결함 수목 분석기법(FTA)을 이용한 가정용 전열기기의 화재위험성 분석

방재설비부 연구원 / 공학박사 ‖ 홍성호

1. 서 론

현대사회에서 전기에너지는 없어서는 안 될 중요한 에너지원이며, 해마다 전기에너지의 사용이 생활수준의 향상과 전기기술의 발전에 힘입어 날로 증가함에 따라 전기로 인한 재해도 발생할 가능성이 높아지고 있다. 전기로 인한 재해 중 전기화재는 수많은 인명 및 재산상의 피해를 가져다주는 심각한 재해이다.

특히, 일반 가정에서 많이 사용되는 가정용 전열기기는 고온에서 사용되는 기기이기 때문에 다른 기기와는 달리 화재에 대한 높은 안전성이 요구된다.

현재 사용되는 가정용 전열기기가 이상없이 안전하게 사용되고, 제품의 수명이 다하여 안전하게 폐기되는 것이 이상적이지만 가정용 전열기기로 인한 전기화재에 관한 사고사례가 종종 보고되고 있는 현실이다[1)-2)].

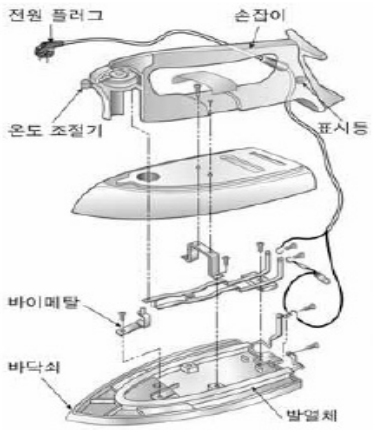
본 연구에서는 가정용 전열기기 중 각 가정에서 하나이상 보유하고 있고 흔히 사용되고 있는 전기다리미의 화재위험성을 결함 수목 분석기법을 이용하여 분석하였고, 이를 통하여 안전한 제품을 설계하는데 도움을 주고자 하였다.

2. 전기다리미 구조

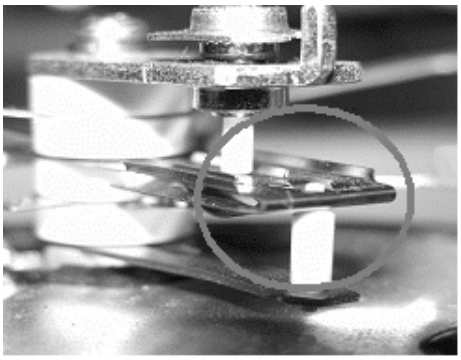
전기다리미는 스팀이 나오지 않는 다리미와 스팀다리미가 있지만 현재에는 각 가정에서 스팀이 나오는 다리미를 주로 사용하고 있다.

전기다리미의 내부구조는 제조사별로 제품모델별로 큰 차이가 없다. 전기다리미의 구조는 주로 열경화성 플라스틱으로 구성된 손잡이 커버 등과 전열선 등으로 구성된 발열부, 바이메탈 등으로 구성되어 있다. 전열선은 주로 니크롬선이 많이 사용되고 있으며, 감전사고 방지를 위하여 니크롬선 주위를 절연체로 씌운 구조로 되어 있다. 발열부와 전원 연결은 바이메탈을 이용한 자동온도조절기로 구성되어 있으며, 2차 안전장치로 자동온도조절기가 고장일 경우 일정온도 이상에서 전원을 차단할 수 있는 적하식의 안전장치가 부착되어 있는 제품도 있다.

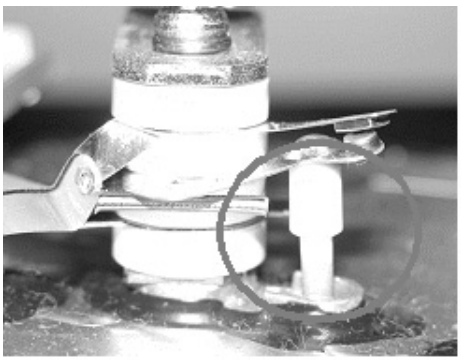
[그림 1]은 이와 같은 전기다리미의 구조를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 바닥쇠 위에 발열체인 전열선이 있고, 전열선에 전원을 연결하여 온도를 자동으로 조절하도록 바이메탈이 연결되어 있는 자동온도조절기가 있는 것을 볼 수 있다. 자동온도조절기는 정격전압이 입력되면 전기다리미



