제 6 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 기간동안 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 [공기1회]

* 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 사회적으로 큰 영향을 갖게 되고, 그의 고장이 큰 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 신뢰성의 척도

1.2.1 신뢰성 척도의 계산 : $R(t)$, $F(t)$, $f(t)$, $\lambda(t)$ [공기3회] [품기3회]

* 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.

$$R(t) = \frac{n(t)}{N} \qquad (6.1)$$

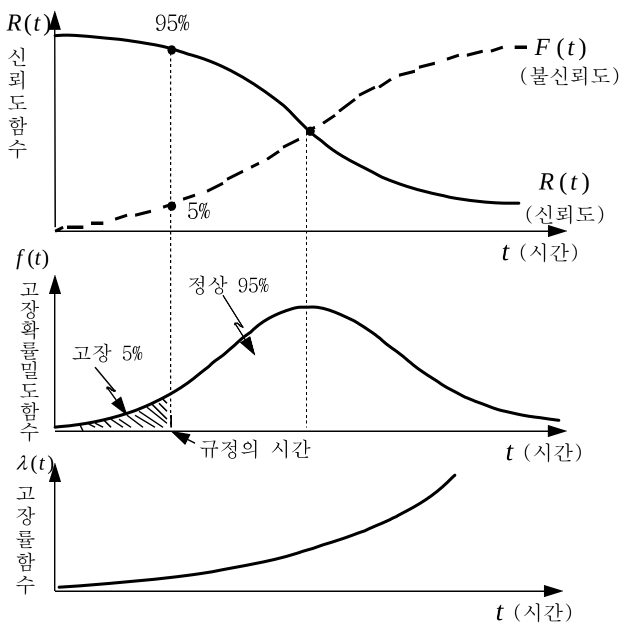
* 그리고 시점 t 까지의 고장난 것의 누적고장확률(불신뢰도) $F(t)$ 는 다음과 같음.

$$F(t) = 1 - \frac{n(t)}{N} \qquad (6.2)$$

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

$$R(t) + F(t) = 1 \qquad (6.3)$$

* [그림 6.1]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 6.1] 신뢰도함수, 고장밀도함수와 고장률

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

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \qquad (6.4)$$

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

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \tag{6.5}$$

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt = 1 - F(t) \tag{6.6}$$

* 또한 식 (6.4)에서 $F(t)$ 대신에 $1-R(t)$를 대입하여 미분하면 $f(t)$는 다음과 같이 됨.

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \tag{6.7}$$

* 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.

$$\text{단위시간당 고장률} = \frac{R(t) - R(t+\Delta t)}{\Delta t \cdot R(t)} \tag{6.8}$$

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.

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

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \tag{6.9}$$

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 (6.4) 또는 식 (6.7)과 식 (6.9) 대신에 다음 식에 의하여 $f(t)$와 $\lambda(t)$를 계산함.

$$f(t) = \frac{\text{시간 } t\text{와 } (t+\Delta t) \text{ 간의 고장개수}}{\text{샘플수}} \cdot \frac{1}{\Delta t} = \frac{n(t) - n(t+\Delta t)}{N \cdot \Delta t} \tag{6.10}$$

$$\lambda(t) = \frac{\text{시간 } t\text{와 } (t+\Delta t) \text{ 간의 고장개수}}{t\text{시점의 생존개수}} \cdot \frac{1}{\Delta t} = \frac{n(t) - n(t+\Delta t)}{n(t) \cdot \Delta t} \tag{6.11}$$

예제 6.1 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 =20,000km에서의 $R(t), F(t), f(t)$ 및 $\lambda(t)$ 는 다음과 같이 계산됨.

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

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

$$f(t=20{,}000)=\frac{n(t)-n(t+\Delta t)}{N\cdot\Delta t}=\frac{46-(46-19)}{46(20{,}000)}=0.207\times10^{-4}$$

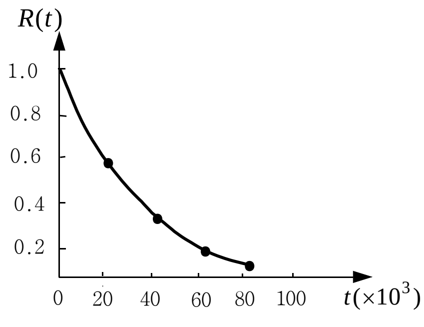
$$\lambda(t=20{,}000)=\frac{n(t)-n(t+\Delta t)}{n(t)\cdot\Delta t}=\frac{46-(46-19)}{46(20{,}000)}=0.207\times10^{-4}$$

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

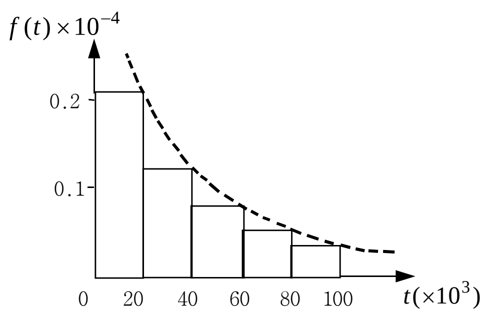
[표 1] 신뢰성척도 $R(t), F(t), f(t)$ 및 $\lambda(t)$ 의 계산

t	고장개수	$R(t)$	$F(t)$	$f(t)\times10^{-4}$	$\lambda(t)\times10^{-4}$
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

1.2.2 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_i 와 그 누적분포함수 $F(t_i)$ 가 직선관계를 보이는 성질을 이용한 것임.

(1) 메디안 랭크(Median Rank)법 [품기1회]

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

$$F(t_i) = \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \tag{6.12}$$

$$R(t_i) = 1 - F(t_i) = \frac{n - i + 0.7}{n + 0.4} \tag{6.13}$$

$$\lambda(t_i) = \frac{f(t_i)}{R(t_i)} = \frac{1}{(n - i + 0.7)(t_{i+1} - t_i)} \tag{6.14}$$

$$f(t_i) = \frac{1}{(n + 0.4)(t_{i+1} - t_i)} \tag{6.15}$$

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.

$$F(t_i) = \frac{i}{n+1} \tag{6.16}$$

$$R(t_i) = 1 - F(t_i) = 1 - \frac{i}{n+1} = \frac{n+1-i}{n+1} \tag{6.17}$$

$$f(t_i) = \frac{1}{(n+1)(t_{i+1} - t_i)} \tag{6.18}$$

$$\lambda(t_i) = \frac{f(t_i)}{R(t_i)} = \frac{1}{(n+1-i)(t_{i+1} - t_i)} \tag{6.19}$$

(3) 선험적(Empirical) 방법

* 이는 지수확률지를 이용한 경험적 방법에 따른 신뢰성척도의 계산 방법임.

$$F(t_i) = \frac{i}{n} \tag{6.20}$$

$$R(t_i) = 1 - \frac{i}{n} = \frac{n-i}{n} \tag{6.21}$$

$$f(t_i) = \frac{1}{n(t_{i+1} - t_i)} \tag{6.22}$$

(4) Midpoint Rank법

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

$$F(t_i) = \frac{i - 0.5}{n} \tag{6.23}$$

1.3 신뢰도함수 $R(t)$ [품기4회]

$$R(t) = e^{-\lambda t} [= \exp(-\lambda t)] \tag{6.24}$$

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

예제 6.2 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 6.3 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 [품기1회]

* 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.

