

《기술보고》

격납건물 사건수목 분석방법론에 대한 고찰

안광일 · 진영호 · 김동하 · 박창규

한국원자력연구소

(1994. 6. 20 접수)

요 약

격납건물 사건수목 방법은 확률론적 안전성 평가시 격납건물 해석의 핵심을 이루는 부분으로서 계통 안전 분석으로부터 파악된 주요 노심용융 사고경위와 격납건물 방호계통의 적절한 조합에 의하여 선정된 발전소손상군을 초기조건으로 하여 격납건물 파손 및 방사선원 방출에 영향을 주는 격납건물 내부에서 발생 가능한 주요 사고진행 과정을 체계적으로 다룰 수 있는 유용한 수단이다. 원자력 안전성 향상연구이후 격납건물의 건전성을 확보하기 위한 많은 노력의 결과 현재까지 격납건물 해석 및 논리체계는 상당한 기술적 진보를 이루어 왔으나 아직도 이를 기술하는 방식에는 논쟁의 여지가 많고, 중대사고와 관련된 여러 현상들을 반영할때 그것의 논리적 타당성을 객관적으로 평가할 수 있는 방법이 아직 확고히 정착되지 못함으로 인하여 격납건물 해석결과에는 많은 불확실성이 존재한다. 또한 아직까지 기존 방법론에 대한 어떠한 종류의 체계적 분석도 이루어지지 않음으로 인하여 이들에 대한 논리적 한계점을 파악하는 데 많은 어려움이 있다. 본 연구에서는 지금까지 주로 개발, 사용되어 온 다양한 격납건물 사건수목 분석방법론을 소개하고 이들 각각이 지니고 있는 기술적인 문제점을 고찰하며 이를 바탕으로 격납건물 사건수목이 갖추어야 할 기본논리, 구조에 대한 안내지침을 제시함으로써 효과적인 격납건물 해석 및 방법론 개발에 도움을 주고자 한다.

1. 서 론

원자력발전소의 안전성을 정량적이고도 종합적으로 평가할 수 있는 한 방안으로 최근 그 중요성이 크게 부각되고 있는 확률론적 안전성 평가(Probabilistic Safety Assessment, PSA) 방법은 일반적으로 사고 특성, 사고범위 및 해석방법에 따라 노심용융 사고경위 분석(1단계 PSA), 격납건물 및 방사선원 분석(2단계 PSA), 그리고 대기중으로 방출된 방사성물질의 환경영향 및 사고결과 분석(3단계 PSA) 등의 뚜렷하고도 밀접한 세가지 단계로 구성된다. 원자력 안전성연구(Reactor Safety Study, RSS)^[1] 결과가 1979년에 발생한 미국의 TMI-2 사고 가능성을 예측한 것이 밝혀진 후로 이 PSA 방법은 원자력 규제기관과 원전사용주들에 의해 본격적으로 주목을 받기 시작하였고 지금까지

관련된 많은 연구가 이루어져 왔으며 그들 중 많은 부분이 실제 발전소 안전성 평가에 적용되어 왔다. 그 결과로 원전의 안전성을 위험도(Risk)라는 안전성 척도로 정량화하는 것이 가능해 졌으며 부수적인 효과로서 기존 원전이 가지고 있는 안전성개념에 대한 많은 취약점을 도출하였다. 원자력발전소의 종합적 안전성 측면에서 TMI-2 사고로부터 얻은 또 다른 중요한 교훈은 격납건물 역할에 대한 재인식이며 이러한 점은 1986년 체르노빌사고 발생이후 그 중요성이 한층 부각되었다. 이것은 격납건물이 원자력발전소 사고시 방사능물질의 방출을 막을 수 있는 최종적인 방호벽으로써 그것의 건전성을 유지하는 것이 곧 발전소 위험도를 최소화 시킬수 있는 가장 중요한 요인으로 간주되기 때문이다. PSA를 통한 격납건물 성능 및 반응해석은 이러한 격납건물 건전성에 대한 정량적인 평가는 물론 사고예방, 완화조

치를 마련할 수 있는 귀중한 정보도 제공한다.

2단계 PSA의 핵심분야로서 격납건물 해석의 주요 목적은 여러 종류의 격납건물 파손형태와 그에 따른 방사성물질 방출경로의 분석 및 정량화에 있다. 이것은 1단계 PSA 분석으로부터 파악된 발전소 사고시 노심용융을 유발하는 주요 사고경위와 격납건물 파손과 방사성물질의 방출 및 사고결과에 심각한 위협을 주는 각종 사고현상을 억제할 목적으로 격납건물 내부에 설치된 격납건물 방호시스템의 작동 여부를 체계적으로 조합함으로써 구성된 발전소 손상군(Plant Damage State, PDS) 사건들을 초기조건으로 한다. 그러면, 격납건물 해석은 노심 용융물들이 격납건물 내부로 방출되면서 여러 물리 화학적 현상을 동반하고 이에 따라 격납건물 내부의 압력을 높이면서 다양한 격납건물 파손특성(파손시기, 파손크기 및 형태, 그리고 파손장소)을 유발하는 격납건물 내부에서 가능한 모든 사고진행(Accident Progression) 과정을 현상간의 인과관계에 의하여 체계적으로 다룰 수 있는 논리구조인 격납건물 사건수목(Containment Event Tree, CET)을 구성함으로써 합리적으로 이루어질 수 있다. CET 구성시 PDS를 사용하는 이유는 격납건물 해석의 주 목적이 격납건물 파손특성과 방사선원 방출경로의 결정에 있고 노심 손상에 이르는 수많은 사고경위들에 대하여 일일이 격납건물 거동분석을 할 수 없기 때문에 격납건물 파손과정이 비슷하거나 유사한 방사선원 특성을 가질 것으로 예상되는 사고경위들을 서로 묶어 해석할 필요가 있기 때문이다. 결국 이러한 CET 분석의 범위는 노심 용융시부터 격납건물 파손에 이르기까지 발생가능한 격납건물 내부의 모든 현상 및 사고과정을 포함하게 되며, 이것은 2단계 PSA의 또 다른 중요한 분야인 방사선원 특성(방사성 물질의 종류, 양, 방출시간, 방출위치 및 크기) 분석과 서로 밀접히 연관된다.

RSS 연구 이후로 주요 원자력 선진국들은 중대사고 현상에 대한 많은 실험자료 및 전산코드해석 결과를 고려하여 그들 나름의 격납건물 해석 및 CET 논리체계를 개발하여 왔다. 격납건물의 건전성을 확보하기 위한 이러한 노력의 결과 현재까지 격납건물 해석 및 논리체계에 있어 상당한 기술적 진보를 이루어 왔으나 아직도 이를 기술하는 방식에는 논쟁의 여지가 많고, 중대사고와 관련된 여러 현상들을 반영할 때 그것의 논리적 타당성을 객관적으로 평가할 수 있는 방법이 아직 확고히 정착되지 못함으로 인하여 격납건물 해석결과에는 많은 불

확실성이 존재한다. 또한 아직까지 기존 방법론에 대한 어떠한 종류의 체계적 분석도 이루어지지 않음으로 인하여 이들에 대한 논리적 한계점을 파악하는 것은 물론 적절한 방법을 선정하는 것 자체만으로도 많은 어려움이 있다. 이러한 상황에서 격납건물 건전성에 대한 일관성 있는 평가를 위한 국내 나름의 해석기술 및 CET 논리구조를 확보하는 것이 요구된다. 본 연구에서는 지금까지 주로 개발, 사용되어온 다양한 격납건물 사건수목 분석방법론을 소개하고 이들 각각이 지니고 있는 기술적인 문제점을 고찰하며 이를 바탕으로 격납건물 사건수목이 갖추어야 할 기본논리, 구조에 대한 안내지침을 제시함으로써 효과적인 격납건물 해석 및 방법론 개발에 도움을 주고자 한다. 이를 위해 2절에서는 지금까지 개발, 사용되어온 격납건물 사건수목 방법론들에 대한 현황을 간략히 기술하였으며, 그들 각각에 대한 특성 및 장,단점 분석은 제3절에서 이루어진다. 이어서 제4절에서는 방법론 평가결과를 제시 하였으며, 본연구에 대한 결론은 마지막 절에서 다루었다.

2. 현 황

격납건물 해석을 위한 한 방법으로서 CET 개념은 RSS 에서 처음 도입된 이래 한 동안 기본개념은 같으면서 방법을 약간씩 달리하여 실제발전소 격납건물 해석에 응용되었다.^[2] RSS 방법론 이후의 좀 더 개선된 CET 방법론은 PRA 수행지침서 NUREG/CR-2300^[3]에 상세히 제시되고 있다. 그것의 주된 내용은, 초기 및 경제조건으로서 발전소 손상군(PDS) 선정, 사고과정을 기술하기 위한 격납건물 사건수목(CET) 구성, 그리고 격납건물 파손 및 방사선원 분석을 위한 방사선원 방출분류(Source Term Release Category) 선정 및 정량화등 세 단계에 의하여 체계적으로 CET 분석을 수행하는 것이다. NUREG/CR-2300 이후에는 CET 기본구조는 비슷하나 그것의 구성 및 해석에 있어서는 조금씩 차이가 있는 많은 다양한 방식이 제시되고 있다. 이것은 중대사고 현상에 대한 이해가 커지며, 기존 방식의 결점이 많이 밝혀지게 됨에 따라 자연적으로 일어난 결과이다. 특히 Oconee PRA^[4] 이후 CET 구성과 분기점 확률의 산정방식에 있어서 주목할 만한 변화가 있었다.

