

원자력 발전소에 있어서 방화(防火)의 최적화를 위한 확률론적 방법

김 화 중*

.....

요 약

독일 원자력 발전소에서는 포괄적인 방화 연구의 한 부분으로써 방화에 관한 분석과 그것을 최적화할 수 있는 확률론적 방법을 개발하였다. 그 일반적인 흐름을 살펴보면, 미국의 화재 위험성 분석의 방법을 따랐으며, 세밀한 부분에서는 약간의 수정을 한 것이다. 먼저, 선정된 공장지역에서의 화재 사건 경로(fire event tree)는 화재가 발생했을 때, 방화 조치와 안전시스템을 능수능답적으로 고려해서 설정된다. 방화 조치와 안전 시스템에 있어서의 실패 모델(failure model)은 발화 후 시간과 화재 영향과 같은 일상적인 변수와 관련해서 생긴다.

이러한 관련성은 일차(first-order) 시스템의 신뢰성 이론을 적절히 이용해서 화재 사건 경로를 분석할 때 알 수 있다. 더불어 화재가 발생했을 때 방화 시스템의 실패 빈도, event paths의 상대적인 비중, 이러한 path 내에서의 방화 조치 그리고 실패모델의 변수 등은 모두 시간 함수로 계산된다. 이러한 자료에 근거를 두고, 방화의 최적화는 주로 event path, 방화조치와 비중이 가장 큰 변수를 수정함으로써 가능하게 된다. 이것은 독일의 1300 MW PWR reference plant를 예를 들어서 증명될 것이다. 또한 충고를 받아들여서 수정을 하는 것은 발전소 직원과 화재 피해의 위험성을 줄일 수 있다는 것을 보여주고 있다.

.....

1. 서 론

1982년부터 1984년까지 원자력 발전소 /1/에서는 방화에 관한 이론적이면서 실험적인 연구가 몇개의 독일 연구단체에 의해 포괄적으로 행해졌다. 그 작업은 Federal Minister of the Interior (BMI)의 후원을 받았고, GRS(Gesellschaft für Reaktorsicherheit)가 중심이 된 것이다.

이러한 연구의 주 목적 중 하나는 위험한 공장 지역에 있어서 화재위험성을 정량적으로 분석하는 방법을 개발하는 것이었다. 즉, 다음 4가지를

위한 것이다.

- 각각 다른 내부 또는 외부 사건에 따른 위험과 화재위험의 비교
 - 방화 측면에서의 취약점 발견
 - 방화 조치에 있어서 보다 더 효율적으로 조화시킴으로써 화재 위험을 줄이는 것.
 - 가장 중요한 변수를 적용시킴으로써 더 효율적인 방화조치를 만드는 것.
- 처음에는 화재 해석 /2/와 화재 위험성 분석을 하는 미국식 방법이 연구되어왔다. 그러나, 이러한 방법은 독일의 원자력 발전소에 있어서는 적당하지 않은 것 같다. 왜냐하면,
- 독일인의 방화 개념은 주로 시스템 간의 물리

* 경북대학교 건축공학과

원자력 발전소에 있어서 방화의 최적화를 위한 확률론적 방법

적인 분리에 근거를 두고 있지만, 화재 진압 조치에는 중점을 두지 않고 있다.

- 방화 조치와 안전시스템에 관한 화재의 영향이 확실히 고려되어 있지 않다.
- 시간에 따른 화재 영향과 단순 실패(single failure) 사이의 관계가 사건 경과분석에서 명확하게 다루어지지 않았다.

그러므로, 일차 신뢰성 이론(first-order reliability)을 기초로 해서 약간 수정되었다고 볼 수 있는 이 방법론은 다음과 같은 것들로 구성하여 개발되었다.

- 시간에 따른 화재 사건 경과의 평가
- 신뢰성 분석에 사용되는 방화 조치 및 안전시스템에 있어서의 실패모델을 단순화해서 정의하는 것.
- 선형 시스템의 신뢰성 방법을 이용해서 화재 사건경과의 분석
- 사건 경과 분석의 결과에 근거를 둔 방화 조치의 최적화

아래의 두 단계는 독일의 1300 MW PWR reference plant의 예를 들어서 증명될 수 있다.

