

## 한국형 표준원전 화재사건에 대한 2단계 PSA 불확실성분석

김시달, 안광일, 박수용, 김동하, 진영호

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요 약

한국형 표준 원전(울진 원전 3,4 호기) 화재 사건에 대한 2 단계 확률론적 안전성평가 (Level 2 PSA) 에서 격납건물 파손모드에 큰 영향을 준다고 판단되는 현상들에 대한 불확실성 분석을 수행하였다. 불확실성 분석 대상은 주로 민감도분석 및 기존 2단계 PSA 수행결과 중요한 인자로 선정된 8가지 주요 현상들로 국한하였다. 수행 방법은 성층화 추출방식 (Latin Hypercube Sampling) 으로부터 발생된 1000개의 표본을 사용하였고, 분석결과는 두가지 불확실성 척도로 제시하였으며, 사용된 코드는 2 단계 PSA 분석용 전산코드인 CONPAS 이다. 불확실성 관리측면에서, 제일 불확실성이 높은 격납건물 파손모드인 원자로 공동바닥관통의 불확실성 인자를 줄이기 위해서는 CR-EJECT 현상에 대한 불확실성을 줄여야 할 것이다.

### 1. 서론

한국형 표준원전 (울진 원전 3,4 호기) 화재 사건에 대한 2 단계 확률론적 안전성평가 (Level 2 PSA) [1] 에서는 노심손상부터 격납건물파손에 이르는 사고진행 전 과정을 분석하기 위하여 격납건물사건수목 /분해사건수목 (CET/DET) 방법을 사용하였다. 이 방법에 따라 격납건물내 사고진행과정을 기술하기 위한 초기조건을 이루는 발전소손상군 (PDS) 이 발전소 및 격납건물 계통관련 정보를 기술하는 발전소손상군사건수목 (PDS Event Trees)으로부터 결정되었으며,

격납건물 파손모드 및 관련 방사선원항 특성에 주요 하다고 판단되는 현상은 CET 분기점으로 모델링하고 각 CET 분기점 현상을 유발하는 세부현상은 DET 를 통하여 모델링하였다. 이 경우 CET 모든 현상에 대한 영향은 DET 각 분기점 확률로 주어졌다. 최종적으로 격납건물 파손모드를 이루는 모든 CET 사고경위는 방사선원항 논리도 (STC Logic Diagram) 를 통하여 그루핑하였다. 하지만 중대사고 현상에 대한 지식의 한계 때문에 노심손상 과정과 냉각재 계통 및 격납건물내에서 방사성 핵종의 거동을 모델링하고 분석하는 데는 여러 불확실성이 내포되어 있다. 따라서 사고진행분석의 각 단계에 상존하는 불확실성과 사고진행의 모델링시 나타난 불확실성은 격납건물 파손모드와 빈도에 영향을 미친다. 본 연구는 한국형 표준 원전인 울진 원전 3,4 호기의 화재 사건에 대한 2단계 PSA 를 수행하고 분석하는 과정에서 DET 각 분기점에 묘사된 주요 현상에 대한 불확실성이 종합적으로 격납건물 파손모드의 불확실성에 얼마만한 영향을 주는가를 정량적으로 평가하고, 아울러 각 격납건물 파손모드에 대한 개개 불확실성 인자의 영향을 평가하고자 하는 목적에서 수행되었다. 이들 결과는 불확실성 및 중대사고 관리전략시 중요한 판단자료로 활용될 수 있다.

## 2. 분석방법

CET/DET 방법을 통한 불확실성 분석은 DET 각 분기점에 할당된 확률값 (불확실성 입력) 이 CET 및 STC 논리도에 얼마만한 영향을 주는가를 정량적으로 다룬다. 불확실성 입력으로는 민감도 분석 및 기존 2단계 PSA 수행결과와 분석을 통해 격납건물 파손모드에 중요하다고 판단되는 다음과 같은 8가지 주요현상을 선정하였다 [1].

