

안전성평가기법(FTA)를 이용한 전기히터의 화재위험성 분석

홍 성호/공학박사·책임연구원

Fire Hazard Analysis of Electric Heater using Fault Tree Analysis

1. 서론

현대사회에서 전기에너지는 없어서는 안 될 중요한 에너지원이며, 해마다 전기에너지의 사용이 생활수준의 향상과 전기기술의 발전에 힘입어 날로 증가함에 따라 전기로 인한 재해발생 가능성도 높아지고 있다. 전기로 인한 재해 중 전기화재가 근원이 되어 연소확대로 이어지는 경우 수많은 인명 및 재산상의 피해를 가져다주는 심각한 재해이다¹⁾.

특히, 일반 가정이나 사무실 등에서 겨울철에 많이 사용되는 전기히터는 항시 고온으로 사용되는 제품이므로 사용자의 순간적인 방심이나 부주의에도 화재가 발생할 수 있는 화재위험성이 높은 제품이다.

전기히터는 니크롬선 등에 의한 발열체를 가진 구조로, 전기히터에서 발생하는 화재는 주로 발열체에 가연물이 접촉 또는 근접한 상태에서 연소되어 화재가 발생한다²⁻³⁾.

본 원고에서는 각 가정에서 하나 이상 보유하고 있고, 특히, 겨울철에 많이 사용되어 화재발생 사고사례가 빈번한 전기히터의 화재위험성을 안전성평가기법 중 널리 사용되고 있는 결함수목분석(Fault Tree Analysis, FTA)을 이용하여 분석하는 방법을 소개하였다. 그리고, 이러한 기법을 이용한 위험성분석 사례 소개를 통하여 안전한 제품을 설계하는데 도움을 주고자 하였다.

2. 전기히터 구조

전기히터는 주요 구조부로서 히터(발열체), 후방안전망, 보호망, 반사판, 안전스위치, 지지대

등으로 구성되어 있다.

전기히터는 발열방법에 의해 발열체의 뒷면에 있는 반사판으로 열을 반사하는 반사형과 대류형, 반사형과 대류형이 복합된 혼합형 등으로 구분한다. 대류형은 자연대류방식과 송풍기를 이용한 강제대류방식이 있으며, 어느 방식이나 전기히터 전도에 의한 화재를 예방하기 위한 전도방지장치가 있다.

한국산업규격에서는 전기난로(전기스토브: KS C 9205)의 적용범위를 정격 소비전력 2 kW 이하인 반사형, 대류식 및 혼합형으로 규정한다.

2.1 반사형 전기히터

발열체로부터 발생된 방사열을 발열체 뒷부분의 스테인레스(stainless), 알루미늄(AL)으로 된 반사판으로 일정방향 반사하는 방향성 전열기인 반사형 전기히터는 대부분 온도조절장치가 없으며, 절환스위치로 2개의 발열체를 선택 동작시켜 연속적으로 발열체를 가열시킨다. 제품에 따라서 별도의 발열체를 사용하여 증기를 발생하거나, 반사판 뒷면에 송풍기를 부착하거나, 전기히터를 회전시켜서 넓은 부분을 보온하는 방식도 있다.

전기히터에 사용하는 발열체는 Figure 1과 같이 나사모양으로 진공의 석영관 또는 유리세라믹의 중간에 넣어서 사용하며, 발열체를 내장한 석영관 표면의 방사·복사열을 이용하여 난방에 사용한다.

석영관 발열체는 열보다 적외선의 투과성이 좋으므로 적외선 난로라고도 하며, 대부분 600~800 W의 정격소비전력을 갖는다.