[그림 1] 전기다리미 구조도



[그림 2] 자동온도조절장치



[그림 3] 적하식 2차 안전장치

의 전열선에 의해 온도가 상승하게 되고 일정 온도이상이 되면 바이메탈이 동작하여 전원을 차단하게 되는 형태로 전기다리미가 일정 온도이상이 되지 않도록 조절하게 된다. [그림 2]는 이와 같은 자동온도조절기를 나타내는 그림이고, [그림 3]은 적하식의 2차 안전장치를 나타낸다. 2차 안전장치는 자동온도조절기가 고장일 경우 온도가 계속 상승하게 되면 일정 온도에서 용융물이 용융되어 지지대가 밑으로 적하되는 형태로 전원을 차단하게 된다. 그 외에 전기다리미는 통전되는 상태를 나타내는 파이롯트 램프 등으로 구성되어 있다. 바이메탈의 자동온도조절기나 적하식 2차 안전장치가 정상 작동하는 경우에는 화재발생가능성이 비교적 낮다고 할 수 있지만, 이러한 안전장치가 고장인 경우에는 화재발생가능성이 상당히 높다. 본 연구에서는 이와 같은 전기다리미의 구조를 고려하여 결함 수목(Fault Tree, FT)을 구성하고 전기다리미의 화재위험성을 분석하였다.

3. 결함 수목 분석(Fault Tree Analysis, FTA)

3. 1 FTA의 특성

FTA는 연역적 기법으로 시스템 고장이라는 결과로부터 출발하여 시간을 거슬러 원인을 찾아가는 역방향 분석기법이다. 또한 FTA는 정성적인 분석과 정량적인 분석이 모두 가능하고, 시스템 구성수준으로 보았을 때에는 하방향 분석방법(Top-down Approach)으로 시스템의 고장을 발생시키는 정상사상(Top Event)과 그것의 원인과의 인과관계를 논리기호인 부울대수(Boolean Algebra)를 사용하여 나뭇가지 모양의 그림으로 나타낸 고장수목(Fault Tree)을 만들고, 이에 의하여 시스템의 고장확률을 구함으로써 문제가 되는 부분을 찾아내어 시스템의 신뢰성을 개선하는 고장해석 및 안전성 평가방법이다[3)~4)]. 여기서 사상(Event)이란 시스템 구성요소의 상태변화를 나타내는 것으로 정상사상, 중간사상, 기본사상 등을 포함한다.

이 기법은 부품 고장간의 인과관계를 체계적으로 규명하고, 시스템에 치명적일 수 있는 고장모드, 특히 전파될 수 있는 단일결함의 최초 징후를 제공한다는 큰 장점을 지니고 있으며, 이전에 알려져 있지 않은 가능한 결과들을 탐색할 수 있다. 또한 정상적인 기능으로부터의 이탈뿐만 아니라 파생되는 결과들을 규명할 수 있다는 점에서 여러 시스템의 안전성 분석기법으로 널리 사용되고 있다. 즉, 이 기법은 정상사상을 초래하는 원인이나 원인들 조합의 규명, 정상사상의 발생확률을 평가하거나 어떤 기본사상의 발생이 정상사상의 발생에 어느 정도의 영향을 미치는가를 결정하며, 정

상사상에 대한 제품의 고장률과 평균수리시간을 구할 수 있다[5)-6)].

3. 2 FTA 분석절차[7)]

3.2.1. 제 1단계 – 분석범위의 정의 및 분석수준의 결정

분석범위의 정의란 분석되어야 할 시스템, 분석목적과 범위, 시스템 운용상의 초기조건들과 현재의 조건, 그리고 기본적인 가정사항들의 정의를 말한다. 이 때 기본적인 가정들이란 모든 사용조건하에서의 시스템 성능뿐만 아니라 예상되는 운용조건들과 보전조건들과 관련된 모든 가정사항들을 포함하여야 한다.

3.2.2. 제 2단계 – 대상시스템의 특성파악

결함 수목 분석이 성공적으로 이루어지려면 시스템에 대해 상세히 숙지하고 있어야 한다.

3.2.3. 제 3단계 – 정상사상의 정의

작업자의 과오나 기계 및 설비로 인한 경과를 모형화하고 대책을 설정할 문제점들에 대해 중요도나 우선순위를 결정하여 분석할 대상이 되는 사항을 정상사상으로 선정한다.