- induced primary system failure (RCSFAIL)  
: 원자로가 깨지기 전 고온의 가스로 인한 고온관이나 증기발생기 튜브 등의 파손을 결정하는 정점사상.
- debris cooled in-vessel (MELTSTOP)  
: 원자로 파손이 없을 시 원자로 내부에서 노심파편(debris)의 냉각여부를 결정하는 정점사상.
- alpha mode failure frequency (ALPHA)  
: 격납건물 Alpha 모드 파손을 초래하는 노내 증기폭발의 여부를 결정하는 정점사상.
- amount of corium ejected out of cavity (CR-EJECT)

: 원자로가 파손되면서 Cavity 밖으로 나가는 코륨의 양을 결정하는 정점사상.

- **ex-vessel steam explosion (EVSE, CF-EARLY)**  
: 노외 증기폭발 여부를 결정하는 정점사상.
- **amount hydrogen produced in-vessel (H2-MASS, CF-EARLY)**  
: 노내에서 발생하는 수소 양을 결정하는 정점사상.
- **molten debris depth in the cavity(DB-DEPTH, EXVCOOL)**  
: 노심 용융물 Pool의 깊이를 결정하는 정점사상.
- **basemat melt-through probability (BMT-MELT)**  
: 원자로 공동바닥의 관통 여부를 결정하는 정점사상.

이를 바탕으로 선정된 5가지 격납건물 파손모드에 대한 불확실성과 주요 입력의 각 격납건물 파손모드에 대한 종합적인 영향 및 각 격납건물 파손모드에 대한 개개 불확실성 인자의 영향을 정량적으로 평가하고자 한다. 본 연구에서 선정된 주요 격납건물 파손모드는 일반적으로 2단계 PSA 주된 분석대상으로 고려되는 것으로 Basemat Meltthrough (BMT) 와 Early Containment Failure (ECF), Late Containment Failure (LCF), No Containment Failure (No CF), 그리고 Containment Bypass (Bypass) 이다.

## 2.1 불확실성 분석 범위

불확실성 분석결과를 해석하는 방법은 불확실성이 어떤 수준으로 수행되었느냐에 따라 다르다. 2단계 PSA시 불확실성분석은 (1) 각 DET 분기점에서 특정한 분기점을 확률적으로 선택하는 경우, (2) DET 분기점 확률값에 대한 분포만을 사용하여 분석하는 경우, (3) 보다 상세한 분석을 위해 DET 각 분기점에 다양한 전문가의견을 그대로 반영하는 경우, 그리고 (4) 특정한 현상에 대한 확률값을 추정하기 위하여 각 해석결과 (예, 압력, 온도등) 에 대한 분포를 사용하는 경우(예, 사고진행과정중 격납건물 파손모드에 대한 확률) 등이 있다[1,2]. 본 분석에서는 확률분포를 추정하기 위한 전문가 및 테이타의 부족으로 인하여, 위의 경우 첫번째 방법만을 고려하여 CET 및 STC 논리도를 통하여 통계적으로 전파시킨다음 각 격납건물 파손모드에 대한 불확실성 결과를 Range Factor (RF: 95 percentile / median)와 Uncertainty Factor (UF : 95 percentile / mean)의 두가지 측도로 제시하였다.

따라서 최종 불확실성 결과는 DET 각 분기점 현상에 대한 영향이며, 이전 단계 (PDS Event Trees and PDS)에서 발생하는 불확실성 결과는 따로 고려하지 않았다.

이들 결과를 얻기 위하여 DET 불확실성 입력에 대한 성층화 추출 방식(Latin Hypercube Sampling)으로부터 발생된 1000개의 표본을 CET/STC 를 통하여 전파시키는 방법을 고려하였고 이 모든 과정은 CONPAS [3] 를 통하여 이루어 졌다.

