

PKL-IIB5 데이터를 이용한 RELAP5/MOD3.1/K 평가

Assessment of RELAP5/MOD3.1/K Using PKL-IIB5 Experimental Data

이상용

한국전력기술주식회사
대전광역시 유성구 덕진동 150

반창환

한전원자력연료주식회사
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

LOCA 시의 blowdown 완료 시점부터 재관수 기간에 걸쳐서, 노심을 포함한 전체 계통의 열수력 현상 연구를 목적으로 수행된 독일 SIEMENS KWU사의 PKL-IIB5 실험 데이터를 이용하여 RELAP5/MOD3.1/K 코드의 재관수 예측 능력을 평가하였다. RELAP5/MOD3.1의 재관수 모델을 개선한 RELAP5/MOD3.1/K 코드는 재관수 기간 중의 압력 및 유량, 수위 등의 전반적인 거동을 잘 예측하는 것으로 확인되었다. 그러나 원자로 상부 공간의 수위 및 증기 발생기를 통한 압력 강하 등의 비교 결과, RELAP5/MOD3.1/K 코드는 노심에서 원자로 상부 공간으로의 액적 동반을 과도 예측하고 이 과도 예측된 액적 동반은 steam binding을 심화시키는 것으로 나타났다. 결과적으로 피복재 온도는 실험보다 평균 58 K 높게 예측되었으며, RELAP5/MOD3.1/K 코드는 피복재 온도 관점에서 재관수 기간의 전체 계통 거동을 보수적으로 예측함을 확인하였다.

Abstract

Reflow prediction of RELAP5/MOD3.1/K, which modified the reflow model of RELAP5/MOD3.1, was assessed using the experimental data of PKL-IIB5 which was performed by SIEMENS KWU to study the overall system thermal hydraulic behaviors from the end of blowdown to the end of LBLOCA transient. System hydraulic behaviors such as pressure, flow rate and liquid level were quite well predicted. But it was found that RELAP5/MOD3.1/K had a tendency to overpredict the steam binding phenomena by overpredicting the liquid entrainment from the core. Calculated pressure drop across the steam generator was also overpredicted. Calculated clad temperatures were, consequently, higher than the measured values by 58 K in average. It was confirmed that the RELAP5/MOD3.1/K had a conservatism in predicting the system reflow behaviors with respect to the clad temperatures.

1. 서론

RELAP5/MOD3.1/K는 RELAP5/MOD3.1 중 재관수 모델을 개선한 코드로 벽면 열전달 모델과 분산유동 영역의 액적 크기 결정 부분을 개선하였으며 재관수 시 발생하는 압력 Spike와 수위 진동을 막기 위하여 벽면 증기 생성의 Time-smoothing과 수위 추적 모델이 추가되었다. 이 코드는 FLECHT-SEASET 실험의 평가 계산을 통해 검증되었다[1].

PKL 실험 장치는 독일 SIEMENS KWU 사의 4-루프 원전을 축소 모사한 실험 장치로 그 구성은 그림 1과 같으며, 길이 축적은 1:1, 직경 축적은 1:12, 체적 축적은 1:145이다. PKL-IIB5는 1985년에 KWU에 의하여 수행된 전체 효과 (Integral Effect) 실험으로, 배출 종료 시점부터 재관수 기간에 걸쳐서 계통과 노심의 열수력학적 거동을 연구하기 위하여 수행되었다. PKL 실험 장치는 형상적으로는 세 개의 루프로 구성되어 있으나, 한 개는 파단 루프이고 건전 루프 중 한 개는 두 개의 루프를 모의하고 있으므로, 실제로는 4-루프 발전소를 모의하고 있는 것이다. 원자로 강수관은 강수관에서 발생하는 counter-current 현상을 모의하기 위하여 원자로 외부에 두 개의 분리된 파이프로 이루어져 있다. 파단은 저온관에서 발생하며 비상노심 냉각수도 건전 루프의 저온관으로 주입된다. 이 실험은 배출 종료 시점의 원자로 내부 조건을 모의할 수 있도록 실험의 시작과 함께 upper head를 통하여 conditioning water의 주입이 이루어진다. 이 conditioning water는 노심 냉각이 목적이 아니라, 배출 종료 시점에서의 노심 및 원자로 내부의 열수력 조건을 실제 상황과 유사하게 만들어 주기 위한 것이다. 원자로 냉각재 펌프는 압력 강하로 모의되며, 증기 발생기는 2차측 냉각수를 포함하고 있으나 대형 냉각재 상실사고 모사 실험 관점에서 단순화되어 있다. 1차 측에는 30 개의 u-tube와 함께 inlet chamber, outlet chamber가 설치되어 있으며, 2차 측은 단순한 파이프 형태로 만들어져 있다.

노심은 그림 2와 같이 314 개의 전기 가열봉으로 구성되어 있으며, 그 출력 수준에 따라 63 개의 inner zone 가열봉, 118 개의 middle zone 가열봉, 133 개의 outer zone 가열봉으로 분류된다. 표 1은 각 영역의 가열봉 개수, 출력 등을 보인 것이다. 노심의 중앙부에 위치한 63 개의 inner zone 가열봉은 middle zone 가열봉과 outer zone 가열봉에 비하여 가열봉 당 출력이 각각 17%, 30% 씩 높다. 모든 가열봉의 축방향 출력 분포는 소위 chopped cosine 모양이다.

2. 계통 모델링

일차 측의 루프는 실험 장치의 구성과 동일하게 3 개의 루프로 모델하였으며, 가압기는 한 개의 루프를 모의하고 있는 단순 루프에 연결되어 있다. 실험의 conditioning water와 안전 주입수는 시간 종속 체적 및 시간 종속 유로 요소를 이용하여 모델되었다. 노심은 63 개의 고 출력 가열봉을 고온 채널로 모델하였으며, 나머지 251 개의 가열봉은 노심 평균 채널에 위치시켰다. 출력이 서로 다른 3 종류의 가열봉을 모사하기 위하여, 노심 평균 채널에 middle zone 가열봉과 outer zone 가열봉을 따로 따로 모델하였다. 두 노심 채널은 횡방향 유로 (cross flow junction)를 이용하여 서로 연결하였다. 그림 3은 원자로 용기의 모델링을 보인 것으로, 두 개의 파이프로 분리된 원자로 강수관, 노심 우회 유로, 하부 공간, 상부 공간, 상부 헤드 등을 명백히 모사하고 있음을 보인다. 상부 공간은 실제 실험 장치의 구성대로 두 개의 채널로 모델하였으며 두 채널 사이의 유동은 횡 방향 유로 요소를 이용하여 모델하였다. 상부 헤드에 연결된 유로 및 체적은 상부 헤드로 유입되는 conditioning water를 모사하기 위한 것이며, 각 노심 노드는 최상부 노드를 제외하고는 모두 0.18288m의 높이를 가진

다. 루프로 유입되는 condition water와 안전 주입수는 해당 위치에 시간 종속 체적과 유로를 이용하여 모델하였다. 배출 종료 시점의 파단 루프 유동을 모의하기 위한 루프 conditioning water는 실험에서와 마찬가지로 파단 루프의 파단 양쪽에 유입되는 것으로 모델하였다. 상부 헤드 및 루프의 conditioning water는 실험의 초기 3초 동안만 유입된다.

