

'99 추계학술포럼 논문집

한국원자력학회

웨스팅하우스 평가모델을 이용한 영광 3/4호기 대협냉각재상실사고 파단스펙트럼 해석

**A LBLOCA Break Spectrum Analysis for Yonggwang Units 3/4
Using Westinghouse Evaluation Model**

최동수, 이재훈, 이상중, 조창석

한전원자력연료주식회사

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

웨스팅하우스의 평가모델을 사용한 영광 3/4호기 대협냉각재상실사고 파단스펙트럼 해석이 수행되었다. 해석에는 영광 3/4호기 FSAR 해석에 사용된 초기 조건 및 주요 입력 가정이 그대로 사용되었으며, 영광 3/4호기의 계통 구성상의 특징을 반영한 Nodalization이 적용되었다. 일정 범위의 파단 방출계수에 대한 계산으로부터 가장 제한적인 파단 방출계수는 0.4인 것으로 밝혀졌으며, 모든 경우에 있어서 최고피복재온도는 Reflood 후반에 발생하였다. 추후에 축 방향 출력 분포를 비롯한 주요 변수에 대한 민감도 분석이 수행될 예정이다.

Abstract

A break spectrum analysis for Yonggwang Units 3/4 was performed with Westinghouse LBLOCA evaluation model. The initial conditions and major input assumptions incorporated in the FSAR analysis were used with no change and nodalizations reflecting the unique system design of Yonggwang Units 3/4 were used in this analysis. It was revealed from the calculations for a range of break discharge coefficients that the most limiting discharge coefficient is 0.4 and the peak cladding temperatures occur in the late period of reflood in all cases. Sensitivity studies for various major parameters including the axial power distribution are to be done later.

1. 서론

KNPC에서는 영광 3/4호기를 포함한 CB형 발전소와 울진 1/2호기를 포함한 웨스팀하우스형 발전소의 비상노심냉각계통 관련 설계 및 해석을 수행해오고 있다. 현재 각각의 발전소 해석에는 기술 제공사로부터 도입된 코드 및 방법론을 사용하고 있으나, 이종 코드에 의한 CB형 발전소 해석^[6]을 1998년에 수행하여 그 적용 가능성을 확인한 바 있다. 이 논문의 결론은 CB형 대험냉각재상실사고 해석 코드의 성능 개선은 Reflood 해석용 코드의 개선 및 개발을 중심으로 이루어져야 한다는 것이었다. 본 연구에서는 이 결론의 후속 작업으로 Blowdown 및 Refill/Reflood 단계를 포함한 전 사고 기간에 대하여 웨스팀하우스의 평가모델을 이용하여 대험냉각재상실사고 파단스펙트럼 해석을 수행하였다.

지금까지 웨스팀하우스는 자사의 코드 및 방법론을 사용한 CB형 발전소 해석에서 웨스팀하우스형 발전소에 대해 그 적용을 승인 받은 평가모델 및 방법론을 사용하여 수행하였으며, 해당 평가모델 및 방법론이 CB형 발전소와 웨스팀하우스형 발전소간의 차이를 적절히 모사할 수 있음을 보임으로써 그 적용에 대한 인허가^{[3][8]}를 획득하였다. 따라서, 본 연구에서도 기존의 웨스팀하우스형 발전소 설계에 사용되는 코드 및 방법론을 기본으로 두 발전소의 차이를 평가하는 접근 방법을 사용하였다.

1998년 논문^[6]에서 언급된 바와 같이 영광 3/4호기와 웨스팀하우스형 발전소가 다른 점은 2x4 Loop Layout, 안전주입 각도, 상부안내구조물 및 유량분배환을 비롯한 원자로용기 상·하부 구조, 안전주입탱크 크기, 증기발생기 인구 노출의 검사도, 그리고 유효 연료 길이 등이다. 이러한 차이를 적절히 모사할 수 있는 Noding이 웨스팀하우스형 기본 Noding과 CB의 평가 방법론에서 사용하는 Noding을 기초로 개발되었다.