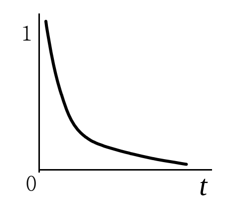
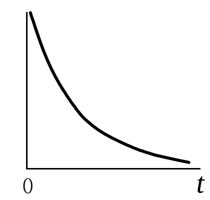
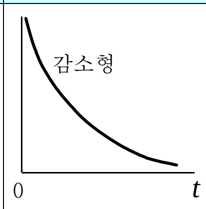
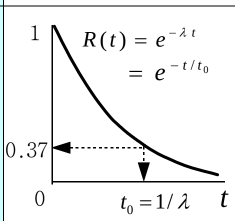
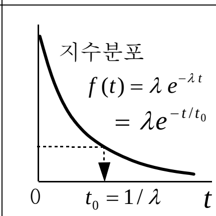
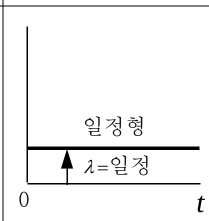
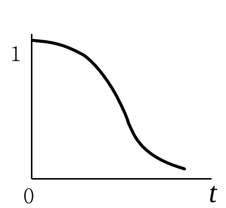
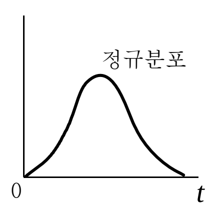
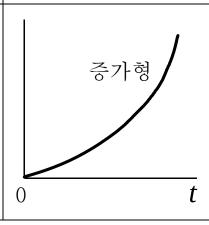
* 그러나 여러 개의 부품이 조합되어 만들어진 기기나 시스템의 고장확률밀도함수는 지수분포에 따르게 됨. 이는 고장률이 상이한 여러 개 부품이 조합되어 있기 때문에 기기나 시스템 전체의 고장률은 이들의 평균이 되므로 기기나 시스템의 고장률은 일정하게 되기 때문임.

* 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 븐포임.
  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 6.1>과 같음.

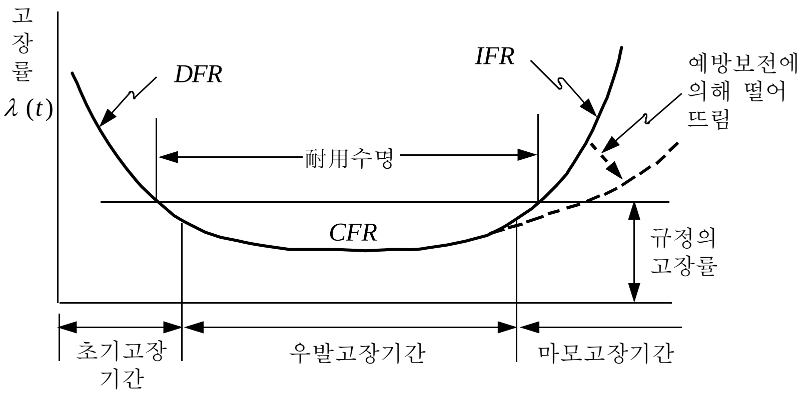
<표 6.1> 고장률의 형과 $f(t)$ 와의 관계

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 시스템의 수명곡선인 욕조곡선 [공기7회] [품기1회]

(1) 욕조곡선의 형태 [품기7회]

* 여러 가지 부품으로 구성된 제품이나 시스템의 가장 전형적인 고장률 패턴은 [그림 6.2]와 같은 욕조곡선(bath-tub curve)을 따름.



[그림 6.2] 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) 고장률의 패턴별 고장대책 [공기3회] [품기2회]

* 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.

2.3 평균수명과 평균고장률 [품기2회]

2.3.1 평균수명 $E(t)$ [품기4회]

(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

$$E(t) = \int_0^\infty t \cdot f(t)dt = \int_0^\infty R(t)dt \tag{6.25}$$

(2) 고장확률밀도함수 $f(t)$ 가 지수분포인 경우 [품기1회]

$$E(t) = \int_0^\infty R(t)dt = \int_0^\infty e^{-\lambda t}dt = \frac{1}{\lambda} \tag{6.26}$$

$$V(t) = \frac{1}{\lambda^2} \tag{6.27}$$

$$\text{MTBF(or MTTF)} = t_0 = \frac{1}{\lambda} \tag{6.28}$$

* 특성수명인 $t = t_0$ (MTBF or MTTF)에서는 $R(t) = e^{-1} \approx 0.368$

* MTBF를 실측 데이터로부터 구할 때

$$\hat{\theta} = MTBF = \frac{T}{r} = \frac{1}{\lambda} \tag{6.29}$$

여기서, T : 총동작시간, r : 고장횟수

(3) 고장확률밀도함수 $f(t)$ 가 정규분포인 경우

$$E(t) = \mu = \frac{\sum (t_i \cdot r_i)}{\sum r_i} \tag{6.30}$$

여기서, t_i : i 번째 고장체크시간, r_i : t_i 까지의 구간고장개수

$$V(t) = \sigma^2 \tag{6.31}$$

여기서, $\sigma = \sqrt{\frac{(\sum r_i)(\sum t_i^{\,2} r_i) - (\sum t_i r_i)^2}{\sum r_i (\sum r_i - 1)}}$

$V(t)$: 평균수명의 분산

(4) 고장확률밀도함수 $f(t)$가 와이블분포(대부분 위치모수 $\gamma=0$)인 경우

* 이 경우에는 $R(t) = \exp\left(-(t/\eta)^m\right)$이 되므로, 감마함수표를 이용한다.

$$E(t) = \eta \cdot \Gamma\left(1+\frac{1}{m}\right) = \hat{\mu} \tag{6.32}$$

$$V(t) = \eta^2 \cdot \left[\Gamma\left(1+\frac{2}{m}\right) - \Gamma^2\left(1+\frac{1}{m}\right)\right] = \hat{\sigma}^2 \tag{6.33}$$

2.3.2 평균고장률 λ

(1) 고장확률밀도함수 $f(t)$가 지수분포인 경우

* 평균고장률 λ와 평균수명 $E(t)$는 역수관계이다.

$$E(t) = \text{MTBF 또는 MTTF} \tag{6.34}$$

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} = \frac{1}{T/r} = \frac{r}{T} \tag{6.35}$$

여기서, λ : 평균고장률, r : 대상기간 중 총고장횟수, T : 총동작시간

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

$$\text{누적고장률 } H(t) = \int_0^t \lambda(t)dt = -\ln R(t) \tag{6.36}$$

* 시간 t_1과 t_2간의 구간고장률 $FR(t_1, t_2)$은

$$FR(t_1, t_2) = H(t_2) - H(t_1) = -\ln R(t_2) + \ln R(t_1) \tag{6.37}$$

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

* 시간 t_1과 t_2간의 구간평균고장률 AFR(Average Failure Rate)은

$$AFR(t_1, t_2) = \frac{\ln R(t_1) - \ln R(t_2)}{t_2 - t_1} \tag{6.38}$$

여기서, $f(t)$가 $\gamma=0$인 와이블분포에 따르면

$$AFR(t_1, t_2) = \frac{(t_2/\eta)^m - (t_1/\eta)^m}{t_2 - t_1} \tag{6.39}$$

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 T시간까지 총평균고장률 $AFR(T)$은

$$AFR(T) = \frac{\ln R(t)}{T} \tag{6.40}$$

예제 6.4 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. 신뢰성추정 [공기3회] [품기3회]

3.1 신뢰성추정의 개요

* 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 신뢰성추정 (전수고장시) [품기1회]

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

$$\hat{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i}{n} = \frac{T}{n} \tag{6.41}$$

여기서, n : 샘플수, T : 총시험시간, t_i : i번째 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 : 타점들이 직선관계이면 고장데이터가 가정된 분포를 따른다고 판정.

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

$$B_r = \frac{2r\left[\ln\left(\frac{t_r}{r}\right) - \frac{1}{r}\sum \ln x_i\right]}{1 + \frac{(r+1)}{6r}} \tag{6.42}$$

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.

예제 6.5 n=20에 대하여 245시간 동안의 진동시험결과 모두 고장났으며 고장발생시간 간격은 다음과 같다. 평균수명의 점추정치를 구하고, 이들 데이터는 지수분포를 가정해도 좋은지를 적합도검정 방법에 의거 검정을 실시하라.