CET 구성면에서 보면 최근 NUREG-1150^[5] 격납건물 해석에서 고려한 사고진행 사건수목(Accident

Progression Event Tree, APET) 방법은 이전의 CET에 비하여 엄청난 수의 정점사상을 고려하고 있다. 이전의 CET가 격납건물 내부의 물리적 현상을 주로 다룬 데 비하여 APET는 이들 현상뿐만 아니라 노심용융 이전의 원자로용기 내부의 주요현상, 각종 격납건물 안전계통의 작동여부, 고장회복 가능성 및, 운전원회복 및 사고 완화조치등 사고진행에 중요한 영향을 주는 거의 모든사건을 하나의 APET 내에 기술함으로써 종래의 CET 개념자체를 바꾸어 놓았다. APET는 수행될 당시까지 획득된 중대사고 관련 모든현상에 대한 정보를 반영하여 CET를 분석 정량화하고 이와 관련된 불확실성을 평가하는 것이 주된 목적이었기 때문에 대형, 복잡화 될 수 밖에 없었다. 그러나 이후에 수행된 대부분의 CET는 나름의 의도와 목적을 반영하여 소형화되는 추세에 있다.

한편, CET 정량화시 분기점 확률의 산정 방식을 보면, Oconee PRA를 포함하여 이전의 CET 분기점은 대부분 기존 중대사고 관련자료에 바탕을 둔 상대빈도적 확률개념을 채택하였으나 APET에서는 상대빈도적 확률개념과 분석자의 주관관을 최대로 반영한 주관적 확률개념을 혼용하였고 이후 제시된 대부분의 CET에서는 주관적 확률개념을 채택하고 있다. CET 분기점 정량화시 주관적 확률개념의 타당성은 NUS의 Parry^[6]와 PLG의 Torri^[7]가 상세히 소개하고 있다.

NUREG-1150 이후에는 NUREG-1150의 상세한 정보를 어느정도 포용하면서 CET 구조는 단순화시킨 CET/PFT^[8-11], CET/DET^[12-14], SCET^[15-16] 및 APSET^[17] 등 여러 독특한 격납건물 해석 방법론들이 개발되었다. 앞의 두가지는 CET에서 직접 다루어지는 정점사상들의 수를 사고진행에 대한 정보를 손실하지 않는 범위내에서 가능한한 줄이고 각 정점사상과 관련된 현상들은 현상론적 고장수목(Phenomenological Fault Tree, PFT)이나 분해 사건수목(Decomposition Event Tree, DET) 같은, 보조수목 개념을 사용하여 CET를 체계적으로 분석 정량화 하고자 하는 목적에서 제안된 것들이다. 또한, SCET(Simplified CET)는 NUREG-1150과 유사한 결과들을 얻는 범위 내에서 체계적인 축소화 과정을 통하여 APET의 구조를 단순화 시킨 것이며, APSET(Accident Progression Stage Event Tree) 개념은 사고진행을 특성에 따라 몇 단계로 구분하고 각 단계마다 연속적인 사건수목을 적절히 구성함으로써 하나의 CET 내에 여러개

의 사건수목에 의하여 사고를 단계별로 분석하고자 하는 목적에서 제안되었다.

3. 방법론 평가

이번 절에서는 위에서 기술한 기존 격납건물 사건수목 방법들을 그들의 특성에 따라 크게 6가지 범주로 나누고, 관련된 여러 사고진행 논리구조를 체계적으로 비교 평가함으로써 그들 각각이 지니고 있는 기술적인 장, 단점을 파악하고자 한다.

3.1. 재래식 격납건물 사건수목방법 (Conventional CET)^[1, 4, 18-20]

재래식 CET의 범주는 RSS^[11] 이후 Oconee PRA^[4]까지 그리고 최근의 Beaver Valley-2 PRA^[18]에서 채택된 기본방식이 이에 속한다. 그들의 특징은 고려된 정점사상 수와 그 정점사상을 CET 내에서 배열하는 방식에 따라 약간씩 차이가 있다. 그림 1에서 보여진 것처럼 RSS와 같이 격납건물 파손 모드뿐만 아니라 정점사상을 구성할 때는 격납건물 파손모드와 파손확률은 가시적으로 쉽게 파악할 수 있으나, 격납건물 사건수목 그 자체에는 격납건물내에서 어떤 현상이 발생하였으며 그 현상이 격납건물 파손에 어떤 영향을 미쳤는가 등에 대한 정보는 상세히 제시되지 않는다. 더우기 격납건물 파손에는 직접적인 영향을 주지 않더라도 방사선원의 특성 및 크기에 중요한 영향을 주는 현상들을 고려할 수 없으므로 인하여 같은 격납건물 파손모드라도 다른 방사선원을 초래하는 것은 사건수목 그 자체로는 구분할 수 없다. RSS에서는 이를 보상하기 위하여 방사선원에 영향을 주는 주요 인자들을 적절히 고려하여 격납건물 파손모드를 재 분류함으로써 방사선원군을 정의하였다.

Oconee PRA^[4], Zion PRA^[19], 및 Indian Point PRA^[20] 등에서는 이러한 RSS의 단점을 보완하고자 격납건물 파손모드 이외에도 방사선원에 영향을 주는 주요 현상들을 CET 정점사상으로 고려하였다. 이에 따라 격납건물 해석이 보다 현실적으로 이루어질 수 있었다. 하지만 부수적인 결과로, 비록 사상간의 종속성에 의하여 불필요한 사고경위가 많이 제거되었더라도 사건수목 자체의 구조가 매우 복잡해지고 분석되어야 할 사고경위가 상당히 증가했다. 하지만 그림 2에서 보여진 바와 같이 이들 방법에서 정의된 사건수목의 최종치(End

Point) 중 격납건물 파손모드 및 방사선원군을 유사한 것끼리 재분류하면 RSS에서 사용한 파손모드 및 방사선원군과 비슷한 결과를 얻을 수 있다. 또다른 특징으로 이들 모두는 어떤 형태로의 운전원 회복조치나 사고 완화조치를 고려하지 않음으로써 사고과정을 단지 순수 물리적 차원에서 해석하려 했던 것이다. 그렇지만 이들 방식의 체계적인 분석작업이 수행됨으로써 RSS 수행당시보다 중대사고 전반에 대한 많은 이해가 이루어졌다. 또한 Oconee PRA등에서는 제한적으로나마 CET 분기점 정량화시 단일추정치, 상, 하위값으로 이루어진 3점 분포 개념을 도입하였는데, 비록 실제 분석에서는 이들 분포가 CET를 통해 전파되지 않고 평균값만이 사용되었다 하더라도 CET 정량화를 보다 실질적으로 수행하는 계기가 되었다.

최근 PLG가 수행한 Beaver Valley-2 PRA^[18]에서는 CET의 모든 정점사상을 최근 중대사고 연구에서 정점화되고 있거나 분석자들 사이에 점차 의견의 일치를 보이고 있는 중대사고관련 주요 물리적 현상에만 국한하고, 계통관련 사건들은 PDS에 포함시키는 방식을 채택하였는데 이는 CET 정량화에서 불확실성 분석이나 분기점확률 산정시 일관성을 확보하기 위한 목적으로 간주된다. 즉 앞서 수행된 RSS, Zion/Indian Point PRA, Oconee PRA 등에서는 분기점 확률들이 상대빈도적 확률개념으로 처리된 반면, PLG CET에서는 분기점확률의 산정방식에 있어서 중대사고 현상과 관련된 사건은 주관적 확률개념으로, 계통관련 사건들과 운전원 회복조치는 상대빈도적 확률개념으로 나누어 PDS에서 처리하는 최근 경향을 반영함으로써 있을 수 있는 논쟁을 회피하고자 하였다. PLG의 CET 구성은 초기 원자로 용기내 용융물 거동, 용융물의 원자로 캐비티 및 격납건물 내부의 용융물 거동, 장기적 거동, 그리고 격납건물 파손모드 등 각 사고단계별로 핵심적인 사건들만 기술함으로써 간단하면서도 중요한 중대사고 현상들의 영향을 잘 평가할 수 있지만 고압용융물 방출현상을 제외하고는 그러한 현상을 유발시키는 경로들을 체계적, 가시적으로 적절히 평가하지 않은 것이 주요 단점으로 지적되었다.

한편 CET 내에서 정점사상들은 크게 두가지 방식으로 배열하여 왔다. 초기 RSS에서는 정점사상을 사고결과의 심각성에 따라 배치하였으나 중대사고 현상을 충분히 다룰 수 없는 한계점으로 인하여 이후 대부분의 CET에서는 사고진행 순서에 따라 정점사상을 배치하

는 방식을 채택하고 있다. 이것은 사고진행 자체가 시간적인 개념을 포함하고 있기 때문에 CET 내의 전 단계 사건과 후 단계 사건은 서로 시간적으로 종속되어야 한다는 관점에서 볼 때 바람직한 것으로 판단된다. 특히 PLG의 CET에서는 반복되는 사고경위들은 모듈화시킴으로써 CET 구조를 단순화시켰는데 정점사상들의 수가 많아 구조가 복잡할 경우에는 상당히 효율적이거나 사고경위를 가시적으로 파악하기가 어려운 단점도 있다.