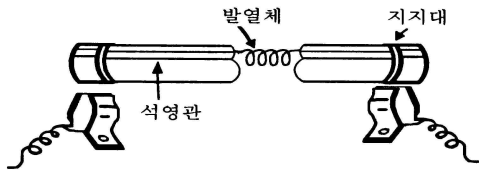


Figure 1. Structure of heating element for quartz tube type

2.2 대류형 전기히터

발열체에서 발생한 열을 공기를 이용하여 밀폐된 공간을 효율적으로 난방하는 대류형 전기히터는 대류방식에 의해 전열기를 회전시키는 자연대류방식과 송풍기를 이용하는 강제대류방식으로 구분한다. 열 확산성이 반사형 히터보다 우수하므로 가정용보다 사무실, 병원 등 넓은 면적을 난방하는 목적으로 주로 사용되며, 정격 소비전력은 1.5~3 kW의 범위가 많이 사용된다.

전기히터는 제조사별로 다양한 종류가 시판되고 있지만 열을 발생시키는 발열선이나 안전장치(전도안전장치, 온도 Fuse) 위치나 종류는 거의 유사하다. Figure 2는 현재 시판되고 있는 여러 가지 전기히터를 나타낸 것이다.



Figure 2. Electric Heater

3. Fault Tree Analysis

3.1 FTA의 특성

FTA는 연역적 기법으로 시스템 고장이라는 결과로부터 출발하여 시간을 거슬러 원인을 찾아가는 역방향 분석기법이다. 또한 FTA는 정성

적인 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 평가방법이다⁴⁻⁵⁾. 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 최종 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, 정상사상에 대한 제품의 고장률과 평균수리시간을 구할 수 있다⁶⁻⁷⁾.

3.2 FTA 분석절차⁸⁻⁹⁾

3.2.1 제 1단계 - 분석 범위 정의 및 수준 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 특성과악

FTA가 성공적으로 이루어지려면 시스템에 대해 상세히 숙지하고 있어야 한다.

3.2.3 제 3단계 - 정상사상의 정의

시스템의 부품 및 시스템 전체 등에 대한 경과를 모형화하고 대책을 설정할 문제점들에 대해 중요도나 우선순위를 결정하여 분석할 대상이 되는 사항을 정상사상으로 선정한다.

3.2.4 제 4단계 - Fault tree 구성

Fault tree를 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 복합 고장을 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 논리연산자를 나타내는 기호이다. 이 기호들은 기초사상들이나 정상사상과 연결시킨다든지, 기초사상들을 상위의 중간사상들과 연결시키는 역할을 하며 여기에는 AND, OR 등이 있다. Table 1은 이러한 Fault tree 작성시 사용되는 기호들의 예를 나타낸다.

3.2.5 제 5단계 - Fault tree의 정성적 분석






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

(1) Fault tree의 타당성 조사

정성적 분석의 첫 단계는 구성된 결함수에 대한 타당성 조사이다. 이것은 대부분의 경우 추가적인 분석의 형태와 분석범위를 올바르게 결정

하기 위하여 수행된다. 이 때 검토되는 사항은 주로 결함수의 구조, 공통사상의 구명, 그리고 독립적인 가치의 탐색이다.

Table 1. Fault tree analysis symbols

분류	명칭	기호	내용
기초 사상	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

(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

Fault tree에 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.

(1) 정상사상의 발생확률

사상의 발생이 독립인 경우 사상 1, 2, ... n의 발생확률을 q_1, q_2, \dots, q_n 이라 하면 정상사상의 발생확률은 식 (1)과 같이 표현된다.

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

(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 $\frac{\Delta q_j}{q_j}$ 에 대한 정상사상 발생

확률의 변화율 $\frac{\Delta g(Q)}{g(Q)}$ 의 비로 정의되며, 확률

중요도 척도에 임의의 기본사상 j가 발생할 확률을 곱하고 이것을 정상사상이 발생할 확률로 나눈 것이다. 치명중요도 지수값이 크다는 것은 해당 기본사상의 신뢰성을 증가시키면 정상사상의 발생확률을 현저히 저감할 수 있다는 것을 의미한다. 이러한 치명중요도 지수인 $I_c(j)$ 는 수학적 함수들의 특성에 따라 식 (2)와 같이 계산된다.