3. 해석 결과

3.1 계통 거동

노심과 가압기의 압력 비교는 그림 4와 같다. 계산은 실험의 측정 데이터를 잘 예측하고 있음을 볼 수 있다. 실험에서는 파단 유량 저장 탱크 입구에서의 유량을 측정하고 있으나, 계통 모델링은 파단 유량 저장 탱크를 포함하지 않으므로 파단 유량의 직접적인 비교는 불가능하다. 그림 5는 파단 루프 펌프 흡입관에서의 유량을 비교하여 보인 것이다. 계산은 파단 밸브 개방 후의 초기 급격한 유량 침투 및 안전 주입수에 의한 증기 응축의 영향으로 나타나는 부 (-) 방향 유량까지 정확히 예측하고 있다. 측정에서 나타나는 순간적인 유동 진동 양상은 완만하게 예측됨을 볼 수 있다.

노심 수위 비교는 그림 6과 같다. 실험은 reference elevation으로부터의 수위를 보여 주고 있으나 계산은 노심의 void fraction을 이용하여 계산되었으므로, 노심에서 수위가 형성되기 시작하는 재관수 개시 이전의 비교는 무의미하다. 계산의 초기에 수위가 나타나는 것은 상부 헤드로 유입된 conditioning water가 노심으로 내려오기 때문이다. 안전 주입 펌프와 안전 주입 탱크의 비상 노심 냉각수는 4.5초부터 주입이 시작되지만, 노심의 재관수는 약 35초에야 시작한다. 계산된 수위는 재관수 초기의 수위 및 전 재관수 기간의 수위 증가 경향을 적절히 예측하고는 있으나, 재관수가 진행됨에 따라 실험의 측정치보다 낮아지는 경향이 심화된다.

이는 RELAP5/MOD3.1/K 코드가 노심에서 발생하는 수증기의 액적 동반을 과도 예측하기 때문이다. 그림 7은 원자로 상부 공간의 수위를 비교한 것이다. 0 초부터 상부 공간의 수위가 나타나는 것은 상부 헤드로 유입된 conditioning water를 나타낸다. 노심의 재관수에 의한 상부 공간의 수위는 약 45초부터 형성되며, 거의 전 재관수 기간에 걸쳐서 상부 공간의 수위는 실험보다 높게 계산되고 있다. 가압기에 잔류하고 있던 물이 고온관으로 유입되면서 이 중의 일부가 상부 공간으로 들어올 수 있으므로, 이에 의한 상부 공간 수위의 증가 가능성이 있다. 그러나 그림 8에 보인 바와 같이 이는 상부 공간에 수위가 형성되기 전에 모두 종료되므로, 45초부터 나타나는 상부 공간의 수위는 전적으로 노심의 수증기에 동반되어 상부 공간으로 활발히 유입되는 액적에 의한 것이다. 측정 수위와 계산 수위는 150 초까지는 1 cm 정도의 차이밖에 보이지 않으나 후반으로 갈수록 그 차이는 증가하여 250 초에서는 22 cm, 300 초에서는 12.7 cm의 차이를 나타낸다. 실험에서는 동반된 액적이 일부 upper core plate에서 이탈되고, 상부 공간의 일부 액체 상은 다시 노심으로 유입될 것으로 추정되나, 계산은 이탈이나 노심 유입을 거의 보이지 않는다. Upper core plate를 통한 액체 상의 유량을 적산한 것을 그림 9에 나타내었다. 45 초까지는 가압기 등에서 노심으로 유입되는 액체 상의 물이 있으나, 45 초 이후로는 꾸준히 노심에서 상부 공간으로만 유입되고 있음을 알 수 있다. 이러한 액적 동반의 과도 예측은 RELAP5/MOD3.1/K 코드의 interface drag가 크고, 액적 이탈 모델이 없기 때문에 발생하는 것으로 판단된다.

그림 10과 11은 증기 온도를 비교하여 보인 것이다. 그림 11은 고온 측 u-tube 중에서 가장 낮은 위치 측, 증기 발생기 inlet chamber 바로 위 지점의 u-tube에서 측정된 값과 해당

하는 계산 값을 비교한 것이다. 재관수 개시 이전의 증기 온도는 아주 잘 예측되고 있다. 재관수가 시작되면 증기 온도는 전 구간에 걸쳐서 계산 값이 실험치보다 높게 나타난다. 노심 수위의 과소 예측과 그림 5의 유량의 정확한 예측은 결국 노심 출구에서 entrainment가 과도함을 보여준다. 이것은 액적들의 증발량이 실제보다 적게 계산되며 열이 증기로 전달되어 결국 노심의 증기 온도가 높게 예측된다. 그림 11은 u-tube 최상단에서의 증기 온도를 비교한 것이다. 2차 측의 단순화 모델링 때문에 2차 측 온도가 낮게 예측되어 증기 온도는 실험치보다 낮게 나타나나 그 차이는 약 3 K 정도로 무시할 만한 수준이다. RELAP5/MOD3.1/K는 재관수 이전의 증기 온도를 실험 데이터의 평균 값으로 예측하고 있으며, 전 노심에 걸쳐서 가열봉의 냉각이 완료되는 것으로 계산되는 약 250 초까지 증기 온도를 아주 정확히 예측하고 있다. 250초 이후의 증기 온도는 최대 피복재 온도 관점에서 유의성을 갖지 못한다.

그림 12는 증기 발생기의 압력 강하를 비교한 것이다. 재관수가 시작되면서 압력 강하의 계산 값은 전 재관수 기간 동안 실험의 측정치 보다 크게 나타난다. 압력 강하가 클 수 있는 요인은 증기 온도가 현저히 높아서 증기의 밀도가 낮아짐에 따라 증기 속도가 커지거나, 증기 밀도가 유사하다면 증기 유량이 많기 때문이며, 이 두 가지 요인은 동시에 발생할 수도 있다. 증기 발생기의 압력 강하가 크다는 사실은 steam binding 현상이 심화되고 있음을 직접적으로 나타낸다. 그림 5로 볼 때 루프의 유량은 정확히 계산되고 있으므로, RELAP5/MOD3.1/K 코드의 과도한 steam binding 예측은 증기 온도에 기인하는 바가 큰 것으로 판단된다. 그림 10과 12로 볼 때, 평균적인 증기 온도는 과도하게 예측되며 이에 따라 steam binding이 심해지는 것으로 추정할 수 있다.

