

'96 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

WCOBRA/TRAC을 이용한 고리 1호기 대형냉각재 상실사고 해석

이재훈, 최동수, 박병서, 조창석, 박진영
한국원전연료 주식회사

요 약

최근 웨스팅하우스사가 SECY-83-472에 근거하여 개발한 최적평가방법론인 WCOBRA/TRAC UPI EM을 이용하여 Appendix K, Superbounded, Nominal 계산을 고리 1호기에 대하여 수행하였다. 15%증기발생기 관막음을, 출력 침투 계수 2.35, 최대 선형 열출력 15.588kw/ft을 사용하여 계산한 결과 Appendix K 최대 피복재 온도는 1941°F로서 KAERI/Siemens가 RTSR 작성시 수행한 해석에 비하여 운전여유도가 증가한 것으로 나타났으며, 그 결과가 SECY 방법론에 합당함을 확인하였다.

1. 서 론

이전까지는 고리 1호기와 같은 UPI 발전소에 대한 대형 냉각재상실사고해석은 Upper Plenum으로 주입되는 저압안전주입수의 노심 내부에서의 거동을 고려하지 않는 Non-UPI 발전소 평가 모델을 이용하여 해석하여왔다. 그러나 1977년 USNRC는 이러한 해석 방법의 물리적 타당성 부족을 지적하여 UPI 발전소의 운전에 대하여 별점을 부과하였고, 저압안전주입수의 노심에서의 영향을 충분히 고려할 수 있는 별도의 UPI 발전소 평가모델을 개발할 것을 요구하였다. 이에 따라 미국 내 UPI 발전소에 연료를 공급하고 있던 웨스팅하우스와 엑슨사는 1979년부터 1983년 사이에 새로운 평가 모델을 개발하여 USNRC에 제출하였으나, 이 역시 노심에서의 저압안전주입수의 거동을 충분히 고려하지 못하였다는 이유로 거절된 바 있다.

그러던 중 1983년 USNRC는 SECY-83-472[1]를 발표하여 비상노심냉각계통 평가모델에 최적평가방법론을 사용할 수 있도록 하였고, 이를 근거로 웨스팅하우스는 COBRA/TRAC[2] 전산코드를 사용한 최적평가방법론을 개발하여 1988년 USNRC로부터 인허가를 획득하였다.

2. 웨스팅하우스 UPI 발전소 대형 냉각재상실사고 해석 방법론

웨스팅하우스의 2-Loop UPI 발전소 대형 냉각재상실사고 해석 방법론은 USNRC가 발표한 SECY-83-472에 근거하여 개발되었는데, 이 SECY-83-472는 기존의 비상노심 냉각계통 평가모델이 가지고 있는 보수성을 현재의 10 CFR 50 Appendix K 요구조건을 따르면서 체계적인 방법을 통하여 줄이는 것을 허용하고 있다.

이 방법론으로 대형 냉각재상실사고의 중요 현상을 모사할 때에는 최적평가모델을 사용할 수 있으나 이때 사용되는 최적평가 모델에 대해서는 그 불확실성이 체계적으로 정량화 되어야만 한다. 이 방법론에 의하면 사용자는 최적평가모델이나 최적전산코드를 사용하여 Nominal PCT(50% 신뢰도 PCT), 95% 신뢰도 PCT, 그리고 Appendix K 요구조건을 만족하는 PCT를 계산하여야 하며, 95% 신뢰도 PCT를 계산할 때에는 이 계산에 포함된 불확실성을 평가하여 정량화 하여야 한다.

이러한 계산 결과 Appendix K PCT가 95% 신뢰도에서 계산된 PCT보다 높고 규제 제한치 인 2200°F보다 낮으면 이 해석은 SECY-83-472에 비추어 타당한 것으로 평가된다.

SECY-83-472에 근거한 웨스팅하우스의 접근방법은 다음과 같다.