3.2.4. 제 4단계 – 결함 수목의 구성

결함 수목을 작성하는데 사용되는 일반적인 기호와 각 사상의 정의를 살펴보면 다음과 같다.

정상사상(Top Event)이란 시스템의 고장이나 인명의 손실과 같이 의도되지 않고 동시에 바람직하지 않은 상황이 발생하는 것을 나타내며, 직사각형으로 표시되는 것이 보통이다.

중간사상(Intermediate Event)이란 정상사상이 발생하는 원인이나 기여조건들로서, 그 자체가 여러 가지 요인들의 동시 발생으로 발생한 복합고장을 나타낸다. 중간사상은 추가적인 상세분석이 요구되는 재해연쇄의 중간적 결과를 나타내며, 정상사상과 마찬가지로 직사각형으로 표시되는 것이 보통이다.

기본사상(Basic Event)이란 더 이상의 분석이 필요하지 않은 단일요소나 부품의 고장 혹은 결함을 나타낸다. 이 기본사상은 원으로 나타내는 것이 보통이다.

논리게이트는 사상과 사상들을 연결하는 논리 연

〈표 1〉 결함 수목 작성시 사용기호

분류	명칭	기호	내용
기초사상	기본사상 (Basic Event)		더 이상의 개발이나 분석이 필요없는 사상
	중간사상(Intermediate Event)		논리게이트를 통해 발생하는 하나 또는 그 이상의 입력원인으로 인해 발생하는 사상
	미개발사상 (Undeveloped Event)		불충분한 결론이나 정보 때문에 더 이상의 분석이나 개발이 불필요하거나 불가능한 사상
논리 게이트	AND		모든 입력이 발생하는 경우에만 출력이 발생
	OR		입력 중 어느 하나라도 발생하면 출력이 발생

산자를 나타내는 기오이다. 이 기호들은 기초사상들이나 정상사상과 연결시킨다든지, 기초사상들을 상위의 중간사상들과 연결시키는 역할을 하며 여기에는 AND, OR 등이 있다. 〈표 1〉은 이러한 결함수목 작성시 사용되는 기호들의 예를 나타낸다.

3.2.5. 결함 수목의 정성적 분석

결함 수목의 정성적 분석이란 정량적인 변수들을 이용하지 않고 시스템의 구조적 특성이나 각 기본사상들이 정상사상의 발생에 미치는 상대적 중요도 등을 평가하는 분석을 말한다.

3.2.5.1. 결함수의 타당성 조사

정성적 분석의 첫 단계는 구성된 결함수에 대한 타당성 조사이다. 이것은 대부분의 경우 추가적인 분석의 형태와 분석범위를 올바로 결정하기 위하여 수행된다. 이 때 검토되는 사항은 주로 결함수의 구조, 공통사상의 구명, 그리고 독립적인 가지의 탐색이다.

3.2.5.2. 최소절단집합(Minimal Cut Set, MCS)

절단집합(Cut Set)이란 정상사상을 일으키는 기본사상들의 집합을 의미한다. 즉, 동시에 발생하는 경우 정상사상의 발생을 야기시키는 일련의 사상집단을 말한다.

특히, 최소절단집합이란 정상사상이 발생하려면 집합내의 모든 사상이 발생하여야 하는 가장 작은 절단집합을 의미한다. 만약 최소절단집합내의 하나의 사상이라도 발생하지 않는다면 결과적으로 그것은 정상사상의 발생을 예방하는 셈이 된다.

3.2.6. 제 6단계 – 결함 수목의 정량적 분석

결함 수목에 대한 정량적 분석의 최대 장점 중의 하나는 사상 발생확률의 평가가 가능하다는 것이다. 가장 기초적인 것은 역시 기본사상으로, 각 기본사상들의 발생확률만 알고 있다면 몇 가지 가정사항들을 추가함으로써 중간사상들이나 정상사상의 발생확률을 계산할 수 있다.

3.2.6.1. 정상사상의 발생확률

사상의 발생이 독립인 경우 사상 1, 2, … n의 발생확률을 q1, q2, … qn이라 하면 정상사상의 발생확률은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$g(Q) = \prod_{i=1}^{n} q_i \quad \cdots\cdots(1)$$

3.2.6.2. 중요도

중요도란 어떤 기본사상의 발생이 정상사상의 발생에 어느 정도의 영향을 미치는 가를 정량적으로 나타낸 것으로 재해예방책 선정의 우선순위를 제시한다고 볼 수 있다.