21.2	0.1	15.3	5.8
26.7	2.1	4.3	7.3
11.3	7.5	14.1	32.1
2.8	6.7	16.9	17.6
12.6	2.3	7.7	4.5

해설

(1) 평균수명의 점추정

n=20개, r=20개, $T=\sum t_i = 218.9$이므로, 식 (6.41)에 대입하면 평균수명의 점추정치는

$$\hat{\theta} = \frac{T}{20} = \frac{218.9}{20} = 10.945 \text{ (시간)}$$

(2) 적합도 검정

① 가설설정 : H_0 : 지수분포에 따른다. H_1 : 지수분포에 따른다고 할 수 없다.

② 유의수준 : α=0.10으로 함.

③ 검정통계량의 값(B_r) 계산

r=20번째까지의 고장발생시간의 합이 t_r=218.9시간이고, $\ln 21.2$, $\ln 26.7, \cdots$, $\ln 4.5$를 구하여 이것을 모두 합하면 $\sum_{i=1}^{20} \ln x_i = 38.80$ 이므로, 이것을 식 (6.42)에 대입하여 검정통계량 B_r을 구하면 다음과 같음.

$$B_r = \frac{2r\left[\ln\left(\frac{t_r}{r}\right) - \frac{1}{r}\sum \ln x_i\right]}{1+\frac{(r+1)}{6r}} = \frac{2(20)\left[\ln\left(\frac{218.9}{20}\right) - \frac{1}{20}(38.80)\right]}{1+\frac{21}{120}} = 15.42$$

④ 기각역 설정

$B_r < \chi^2_{\alpha/2}(\nu) = \chi^2_{0.05}(19) = 10.12$ 또는 $B_r > \chi^2_{1-\alpha/2}(\nu) = \chi^2_{0.95}(19) = 30.14$이면 H_0 기각

⑤ 판정 : $\chi^2_{0.05}(19) = 10.12 < B_{20} = 15.42 < \chi^2_{0.95}(19) = 30.14$ 이므로, H_0를 기각할 수 없음. 즉, 이 통계량은 지수분포로 가정해도 좋음.

3.3 신뢰성추정 (지수분포의 경우) [품기4회]

* 확률분포의 모수추정 방법에는 점추정과 구간추정의 2가지 방법이 있음.
* 본 항에서는 공식에 의한 점추정 및 구간추정 방법을 알아보기로 함.

3.3.1 점추정

(1) 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

$$\hat{\theta} = \frac{\sum t_i + (n-r)t_c}{r} \tag{6.43}$$

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

② 도중에 교체하는 경우

$$\hat{\theta} = \frac{n \cdot t_c}{r} \tag{6.44}$$

여기서, $T = n \cdot t_c$

(2) 정수중단시험의 경우 [품기1회]

* 샘플 n개를 채취하여 r개가 고장날 때까지 시험하고, r개가 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)

$$\hat{\theta} = \frac{\sum t_i + (n-r)t_r}{r} \tag{6.45}$$

여기서, $T = \sum t_i + (n-r)t_r$

② 도중에 교체하는 경우 (수리하면서 사용하는 제품)

$$\hat{\theta} = \frac{n \cdot t_r}{r} \tag{6.46}$$

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

(3) 고장개수 $r=0$인 경우 [품기1회]

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

$$\sum_{r=0}^{c} \frac{e^{-m} \cdot (m)^r}{r!} = \alpha \quad (\text{단, } m = \lambda T) \tag{6.47}$$

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.

$$\text{신뢰수준 90\%일 때, } \theta_L = \frac{T}{2.3} \tag{6.48}$$

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

$$\text{신뢰수준 95\%일 때, } \theta_L = \frac{T}{2.99} \tag{6.49}$$

(4) 구간점검으로 고장난 것과 고장날 만한 것을 모두 새 것 교체한 경우 [품기1회]

* 이 경우의 평균수명은 다음 공식에 의거 추정함.

$$\hat{\theta} = \frac{\sum t_i r_i + \sum t_i k_i}{r} \tag{6.50}$$

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

k_i : i 시간에서의 고장날 만하기 때문에 교환한 구간교체수

r : 전체고장개수($r = \sum r_i$)

3.3.2 구간추정

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

$$P_r\left[\chi^2_{\alpha/2}(2r) \le \frac{2r\hat{\theta}}{\theta} \le \chi^2_{1-\alpha/2}(2r)\right] = 1-\alpha \tag{6.51}$$

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

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

(1) 양쪽구간 추정 [품기2회]

① 정수중단의 경우

$$\frac{2r\hat{\theta}}{\chi^2_{1-\alpha/2}(2r)} \le \theta \le \frac{2r\hat{\theta}}{\chi^2_{\alpha/2}(2r)} \quad (\text{단, } r\hat{\theta} = T) \tag{6.52}$$

② 정시중단의 경우

$$\frac{2r\hat{\theta}}{\chi^2_{1-\alpha/2}\{2(r+1)\}} \le \theta \le \frac{2r\hat{\theta}}{\chi^2_{\alpha/2}(2r)} \quad (\text{단, } r\hat{\theta} = T) \tag{6.53}$$

(2) 한쪽구간 추정

① 정수중단의 경우

$$\theta_L = \frac{2T}{\chi^2_{1-\alpha}(2r)} = \frac{2r \cdot \hat{\theta}}{\chi^2_{1-\alpha}(2r)} \tag{6.54}$$

② 정시중단의 경우

$$\theta_L = \frac{2T}{\chi^2_{1-\alpha}\{2(r+1)\}} = \frac{2r \cdot \hat{\theta}}{\chi^2_{1-\alpha}\{2(r+1)\}} \tag{6.55}$$

예제 6.6 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

☞ $n=10,\ r=4,\ t_c=50$ 이므로 평균수명의 점추정치는 다음과 같음.

$$\hat{\theta}=\frac{T}{r}=\frac{\sum_{i=1}^{r} t_i+(n-r)t_c}{r}=\frac{(13+25+32+44)+(10-4)(50)}{4}=103.5\ (\text{시간})$$

예제 6.7 어떤 제품에 대하여 MTTF를 추정하기 위하여 n=50개의 제품의 수명을 정시마감 t_c=100일을 정하여 놓고 관측하였더니 총고장수는 r=10개이고, 총동작시간은

$$T=\sum_{i=1}^{r} t_i+(n-r)t_c=\sum_{i=1}^{10} t_i+(50-10)(100)=4{,}500(\text{시간})$$

이었다. 신뢰수준 90%로 양쪽추정에 의한 MTTF의 구간추정을 실시하라.

해설

☞ 정시중단시험인 경우(교체하지 않는 경우)로서, 점추정치를 구하여 보면 다음과 같음.

$$\hat{\theta}=\widehat{MTTF}=\frac{T}{r}=\frac{4{,}500}{10}=450\ (\text{시간})$$

다음으로 양쪽추정에 의한 신뢰구간은 식 (6.53)에서 다음과 같이 구간추정됨.

$$\frac{2r\hat{\theta}}{\chi^2_{1-\alpha/2}\{2(r+1)\}}\le\theta\le\frac{2r\hat{\theta}}{\chi^2_{\alpha/2}(2r)}\ \text{에서}\ \frac{2(10)(450)}{\chi^2_{0.95}\{2(10+1)\}}\le\theta\le\frac{2(10)(450)}{\chi^2_{0.05}\{2(10)\}}$$

$$\rightarrow\ \frac{9{,}000}{33.92}\le\theta\le\frac{9{,}000}{10.85}\ \rightarrow\ 65.33\le\theta\le 829.49\quad\therefore\ 265.33\le\theta\le 829.49$$

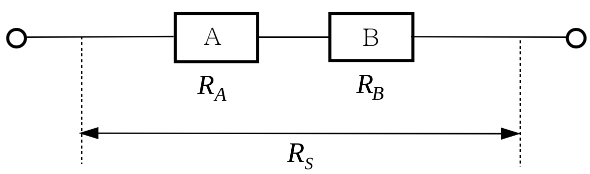
따라서 MTTF의 90% 신뢰구간은 (266시간, 830시간)이 됨.