2. 시간에 따른 화재 경과분석(fire event trees)

/1/에서의 위험성에 초점을 둔 조사는, 독일의 전형적인 PWR 공장 지역을 선택하는 것으로 시작되었다. 그 지역에서의 잠정적인 화재 위험성은 안전시스템이나 발전소 직원을 위험에 처하게 할 수 있다. 이러한 지역에서는, 초기 화재 발생에 따라서 사건이 연속적으로 발생한다. /2/와 비슷하지만, 다른 방어적인 조치들은 화재를 감지하고 진압하기 위해서 마련되며, 또는 안전시스템과 직원에게 화재의 영향을 제한하기 위하여 마련되어 있다.(그림 1) 경험으로 보아서, 발화 후 그러한 조치가 가능할 수 있는 시간대 즉, 최소와 최대 시간대는 아주 적극적인 화재 방어조치를 위해서 추정할 수 있다.

적극적인 화재 방어 조치의 성공 또는 실패에 의존하여, 화재 효과의 다른 time-histories가 기대된다. 그림 2에서는 어떤 시간-온도 곡선은 다음과 같은 경계 조건을 보여준다.

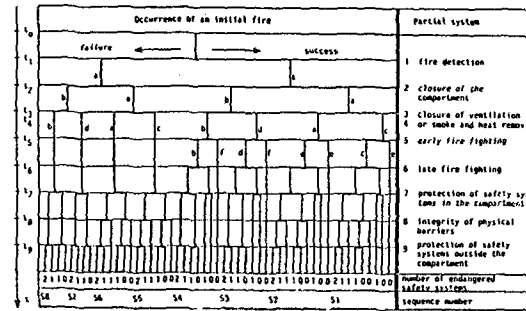


그림 1.

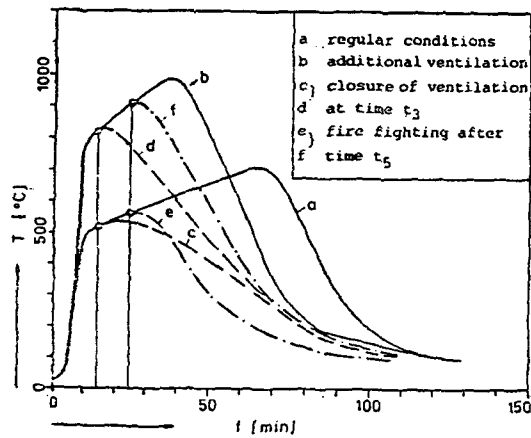


그림 2.

- curve a - 정상상태, 칸막이가 닫혀있고, 강제 환기율이 일정하며, 화재진압이 없다.
 - curve b - 적어도 한개의 문이 열려 있고, (더 높은 환기율) 화재 진압이 없다.
 - curve c - a와 비슷하나, 시간 t_3 에서 환기가 멈춘 것이다.
 - curve d - b와 비슷하나, 시간 t_3 에서 환기가 멈춘 것이다.
 - curve e - a와 비슷하나, 시간 t_3 에서 화재진압이 시작된다.
 - curve f - b와 비슷하나, 시간 t_3 에서 화재진압이 시작된다.
- 만약, 화재 진압조치가 알맞은 시간에 알맞게 작동된다면, 온도증가가 너무 빨라서 curve e와 f

는 결과 분석에서 무시될 수 있다.

위에서 언급된 시간-온도 곡선 중의 하나는 그림 1의 사건경과의 각 과정에 해당된다. 화재 발생 시 화재 방어 조치나 안전시스템의 실패는 어떤 요구 시간에 있어서 그 온도가 얼마인가에 따라 발생할 수 있다. 그러므로, 발전소 내의 화재 결과도 역시 시간에 따른다고 볼 수 있다. 시간 경과의 분석에 있어서, 중요한 결과가 자주 발생하는 것, 즉, 방화 구획에 있는 안전 시스템이 자주 작동하지 않는다는 두 구획 사이에 있는 어떤 물리적인 장치가 고장난다든지, 또, 인접 구획에 있어서 두번째로 자주 발생하는 고장 등이 변화하는 시간 단계 t^* 에 따라 체크된다.

3. 방화조치와 그 시스템에 있어서 고장 모델

(failure models for fire protection measures and systems)

화재 영향이 시간에 따라 다르다는 것을 설명하기 위하여 단순고장(single failure)은 단순화시킨 기계 모델을 이용하여 설명된다. 그 모델은 다음과 같다.

