sub>3</sub> |                  |        |
| 1                                                                                                                                                                                                                                                                              | 페달      | 유압장치 (마스타 실린더) 작동시킴 | 페달을 밟아 누를 수 없음 | 1. 페달 그랭크 절손<br>2. 페달 아래에 이물질 축적<br>3. 마스터 실린더 로드 절손 | 제동 불능     | 정지 불능      |        | 10                | 1<br>2<br>5       | III<br>II<br>I   | 로드재 변경 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                |         |                     | 페달복귀 불능        | 스프링 절손                                               | 제동해제 불가   | 브레이크 기능정지  |        | 8                 | 5                 | II               |        |
| 2                                                                                                                                                                                                                                                                              | 유압 파이프  | 유압전달                | 파이프연 결부파손      | 1. 과대응력<br>2. 용접불량<br>3. 부식                          | 제동력 감소    | 정지 지연      | 오일 누설  | 7                 | 2<br>3<br>2       | III<br>II<br>III |        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                |         |                     | 파이프의 크랙발생      | 1. 피로<br>2. 과대응력                                     | 제동력의 점차감소 | 정지 불충분     | 오일 스미  | 4                 | 1<br>2            | IV<br>III        |        |
| 3                                                                                                                                                                                                                                                                              | 브레이크 슈우 | 차륜의 제동              | 슈우의 미끄러짐       | 1. 표면재 불량<br>2. 표면재 피로                               | 제동 불량     | 정지거리가 크게 됨 |        | 3                 | 7<br>7            | II<br>II         |        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                |         |                     | 슈우의 소음         | 1. 재질불량<br>조립불량                                      | 소음 발생     | 불쾌감        |        | 1                 | 7<br>5            | III<br>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.

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

&lt;표 9.12&gt; 고장영향의 크기에 따른 평점

| 항목                               | 내용                      | 계수  |
|----------------------------------|-------------------------|-----|
| $F_1$<br>(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 |
| $F_2$<br>(시스템에 미치는<br>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 |
| $F_3$<br>(발생빈도)                  | 발생빈도가 높음                | 1.5 |
|                                  | 발생가능성이 있음               | 1.0 |
|                                  | 발생가능성이 적음               | 0.7 |
| $F_4$<br>(방지의 가능성)               | 불능                      | 1.3 |
|                                  | 방지가능                    | 1.0 |
|                                  | 간단히 방지됨                 | 0.7 |
| $F_5$<br>(신규설계 여부)               | 약간 변경된 설계               | 1.2 |
|                                  | 유사한 설계                  | 1.0 |
|                                  | 동일한 설계                  | 0.8 |

\* 치명도평점  $C_E$ 에 대응하는 고장등급은 <표 9.13>에 의해 결정됨.

<표 9.13> 치명도평점  $C_E$ 에 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 치명도 해석을 포함시킨 것을 FMECA(Failure Mode, Effect and Criticality Analysis)라고 함.
- \* 고장등급이 I 또는 II인 고장모드의 일람표를 작성하고, 이들 각각의 고장모드별의 치명도 지수를 다음 식 (9.180)에 의거 계산함.

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

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

$\kappa_A$  : 운용시의 고장률 보정계수,  $\kappa_E$  : 운용시의 환경조건의 수정계수

$\lambda_G$  : 기준고장률(시간 또는 사이클당)

$t$  : 임무당 동작시간(또는 횟수), 운용시간(또는 횟수)

$\alpha$  :  $\lambda_G$  중에 당해 고장이 차지하는 비율(고장모드 차지비율)

$\beta$  : 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)를 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

- 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.

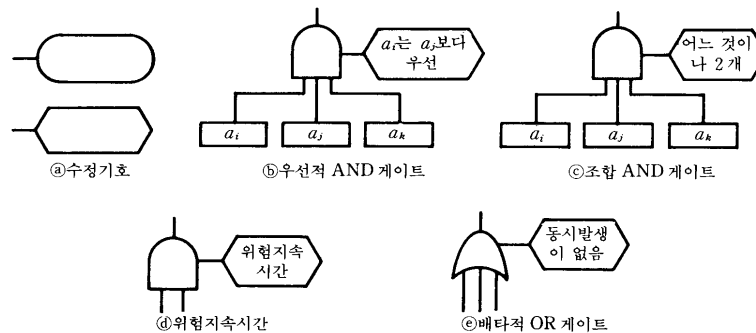


[그림 9.19] 억제게이트와 부정게이트

### (3) 조건 게이트

\* AND게이트 또는 OR게이트 수정기호를 병용함으로써 각종 조건부 게이트를 구성함.

