2004 춘계학술대회 논문집
한국원자력학회

KINS 불확실성 평가방법의 개선 및 L2-5 실험 평가계산에의 적용

Improvement of KINS Uncertainty Evaluation Method and Application to Simulation of L2-5 Experiment

방영석, 오덕연, 설광원, 김인구, 김봉현, 김효정
한국원자력안전기술원
305-338, 대전시 유성구 구성동 19

요약

한국원자력안전기술원은 대형냉각재상실사고(LBLOCA)의 최적계산에 관련된 불확실성 평가 방법을 개발해 왔다. 현재의 방법은미국원자력규제위원회의 CSAU (Code Scalability Applicability and Uncertainty) 방법과 유사한 기본 구조를 가지고 있는데 최근의 기술 발전에 기초하여 개선이 이루어 졌다. 본 개선에서는 가장 최신의 열수력 코드인 RELAP5/MOD3.3 을 확정 코드로 채택하였고, Monte Carlo방법을 사용하는 반응도표면방법 대신 Wilks 공식을 이용한 비모수 통계학적 방법을 반영하였다. 또한 통계적으로 처리되는 불확실 변수의 수를 확장하였다. 본 방법론을 통해 임의의 수의 변수에 대해서도 59 회의 계산을 통해 LBLOCA시의 최대피복재온도와 같은 주안전변수의 95% 신뢰도 수준에서 95% 확률 한계치를 얻을 수 있다. 본 방법의 타당성과 적용성을 보장하기 위해 LOFT L205 실험 묘사계산에 적용하였다. 계산 결과 본 방법론은 실제 원전의 LBLOCA 최적계산의 불확실성 평가에 합리적이고 실제적으로 적용할 수 있음을 확인하였다.

ABSTRACT

A method of uncertainty evaluation associated with best-estimate (BE) calculation of large-break loss-of-coolant accident (LBLOCA) has been developed in KINS (Korea Institute of Nuclear Safety). The present method has a basic structure similar to the CSAU (Code Scalability Applicability and Uncertainty) method of USNRC(United States Nuclear Regulatory Commission). The method has been revised based on the recent progresses. It adopts the most advanced thermal-hydraulic code, RELAP5/MOD3.3, as a frozen code, implements the nonparametric statistic method with Wilk's formula instead of the response surface method with Monte Carlo simulation, and expands the number of uncertain parameters treated in statistical way. Through the present method, the primary safety parameter such as peak cladding temperature (PCT) during LBLOCA can be obtained at the 95 percentile probabilistic limit at 95 percentile confidence level by 59 code runs for any set of the parameters. To assure the validity and applicability of the method, it is applied to the LOFT (Loss-of-Fluid Test) L2-5 large break loss-of-coolant experiment. The result from the L2-5 prediction shows the method can be reasonably and practically applied to the uncertainty evaluation of BE calculation of LBLOCA in real nuclear power plant.

I. INTRODUCTION

최근 국내에서 승인된 바 있는 비상노심냉각계통 성능의 최적평가방법론 [1]은 가압경수로의 가상 대형 냉각재상실사고(Large Break Loss-of-Coolant Accident, LBLOCA)에 적용되어 왔던 기존의 보수적 평가방법을 실제적 평가방법으로 대체하기 위한 것이었다. 이 방법론은 전력산업에 가동 원전의 출력 증강 등에 있어 많은 이득을 가져다 줄 것으로 기대되고 있다 [2].

최적계산에 관련된 불확실성은 USNRC(US Nuclear Regulatory Commission)의 CSAU (Code Scalability, Applicability and Uncertainty) 방법론[3]이 제시된 이후에도 최적계산코드 자체뿐만 아니라 오랜 기간동안

주요한 현안의 하나였다. 신뢰성 있는 불확실성 평가 결과를 얻기 위해 다양한 불확실성의 근원을 고려해야 한다는 점, 확률론적 및 통계학적으로 실제적인 방법이 제시되어야 한다는 점, 방대한 양의 계산, 등등이 그 예이다 [4]. 그러나 이 분야의 기술의 발달에 따라 이러한 어려운 문제들은 부분적으로 해결되고 있다 [5].

본 논문은 가압경수로 LBLOCA의 최적계산 및 불확실성 평가에 대한 규제 입장을 제시하는 한국원자력안전기술원의 실제적 평가방법 (KINS Realistic Evaluation Model, KINS-REM)을 기술하고, KINS-REM의 적용성을 논의하는 데 목적을 두고 있다. KINS의 방법론은 본래 1991 년에 CSAU에 근거를 두고 개발되어 고리 3,4 호기의 안전 심사를 보조하기 위한 독립적 규제검증계산에 사용된 바 있다 [6]. 최근의 최적계산방법론 기술의 발달에 따르면 KINS 방법론의 개선이 필요하다는 사실이 제시되었다. 주된 개선 사항은 사용되는 최적계산 코드의 최신화, 불확실성 기여 인자의 확장, 확률론적 통계학적으로 신뢰성있고 보다 실제적인 방법의 도입 등이었다. 개선된 방법에서는 최신의 최적계산 코드로서 RELAP5/MOD3.3 [7] 코드을 채택하였고, 최근의 기술 발달을 반영하여 비모수통계학 방법 [8]을 사용하도록 하였다.