적극적인 방화조치는 그림 1에서 지적된 대로 6가지 “부분적인 시스템”으로 나누어진다. 즉,

- 화재감지와 경보
- 구획 경계부분에서 개구부의 폐쇄
- 구획 환기를 폐쇄하거나 셔터를 내림
- 연기와 열의 제거
- 구획 내에서의 빠른 초기 진압
- 구획 바깥으로부터 발화 후 화재진압

이러한 부분적인 시스템은 “부품(components)”으로 구성되는데, 그것은 병렬, 직렬 배열로 작동한다. 이 부분적인 시스템의 고장 빈도율(failure frequencies)은 fault tree 모델을 이용하여 부품(components)들의 고장율로부터 얻을 수 있다. (그림 3)

“부품(components)”의 고장율은 통계 데이터로부터 부분적인 것만 알 수 있다. 특히, 화재를 일으키는 원인이나 늦게 작동하는 방화 시스템 등은 데이터만으로는 충분히 막을 수 없다. 그러므로, 단순화된 한계상황(limit-state) 모델은 일차

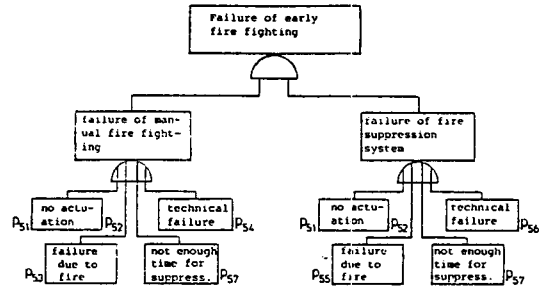


그림 3.

신뢰성 이론(first-order reliability)을 이용해서 명확하게 다루어진다. 부분적인 시스템에 있어서는 그림 3과 같이 “초기 화재진압” 즉, 한계상황(limit-state) 함수는 다음과 같다 :

$$P_{51} = P \{Z_{51} - \beta_{51}\}$$

β_{51} = P_{51} 을 위해 통계적 데이터로 측정된 표준 가우스 변수

$$P_{52} = P \{Z_{52} - \beta_{52}\}$$

$$\beta_{52} = \beta_{51} \text{과 유사}$$

$$P_{53} = P \{Z_{53} \leq T_{RM} - T(t_5)\}$$

$$T_{RM} = \text{수동화재진압에 있어서 최고온도(}^\circ\text{C)}$$

$$T(t_5) = \text{시간 } t_5\text{에서의 가스온도(}^\circ\text{C)}$$

$$t_5 = t_1 + \Delta t_5$$

= 화재감지시간 + 화재신고자가 도착해서 감지하는데 걸리는 지연시간

$$P_{54} = P \{Z_{54} \leq -\beta_{54}\}$$

$$\beta_{54} = \beta_{51} \text{과 유사}$$

$$P_{55} = P \{Z_{55} \leq T_{RL} - T(t_5)\}$$

$$T_{RL} = \text{화재진압시스템에 있어서 최고 온도(}^\circ\text{C)}$$

$$P_{56} = P \{Z_{56} \leq -\beta_{56}\}$$

$$\beta_{56} = \beta_{51} \text{과 유사}$$

$$P_{57} = P \{Z_{57} \leq t^* - t_5 - \Delta t_5^*\}$$

$$t^* = \text{결과 체크시 변하는 시간}$$

$$\Delta t_5^* = \text{화재진압 완료까지 걸리는 시간}$$

소극적인 방화 기구(물리적 장치)와 안전시스템의 고장 빈도율(failure frequency)은 화재에 많은 영향을 끼치는데, 그 중에서도 특히 가스 온

도에 많은 영향을 준다. 그 가스 온도는 초기 화재 발생 후 시간의 함수이다. 안전 시스템(기계적이고 전기적 요소)에 있어서, 최고가스온도는 화재 테스트나 실험을 거쳐서 설계되어져야만 한다. 소극적인 방화 기구는 보통 표준 화재 시험으로 테스트를 받는다. 독일에서는 DIN 4102 /6/이다. 이러한 기구들의 내화성은 가스 온도에 관계할 뿐만 아니라 온도가 변화하는 시간에도 관계한다: 그러므로, 내화시간에 대한 표준 화재곡선의 시간적분은 내화의 최대 한계로 받아들일 수 있다. /1/은 이 최대 한계가 표준 화재 뿐만 아니라 구획 내에서의 자연화재에도 유효하다는 것을 나타내 주고 있다.