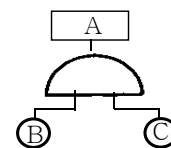
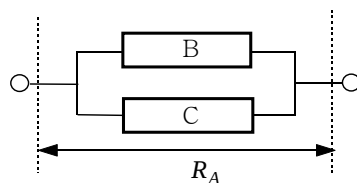
- ① 우선적 AND게이트 → 입력사상 중 어떤 사상이 다른 사상보다 앞에 일어났을 때 출력사상이 생김.
- ② 조합 AND게이트 → 3개 이상 입력사상 중 어느 것이나 2개가 일어나면 출력이 생김.
- ③ 위험지속기호 → 입력사상이 생겨 어떤 일정한 시간 동안 지속하였을 때 출력이 생김. 만약 지속되지 않으면 출력은 생기지 않음.
- ④ 배타적 OR게이트 → 2개 이상의 입력이 존재하는 경우에는 출력이 생기지 않음.



[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

$$\textcircled{1} F_A = F(B \text{ AND } C) = F(B \cap C)$$

여기서, B와 C가 서로 독립이면

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

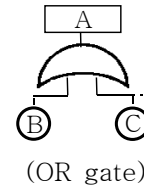
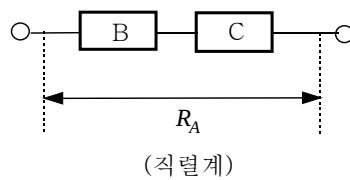
② 혹은 ①과 달리 계산하는 방법으로

$$\begin{aligned} F_A &= 1 - R_A = 1 - [1 - (1 - R_B)(1 - R_C)] \\ &= (1 - R_B)(1 - R_C) = F_B \cdot F_C \end{aligned}$$

③ 한편,  $n$  개의 기본사상의 AND 결합시에는 다음과 같이 됨.

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

(2) OR Gate의 경우



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

$$\textcircled{1} F_A = F(B \text{ OR } C) = F(B \cup C)$$

$$(B \text{와 } C \text{가 독립사상이면}) \quad F_A = F_B + F_C - F_B \cdot F_C \quad (9.183)$$

② 위 ①과 다른 방법으로 계산하면

$$\begin{aligned} F_A &= 1 - R_A = 1 - R_B \cdot R_C \\ &= 1 - (1 - F_B)(1 - F_C) \\ &= F_B + F_C - F_B \cdot F_C \end{aligned} \quad (9.184)$$

③ 한편,  $n$  개의 기본사상의 OR 결합시에는

$$\begin{aligned} F_S &= 1 - (1 - F_1)(1 - F_2) \cdots (1 - F_n) \\ &= 1 - \prod_{i=1}^n (1 - F_i) \end{aligned} \quad (9.185)$$

(3) 사상의 고장확률을 구하는 방법 1998

\* 톱사상 A의 고장확률  $F_A$ 를 구하기 위해서는 먼저 하위사상인 B, C의 고장확률  $F_B, F_C$ 를 구하는 것이 중요한 데, 그 중 하나의 예로서  $F_B$ 의 고장확률 산출 방법은 다음과 같음.

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

이므로, 사상 B가 고장날 확률  $F_B$ 는

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

여기서,  $t$  는 사용(가동)시간,  $R_B$  는 B의 신뢰도이고,

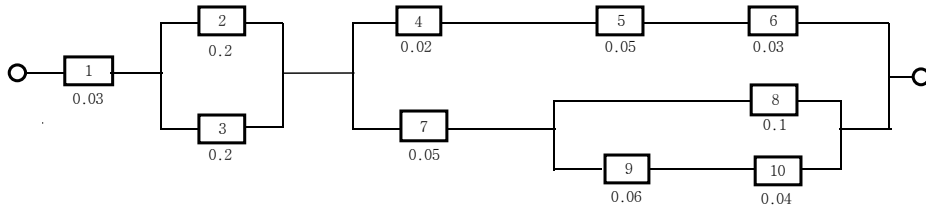
MTBF는 평균고장간격시간(평균수명)으로서 다음과 같음.

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

#### (4) MTBF와 시스템이 고장날 확률( $F_S$ )와의 상관관계

\* MTBF와  $F_S$ 의 관계는  $MTBF(\uparrow) \rightarrow R(t)(\uparrow) \rightarrow F(t)(\downarrow) \rightarrow F_S(\downarrow)$ 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.