2. 평가모델 및 모델링

본 대험냉각재상실사고 해석은 웨스팀하우스의 "1981 BM with BASH"를 기본 평가모델로 사용하여 수행되었다. 이 평가 모델은 10 CFR 50, Appendix K에 기술되어 있는 모델 및 가정을 사용하여 개발되었으며, SATAN-VI, BASH, 그리고 LOCBART 코드로 구성된 것으로서 저온관으로 안전 주입이 이루어지는 가압검수로에 적용이 가능하다.

"1981 BM with BASH"를 구성하는 코드들간의 정보 전달 관계는 그림 1에 개략적으로 설명되어 있으며, 각 코드의 역할 및 기능상의 특징은 다음과 같이 요약될 수 있다.

2.1 SATAN-VI

SATAN-VI는 대형냉각재상실사고의 Blowdown 기간 동안에 일어나는 일차 계통과 이차 계통 사이의 열 전달과 일차 계통 내의 압력, 엔탈피, 밀도, 그리고 질량 및 에너지 유량의 시간별 변화 양상을 계산하는 일차원 네트워크 코드이다.

이 코드에 의해 계산된 Blowdown 동안의 열수력 인자들은 연료봉의 온도 변화를 계산하는 LOCBART 코드의 열전달 경계 조건으로 사용된다. 또한 이 코드는 Blowdown 동안에 원자로 냉각재 계통으로부터 격납 건물로 방출되는 질량 및 에너지 유량을 계산하는데, 이 정보는 BASH의 COCO 모듈로 전달되어 격납 건물내의 압력 및 온도 변화를 계산하는 데 사용된다.

이 해석에서는 파단 루프의 건전 저온관과 파단 저온관을 각각 별도의 노드를 사용하여 모델링하였다. 원자로용기 내의 상부안내구조물은 상향 유동 지역과 하향 유동 지역으로 나누어 모델링하였으며, 두 유동 지역 사이에는 유로간 유로 (Cross Flow Path)를 구축하였다. 또한 CB형 발전소의 특징적 부품이라 할 수 있는 유량분배관은 압력 손실 계수를 통해 모델링되었다.

2.2 BASH

BASH는 Refill 및 Reflood 기간 동안에 원자로냉각재계통 및 노심에서 일어나는 열수력 현상을 계산하는 통합 코드이다. 이 코드는 Refill 기간 동안에 원자로용기 하부플레넘이 채워지는 과정을 계산하는 REFILL 모듈, Reflood 직전까지의 노심 평균 출력 연료봉의 온도 변화를 계산하는 LOCTA 모듈, Reflood 기간 동안에 원자로냉각재계통 및 노심에서 일어나는 열수력적 현상을 계산하는 BASH 모듈, 그리고 격납 건물의 압력을 계산하는 COCO 모듈로 구성되어 있다.

이 해석에 적용된 BASH Nodalization은 그림 2에 제시되어 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 루프 부분은 SATAN-VI 계산에 적용된 것과 유사하게 건전 루프의 두 개 저온관을 하나로 합쳐서 취급하였으며 파단 루프의 건전 저온관과 파단 저온관은 각각 별도의 노드를 사용하여 모델링하였다. 이에 따라 안전주입탱크와 능동 안전주입계통에 의한 안전 주입은 건전 루프의 합쳐진 저온관으로 연결된 것과 파단 루프의 건전 저온관으로 연결된 것을 별도로 모델링하였다.

원자로용기 내의 Nodalization은 웨스팅하우스형 발전소의 경우와 대체로 유사하나, Reflood 계산에서 있어서 그다지 중요하게 취급되지 않는 상부안내구조물 내 체적은 상부헤드와 함께 하나의 유체 노드로 모델링하였다.

격납 건물의 압력 및 온도 변화를 계산하는 COCO 모델의 계산에는 영광 3/4호기의 격납 건물 구조 및 구성 기기가 웨스팀하우스형 발전소의 그것과 크게 다르지 않기 때문에 영광 3/4호기만을 위한 특별한 모델링은 사용되지 않았다.