KINS-REM의 타당성 및 적용성을 보증하기 위해서, Loss-of-Fluid-Test (LOFT) 실험장치에 수행되었던 L2-5 대형파단 실험[9]을 묘사하고 불확실성을 평가하는 계산을 수행하였다. 이 실험 장치는 핵연료를 사용하는 유일한 종합효과실험(Intergal Effect Test, IET)으로서 이 실험데이터와의 비교를 통해서 코드에 포함된 대부분의 중요 현상 및 중요 열수력 모델을 평가할 수 있다. 또한 스케일 효과를 제외하면 L2-5 실험의 예측에 관계된 불확실성과 유사한 수준의 불확실성이 실제발전소의 LBLOCA 최적계산에서 기대될 수 있다. 따라서 이 실험의 평가는 코드 및 사용 방법론의 타당성을 평가하는 정량적인 척도가 될 수 있다. 같은 맥락에서 L2-5 실험은 OECD/NEA 에 의해 최적계산방법론에 관한 국제공동연구 (BEMUSE)의 표준 문제로 선정된 바 있다 [10].

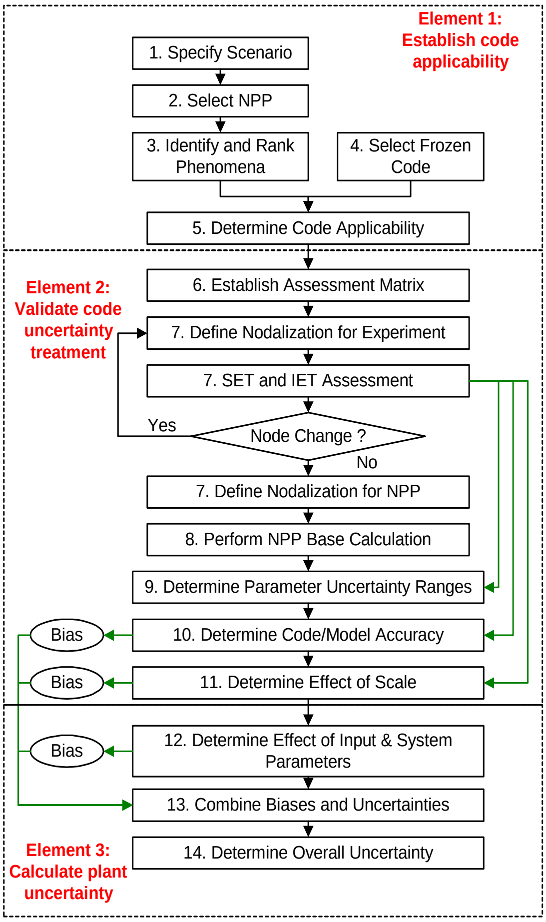

그림 1. KINS-REM 의 개략도

II. KINS 방법론

기본 구조

KINS의 불확실성 평가방법은 당초 CSAU 방법과 동일한 방향으로 개발되었다 [6]. CSAU 방법의 현상 확인 및 순위화, 평가계산에 의한 변수 불확실성 범위를 결정하는 방법, 개별 불확실성 인자들을 결합하고 통계적으로 전파시켜 최고피복재 온도 (Peak Clad Temperature, PCT)상의 코드 불확실성을 평가하는 방법 등의 상세 단계들은 대부분 KINS 방법에서도 구현되어 있었다. 또한 KINS 방법론은 코드 불확실성과 미고려된 다양한 근원으로부터 야기되는 Bias들을 통계적인 방법으로 결합시켜 전체계산 불확실성 (Overall Calculational Uncertainty, OCU)를 결정하는 CSAU 방법과 유사한 구조를 갖는다.

개선된 방법

개선된 KINS 방법은 그림 1 에 도시되어 있다. 방법론의 기본 구조는 이전 방법의 구조와 동일하다. 이전 방법과 비교하여 크게 달라진 점은 단계 4 및 13 에 있다. 각 단계에 대한 설명은 다음에 제시한다.

단계 1: 사고 진행의 세부 단계를 포함하여 사고 시나리오를 정한다.

단계 2: 주요 계통과 부품을 포함하여 해석하고자

하는 원자력발전소를 결정한다.

단계 3: 주요 부품 및 사고 세부 단계에 대해서 PCT와 같은 주안전기준 (Primary Safety Criteria, PSC)에 영향을 주는 중요한 현상들을 지정한다. 지정된 현상들은 실험데이터를 조사하거나, 코드 계산을 하거나, 전문가의 의견을 참조하거나, 기타 문헌을 통해서 PCT에 미치는 영향에 따라 우선순위를 정한다. 또한 다음 단계에서 고려해야 할 고 순위 현상을 정한다.

단계 4: 열수력 계통해석 확정 코드(frozen code)를 선정한다. 본 방법론에서는 RELAP5/MOD3.3 을 확정 코드로 간주하고 있으며, 이것은 이전 방법에서 RELAP5/MOD2 를 사용하던 것과 차이를 갖는다.

