2001 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

대형 냉각재 상실사고 최적평가 방법의 이해

제1부: Top-down Approach 와 TRAC-CSAU

Understanding of the Best-Estimate Methodology for LB-LOCA

Part-I: Top-down Approach and TRAC-CSAU

이상용

한국전력기술주식회사
대전시 유성구 덕진동 150

요약

1998년 관련법 개정[1]을 통하여 냉각재 상실사고에 대한 최적 평가 방법을 허용한 이후 미국 원자력 규제위원회는 기존의 보수적 평가 방법론[2] 및 최적 방법론[3]을 각각 별도의 지침으로 제시했다. 이 논문에서는 미국규제지침 및 관련연구[4,5]를 면밀히 검토함으로써 각 평가방법론에 대한 별도의 규제입장에도 불구하고 일관되게 유지되는 규제원칙이 있음을 지적하고, 이를 근거로 최적평가방법론에서 불확실성 인자로서의 개별모델 선택의 의미를 밝히고 불확실성 변역 결정방법의 원칙을 제시하였다. 즉, 대형냉각재 상실사고(LB-LOCA) 최적 방법론의 불확실도를 평가는 수많은 개별 모델의 불확실도를 평가[1]하기보다는 중요한 것으로 확정된 현상 혹은 공정들[i]의 불확실도를 평가하는 것으로 가능하다는 것이다. 이렇게 하는 과정에서 어떤 코드 모델이나 상관식 (이후부터 통칭 모델이라고 함) 들의 한 개 혹은 다수를 선택해야 하며 이러한 코드 모델(들)의 불확실도를 평가하는 과정이 필요하다. 그러나, 그 선택된 코드 모델(들)의 역할은 관련된 현상이나 공정에 개입되는 많은 모델들 중에서 선택된 것으로 그 공정을 ‘대표’하는 것으로 이해 되어야 한다. 따라서 선정된 불확실성 모델의 변역은 실제 원자로를 잘 축도한 분리효과실험(Separate Effect Test, SET)이나 종합효과실험(Integral Effect Test, IET)으로 확인되어야 한다. 더불어, 이상과 같은 관점으로부터 TRAC-CSAU[5] 발간 이후 제기된 의문점[6]에 대한 해답을 제시했다.

---

[1] Bottom-up approach

[2] Top-down approach

Abstract

Since the law[1] for Large Break Loss of Coolant Accident(LB-LOCA) has been revised to allow the use of the Best-Estimate(BE) Methodology, The U.S. Nuclear Regulatory Commission(NRC) issued two independent positions for the old conservative evaluation model[2] and for the BE evaluation model[3] respectively. In this paper, by scrutinizing the U.S. regulatory position and the related studies[4,5], it is shown that a consistent regulatory principle is kept in both methodology. Following this principle, a methodology can be suggested to select a certain code model or correlation and to quantify their ranges for the concerned important uncertain phenomena or process. The key point of the BE-methodology is that the identified important phenomena or processes are to be evaluated to quantify the uncertainties in the LB-LOCA scenario, instead of evaluating the individual models and correlations. In doing so, however, a certain model or group of models should be selected and their uncertainties should be quantified. But, their role should be understood as the ‘representative’ parameters for the concerned phenomena or processes. Accordingly, the range of the selected uncertainty parameter should be confirmed based on the well-scaled experiments. With the above viewpoint, some solutions are suggested for the many questions[6] concerning the TRAC-CSAU[5] methodology.

1. 서론

TRAC-CSAU 보고서가 발간된 이후, 그 방법론의 적합성, 실용성 및 완결성 등 광 범위한 논란이 이루어 졌다. 이러한 논의는 표-1에 보인 바와 같이, TRAC-CSAU를 개발한 TPG group[6]의 편찬목록에 나타나 있다. 모든 질문들이 TRAC-CSAU를 보다 더 잘 이해하는데 도움을 주겠지만, 이 논문에서 취급되는 핵심 질문은 항목 7번으로 다음과 같다. 즉, “수많은 열수력 현상들을 불확정성원으로부터 제거한 것은 정당한가?” 라는 질문이다. 이 어려운 질문에 TPG group은 다음과 같이 강하게 대답한다;

“It is not possible nor necessary to address each potential source of uncertainty in an equal manner. One of the strengths of the methodology is its ability, based on expert evaluation of experimental evidence, to prioritize the sources of uncertainty for further analysis and treat them accordingly”

이와 같은 뜻으로 쓰인 구절이 TRAC-CSAU보고서[5] 및 NUREG-1230[4]에도 찾아 볼 수 있다. 이 대답을 이해하는 것은 대형냉각재 상실사고의 최적 평가 방법을 이해하는데 매우 중요하다. 이 대답은 곧바로 다음과 같은 두 개의 질문을 야기 시킨다. 첫 째는 ‘왜 주요 현상 외의 다른 현상들은 불확정성 정량화에 불필요 한가?’ 이고, 둘 째는 ‘어떻게 주요 현상들의 불확정도를 평가 하는가?’ 이다.