4. 시스템의 신뢰도 [기지1회] [공기3회] [품기3회]

4.1 직렬결합모델의 신뢰도 [품기5회]

* 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 6.3]와 같이 A, B 2개의 부품이 직렬결합모델로 되어 있으면 이 기기가 제대로 기능을 발휘하기 위해서는 A와 B 2개의 부품이 모두 정상작동하여야 함.



[그림 6.3] 직렬결합모델

* 직렬결합모델의 전체 시스템이 작동하는 전체 신뢰도 R_S 는 다음과 같음.

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

* 만일 A, B가 서로 독립사상이면

$$R_S = P_r(A) \cdot P_r(B) = R_A \cdot R_B \tag{6.56}$$

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.

$$R_S = R_1 \cdot R_2 \cdots R_n = \prod_{i=1}^{n} R_i = e^{-(\lambda_1+\lambda_2+\cdots+\lambda_n)t} \tag{6.57}$$

* 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_S는 다음의 식으로 구해짐.

$$\lambda_S = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i = \lambda_1 + \lambda_2 + \cdots + \lambda_n \tag{6.58}$$

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

$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-\frac{t}{\mathrm{MTBF}}} \fallingdotseq 1 - \frac{t}{\mathrm{MTBF}} \tag{6.59}$$

여기서, t =사용시간, λ =1/MTBF

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

$$\mathrm{MTBF_S} = \frac{1}{\lambda_S} \tag{6.60}$$

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

예제 6.8 각 부품의 평균고장률이 0.002(/시간)인 부품 7개가 동시에 모두 작동해야만 기능을 발휘하는 기기가 있음. 이 기기의 평균수명을 구하라.

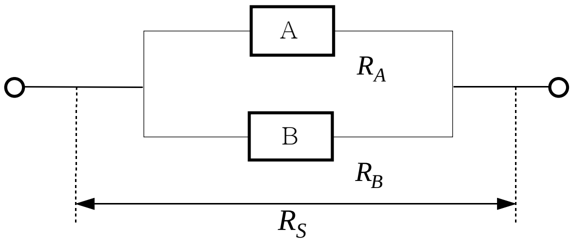
해설

☞ 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)

4.2 병렬결합모델의 신뢰도 [품기3회]

* [그림 6.4]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 6.4] 병렬결합모델

* 병렬결합모델의 전체 시스템이 작동하는 전체 신뢰도 R_S는 다음과 같음.

$$\begin{aligned} R_S &= P_r(A \;\; OR \;\; B) = P_r(A \cup B) \\ &= P_r(A) + P_r(B) - P_r(A) \cdot P_r(B) \\ &= R_A + R_B - R_A \cdot R_B \end{aligned} \tag{6.61}$$

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

$$\begin{aligned} R_S &= (1 - F_A) + (1 - F_B) - (1 - F_A)(1 - F_B) \\ &= 1 - F_A F_B = 1 - (1 - R_A)(1 - R_B) \end{aligned} \tag{6.62}$$

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

$$R_S = 1 - \prod_{i=1}^{n} F_i = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - R_i) \tag{6.63}$$

* 병렬결합모델의 시스템 MTBF는 식 (6.61)에서

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

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.

$$\mathrm{MTBF_S} = \frac{1}{\lambda_S} = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} \tag{6.64}$$

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

$$\mathrm{MTBF_S} = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{\lambda_0} \tag{6.65}$$

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

$$\mathrm{MTBF_S} = \frac{1}{\lambda_0} + \frac{1}{2\lambda_0} + \cdots + \frac{1}{n\lambda_0} \tag{6.66}$$

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

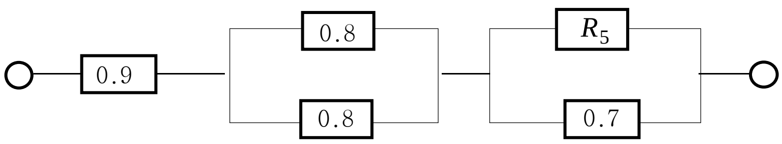
$$\mathrm{MTBF_S} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\theta_0}{i} \tag{6.67}$$

* 그리고, 시스템의 고장률 λ_S는 다음 식으로 구해짐.

$$\lambda_S = \frac{1}{\mathrm{MTBF_S}} = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_0} + \frac{1}{2\lambda_0} + \cdots + \frac{1}{n\lambda_0}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{\theta_0}{i}} \tag{6.68}$$

여기서, $\theta_0 = 1/\lambda_0$인 경우임.

예제 6.9 다음과 같이 구성된 시스템이 있다. 전체 신뢰도 R_S=0.85로 하고자 할 때 R_5의 신뢰도는 얼마인가? 〔기사 기출〕



해설 [품기4회]

☞ 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

이를 풀면 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. 보전성과 가동성 [공기3회]

5.1 보전성

5.1.1 보전성의 의의 [품기1회]

* 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 나뉨.
  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, 보전성 척도는 MTTR(평균수리복구시간 ; mean time to repair)이 쓰임.

5.1.2 보전도, 평균수리복구시간, 평균정지시간

(1) 보전도[$M(t)$] 및 평균수리복구시간[MTTR]

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

$$m(t) = \frac{dM(t)}{dt} \qquad (6.69)$$

$$\mu(t) = \frac{m(t)}{1 - M(t)} \qquad (6.70)$$

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

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} \qquad (6.71)$$

* 보전도함수 $M(t)$가 식 (6.71)과 같고, 수리시간이 평균수리율 μ인 지수분포에 따르면 평균수리복구시간 MTTR(mean time to repair)은

$$MTTR = \int_0^{\infty}[1 - M(t)]dt = \int_0^{\infty} e^{-\mu t}dt = \frac{1}{\mu} \qquad (6.72)$$

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

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i}{n} \qquad (6.73)$$

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

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^{n} \lambda_i t_i}{\sum_{i=1}^{n} \lambda_i} \qquad (6.74)$$

여기서, n : 기계의 구성부품 수, λ_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.

$$MTTR = \frac{\sum n_i \lambda_i t_i}{\sum n_i \lambda_i} \qquad (6.75)$$

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

예제 6.10 5대 장치의 수리시간을 조사하였더니 50, 70, 130, 270, 300(시간)이었음. 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 6.11 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 6.12 만일 n_i개의 부품으로 구성된 5개의 부분으로 된 시스템이 있으며, 각 부분의 구성부품수 n_i와 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 (6.75)을 이용하여 계산하면 $\text{MTTR} = \dfrac{\sum n_i \lambda_i t_i}{\sum n_i \lambda_i} = \dfrac{63.5}{161} = 0.394$ (시간)

(2) 평균정지시간 (MDT)

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

$$M_{pt} = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i}{f_p} \tag{6.76}$$

여기서, t_i 는 장치의 예방보전시간, f_p는 예방보전횟수

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

$$M_{bt}(MTTR) = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i f_i}{f_b} \tag{6.77}$$

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

$$\text{MDT} = \frac{\text{총 보전작업 시간}}{\text{총 보전작업 건수}} \tag{6.78}$$

* 한편 사후보전만으로 평균정지시간을 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 (9.173)은 다음과 같이 됨.

$$\text{MDT} = \frac{f_p \cdot M_{pt} + f_b \cdot M_{bt}}{f_p + f_b} \tag{6.79}$$

여기서, 예방보전빈도 f_p는 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_b는 장치의 신뢰도로부터 결정됨. 따라서 만일 이 장치의 신뢰도가 평균고장률 λ=0.02(/시간)인 지수분포에 따른다면 20,000시간 동안의 사후보전빈도 f_b는 다음과 같음.