3.2. 사고진행 사건수목방법 (APET)^[5]

중대사고에 대한 전반적인 이해와 존재하는 불확실성의 체계적인 평가를 통하여 규제기관의 규제결정에 도움을 주기위한 기술적 기초를 마련하기 위해 수행된 NUREG-1150^[5]의 APET 방법은 그림 3에서 보여진 것처럼 크기 및 사건기술의 상세성에 있어서 종래의 격

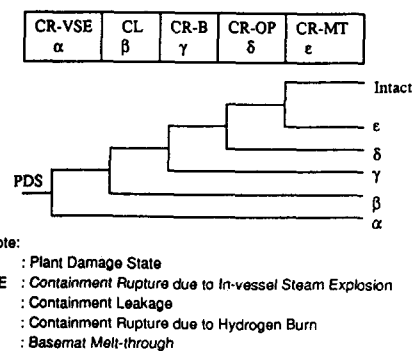


그림 1. RSS에서 사용된 PWR 격납건물 사건수목

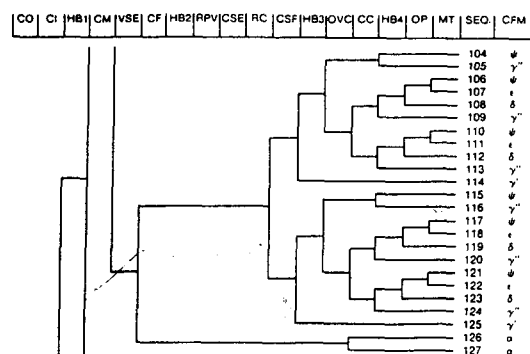


그림 2. Oconee PRA에서 사용된 격납건물 사건수목

납건물 사건수목 방법과는 상당한 차이를 보인다. APET 방법에서는 사고진행을 주요 시간대로 구분하고 각 시간대에서 고려해야 할 사고진행 관련 정점사상을 선정하는 방식을 채택하였는데, 사고의 특성상 크게 초기조건과 경계조건을 포함하는 '사고시작단계 (Initial)', 사고시작부터 원자로용기 파손시점까지의 '초기단계 (Early)', 원자로용기 파손전후의 짧은 시간대의 '중기단계 (Intermediate)', 원자로용기 파손이후의 '후중기단계 (Late Intermediate)', 노심-콘크리트 반응 (CCI) 이 일어나는 동안의 '후기단계 (Late)', CCI 이후부터 격납건물 파손시점까지의 '후후기단계 (Very Late)', 그리고 격납건물의 최종상태를 나타내는 '종결단계 (Final)' 등 7단계로 나누어 사건을 체계적으로 기술하고 있다. 또한 격납건물 유형에 따라 정점사상수가 달라지나 기본적으로 71 (Zion/Surry)-111 (Sequoyah)개에 이를만큼 그 수에 있어서는 종래의 범주 (Zion PRA^[19]: 19개)를 훨씬 뛰어넘고 있다. 이 방법의 주요 특징은 다음 몇가지로 요약될 수 있다.

첫째, APET 방법은 임의의 정점사상을 선정할 수 있고, 그 수에 있어서도 특별한 제한이 없다. 이는 격납건물 내부의 물리적 현상뿐만 아니라 사고진행에 영향을 줄 수 있다고 판단되는 노심용융 이전의 원자로용기 및 격납건물 내부의 주요현상, 원자로 냉각계통에 대한 파손모드, 각종 격납건물 안전계통의 사고진행에 따른 작동여부, 고장회복 가능성 및, 운전원에 의한 전원 회복과 사고완화 조치를 포함한 사고진행에 중요한 영향을 주는 모든 가능한 사건을 단일 APET 내에 명시할 수 있는 구조를 가지기 때문이다. 또한 APET는 이전 CET 분석에서는 PDS에서 다루어졌던 모든 PDS 사건들을 하나의 CET 내에 고려하고 특정한 PDS에 대한 CET 분석은 그 PDS에 관련된 사건들을 CET 구조 내에서 지정함으로써 계산을 수행하는 방식을 채택하고 있다. 이렇게 함으로써 하나의 일반화된 CET만 구성하면 모든 PDS에 적용 가능하게 되는 편리한 구조를 갖는다.

둘째, 각 정점사상에 대한 분기점수도 많은 경우 10여 개를 고려할 정도로 세분화 하였다. 이렇게 함으로써 정량화 과정 또한 가장 기본적인 사건에서 이루어질 수 있다. 하지만 이러한 방식을 채택할 경우 전후 사건과의 종속성이 고려되어야 하므로 확률산정 또한 그만큼 어려워지는 단점이 있다. NUREG-1150에서는 APET

정량화를 위하여 많은 전문가의견 수렴과정 (Expert Opinion Elicitation Process)을 거쳤는데 대부분의 격납건물 해석에서는 인력 및 예산상의 한계로 이러한 절차를 활용할 수 없다. 따라서 이용가능한 정보가 제한되어 있을 때는 APET 자체는 상세하게 구성할 수 있더라도 정량화가 어려우므로 효율적이지 못하다.

세째, CET 내에서 모사되는 전, 후 사건들간의 인과관계를 체계적으로 고려함으로써 중대사고시 발생 가능한 주요 사건들의 영향을 사고진행에 따라 상세히 분석할 수 있다. 특히 운전원에 의한 전원 회복조치를 고려할 때는 회복조치 때문에 뒤이어 발생하는 사상의 확률값에 영향을 줄 수 있다는 점을 인식하고 어떤 사상의 확률값이 이전사상의 각 상태에 따라 달라지는 부분에 대해서는 사상간의 종속성을 더욱 세심히 다루었다.

네째, 격납건물 파손형태 및 확률을 결정하기 위하여 격납건물 사건수목의 주요 단계마다 격납건물 과열정도를 변수로 할당함으로써 단계별 격납건물 파손확률을 내부적으로 계산하는 구조를 채택하였다. 이는 기존 방법들처럼 독자적으로 분기점확률을 산정하지 않더라도 격납건물 파손곡선과의 비교로 전산코드 내부에서 직접 할당되며, 격납건물 파손확률을 사고의 주요 시점마다 조사함으로써 각 단계별로 사고진행의 심각성을 파악할 수 있는 장점이 있다.

다섯째, APET 구조는 모델 및 데이터와 관련한 불확실성 분석을 상세히 할 수 있다는 점이다. 중대사고에 대한 여러 불확실한 현상들은 격납건물의 최종해석에 커다란 영향을 미친다. APET에서는 이러한 현상들을 확률분포 및 다양한 전문가의견을 반영하여 확률분포를 구성하고 이들을 LHS (Latin Hypercube Sampling) 불확실성 전파방식으로 처리하였다. 이러한 모든 분석은 전산코드를 사용함으로써 가능하다. NUREG-1150에서는 CET분석에 본격적으로 전산코드 체제 (EVNTRE)^[21]를 도입함으로써 중대사고 현상에 대한 상세한 모의를 빠른 시간내에 가능하게 하였다.

위에서 기술한 많은 장점에도 불구하고 APET에 의한 격납건물 분석은 구조가 복잡하고 사상간 심한 종속관계 및 사고진행에 대한 과다한 질문으로 인하여 질문간의 연관성을 쉽게 파악할 수 없다. 더우기 정점사상의 수가 많아짐에 따라 사건수목의 도식화는 불가능하게 되었고 이에 따라 주요 사고경로와 잘못된 종속성을 파악하는 것이 사실상 매우 어렵게 되었다.

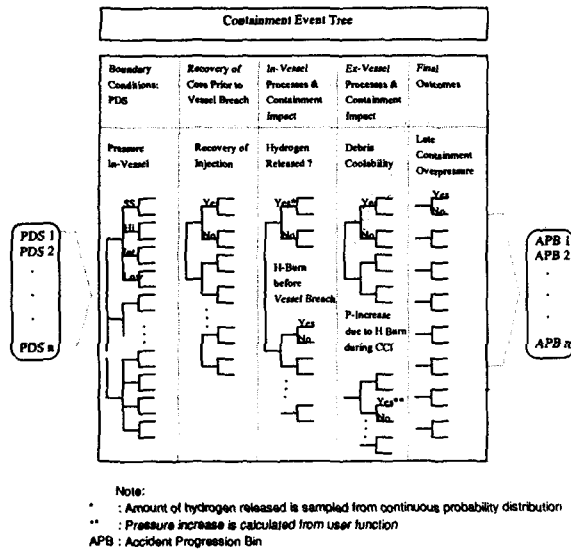


그림 3. APET 방법의 기본개념도

3.3. 격납건물 사건수목/ 현상학적 고장수목 방법 (CET/ PFT)^[8-11]

SAROS (Safety and Reliability Optimization Services, Inc.)^[8], System 80+PRA^[9], 및 Palo Verde IPE (Individual Plant Examination)^[10]에서 격납건물 해석을 위한 주된 방법으로 사용되었으며 EPRI^[11]가 격납건물 해석방법으로 추천하고 있는 CET/PFT 방식은 사고진행 사건수목에 의한 기존의 격납건물 해석방법과 개념적으로 상당한 차이가 있다. 즉 CET/PFT 방식은 그림 4에서 처럼 APET의 단점을 보완하며 CET 구조의 명확성과 주요결과들에 대한 해석을 쉽게하기 위하여 사고진행을 모사하는 정점사상의 수를 가능한 한 줄이고 정점사상을 유발시키는 세부 현상은 기존 1단계 PSA에서 주로 사용되어온 고장수목 개념을 현상학적 사건에 확장시킨 현상학적 고장수목 (PFT)이라는 보조논리 체계에 의하여 보다 상세하게 다루어지고 정량화된다. 일반적으로 CET 정점사상들은 대략 10-15개 정도의 격납건물 파손모드 및 방사선원 거동에 심각한 영향을 미치는 사건들로 구성되며 격납건물 반응에 유사한 영향을 미치는 현상학적 사건이나 계통관련 사건들은 하나의 CET 정점사상에 포함된다. 또한 모든 PDS에 대하여 공통적인 CET 구조를

가지며 특정 PDS에 대한 영향은 CET 정량화 과정을 통하여 반영된다. 따라서 각 PDS는 고유의 정량화된 CET 하나를 갖는다. 현상학적 고장수목의 정량화는 다음 세가지 방식으로 이루어질 수 있다. 첫째, 여러 기존 격납건물 분석에서 공통적으로 나타나는 불확실성이 크고 PDS, 사고진행 및 발전소 특성에 별로 영향을 받지 않는 일반적인 중대사고관련 현상들은 NUREG-1150 등 기존 분석에서 사용된 값을 이용한다. 그러나 격납건물의 특성에 영향을 받는 불확실성이 큰 현상학적 사건들은 발전소 특성을 고려함으로써 정량화 한다. 둘째, 계통관련 사건들은 CET에 고려된 현상학적 사건들에 영향을 주는 경계조건을 정의하기 위한 논리적 기초로만 제공된다. 즉 이들 사건들은 PDS에서 정의된 그 계통들의 상태에 따라 0이나 1 어느 한 값으로 할당된다. 셋째, 이전단계에서 성공이나 실패 어느하나로 정의된 사상들은 해당 CET분기점의 조건에 따라 0이나 1 어느 한 값으로 할당된다.