첫째 질문에 대한 대답은 미국의 LB-LOCA에 대한 규제의 전통과 원칙을 이해 함으

로써 가능해진다. 두 번째 질문은 대표 변수 개념의 이해가 필요하다. 이러한 것들을 다음에서 상세히 논하겠다.

2. Top-down Approach; LB-LOCA에 대한 미국규제의 원칙

Top-down approach 는 LB-LOCA에 대한 미국 규제법의 전통이자 원칙이다. 과거에 LB-LOCA현상을 이해하고 규제에 필요한 보수성을 확보하기 위하여 광 범위한 LB-LOCA실험 연구가 수행되었다. 그러나, 경제적 이유로 실물 크기의 실험장치는 만들 수 없었고, 단지 축소된 실험장치를 건설하여 복잡한 LB-LOCA를 연구 해 왔다. 축소된 실험장치를 건설할 때도 LB-LOCA의 모든 상세한 현상을 조사 해 볼 수 없었다. 그래서 어떤 실험 장치를 건설하기 전에, 조사해 보려는 주요한 공정을 미리 결정하였다. 이렇게 실험의 주요한 공정을 결정하는 과정에 개입된 절차를 top-down approach 라고 한다. 이러한 과정에서 도출된 주요한 현상이나 공정들은 실험을 위해서 뿐 만 아니고, 코드 개발이나 규제에서도 중요하게 사용되었다.

2.1 Appendix-K 의 Top-down Approach;

Appendix-K 의 규제법에서는 어떻게 top-down approach 가 반영 되었는지를 알아보기 위하여 NUREG-1230[4]의 다음과 같은 구절을 인용한다;

“Because extensive directly applicable experimental data did not yet exist in 1972 for use in computer code development or in assessing the predictive capabilities of these codes for key portions of the Light Water Reactor (LWR) response to LOCAs, large uncertainties existed in predictions of these transients. Accordingly, sufficiently conservative assumptions were used in developing 50.46 and Appendix-K in 1974 to provide assurance that Emergency Core Cooling System(ECCS) criteria would be satisfied even in the unlikely event that worst-case uncertainties prevailed.”

위에서 언급된 보수적 가정들에 관하여 밝혀 두어야 할 하나의 중요한 점은, 그것들이 모든 개별 모델에 관계된 것이 아니고 주요한 몇몇 현상이나 공정에 관계되고 있다는 것이다. 이러한 주요 현상이나 공정들은 이미 2 절 초입에서 언급된 실험들의 주요 조사항목과도 일치한다. Appendix-K 에 도입된 보수적 가정은 required features 라고 부르며 표-3 에 그 항목들을 보였다. 이 가정들은 모두 주요 현상/공정들에 관계되는 것들로 이해 되어져야 한다. Appendix-K 를 근거로 한 평가방법론은 이러한 required features 를 구현하는 현상 혹은 공정 모델들을 가진 전산 코드를 포함한다. 이러한 required features 들은 각각이 관여하는 현상/공정들을 대표한다고 이해 되어 질 수 있다. 규제기관은 이렇게 주요 현상들을 모사한 실험들에 의해 잘 알려진 LB-LOCA 의 주요 현상들의 불확실도를 반영한 보수성을 포함한 계산 체계와 그 계산 결과로부터 그 방법론을 적용하고 있는 발전소의 안전성을 점검한다. 즉, Appendix-K 방법론에서는 required features 들의 충분히 보수적 가정에 의해 관련된 현상/공정

의 불확실성을 포함할 수 있다는 확신이 규제의 핵심이다..