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

예제 6.13 평균예방보전시간 M_{pt}=630시간, 예방보전빈도 $f_p = 10$, 평균사후보전시간 M_{bt}=3.1시간, 사후보전빈도 $f_b = 40$일 때 평균정지시간 MDT는 얼마인가?

해설

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

5.2 가동성 [공기3회]

5.2.1 가동성의 의의 [품기4회]

* 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 (6.71)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..

$$A(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} + \frac{\lambda}{\mu + \lambda} e^{-(\mu+\lambda)t} \tag{6.80}$$

* 상기 식에서 t를 ∞로 수렴시키면

$$A = \lim_{t \to \infty} A(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} \tag{6.81}$$

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

$$A = \frac{1/\lambda}{1/\lambda + 1/\mu} \tag{6.82}$$

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

$$A = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} \tag{6.83}$$

5.2.2 시간이용도(A_t) 및 장치이용도(A_E) [품기2회]

* 식 (6.83)을 시간의 이용도(A_t)라고도 하는데, 신뢰도와 보전도가 다 같이 지수분포에 따를 때 보전계수 ρ를 써서 나타내면 다음과 같음.

$$A_t = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} = \frac{1/\lambda}{1/\lambda + 1/\mu} = \frac{\mu}{\mu + \lambda} = \frac{1}{1+\rho} \tag{6.84}$$

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

* 한편 시스템을 구성하는 모든 유니트가 사명시간 T 안에서 고장이 나지 않든가 고장이 나도 각각 t 시간 내에 수리되는 확률을 사명 availability [$A_M(T\,;t)$]라 하며 다음 식 (6.85)와 같이 나타냄.

$$A_M(T\,;t) = e^{-\lambda T} \cdot e^{-\mu t} \tag{6.85}$$

* 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)

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

$$= 1 - (1 - e^{-\lambda T})e^{-\mu t} \tag{6.86}$$

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

* 장치가 무보전으로 된다면 t=0이므로 식 (6.87)이 얻어짐.

$$A_E(T\,;0) = e^{-\lambda T} = R(T) \tag{6.87}$$

예제 6.14 고장률 λ=0.063(/시간), 수리율 μ=0.4(/시간)일 때 시간의 이용도를 구하라.

해설

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

예제 6.15 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 $\text{MTTR} = \dfrac{\sum t_i}{n} = \dfrac{\sum (t_i r_i)}{\sum r_i} = \dfrac{3\times5+6\times2+\cdots+5\times4}{5+2+\cdots+4} = \dfrac{69}{18} = 3.83$ 시간

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

③ $M(t=5) = 1-e^{-\mu t} = 1-e^{-0.26\times5} = 0.73$

5.2.3 가용도 [공기1회]

(1) 고유가용도

* 이상적인 지원환경(공구, 수리부속, 인력, 교범, 기타 군수지원이 가능한 상태)에서 예방정비를 고려하지 않고 정해진 조건으로 사용될 때 장비가 언제라도 만족스럽게 운용될 확률.

(2) 성취가용도

* 고유가용도와 비슷하나 여기서는 고장정비 및 예방정비시간이 관련되고 초기 설계과정부터 총 생산시험 단계까지 사용됨.

(3) 운용가용도

* 장비가 실 운용환경에서 정해진 조건하에 사용될 때 언제든지 만족스럽게 운용될 확률. 비가동시간인 고장정비, 예방정비, 보급대기 등과 관련됨.

6. 고장해석기법으로서의 FMEA·FTA [공기4회] [품기2회]

6.1 FMEA(Failure Mode & Effect Analysis) [공기1회] [품기7회]

6.1.1 FMEA의 기초개념

(1) FMEA의 발전

* FMEA(Failure Mode & Effect Analysis ; 고장유형 및 영향분석)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.

(2) FMEA의 종류

① 개념 FMEA : 각 단계에 적합하도록 제품의 구상시 과연 올바른 기능정립이 되었는가를 검토하고, 이에 대한 기능적 위험을 평가하고 대안을 수립하며, 구체적인 개선방향을 수립하기 위해 작성되고 활용하는 것.

② 설계 FMEA : 타당성이 입증되면 구체적인 부품의 구성 및 상세한 설계단계로 진입하게 되는데 이때 설계에서 설정한 여러 값들이 과연 타당한 것인지, 고객만족을 위한 보다 나은 노력과 위험인자가 있는지를 검토하고 개선하기 위해 적용되는 것.
즉, 설계의 약점을 집중적으로 파악하는 기법이라 할 수 있음.

③ 공정 FMEA : 설계에서 제시된 제품을 생산하기 위해 공정을 검토하기 위한 단계에서 보다 나은 품질과 실수를 예방하고 이를 구체적인 품질관리 방법으로 연결시킴으로써 고장에 대한 미연의 방지를 추구하기 위해 실시하는 것.
이 공정FMEA는 지속적인 고장예방과 품질관리를 위해 체계적으로 수행하는 단계라고 할 수 있으며, 구체적인 품질관리 계획을 위한 아주 중요한 입력자료 중에 하나라고 할 수 있음.

(3) FMEA의 작성 시점

① 새로운 시스템 또는 제품 및 공정이 설계될 때

② 기존의 설계나 공정이 변경될 때

③ 상세설계 이전의 단계

④ 제품 기능이 정의되고, 설계도면이 본격생산되는 단계

⑤ 제품의 예비설계 또는 제품의 생산계획 및 공정설계가 가능한 단계

6.1.2 FMEA 실시절차

* 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)에서의 시스템·서브시스템의 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 6.5>에 제시하였음.

6.1.3 고장등급 결정방법

* 고장등급 결정방법은 고장평점법, 치명도평점법의 2가지가 있음.

(1) 고장평점법

* 고장평점법의 평가항목으로는 5개인 $C_1 \sim C_5$가 있고, 이들의 평가항목에 의거 시스템의 평가등급인 C_S가 다음 식으로 구해지며, C_1, C_2, C_3의 평가점은 <표 6.2>와 같음.

$$C_S = \sqrt[5]{C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5} \tag{6.88}$$

* 이상과 같은 방법에 의거 시스템의 고장평점 C_S를 계산한 다음에 <표 6.3>에 의거 고장평점에 대응한 고장등급을 결정함.
  여기서, C_4는 고장방지 가능성, C_5는 신규설계의 정도를 나타냄.

<표 6.2> C_1, C_2, C_3의 평가점

C_1의 평가점		C_2의 평가점		C_3의 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

<표 6.3> C_S에 따른 고장등급

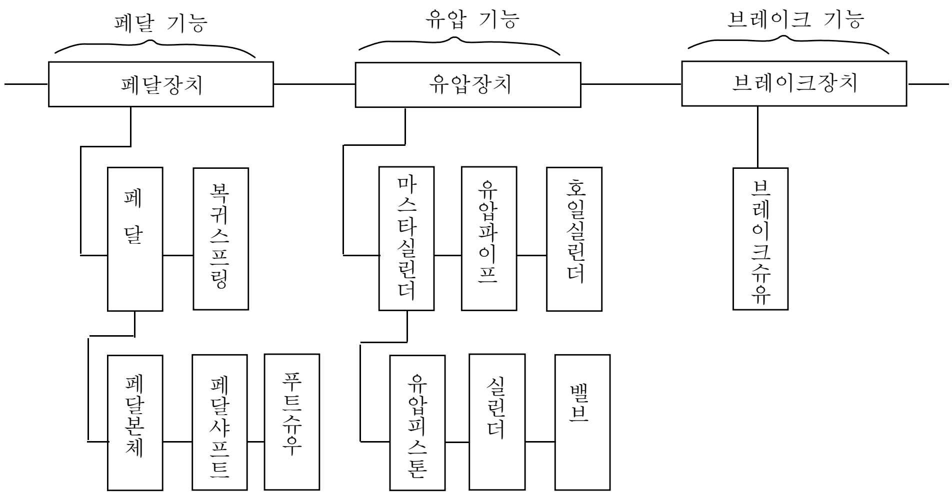
C_S	고장등급
7점이상~10점	Ⅰ
4점이상~7점미만	Ⅱ
2점이상~4점미만	Ⅲ
2점미만	Ⅳ

* 한편, 이상과 같이 고장평점을 계산하지 않고 간단히 임무달성에 중점을 두어 <표 6.4>와 같이 고장등급을 결정하는 경우, 즉 "간단평가방법"이 있는데, 고장등급으로서는 Ⅰ~Ⅳ등급이 있으며, Ⅰ은 치명고장, Ⅱ는 중고장, Ⅲ은 경고장, Ⅳ는 미소고장으로 됨.