2.3 LOCBART

LOCBART는 LOCTA-IV 코드와 BART 코드를 연결하여 만들어졌다. LOCTA-IV 코드는 냉각재상실사고 동안의 연료 및 피복재와 냉각재의 온도를 계산하는 기능을 가지고 있다. LOCBART는 LOCTA-IV 코드의 연료봉 모델 중에서 FLBCHT 실험식을 사용하여 Reflood 동안의 국부 열전달계수를 계산하는 부분을 BART 코드로 대체한 것이다. BART 코드는 LOCTA-IV가 계산하는 연료봉이 겪게되는 실제적인 유동 및 열 전달 체계에 맞는 열 전달 계수를 매우 정교한 기계적 모델을 사용하여 계산한다. 이러한 접근 방법은 고점적인 실험식을 사용하는 것에 비해 보다 실제적인 것으로 여겨진다.

3. 파단스펙트럼 해석

다양한 발전소에 대한 대형냉각재상실사고 해석 경험에 의하면 특정 발전소에 대해서 가장 제한적인 파단 방출계수를 일반적으로 결정하기는 어렵다. 대형냉각재상실사고 해석에서 가장 제한적인 파단 방출계수는 동일한 발전소 또는 동일한 연료 관련 자료를 사용한 경우에도 평가 모델에 따라 다를 수 있으며, 심지어는 동일한 평가 모델을 사용한 경우에도 주요 계통의 변경에 의해 달라질 수 있다.

예를 들어 기존에 웨스팀하우스 평가 모델을 Millstone Unit 2 또는 Fort Calhoun Unit 1과 같은 CB형 발전소에 적용한 해석^{[5][6]}에서는 제한적인 파단 방출계수가 0.4로 밝혀진 바 있으나, CB 평가 모델을 사용하여 Fort Calhoun Unit 1에 대하여 해석한 결과^[4]에서는 제한적인 파단 방출계수가 0.6이었고, 영광 3/4호기를 대상으로 CB 평가 모델을 사용한 경우^[6]에서도 제한적인 파단 방출계수는 0.6으로 결론지어진 바 있다.

이러한 이유 때문에 이 해석에서는 일정 범위의 파단 방출계수에 대한 파단스펙트럼 해석을 통하여 가장 제한적인 파단 방출계수 값을 확인하였다. 웨스팀하우스형 발전소에 대한 파단스펙트럼 해석은 일반적으로 3 개의 파단 방출계수 값에 대해서만 계산을 수행하지만 이 해석에서는 CB 평가모델을 사용한 해석^[6]에서와 같이 4 개의 파단 방출계수 값, 즉, 1.0, 0.8, 0.6, 0.4에 대한

계산을 수행하였으며 Chopped Cozine 출력 분포를 가점하였다. 또한, 이 해석에는 영광 3/4호기 FSAR 해석에서 사용되었던 사고 초기조건 및 계통 변수가 그대로 사용되었는데, 이들은 표 1에 요약되어 있다.

그림 3 ~ 그림 12는 방출계수가 1.0인 경우에 대한 계산으로부터 도출된 노심 압력, 파단 유량, 노심 유량, 노심 출력, 안전주입 유량, 원자로용기 하향유로 및 노심 내 수위, 그리고 최고 피복재온도 등과 같은 주요 변수들의 시간에 따른 변화 양상을 보여주고 있다. 이 변화 양상들은 기존의 웨스팀하우스형 발전소 해석에서 볼 수 있는 전형적인 것들로서, FSAR 해석 결과와 점성적인 측면에서 상당히 유사하나 전체적으로 조금 빠른 사고 진행을 보이고 있다. 이러한 사고 진행 속도의 차이는 사용된 평가모델의 파단 유량 모델의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 그런데, 그림 6에 있는 정규화된 노심 출력의 경우에는 FSAR 해석에 특정 밀도 영역에서 양의 값을 갖는 감속재밀도계수가 사용된 반면 이 계산에서는 최대 값이 0인 감속재밀도계수가 사용되었기 때문에 사고 초기에 그 양상이 약간 다르다. 그러나, 그림 12에서 알 수 있듯이 최고피복재온도가 Reflood 후반에 발생하기 때문에 이 차이는 전체 계산의 결과에 큰 영향을 미치지 않는다.