2.2 최적 평가방법론의 Top-down approach

LB-LOCA 에 최적 평가방법의 사용을 가능케 한 새로운 규제지침은[3] 최적 방법론의 특징과 요구 조건들을 명시한다. 표-3 에 Reg Guide1.157 을 요약하였다. 이 표를 보면, 입장-1 과 입장-2 에서 각각 최적방법론의 일반적인 그리고 특별한 속성을 기술하였다. 입장-3 에서는 Appendix-K 와 마찬가지로, LOCA 의 모든 주요한 현상 및 공정들을 열거하였다. 입장-4 에서는 불확정성을 어떻게 취급할 것인가를 보여 주었다. 만약 입장-3 의 모든 주요한 현상 및 공정들과 Appendix-K 의 그것들과 비교하면 서로 일치함을 알 수 있다. 그러나 입장-3 에는 요구 조건들이 없고 대신에 입장-4 에 불확정성 평가에 대한 과정이 기술되어 있다. 또한 입장-2 에는 NUREG-1230[4]이 불확실성 평가방법론 구성을 위한 안내자라는 것을 밝혔다. 여기서 NUREG-1230 의 구절을 인용해보자;

“There can be two method to evaluate a best estimate code. In the bottom-up approach, each model and all the closure relations in a code are examined and assessed in a uniform function. Sensitivity studies are performed on every single model to assess its effects on calculated results. Although this approach is rigorous, it is definitely impractical in view of the number of calculations that would be required.

In the top-down approach, one identifies significant phenomena that have influence on the overall results for a scenario or for a distinct class of scenarios. The capability of the code to calculate these significant phenomena is assessed against test data. Finally, sensitivity studies are performed on parameters and/or models that affect the significant phenomena. It is evident that the top-down approach has several attractive features, for example, the reduced number of sensitivity calculations. However, it still has important shortcomings, that is, it does not offer a method to address the questions related to scaling and to compensating errors among others. CSAU method, which removes these and other shortcomings ..”

매우 원론적인 구절이지만 bottom-up approach 를 상정하여 top-down approach 와 비교하고 있다(표-4 참조). CSAU 방법론은 기본적으로 top-down approach 를 사용하지만 QA documents 와 SET 와 IET 평가를 통하여 그 결점을 보완하고 있다고 주장한다. 이러한 개념상의 방법론을 가지고 구체적인 최적 방법론을 최초로 개발한 것이 TRAC-CSAU 방법이다[5]. 이 방법론은 TRAC-PF1[7]코드를 사용하여 웨스팅하우스사의 4 루프 발전소에 대한 LB-LOCA 예시 계산이다. 이 방법론에서 선정된 주요 현상/공정들은 그림-1 에 보였다. 또한, 선정된 주요 현상/공정에 대한 코드 모델 변수를 보면(표-2), 새로운 방법론과 Appendix-K 방법론 사이의 관계를 알아 볼 수 있다. 이 비교에서 required features 와 uncertainty parameters 사이에 매우 유사한 점들이 발견된다.

위의 검토로부터의 결론은, 최적방법론이라고 하더라도 미국 규제법의 원칙인 top-down approach 가 지켜지고 있다는 것이다. 즉, 최적 방법론이란 주요 현상/공정의 보수적 가정을 통하여 불확정도를 취급한 Appendix-K 와는 달리 똑같은 주요 현상/공정들의 불확정도를 그 동안 쌓여온 기초 및 주요 현상/공정 실험 데이터를 통하여 평가하는 방법을 제시한 것이다. 이것은 개요의 첫번째 질문, 즉, '왜 주요현상 외의 다른 현상들은 불화정성 정량화에 불필요 한가?' 라는 질문에 대한 답이 될 수 있다.

3. 불확정 변수에 대한 논의

코드 불확실도는 CSAU 에 따르면 주요 불확정성 변수들을 통하여 평가해야 한다. TRAC-CSAU 는 phenomena/process identification and ranking 과정을 통하여 주요 현상들을 정하고 코드의 민감도 분석과 코드 관련서류를 검토하여 주요 불확정 변수를 정하였으며, 그 주요 불확정 변수들은 그림-1 에서 보는 바와 같이 break discharge coefficient, fuel parameters, heat transfer coefficient, minimum boiling temperature, pump, steam binding, ECC bypass, dissolved nitrogen 등이다. 그 중 heat transfer coefficient 와 minimum boiling temperature 를 살펴보면, stored energy and fuel response 라는 주요 현상을 위하여 코드가 가지고 있는 기능을 찾아 clad surface heat transfer 를 찾았고, 다시 이것을 구현한 코드의 모델과 상관식들을 검토하여 그들 중 중요한 두 가지가 선택된 것이다[그림-1]. 여기에서 중요한 것은 불확정도를 평가하는 것은 마지막으로 선택된 heat transfer coefficient 와 minimum boiling temperature 가 아니고 주요한 현상으로 선택된 fuel response 라는 점이다. 이러한 점은 미국의 규제 전통을 살펴보면 쉽게 이해될 수 있다. 즉, 종래의 Appendix-K 평가 모델에서는 fuel response 에 해당되는 불확정도를 no return to nucleate, no return to transition boiling, hot channel to be less than one assembly size, FLECHT correlation to be used for 1 in/sec, steam cooling to be used for 1 in / sec 등의 여러 개의 required features 를 통하여 확보하도록 만들었다(표-2 참조).