<표 6.4> 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 6.5] 기능별 신뢰성블록도

* 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 6.5]가 됨.
다시 FMEA 실시절차에서 기술한 순서에 따라 <표 6.5>에 FMEA표를 작성하였음.

<표 6.5> 브레이크시스템의 FMEA(일부)

F M E A

날짜: 2007년 02월16일

시스템 : ○○수송시스템
서브시스템 : 브레이크시스템

작성자: 반영식
승인자: 권오운

번호	대상 품목	기능	고장 모드	추정원인	영향		고장 검지법	고장평점		고장 등급	대책
					서브 시스템	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	파이프연결부파손	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	브레이크 슈우	차륜의 제동	슈우의 미끄러짐	1. 표면재 불량 2. 표면재 피로	제동 불량	정지거리가 크게 됨		3	7 7	Ⅱ Ⅱ	
			슈우의 소음	1. 재질불량 조립불량	소음 발생	불쾌감		1	7 5	Ⅲ Ⅲ	

* 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 6.5]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 6.5>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 6.5>는 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 6.5>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 [공기3회] [품기3회]

☞ 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 6.6>과 같이 “고장영향의 크기”에 따라 평점을 구하고, 다음 식 (6.89)에 의해 치명도 평점(C_E)를 계산한 후에 이 점수에 대응하여 고장등급을 결정하는 방법임.

$$C_E = F_1 \times F_2 \times F_3 \times F_4 \times F_5 \qquad (6.89)$$

<표 6.6> 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 6.7>에 의해 결정됨.

<표 6.7> 치명도평점 C_E에 대응하는 고장등급

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

6.1.4 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 (6.90)에 의거 계산함.

$$\text{치명도지수 } C_r = \sum_{i=1}^{n} (\alpha \cdot \beta \cdot \kappa_A \cdot \kappa_E \cdot \lambda_G \cdot t)_i \qquad (6.90)$$

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.
* FMEA에서 발전한 치명도해석을 실시하는 경우에는 <표6.8>과 같은 양식을 사용함.

<표 6.8> FMECA(치명도해석)표

시스템: 추진 서브시스템: 에어압력				**F M E C A(치명도해석)표**					작성일자: 2008년 2월 16일 작성자 : 송한석 승인자 : 권오운		
대상 품목	치명적 고장										
	모드	영향	data원	모드 차지 비율 α	영향 확률 β	운용 계수 κ_A	환경 계수 κ_E	기준 고장률 λ_G	운용 시간 t	기여율 $(\alpha\beta\kappa_A\kappa_E \lambda_G t)\times 10^4$	C_r
파이로트 밸브	받힘 실패	실제 임무 불가	BK-217	0.1	1.0	100	50	0.04×10^{-4}	10	250	710
	닫힘 상태 유지 실패	임무 불가 확률 있음	상동	0.1	0.6	100	50	0.04×10^{-4}	10	150	
	닫힘 상태 유지 실패	실제 임무 불가	상동	0.1	1.0	100	50	0.04×10^{-4}	10	250	
	외부 누설	임무 불가 확률 있음	상동	0.6	0.04	100	50	0.04×10^{-4}	10	60	
릴리프 밸브				(이	하	생	략)				

6.2 FTA(Fault Tree Analysis)에 의한 고장해석 [공기2회] [품기4회]

6.2.1 FTA(고장나무분석)의 발전과 의의

* 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.

6.2.2 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(Bool) 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

6.2.3 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(결합사상)을 규명하고 나열하여 정상사상과의 사이를 논리게이트를 사용하여 나무가지 모양으로 결합시킴.
  ③ 위 ②의 각 결합사상의 직접원인이 되는 결합사상을 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 결합사상 (생략사상)
  ④ 그것 이하는 이 고장나무(FT)의 다른 부분과 동일해지는 경우로서, 이것은 다른 부분으로부터의 전이(轉移)로서 취급함.

6.2.4 고장나무(결함수)의 논리게이트

* 기본적으로 결합사상은 AND게이트와 OR게이트를 사용하여 표시하나, 여러 종류의 논리게이트 또는 수정기호(modifier)를 사용함으로써 시스템을 더 정확히 또는 간결하게 표현할 수 있음(그림 6.6 참조).

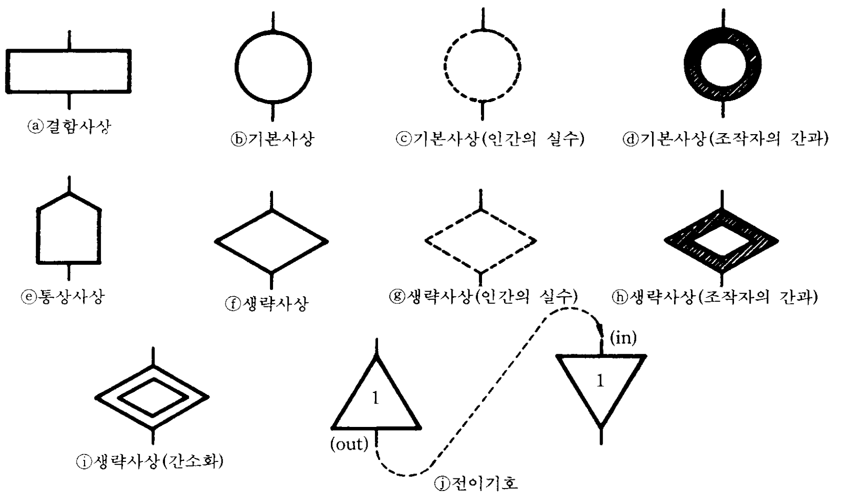
* 단, 너무 복잡한 논리게이트를 사용하는 것은 고장나무분석의 특징인 시각에 의한 이해나 연산의 용이성을 손상시킬 우려가 있으므로 주의하여야 함.

(1) 사상기호

① 직사각형 기호 → 정상사상을 시작으로 하는 결합사상을 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 → 결합사상은 아니고 시스템 내의 상태로서 일어나는 통상사상을 나타내는 기호가 됨(그림 ⓔ).



[그림 6.6] 사상기호

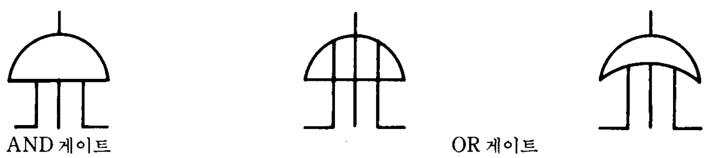
④ 마름모형기호 → 그것 이상은 분석할 수 없거나 또는 분석의 필요가 없는 생략사상을 나타내는 기호(그림 ⓕ).