표 2와 표 3에는 이 해석으로부터 도출된 주요 계산 결과와 사고 진행 순서가 각각 요약되어 있다. 이 결과로부터 웨스팀하우스 평가모델을 적용할 경우 영광 3/4호기의 가장 제한적인 파단 방출계수는 0.4라는 것과 웨스팀하우스 평가모델을 적용할 경우에도 영광 3/4호기의 최고피복재온도는 Reflood 후반에 발생한다는 사실을 알 수 있다.

4. 결론

웨스팀하우스 평가모델의 영광 3/4호기에의 적용 가능성을 확인하고 그 효과를 확인하기 위한 대협냉각재상실사고 파단스펙트럼 해석이 수행되었다. 1.0, 0.8, 0.6, 0.4의 방출계수에 대한 계산으로 이루어진 이 해석으로부터 영광 3/4호기에 웨스팀하우스 평가모델을 적용할 경우 가장 제한적인 방출계수는 0.4인 것으로 밝혀졌다. 또한, 이 해석에서는 평가모델의 변경에도 불구하고 여전히 영광 3/4호기의 최고피복재온도가 Reflood 후반에 발생하는 것으로 계산되었다. 이 분석으로부터 도출된 최고피복재온도의 크기로부터 웨스팀하우스 평가모델을 사용할 경우의 최고피복재온도가 CB 평가모델을 사용한 FSAR 해석에 비하여 크게 낮을 것으로 예상할 수 있으나, 그 정확한 차이는 추후 축 방향 출력 분포를 비롯한 주요 해석 변수에 대한 민감도 분석을 통하여 확인될 것이다.

참고 문헌

- [1]. CBNPD-132P, "Caloulative Methods for the C-B Large Break LOCA Evaluation Model for the Analysis of C-B and W Designed NSSS", June 1985.
- [2]. WCAP-9528, "ECCS Evaluation Model for Westinghouse Fuel Reloads of Combustion Engineering NSSS", Ferguson, K. L. and R. M. Kemper, June 1979.
- [3]. WCAP-13027-P, "Topical Report : Westinghouse ECCS Evaluation Model for Analysis of CE-NSSS", Akers, J. J. and K. J. Schrader, July 1991.
- [4]. "Fort Calhoun Station No. 1 Updated Safety Analysis Report", Omaha Public Power District, July 1989.
- [5]. "CE LBLOCA EM의 개선 방향 고찰", 98 춘계학술발표회 논문집, April 1998.
- [6]. Yonggwang Units 3&4, Final Safety Analysis Report, Vol. 10.

표 1. 초기 조건 및 계동 변수

102% 노심 출력	2871 MWt
고온연료봉 최대선출력	13.9 (kW/ft)
1차측 압력	2250 (psia)
1차측 총 유량	121.586 (lbm/hr)
노심 유량	117.986 (lbm/hr)
노심 입구 온도	564.5 °F
노심 출구 온도	622.0 °F
축압기 압력	585 psia
축압기 Gas/물의 양	616/1790 (ft ³)
안전주입 Setpoint	1555 (psia)
안전주입 지연 시간	50 (sec)
증기발생기 관막음률	8 (%)

a

표 2. 파단스펙트럼 분석 결과

결과 방출계수	최고피복재온도			최대국부 금속-물 반응		연료봉 파열	
	PCT (°F)	Time (sec)	Location (ft)	Reaction (%)	Location (ft)	Time (sec)	Location (ft)
1.0	1621	232	9.0	1.23	9.0	N/A	N/A
0.8	1626	234	9.0	1.68	7.75	163	7.75
0.6	1743	227	8.25	3.21	7.75	147	7.75
0.4	1855	226	8.25	5.43	7.75	118	7.75