- 1) 최적전산코드로 WCOBRA/TRAC[3-5]이 사용되었다.
- 2) WCOBRA/TRAC 전산코드의 불확실성은 실험 Data와 비교하여 정량화 하였다.
- 3) Nominal 계산을 수행한다.
- 4) Superbounded 계산을 수행한다. Superbounded 계산은 95% 신뢰도 PCT 보다 보수적인 계산을 나타낸다.
- 5) Appendix K 요구 조건을 WCOBRA/TRAC에 반영하였으며 Appendix K 요구조건을 만족 하는 입력을 사용하였다.
- 6) 결과적으로 Westinghouse 2-Loop UPI 대형 냉각재상실사고 해석 방법론은 Nominal, Superbounded, 그리고 Appendix K 계산을 수행하게 된다. 해석결과 최종 PCT는 Appendix K PCT가 된다.

3. WCOBRA/TRAC 전산코드

고리 1호기 대형냉각재상실사고의 Blowdown Phase와 Reflood Phase 전 과정을 모사하기 위해 사용된 최적 열수력 전산코드는 WCOBRA/TRAC이다. WCOBRA/TRAC은 본래 Pacific Northwest Laboratory(PNL)가 TRAC-PD2에서 Vessel Module을 제거하고 그 대신에 COBRA-TF를 결합하여 Vessel 내부의 해석 능력을 향상시킨 COBRA/TRAC을 웨스팅하우스가 다시 인허가용으로 수정 보완한 코드이다.

COBRA/TRAC을 구성하고 있는 COBRA-TF는 이상유체(Two-phase Flow)에 대하여 기체, 액체 그리고 액적(Entrained Liquid Drop)의 3개 유동장의 3차원 현상을 Semi-implicit 수치해석 기법을 사용하여 모사 하는 전산코드이며, TRAC-PD2는 이상유체에 대하여 5 개의 지배방정식과 Drift Flux 모델을 사용하는 전산코드이다.

웨스팅하우스가 COBRA/TRAC을 인허가용으로 수정할 때 수정 또는 추가된 중요 모델은 다음과 같다.

- A point kinetics and decay heat model(LUCIFER Subroutine)
- Droplet heat transfer for bottom up reflood
- Drop size models for top down reflood
- Heat partitioning model for non-equilibrium dispersed flow film boiling
- Drop deposition model
- Accumulator nitrogen model
- Improved CHF correlation selection logic
- Improved reflood time step size selection method

4. WCOBRA/TRAC 불확실성 정량화

SECY-83-472에서 제시한 전산코드 불확실성은 전산코드를 실제 발전소에 적용할 때 발생하는 불확실성과 분리효과실험(Separate Effect Test) 및 종합효과실험(Integrated Effect Test)과의 평가계산에서 나타나는 불확실성으로 분류할 수 있다. 웨스팅하우스는 SECY-83-472에서 제시한 방법론에 따라 불확실성을 정량화 하였으며, 실제 발전소 적용에서 나타나는 일부 모델의 불확실성은 실험 데이터와 직접적인 비교/평가가 불가능하기 때문에 민감도분석을 통하여 정량화 하였다.

WCOBRA/TRAC의 불확실성은 다음 식으로 표시될 수 있다.

$$PCT_{P \geq 95\%} = PCT_{PLANT} \pm Code\ Bias + 1.645 \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2}$$

여기서,

Code Bias : Obtained by comparing the code calculated temperatures to the average of temperatures measured from various single effects and integral effects tests

δ_1 : Standard deviation of the code bias

δ_2 : Uncertainty in the data for each of the experiments

δ_3 : Initial test condition uncertainty

δ_4 : Test modeling uncertainty

WCOBRA/TRAC의 불확실성은 Blowdown Phase와 Reflood Phase에 대하여 따로이 정량화 되었는데, Blowdown Phase의 경우 Code Bias와 불확실성의 합은 260.5 °F 이고 Reflood Phase의 경우 그 합은 175 °F 이다.