CET/PFT 방식의 특성은 다음 몇가지로 요약될 수 있다.

첫째, 이 방법은 적은 수의 정점사상으로 사건수목을 단순화하면서도 격납건물내에서 발생하는 주요 중대사고 현상들을 현상론적 관점과 계통의 작동상태에 따라 상세히 모의할 수 있는 특성을 가진다. 또한 격납건물 파손모드와 방사선원에 큰 영향을 주는 사건들을 CET 정점사상으로 사용함으로써 별도의 작업 없이도 격납건물 파손형태에 따른 방사선원 특성의 영향을 동시에 고려할 수 있다. 결과로 CET 최종 사고 경위는 격납건물 파손모드에 대한 방사선원 방출분류를 나타내게 된다.

둘째, 정점사상중에서 쟁점화되어 있거나 보다 상세한 분석을 요하는 복잡한 현상들은 계통사건수목과 고장수목을 연결하는 기존1단계 PSA 방식을 채택함으로써 1단계 PSA 와 2단계 PSA를 동시에 분석할 수 있는 체계를 제공한다. 하지만 중대사고 해석시 가림 고려될 수 있는 확률이 큰 사건은 기존 사건수목/고장수목 분석에서 사용되고 있는 희귀사건 근사화방식 (Rare Event Approximation)으로 PFT에서 확률을 전파할 경우 최종 결과에 상당한 오류가 발생하므로 PFT 기본 사상 확률에 대한 보다 합리적인 전파방식을 고려해야 한다.

셋째, PFT 방식은 CET 정점사상과 관련된 모든 세부사건들을 하나의 고장수목에 포함시킴으로써 개개 정점사상 현상을 분석하는데 있어 기존 사고진행 사건수

목보다 상당한 도움을 준다. PFT의 정점사상이 CET의 분기점을 나타내므로 이 분기점에 직접 영향을 주는 사건들을 일목요연하게 파악할 수 있다. 또한 CET 구조의 수정이 쉽다. 즉 새로운 CET 정점사상이 추가될 때에는 기존 PFT는 그대로 사용할 수 있고 대응되는 PFT만 제거하면 되고 기존 사상이 제거될 때에는 대응되는 PFT만 제거하면 된다. 따라서 주요 현상학적 사건들에 대한 PFT가 독립적으로 구성되더라도 CET에 그대로 적용할 수 있다. 하지만 현상학적 고장수목의 일관성 있는 구성 및 정량화를 위하여 단지 발생유무만을 나타내는 2개의 분기점만이 허용되기 때문에 중요한 현상을 상세히 분석할 수 없는 단점도 있다.

네째, 격납건물 사건수목내에서 사고진행에 따른 단계별 격납건물 파손확률을 파악하는데 도움을 주는 변수의 영향을 고려할 수는 있으나, CET/PFT 특성상 PFT 내에서 직접 다루어지지 않고 독립적인 분석을 통해 이루어짐으로 그 변수들이 PFT 각 기본사상에 어떤 영향을 미쳤는가를 가시적으로 파악할 수 없는 단점이 있다.

다섯째, 운전원 조치에 의한 사고의 조기종결이나 사고완화 조치를 정점사상에 포함시키거나 고장수목의 기본사상에 제한적으로 고려할 수 있다.

마지막으로, PFT에서 고려되는 모든 세부 사건들이 사고진행에 따라 상호의존적 관계를 가지는 사건들과 독립적인 사건들을 적절히 고려함으로써 사고진행에 따른 격납건물 분석을 효과적으로 수행할 수 있다. 따라서 격납건물 파손에 중요한 영향을 미치는 현상에 대한 불확실성 및 민감도 분석이 용이하다.

3.4. 격납건물 사건수목/ 분해사건수목 방법

(CET/ DET)^[12-14]

HNUS (Halliburton NUS Environmental Co.)^[12]에서 제안되고 Surry IPE^[14]에서 격납건물 해석의 주된 방법으로 사용된 CET/DET 방식은 CET 정점사상의 선정에 있어서는 CET/PFT와 유사하나 CET를 정량화하는 보조논리 체계는 CET/PFT의 그것과 많은 차이가 있다. 즉 CET에서 고려되는 정점사상들의 수를 제한하기 위해서 CET/PFT의 그것처럼 격납건물 파손특성 및 방사선원의 방출에 주요 영향을 미치면서 중대사고진행의 각 단계에서 상당히 다른 결과를 발생시키는 현상학적 사건들로만 CET를 구성된다. 대개 사고진행 가능성을 효과적으로 기술하고 이에 따른 일련의 결과들을 정의하기 위하여 요구되는 정점사상들의 수는 CET 해석을 명확히 할 수 있는 범위로 인정되는 대개 10-20개 정도로 제한된다. 이 경우 거의 동시에 일어나거나 효과가 서로 비슷한 몇몇 사건들은 하나의 정점사상에 포함된다. 예를들면 격납건물 직접가열현상, 조기수소연소, 및 중기폭발등은 원자로용기 파손시점에서 격납건물의 압력증가에 직접 영향을 미치므로 이들은 조기 격납건물파손이라는 하나의 정점사상에 포함될 수 있다. 이러한 정점사상들은 그들의 발생순서에 따라 CET 내에 배열되며 이들은 CET/PFT와 달리 두개 이상의 분기점에 의하여 현상을 상세히 기술 할 수 있다. 고려된 정점사상들을 유발하는 세부현상은 PDS에서 고려된 계통관련 세부사건, 및 운전원 회복조치 및 CET 이전사건들을 초기조건으로 하여 그림 5에서 보여진 것처럼 각 정점사상당 하나의 분해사건수목 (Decomposition Event Tree, DET)에 의하여 모사되고 정량화된다. PFT가 연역적 방식으로 사건을 배열하는데 비하여 DET는 귀납적 방식으로 사건을 기술한다.

CET 정량화시 DET에서 허용되는 사건들은 특성에 따라 두가지 유형으로 분류된다. 첫째는 구분사건 (Sorting Event)으로서 분기점중 단지 하나에만 1의 확률값이 할당되고 나머지 분기점들은 0으로 정해지는 사건들이 이에 속한다. 구분사건의 분기는 PDS나 CET 이전사건의 상태에 의하여 결정되는 것으로 사고경로에 대한 종속성을 파악함으로써 구성된다. 또한 같은 구분사건의 부류에 속하는 사건들은 하나의 CET 정점사상에 대하여 공통된 DET에서 다루어진다. DET에서 허용되는 두번째 사건부류는 일반적으로 0과 1 사이의

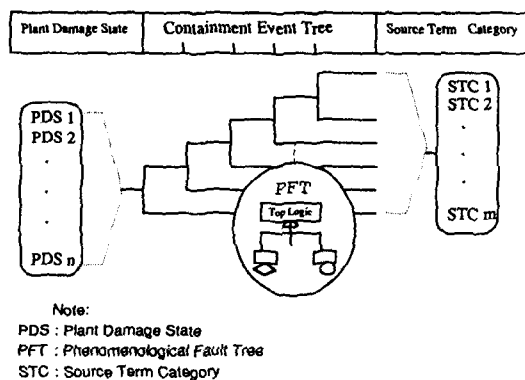


그림 4. CET/PFT 방법의 기본개념도

분할율 (Split Fraction)에 의하여 확률값이 할당되는 현상학적 사건들이다. 어느 부류에 속하든지 DET의 최종 사건은 CET에서 고려한 정점사상들과 같아야 한다. 각 DET를 구성할 때는 DET 최종 분기점들이 분해되는 CET 정점사상과 잘 부합해야 하고, 선정된 DET 세부 사건들은 기존 데이터와 기존의 여러 격납건물 분석결과들을 참조하여 합리적으로 정량화되어야 하며, 또한 DET 세부사건들과 PDS 초기조건 및 CET 이전사건 상태와의 종속성이 엄밀히 고려되어야 한다. CET/DET 방식의 특징은 다음 몇가지로 요약될 수 있다.

첫째, CET와 DET로 주어지는 일관성 있는 사건수목의 구성으로 사고진행과정을 일관성 있게 모사할 수 있다. 또한 CET/PFT 방식과 마찬가지로 하나의 일반화된 CET만 구성하면 모든 PDS에 적용가능하게 되는 편리한 구조를 갖는다. 특정 PDS에 대한 영향은 CET 정량화 과정을 통하여 반영된다. 따라서 각 PDS는 고유의 정량화된 CET 하나를 갖는다.

둘째, 적은수의 정점사상으로도 주요 중대사고 현상들을 현상론적 관점과 계통의 작동상태에 따라 사고진행에 따른 상호의존적 관계를 고려함으로써 효과적으로 평가할 수 있다. 단점으로는 DET 사이의 종속성을 적절히 고려할 수 없다는 것이다. 따라서 한 사건이 다른 DET 사건에 직접 영향을 줄 때에는 그 사건을 CET 정점사상으로 고려해야 한다. 물론 이러한 사건들을 많이 고려하면 할수록 CET 구조 자체가 복잡해지므로 CET/DET 장점을 충분히 살리지 못할 단점이 있다.

셋째, 격납건물 파손에 중요한 영향을 미치는 현상에 대한 불확실성 및 민감도 분석이 용이하다. 즉 CET 각 분기점 확률은 PDS와 CET 이전사건에만 의존하므로 PDS 및 CET 이전사건이 결정되면 해당 CET 분기점 확률은 대응되는 DET에서 직접 결정된다. 따라서 DET 분기점 확률에 대한 불확실성 분포가 주어지면 그들이 PDS와 CET 이전사건의 종속성에 따라 CET 각 분기점 확률에 대한 불확실성 분포가 결정된다. 이들은 다른 DET 사건에는 더 이상 영향을 주지 않기 때문에 CET에 대한 정량화가 쉽게 이루어진다.