3.2 피복재 온도 거동

계산된 피복재 온도는 그림 13과 14에 보였다. RELAP5/MOD3.1/K 코드는 초기 5초 동안은 정확히 피복재 온도를 예측하나, 약 10초 정도 조기에 재 충수 기간의 단열 가열 반응을 시작하고 있음을 알 수 있다. Conditioning water에 의한 피복재의 냉각이 실험 데이터의 경우에는 상당히 진행되고 있으나 계산은 적은 량의 냉각 효과밖에 보이지 못한다. 이는 계산의 경우, 노심으로 유입된 conditioning water가 조기에 상당량이 다시 동반되어 상부 공간으로 나가 버리기 때문인 것으로 보인다. 이러한 설명은 노심 수위 및 steam binding 등의 코드 예측과도 일관성을 가진다. Inner zone 가열봉의 경우, 단열 가열의 조기 발생에 의한 피복재 온도 증가는 최소한 48 K 정도이다. 그러나 재관수 초기에는 가열봉 냉각이 계산에서 더 크게 나타난다. 이는 노심 입구에 도달한 안전 주입수가 용이하게 동반되어 고온 영역에 까지 도달하기 때문이다. 재관수 초기에는 액적의 동반에 의한 영향으로 고온 지점의 냉각이 실험보다 양호하게 계산된다. 그러나 재관수가 진행되어 가면서, 노심 수위의 과소 예측과 steam binding의 과도 예측에 의하여 피복재 온도는 약 110 초까지 실험보다 높은 증가율을 보인다. 이러한 경향은 middle zone 가열봉의 경우에도 동일하게 나타난다.

실험에서는 7군데의 노심 높이에서 가열봉 온도를 측정하고 있다. 그림 13과 14는 실험에서 최대 가열봉 온도가 측정된 지점에 해당하는 계산의 가열봉 온도를 비교하여 보인 것이다. 코드 계산은 측정된 가열봉 온도를 적절히 예측하고 있음을 확인할 수 있으며, 가열봉 단열 가열의 조기 발생에 의하여 최대 피복재 온도는 계산이 전반적으로 실험보다 높게 나타난다. 7군데의 측정 위치 중 유효 노심의 거의 상부 경계 지점에 위치하고 있는 데이터를 제외하고, 세 종류의 가열봉을 모두 고려하여 최대 피복재 온도를 비교하여 그림 15에 나타내었다. RELAP5/MOD3.1/K 코드는 전반적으로 피복재 온도를 실험의 측정치보다 높게 계산하고

있으며, 그 차이는 평균 58 K이었다.

4. 결론

RELAP5/MOD3.1/K 코드는 PKL-IIB5 실험의 열수력학적 거동을 잘 예측하는 것으로 평가되었으며, 코드 결과들은 모두 일관성을 보였다. LBLOCA의 중요 재관수 현상 중의 하나인 steam binding은 다소 과도하게 예측되었으며, 이는 RELAP5/MOD3.1/K 코드가 노심의 액적 동반을 과도하게 예측하고 원자로 상부 공간 등에서의 액적 이탈을 모사하지 못하기 때문인 것으로 평가되었다. 피복재 온도는 전체 노심의 가열봉을 모두 고려했을 때 평균 58 K 높게 예측되었다. 본 연구 결과, RELAP5/MOD3.1/K 코드는 LBLOCA의 재관수 열수력 현상을 다소 보수성을 갖고 예측하고 있음을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 평가되지 못한 LBLOCA의 다른 주요 현상에 대해서는 추후의 보다 심도있는 연구가 필요하다.

참고 문헌

1. 이상용, 정법동, 이영진, 박찬익, 최철진, "RELAP5/MOD3 재관수 모델의 개발 및 재관수 침투 온도의 불확실성 정량화," KAERI/TR-436/94, KAERI(1994).
2. Schmidt, Umminger, Gueneysu, "Ergebnisse des Versuches IIB-5 aus der Testserie PKL IIB," KWU, 1985.
3. C.H. Ban and W. Hering, "Assessment of RELAP5 Reflood Models using PKL-IIB5 test," IRS, FZK, 1999.
4. V. Sanchez and C.H. Ban, "Status of Reflood Model Assessment in RELAP5/mod3.2.2 Beta," 14th CAMP mtg., Bariloche, Argentina, 1999.
5. NUREG-1230, "Compendium of ECCS Research for Realistic LOCA Analysis - Final report," 1988.
6. NUREG/CR-5249, "Quantifying Reactor Safety Margins: Application of Code Scaling, Applicability, and Uncertainty Evaluation Methodology to a Large Break Loss of Coolant Accident," EG&G Idaho, Inc., Technical Program Group, December 1989.
7. NUREG/IA-0127, "Reactor Safety Issues Resolved by the 2D/3D Program International Agreement Report", MPR Associates, Inc., July, 1993.

표 1. PKL-IIB5의 노심 구성

	Inner Zone	Middle Zone	Outer Zone	Remarks
No. of Rods	63	118	133	Total 314 Rods
Power Fraction (KW)	313	502	510	Test Initial Condition
Rod Power (W/rod)	4.97	4.25	3.83	
Axial Power Shape	Chopped Cosine			