5. 고리 1호기 WCOBRA/TRAC Vessel Model

WCOBRA/TRAC Vessel은 Channel과 Gap으로 모델링되고 Channel은 다시 1개 또는 여러 개의 Cell로 이루어져 있는데, Channel은 수직방향의 유로를 모델링하기 위하여, Gap은 Channel과 Channel 사이의 수평 유로를 모델링하기 위하여 각 각 사용된다.

고리 1호기의 경우 Vessel은 48개 Channel, 95개의 Cell과 36개의 Gap으로 모델링되었다. 이 중에서 가장 중요한 부분인 노심은 그림1에 나타낸 바와 같이 4개의 Channel과 각 Channel별 5개의 Cell로 모델링하였는데, 4개의 Channel은 각 각 Hot Assembly Channel(Channel 12), Guide Tube Channel(Channel 11), Low Power Periphery Channel(Channel 13), Open Hole/Support Column Channel(Channel 10) 등이다.

Hot Assembly Channel은 UCP(Upper Core Plate)로부터의 유로 면적이 가장 작은 Assembly로서 고리 1호기의 경우 UCP위에 Mixer가 달린 Support Column이 있는 Assembly가 이에 해당한다. Guide Tube Channel은 Fuel Assembly중 Guide Tube를 가지고 있는 Assembly로서 정의되며, 고리 1호기의 경우에는 33개의 Assembly가 이에 속한다. Low Power Periphery Channel은 Fuel Assembly 중 Baffle과 접하는 Assembly를 말하는데, 고리 1호기의 경우 24개의 Assembly가 여기에 속하고, Open Hole/Support Column Channel은 UCP위에 Open Hole 또는 Support Column이 있는 Assembly로서 고리 1호기의 경우 63개의 Assembly가 여기에 해당한다.

Channel 7과 8은 Downcomer를, Channel 9는 노심 우회 유로를 나타낸다.

6. 해석방법

고리 1호기 대형 냉각재상실사고 해석은 웨스팅하우스 WCOBRA/TRAC SECY UPI EM을 이용하여 Nominal, Superbounded 그리고 Appendix K 계산을 수행하였다.

Nominal PCT 계산은 대부분의 주요 입력자료를 고리 1호기의 Nominal 값을 사용하여 수행하였으며, 이 때 사용된 모델들도 Cathcart-Pawel Metal-water Reaction[6], 1979년 Decay Heat 모델[7]과 같은 현실적인 모델들이다. 계산 결과는 그림 2와 같으며, Nominal PCT는 1587 °F였다.

Superbounded PCT 계산에 사용된 중요 입력자료는 출력이나 연료봉 초기온도 등에 불확실성이 포함된 Bounding Value들이며, Bounding Value를 사용하여도 95% 신뢰도를 보장할 수 없는 입력자료에 대해서는 민감도 분석을 수행하여 그 불확실성을 더해주는 접근방법을 사용하였다. 따라서 Superbounded PCT 계산은 95% 신뢰도 PCT 계산보다 더 보수적이라 할 수 있는데, 그 계산 결과는 그림 3과 같으며, Superbounded PCT는 Code Bias와 불확실성을 포함하여 1877°F였다.

Appendix K PCT 계산은 10 CFR 50 Appendix K가 요구하는 모델이나 제한조건을 사용하여 계산을 수행하였는데, 그 계산 결과는 그림 4에 나타나 있으며, 계산된 PCT는 1941°F 였다.

Nominal PCT, Superbounded PCT, 그리고 Appendix K PCT 계산에 사용된 중요 입력자료와 모델은 표1에 나타내었다.