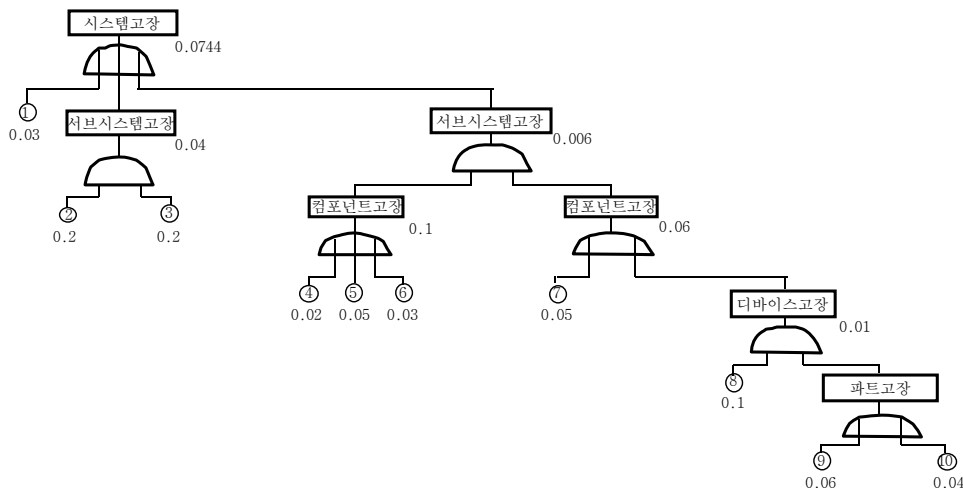
(1) 파트 고장확률 (⑨, ⑩) :  $F_{S1} = 1 - (1 - F_9)(1 - F_{10}) = 1 - (1 - 0.06)(1 - 0.04) = 0.098$

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

(3) 우측의 서브시스템 고장확률 :

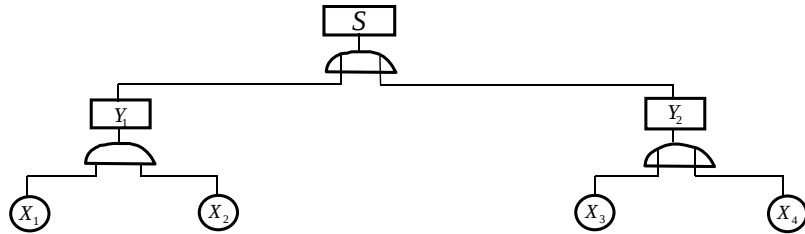
$$F_{S3} = \{1 - (1 - 0.02)(1 - 0.05)(1 - 0.03)\} \times \{1 - (1 - 0.05)(1 - 0.01)\} = 0.1 \times 0.06 = 0.006$$

(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  $R_S = 1 - F_S = 1 - 0.706 = 0.294$

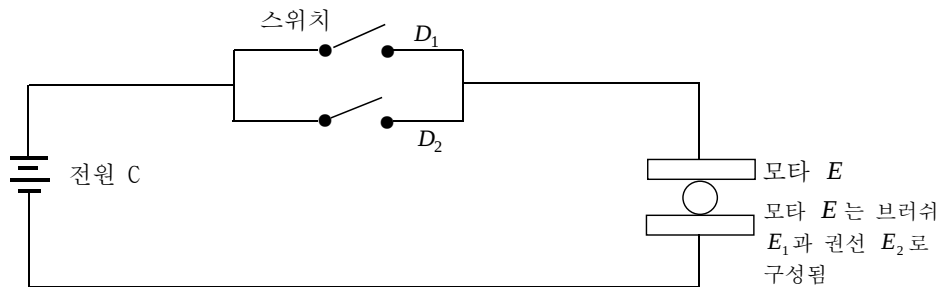
$$\text{여기서, } F_S = F_{Y_1} + F_{Y_2} - F_{Y_1} \cdot F_{Y_2} = 0.02 + 0.7 - 0.02 \times 0.7 = 0.706$$

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

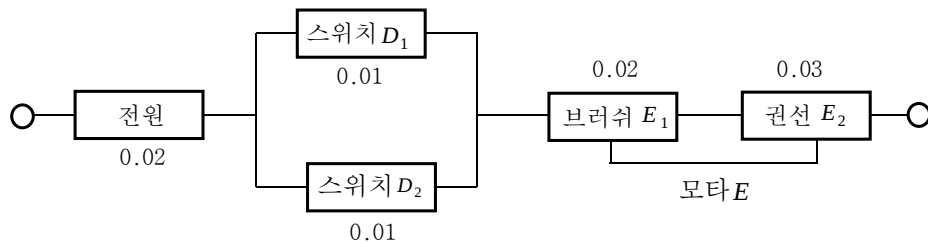
$$F_{Y_2} = F_{X_3} + F_{X_4} - F_{X_3} \cdot F_{X_4} = 0.4 + 0.5 - 0.4 \times 0.5 = 0.7$$