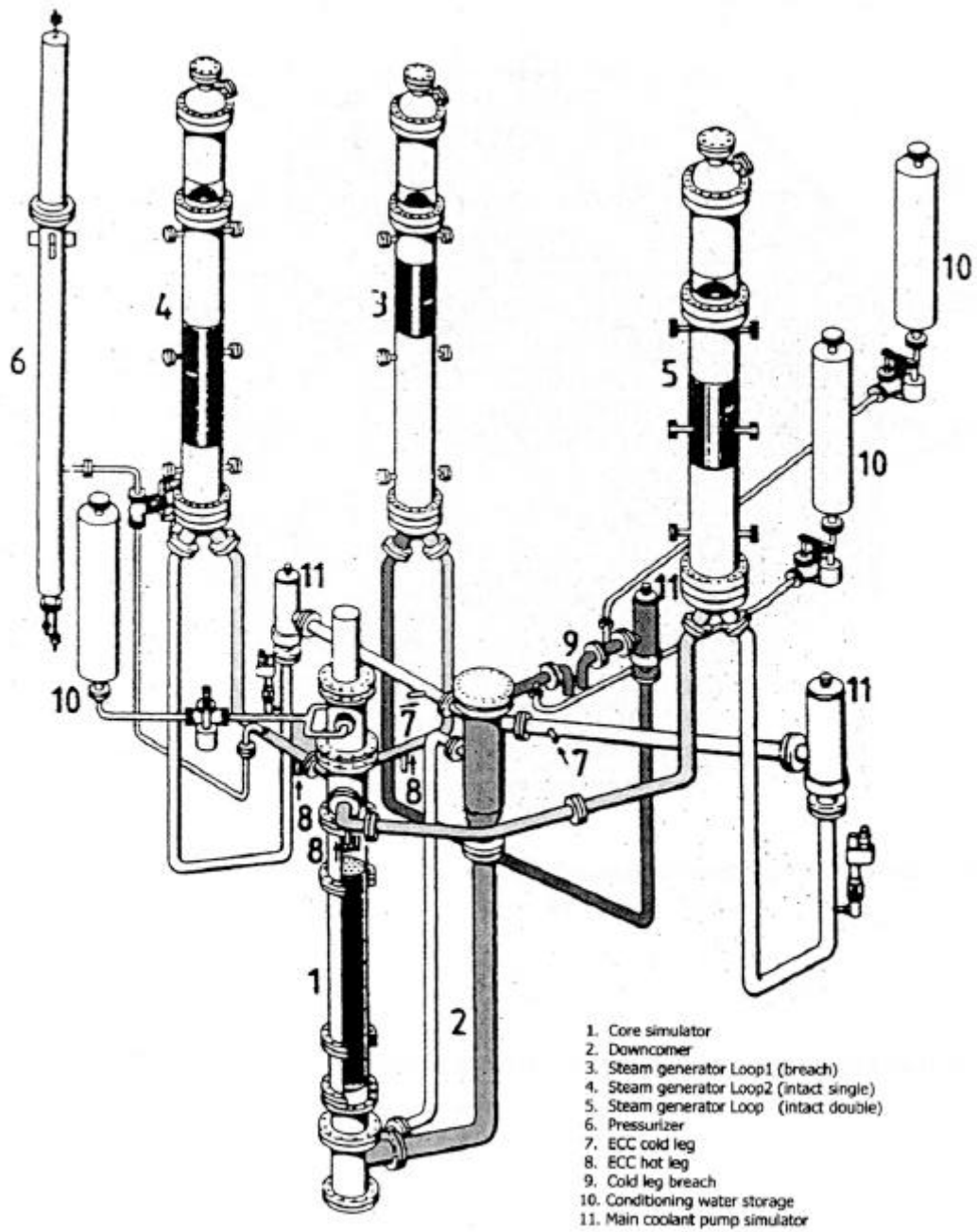


그림 1. PKL-IIB5의 실험 장치 구성

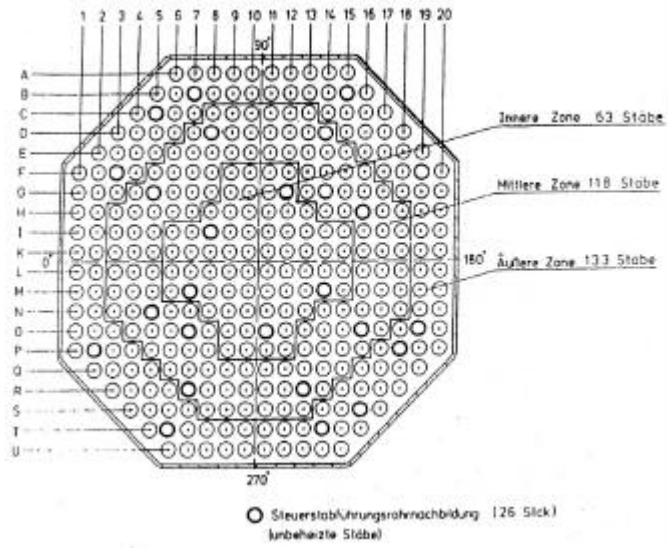


그림 2. PKL-IIB5의 노심 구성

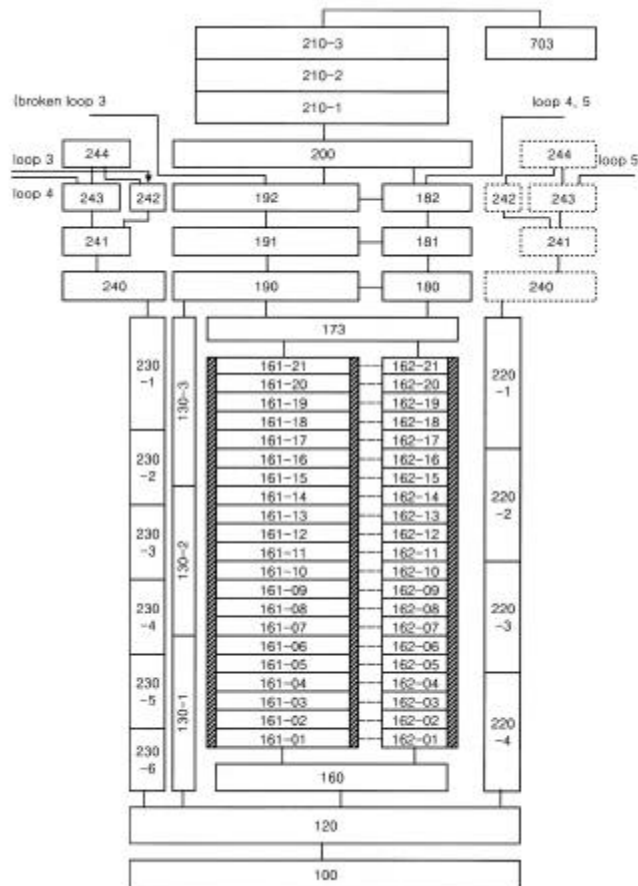


그림 3. PKL-IIB5의 원자로 Nodalization