## 2.2 불확실성 중요도 분석

통상 출력분포의 변화는 주어진 입력분포의 정량화 과정에서 이루어진 서로 다른 가정들에 기인한 불확실성과 밀접히 관련되어 있다. 이 경우, 직면하게 되는 불확실성 분석의 주요 관심사중의 하나는 출력분포에 대한 입력분포들의 기여도를 파악하여 측정할 수 있는 수준으로 정량화하는 일이다. 불확실성 감소 및 관리측면에서 이들은 어떤 입력들에 대한 불확실성이 최종 불확실성을 줄이기 위하여 우선적으로 분석되어 감소시켜야 하는가를 결정짓는 중요한 수단을 제공하는 데, 이는 불확실성 중요도 분석을 통하여 평가할 수 있다 [2]. 보통, 중요도 분석은 주어진 입력변수의 불확실성이 고려되지 않은 경우 출력변수의 불확실성 크기의 상대적 변화 (Relative Change), 입력 불확실성의 크기 (Uncertainty Bound)의 변화에 따른 출력변수의 불확실성 크기의 상대적 변화, 그리고 입력변수 불확실성 분포 유형(Distribution Type)의 변화에 따른 출력변수의 불확실성 크기의 상대적 변화 등 세가지로 수행된다. 본 분석에서는 통상 수행되는 첫번째 경우처럼 단지 입력변수의 불확실성만을 하나씩 고려하여 얻은 출력분포를 비교하여 각 입력 불확실성의 출력 불확실성에 대한 상대적 기여도를 평가하는 방식만을 고려하였다.

## 3. 분석결과

화재 사건 격납건물 파손모드에 대한 각각의 DET Branch의 불확실성 결과를 불확실성 측도로 제시한 것이 표1에서 표6 에 나타나있다. CR-EJECT 현상의 불확실성 중요도 순위가 격납건물 건전성 유지, 격납건물 후기 파손에서는 첫번째로 격납건물 조기 파손에선 두 번째로, 그리고 원자로 공동바닥관통에서는 세 번째로 나타나는 등 각 격납건물 파손모드에 중요하게 나타나는 이유는 이

현상이 대부분의 DET에 정점사상으로 포함되어 격납건물 파손과 밀접하게 연관되어 있기 때문이다. 격납건물 우회에 대한 불확실성 중요도 순위는 RCSFAIL이 첫번째이고 나머지 현상들은 이 파손모드와 관련이 없기 때문에 모두 동일하게 처리되었다. 또한 BMT-MELT와 H2-MASS가 각각 원자로 공동바닥관통과 격납건물 조기 파손에 대한 불확실성 중요도 순위가 첫번째인 이유는 이들 현상이 각각의 파손모드에 가장 중요하기 때문이다. 그리고 표6에서처럼 모든 중요 변수가 포함된 불확실성 분석 결과 원자로 공동바닥관통이 제일 불확실성이 높은 파손모드로 나타났으며, 이유는 불확실성이 큰 CR-EJECT 현상에 가장 큰 영향을 받기 때문이다.

#### 4. 결론

본 연구에서 파악된 주요 불확실성 인자를 바탕으로 한국형 표준원전에서의 화재사건에 대한 불확실성 분석을 수행한 결과 각 격납건물 파손모드의 불확실성에 크게 영향을 주어 불확실성 관리측면에서 우선적으로 감소시켜야 할 주요 불확실성 인자로는, 격납건물 건전성 유지의 경우 및 격납건물 후기 파손의 경우는 CR-EJECT, 격납건물 우회의 경우는 RCSFAIL, 원자로 공동바닥관통의 경우는 BMT-MELT 그리고 격납건물 조기 파손의 경우는 H2-MASS 현상으로 나타났다. 종합적으로 제일 불확실성이 높은 격납건물 파손모드인 원자로 공동바닥관통의 불확실성 인자를 줄이기 위해서는 CR-EJECT 현상에 대한 불확실성을 줄여야 할 것이다. 비록 본 연구의 결과가 격납건물 파손모드 불확실성에 대한 나름의 기초정보를 제공할지라도, 불확실성 관리시 보다 종합적인 판단의 자료로 사용하기 위해서는 본 연구에서 언급된 불확실성 입력 이외에 보다 다양한 전문가의 판단에 의한 불확실성 분포 및 사고진행과정에서 격납건물 파손에 이르는 여러 변수값의 불확실성도 동시에 고려해야 할 필요가 있는 것으로 판단된다.

