

## 냉각재상실사고해석의 최적 및 보수적 방법론의 결과 비교

이상중, 반창환, 정재훈, 최한림, 정법동  
한국원자력연구소

### 요 약

보수적 방법론(Evaluation Model)으로 계산된 냉각재상실사고 해석의 결과는 너무 비현실적이고 보수적이라는 문제점이 제기되어 왔으며, 이를 해결할 수 있는 방안으로 미국 원자력규제위원회(USNRC)에서는 1988년에 최적 방법론(Best Estimate Model)을 적용할 수 있도록 규정을 개정하였다. 이에 따라, 한국원자력연구소에서는 수정된 RELAP5/MOD3를 근간으로 대형냉각재 상실사고 최적 방법론을 개발하였다. 개발된 최적 방법론을 울진 3,4호기에 적용하여 해석을 수행하였으며 그 결과를 보수적 방법론으로 계산된 결과와 비교하여 주요 변수들의 거동을 분석하였다.

### 1. 서 론

1988년 미국 원자력규제위원회의 개정된 규정[1]에 따라 한국원자력연구소는 냉각재상실사고해석을 위한 최적방법론을 개발하였다. 이 방법론의 ABB-CE 형 발전소에의 적용성을 검토하기 위하여 한국형 표준 원전인 울진 3,4호기의 냉각재상실사고 해석을 수행하였다. 이 결과를 보수적 방법론으로 계산된 결과와 비교하여 주요 변수들의 현상을 파악하고 결과를 비교하는데 주안점을 두었다. 두 방법론은 입력자료 선정 방법이 다르고, 또한 최적 방법론으로 계산된 결과는 불확실성 평가를 수행하기 때문에 두 방법론의 결과를 직접 비교하기에는 무리일 수 있으나, 두 방법론의 해석 결과의 비교를 통하여 주요 변수들의 현상을 이해함으로써 보수적 방법론의 보수성을 검토하고 최적 방법론의 적용성을 평가하는데 도움이 될 것으로 판단된다. 최적 방법론의 해석 방법 및 결과는 참고문헌 2에 기술되어 있으며, 보수적 방법론의 해석 방법 및 결과는 울진 3,4 호기 최종 안전성 분석 보고서[3]에 기술되어 있다.

### 2. 해석 방법론

최적 방법론 계산은 RELAP5/MOD3.1을 근간으로 개발된 RELAP5/MOD3-K라는 전산 코드를 사용하였다[2]. 격납건물압력은 CONTEMPT4/MOD5[4]코드를 RELAP5/MOD3-K에 연결하여 계산하였다. 최적 방법론은 하나의 코드로 취출, 재충수 및 재관수의 현상들을 연속적으로 계산하며 비평형 방정식(Non-equilibrium field equations)과 비응축 가스 균형 방정식(Non-condensable gas balance equations)을 채택하고 있다. 보수적 방법론은 ABB-CE의 전산코드를 사용하였다. 최적 방법론과는 다르게 보수적인 방법론[5]은 각 현상마다 모사하는 코드가 따로 개발되었다. 즉, 취출 기간의 열수력학적 현상은 CEFLASH-4A가, 재충수 및 재관수 기간의 열수력학적 현상 및 격납건물 압력은 COMPERC-II가, 고온 핵연료 봉의 피복재의 온도 및 산화도의 거동은 STRIKIN-II가 계산한다. 보수적 방법론은 유체의 균일 분포(Homogeneous Fluid Distribution) 및 열적 평형을 가정하여 계산한다.

### 3. 분석 및 결과

각 방법론의 Nodalization은 그림 1, 2에서 비교하였다. 그림에서 알 수 있듯이 최적 방법론의 Node와 Flow path의 개수가 보수적 방법론보다 훨씬 많음을 알 수 있다. 이는 보수적 방법론 개발 당시에 모델이나 관계식 등의 정확하고 다양한 정보가 없었고 컴퓨터 용량의 한계 때문에 계산을 비교적 단순화시켜 수행하는데 비하여, 최적 방법론 개발에는 보수적 방법론 개발 이후 부터 많은 연구 및 실험을 통하여 정량화된 모델이나 관계식 등이 비교적 충분하고 컴퓨터 용량의

제약이 적기 때문에 좀 더 정확하고 실제 현상에 가깝게 계산하기 위하여 상세한 Nodalization을 채택하였다. 각 방법론에서 사용된 변수들의 초기 조건을 표 1에서 비교하였다. 최적 방법론에서는 계통 입력 자료는 제한값을 적용(Limit Value Approach ; LVA)하였고, 핵연료 관련 자료는 그 불확실성을 통계적으로 처리할 수 있도록 입력하였다. 그리고, 보수적 방법론에서는 계통 및 핵연료 관련 자료 모두 서로 보수적인 방향의 값을 사용하였다. 또한, 안전 계통의 단일 고장 가정은 두 방법론 모두 격납건물의 압력을 최소화하는 방향으로 선택되었다.