e

표 3. 사고 진행 순서

사건 방출계수	SIT On (sec)	End of Bypass (sec)	Bottom of Core (sec)	SI Pumps On (sec)	SIT Empty (sec)
1.0	8.5	20.5	29.1	50.3	76.6
0.8	10.0	21.8	30.4	50.3	78.2
0.6	13.0	24.3	32.8	50.3	80.9
0.4	18.0	29.1	37.3	50.4	86.7

h

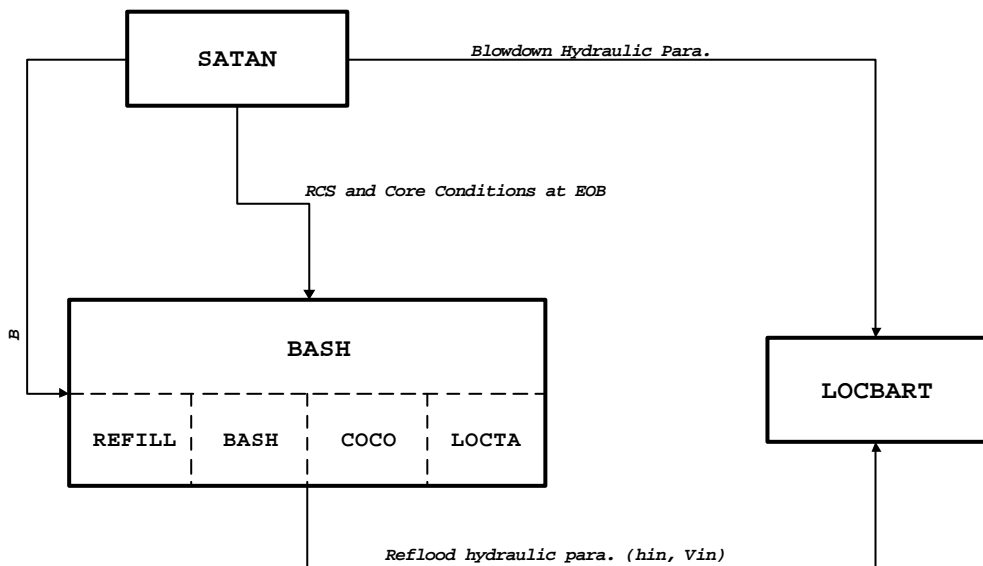


그림 1. "1981 EM with BASH"의 코드간 정보 전달 관계