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

3.2.7 제 7단계 - 분석결과의 보고

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

4. FTA를 이용한 화재위험성 분석

4.1 정상사상

Fault tree의 정상사상은 일반적으로는 대상 시스템의 바람직하지 않은 사상이다. FTA에서 정상사상을 설정할 때에는 여러 가지 분석, 검사결과 또는 사고사례를 감안하여 결정하게 된

다. 일반적으로 대상시스템의 계획외 정지나 성능저하 현상 등을 설정하게 된다⁷⁾.

본 원고는 전기히터의 화재위험성 평가를 위한 것이므로 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 원고에서 논하는 전기히터와 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 원고에서는 전기히터 FT에 대한 기본사상이 되는 부품 등의 고장률을 미국 MIL-HDBK-217F(Reliability Prediction of Electronic Equipment)를 근간으로 적용하였으며, MIL-HDBK-217F에 없는 고장률데이터는 데이터 분석을 위하여 유사한 사례를 기준으로 추정하였다. 이와 같은 고장률 및 가정들을 근간으로 하여 구성한 FT를 Figure 3에 나타내었다.

4-3. FTA 분석결과

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

Table 2는 최소절단집합을 나타낸 것으로 각 MCS가 나타내는 의미는 정상사상인 화재가 발생하기 위한 최소한의 집합을 나타내는 것이므로 이 MCS를 제거하면 정상사상이 발생하지 않는다는 것으로 해석된다. 따라서 이러한 MCS를 확인하면 한번에 정상사상을 발생시킬 수 있는 요소들을 분석할 수 있다.

본 원고에서 나타낸 FT는 다소 간단한 것이기 때문에 필요성을 느끼지 못할 수 있으나 복잡한 시스템에서는 이러한 MCS에 의한 정성적 분석을 통하여 위험요인을 제거할 수 있다.