7. 결 론

웨스팅하우스 SECY UPI 최적방법론을 이용하여 고리 1호기 대형냉각재 상실사고를 해석한 결과 KAERI/Siemens RTSR 결과와 비교하여 더 많은 운전여유도를 확보하였다. 표2에 나타나 있듯이 출력침투계수가 2.08에서 2.35로 증가되었음에도 불구하고 최대피복재온도는 2006.6°F보다 낮은 1941°F로 나타났다. 또한 1988년에 개정된 10 CFR 50[8]은 SECY 방법론의 Appendix K 계산을 필요로 하지 않는 완전한 최적평가방법론을 허용하고 있다. 고리 1호기 해석결과에 나타난 Nominal PCT와 Appendix K PCT를 비교해 볼 때 아직도 상당한 보수성을 가지고 있으며, 개정된 10 CFR 50에 따라 최적평가방법론을 개발한다면 더 많은 운전여유도를 확보 할 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. NRC Staff Report, "Emergency Core Cooling System Analysis Methods," USNRC-SECY-83-472, November 1983.
2. Thurwood, M. J., Kelly, J. M., Guidotti, T. E., Kohrt, R. J., Crowell, K. R., "COBRA/TRAC - A Thermal-Hydraulics Code for Transient Analysis of Nuclear Reactor Vessel and Primary coolant Systems: Equations and Constitutive Models," NUREG/CR-3046, PNL-4385 Vol. 1, R4, March 1983.
3. Hochreiter, L. E., Schwarz, W. R., Takeuchi, K., Tsai, C. K., and Young, M. Y., "Westinghouse Large-Break LOCA Best-Estimate Methodology," Volume 1: Model Description and Validation, WCAP-10924-P-A, Vol. 1, Rev. 1, and Addenda, December 1988.
4. Dederer, S. I., Hochreiter, L. E., Schwarz, W. R., Stucker, D. L., Tsai, C. K., and Young, M. Y., "Westinghouse Large-Break LOCA Best-Estimate Methodology," Volume 2: Application to Two-Loop PWRs Equipped with Upper Plenum Injection," WCAP-10924-P-A, Vol. 2, Rev. 2, and Addenda, December 1988.
5. Hochreiter, L. E., Tsai, C. K., Bajorek, S. M., Yeh, H. C., Dederer, S. I., Takeuchi, K., Andreychek, T. S., Ankney, R. D., "Westinghouse Large-Break LOCA Best-Estimate Methodology, Volume 2: Application to Two-Loop PWRs Equipped with Upper Plenum Injection, Addendum 3 : Upper Plenum Injection Model Improvement," WCAP-10924-P-A, Vol. 2, Rev. 2, and Addenda, December 1988.
6. Cathcart, J. J., et al., "Zirconium Metal-Water Oxidation Kinetics IV-Reaction Rate Studies," ORNL/NUREG-17, August 1977.

7. ANSI/ANS-5.1-1979, "Decay Heat Power in Light Water Reactors," August 29, 1979.
8. 10 CFR 50.46 and Appendix K of 10 CFR, Part 50, "Acceptance Criteria for ECCS for Light Water Cooled Nuclear Power Reactors," Federal Register, Volume 39, Number 3, January 1974, as amended in Federal Register, Volume 53, September 1988.

표1. 해석결과 비교

Parameter	Previous Result	SECY UPI Result
Core Power (MWt)	1758	1758
F_0	2.08	2.35
F_{DH}	1.50	1.55
PLHR(kW/ft)	13.714	15.513
SG Tube Plugging	15%	15%
Appendix K PCT(°F)	2007	1941
Superbounded PCT(°F)	N/A	1877
Nominal PCT(°F)	N/A	1587