넷째, 운전원 회복조치를 적절히 고려할 수 있다. 일반적으로 회복조치는 PDS에서 제한적으로 고려되어진다. 하지만 사고진행 단계별로 회복조치를 고려할 필요가 있을 경우 이를 CET 정점사상으로 포함시키면 상세한 분석이 가능하다.

마지막으로 APET처럼 격납건물 사건수목내에 사고

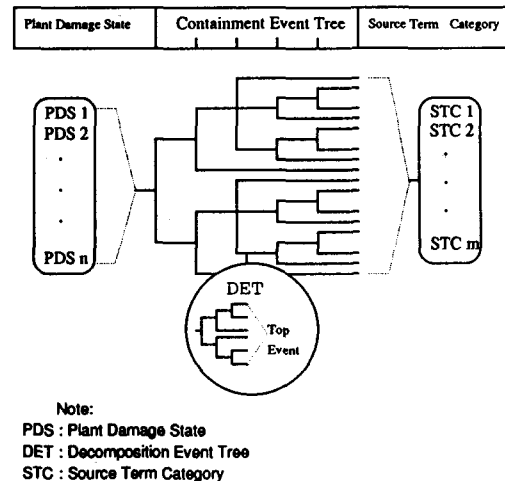


그림 5. CET/DET 방법의 기본개념도

진행에 따라 격납건물 내부압력을 적절히 표현하고 그것에 의하여 단계별 격납건물 파손확률을 파악하는데 도움을 주는 변수를 적절히 고려할 수 있다.

3.5. 축약된 격납건물 사건수목방법 (SCET)^[15-16]

SCET (Simplified CET)^[15-16] 방법은 격납건물 반응해석을 위한 기존 APET로부터 축소화 과정을 통하여 구성된 APET의 축소모델이다. 따라서 CET 구조뿐만 아니라 분기점 확률 또한 APET의 그것에 직접적으로 의존할 수 밖에 없다. APET가 모든 PDS를 다룬 데 비하여 SCET의 기본적 구조는 특정 PDS마다 하나의 CET를 구성하고 그 PDS에 의한 주요 사고현상 및 격납건물 파손 메커니즘을 파악하기 위하여 APET로부터 여러 반복된 축약과정을 거쳐 주어진 사고 경위에 대한 사고결과에 가장 중요한 영향을 주는 사건들을 선정함으로써 개발된다. 즉 각 PDS에 대한 하나의 SCET는, APET로부터 중요하다고 판단되는 정점사상 및 분기점을 선정하고 그것에 의한 결과와 APET에 의한 결과가 비슷해질 때까지 덜 중요한 사건은 제거하고 필요한 주요사건을 추가하는 여러단계의 반복작업을 거치면서 구성된다. 이러한 과정을 거침으로써 SCET의 구조는 그림 6에서 보여진 것처럼 APET에 비하여 상당히 단순해진다. 기존 SCET 구성의 이러한 모든 작업은 NUREG-1150에서 사용된 EVNTRE^[21] 코드와 PSTEVNT^[22] 코드에 의하여 실제적으로 이루어졌다.

EVNTRE 코드는 APET 결과와 SCET 결과를, 축소화하는 반복작업 과정에서 비교함으로써 SCET의 정점사상들을 선별하는데 중요한 정보 및 유용한 수단을 제공한다. 그러면 SCET의 최종 사고경위는 APET 사고진행군(Accident Progression Bin, APB)의 특성에 따라 상호 연결된다. 이들 사고진행군에 대한 작업을 수행하기 위하여 PSTEVNT가 주로 사용된다. SCET는 단순성에도 불구하고 그것의 유용성을 보강시키는 몇가지 주요 특징을 가지고 있다.

첫째, SCET는 노심손상 이전사건(Front-End)과 노심손상 이후사건(Back-End)을 적절히 고려함으로써 두 사건들 사이의 상호작용을 효과적으로 모의한다. Front-End 사건은 주어진 사고경위의 빈도 및 특성을 정의하기 위하여 사용되고 Back-End 사건은 주로 적납건물 내부현상 및 결말치에 중요한 사고완화 조치를 평가하기 위하여 선정된다.

둘째, SCET는 APET와 비슷한 결과를 얻는 범위내에서 최대한으로 단순화 시킬 수 있다. 이는 대표적인 사고경위별로 CET를 구성 정량화함으로써 가능하다. 각 사고경위에 따라 SCET 정점사상의 수는 10-15개 정도가 고려된다. 이것은 NUREG-1150의 APET들과 비교하면 엄청나게 줄어든 것이다. 더우기 사고경위를 보다 간단히하기 위하여 APET에서 고려된 다중분기점 개념을 적절한 방식으로 제거함으로써 SCET에서는 모든 분기점을 두가지 상태(Binary)로만 한정시켰다. 이렇게 함으로써 SCET의 모든 사고경로가 한장의 종이 위에 가시적으로 보여질 수 있다. 이것은 각 사고경위에 대한 적납건물 거동을 쉽게 파악하는데 유용하다. 하지만 적납건물 성능을 모사하는 분기점들의 선정에는 보다 많은 반복작업이 요구된다.

셋째, 기존 APET가 모든 가능한 불확실성을 고려하였으므로 SCET에서는 추가적인 불확실성 분석을 할 필요가 없다는 점이다. 이것은 SCET가 CET의 정량화 보다는 여러가지 중요한 사건의 영향을 분석하고자 하는 목적을 그대로 반영한 때문이다. SCET에 할당된 값들은 APET에서 할당된 불확실성에 대한 최적확률값이다.

넷째, SCET는 사고관리 측면에서 적납건물 개선과 관련된 잠재적 이득을 정량화하고 최근 중대사고와 관련된 연구쟁점들의 상대적 영향을 비교하는 유용한 수단을 제공한다. 예를들면 사고감소를 위한 적납건물 내부공기 배출(Venting) 또는 Venting 전략에 대한 잠

재적 개선의 실질적 이득은 APET 구조로 평가하기가 쉽지 않다. 일단 APET 결과들과 비교하여 SCET 구조의 합리성이 인정되면 이를 이용하여 Venting 효과를 평가하는 절차는 비교적 간단하다.

다섯째, SCET는 중대사고시 적납건물 반응에 영향을 주는 주요 현상들 및 중대사고 관리측면에서 위험도에 대한 다양한 민감도/불확실성 분석을 수행하는 효과적이고도 융통성있는 수단을 제공한다. 더우기 불확실성/민감도 계산을 위하여 SCET를 수정하고자 할때 대응되는 정점사상 및 분기점들이 쉽게 파악된다. 이것은 물리적 변수와 관련된 불확실성을 평가하고자 할때 가능한 범위의 값들을 쉽게 고려할 수 있게 해 준다.

마지막으로 SCET에 의한 적납건물 해석은 원자력발전소의 운전으로부터 결과하는 위험도에 중요한 영향을 미치는 현상들이나 불확실성에 대한 절대적인 이해라는 관점에서 보다는 적납건물 반응이나 잠재적 위험도 감소요인의 보강에 대한 이득을 체계적으로 연구하는 한 방법을 제공한다는 점에서 중요성이 인정된다. 그러나, 이 방식은 APET 분석결과에 상당히 의존하므로 기존 NUREG-1150에서 참조된 발전소 이외에 적용할 시는 APET를 다시 구성해야 한다는 단점이 있다.

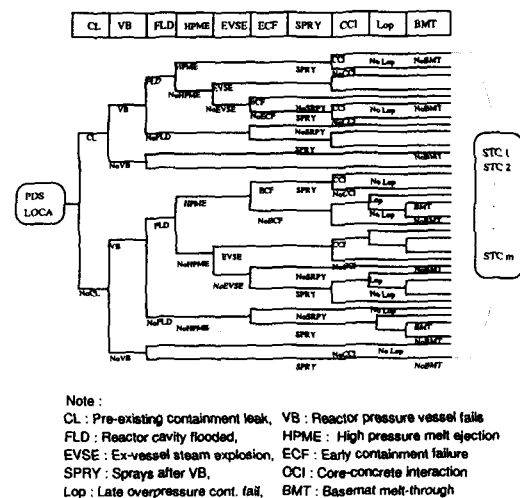


그림 6. NUREG-1150의 Zion APET에 적용된 SCET(LOCA)

3.6. 사고진행 단계별 사건수목 방법 (APSET)^[17]

일본 원자력연구소 (JAERI)에서 개발된 APSET (Accident Progression Stage Event Tree)^[17] 방식은 그림 7에서 주어진 바와 같이 기존 사고진행 분석과 달리 PDS 개념을 따로 고려하지 않고 하나의 전체적 CET 내에 모든 사고경위에 대한 사고진행과정을 '노심 용융 전 단계 (Pre-stage for core melt)', 노심 용융으로 부터 원자로 용기 파손 시점까지를 모사하는 '노심 용융 단계 (Core-melt progression stage)', 원자로 용기 파손후 극히 짧은 시간대를 모사하는 '노심용융물 방출단계 (Debris exit stage)', 및 격납건물로 방출된 노심용융물이 장기적으로 사고진행에 영향을 미치는 '장기사고 진행 단계 (Long-term progression stage)' 등 몇 단계로 나누고 각 단계마다 사건수목을 구성하는 방식을 채택한다. 이러한 사고진행 단계들은 격납건물 반응에 영향을 미치는 주요사고 특성에 따라 구분되며 각 단계별 사건수목은 연계인자 (Interface Parameter) 개념을 사용하여 연결한다. 한마디로 APSET은 전 사고진행 과정을 모듈화시켜 이것을 하나의 종합적 CET로 합성화하는 구조를 가진다.