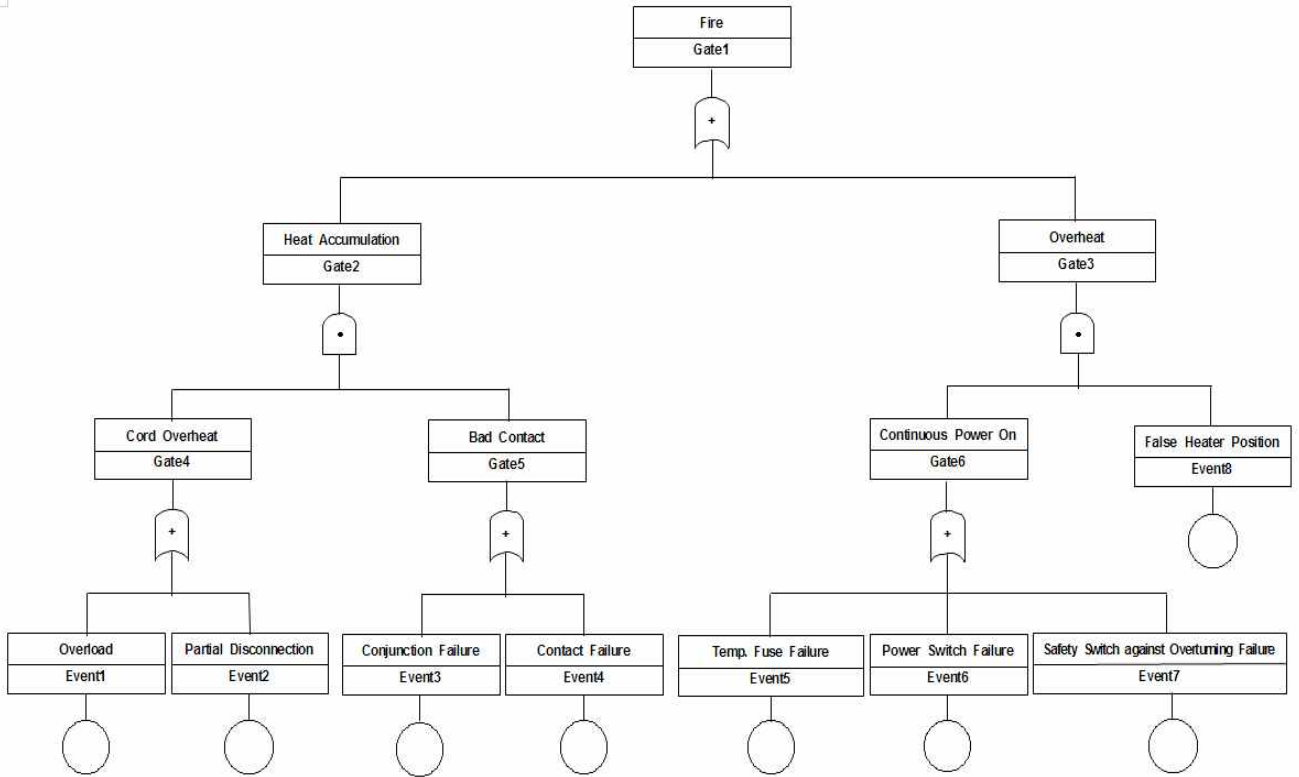


Figure 3. Fault tree for electric heater

Table 2. Minimal cut sets

No.	MCS
1	Event 1, 3
2	Event 1, 4
3	Event 2, 3
4	Event 2, 4
5	Event 5, 8
6	Event 6, 8
7	Event 7, 8

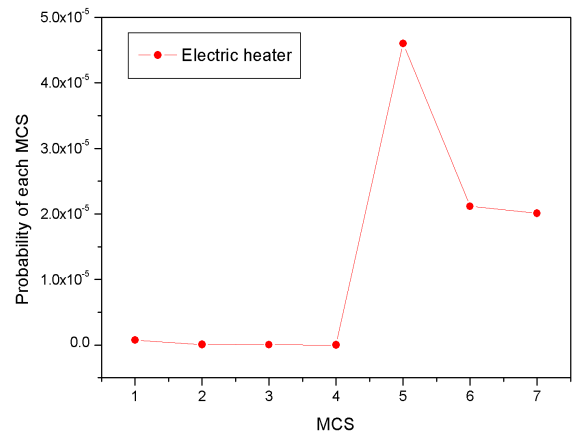


Figure 4. Probability of each MCS

Figure 4는 각 MCS의 발생확률을 나타낸 것으로 MCS 기본사상 5와 8로 구성된 MCS No. 5의 확률이 가장 높게 나타났다. 이는 이러한 기본사상이 전기히터 화재에 가장 영향을 미친다는 것을 의미한다.

정상사상이 발생에 어떤 기본사상이 가장 영향을 미치는 가를 확인하는 또 다른 방법은 치명중요도를 검토하는 것이다.

Figure 5는 치명중요도와 확률중요도를 나타낸 것으로 그림에서 보듯이 확률중요도는 각 기본사상별로 차이가 없게 나타났지만, 정상사상 발생에 영향을 주는 요소를 확인하는 치명중요도는 기본사상 5와 8의 값이 다른 치명중요도보다 높게 나타났다. 이는 온도 fuse 고장이나 전도안전장치 고장은 정상사상인 화재가 발생되는데 매우 높게 작용한다는 것을 알 수 있다.

즉, 온도 fuse나 전도안전장치의 신뢰성이 높으면 정상사상인 화재발생 확률이 낮은 것을 반증하는 것이다.