이러한 전통은 최적 평가 방법론에도 그대로 이어진다. 즉, Reg. Guide Position 4.2 를(표-4 참조) 보면 위와 같이 결정된 주요 불확정 SET 및 IET 를 통하여 그 불확정 도를 평가해야 한다고 명시 되었다. 이 점이 매우 중요하기 때문에 다음에 원문 그대로 인용하겠다;

"Code uncertainty should be evaluated through direct data comparison with relevant integral systems and separate effects experiments at different scales. In this manner, an estimate of the uncertainty attributable to the combined effect of the models and correlations within the code can be obtained for all scales and for different phenomena. Comparisons to a sufficient number of integral systems experiments from different facilities and different scales, should be made to ensure that a reasonable estimate of code uncertainty and bias has been obtained.…."

위의 인용을 보면 그늘진 부분의 두 가지 점이 강조되었다. 즉 불확정 변수는 SET 및 IET 에 의해 불확정도가 평가되어야 한다는 점과 code uncertainty 와 bias 는 IET 에 의해 확인 되어야 한다는 점이다. 이러한 확인 과정은 Appendix-K 방법론에서 required features 들의

충분히 보수적 가정에 의해 관련된 현상/공정의 불확실성을 포함할 수 있다는 확신을 대신한다고 보여진다. 이상과 같은 분석을 기초로 TRAC-CSAU 에서 행한 heat transfer coefficient 와 minimum boiling temperature 의 불확정도 평가 과정을 검토 해 보자.

3.1. heat transfer coefficient 의 불확정성 결정

fuel response 라는 공정의 불확정성은 노심 유동, flow regime map, 열전달 상관식 등의 많은 상관식 및 모델에 의존 하고 있으나, TRAC-CSAU 는 피복재 표면에서의 열 전달계수 및 최소비등온도로 대표 되어질 수 있다고 판단했다. 이러한 관점의 정당성에 대한 질문은 이미 언급한 바와 같이 이 현상과 관련된 Appendix-K 의 required feature 를 보면 긍정적으로 답변 될 수 있다. 그러나 TRA-CSAU 에서 열 전달 계수의 불확정도를 평가하기 위하여 사용한 데이터는 single heated tube 실험[7]으로, 여기에서 여러 가지 논란이 발생된다. 사용한 열 전달계수는 전 구간에서 피복재 온도에 민감하게 작용하며 전 시간 영역에서 다음과 같은 함수 형태로 표시 되어진다.

$$h(t) = h(W(t), a(t), K, c_p, ...t)$$

위 함수에서 h 가 시간 t 의 직접적인 함수라는 것은 시간의 변화에 따라 진행되는 사고의 상태에 따라 열 전달 모드가 달라진다는 것을 의미한다. 실제로 코드에 설치된 형태는 다음과 같다.

$$h(t) = h_i \, (W(t), a(t), K, c_p, ...) \qquad t_{i-1} < t < t_i$$

여기에서 i 는 열 전달영역(heat transfer regime)을 나타낸다. 이렇게 표시되는 열 전달계수의 불확실성을 정량화 하는 과정에 다음과 같은 점들이 발생된다.

1. 어떤 한 열 전달영역에서 적용되는 $h_i(t)$ 는 single tube test[8]등의 이상적인 조건에서 수행된 실험에 근거하여 그 불확실성을 추정한다면 그 값이 실제 대형 냉각재 상실사고 진행시의 불확실성으로 쓸 수 없다. 왜 그런가 하면 천이 기간중의 열 전달계수가 이상조건에서의 열 전달계수와 같은 함수형태로 표시될 수 있다는 가정은 확인 되지 못한다.
2. 만약 같은 함수형태로 표시될 수 있다는 가정이 옳다고 하더라도 실제 대형 냉각재 상실사고 진행 시 어떤 특정한 시간에 W 및 a 등의 변수들의 불확실성은 역시 평가 되어질 수 없다.
3. 열 전달 계수가 노심 열 전달 현상을 대표하는 변수라는 것은 사실이지만

피복재 온도를 결정하는 유일한 변수는 아니다. 예를 들면 유체온도의 불확실도도 역시 같은 정도로 중요하다. 특히 재관수 기간의 피복재 온도계산은 피복재 외부의 증기온도가 기준이 되며, 증기온도는 droplet entrainment, droplet evaporation 등 다수의 인자가 모두 중요한 역할을 한다.