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

**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).



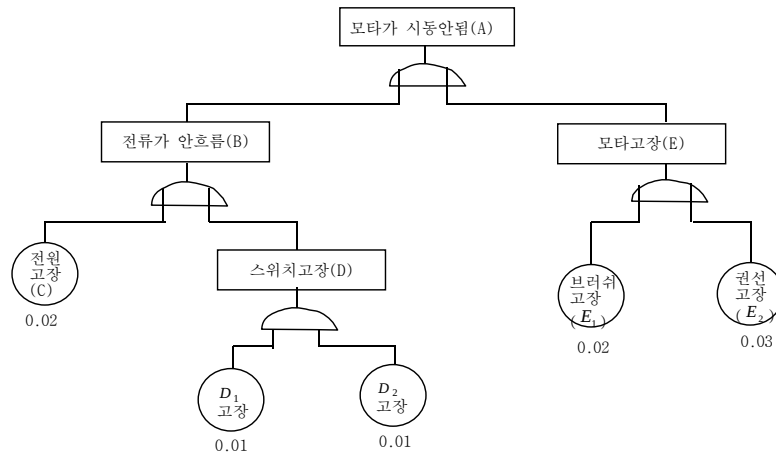
[그림 1] 회로도



[그림 2] 신뢰성블록도

**해설**

[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.

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

$$\text{여기서, } F_B = 1 - (1 - F_C)(1 - F_D) = 1 - (1 - 0.02)(1 - 0.0001) = 1 - 0.9799 = 0.0201$$

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

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

### 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<br>② 정성적 해석 방법<br>③ 표를 사용한 해석<br>④ 총합(또는 전체)적 해석<br>⑤ 하드웨어의 고장해석 | ① Top-down 방식<br>② 정량적 해석 방법<br>③ 논리기호를 사용한 해석<br>④ 특정사상에 대한 해석<br>⑤ 소프트웨어나 인간의 과오까지도 포함한 고장해석이 가능 |

## 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  $T$ 는  $T = \max(T_1, T_2)$ 가 된다.



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

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

단,  $T_1$ 과  $T_2$ 는 서로 독립이라고 가정하라. (1982년 1차)

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

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

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 | $5.0 \times 10^{-6}$ |
| B  | 15 | $2.2 \times 10^{-6}$ |
| C  | 30 | $0.5 \times 10^{-6}$ |

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.

$$MTTF = 1/\lambda_s, \quad \text{단, 직렬연결인 경우 } \lambda_s = \sum \lambda_i$$

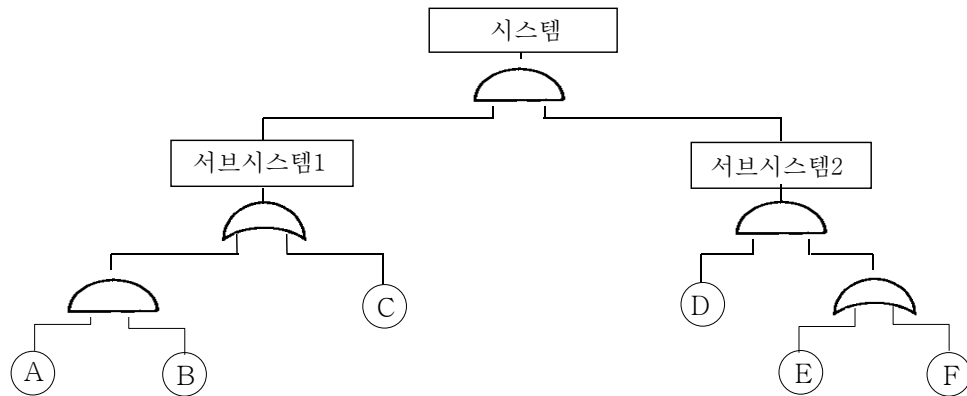
04 신뢰성 개선은 설계시에 행하는 것이 가장 효과적이다. 설계단계에서 신뢰성을 향상시킬 수 있는 방법에 대해 기술하시오. (8가지 이상) (25점). (2000년 1차)

☞ 힌트 : 본문 『신뢰성 설계』 해설 참조

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.