그림 3에서 11까지는 Cd = 1.0 순시 파단에 대한 주요 변수들의 거동을 비교하였다. 표 2는 스펙트럼 분석 결과로부터 얻어진 순시파단의 최대 피복재 온도를 나타내었다.

그림 3은 노심 출력의 변화를 비교하고 있다. 보수적 방법론에서는 moderator density vs. reactivity curve를 보수적으로 고려하여 사고 초기에 출력이 상승하다가 감소하도록 계산하는데 최적 방법론도 같은 moderator density vs. reactivity curve를 사용하였다. 보수적 방법론은 Kinetics로 출력을 계산하다가 잔열 수준에 도달하면 잔열로 출력이 대체되지만 최적방법은 처음부터 Kinetics 및 잔열을 동시에 고려한다. 따라서, 초기에는 최적 방법론의 출력이 크지만 몇 초 지나지 않아 최적 방법론의 잔열이 작기 때문에 전출력이 작아진다. 그림 4는 취출 기간동안 노심에서의 압력 강하를 나타내고 있다. 사고 초반 약 7초까지는 최적 방법론의 결과가 약간 낮게 유지되지만 그 이후에는 반대의 경향을 보이고 있다. 보수적 방법론에서는 열적 평형을 가정하기 때문에 가열된 물이 바로 증기가 되고 그 부피가 압력 상승에 반영되지만 최적 방법론은 열적 비평형으로 가열된 물이 증기가 되는데 시간적으로 지연이 되어 초기에는 압력이 낮지만 시간이 지나면서 증기화에 의한 압력 상승이 이루어지므로 압력이 오히려 높게 유지된다. 그리고, 보수적 방법론의 결과에는 14초 경에 안전주입탱크의 주입수에 의한 압력상승이 계산되나 최적 방법론에서는 그 현상이 나타나지 않는 것이 특징이다. 그림 5는 파단유량이다. 원자로 용기측에서는 모델차이에 의하여 보수적 방법론이 크게 계산된다. 14초 경에 보수적 방법론의 결과가 큰 이유는 안전주입탱크의 주입수에 의한 압력상승이 반영되기 때문이다. 펌프 측에서는 초기에는 거의 같게 계산되다가 5초 이후에 최적 방법론의 결과가 크게 나타나는데 이것은 최적 방법론에서는 파단된 저온관으로 방출되는 안전주입탱크의 주입수 양이 반영되었기 때문이다. 보수적 방법론에서는 파단부위의 안전주입탱크는 모사하지 않는다. 그림 6은 노심 유량을 비교한 것이다. 보수적 방법론으로 계산된 유량이 음의 방향으로 크게 증가하다가 양의 방향으로 회복되는 반면, 최적 방법론의 결과는 보수적 방법론의 결과보다는 서서히 음의 방향으로 증가하다가 양의 방향으로 회복도 서서히 이루어진다. 그림 7은 격납건물의 압력변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 최적 방법론의 계산 결과가 더 높으며 이는 재관수율을 증가시켜서 피복재 온도를 더 감소시키게 된다. 그리고, 최적 방법론의 계산은 200초에서 완료되었고 보수적 방법론의 계산은 500초까지 이루어 졌는데, 이는 그림 9와 10에서 알 수 있는 바와 같이 최적 방법론의 열전달 계수가 크게 계산되기 때문에 피복재 온도가 빨리 감소되며 피복재 온도가 충분히 감소되었음을 보여 줄 수 있는 시점이 훨씬 짧기 때문이다. 그림 8은 노심의 수위를 나타내고 있다. 보수적 방법론의 결과는 이상유체 수위를, 최적 방법론은 응축 수위를 보여주고 있다. 최적 방법론의 유체 수위가 응축 수위인데도 불구하고 보수적 방법론의 이상유체 수위보다 상당히 높게 계산됨을 알 수 있다. 이는 최적 방법론의 재관수율이 크게 계산되는 것을 의미한다. 그림 9는 고온점의 열전달계수를 비교한 것이다. 전반적으로 최적 방법론의 결과가 크게 계산된다. 재관수 기간의 열전달 계수는 두배이상 차이가 나기 때문에 최적 방법론의 피복재 온도가 보수적 방법론의 결과보다 훨씬 낮게 계산되며 빨리 급랭(Quenching) 된다. 그림 10에서는 두 방법론으로 계산된 최대 피복재 온도 (Peak Cladding Temperature ; PCT)를 직접 비교하였다. 최적 방법론의 피복재 온도는 취출 기간 동안 침두치를 보이다가 재관수 기간에는 더 낮은 값을 보이고 있는데 비하여 보수적 방법론에서는 반대로 재관수 기간에 침두치를 보이고 있다. 보수적 방법론이 재관수 기간동안 피복재 온도의 침두치를 갖는 이유는 각각의 현상을 모사할 때 과도한 보수성을 부여하여 높은 피복재 온도를 계산하도록 가정을 도입하였기 때문이다. 그림 11은 안전주입수의 유량을 비교한 그림이다. 보수적 방법론에서는 건전한 관에 주입되는 주입수만 모사하지만 최적 방법론은 파단관의 주입수도 모사하며 건전한 관에 주입되는 최적 방법론의 유량이 약간 크게 계산된다. 안전주입탱크