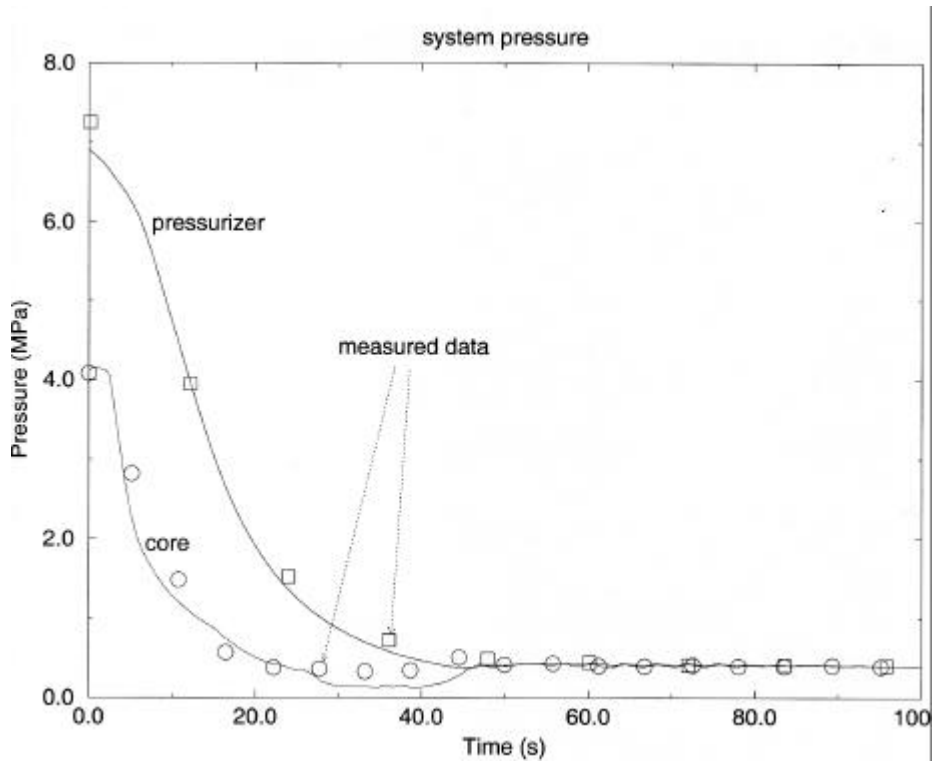


그림 4. 노심과 가압기 압력

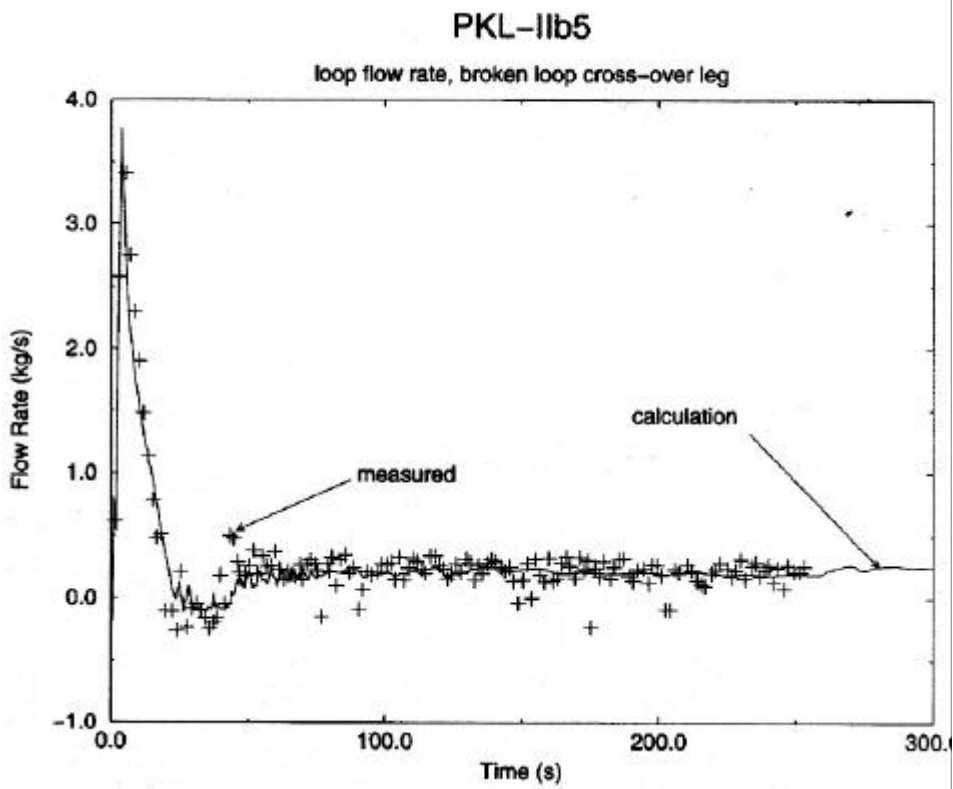


그림 5. 루프 유량

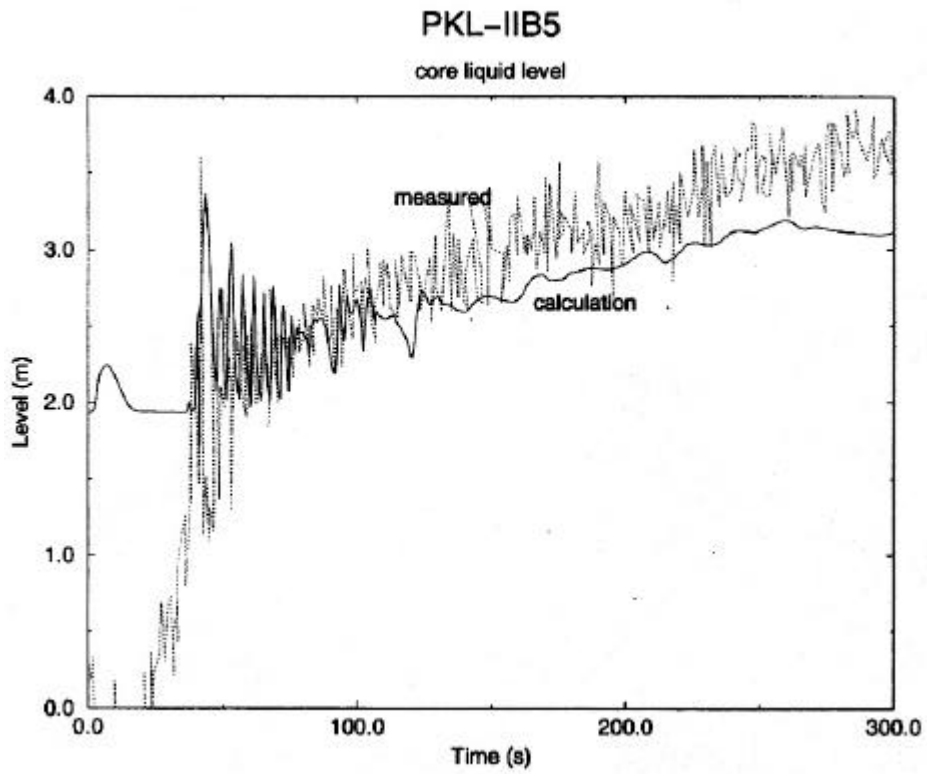


그림 6. 노심 수위

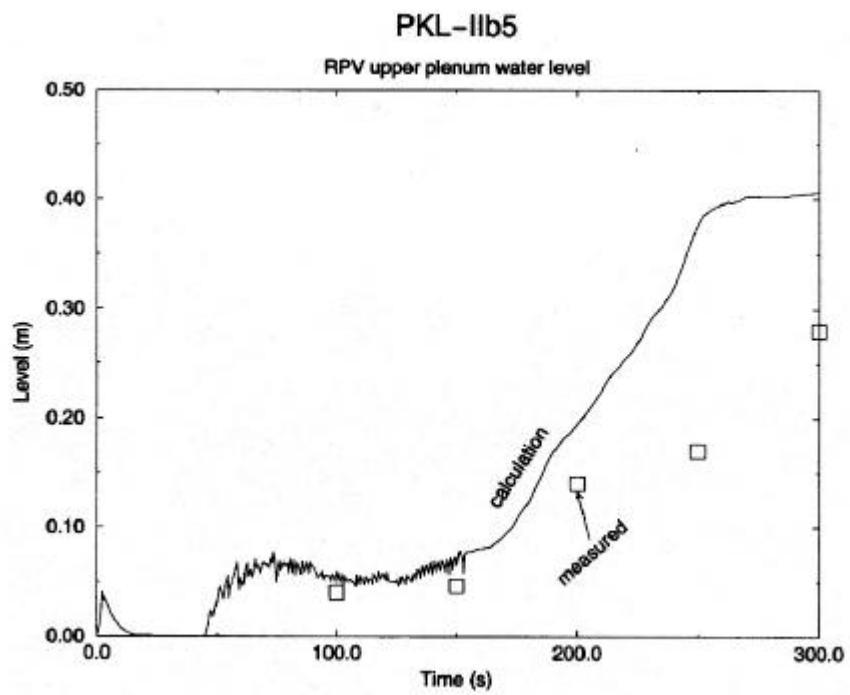


