

‘97 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

TRAC-PF1을 이용한 FLECHT-SEASET 평가계산

이재훈, 최동수, 이걸우, 황태석, 박병서, 조창석

한국원전연료 주식회사
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

FLECHT-SEASET 실험을 이용하여 냉각재상실사고시 Reflood에 대한 TRAC-PF1 전산코드의 예측 능력을 평가하였다. FLECHT-SEASET 실험 장치는 3.657 m(12 ft) 높이 161개 전열 봉으로 이루어져 있으며, 다양한 재관수율, 계통압력, 초기 피복재온도, 재관수온도 노심내 반경방향 출력분포 등의 조건에 따라 수행된 실험이다. TRAC-PF1은 비균질 비평형 이상유동 열수력(Nonhomogeneous Non-equilibrium Two-Fluid Hydrodynamic) 모델을 사용하고 원자로 압력용기는 3차원으로 모델할 수 있는 최적전산코드로서, 이 평가 계산에는 HP Version이 사용되었다. 본 연구에서는 재관수율 변화에 따라 달라지는 연료봉 최대 피복재온도와 Quench 시간에 대한 TRAC-PF1 전산코드의 예측 능력을 중점적으로 평가하였다. 계산 결과 TRAC-PF1은 최대 피복재온도는 약 20-100°K 낮게, Quench 시간은 실험치와 비교하여 약 40-150초 정도 늦게 예측하는 것으로 나타났는데, 재관수율이 낮을수록 최대피복재 온도는 낮게, Quench 시간은 늦게 예측하는 경향을 보이고 있다. 또한 재관수율이 3 in/sec 이상에서 노심 상부가 일찍 Quenching 되는 것으로 계산되는데, 이는 노심상부 열전달 Regime의 부적절한 계산이 원인으로 보인다.

1. 서 론

FLECHT-SEASET[1] 실험은 LOCA시 Reflood 동안 노심 열수력 거동에 관한 실험 자료를 생산하기 위하여 수행된 실험으로, 재관수율, 계통압력, 초기 피복재온도, 재관수온도, 노심내 반경방향 출력분포 등의 조건에 따라 실험이 수행되었다.

대형냉각재 상실사고는 사고진행에 따라 주요현상별로 급격한 감압에 의한 노심 노출이 일어나는 Blowdown 기간, 비상노심냉각수에 의한 노심하부공간이 냉각수로 채워지는 Refill 기간, 그리고 비상노심냉각수에 의해 노심이 다시 냉각수로 채워져 연료봉의 가열이 중단되는 Reflood 기간으로 나뉘어진다. 이 중 Reflood 기간에는 저온 안전주입수와 고온의 연료봉사이의 급격한 반응에 의한 열수력 인자의 진동이 일어나는 것이 특징이다. Reflood 기간은 파단이 일어난 후 약 35초 정도에 노심하부공간이 채워지고 비상노심냉각수가 노심으로 들어오면서 시작된다. 노심으로 들어온 저온의 비상노심냉각수가 연료봉을 다시 적시면서 증기가 발생한다. 이 때 발생한 증기는 노심상부공간, 고온관, 증기발생기, 펌프를 거쳐 파단부위로 배출된다. 상대적으로 낮은 재관수율 때문에 노심 수위가 어느 정도 높아지기 전까지는 피복재 온도는 점진적으로 증가하는 경향을 보이다가 노심 수위가 충분히 증가하면 Quenching이 일어나 피복재 온도는 급격히 떨어져 Reflood 가 끝나게 된다.

1970년대 초반까지만 하여도 낮은 재관수율에서의 Reflood 실험자료가 충분하지 않아, 이 기간의 복잡한 열수력 현상에 대한 이해가 부족하였고[2], 이로 인해 0.0254 m/sec(1 in/sec) 이하의 재관수율에서는 증기에 의한 열전달만 고려하는 등 많은 보수성이 부과되어 왔다. 그후 FLECHT-SEASET, Semiscale[3], CCTF[4], SCTF[5] 등 Reflood 현상에 대한 많은 실험과 이에

관한 모델이 개발되어 대부분의 최적전산코드에 사용되고 있으며, 최적전산코드의 Reflood에 대한 평가 계산은 코드의 예측능력을 평가함에 있어 매우 중요하다. 따라서 Reflood 기간중 열수력 거동에 중요한 요소 중의 하나인 재관수율에 따른 TRAC-PF1의 예측능력을 평가하기 위하여, FLECHT-SEASET 실험 중 재관수율 변화에 관한 실험에 대한 평가 계산을 수행하였다. 평가 계산에 사용된 실험은 31805, 31203, 31302 이고 실험 조건은 표 1에 있다.