일반적으로 APSET는 (1) 사고 진행 단계의 구분 (2) 단계별 격납건물 파손 과정 분석 (3) 정점사상의 선정 (4) 단계별 초기 조건의 선정 (5) 단계별 사건 수목 구성 및 (6) 연계 인자 할당 등 여섯 과정을 통하여 구성된다. JAERI가 APSET 방식을 사용하여 MARK-II 타입의 BWR 격납건물을 해석할 때는 노심용융 전 단계에서 7개, 노심용융 단계에서 10개, 용융물 방출단계에서 11개, 그리고 장기사고 진행 단계에서 12개 등 모두 40개의 정점사상을 고려하였다. 특히 여기서 주목할 것은 단계별 초기 조건의 선정과 연계 인자 할당 과정이다.

단계별 사건 수목의 초기조건은 그 단계에서 중요한 영향을 미치는 이전 단계의 물리적 현상에 의하여 결정된다. 즉 1단계 사건수목의 초기조건은 노심 용융경위, 2단계는 RCS 압력, 3단계는 원자로 용기 파손 모드, 마지막으로 4단계에서는 노심용융물 파편의 격납건물내에서의 축적장소가 고려될 수 있다. 또한 연계인자는 전단계에서 정의된 사고경로와 후단계 사건수목의 초기조건을 제공하는 발전소상태 및 전단계 사건의 후단계 사건에 주는 영향등을 고려하여 결정된다. 일반적으로 사용

될 수 있는 연계인자는 1단계와 2단계 사이에는 원자로 압력상태와 격납건물 냉각성, 2단계와 3단계 사이에는 원자로용기 파손모드, 원자로 압력상태 및 격납건물 냉각성, 그리고 3단계와 4단계 사이에는 격납건물 냉각성 및 격납건물내 노심용융 파편의 축적장소 등이다. 나머지 과정은 기존 CET 분석에서 고려된 것들과 유사하게 구성된다. APSET는 다음 몇가지 특성을 가지고 있다.

첫째, APSET에서는 사고시작부터 종결까지를 하나의 사건수목으로 처리하지 않고 사고진행 단계에 따라 사건수목을 구성함으로써 단계별 격납건물 파손모드를 파악하기가 쉽다. 또한 이러한 격납건물 사건수목의 구조는 모든 중대사고 현상을 하나의 CET에서 동시에 모사할 수 있음으로 인하여 사고경로의 이해가 용이하며 사고진행의 각 단계에 따른 사고 완화조치의 영향을 파악하는 데 특히 유용하다. 더우기 각 단계에서 고려된 시간대가 짧기 때문에 각 단계에서는 적은수의 정점사상으로도 그 단계에서 발생하는 주요현상을 잘 모의할 수 있다.

둘째, CET를 모듈화시킴으로써 전체적인 구조를 이해하기가 쉽고 구성이 비교적 간단하다. 하지만 연계인자의 수가 많아지면 결과하는 각 단계별 사건수목 구조는 상당히 복잡해지고 연계인자의 수를 줄이면 전단계에서 고려된 정보를 상실할 수 있다. 따라서 연계인자를 합리적으로 선정하고 그 수를 적절히 해야만 격납건물 반응해석을 효과적으로 할 수 있다. 더우기 중간단계에서 사고진행 분석에 대한 오류가 발생하면 그것이 후단계의 모든 사건수목에 영향을 미치므로 사건수목 자체를 재구성해야 하는 단점이 있다.

셋째, 단계별 불확실성과 민감도 분석은 비교적 쉬우나 전체적인 관점에서 보면 불확실성이 큰 사건에 대한 정보가 연계인자의 사용으로 후단계로 직접 전달되기 어려운 경우가 생기므로 전체적인 불확실성 및 민감도 분석이 효과적이지 못하다. 이것은 1단계 PSA 결과를 격납건물 사건수목에 직접 연결할 때 생기는 문제점과 유사하다. APSET에서는 각 단계마다 이러한 문제점이 생기므로 중간단계에서 약간의 오류만 발생해도 최종결과에 심각한 영향을 줄 수 있다.

4. 평가결과

앞절에서는 지금까지 주로 개발, 사용되어 온 다양한

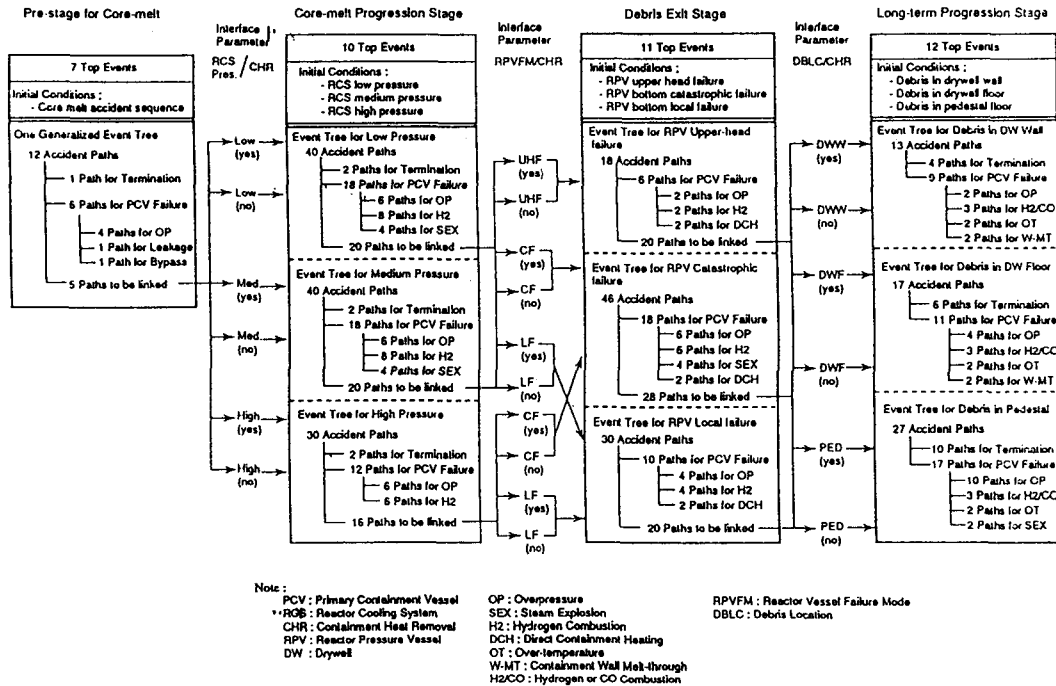


그림 7. APSET 방법의 기본 개념도

격납건물 사건수목 분석방법론을 소개하고 이들 각각이 지니고 있는 주요 특성 및 기술적인 문제점을 고찰하였다. 그 결과로 파악된 표 1은 기존 격납건물 사건수목 방법의 기본구조에 따른 여러가지 특성을 보여준다. 이를 다시 표 2에서처럼 각 방법론에 의한 대표적인 격납건물 해석의 특성을 주요 항목으로 세분화하여 상세히 비교하였다. 이들을 바탕으로 보다 효과적인 격납건물 해석을 위해 격납건물 사건수목이 갖추어야 할 주요 논리구조 및 요건으로 다음 여섯가지가 최종적으로 도출되었다.

(1) 사건 수목의 구조는 가능한한 단순하게 하되 사고경위의 정량화 과정은 체계적일 것

격납건물 반응을 상세히 평가하기 위해서는 CET 구조가 크고 복잡할수록 유용하나 이 경우 CET 자체를 구성, 정량화하고 분석하는 일 또한 그만큼 힘들어진다. 중대사고 전반적인 현상과 CET 구조의 논리적 체계에 대한 상세한 지식이 없으면 그 결과를 해석하는 것 또한 상당히 어렵다. 더우기 PDS 및 CET 사건들 사이의 중

속성을 고려함으로써 분석해야 할 사고경로는 어느정도 줄일 수 있다 하더라도, CET 구조가 복잡할수록 도식적 표현은 더욱 어려워지기 때문에 사고진행을 효과적으로 기술할 수 없다. 따라서 CET는 도식적 표현이 가능하게 함으로써 사고진행 과정의 추적이 쉬우며 격납건물 파손모드나 방사선원에 영향을 미치는 현상들의 구별이 용이할 수 있는 구조로 표현하는 것이 바람직하다. 그럼에도 불구하고 대형 CET의 장점을 충분히 활용하기 위하여 대형 CET에서 다루고 있는 주요 현상을 충분히 모사할 수 있어야 한다. 이를 위해 CET에서 고려되는 정점사상의 수는 가능한 한 적게하여 CET 구조를 단순화시키고 나머지는 보조수목을 사용하여 보다 상세하게 다루는 것이 합리적이다. 보조수목의 사용은 사고경위를 체계적으로 정량화하는 한 방안이기도 하다.

(2) 분기점 확률개념의 적용에 일관성이 있을 것

격납건물 사건수목 정량화시 확률의 정의와 관련하여 두가지 해석이 존재한다. 하나는 발생횟수의 상대적 표현인 상대빈도 (Relative frequency) 적 해석이고 다른

표 1. 사건구성에 따른 격납건물 사건수목의 분류 및 특성

Classification		General Characteristics
Criteria	Types	
Size	Small CET	Implicit considerations of many phenomenologies Inability to treat important uncertainties explicitly Only two branches per top event Hidden dependencies among physical phenomena Difficulty to carry out the detailed quantification Ease to identify the dominant accident pathways Ease to construct, review, and understand Difficulty in addition of mitigation or recovery actions
	Large CET	Direct incorporation of results for different mechanistic codes & different experts' opinions Incorporation of all types of accidents into a single tree Very little computing time for a single evaluation Ability to treat important uncertainties explicitly Multiple branches per top event Difficulty to identify the dominant accident pathways Difficulty to construct, review, and understand
Structure	Accident Specific CET	Inefficient to identify top events specific to each sequence since physical phenomena may be affected by the inside-containment conditions rather than the characteristics of core melt sequence itself Different trees for different types of accident
	General CET	Increase of the number of top events by considering all possible accident sequences Incorporation of all types of accidents into a single tree

하나의 분석자의 신념정도 (Degree of belief)를 나타내는 주관적 확률 (Subjective probability) 해석이다. 다시 말하면, 상대 빈도적 해석은 수많은 독립적인 시도 (Trial)에서 특정한 값이 갖는 상대빈도로써 확률을 정의하는 것이고 주관적 확률은 그 특정한 값을 얻을 가능성에 대한 개개인의 신념정도로 정의된다. 따라서 전자는 특정한 값이 반드시 일어난다는 가정이 전제가 되고 후자는 그것이 일어날 수도 일어나지 않을 수도 있다는 것이 전제가 된다. 전자는 기존 지식을 나타내는 반면 후자는 신념을 나타낸다.