그림 7. 원자로 상부 공간 수위

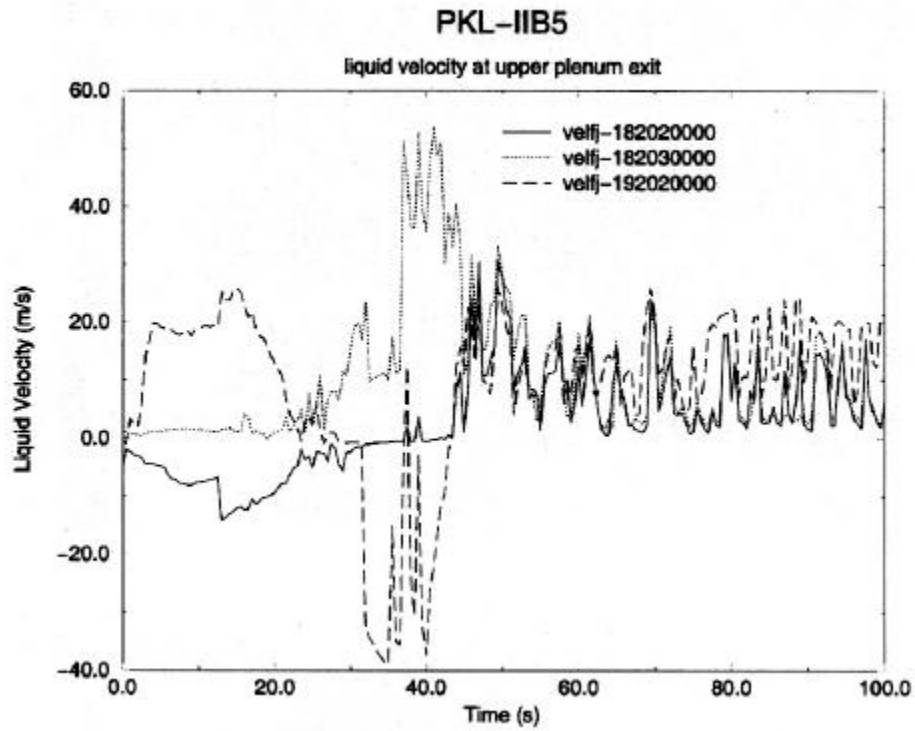


그림 8. 원자로 상부 공간으로 주입되는 유량

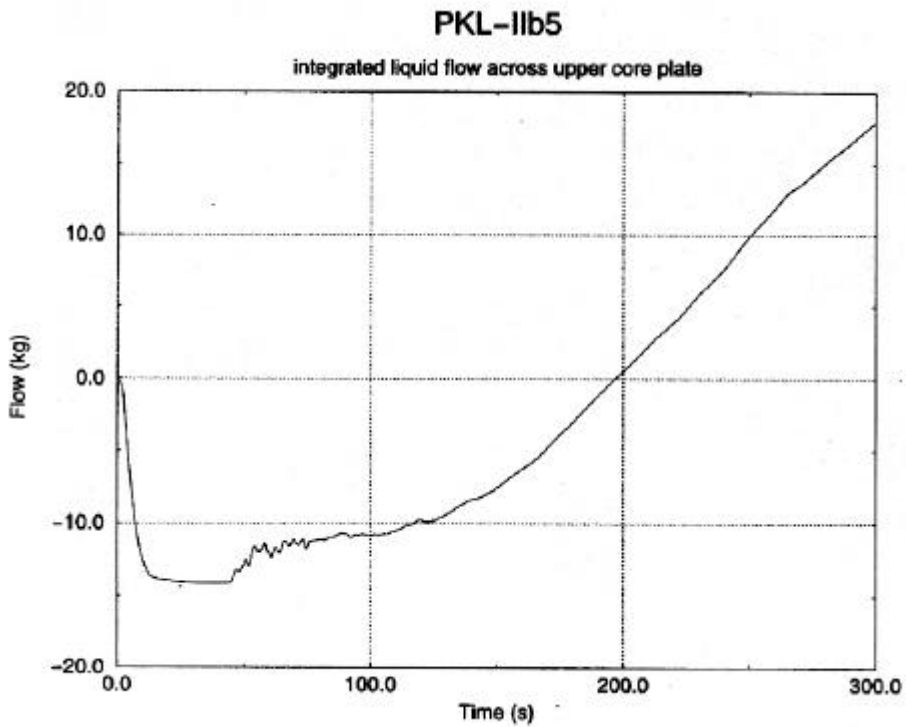


그림 9. Upper core plate를 통하여 상부 공간으로 유입되는 유량 적산