중요도에는 확률중요도와 치명중요도 등이 있다. 이 중 치명중요도는 기본적으로 기본사상 발생확률의 변화율 $\Delta q_j/q_j$에 대한 정상사상 발생확률의 변화율 $\Delta g(Q)/g(Q)$의 비로 정의되며, 확률중요도 척도에 어떤 기본사상 j가 발생할 확률을 곱하고 이것을 정상사상이 발생할 확률로 나눈 것이다. 치명중요도 지수 값이 크다는 것은 해당 기본사상의 신뢰성을 증가시키면 정상사상의 발생확률을 현저히 저감시킬 수 있다는 것을 의미한다.

이러한 치명중요도 지수인 $I_c(j)$는 수학적 함수들의 특성에 따라 식 (2)에 의해 계산된다.

$$I_c(j) = \frac{q_j}{g(Q)} I_g(j) \quad \cdots\cdots(2)$$

3.2.7. 제 7단계 – 분석결과의 보고

이상의 과정을 거쳐 정성적 분석 및 정량적 분석이 종료되면 최종적인 보고서를 준비하게 된다.

4. FTA를 이용한 화재위험성 분석

4.1. 정상사상

결함 수목의 정상사상은 일반적으로는 대상 시스템의 바람직하지 않은 사상이다. FTA에서 정상사상을 설정할 때에는 여러 가지 분석, 검사결과 또는 사고사례를 감안하여 결정하게 된다. 일반적으로 대상시스템의 계획외 정지나 성능저하 현상 등을 설정하게 된다[8].

본 연구는 전기다리미의 화재위험성 평가를 위한 연구이므로 정상사상은 "화재"로 정하고, 정상사상이 발생할 수 있는 확률 등을 계산하였다.

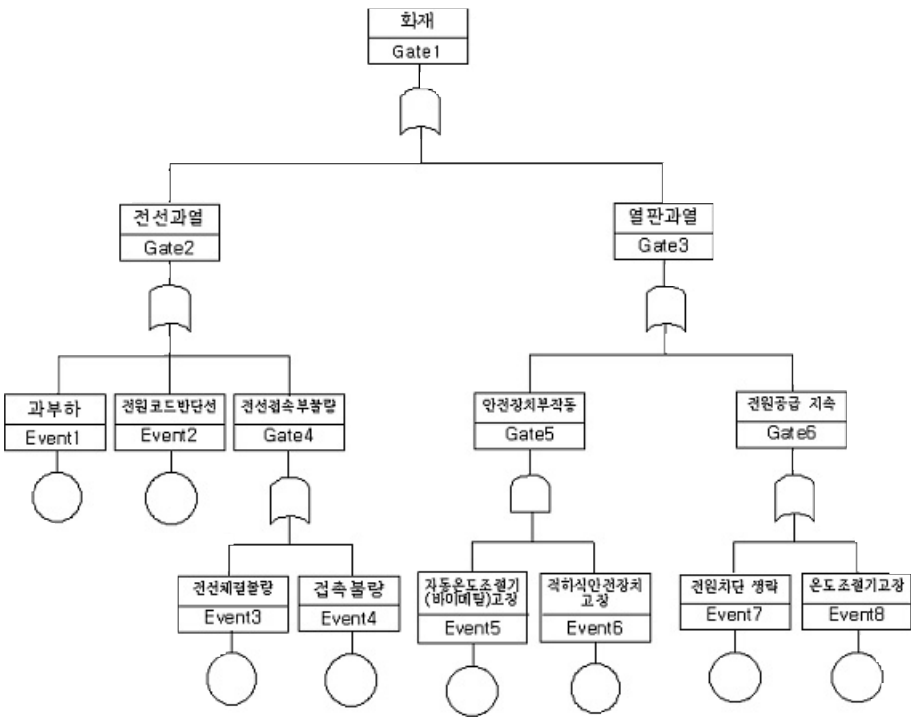
4.2. Fault Tree 구성

FTA는 정상사상이 발생하는 원인이나 조건을 추출하여 대책 가능한 수준의 기본사상을 구하는 기법이다.