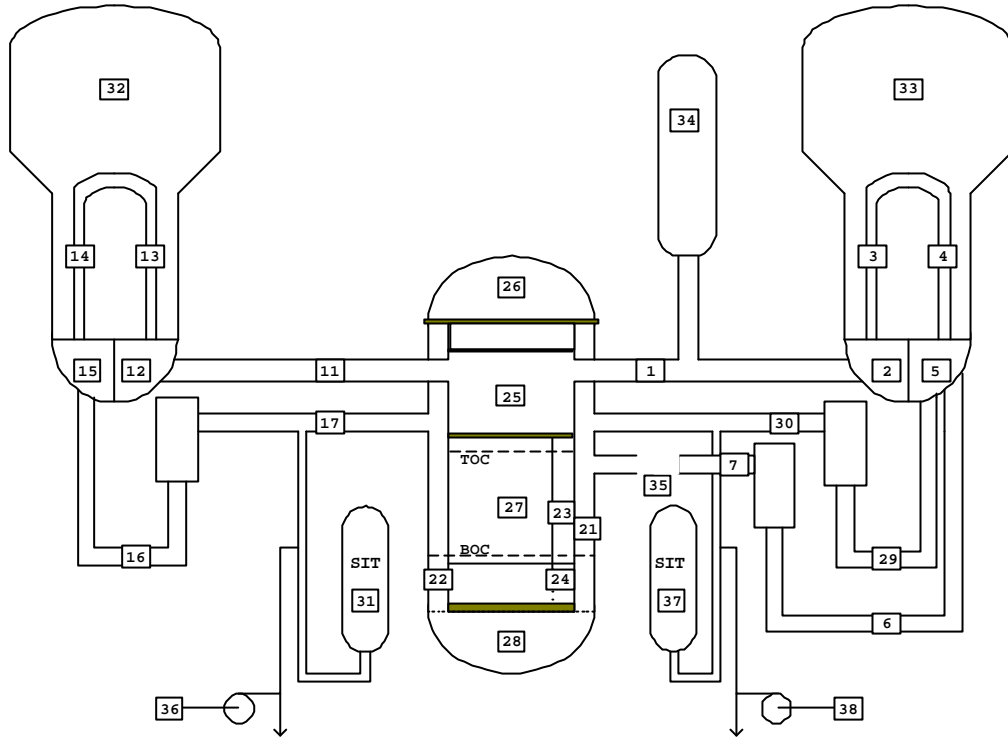


그림 2. 영광 3/4호기 해석을 위한 BASH Nodalization

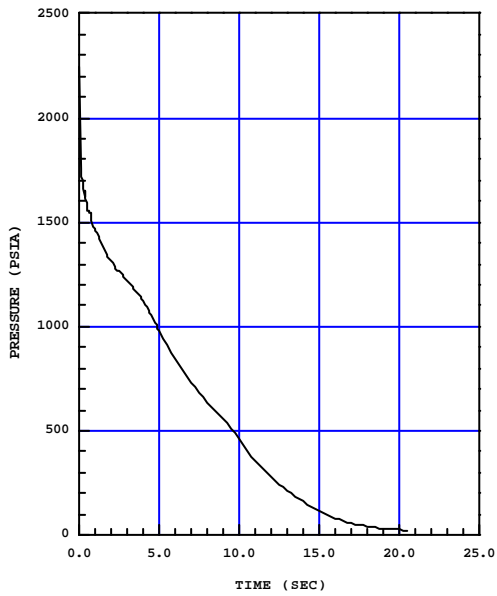


그림 3. 노심 압력 ($C_p=1.0$)

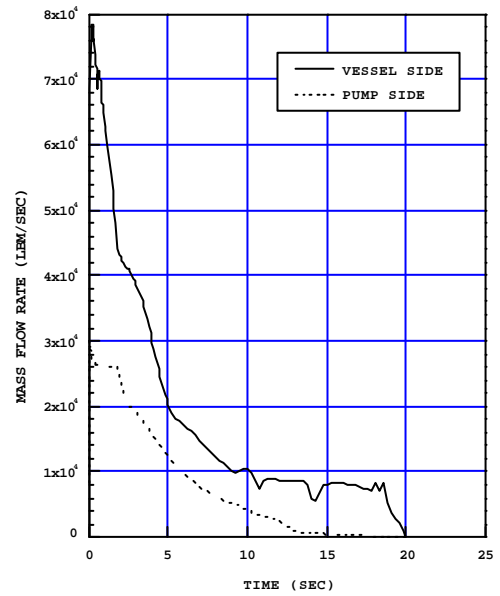


그림 4. 파단 유량 ($C_p=1.0$)

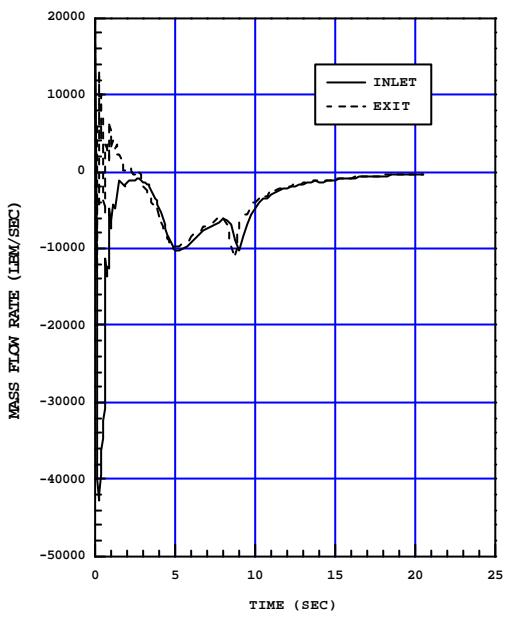


그림 5. 노심 유량 ($C_0=1.0$)