4. 노심내의 열전달 현상의 계산 능력은 코드의 모델 유무 등이 중요하다. 코드에는 grid 등의 모델이 없다면, 이와 같이 존재하지 않는 모델에 의한 열 전달 현상의 변화는 단순한 실험이 반영시키지 못한다.

5. 실제적인 적용을 가능하도록 하기 위하여 노심의 부 수로를 모두 모사할 수 없다. 고온 및 평균 수로 등의 몇 개 수로로 모델 한다. 이와 같은 적용상의 간략화에서 오는 불확정도는 단순한 열 전달계수의 변역과 일치하지 않는다.

위와 같은 문제점은 근본적으로 두 가지 이유에서 발생된다. 첫째로, 열 전달 계수는 fuel response 라는 현상을 '대표' 하는 코드 모델이라는 것과, 둘째로, INEL 의 Post-CHF 실험이 원자로를 잘 축도한 실험이 아니라는 것이다.즉, '불확정 변수는 SET 및 IET 에 의해 불확정도가 평가되어야 한다는 점과 code uncertainty 와 bias 는 IET 에 의해 확인 되어야 한다는 점들에서 TRAC-CSAU 는 Reg. Guide 의 요구사항을 잘 준수하고 있지 못하다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위해서는 Reg. Guide 의 요구사항을 잘 준수하여 실제 대형 냉각재 상실사고를 훌륭하게 축도한 다수의 실험을 확보하여 그 실험들을 모사하는 방식으로 최적코드와 그 속에 있는 열 전달 팩케지의 불확실도를 평가하는 방법이 시도 되어 질 수 있다. 이러한 방법은 이미 임계 열속의 불확실도 평가에서 사용되고 있다. 여기서는, 실제 크기와 모양을 가진 핵연료 집합체를 실제 운전조건 영역에서 천이 운전 시키면서 임계 열속을 측정하고 상관식을 장착한 전산코드로 추정 계산하여 그 차이의 통계적 처리를 불확실성으로 쓰고있다.

대형 냉각재 상실사고 시에도 이러한 방법이 가능한지를 알기 위해 축도된 실험의 존재 여부룰 평가 하여야 한다. 우선 배출기간에는 power-to-volume 축도 방식이 적합한 것으로 판단되어 있다. 그렇게 축도된 실험으로써 발전소의 운전조건을 포함하는 다양한 초기조건을 가지고 수행된 실험으로 THTF[9]를 선택할 수 있다. THTF 실험은 고 유속, 고 압력하의 임계열속 상관식, film boiling 상관식 및 transition boiling 상관식 등의 적합성 여부를 보여줄 뿐만 아니고 grid 등의 핵연료 특유의 기하학적 구조도 반영하고 있다. 또한, 재관수 기간에 노심 열수력 팩케지의 불확실성을 평가하기 위해, distortion 되어진 계통의 영향을 배제하고 노심을 적합하게 축도한 실험으로 FLECHT-SEASET[10]을 열거 할 수 있다.

이상에서 언급된 축도된 실험들을 평가 계산하면 일차적으로 피복재 온도의 예측 불확실도가 정해진다. 이렇게 구해진 피복재 온도의 예측 불확실도는 IET 평가 계산을 통하여 확인하면 Reg. Guide 의 요구 사항을 만족 시킨다.

3.2 TRAC-CSAU 와 heat transfer coefficient 의 불확정성 결정

이상의 논의에서 보면 1 장 개요에서 제시한, 어떻게 PIRT process 들의 불확실도를 평가할 것인가라는 두 번째 질문의 답변은 다음과 같다. 즉, 우선, 각 현상의 대표할 수 있는 코드의 모델이나 상관식을 선택한다. 다음, 평가 대상인 원자로를 잘 축도한 SET 나 IET 를 평가하여 불확실도를 구한다.

이때, 경우에 따라 피복재 온도의 불확정도가 동시에 구해질 경우도 있다. 예로, fuel response 의 경우, THTF 의 평가계산으로 그 불확실도를 결정한다면 코드 평가계산에서 도출되는 피복재 온도의 예측 불학실도가 곧 fuel response 의 불확실도이다. 이때에 만약 피복재 온도의 예측 불학실도에 상응하는 열 전달계수의 불확실도를 구하고자 한다면 THTF 의 열 전달 계수에 대한 민감도 분석을 통하여 환산이 가능하다.