* 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

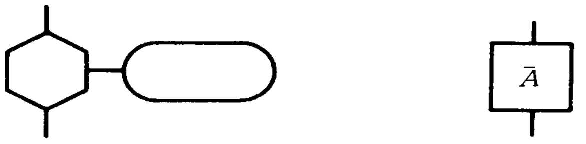
① AND게이트와 OR게이트



[그림 6.7] 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 6.8] 억제게이트와 부정게이트

(3) 조건 게이트

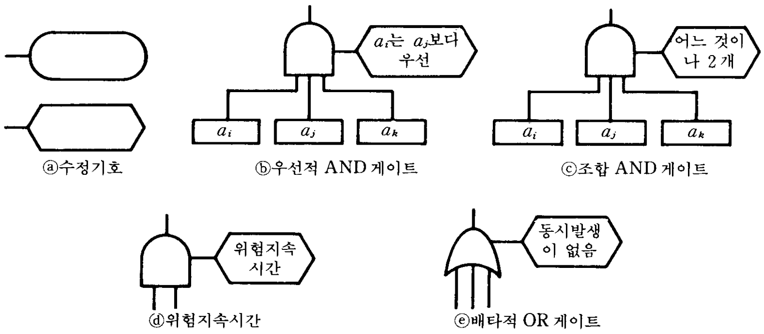
* AND게이트 또는 OR게이트 수정기호를 병용함으로써 각종 조건부 게이트를 구성함.

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 6.9] 수정기호와 조건 게이트

6.2.5 고장확률 계산방법

(1) AND Gate의 경우

① $F_A = F(B\ AND\ C) = F(B \cap C)$

여기서, B와 C가 서로 독립이면

$$F_A = F_B \cdot F_C \qquad (6.91)$$

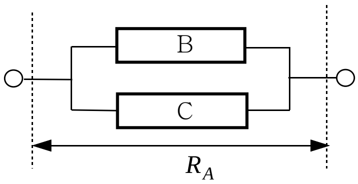
② 혹은 ①과 달리 계산하는 방법으로

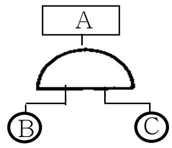
$$F_A = 1 - R_A = 1 - [1 - (1 - R_B)(1 - R_C)]$$

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

③ 한편, n 개의 기본사상의 AND 결합시에는 다음과 같이 됨.

$$F_S = F_1 \cdot F_2 \cdots F_n = \prod_{i=1}^{n} F_i \tag{6.92}$$





[그림 6.10] 병렬계 신뢰성 블록도 [그림 6.11] AND게이트에 의한 FT도

(2) OR Gate의 경우

① $F_A = F\,(B\ OR\ C) = F(B \cup C)$

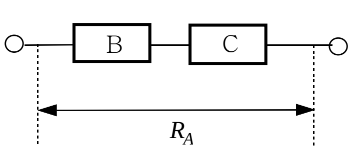
(B와 C가 독립사상이면) $F_A = F_B + F_C - F_B \cdot F_C$ (6.93)

② 위 ①과 다른 방법으로 계산하면

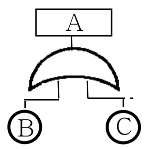
$$\begin{aligned} F_A &= 1 - R_A = 1 - R_B \cdot R_C \\ &= 1 - (1 - F_B)(1 - F_C) \\ &= F_B + F_C - F_B \cdot F_C \end{aligned} \tag{6.94}$$

③ 한편, n 개의 기본사상의 OR 결합시에는

$$\begin{aligned} F_S &= 1 - (1 - F_1)(1 - F_2)\cdots(1 - F_n) \\ &= 1 - \prod_{i=1}^{n}(1 - F_i) \end{aligned} \tag{6.95}$$



(직렬계)



(OR gate)

[그림 6.12] 직렬계 신뢰성 블록도 [그림 6.13] OR 게이트에 의한 FT도

(3) 사상의 고장확률을 구하는 방법 [품기1회]

＊ 톱 사상 A의 고장확률 F_A를 구하기 위해서는 먼저 하위사상인 B, C의 고장확률 F_B, F_C를 구하는 것이 중요한 데, 그 중 하나의 예로서 F_B의 고장확률을 구하는 방법은 다음과 같음.

$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-t/\mathrm{MTBF}} \fallingdotseq 1 - \frac{t}{\mathrm{MTBF}} \quad (\text{단, } t \text{ : 사용시간}) \tag{6.96}$$

이므로, 사상 B가 고장날 확률 F_B는

$$F_B = 1 - R_B = 1 - (1 - \frac{t}{MTBF}) = \frac{t}{MTBF} \quad (< 1) \qquad (6.97)$$

여기서, t는 사용(가동)시간, R_B는 B의 신뢰도이고,

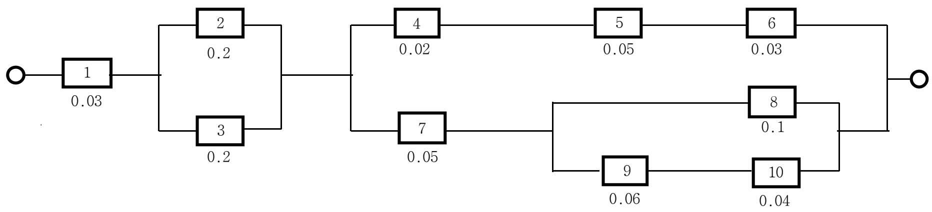
MTBF는 평균고장간격시간(평균수명)으로서 다음과 같음.

$$\text{MTBF} = \frac{1}{\lambda} = \frac{\text{총 동작시간 } (T)}{\text{그 기간 중의 고장개수 } (r)} \qquad (6.98)$$

(4) MTBF와 시스템이 고장날 확률(F_S)와의 상관관계

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

예제 6.16 신뢰성 블록도가 [그림 1]과 같고 사상의 고장날 확률이 주어졌을 때, 시스템의 고장확률을 계산하고, FT도에 고장확률을 나타내어라.



[그림 1] 신뢰성 블록도

해설

☞ 시스템의 고장확률은 하위사상에서부터 상위사상으로 순차적으로 계산함.

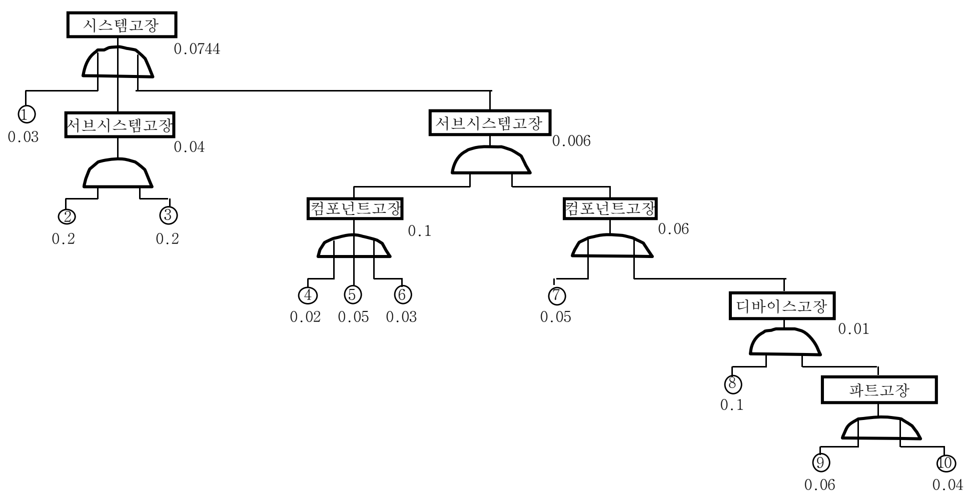
(1) 파트 고장확률 (⑨, ⑩) : $F_{S1} = 1 - (1 - F_9)(1 - F_{10}) \;= 1 - (1 - 0.06)(1 - 0.04) = 0.098$