단계 5: 정해진 발전소의 사고 시나리오 및 고순위 중요 현상에 대해 확정 코드의 능력을 결정한다. 기본 지배방정식 및 특정 현상에 고유한 모델과 상관식을 평가한다. 이용가능한 코드 평가 데이터베이스 및 코드 제한점을 조사한다. 중요한 코드 모델 및 상관식을 취급가능한 적합 변수 (Relevant parameter)로 표현한다 (p_R). 특정 현상을 예측하는 데 따르는 불확실성을 결정하는 방법을 정한다. 적합변수들을 다음 네가지 그룹으로 분류하는 방법을 제안한다: 통계적으로 처리할 변수 (p_S), 보수적으로 제한치로 가정할 변수 (p_L), 적합한 모델이 부재하여 바이어스로 표현될 변수 (p_B), 및 보수성을 위하여 무시될 수 있는 현상 (P_i).

단계 6: 개별효과실험(Separate Effect Test, SET)과 종합효과실험을 포함한 이용가능한 실험 데이터베이스를 조사하여 중요 현상들을 가장 잘 묘사하고 있는 실험들을 선정한다. 이 실험들은 계산 Nodalization 선정 (단계 7), 변수 범위 결정 (단계 9) 및 스케일 효과 평가 (단계 11) 등을 보조하는데 사용된다.

단계 7: 중요 현상을 가장 잘 나타낼 수 있는 Nodalization 을 이용하여 코드 평가 계산을 수행한다. 계산 Nodalization 및 그 선정 근거는 원자력발전소 모델링에도 일관되게 사용된다. SET/IET에 대한 코드 평가 결과는 변수 범위 결정 (단계 9), 코드/모델 정확도 결정 (단계 10), 및 스케일 효과 평가 (단계 11)에 이용된다.

단계 8: 발전소의 최적 거동을 묘사하는 발전소 기본 계산을 수행하여 PCT의 기준 값을 정한다 (PCT_{BASE}). 계산에서는 단계 7 에서 논의된 Nodalization 을 사용한다. 통계적 취급변수에 대해서는 코드의 default 값을 사용하며 보수적 취급변수에 대해서는 제한치를 사용한다.

단계 9: 계산과 실험데이터간의 비교를 통해 개별 통계취급변수의 불확실성 범위 및 이의 통계적 분포를 결정한다. Nodalization 에 따라 영향받지 않는 모델 및 상관식에 대해서는 코드 계산 없이 직접 비교를 통해 범위를 구할 수 있다.

단계 10: 단계 7 에서 수행된 SET/IET 평가는 계산치와 실험데이터 간의 차이, 즉 바이어스(B_{SET}, B_{IET}) 와 분산을 보일 수 있는데 이것들은 여러가지 불확실성의 근원에서 유래된 것이다. 선정된 SET에 대한 코드 평가에서 정해진 대부분의 바이어스들은 이미 변수 범위 결정 (단계 9)에 반영되어 있다. 단계 9 에 포함되지 않았던 바이어스들은 다른 방법, 말하자면 SET 바이어스에 등가하는 PCT 영향 등으로 고려한다. 이 바이어스와 분산을 결정하여 단계 13 에서 PCT_{final} 을 결정할 때 포함시킨다.

단계 11: 코드 능력 평가 (단계 5) 및 SET/IET 평가 (단계 7) 로부터, 코드의 스케일 능력에 대해 평가한다. 코드 평가는 발전소 전체 스케일 까지를 포함하는 다양한 스케일의 실험을 포괄해야 한다. 스케일 왜곡이 있는 현상이나 모델에 대해서는 바이어스(B_{SCALE}) 와 분산을 고려한다.

단계 12: 주요 현상 선정 및 우선순위화 과정에서 정해진 변수들을 제외한 발전소 운전 변수들의 불확실성은 고려되지 않았으므로 이들의 효과를 고려해야 한다. 이들의 효과가 중요하다면 추가적인 바이어스와 분산을 고려한다. (B_{PLANT}).

단계 13: 개별 모델과 변수로부터 유래되는 불확실성을 95% 확률수준 및 95%신뢰도 수준에서의 PCT로 통계적으로 결합한다 ($PCT_{95/95}$). 여기에 코드 제한점, 스케일 효과, 발전소 변수 영향 등으로부터 유래되는 바이어스들과 분산은 선형적으로 더하여 PCT_{final} 을 결정한다.

$$PCT_{final} = PCT_{95/95} + B_{SCALE} + B_{SET} + B_{IET} + B_{PLANT}$$

기존 방법에서, $PCT_{95/95}$ 는 샘플링된 코드 계산결과로부터 생산한 반응도표면방정식에 대하여 방대한 수의 Monte Carlo 모사를 통하여 결정되었으며 이는 CSAU 방법과 유사하였다.

개선된 방법에서는 95% 확률수준 및 95%신뢰도 수준에서의 PCT는 반응도표면방정식 없이 코드 계산 결과로부터 직접 결정된다. 비모수 통계학 (Non-parametric Statistics) [8]에 의하면, 일방 상한치를 평가하는데 필요한 최소 코드 계산 회수 (n) 은 Wilks 공식에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$1 - (p/100)^n \le (q/100)$$