2. FLECHT-SEASET 실험

FLECHT-SEASET 실험 장치는 그림 1에 있는 것처럼 161개의 전열 봉, 16개의 안내관, 8개의 보조 봉으로 구성되어 있고, 실제 웨스팅하우스 17 X 17 핵연료 집합체와 유사한 재원으로 제작되었으며, 사각형 피치로 배열되어 있다. 전열봉 직경은 9.5 mm(0.374 in), 전열봉 피치는 12.6 mm(0.496 in), 안내관 직경은 12.29 mm(0.484 in) 이다. 삼각형으로 된 보조 봉은 PWR 핵연료 집합체의 출력 대 유동면적 비가 5% 이내로 유지하도록 유동면적을 줄여주는 역할을 하며 전열관 다발 유동면적은 155.48 cm² 이다. 실험영역은 Stainless Steel로 된 원통에 싸여져 있으며 아래쪽에는 하부공간과 위쪽에는 상부공간과 연결되어 있다. 노심 원통은 직경 193 mm(7.625 in) 이고 외부로 열손실을 방지하기 위하여 단열처리가 되어 있다. 전열관 다발은 상부에 볼트로 고정되어 있고 축방향 변형이 가능하도록 아래쪽은 고정시키지 않고 자유롭게 매달려 있는 형태로 되어 있다. 연료봉의 수평변형과 휨을 방지하기 위하여 연료봉은 520 mm(20.5 in) 간격으로 Spacer Grid로 고정되어 있다. 나선모양의 전열선 안쪽과 바깥쪽이 Boron-Nitride 단열재로 채워져 있는 전열봉은 Stainless Steel로 피복되어 있다.

피복재 온도측정을 위하여 K 형 열전쌍이 68개의 전열봉과 4개의 안내관에 설치되어 있으며 질량 균형과 기포를 결정을 위하여 실험영역 304.8mm(12 in) 간격으로 DP Cell이 설치되어 있다. 또한 고온의 증기로부터 습분을 분리시키기 위하여 증기 탐침이 실험영역 출구 쪽에 설치되어 있다.

3. TRAC-PF1 전산코드

TRAC-PF1[6] 전산코드는 USNRC 후원으로 미국 LANL(Los Alamos National Lab)에서 개발한 가압경수로 모사용 최적전산코드이다. 공식적으로 발표된 TRAC 초기 버전은 1977에 개발된 TRAC-P1으로 가압경수로 대형냉각재 상실사고 해석을 주 목적으로 하고 있다. TRAC-P1의 1차원 열수력 모델을 근간으로 하여 열전달 모델을 개선하여 1979년에 TRAC-P1A가 개발되었다. TRAC-P1A에 재관수 모델, 열전달 모델, 수치해법을 개선하여 TRAC-PD2[7]가 발표되었으며, 대형냉각재 상실사고 뿐만 아니라 소형냉각재 상실사고 해석에도 적용되었다. TRAC-PD2의 소형냉각재 상실사고 해석능력을 보완하고 1차원 열수력 모델에 Drift Flux 모델 대신 비균형 비균질 이상유동 모델을 사용하여 TRAC-PF1을 개발하게 되었다. 현재 공식적으로 발표된 최근 TRAC 전산코드는 TRAC-PF1/MOD1을 거쳐 TRAC-PF1/MOD2이다. 이 계산에 사용된 TRAC-PF1은 HP Workstation Version으로 CDC Version으로부터 변환한 것이다. 변환된 HP Version은 검증 매트릭스에 따라 성공적인 변환을 확인 하였다.