소극적인 방화기구와 그 안전시스템 뿐만 아니라, 적극적인 방화 기구의 “부품(components)”에도 사용되는 전체 한계상황(limit-state)에 대한 정의는 표1에 요약되어 있다. 한계상황(limit-state)에 영향을 미치는 parameter는 불규칙 변수이며, 분배 parameter로 설명된다. 한계상황(limit-states)은 종속이며, 따라서 공통 parameter이다.

4. 시스템 신뢰성 평가

그림 1에서의 화재 event tree는 어떤 시리즈 배열로써 같은 결과를 나타내는 다른 사건들이 연속적으로 이루어져서 하나의 기계적 시스템처럼 다룰 수 있다. 각 사건들이 연속되면서, 앞 부분에 따라나오는 다음 partial system은 나란히 배열되어 있다. 마침내, partial system은 몇개의 “부품(components)”으로 이루어져서 병렬 또는 직렬 시스템으로 작동한다. 전체 시스템의 상태는 Boolean algebra을 이용하여 명확히 할 수 있다. 그렇지 않으면, 시스템 상태는 하나하나의 “부품(components)”상태로 직접 설명하거나, 중계 시스템(즉, 사건의 연속)이나, 일종의 macro-components인 부분 시스템을 이용해서 간접적으로 설명될 수 있다.

다음에 두번째 “부시스템 방법(subsystem method)”은 계산하기가 쉽고, 그 결과를 이해하는 데 쉽기 때문에 주로 이용되고 있다. 위에서 언급된 의존성 때문에, 어떤 단독 부품(component) 사이

원자력 발전소에 있어서 방화의 최적화를 위한 확률론적 방법

에는 fault tree와 event tree analysis 를 하기 위한 전통적인 방법은 적용될 수 없다. 예를 들면, 전체 시스템 상태의 빈도라는 것은 곱하거나(교집합으로) 또는 부품을 합하거나(합집합으로), 큰 부품 상태의 빈도로 계산할 수 없다. 그러므로, 일차 선형 시스템 신뢰성(first-order system reliability) 방법은 /7-10/에서 제안하는 데 근거를 두고 사용된다. 여기서는 아주 작은 부분만을 다루고 있다.

앞에서 보았듯이, 모든 단독 부품(components)은 상태함수(state function) Z_i 로 나타낸다.

$Z_i \leq 0$: 부품 고장

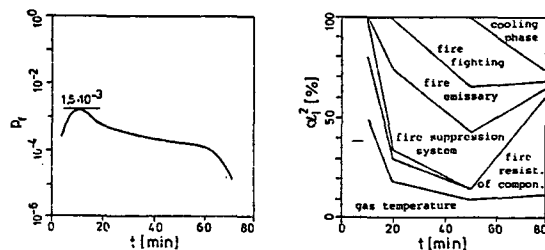
$Z_i \geq 0$: 부품 성공

만약, Z_i 가 그림 4에 의해서 매개변수 벡터 x 의 함수이며, 각각의 매개변수가 분배 가능이라면, 부품이 고장날 확률은,

$$P_{fi} = p(Z_i(X) \leq 0)$$

일차 선형 신뢰성 방법으로 계산할 수 있다. 이 방법의 기본 원칙은 한계상태(limit-state) Z_i 를 비상관 표준가우스 변수의 선형함수로 변형시킨 것이다. 그러면, 확률 분배인 ϕ_{Z_i} 도 역시 표준 가우스이며, 쉽게 결정된다. 즉, 고장날 확률은 $\phi_{Z_i}(Z_i = -\beta_i)$ 이다. 여기서 β_i 는 소위 안전지수라고 한다. 안전지수 β_i 에 대한 매개변수 X_i 의 random variation의 분포는 소위 비중값(weighting factor) α_{xi} 로써 알 수 있는데, 그 값은 /8/에 의해 한계상황이 선형일때 계산된다.