여기서 p 및 q 는 확률수준 및 신뢰도 수준을 의미한다. 이 공식에 따르면 59 회의 계산은 계산된 최대 PCT를 95% 신뢰도 수준에서의 95% 확률 상한치로 간주할 수 있음을 보증한다 ($PCT_{95/95}$). 여기서 59 개의 표본은 P_S 변수들의 불확실성 범위로부터 임의추출방법에 의하여 추출된다. 그리고 매 세트에 대한 계산이 59 회 수행되고 이중 최대 PCT가 $PCT_{95/95}$ 로 정해진다. 이 방법은 95%/95% 수준에서는 임의의 수의 변수에 대해서도 계산 회수는 항상 59 회로 제한한다. 기존 방법에서는, 불확실설 변수가 증가함에 따라 코드 계산의 횟수가 기하급수적으로 증가하였던 단점을 극복한 것이다. 여기서 구해지는 PCT_{final} 은 최적계산의 모든불확실성을 고려한 것으로서 허용기준 [2]과 비교되는 값이다. 비록 허용기준에서는 전체계산불확실성 (OCU) 자체값을 요구하지는 않지만 필요하다면 다음과 같이 표시될 수 있다:

$$\Delta PCT_{final} \cong PCT_{final} - PCT_{BASE}$$

단계 14: 최종적으로, 예상하지 못했던 제한사항을 경우별로 고려하기 위해 추가적인 바이어스를 PCT_{final} 에 고려한다.

III. L2-5 실험 묘사계산에의 적용

앞서 설명한 개선된 방법론의 타당성과 적용성을 확인하기 위해 LOFT L2-5 실험의 묘사계산에 적용하였다. 본 방법은 원자력발전소의 가상사고에 적용할 수 있도록 고안되어 있으므로, LOFT L2-5 묘사계산에서는 몇 개의 단계는 적용되지 않을 수도 있다. 다음은 단계별 적용 내용 및 결과를 설명한다.

단계 1 및 2: LOFT 실험장치의 L2-5 실험이 정해졌다. 시나리오는 방출단계, 재충수/재관수 단계로 구별된다. 실험장치 및 실험에 대한 설명이 충분히 제공되어 있다.

단계 3: CSAU를 포함한 이전의 작업 에서 정해진 주요 현상을 이용한다. 본 방법론은 불확실성 변수의 개수에 제한을 두지 않으므로, 우선순위화 과정을 크게 강조하지 않는다. 발전소의 LBLOCA와 L2-5 실험간에는 몇가지 차이가 존재하기 때문에 이전의 개발된 PIRT (Phenomena Identification and Ranking Table) 에 대해 몇가지 수정이 필요하다. 표 1 에는 결과적으로 정해진, 주요 부품에서 다루어 져야 하는 주요 현상이 요약되어 있다.

단계 4: RELAP5/MOD3.3 코드가 확정코드로 정해졌다. 모든 코드 서류는 이용가능하다.

단계 5: RELAP5/MOD3.3 코드의 능력은 잘 알려져 있다. 코드는 6-방정식 비평형 비균일 해석 모델로서, 불응축성가스 거동, 상분리, 계면 열 및 질량전달을 계산하는 능력을 가지고 있다. RELAP5/MOD3.3 코드는 비록 1 차원 방식이지만 교차류 junction을 이용하여 다차원적인 효과를 부분적으로 묘사할 수 있다.
이 표에서 정의된 주요 현상과 관련된 RELAP5 코드의 모델 혹은 변수를 도출하였다. 그 결과는 표 1 에 제시되어 있다. 예를 들어 “핵연료 축적에너지”라는 현상은 핵연료봉 간극 전도도 (입력 혹은 모델), 출력첨두계수(입력), Dittus Boelter 열전달 (모델), 핵연료 열전도도 (입력), 그리고 노심 출력 (입력) 등으로 나타낼 수 있다.

표 1. 중요 현상과 관련된 RELAP5 모델 및 변수

현상 (부품)	모델/변수
축적에너지 (연료봉)	간극전도도, 첨두계수, Dittus Boelter 열전달, 핵연료열전도도, 노심출력
피복재산화 (연료봉)	Cathcart-Powell 모델
노심붕괴열 (연료봉)	ANS 붕괴열모델
핵연료봉 간극전도도 (연료봉)	간극전도도 모델, 파열온도/변형률
파단유동 (파단부)	임계유량모델 (C_D)
펌프 이상유동성능저하 (RCP)	성능저하곡선입력자료
증기 응축 (저온관, 강수부)	ECC Bypass로 대체
액체견인 및 이탈(entrainment /deentrainment) (강수부, 상부플레넘, 고온관)	ECC Bypass로 대체 액적분율 (상부플레넘, 고온관)
역류 (Counter-current flow) (강수부)	ECC Bypass로 대체
고온벽 효과 (강수부, 하부플레넘)	ECC Bypass로 대체
휩쓸림(Sweep-out) (강수부, 하부플레넘)	ECC Bypass로 대체
다차원 효과 (강수부, 노심)	강수부: ECC Bypass로 대체, 노심: 무시함
노심열전달 (임계열속, 재침수, 막비등, 핵비등) (노심)	Greeneveld 임계열속, Bromley 막비등, T_{min}, Zuber 임계열속, Chen 핵비등, Weber 수
노심 기포 생성	노심열전달에 포괄
불응축성가스 효과 (축압기, 저온관)	축압기 온도 압력
스팀바인딩(Steam binding) (증기발생기)	Dittus Boelter열전달상관식, 액적직경.
격납건물 압력 (격납건물)	고려하지 않음 (경계조건으로 취급)