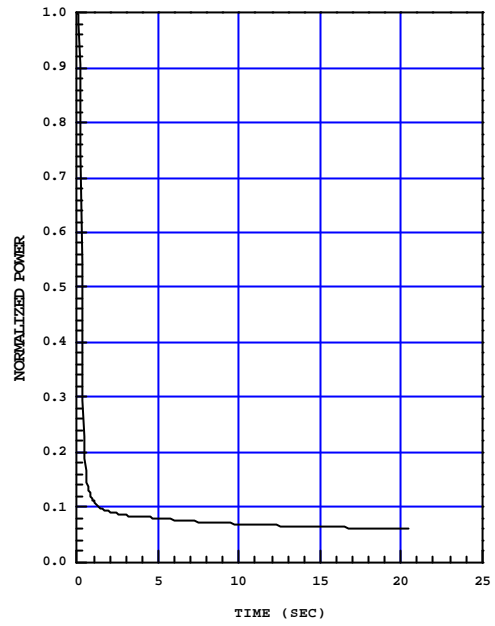


그림 6. 노심 출력 ($C_0=1.0$)

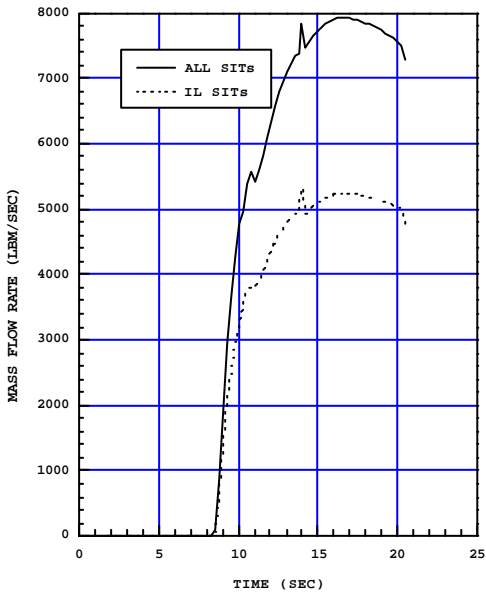


그림 7. 안전주입탱크 유량 ($C_0=1.0$)

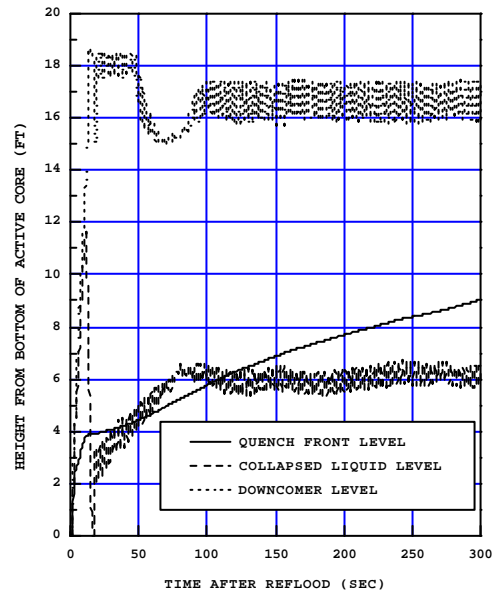


그림 8. 원자로용기 하향유로 및 노심 수위 ($C_0=1.0$)