TRAC-CSAU 를 다시 예로 들어보면, break discharge coefficient 의 경우에는, break flow 라는 주요현상을 대표할 수 있는 코드 변수로 선택되어, 축도실험인 Mraviken[11] 실험을 통하여 그 변역이 결정되고 총 불확실도 평가에 사용되었다. Mraviken 실험이 원자로 LB-LOCA 시 발생되는 critical flow 를 잘 scale 할 것이라고 판단된다. 이렇게 단일 변수로 대표될 수 있는 현상/공정은 논리적으로 문제가 없다. 그러나 fuel response 라는 현상은 매우 많은 코드 변수들이 종합적으로 개입 되므로 그 대표 코드변수를 선정하는데 고심하게 된다. 배출기간의 경우 TRAC-CSAU 와 같이 열 전달계수, 최소비등온도 등의 코드 모델들이 주요한 불확실변수로 선택될 수 있다. 그러나 Appendix-K 에서 보수적 decay heat 와 no return to nucleate boiling 등이 잘 모르는 모든 불확실도를 포섭하는 것처럼 이 두 변수의 변역들은 fuel response 가 가지는 불확실도를 충분히 포섭해야 한다. 이 충분한 포섭성은 THTF 와 같이 실제원자로에 유사한 SET 의 평가계산에 의해서만 확인되지 single tube test 로는 그 확인 이 불가능하다. 즉 TRAC-CSAU 는 적절한 SET 나 IET 로 확인하는 절차를 밟지 않았다.

4. 결론

이상과 같은 논의에서 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다. TRAC-CSAU의 전 과정은 합리적 이지만 열 전달계수 및 최소비등온도로 대표 시킨 fuel response현상의 불확정도 평가를 위하여 선택된 실험은 부적합하다. 즉 원자로를 잘 축도한 실험이 아니다. 이 부적합성 때문에 많은 사람들이 열 전달 계수가 최소비등온도와 함께 노심의 열 전달 현상을 대표한다는 생각을 버리고 단순한 개별 모델이라고 오해한다. 이러한 오해는 부분적으로 개요에서 언급된 표-1의 질문 7과 같은 의문이 생기게 한다. 또한, 이러한 오해는 곧, 최적 평가방법을 개발할 때에 무수한 개별 모델들의 불확정도를 평가 해야만 된다는 오해를 불러 일으켰고, 최적방법론의 잠재적 적용능력을 의심하게 만들었다. 이

논문에서는, 최적방법에서는 개별 모델이 아니고 주요현상의 불확정도 평가를 통하여 총체적 불확실도를 정량화 한다는 점을 다시 강조하고, 주요현상의 불확정도 평가할 때 선택된 코드의 모델이나 상관식은 때로는 그 현상을 대표하는 것들로 그 변역을 결정할 때 단순한 실험을 사용하지 말고, 반드시 적절히 축도된 SET**나** IET **들로 수행해야 한다는 점이다.**

참고문헌

1. United States Code of Federal Regulations, Title 10, Section 50.46, “Acceptance Criteria for Emergency Core Cooling Systems for Light Water Reactors”, 1988.
2. APPENDIX-K to Part 50 —ECCS Evaluation Models, I. Required and Acceptable Features of Evaluation Models; Regluations—U .S.Nuclear Regulatory Commission
3. Regulatory Guide 1.157, “Best-Estimate Calculations of ECCS Performance”, U.S. Regulatory Commission, May 1989.
4. Division of Reactor and Plant Systems, "Compendium of ECCS Research for Realistic LOCA Analysis". NUREG -1230, 1987.
5. B. Boyack, et, al., "Quantifying Reactor Safety margins". NUREG/CR-5249, 1989.
6. G. E. Wilson, et. al., "TPG response to the foregoing letters-to-editor". Nucl. Eng. and Des. V132, pp431, 1992.
7. D. R. Liles et. al., "TRAC-PF1/MOD1, An advanced Best-Estimate Computer Program for Pressurized Water Reactor Analysis". NUREG/CR-3858, July 1986.
8. R. C. Gottula et. al., "Forced convective, Non-equilibrium, Post-CHF heat transfer experiment data and correlation comparison report". NUREG/CR-3193, March 1985.
9. V. D. Clemens et. al., PWR Blowdown Heat Transfer Separate-Effects Program --- Thermal-Hydraulic Test Facility Experimental Data Report for Test 160, NUREG/CR-0730, June 1980.
10. M. J. Loftus, et. al., PWR FLECHT-SEASET Unblocked Bundle, Forced and Gravity Reflood Task Data Report, NUREG/CR-1532, September 1981.
11. Studsvik Energieknik AB, “The Marviken FullpScale Critical-Flow Tests”, Final report Vol 1-35, EPRI/NP-2370, December 1982.