표2. 고리 1호기 계산에 사용된 중요 모델 및 입력

Parameter	Nominal	Superbounded	Appendix K
F_0 and F_{DH}	Base load without uncertainties	Conservative estimate of the 95th Percentile	Technical Specification value
Peak Linear Heat Rate*	14.364 kW/ft	15.183 kW/ft	15.513 kW/ft
Core Power	100%	102%	102%
Fuel Average Temperature	Best Estimate without uncertainties	Best Estimate without uncertainties	Best Estimate with uncertainties on the hot rod
Decay Heat	ANS 1979 without uncertainties	ANS 1979 with uncertainties	ANS 1971. +20% uncertainty
Cladding Reaction	Cathcart-Pawel without uncertainties	Cathcart-Pawel with uncertainties	Baker-just
Rewet	allow rewet without uncertainties	allow rewet with uncertainties	no rewet in blowdown; rewet in reflood with uncertainties
Containment Pressure	Best Estimate	lower bound	lower bound

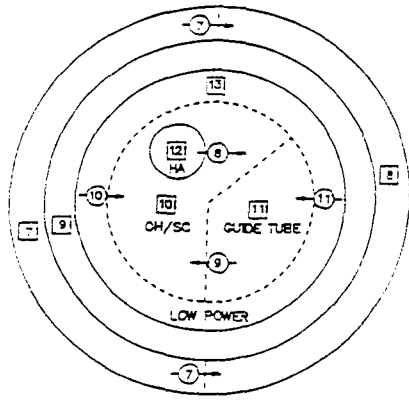


그림 1. Active Fuel Region

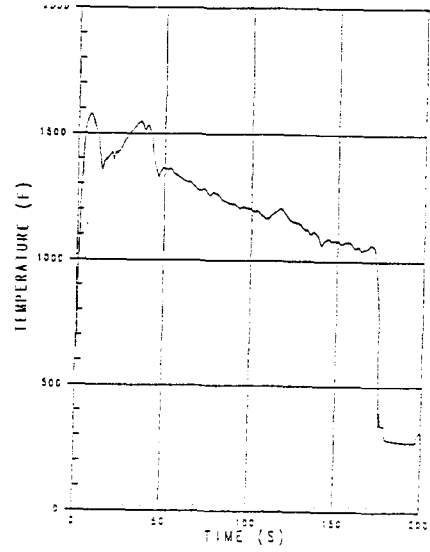


그림 2. Nominal PCT

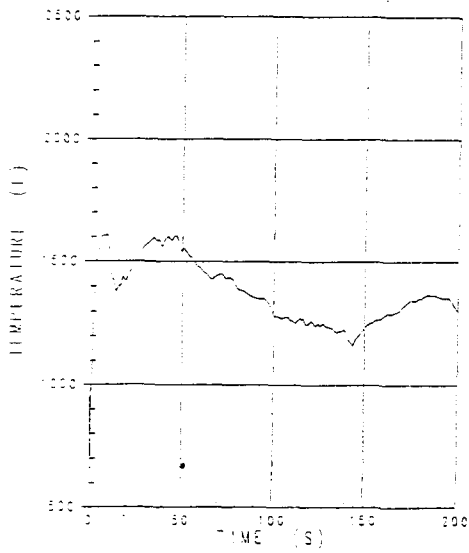


그림 3. Superbouded PCT

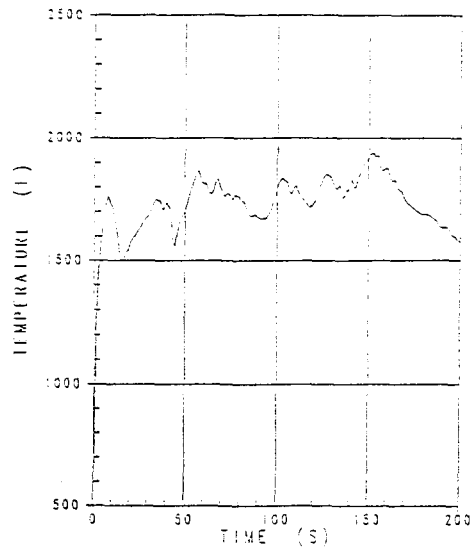


그림 4. Appendix K PCT