본 연구와 같이 실생활에서 사용되고 있는 기기를 대상으로 FTA를 수행하는 경우에 가장 문제가 되는 것 중의 하나는 고장률에 대한 데이터가 절대적으로 부족하다는 것이다. 그래서 과거 연구자의 자료를 그대로 도입하거나 대상 시스템의 특성에 맞게 적절하게 수정하여 분석을 수행하는 경우가 많다.

본 연구에서는 전기다리미 FT에 대한 기본사상이 되는 부품 등의 고장률을 미국 MIL-HDBK-217F "Reliability Prediction of Electronic Equipment"를 근간으로 적용하였으며, MIL-HDBK-217F에 없는 고장률데이터는 실험을 통하여 정상사상인 화재가 발생할 수 있는 위험성에 따라 고장률을 적용하였다.

이와 같은 고장률 및 가정들을 근간으로 하여 구



[그림 4] 전기다리미 Fault Tree

성한 FT를 [그림 4]에 나타내었다.

4.3. FTA 분석결과

구성된 FT에 대한 최소절단집합(Miniaml Cut Set, MCS), 정상사상의 발생확률 및 치명중요도를 계산하였다.

운전시간을 1,000시간으로 하여 전기다리미의 화재라는 정상사상이 발생할 확률은 약 2.888×10−1로 나타났다. 이것을 평균고장시간인 MTTF(Mean Time to Failure)로 환산하기 위해서 비신뢰도 $F(t) = 1-e^{-\lambda t}$에서 고장률 를 다음 식 (3)으로 구한 후 MTTF를 구하였다[9].

$$\lambda = \frac{1n(1-F(t))}{-t} \quad \cdots\cdots(3)$$

$$MTTF = \frac{1}{\lambda}$$

식 (3)을 통해 구한 MTTF는 약 2,941시간이며, 전기다리미의 경우 매일 항상 사용하는 기기가 아니므로 본 연구에서는 일주일에 약 3시간 정도 사용하는 것으로 간주하였다. 이 시간에 근거한 전기다리미에서 부품 등의 고장으로 인하여 화재가 발생할 주기는 약 18.8년으로 평가되었다. 물론, 이 값은 일반 가정에서 전기다리미를 실제 사용하는 시간과 다르고, 실제 전기다리미의 사용 환경에 따른 전기다리미 부품의 고장률을 적용한 것이 아니기 때문에 실제와 다소 다르게 나타날 수 있다.

따라서 차후로 사고사례나 현장 A/S 등을 통한 통계자료를 축적하여 실제 사용 환경에서의 전기다리미 부품 등에 따른 고장률이 얻어진다면 보다 정확하게 전기다리미의 화재발생확률 및 화재발생 주기를 예측하는 것이 가능하다.

〈표 2〉는 정상사상 발생을 위한 기본사상의 최소집합인 최소절단집합(Minimal Cut Set, MCS)과 이에 따른 비신뢰도를 나타낸 것이다. 표에서 보듯이 전기다리미의 화재라는 정상사상을 일으키는데 상위 25 %에 해당하는 최소절단집합이 대부분의 영향을 주고 있는 것으로 해석되었다. 특히, 기본사상 5와 6인 안전장치고장인 최소절단집합은 다른 값들보다 상당히 높아서 화재라는 정상사상을 일으키는데 가장 큰 영향을 미치고 있는 것을 알 수 있다.

〈표 2〉 최소절단집합 Lists

최소절단집합	비신뢰도(Unreliability)
Event1	0.00995
Event2	0.01489
Event3	0.01980
Event4	0.02078
Event7	0.04877
Event8	0.01980
Event5, Event6	0.15482

〈표 3〉 치명중요도 지수

기본사상	치명중요도
Event1	0.034452
Event2	0.051550
Event3	0.068562
Event4	0.071954
Event5	0.536054
Event6	0.536054
Event7	0.168867
Event8	0.068562

〈표 3〉은 치명중요도 지수 계산 결과를 나타낸 것이다. 표에서 보듯이 "자동온도조절기(바이메탈) 고장", "적하식 안전장치 고장"이라는 기본사상이 치명중요도 지수가 크게 나타났다. 이것은 이러한 기본사상에 관련된 부품을 신뢰성이 높은