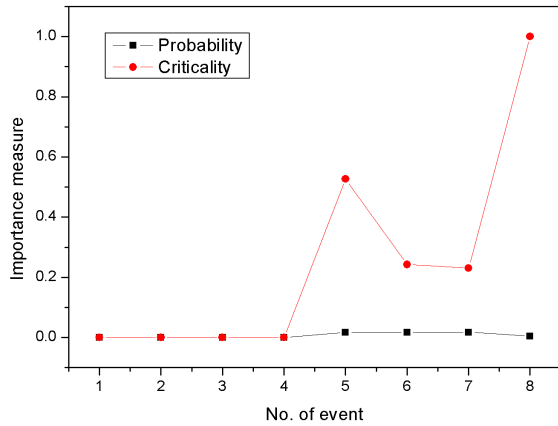


Figure 5. Importance measure

전기히터는 추운 계절에 집중적으로 사용하는 제품이다. 따라서 본 원고에서는 추운 계절 3개월간 전기히터를 집중적으로 사용한다고 보았을 때 전기히터의 연간 사용시간을 약 1 000시간으로 가정하였다. 운전시간을 1 000시간으로 하여 전기히터 화재라는 정상사상이 발행 확률은 약 8.81×10^{-5} 로 나타났다. 즉, 동일한 제품 100대가 연간 1 000시간을 사용한다고 가정하면 화재가 발생할 확률은 약 0.88 %라고 간주할 수 있다. 물론 이 수치는 동일한 제품이라 하더라도 사용자의 전기히터 사용상, 제품별 사용환경 등에 따라 값이 달라지기 때문에 다르게 나타날 수 있다. 또한 본 원고의 FT에는 사용자 부주의와 같은 Human error부분이 고려되어 있지 않기 때문에 실제 사용조건과 다소 상이한 결과일 수 있다. 다만, 본 원고에서는 FTA를 이용하여 전기제품의 화재위험성을 분석하는 방법을 통하여 실제 실험을 거치지 않고 위험요인을 도출하거나 위험 발생 가능성을 예측하는 방법 등을 고찰하는 사례를 제시한 것이다.

5. 결론

본 연구는 전기히터의 화재위험성에 대하여 FTA를 이용하여 분석한 연구이다. 화재위험성을 평가하기 위하여 정성적인 FT를 구성하고,

정상사상인 화재가 발생할 확률 및 치명중요도 등을 계산하였다.

FTA를 이용하여 전기히터의 화재위험성을 평가한 결과 1 000시간을 사용할 때 전기히터 화재발생확률은 약 8.81×10^{-5} 로 나타났고, MCS 치명중요도 등을 분석하였을 때 전기히터의 화재발생에 가장 영향을 미치는 요인은 온도 Fuse 작동불능, 전도안전장치 고장으로 나타났다.

본 원고에서는 Human error부분을 고려하지 않았으나 향후 실제 사고사례 조사나 현장 A/S 사례 등을 통하여 전기히터의 고장형태나 고장률 등의 통계자료를 축적하고, Human error 등을 고려한 FT를 구현한다면 보다 정확하게 전기히터의 화재발생확률을 계산할 수 있을 뿐만 아니라 전기히터의 화재발생 주기를 예측하는 것도 가능할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 최충석, 김향곤, “전기화재 예방 및 메커니즘 기술개발 동향”, 한국전기전자재료학회지, Vol. 19, No. 4, pp.12~20, 2006
2. 백동현, “가전제품 화재사태에 따른 대응”, 전기제품안전21, Vol. 142, pp. 17~19, 2005
3. 강인호, 강성기, “생활용 가전제품의 안전성 평가 사례”, 한국산업안전학회 춘계학술발표대회 논문집, pp. 369~374, 2002
4. 윤석범외 6인, “FTA기법을 이용한 가전제품의 안전성 평가”, 한국산업안전학회 춘계학술발표회 논문집, 2002
5. J. I. Ansell & M. J. Phillips, Practical Methods for Reliability Data Analysis, Oxford, 1994
6. E. J. Henley & H. Kumamoto, Reliability Engineering and Risk Assessment, Prentice Hall Inc., 1981
7. B. J. Nicholas, System Safety Engineering and Risk Assessment, Routledge, 1997
8. 임현교, 시스템 안전공학, 산업인간공학연구회, 2005
9. 日本総合安全研究所, FTA 安全工学, 機電研究社, 1990