표 1에 있는 대부분의 변수들의 불확실성은 코드 모델과 실험데이터간의 직접 비교에 의해서 결정될 수 있다. 응축, 고온벽 효과 등의 강수부 현상은 CSAU 방법에서와 같이 하나의 종합적인 현상, 즉 비상노심냉각수 우회 (ECCS Bypass)라는 현상으로 나타낼 수 있다. 따라서 ECCS Bypass를 예측하는 데 관련된 불확실성을 평가하는 것은 개별 변수의 불확실성이 결합된 것을 포괄할 수 있을 것이다. 이러한 변환은 고유한 ECCS Bypass 실험의 평가와 추가적인 SET 바이어스 혹은 이에 상당하는 등가 PCT 영향을 결정할 것을 요구할 수 있다. L2-5 실험 묘사계산에 있어서, 몇가지 변수에 대한 불확실성은 고려할 필요가 없다. 핵연료의 출력 분포는 실험 측정의 불확실성을 고려하여 보수적인 방법으로 모델하였으므로 출력 첨두계수에 대한 불확실성은 다시 고려할 필요가 없다. 격납건물 압력에 해당하는 방출억제탱크 (Blowdow Suppression Tank, BST)의 압력은 측정의 불확실도를 고려하여 실험데이터를 경계조건으로 부과하였다. 실험에서 피복재 산화의 정도는 심각하지 않았으므로 이의 불확실성은 추가적으로 고려하지 않았다. 마찬가지로 "노심에서의 다차원 유동"현상도 L2-5 실험에서는 심각하지 않았으므로 [9] 무시하였다. 피복재 파열 온도 및 변형률에 대한 불확실성도 같은 이유로 무시하였다. 결과로서 전체 23 개 적합변수 중 불확실성을 통계적으로 처리할 17 개의 적합 변수가 선정되었고, 1 개의 SET 바이어스를 고려하도록 하였고, 5 개 변수는 보수적인 근거에서 불확실성을 고려하지 않도록 하였다. 이 내용은 표 2 에 요약되어 있다.

단계 6: 표 2 에서 도출된 현상에 적합한 RELAP5 코드 모델 및 변수를 평가하기 위한 평가 매트릭스를 작성하였다. 본 연구는 L2-5 실험의 묘사계산에 초점을 두고 있으므로 추가적인 종합효과실험은 요구되지 않는다. 노심 열전달에 관련되는 SET는 RELAP5 코드 서류에 대부분 제시되어 있다. Marviken 임계유량 실험도 같은 문헌에서 이용가능하다. 2 상유동 펌프 수두/토크 저하배수에 대해서는 LOFT 실험데이터를 이용할 수 있다. ECCS Bypass에 대해서는 L2-5 실험결과 그 자체가 이용될 수 있다.

단계 7: LOFT 실험장치의 Nodalization을 정하기 위해서 문헌 [7]의 LOFT 실험 평가 및 같은 문헌에 제시된 Marviken 실험 평가에 기술된 내용을 참고하였다.

표 2. 적합변수/상관식과 데이터베이스 및 변수 범위/분포

모델/상관식 (방법)	데이터베이스	범위/분포
핵연료봉 간극전도도 (입력)	RELAP5 코드 서류	0.67~1.5 /N *(정규분포)
노심 붕괴열 (입력)	RELAP5 코드 서류	0.97~1.03 /N
노심출력 (입력)	L2-5 실험데이터	0.96~1.04 /N
출력첨두계수 (입력)	L2-5 실험데이터	고려하지 않음
파단부 방출계수, C_D (입력)	Marviken 실험서류	0.703~1.2 /N
펌프 이상유동 수두저하배수 (입력)	LOFT 실험 데이터	0.8~1.2 /U* (균등분포)
펌프 이상유동 토크저하배수 (입력)	LOFT 실험 데이터	0.8~1./U
Groeneveld임계열속Lookup Table (모델)	RELAP5 코드 서류	0.17~1.8 /N
Chen핵비등열전달상관식 (모델)	RELAP5 코드 서류	0.53~1.46 /N
Zuber임계열속 열전달상관식(모델)	RELAP5 코드 서류	0.38~1.62 /N
최소막비등온도(T_{min}) 상관식(모델)	RELAP5 코드 서류	0.54~1.46 /U
Dittus-Boelter (액체) 열전달상관식(모델)	RELAP5 코드 서류	0.606~1.39 /N
Dittus-Boelter (기체) 열전달상관식(모델)	RELAP5 코드 서류	0.606~1.39 /N
Bromley막비등열전달상관식(모델)	RELAP5 코드 서류	0.428~1.58 /N
Weber수 상관식 (모델)	NA	2.7~14 /U
핵연료열전도도 (입력)	MATPRO코드 서류	0.845~1.15 /U
축압기온도 (입력)	L2-5 실험데이터	296~308 K /U
고압안전주입수 온도 (입력)	L2-5 실험데이터	298~312 K /U
비상노심냉각수 우회	L2-5 실험데이터	바이어스
피복재 파열온도 (모델)	RELAP5 코드 서류	고려하지 않음
피복재 파열변형률 (모델)	RELAP5 코드 서류	고려하지 않음
격납건물 압력 (입력)	L2-5 실험 데이터	경계조건으로 취급
Cathcart-Powell 반응열 모델	RELAP5 코드 서류	고려하지 않음

ECCS Bypass 모델에 대한 평가를 위해서는 Nodalization이 정의되어야 한다. 특히 ECCS Bypass는 강수부의 Noding과 상당한 관련을 갖는데 L2-5 실험에 대한 Noding 연구를 통해서 현상을 가장 잘 예측하는 Nodalization 을 정한 바 있다 [6].
기타 모델들은 Nodalization 방법에 의존하지 않으므로 코드 계산이 요구되지 않는다. Groeneveld 임계열속 Look-up Table 등등의 모델에 대해서는 코드 모델 혹은 상관식을 적용가능한 실험데이터와 직접 비교를 수행하였다. 펌프 이상유동 수두저하배수에 대한 RELAP5 입력 자료는 적용가능한 실험데이터와 비교되었다.