초기 CET는 노심용융사고 경위를 정의하기 위하여 구성되는 계통사건수목의 한 연장으로 고려되어 왔으며 그 분기점확률 또한 계통사건수목의 상대빈도적 확률과 유사한 성질을 가지는 것으로 간주되어 왔다. 그렇지만 여러 물리현상들의 발생유무와 관련된 CET 분기점들

에 대한 확률해석은 계통사건수목의 확률해석과 절대적으로 같지는 않다는 것이 일반적 추세이다.

CET 분기점을 주관적 확률로 해석하는 주된 근거는 중대사고 현상들이 대부분 확률론적 모델보다는 결정론적 모델에 의하여 평가되므로 이로부터 산정된 확률은 상대빈도적 의미보다는 주관적 의미가 보다 잘 부합할 것이다 라는데 있다. 이러한 점은 보다 최근 PSA에서 널리 인식되어 왔다. 확률의 의미에 관한 위의 두가지 해석은 현상학적 사건들과 계통관련사건들이 하나의 CET 내에 동시에 존재할 때 최종결과의 해석을 상당히 어렵게 한다. 이것은 상대빈도적 확률은 최종값의 발생 빈도에 직접 영향을 주지만 주관적 확률은 그 자체가 일련의 사고진행에 대한 불확실성의 한 표현이므로 최종값의 발생빈도에는 영향을 주지않고 단지 최종값의 불확실성을 표현해 주기 때문이다.

표 2. 기존 격납건물 사건수목에 대한 논리 및 항목별 수행여부 비교

CET 유형	Conventional CET		APET	CET/PFT	CET/DET	SCET	ASPET
비교항목	WASH 1400 ^[1]	Oconee PRA ^[4] (BV2 PSA ^[18])	Surry/Zion PRA ^[3] (NUREG-1150)	System 80+ PRA ^[5]	Surry IPE ^[14]	Zion PRA Application of NUREG 1150 ^[16]	MARK II ^[17] Application
사건수목구성 :							
수목구조	General	General	General+PDS Event	General	General	Accident Specific	General+PDS Event
수목크기	Small	Small	Large	Small	Small	Small	Large
정상사건수	5	17, 12**	71	10	9	10-15	40
분기점 수	2	2	다중분기	2	다중분기	2	2
보조수목사용	사용안함	사용안함	사용안함	사용함	사용함	사용안함	사용안함
사상확률개념	상대빈도	상대빈도*, (주관적확률**)	주관적확률 및 상대빈도 혼용	주관적확률	주관적확률	주관적확률 및 상대빈도 혼용	주관적확률
사고진행모의	현상중심	계통 및 현상*, (현상중심**)	계통 및 현상	현상중심	현상중심	계통 및 현상	현상중심
사건수목 정량화 :							
정량화수준	개략적	상세함	매우상세함	상세함	상세함	상세함	상세함
민감도분석	수행안함	수행안함	수행함	수행안함	수행함	수행함	수행안함
불확실성분석	수행안함	수행안함	수행함	수행안함	수행안함	수행안함	수행안함
사건수목 해석 :							
해석코드 필요성	불필요함	불필요* [필요함**]	필요함	필요함	필요함	불필요함	불필요함
도식화정도(Sheet)	Single Sheet	Single or Multiple	Impossible	Single Sheet	Single Sheet	Single Sheet	Single or Multiple
수목구성 및 검토	매우 쉬움	복잡함	매우 복잡함	간단함	간단함	복잡함	어려움
수목분석정도	매우 단순함	다양함	매우 다양함	다양함	다양함	다양함	매우 다양함
주요 사고경위 분석	매우 힘들	비교적 쉬움	매우 어려움	매우 쉬움	매우 쉬움	매우 쉬움	비교적 어려움
사건수목 기능 :							
사상진중속성	고려안함	적절히 고려함	상세히 고려함	적절히 고려함	적절히 고려함	적절히 고려함	적절히 고려함
감소, 회복조치	고려안함	고려안함	CET에서 고려함	PDS에서 고려함	PDS에서 고려함	CET에서 고려함	CET에서 고려함
매개변수 사용	사용안함	사용안함	CET에서 사용함	정량화시 사용함	DET에서 사용함	사용안함	사용안함
ESF 동특성	고려안함	고려안함	고려함	고려안함	고려안함	고려안함	고려함

이러한 문제를 피하고 분기점 확률에 일관성을 주기 위하여 최근에는 계통관련 사건들은 PDS에 포함시키고 CET는 현상학적 사건들만 다루는 경향이 짙다. 따라서 CET 내에서 계통관련 사건들과 현상학적 사건들을 구분하여, 계통관련 사건들은 각 PDS와 결합시켜 특정한 사고경위를 유발시키는 초기조건으로 간주하면 현상학적 사건들은 일관성 있는 확률개념으로 정량화할 수 있다. 일반적으로 격납건물 내부에서 발생하는 사건들은 계통관련 사건과, 운전원 조치관련 사건, 및 현상관련 사건으로 뚜렷이 구분되며, Flooding과 같이 동일한 사건이라도 운전원 조치에 의하여 발생할 때는 상대빈도적 확률개념으로, 사고진행 단계에서 자연적으로 발생하는 경우를 모사할 때는 주관적 확률개념으로 정량화할 수 있다.

(3) 불확실성분석 및 민감도분석이 용이할 것

CET 불확실성분석 방법은 상대빈도적 확률 및 주관적확률 중 어느 것을 선택하는가에 따라 달라진다. 민일

분기점확률이 상대 빈도적 개념으로 산정되는 경우 그것의 불확실성은 통상 확률분포로 표현할 수 있다. CET 내의 이런 확률분포들은 적절한 전파 방식을 통하여 최종 결과에 대한 불확실성 분포를 생성한다.

한편 분기점확률이 주관적 확률개념으로 산정되면, 앞에서 기술한 바와 같이 그 자체가 불확실성 분포의 한 표현이므로 각 확률값에 해당하는 상대적 횟수만큼 해당 분기점을 추출하고 (즉 확률 1을 할당) 이들 각각을 CET를 통하여 전파시킴으로써 불확실성 분석을 수행할 수 있다. 또한 분기점확률을 산정할 때 다양한 전문가 그룹을 고려하면 일단의 전문가의견 자체가 분기점 확률에 대한 불확실성 분포로 간주될 수 있다. 이 경우 불확실성 분포들에 의하여 생성된 최종결과에 대한 불확실성 분포는 다양한 전문가의견을 반영한 값들로 해석할 수 있다. 전문가 의견을 정량적으로 반영하여 불확실성 분포를 마련하는 방법은 Delpi Method,^[23, 24] SRI Encoding Process,^[25] NUREG-1150의 전문가

의견 수렴방식^[5] 등이 있다. 전문가 의견의 속성상 이를 결합하는 절대적인 기준은 없으나, 단일전문가가 고려되는 경우 SRI Encoding Process 방식이 매우 효과적이고, 전문가 그룹이 이용될 경우에는, Delpi Method 또는 이를 체계적으로 확장시킨 전문가 의견 수렴방식이 보다 합리적인 확률분포를 생산할 수 있다.

CET에 의한 격납건물 해석의 또 다른 중요한 요소는 격납건물 내부에서 발생하는 어떤 현상 및 사고진행 과정의 영향이 최종결과에 가장 민감한가를 분석하는 것이다. 이러한 민감도 분석은 격납건물의 여러 취약점을 파악하고 건전성을 높이는 방안을 모색하는데 도움을 준다. 일반적으로 CET 민감도분석은 두가지 방식으로 이루어질 수 있다. 그중 하나는 각 정점사상에서 고려된 분기점중 어느 한 분기점만이 발생가능한 사건(확률 1을 할당)이고 나머지 분기점은 불가능한 사건(확률 0을 할당)으로 처리하여 이에따른 최종값(특정 방사선원 방출분류의 확률)의 영향을 평가하는 것이다. 이런 식의 민감도분석은 CET 내의 현상학적 사고진행과정에서 특정 분기점 사건만을 고려할 경우 그 사건의 최종결과에 대한 영향을 평가하는데 초점을 둔다. 나머지 분기점에 대해서도 같은 방식을 사용함으로써 각 분기점 사건의 영향을 체계적으로 평가할 수 있다. 다른 하나는 분기점확률의 신념정도 해석을 고려하여 특정한 분기점 확률을 타당한 값들의 범위내에서 변화시킴으로써 최종값에 미치는 영향을 파악하는 것이다. 즉, 각 정점사상에서 파생되는 분기점사건들의 확률값이 동시에 변할때 최종결과와 변동성을 분석하는 것이다. 이 경우 각 분기점 확률들은 전자에서 고려한 (1, 0) 나 (0, 1)의 조합에 한정시키지 않고 최적값들로부터 불확실성 범위내의 어느 값들로 변경된다. 이러한 민감도분석 방식은 CET 내의 분기점 확률을 할당할 때 어떤 전문가가 할당한 분기점 확률값들이 최종값에 어떤 영향을 미치는가를 파악하는데 초점을 둔다.