RELAP5나 COBRA-TF 같은 최적 전산코드와 비교하여 TRAC의 특징은 원자로 압력용기 내에서의 복잡한 다차원 유동을 모사할 수 있도록 원통좌표계를 사용한 3차원 모델을 할 수 있고, 원자력 발전소 부품의 특성에 따라 Vessel, Pipe, Accumulator, Tee, Pressurizer등 부품 별로 모델할 수 있도록 Module로 구성되어 있다는 점이다. 3차원 Vessel 부품은 하향통로, 노심하부공간 및 노심상부공간을 포함한 원자로 압력용기를 모두 모델할 수 있다.

원자력 발전소 및 실험장치의 열수력 모사를 위하여 TRAC-PF1은 기상 및 액상에 대하여 각각 질량, 에너지, 운동량 보존 방정식을 사용하는 비균형 비균질 열수력 지배방정식을 사용하고, 수치해법은 3차원 열수력 방정식은 Semi-Implicit Scheme[8]을 사용하고 1차원 열수력 방정식은 SETS(Stability Enhancing Two Step) Scheme[9]을 사용한다.

4. TRAC-PF1 FLECHT-SEASET 모델

FLECHT-SEASET 실험을 모사하기 위하여 그림 2에 나타내었듯이 Vessel, Pipe, Fill, 그리고 Break를 이용하여 4개의 부품으로 모델 하였다. Vessel은 노심과 노심하부공간, 그리고 상부공간을 모델하고 실험영역 입,출구쪽은 Pipe로 모델하였다. 경계조건은 입구 측에 실험자료로부터 재관수율, 온도, 압력을 이용해 Fill로 모델하고 출구 쪽은 출구 압력을 경계조건으로 Break로 모델하였다. Vessel 노심하부공간과 노심상부공간은 1개의 노드로 모델하고 노심은 15개의 노드로 모델하였다.

전열 봉은 실험 자료보고서[1]에 있는 연료 봉의 1.83 m(72 in) 높이에서 최대피복재 온도를 기준으로 초기화 후 각 실험에 대하여 Reflood 계산을 수행하였다. 전 실험에 걸쳐 작동되지 않은 2개의 전열 봉은 모델하지 않았다. 실험영역을 싸고 있는 원통과 8개의 보조봉(Filler Rod)에 대한 열전달은 고려하지 않았다. 축방향 출력분포는 실험 보고서에 있는 모양을 그대로 사용하였고 계산과 실험 위치가 일치하지 않는 지점에서는 내삽하여 사용하였다.

5. 해석 결과

재관수율 변화에 따른 TRAC-PF1 전산코드의 계산 능력 평가를 위하여 다른 조건은 일정하게 유지하고 재관수율 변화에 따른 연료봉 높이 1.22 m(4 ft), 1.829 m(6 ft), 2.438 m(8 ft)에서 피복재 온도, 최대피복재 온도 도달 시간, Quench 시간을 실험자료와 비교 평가 하였다.

재관수율 2.1cm/sec인 실험 31805의 연료봉 높이 1.22 m(4 ft), 1.829 m(6 ft), 2.438 m(8 ft)에서 피복재 온도를 그림 3, 4, 5에 나타내었다. 최대피복재온도는 약 20-100°K 정도 낮게 예측하고 Quench 시간은 약 50 -140초 정도 늦게 예측하고 있다. 대체적으로 노심아래보다는 위로 갈수록 최대피복재온도는 낮게 예측하고 Quench 시간과 최대피복재온도 도달 시간은 늦어 지는 경향을 보이고 있다. 재관수율이 31805보다 높은 31203(재관수율 3.84 cm/sec)에 대한 결과는 그림 6, 7, 8에 나타내었으며, 최대 피복재 온도는 1.22 m(4 ft) 높이에서 약 40°K 낮게 2.438 m(8 ft)에서 50°K 높게 예측하고 있다. Quench 시간은 50초 정도 늦게 예측하고 있고 최대 피복재온도 도달시간은 1.829 m(6 ft) 높이에서는 잘 예측하고 있으나 1.22 m(4 ft) 높이에서는 늦게, 2.438 m(8 ft) 높이에서는 빠르게 예측하고 있다. 전반적인 경향은 31805와 비슷하나 재관수율이 증가하면서 실험치를 좀 더 잘 예측하는 것으로 나타났다. 비교적 높은 재관수율(7.65cm/sec)인 31302에 대한 결과는 그림 9, 10, 11에 나타내었다. 최대 피복재 온도는 약 20-50°K 낮게 예측하고 최대 피복재 온도 도달 시간은 10-20초 정도 일찍 예측하고 있다. 그러나 Quench 시간은 1.22 m(4 ft)와 2.438 m(8 ft)에서는 낮은 재관수율때와 비슷하게 약 30-70초 정도 늦게 계산하고 있으나 2.438 m(8 ft)에서는 1.829 m(6 ft)보다 일찍 Quenching 되고 있다.