단계 8: L2-5 실험에 대한 기본 계산을 수행하였다. LOFT 실험장치에 대한 Noding은 그림 2 에 제시한 바와 같다. 143 개의 수력학적 체적, 165 개의 junction이 사용되었다. 원자로 노심 및 강수부는 이중 유로 모델링을 이용하였다. 추후 통계적으로 불확실성을 처리하는 모델 및 변수에 대해서는 공칭값 (1.0)이 곱하여 계산하였고 축방향 출력분포와 같은 몇가지 변수는 앞서 언급한 바와 같이 보수적인 방법으로 모델링하였다. 그림 3 은 피복재 온도 거동의 비교를 보여 준다. 현재의 계산은 방출단계에서부터 피복재 온도를 과대 예측하고 있음을 보이고 있다. 이를 개선하기 위해 Noding 방법 혹은 다른 모델의 개선이 요구된다. 다만 방법론의 타당성 및 적용성을 확인하는 현 단계에서는 현재의 결과를 그대로 이용하도록 한다. 따라서 PCT_{BASE}=1189.4 K로 결정되었다.

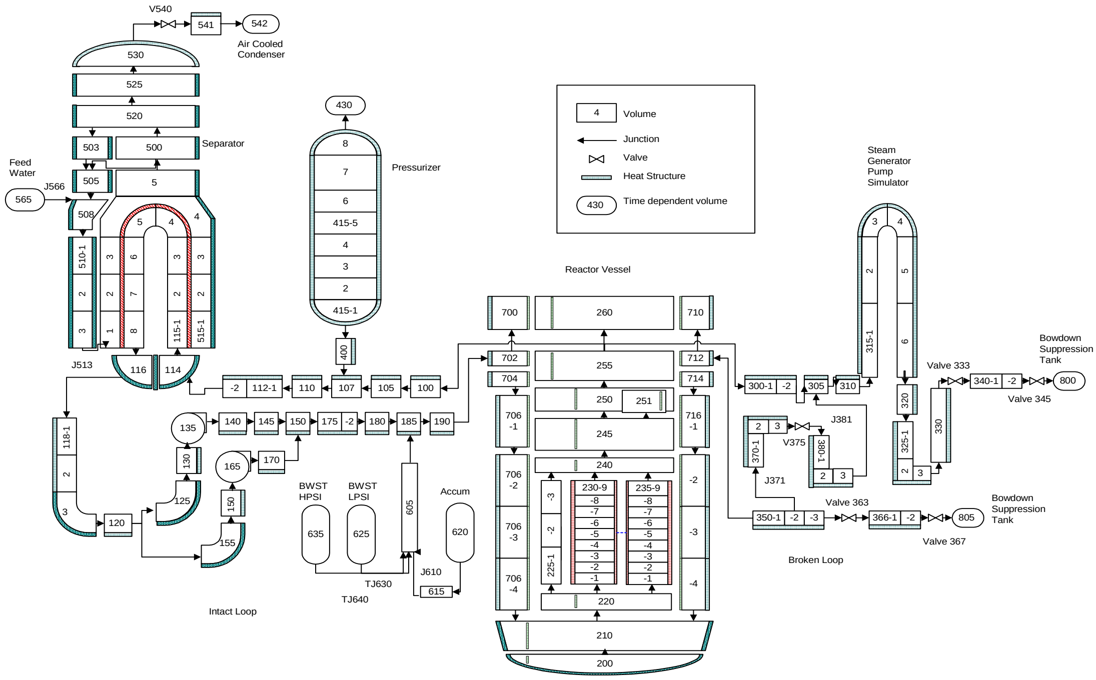

그림 2 LOFT L2-5 실험 묘사계산을 위한 RELAP5 Nodalization

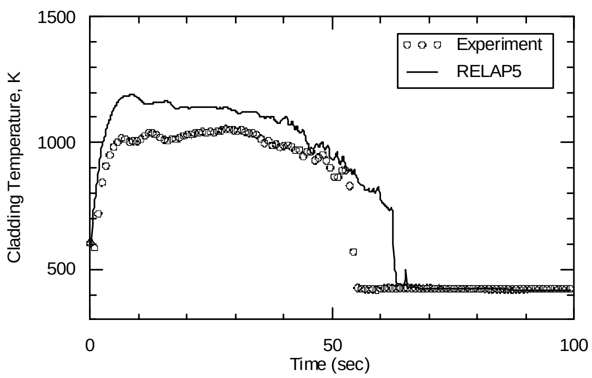

그림 3. L2-5 실험 평가 피복재 온도 비교

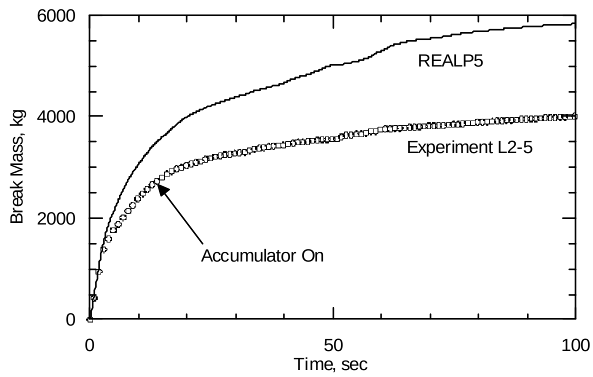

그림 4. L2-5 실험 평가 파단 저온관의 누적 파단유량 비교

그림 4 는 파단루프 저온관을 통과하는 파단 유량의 누적질량에 대한 비교를 보여주고 있다. 실험에서 축압기는 약 17 초에 작동하였고 이후 누적 파단 질량의 증가율이 둔화되고 있음을 보여준다. 반면 계산은 계속해서 높은 증가율을 보이고 있다. 이것은 과도한 ECCS Bypass를 예측하고 있음을 의미한다. 이 사항은 RELAP5 코드 서류에도 기술되어 있다. 이것은 ECC Bypass를 예측하는 코드 모델들의 결함이 PCT상의 이득을 야기시키는 부의 바이어스를 가짐을 의미한다. 따라서 현재의 연구에서는 보수적인 관점에서 이 바이어스 혹은 이에 상당하는 등가 PCT 영향을 무시하기로 한다. 향후 ECC Bypass의 불확실성 및 관련된 PCT 이득을 확인하기 위해서는 보다 정량적인 평가방법이 제시되어야 한다.