그림-1 TRAC-CSAU 불확정성 변수

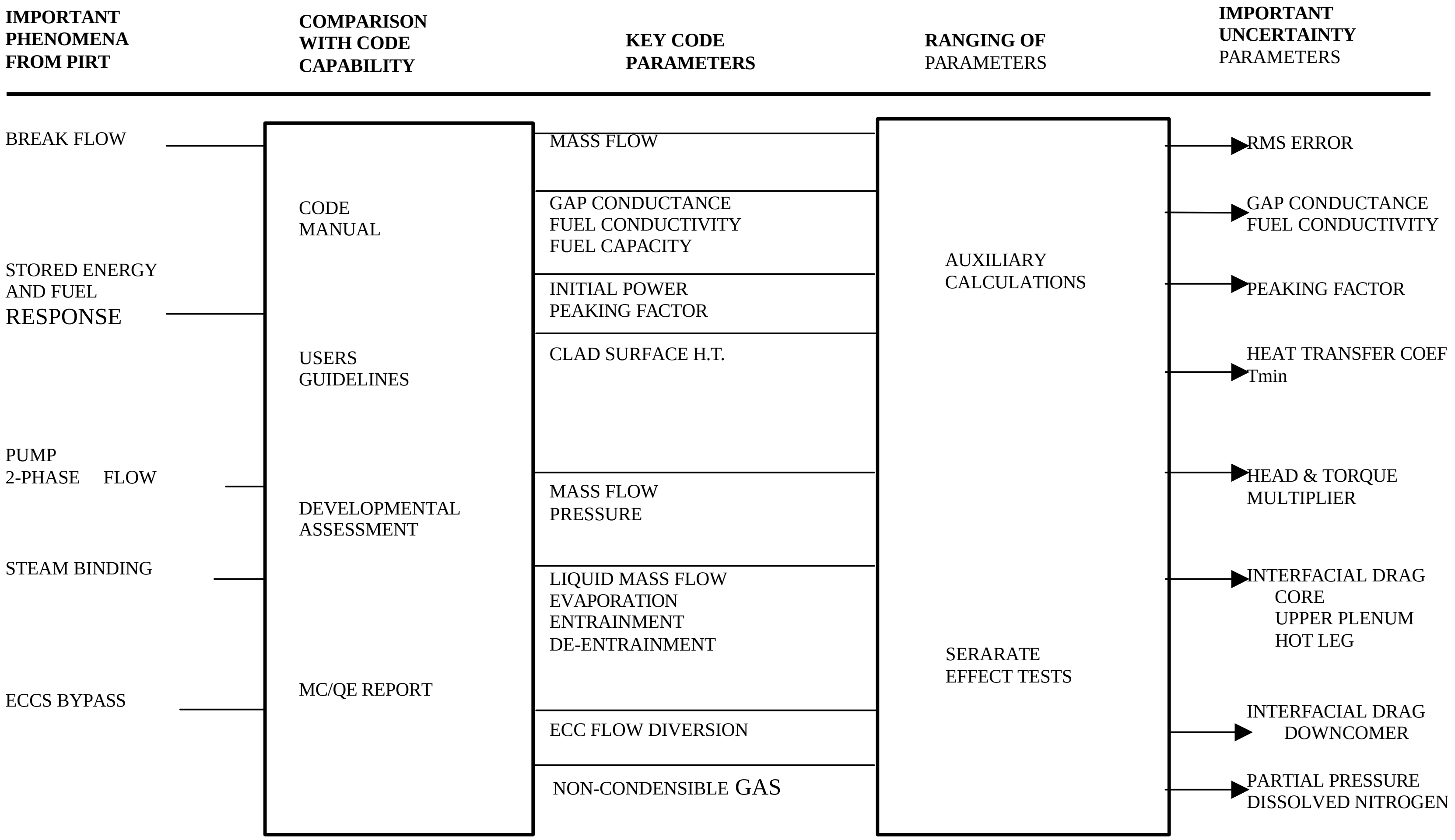

표-1. TRAC-CSAU에 관련된 질문 목록

No.	Questions on
1	Generality of CSAU
2.	Practicality of CSAU
3	Use of Engineering Judgement in application of CSAU
4	Use of Biases in application of CSAU
5	Use of frozen Code Version having Model Deficiency
6	Quantification of uncertainty introduced by user controlled Variations, particularly Nodalization
7	Elimination of many thermal-hydraulic phenomena as sources of Uncertainty
8	Validity of comparing the CSAU results to the world' s PCT data bases
9	Validity of the Use of Supplemental Fuel Rods
10	Scalability of Code
11	Statistics