실험 31302의 경우 2.438 m(8 ft) 높이에서 Quenching이 일어나는 120초 근처의 열전달 Regime을 살펴보면 Film Boiling 에서 아주 짧은 기간에 Transition과 Nucleate Boiling을 거쳐 약 123초에서 Single Phase Liquid로 이어지고 있다. 이때 기포율은 약 0.95로 123초 부근에서 열전달 Regime이 Single Phase Liquid로 계산되는 것은 TRAC-PF1 열전달 모델의 문제점으로 판단된다.

6. 결론

냉각재 상실사고 해석에서 Reflood는 저온의 안전주입수와 고온 연료 봉사이의 급격한 반응으로 복잡한 열수력 현상이 발생하기 때문에 이를 규명하기 위한 많은 실험이 수행되었으며, 대부분의 최적전산코드가 Reflood를 모사하기 위하여 다양한 모델을 사용하기 때문에 이에 대한 평가 계산은 매우 중요하다. TRAC-PF1을 Reflood 실험인 FLECHT-SEASET 평가 계산을 수행한 결과 TRAC-PF1은 재관수율 변화에 대하여 실험자료에 비해 재관수율이 낮을수록 최대피복재 온도는 낮게 예측하고, 최대피복재온도 도달시간 및 Quench 시간은 늦게 예측하는 경향을 보이고 있으나 전반적으로 Reflood를 잘 모사하는 것으로 판단된다.

㉑1. Test Conditions for FLECHT-SEASET Tests

Test No.	Injection Rate(cm/sec)	Upper Plenum Pressure(MPa)	Injection Water Temperature(°C)
31302	7.65	0.28	52
31203	3.84	0.28	52
31805	2.1	0.28	51

참고 문헌

1. M. J. Loftusa and A. Tong, "FLECHT-SEASET Unblocked Bundle, Forced and Gravity Reflood Task Data Report," NUREG/CR-1532, June 1980.
2. USNRC, "Compendium of ECCS Research for Realistic LOCA Analysis," NUREG-1230, August, 1988
3. G. E. McCreery, G. G. Loomis and H. R. Brustle, "Thermal Hydraulic Analysis of the Semiscale Mod-1 Reflood Test Series(Gravity Feed Tests)," TREE-NUREG-1001, Idaho National Engineering Laboratory, January 1977.
4. Y. Murao et al., "Quick Look Report on Large Scale Reflood Test-2 CCTF Tests L1-2," JAERI Memo 8530, October 1979.
5. M. Sobajima et al., "Examination of Repeatability in Reflood Phenomena under Forced flooding in SCTF Core-1 Test," JAERI-M-83-028, 1983.
6. "TRAC-PF1 : An Advanced Best-Estimate Computer Program for Pressurized Water Reactor analysis," Los Alamos National Laboratory, NUREG/CR-3567, February 1984.
7. "TRAC-PD2, An Advanced Best-Estimate Computer Program for Pressurized Water Reactor Loss-of-Coolant Accident Analysis," Los Alamos National Laboratory, NUREG/CR-2054, April 1981.
8. D. R. Liles and W. H. Reed, "A Semi-Implicit Method for Two-Phase Fluid Dynamics," J. of Comp. Physics 26, 390-407, 1978.
9. J. H. Mahaffy, "A Stability-Enhancing Two-Step Method for Fluid Flow Calculation," J. of Comp. Physics 46, 329-341, 1982.