단계 9: RELAP5 코드 서류 및 L2-5 실험 서류에서 참조할 수 있는 실험데이터와 RELAP5 모델간의 비교를 통해서 적합변수들의 불확실성 범위를 결정하였다. 표 2 에는 비교 과정을 통해 얻어진 변수의 범위와 분포를 제시하였다. Weber 수의 범위는 실험데이터에서 확인할 수 없었으며 RELAP5 의 액체 견인을 최대화시켜 PCT에 미치는 효과를 크게 하는 방향으로 범위를 결정하였다. 적합 변수들의 불확실성 분포

형태는 비교 결과에 근거하여 정규분포 및 균등분포의 두가지로 정하였다. 각 변수의 불확실성 범위에 대한 보다 정확한 평가를 위해서는 실험과 코드에 대한 더 상세한 검토가 필요하며 그 결과 PCT에 미치는 영향은 감소될 것이다.

단계 10: SET 평가로부터 모든 바이어스들은 적합변수의 범위 결정과정에서 반영되었다. 또한 앞서 언급한 바와 같이 IET 바이어스는 추가되지 않는다.

단계 11: RELAP5 코드 모델의 스케일링 능력은 다양한 코드 평가를 통해서 입증된 바 있다. 따라서 스케일에 의한 바이어스는 고려하지 않는다.

단계 12: L2-5 실험 모사계산에서 실험의 초기조건 및 경계조건은 입력자료에 반영하였다. 초기 압력, 온도 등의 변수에 측정 오차가 있어도 그에 의한 영향은 크지 않을 것으로 보이며 현 단계에서는 고려하지 않는다.

단계 13: $PCT_{95/95}$를 결정하기 위해서 단계 9에서 결정된 17개 통계취급변수의 범위와 분포에 대해 임의 추출하여 59개 변수 세트를 생산하였다. 그림 5는 Dittus Boelter 강제대류열전달 상관식에 대한 평가에서 얻어진 불확실성 범위와 분포에 대해 임의 추출한 결과를 보여주고 있는데, 본래의 정규분포를 잘 구현하고 있음을 알 수 있다. 이 변수 세트는 59 개의 RELAP5 입력 자료에 반영된다. 입력 자료는 물론 동일한 기하학적 정보와 운전 정보를 가지며 영향을 받는 변수에 대해서는 불확실성이 반영되어 있어 계산시 이 값만큼 곱해지게 된다. 이 입력자료들을 이용한 59 회의 RELAP5 계산으로부터 59개의 피복재 온도거동이 얻어지고 최대 피복재온도가 선정된다. 그림 6은 59회 계산의 결과 및 기본계산 결과, 실험데이터, 최대치 등을 비교하여 보여준다. 이 결과로부터 $PCT_{95/95}$ = 1239.5 K를 확인할 수 있다.

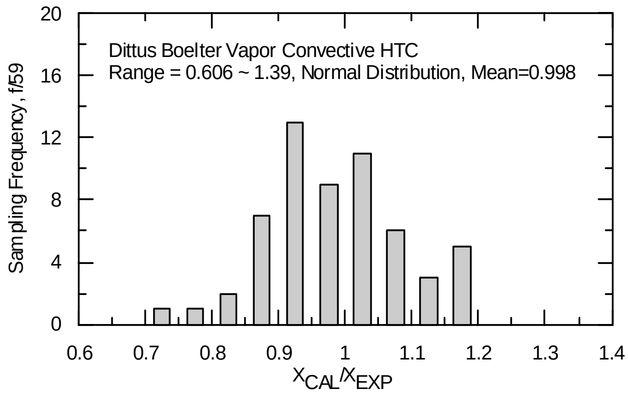

그림. 5 임의 추출의 예 (Dittus Boelter 증기 강제대류열전달 모델)