비중값 α_{xi} 는 한계상황에서 매개변수 X_i 의 상대



김화중

적인 중요성을 나타내는 데 적절한 수단이 된다. 그것들은 또한 공통 매개변수 X를 가지는 Z_i 와 Z_j 의 두 한계상황 사이의 상관 정도를 평가할 수 있게 해 준다. 왜냐하면, 상관계수 ρ_{ij} 는 간단히 다음과 같다.

$$\rho_{ij} = \sum_{k=1}^n \alpha_{ik} \cdot \alpha_{jk}$$

이제, 시스템 분석을 위한 조건은 다음과 같다.:

- 시스템의 모든 부품은 상태함수 Z_i 로 나타낸다.
- 안전지수 β_i 와 비중값 α_{xi} 는 각각의 한계상황에서 각각 계산된다.
- 두 한계상황 Z_i 와 Z_j 에 있어서 상관계수는 ij 는 방정식 (3)에서 결정된다.
- 병렬과 직렬배열로 되어 있는 부품의 partial systems의 상태는 서로 관련있는 부품상태의 교집합과 합집합으로 분석되어야 한다. 예를 들면 그림 3에 따른 partial system 5번인 "초기화재진압"의 실패율 F_5 는 :

$$F_5 = \{(Z_{51} \leq 0) \cup (Z_{52} \leq 0) \cup (Z_{53} \leq 0) \cup (Z_{55} \leq 0) \cup (Z_{57} \leq 0)\} \\ \cap \{(Z_{51} \leq 0) \cup (Z_{52} \leq 0) \cup (Z_{55} \leq 0) \cup (Z_{56} \leq 0) \cup (Z_{57} \leq 0)\}$$

- 모든 시스템의 상태는 서로 상관있는 partial system 상태의 합집합으로 나타낸 각각 다른 event sequence 상태의 교집합으로 계산된다. 예를 들면, 그림 1의 "안전시스템에 있어서 두가지 과잉의 손실"의 결과는 :

$$F = \{S1 \cup S2 \cup S3 \cup \dots \cup S8\}$$

그리고,

$$S1 = \{F_1 \cap F_2 \cap F_3 \cap F_4 \cap F_5 \cap F_6 \cap F_7 \cap F_8 \cap F_9\}$$

상태 확률론을 분석하기 위해서는, 교집합은 /9/, 합집합은 /10/의 근거 하에 multi normal 확률론을 적용한 근사치가 적용된다. partial sys-

tem, intermediate system과 모든 시스템에 있어서는 /7/에 따른 등가 선형식을 이용함으로써, 등가 안전지수와 등가 비중값은 이러한 전 시스템에서 계산된다. 이러한 값은 꽤 복잡한 시스템 분석의 결과를 이해하는데 도움을 준다.

5. 방화조치의 최적화

원자력 발전소에서의 방화조치에 관한 최적화와 그것의 질적인 통제에 관한 최적화는 각기 다른 목표를 가질 수 있다. 예를 들면 :

- 어떤 화재 안전 수준에 있어서 총 건설비, 그 통제, 유지비와 위험 비용을 최소화하는 것.
- 한정된 비용을 위해서 화재로 이어질만한 사건들의 빈도를 최소화하는 것.
- 더 효과적인 방화 조치의 도움으로 화재로 이어질만한 사건들의 빈도를 줄이는 것.

각각 다른 비용 제공에 관한 정보가 매우 부족하기 때문에, 더 실질적인 세번째 목표를 /1/에서 최적화를 위해 선택했다. 방화조치의 평가를 위한 훌륭한 근거는 시스템의 신뢰성 분석에 따른 결과라고 할 수 있다. 그것은 다음과 같다.

- 발전소 지역은 원자로 안전, 발전소 직원 또는 발전소 작동에 있어서 화재가 발생할만한 중요한 곳이다.
- 방어조치는 화재의 빈도율이나 피해비용을 확실하게 줄인다.
- 매개변수는 가장 중요한 역할을 하는 방어 조치의 효과에 대해서 가장 큰 영향을 받는다.