(4) CET 내의 주요 현상들을 합리적 방식으로 모사할 것

사고진행을 합리적으로 분석하기 위해서 CET는 격납건물 파손과 직접적으로 관련되는 사건, 격납건물 파손과는 직접 관련이 없더라도 방사성물질의 방출과 거동에 중요한 영향을 미치는 사건, 원자로 냉각재 계통의 주요사건등 현상학적 사건 이외에도, 이전 사건들과의 상호작용 및 적절한 중속성, 운전원 회복조치 및 사고

완화조치, 사고 진행에 따른 격납건물 안전 계통(ESF)의 적절한 동특성, 사고의 크기에 의하여 결정되는 물리적 매개변수들을 사용한 사고단계별 격납건물 파손상태 평가, 그리고 중요한 사건의 상세한 모의를 위한 다중 분기점등 여러 기능적인 측면은 물론 사고완화조치등 사고관리측면도 가능한 한 고려할 수 있어야 한다. 예를 들면, 운전원 회복조치는 원자로용기 파손전에 사고를 종결시킬 수 있으며, 원자로용기 파손후에도 격납건물의 건전성을 유지할 가능성이 높고, 설혹 격납건물이 파손되더라도 방사선원을 줄이는 데 큰 역할을 한다. 지금까지 운전원 회복조치는 APET 방식을 제외하고는 PDS에서만 제한적으로 고려되어 왔다. 하지만 보다 상세한 분석을 위해서는 CET 내에서 사고진행 단계별로도 회복조치를 적절히 고려해야 할 필요가 있다. 또한, 격납건물 안전 계통은 사고가 진행됨에 따라 발생하는 격납건물 내부현상에 의하여 파손될 가능성이 있고 이는 뒤이어 발생하는 여러 사고진행 경로에 큰 영향을 줄 수 있다. 이들의 동특성을 PDS에서만 고려하면 사고진행의 영향을 충분히 반영하지 못할 가능성이 있으므로 CET 또는 보조수목의 정점사상으로 포함시키는 것이 바람직하다.

(5) 주요 사고경로 및 중간결과의 추적이 가능할 것

사고예방 및 완화의 관점에서 사고경로의 추적은 중요한 역할을 한다. 격납건물 파손확률이나 방사선원 방출에 크게 영향을 주는 주요 사고경로를 파악하고 이들의 확률을 줄임으로써 최종적으로 발전소 위험도를 감소시킬 수 있는 방안을 강구할 수 있다.

(6) 새로운 사건의 추가 및 불필요한 사건의 제거등 CET 수정이 용이할 것

격납건물 사건수목은 단지 사고결과를 정량화하는 역할뿐만 아니라 여러가지 현상들의 상대적 중요성을 분석하는 도구로도 사용된다. 따라서 기존 CET에서 고려되지 않은 주요 사건들의 영향을 평가하고 영향이 적은 사건들을 제거하는 작업이 비교적 간단히 이루어져야 이들의 효과를 쉽게 평가할 수 있다.

5. 결 론

중대사고 현상에 대한 격납건물의 합리적인 분석을 위해서는 격납건물내에서 발생하는 주요 현상학적 사건

들이 격납건물 전전성 및 방사선원에 어떤 방식으로 영향을 미치는가를 보다 효과적으로 파악하기 위한 체계적인 해석방법이 필수적으로 요구된다. 이를 위하여 본 연구에서는 지금까지 주로 개발, 사용되어온 다양한 격납건물 사건수목 분석방법론을 소개하고 이들 각각이 지니고 있는 기술적인 문제점을 고찰하였으며 그것을 바탕으로 효과적인 격납건물 해석을 위하여 격납건물 사건수목이 갖추어야 할 기본적인 논리구조를 제시하였다.

제시된 논리구조의 관점에서 볼 때 비록 기존 격납건물 사건수목 방법들이 나름의 장점을 가짐에도 불구하고 아직까지 논리적으로 보강해야 할 부분이 많이 있는 것으로 파악되었다. 이것은 중대사고에 대한 전반적인 이해와 불확실성 평가가 주 목적인 APET 방법, 개별 안전성 평가를 통한 발전소 개선사항 도출이 주 목적인 CET/PFT 및 CET/DET 방법, 격납건물 성능개선 및 사고관리 방안들의 상대적 영향비교를 위한 SCET, 그리고 사고진행 단계별 현상모의, 파손모드 파악 및 완화조치 평가를 위한 APSET 방법등에서 보듯이 기존 방법들이 격납건물 전전성 평가에 대한 나름의 목적을 수행하기 위하여 개발되었기 때문이다. 따라서 그 목적 이외의 분석이 추가적으로 필요로 될 경우에는 본 연구에서 평가된 것과 같은 한계점을 가질 수 있다. 격납건물 해석을 위한 방법론개발 및 포괄적인 응용의 관점에서 볼 때 격납건물 분석체계는 어떠한 수행목적에도 부합하는 사건수목 구조를 가지는 것이 보다 효과적이며 가능한 한 도출된 안내지침 및 논리구조를 고려하는 것이 타당하다고 판단된다. 끝으로 이 연구는 정성적인 관점에서 기존 방법론들의 장, 단점을 비교, 평가하였으나 보다 엄밀한 분석을 위해서는 실제 계산을 통한 정량적인 비교평가가 계속적으로 이루어져야 할 필요가 있다고 본다.

참고문헌

1. U.S. Nuclear Regulatory Commission (USNRC), "Reactor Safety Study-An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants," WASH-1400 (NUREG-75/014), Oct. 1975.
2. Carlson et al., "Reactor Safety Study Methodology Application Program," NUREG/CR-1659, 1981.
3. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "PRA Procedure Guide: A Guide to the Performance of Probabilistic Risk Assessment for Nuclear Power Plants," NUREG/CR-2300, Jan. 1983.
4. The Nuclear Safety Analysis Center and Duke Power Company, "Oconee PRA: A Probabilistic Risk Assessment of Oconee Unit 3," NSAC/60, June 1984.
5. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Severe Accident Risks: An Assessment for Five U.S. Nuclear Power Plants," NUREG-1150, Final Report, Dec. 1990.
6. G.W. Parry, "Technical Note: On One Type of Modeling Uncertainty in PRA," Nuclear Safety, 24, pp. 624-627, 1983.
7. A. Torri, "A Consistent Probabilistic Methodology for the Seabrook Station Containment Event Tree Analysis," ANS/ENS Intl. Topical Meeting on Probabilistic Safety Methods and Applications, Vol. 1, San Francisco, Feb. 24-Mar. 1 1985.
8. R.L. Summit, "Interim Probabilistic Assessment of the EPRI Requirements for APWRs: Supplement 1-Containment Analysis(Draft)," SAROS, Aug. 1989.
9. System 80+ PRA, "Probabilistic Risk Assessment for System 80+ Standard Plant Design," Combustion Engineering, 1990.
10. Palo Verde Individual Plant Examination, 1992.
11. Science Applications International Corporation (SAIC), "Generic Framework for IPE Back-End (Level 2) Analysis, :PWR Implementation Guidelines," NSAC/159, Vol. 2, Oct. 1991.
12. P.J. Fulford and R.R. Sherry, "NUCAP+ User's Manual," NUS-5282, Apr. 1991.
13. P.J. Fulford, R.R. Sherry, D.M. Bucheit, and Y.C. Chou, "Computerizing The Level 2 PSA/PRA," IAEA-SM-321/20, pp. 233-

- 243, June 1991.
14. Surry IPE, "Probabilistic Risk Assessment," Surry Nuclear Power Plant Units 1 and 2 for the Individual Plant Examination: Final Report, HNUS (Halliburton NUS Environmental Co.) and Virginia Electric Power Company, Aug. 1991.
 15. W.J. Galyean, K.C. Wagner, and R.J. Dallman, "Simplified Containment Event Tree Methodology Applied to Peach Bottom SBO-ST Sequences," *Risk Analysis*, 9, No. 4, 1989.
 16. D.L. Kelly, D.J. Pafford, J.A. Schroeder, and K.R. Jones, "Simplified Methodology for Assessing the Risk Impact of Potential Performance Improvements for the Dry Pressurized Water Reactor Containment," *Nuclear Engineering and Design*, 137, pp. 229-247, 1992.
 17. N. Watanabe, M. Kajimoto, and K. Muramatsu, "A New Modelling Approach for Containment Event Tree Construction-Accident Progression Stage Event Tree Method," Second Intl. Conf. on Containment Design and Operation, Oct. 14-17, 1990.
 18. K.N. Fleming (PLG), "Use of RISKMAN in Beaver Valley Unit 2 PRA," Presented to Korea Power Engineering Company, Seoul Korea, June 4&5 1990.
 19. Pickard, Lowe, and Garrick (PLG) Inc., "Zion Probabilistic Safety Study," Prepared for Commonwealth Edison of Chicago, Sep. 1981.
 20. Power Authority of the State of New York, "Indian Point Probabilistic Safety Study," Consolidated Edison Company of New York, Inc., 1982.
 21. J.M. Griesmeyer and L.N. Smith, "A Reference Manual for the Event Progression Analysis Code (EVNTRE)," Sandia National Laboratories, NUREG/CR-5174, SAND88-1607, Sep. 1989.
 22. S.J. Higgins, "A User's Manual for the Postprocessing Program PSTEVNT," Sandia National Laboratories, NUREG/CR-5380, SAND88-2988, Nov. 1989.
 23. A. Ment, Robert H, "Comparison of Delpi Forecasting Studies in 1964 and 1969," *Futures*, 2, pp. 503-546, March, 1990.
 24. H.A. Linstone and M. Turoff, "The Delpi Method: Techniques and Applications," Reading, MA: Addison-Wesley, 1975.
 25. M.W. Merkhofer, "Quantifying Judgemental Uncertainty: Methodology Experiences, and Insights," *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-17, No. 5, pp. 741-752, Sep., 1987.