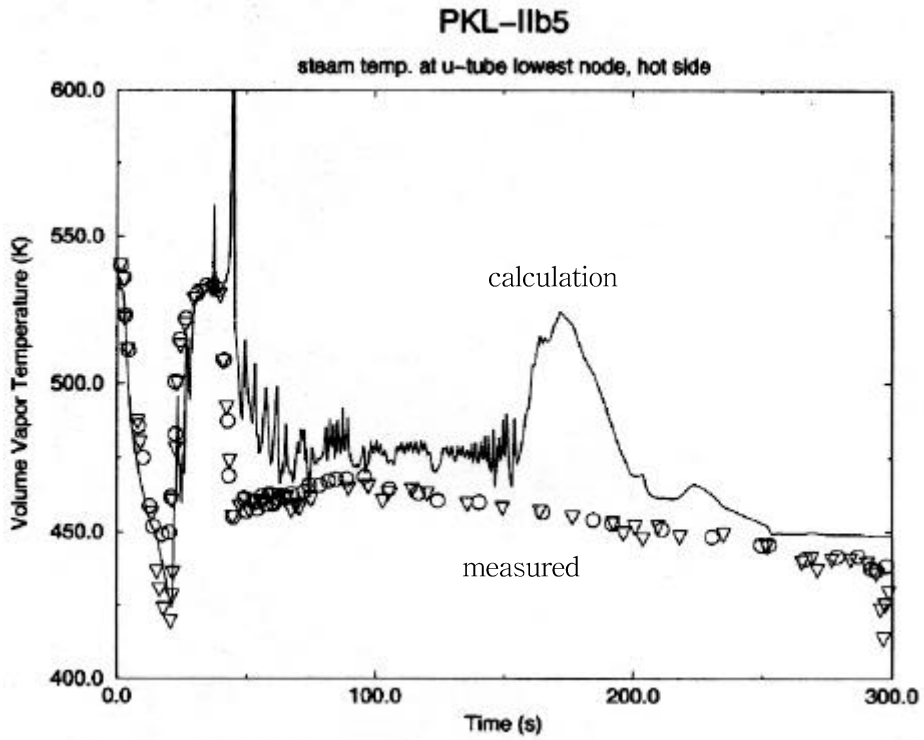


그림 10. 증기 발생기 U-tube 하단의 증기 온도

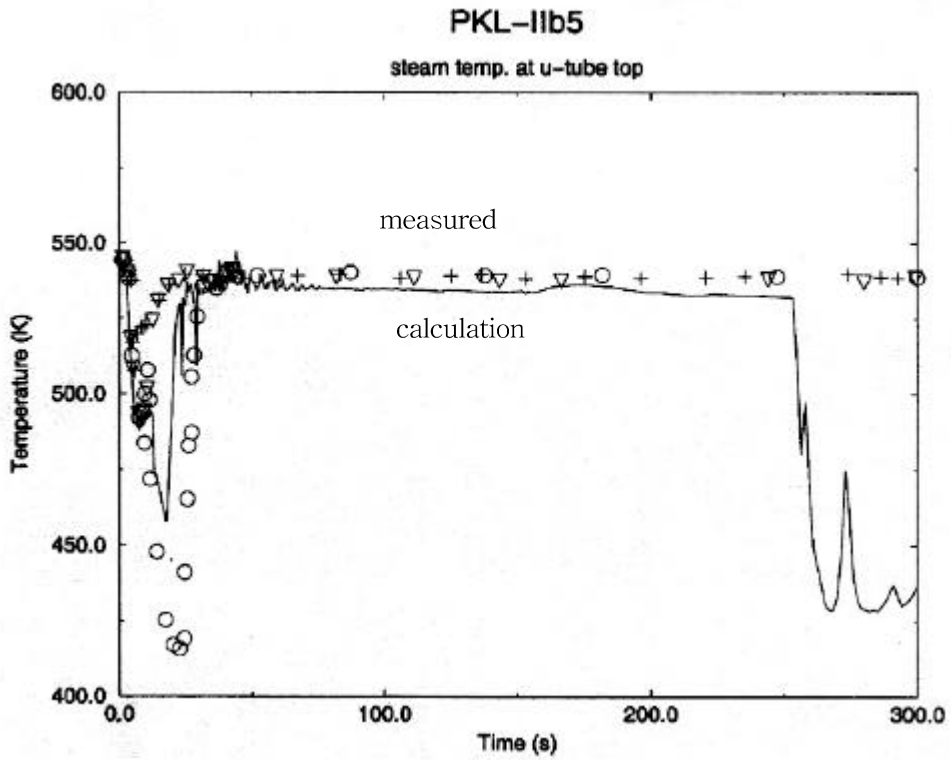


그림 11. 증기 발생기 U-tube 최상단의 증기 온도

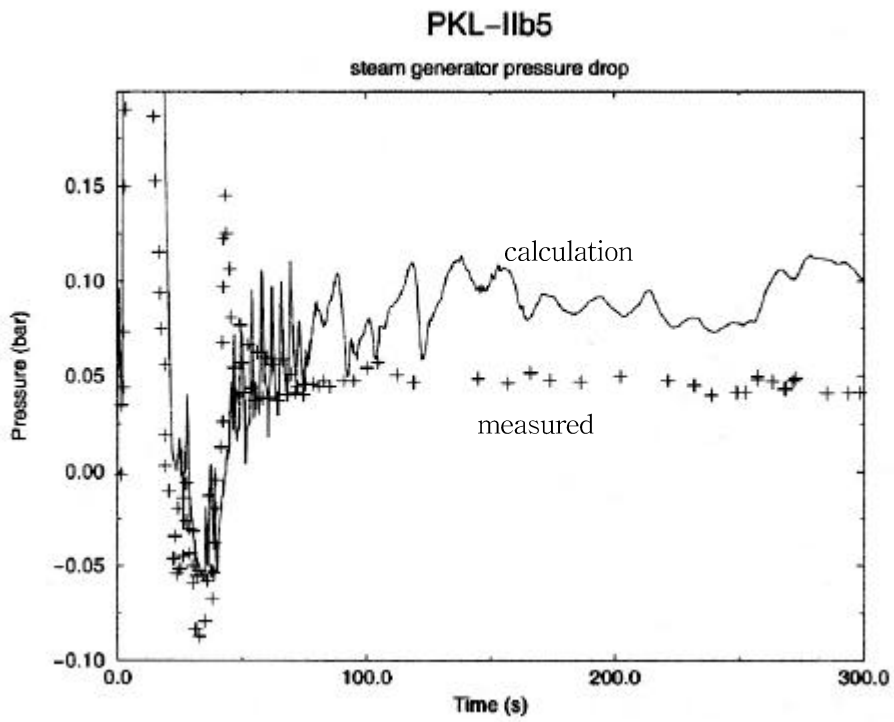


그림 12. 증기 발생기를 통한 압력 강하