#### 5. 참고문헌

- [1] 한국전력공사, "Ulchin Units 3&4 Final Probabilistic Safety Assessment Report", March 1998.
- [2] K.I.Ahn and Y.H.Jin., "A Formal Approach for Quantitative Treatment of Modeling Uncertainties in Safety Analysis", Nuclear Technology, 116(2), p146-159, 1996.
- [3] 안광일, "CONPAS 1.0 User's Manual", KAERI/TR-651/96, KAERI, April 1996.

표1 격납건물 건전성 유지에 대한 불확실성  
중요도 비교

DET Top Heading	Range Factor	Uncertainty Factor	순위
RCSFAIL	1.004	1.029	
MELTSTOP	1.003	1.007	
ALPHA	1.000	1.001	
CR-EJECT	1.187	1.215	1
EVSE	1.000	1.001	
H2-MASS	1.013	1.007	
DB-DEPTH	1.004	1.004	
BMT-MELT	1.123	1.073	2

표2 격납건물 우회에 대한 불확실성  
중요도 비교

DET Top Heading	Range Factor	Uncertainty Factor	순위
RCSFAIL	N/A	0.000	1
MELTSTOP	1.000	1.000	
ALPHA	1.000	1.000	
CR-EJECT	1.000	1.000	
EVSE	1.000	1.000	
H2-MASS	1.000	1.000	
DB-DEPTH	1.000	1.000	
BMT-MELT	1.000	1.000	

표3 격납건물 후기 파손에 대한 불확실성  
중요도 비교

DET Top Heading	Range Factor	Uncertainty Factor	순위
RCSFAIL	1.004	1.017	
MELTSTOP	1.024	1.017	2
ALPHA	1.000	1.001	
CR-EJECT	1.056	1.049	1
EVSE	1.000	1.000	
H2-MASS	1.019	1.009	
DB-DEPTH	1.002	1.002	
BMT-MELT	1.000	1.000	

표4 원자로 공동바닥관통에 대한 불확실성  
중요도 비교

DET Top Heading	Range Factor	Uncertainty Factor	순위
RCSFAIL	3.859	3.025	2
MELTSTOP	1.076	1.047	
ALPHA	1.000	1.001	
CR-EJECT	3.208	2.230	3
EVSE	1.000	1.000	
H2-MASS	1.000	1.000	
DB-DEPTH	1.028	1.030	
BMT-MELT	4.032	3.290	1

표5 격납건물 조기 파손에 대한 불확실성  
중요도 비교

DET Top Heading	Range Factor	Uncertainty Factor	순위
RCSFAIL	1.145	1.129	
MELTSTOP	1.148	1.139	3
ALPHA	1.000	0.945	
CR-EJECT	1.269	1.212	2
EVSE	1.000	0.939	
H2-MASS	3.196	1.557	1
DB-DEPTH	1.000	1.000	
BMT-MELT	1.000	1.000	

표6 모든 중요 변수를 포함한 불확실성  
중요도 비교

Containment Failure Mode	Range Factor	Uncertainty Factor	순위
BMT	N/A	8.976	1
ECF	5.145	1.867	2
LCF	1.119	1.135	3
No CF	1.022	1.102	4
Bypass	1.000	1.000	5

N/A : Not Available

BMT: Basemat Meltthrough : 원자로 공동바닥 관통

ECF : Early Containment Failure : 격납건물 조기 파손

LCF : Late Containment Failure : 격납건물 후기 파손

No CF : No Containment Failure : 격납건물 건전성 유지

Bypass: 격납건물 우회