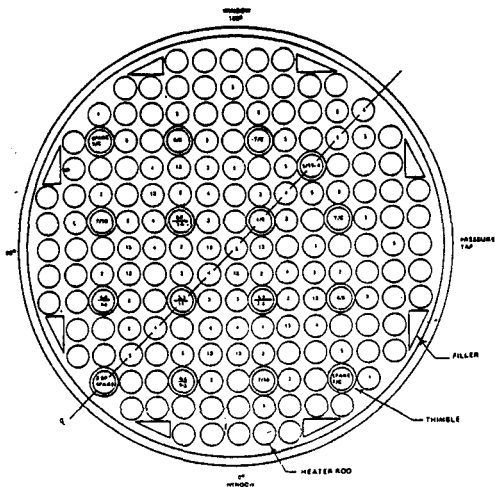


그림 1. FLECHT-SEASET Test Facility

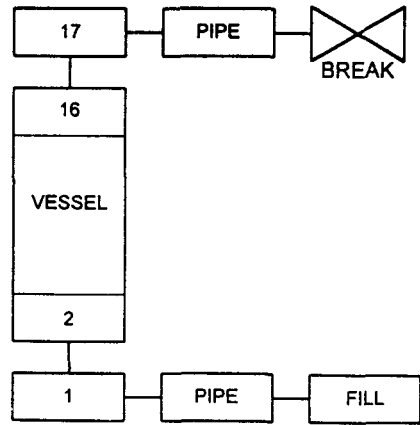


그림 2. TRAC-PF1 Nodalization

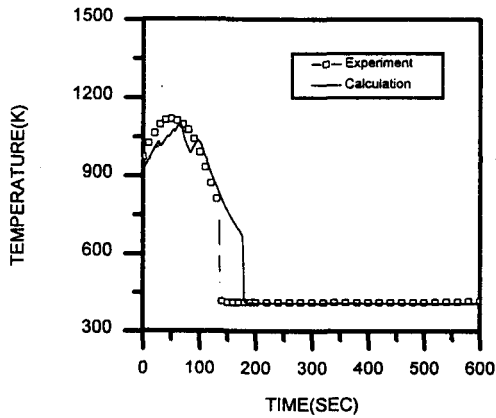


그림 3. Cladding Temperature at 4 ft Elevation, Test 31805

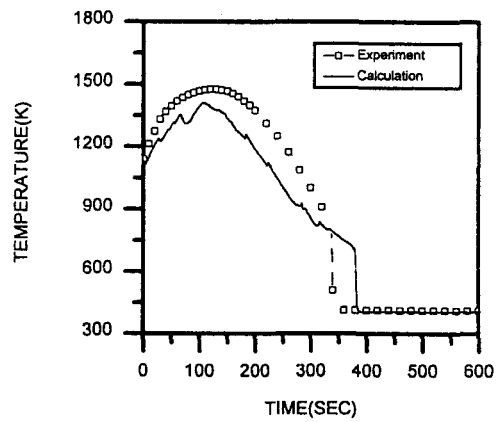


그림 4. Cladding Temperature at 6 ft Elevation, Test 31805

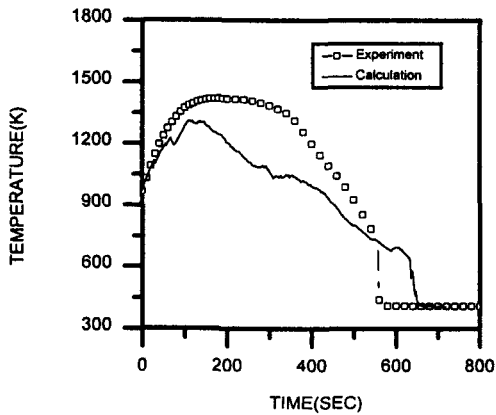


그림 5. Cladding Temperature at 8 ft Elevation, Test 31805

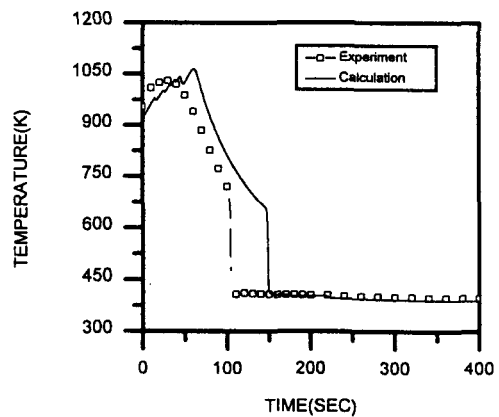


그림 6. Cladding Temperature at 4 ft Elevation, Test 31203