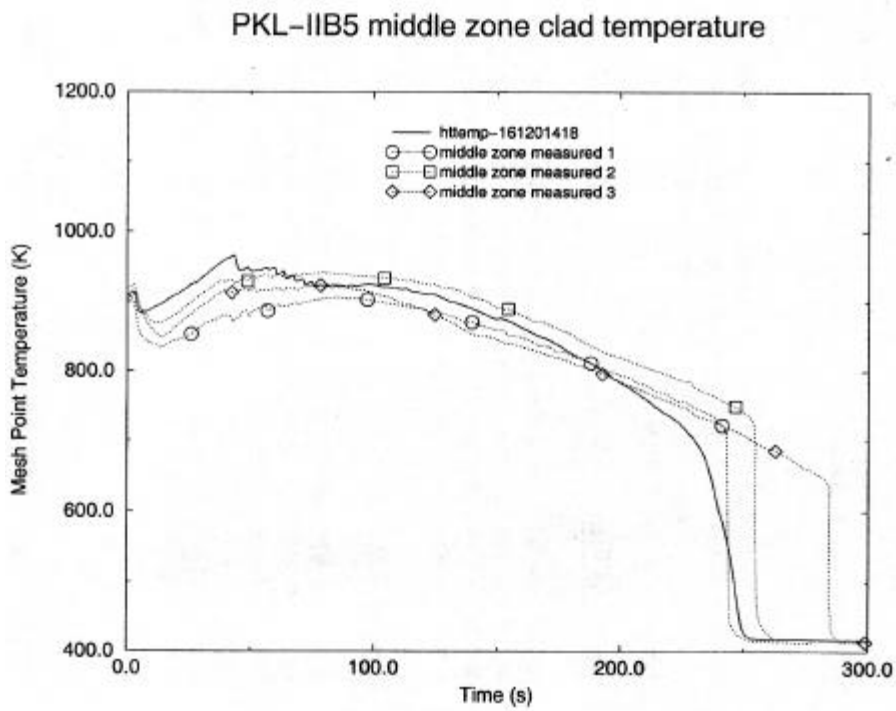


그림 13. Middle Zone 가열봉의 피복재 온도

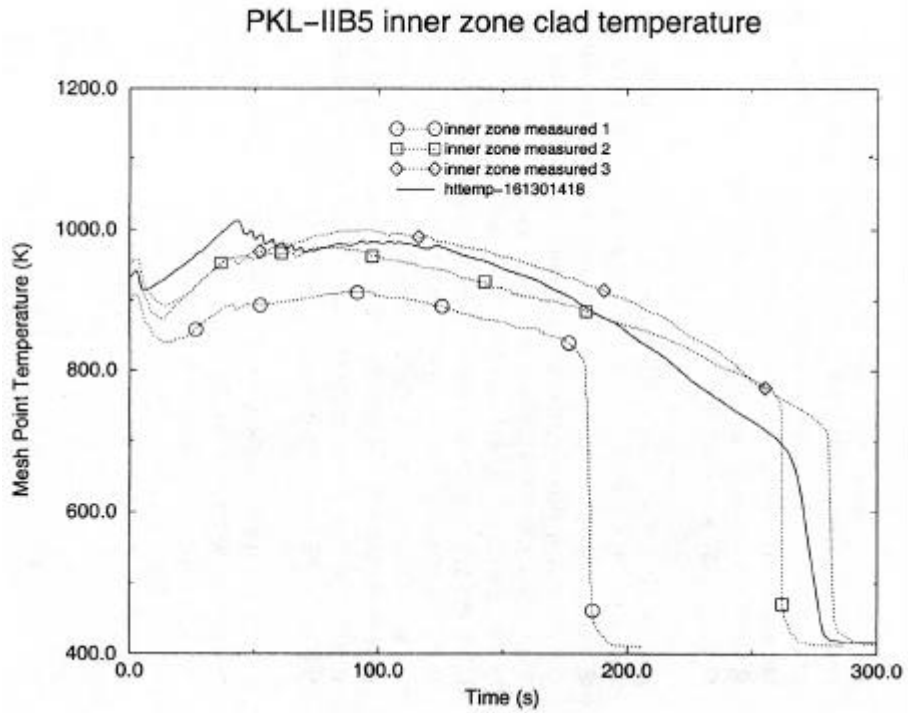


그림 14. Inner Zone 가열봉의 피복재 온도

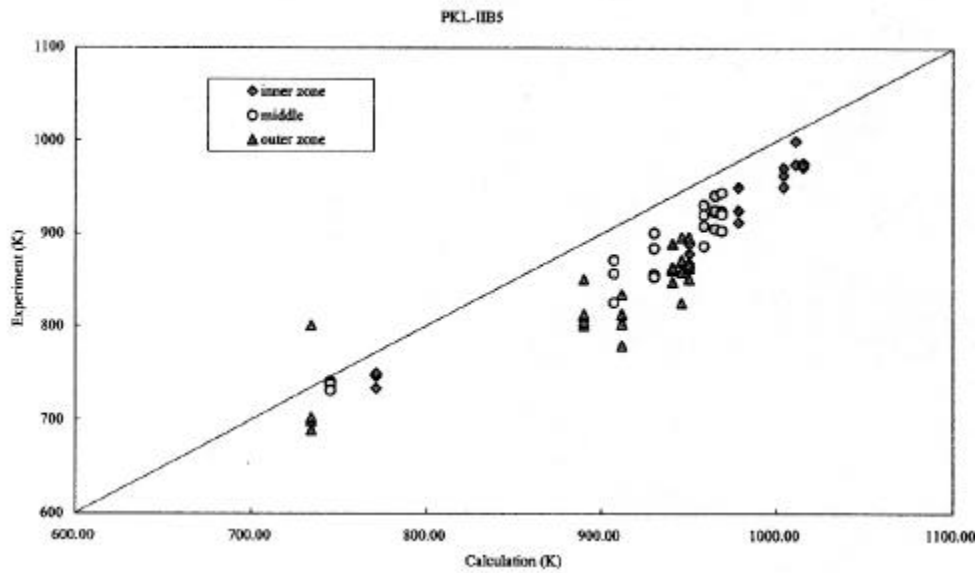


그림 15. 계산과 측정 피복재 온도 비교