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

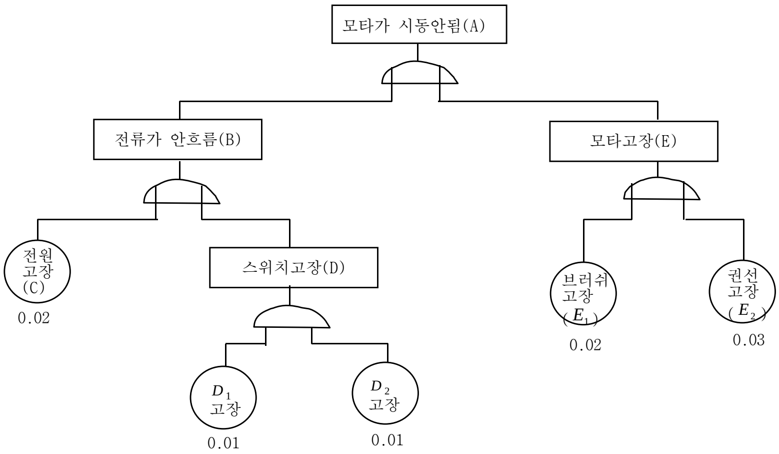
(3) 우측의 서브시스템 고장확률 :

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

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



[그림 2] FT도



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

6.3 FMEA와 FTA의 차이점 비교에 의한 적절한 선택

* 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 6.19 FMEA(또는 FMECA)와 FTA의 차이점을 비교하라. [공기4회] [품기4회]

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

7. 신뢰성 설계기술

7.1 신뢰성 설계기술 [공기1회] [기지1회] [품기8회]

* 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.

$$\left.\begin{aligned} R &= \prod_{i=1}^{n} r_i \\ \lambda &= \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \end{aligned}\right\} \qquad (6.99)$$

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

$$\left.\begin{aligned} \lambda &= n\lambda_0 \\ R &= e^{-n\lambda_0 t} \end{aligned}\right\} \qquad (6.100)$$

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 [공기1회] [품기2회]

* 구성품의 일부가 고장나더라도 그 구성부분이 고장나지 않도록 설계되어 있는 것을 리던던시(용장, 병렬, 과잉, 여유)설계라고 함.

* 이러한 리던던시(redundancy) 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 리던던시설계, 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 (6.99)와 식 (6.100)에서 알 수 있는 바와 같이 구성부품의 수 n이 증가하면 제품의 고장률은 증가하고, 신뢰도는 저하됨.

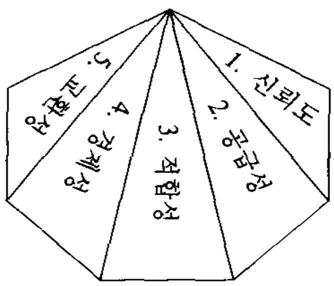
* 따라서 이것을 극복하고 신뢰성의 저하를 줄이기 위해서는 부품의 단순화와 표준화 대책이 요망됨.

(3) 최적재료의 선정 [품기3회]

* 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 6.14] RACER법

① Reliability(신뢰도), ② Availability(공급성), ③ Compatibility(적합성)
④ Economy(경제성), ⑤ Reproducibility(교환성 및 균일성)

* RACER 항목별 각각 점수(5점 만점) 및 가중치(3또는 4)가 주어지고, 가중점수(점수×가중치)를 구한 후 합계점수가 큰 재료를 선정하는 방법임.

(8) 스트레스·강도 모델 (stress and strength model)

* 시간이 지남에 따라 강도의 열화로 인하여 스트레스가 강도보다 커졌을 때 고장이 발생하므로, 신뢰도를 증가시키기 위해 스트레스와 강도의 차이, 즉 안전여유를 적절하게 고려하는 설계임.

(9) 설계에서의 신뢰성시험

* 설계에서의 신뢰성시험은 완성품이 아닌 개발적·기술적 시험이 중요시되며, 이의 내용은 다음과 같음.

  ① 재료부품의 기능, 耐스트레스의 시험, ② 시작단계의 제품 및 하위시스템의 시험
  ③ 생산전의 제품 및 시스템의 시험, ④ 생산품의 시험

(10) 다른 품질과의 균형

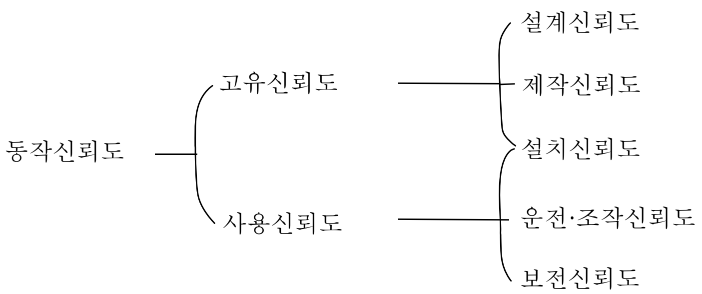
* 신뢰성 뿐만 아니라 제품의 품질을 결정하는 여러 가지 요소, 즉 편의성, 보전성, 경제성, 제조성 등과의 균형을 취하는 것도 반드시 필요함.

(11) 설계심사 (design review)

* 제품의 모든 품질요소에 관해서 관련되는 각 부문의 대표(설계, 기술, 제조, QA/QC, 구매, 판매, 서비스)로 구성된 위원회 형식으로 제품설계의 초기, 중기, 후기 등의 각 단계에서 행하는 종합적 설계검토 시스템이 활용됨.

7.2 고유신뢰성 및 사용신뢰성 향상 [품기3회]

* 신뢰성관리는 [그림 6.15]와 같이 크게 고유신뢰성(설계 및 제조의 신뢰성)과 사용신뢰성(출하 후의 신뢰성)으로 나눌 수 있음.



[그림 6.15] 신뢰도의 구성

(1) 고유신뢰성의 제고방법 [기지1회] [품기2회]

* 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)의 활용
② 제품의 단순화, ③ 고신뢰도 부품의 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.

(2) 사용신뢰성의 제고방법

* 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 체제 확립으로 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.

7.3 리던던시(Redundancy) 설계

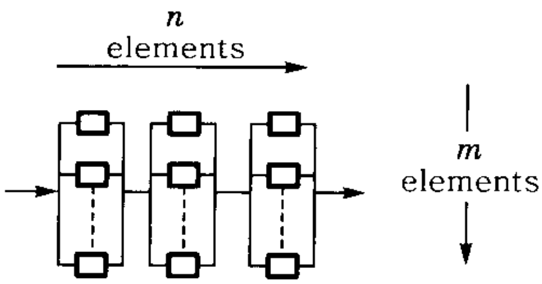
* 고도의 신뢰도가 요구되는 특정부분에 여분의 구성품을 더 설치함으로써 구성품의 일부가 고장나더라도 그 구성부분이 고장나지 않도록 설계하여 그 부분의 신뢰도를 높이는 방법을 리던던시(용장, 병렬, 여유, 과잉)설계라 함.

* 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.

* 대기 리던던시 설계의 경우에는 스위칭시스템(switching system)의 신뢰도가 중요함.

7.3.1 병렬 리던던시 설계

(1) 부품별 병렬 리던던시(부품중복) 방법



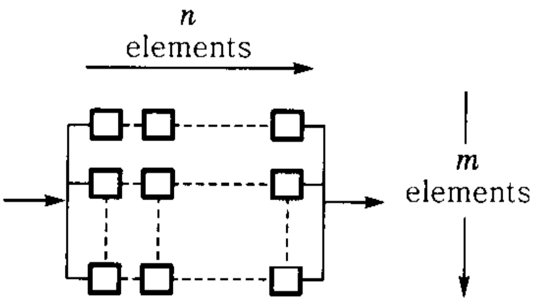
$R_S = [1-(1-r)^m]^n$

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.

7.3.2 대기(Stand-by) 리던던시설계

* 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.

행동의 가치는 그 행동을
끝까지 이루는 데 있다!
- 칭기스 칸 -