그다지 위험하지 않는 발전소 지역에서의 화재 안전수준은 기존의 요구조항에 따르면 된다. 그러나 위험한 지역에서는 더 높은 수준의 화재안전이 그 화재에 따른 피해를 최소화하기 위하여 필요하다고 본다. 비용만 많이 들고 믿을 수 없는 방화조치는 피해야 한다. 또한 피해의 범위나 빈도율에 관해서 아무런 영향도 미치지 않는 방화조치도 적당하지 않다. 방화조치의 효과를 증가시키는 가장 좋은 방법은 가장 큰 비중치를 가지는 매개변수를 바꾸어 보는 것이다.

6. Plant의 적용 사례

앞장에서 기술한 방법은 독일의 1300 MW PWR reference plant(1)에 적용되어졌다. 그것은 1) 방법론의 효과를 증명하고, 2) 가능한 한 입력 데이터가 완전한지 그렇지 않은지를 검토하고 불확실한 입력데이터의 영향을 연구하며, 3) 화재 안전개념을 평가하고 상대적인 약점을 발견하고, 4) 방화조치의 최적화에 있어서 장점과 그것과 관련된 질적 통제를 유도하기 위한 것이다.

선정된 모든 plant 지역에서 위험한 화재를 일으킬 수 있는 결과의 빈도율 P_f 는 초기화재 발생 후, 시간의 함수로 계산될 수 있다.

대부분의 경우에 있어서 화재가 발생했을 때 가장 위험한 상황을 나타내는 최대 P_f 가 존재한다. 최대치 이후의 P_f 의 감소는 화재의 냉각기로 인한 것이기도 하고 또, 화재 진압의 결과이기도 하다; 즉, 공기차단이라는 것은 신뢰할 수 없는 상황이므로 영향을 미칠 수 없다. 그 외에, 빈도율 P_f 는 또는 시간의존의 제공한 비중값 α^2 (시스템 전체에 있어서 동일한 값)으로써 결정되어진다. 증명을 위해서, 원자로 건물의 창고에서 주요 냉각펌프 영역의 분석으로부터 빈도 P_f 와 비중값 α^2 는 그림 4에서 설명된다. 안전시스템에 있어서 화재로 인한 큰 충격은 전기장비의 고장으로 인한 화재로부터 발생한다. 단지, “정상적인” 시간-온도 곡선만이 주목받고 있다. 대부분의 위험 상황은 화재진압 시스템에 의해 화재진압이 아직 수동적으로 작동되지 않을 때인 화재의 초기단계이다. 이 단계에서 중요한 매개변수는 가스온도와 이 영역

원자력 발전소에 있어서 방화의 최적화를 위한 확률론적 방법

전기장비의 최고온도이다. 초기 화재 발생 후 약 10분경에, 진압시스템으로 인해서 초기화재진압은 효과적이고, P_f 는 감소된다. P_f 는 후기화재진압과 화재의 하강기 시초에서 점점 더 감소한다. 화재 초기에 전체 주요 냉각펌프의 전기장비가 고장나 버리기 때문에, 고장을 P_f 를 줄이는 가장 좋은 방법은 화기진압 시스템을 즉시 작동시키는 것이다. 다시 말해서, TV 모니터로 그 상황을 체크한 후 통제실로부터 수동적으로 작동하거나, 자동적으로 화재감지기가 작동하는 것이다. 그러한 조치는 발전소 직원의 위험을 줄이고 유독성 가스가 퍼지는 위험을 제한할 수 있다.

7. 결 론

원자력 발전소에 있어서 화재위험성의 정량적 평가를 위하여 확률론적인 방법이 개발되어왔다. 이것은 fire event sequence가 능동적이거나 수동적인 방화조치에 의해 성공적이거나 그렇지 못하느냐에 근거를 두고 있다. 이러한 조치가 작동이 되지 않는 것과 화재가 발생했을 때 안전시스템이 작동하지 않는 것은 화재로 인한 것으로서 아주 일반적인 것이다. 일차 선형 신뢰성 방법으로, event tree 분석에서 이 의존성은 모델화될 수 있고, 적절히 계산된다. 그 밖에 사건 결과에 있어서 좋지 않는 결과가 나올 빈도율, 사건 결과의 상대적인 비중, 방화조치와 조치에 영향을 미치는 변수들이 결정된다. 이러한 정보를 바탕으로 해서 화재안전 관점에서의 약점들을 쉽게 알아낼 수 있고, 요구되는 화재안전 수준에 알맞는 방화조치를 적합하게 조화시킬 수 있다.