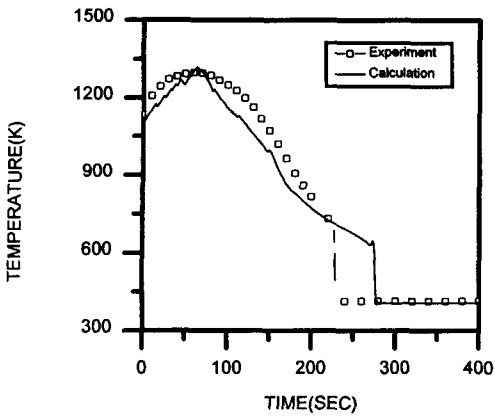


그림 7. Cladding Temperature at 6 ft Elevation, Test 31203

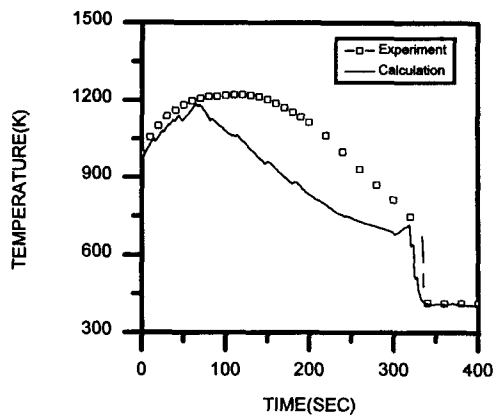


그림 8. Cladding Temperature at 8 ft Elevation, Test 31203

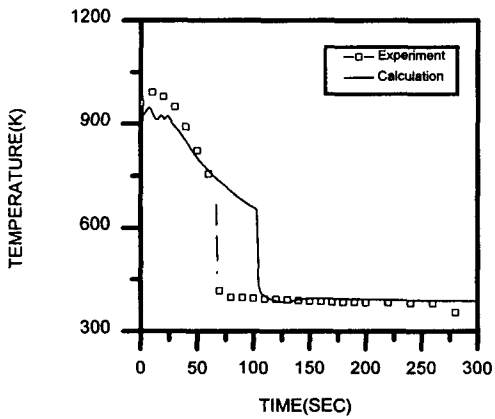


그림 9. Cladding Temperature at 4 ft Elevation, Test 31302

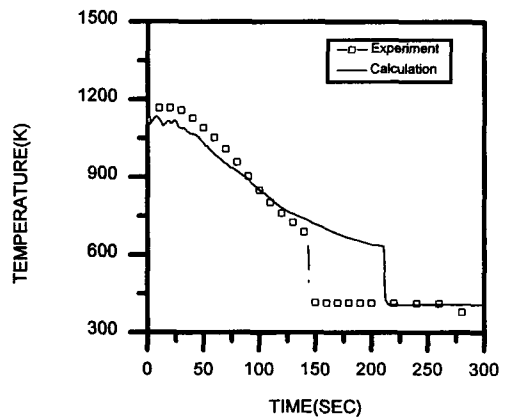


그림 10. Cladding Temperature at 6 ft Elevation, Test 31302

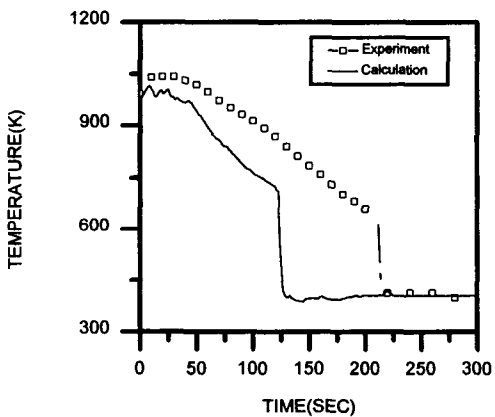


그림 11. Cladding Temperature at 8 ft Elevation, Test 31302