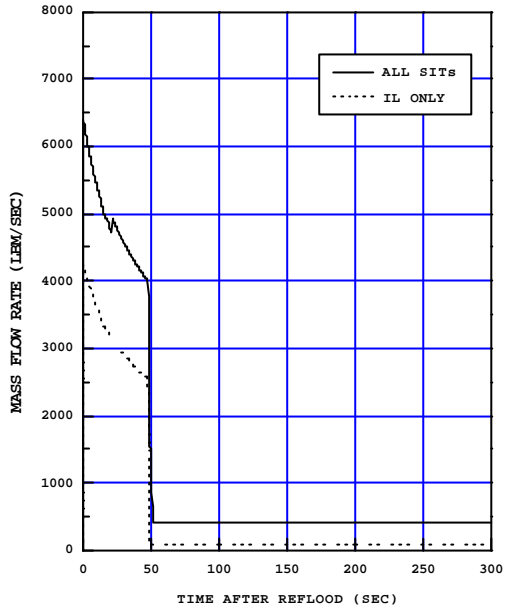


그림 9. 안전주입탱크 및 안전주입 계통 유량 ($C_0=1.0$)

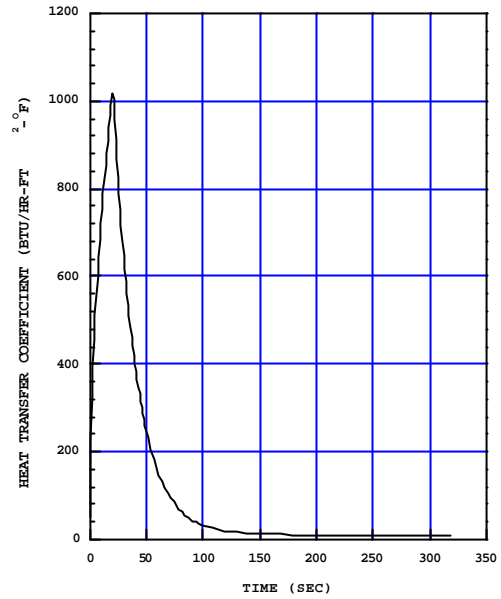


그림 10. 격납 건물 벽면 열전달 계수 ($C_0=1.0$)

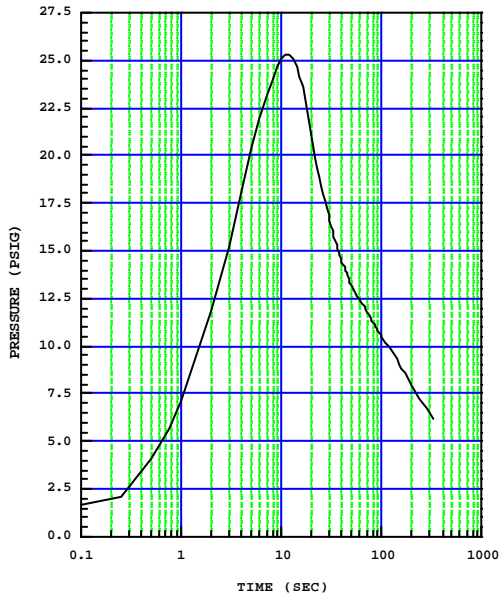


그림 11. 격납 건물 압력 ($C_0=1.0$)

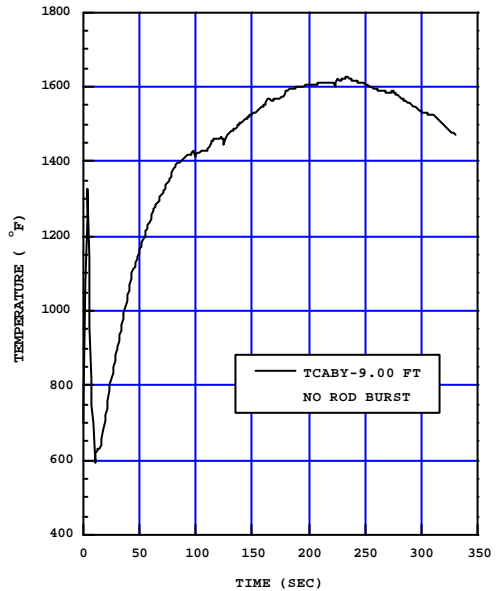


그림 12. 최고피복재온도 ($C_0=1.0$)