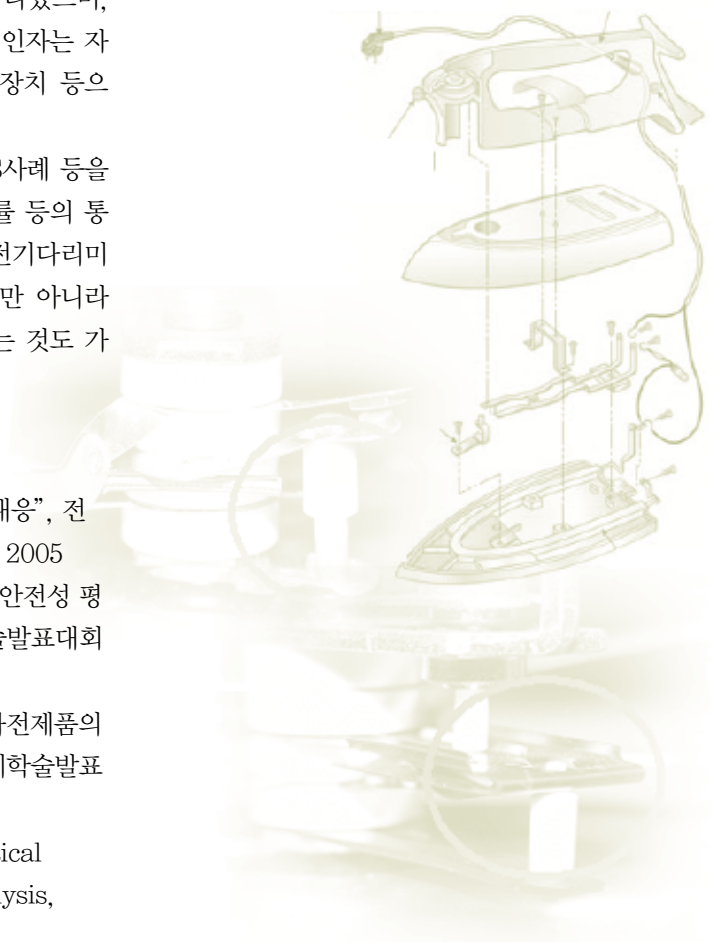
부품으로 교체함으로써 정상사상인 화재발생확률을 감소시킬 수 있다는 것을 의미한다.

5. 결 론

본 연구는 전기다리미의 화재위험성에 대하여 결함 수목 분석기법을 이용하여 분석한 연구이다. 화재위험성을 평가하기 위하여 정성적인 결함 수목을 구성하고, 정상사상인 화재가 발생할 확률 및 치명중요도 등을 계산하였다.

결함 수목 분석기법을 이용하여 전기다리미의 화재위험성을 평가한 결과 전기다리미의 화재발생 주기는 전기다리미를 일주일에 약 3시간 정도 사용한다고 가정할 때 약 18.8년으로 나타났으며, 화재발생을 감소시키는데 가장 중요한 인자는 자동온도조절기(바이메탈)와 적하식 안전장치 등으로 나타났다.

향후 실제 사고사례 조사나 현장 A/S사례 등을 통하여 전기다리미의 고장형태나 고장률 등의 통계자료를 축적한다면 보다 정확하게 전기다리미의 화재발생확률을 계산할 수 있을 뿐만 아니라 전기다리미의 화재발생 주기를 예측하는 것도 가능할 것으로 판단된다. FILK

【참고문헌】

1. 백동현, “가전제품 화재사례에 따른 대응”, 전기제품안전21, Vol. 142, pp. 17~19, 2005
2. 강인호, 강성기, “생활용 가전제품의 안전성 평가 사례”, 한국산업안전학회 춘계학술발표대회 논문집, pp. 369~374, 2002
3. 임현교외 7인, “FTA기법을 이용한 가전제품의 안전성 평가”, 한국산업안전학회 춘계학술발표회 논문집, 2002
4. J. I. Ansell & M. J. Phillips, Practical Methods for Reliability Data Analysis, Oxford, 1994
5. E. J. Henley & H. Kumamoto, Reliability Engineering and Risk Assessment, Prentice Hall Inc., 1981
6. B. J. Nicholas, System Safety Engineering and Risk Assessment, Routledge, 1997
7. 임현교, 시스템 안전공학, 산업인간공학연구회, 2005
8. 日本總合安全研究所, FTA 安全工學, 機電研究社, 1990
9. 박경수, 신뢰성 개론, 영지문화사, 1996