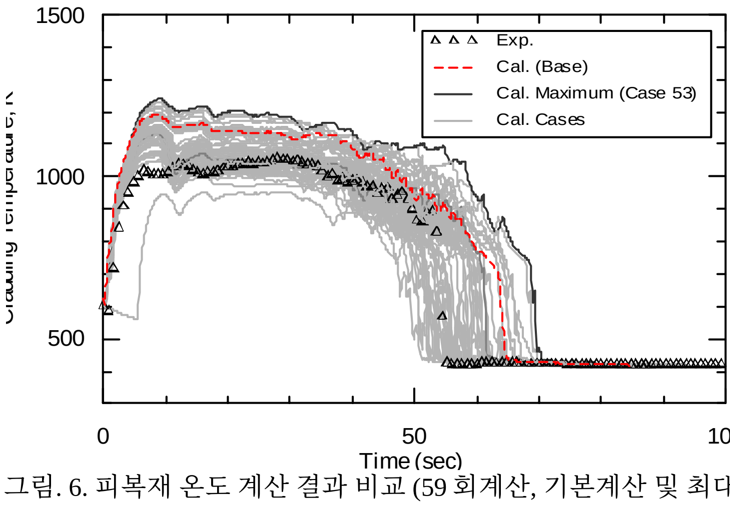

그림. 6. 피복재 온도 계산 결과 비교 (59 회계산, 기본계산 및 최대치)

단계 14: 추가되어야 할 바이어스는 없으므로 PCT_{final} = $PCT_{95/95}$ =1239.5 K 로 구해진다. 또한 추가되어야 할 여유도는 없다. 이 결과로부터 전체계산불확실성은 ΔPCT_{final} =40.1 K 임을 알 수 있다.

이 계산 결과에는 통계적으로 취급하는 17 개 적합변수들의 불확실성이 반영되어 있다. 그러나 기본계산의 결과 PCT는 실험보다 100K 이상 과대 평가하고 있어 결과적으로 PCT_{final} 은 실험 결과를 140 K이상 포괄한다. 또한 기본 계산 결과는 59 회 계산 결과들의 중간 보다 높은 쪽으로 위치하고 있어 변수들의 불확실성 보다 모델링에 의한 바이어스가 더 큰 영향을 보이고 있음을 알 수 있다. 이 사항은 차후 Noding연구를 통해 개선되어야 한다.

IV. 결 론

본 연구에서는 대형냉각재상실사고 최적계산의 불확실성 평가를 위한 KINS-REM을 개선하였고 L2-5 실험 묘사 계산에 적용하여 그 타당성과 적용성을 확인하였다. 현재의 개선된 방법은 CSAU 방법에 기초하여 3 개의 요소 및 14 개의 단계로 구성되었다. 방법론사의 확정 코드로서 최신의 RELAP5/MOD3.3 코드를 채택하였고, 불확실성 전파에서 고려되는 적합변수를 확장하고, 확률론 통계적 방법의 신뢰성을 높이고, 코드 계산 회수의 제한을 제거하기 위해 Wilks 공식에 기초한 비모수 통계적 방법을 적용하였다. LOFT L2-5 에 본 방법을 적용한 결과 각 단계에 적절한 정보가 제공된다면 대부분의 단계들은 합리적이고 체계적으로 사용되어 95% 신뢰도 수준에서 95% 확률 상한의 PCT를 얻을 수 있음을 보이고 있다. 이 결과는 개선된 KINS 방법이 가압경수로의 대형냉각재상실사고 최적계산의 불확실성 평가에 실제적이고 합리적으로 적용될 수 있음을 보인다.

참고문헌

1. KERPI, “KEPRI Realistic Evaluation Methodology”, TR-KHNP-0002, Daejon, Korea (2002)
2. USNRC, 10 CFR 50 Sec.50.46, “Acceptance criteria for emergency core cooling system for light water nuclear power plant”, USNRC, Washington D.C, USA, Sept. (1988)
3. Technical Program Group, “Quantifying Reactor Safety Margins; Application of Code Scaling, Applicability and Uncertainty Evaluation Methodology to a Large Break Loss of Coolant Accident”, NUREG/CR-5249, Washington D.C, USA, October (1989)
4. H. Glaeser et al., “GRS Analyses for CSNI Uncertainty Methods Study”, OECD/CSNI Workshop, Annapolis, USA, (1996)
5. H. Glasser, “Uncertainty Evaluation of Code Results, Application to SBLOCA”, Proceedings of OECD CSNI Workshop on Advanced Thermal-hydraulics and Neutronics Codes, Barcelona, Spain (2000)
6. 김효정 외, “한국형 비상노심냉각계통 평가방법 개발 및 응용”, KINS/GR-021, 한국원자력안전기술원, 대전, 한국 (1991).
7. Information System Lab., RELAP5/MOD3.3 Code Manual, NUREG/CR-5535, Rev.1, Washington D.C., USA, (2002)
8. W. J. Conover, Practical Nonparametric Statistics, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, (1980)
9. Adams, J.P., “Quick Look Report on Nuclear Experiment L2-5,” EGG-LOFT-5921, Idaho Falls, USA (1982)
10. NEA/CSNI, First Meeting of BEMUSE Programme –Phases 1 and 2, NEA/SEN/SIN/AMA (2003)27, OECD/NEA, Paris, France, Nov. (2003)