표-2. Appendix-K Required Features and TRAC-CSAU

Phenomena/Processes	Required features	TRAC-CSAU Uncertainty Parameters
A. Sources of Heat	**A. Decay Heat; ANS-71 plus 20%**	**Peaking factor**
B. Fuel Rod Model	**B. Swelling and rupture**	
	Gap conductance	**Gap conductance**
C. Blowdown Phenomena	**C. Blowdown Phenomena**	
1. Break Flow	**1. Break Flow**	**Discharge coeff.**
a. spectrum	**a. spectrum**	
b. discharge model	**b. Moody Model**	
c. EOB	**c. EOB**	**ECC bypass**
d. Noding near break	**d. Split break**	
2. Frictional Pressure Drop	**2. Realistic Frictional Pressure Drop**	
3. Momentum Equation	**3. Momentum Equation**	
4. Critical Heat Flux	**4. No return to Nucleate**	**Tmin**
5. Post-CHF HTCorrelation	**5. No return to Transition Boiling**	**Heat Transfer Coeff**
6. Pump Modeling	**6. Two-phase Pump Data**	**Pump Degradation**
7. Core Flow Distribution	**7. Hot Channel<One Assembly Size**	
D. Post-Blowdown Phenomena	**D. Post-Blowdown Phenomena**	
1. Single Failure Criterion	**1. Single Failure Criterion**	
2. Containment Pressure	**2. Minimum Back Pressure**	
3. Reflood rate calculation	**3. High entrainment rate**	**Steam binding**
4. Steam condensation	**4. No condensation at pipes**	**Tmin**
5. RF H.T and steam cooling	**5. FLECHT correlation > 1 in/sec** **Steam cooling < 1 in/sec**	**Heat Transfer Coeff**

표-3. Summary of Regulatory Guide 1.157

Regulatory Position 1; General Attributes in Best-Estimate Calculations
Best-Estimate Model; realistic calculation of experiment predict mean value of experiments
Unaccounted-for Model; treated as a bias in overall uncertainty do not include the bias in the analysis
Range of Models; use within the applicable range if extrapolated, uncertainty evaluation
Best-Estimate Code; predict the important phenomena
SET and IET; determine overall uncertainty and bias / IET; confirmation of Best-Estimate Code
Conservatism; simplification leads little or no effect; only upper bound of model is known
Bias is acceptable

Regulatory Position 2; Special Considerations for Best-Estimate Calculations
NUREG-1230 Compendium guides the Best Estimate Methodology

Uncertainties of features; included in overall uncertainty calculation
2.1 Basic Structure of Codes
    2.1.1 Numerical Methods; Noding Sensitivity to be done
    2.1.2 Correlational Models

Regulatory Position 3; Best-Estimate Code Features
3.1 Initial and Boundary Condition and Equipment Availability
3.2 Sources of Heat During a LOCA
3.3 Fuel Rod Parameters
3.4 Blowdown Phenomena
    3.4.1 Break Characteristics and Flow /3.4.2 ECC Bypass
3.5 Noding near the Break and ECCS injection Point
3.6 Frictional Pressure Drop
3.7 Momentum Equation
3.8 Critical Heat Flux
3.9 Post-CHF blowdown Heat Transfer
3.10 Pump Modeling
3.11 Core Flow Distribution During Blowdown
3.12 Post-Blowdown Phenomena
    3.12.1 Containment Pressure
    3.12.2 Calculation of PB Th for PWR
    3.12.3 Steam Interaction with ECC in PWR
    3.12.4 Post Blowdown Heat Transfer for PWR
3.16 Other Features
    3.16.1 Completeness
        BE code should be complete
    3.16.2 Data Comparisons
        Individual Models should be compared with Experiments

Regulatory Position 4; Estimation of Overall Calculation Uncertainty
4.1 General;
    Definition of Uncertainty;
        Code Uncertainty; Combined uncertainty accounting the individual models and correlations
    Overall Calculation Uncertainty;
        Code Uncertainty Plus Uncertainties from the Various Sources
        A completely rigorous mathematical treatment is neither practical nor required.
        Approximations and assumptions
4.2 Code Uncertainty
    Evaluated by direct comparison with relevant IET’ s and SET’ s
    Separate Uncertainties for Blowdown and Reflood
    Justification of separate uncertainty treatment
4.3 Other source of Uncertainty
    4.3.1 Initial and Boundary Conditions and Equipment availability
    4.3.2 Fuel Behavior
    4.3.3 Other Variables
4.4 Statistical Treatment of Overall Calculation Uncertainty

표-4. Bottom-up and top-down approach for code evaluation

Approach	Range of assess	Sensitivity range	Merits	Demerits
Bottom-up	Single model	Every single model	rigorous	impractical
Top-down	Phenomena	Parameter affecting phenomena	economic	Scaling error Compensating error