의 주입 시점은 그림 4의 압력 강하가 주입 압력에 도달되는 시간 차이에 의하여 최적 방법론의 결과가 약간 늦게 계산되며 고갈시점은 거의 같게 계산된다. 안전주입탱크 고갈후 안전주입펌프의 유량은 일정하게 유지된다.

두 방법론의 최대 피복재 온도에 대한 스펙트럼 분석 결과를 표 2에 비교하였다. 최적 방법론에 의한 결과는 코드가 계산한 최적값에 코드 및 발전소 적용 불확실성을 더하여 결정한 값이며 보수적 방법론에 의한 결과는 코드가 계산한 값을 그대로 사용하였다. 최적 방법론의 최대 피복재 온도는 취출 기간동안 Cd 0.8에서 발생하였으며, 보수적 방법론의 최대 피복재 온도는 재관수 기간동안 Cd 0.6에서 발생하였다. 그 차이는 107 K로써 이만큼의 여유도를 더 얻을 수 있었다.

#### 4. 결론

수정된 RELAP5/MOD3를 근간으로 개발된 대형냉각재 상실사고 최적 방법론을 올진 3,4호기에 적용하여 해석을 수행하였으며 그 결과를 보수적 방법론으로 계산된 결과와 비교하여 주요 변수들의 현상을 비교하고 결과를 검토하였다. 이를 통하여 주요 변수들의 현상을 파악하고 계산상의 보수성 및 결과의 예측성을 평가하였다. 예상하는데로 보수적 방법론의 결과가 최적 방법론의 결과보다 대체적으로 아주 보수적이었으며 이런 보수성의 결과로 최적 방법론의 최대 피복재 온도가 매우 낮게 계산됨을 알 수 있었다. 따라서, 최적 방법론을 냉각재상실사고 해석에 적용한다면 LOCA 여유도, 나아가서는 운전여유도를 크게 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. United States Code of Federal Regulations, Title 10, Section 50.46, "Acceptance Criteria for Emergency Core Cooling Systems for Light Water Reactors", 1988.
2. Large Break LOCA Realistic Evaluation Methodology, KAERI, To be issued.
3. 올진 3,4 호기 최종 안전성 분석 보고서, 한국전력공사.
4. NUREG/CR-4001, "Improvement of CONTEMPT4/MOD4 Multicompartment Containment System Analysis Program for Ice Containment Analysis", 1985.
5. CENPD-132, "Calculative Methods for the C-E LBLOCA Evaluation Model", 1985.

Table 1. General System Parameters and Initial Conditions for Evaluation Model and Best Estimate Methodology

Parameter	Best Estimate	Evaluation Model
Reactor Power Level, MWt	102 % of 2815	102 % of 2815
Peak Linear Heat Rate, W/cm	456	456 (13.9 kW/ft)
Axial Power Shape	Top Skewed Shape	Top Skewed Shape
Decay Heat	ANS 79 + 2 $\sigma$	ANS 71 $\times$ 1.2
RCS Flow Rate, kg/hr	55.11E+06	55.11E+06 (121.5E+06 lb/hr)
Core Flow Rate, kg/hr	53.48E+06	53.48E+06 (117.9E+06 lb/hr)
RCS Pressure, MPa	15.513	15.513 (2250 psia)
Core Inlet Temperature, K	569.0	569.0 (564.5 °F)
Core Outlet Temperature, K	601.8	601.8 (622.0 °F)
SI Tank Pressure, MPa	4.031	4.031 (585 psia)
SI Tank Gas/Water Volume, m <sup>3</sup>	15.348/52.613	17.3/50.69 (610/1790 ft <sup>3</sup> )
SI Tank Temperature, K	302.6	322.2 (120 °F)
Number of Steam Generator Tubes (Unplugged/Plugged)	7520/694	7520/694

Table 2. Licensing PCT of BE & EM Methodology from Break Spectrum Analysis

Break Cd (Guillotine Break)	Best Estimate, K		Evaluation Model, K	
	Blowdown	Reflood	Blowdown	Reflood
1.0	1337.23	982.56	1182.93	1447.78
0.8	<b>1350.23</b>	1126.56	1186.34	1450.56
0.6	1267.23	1189.56	1130.16	<b>1457.22</b>
0.4	1131.23	1188.56	984.16	1444.44

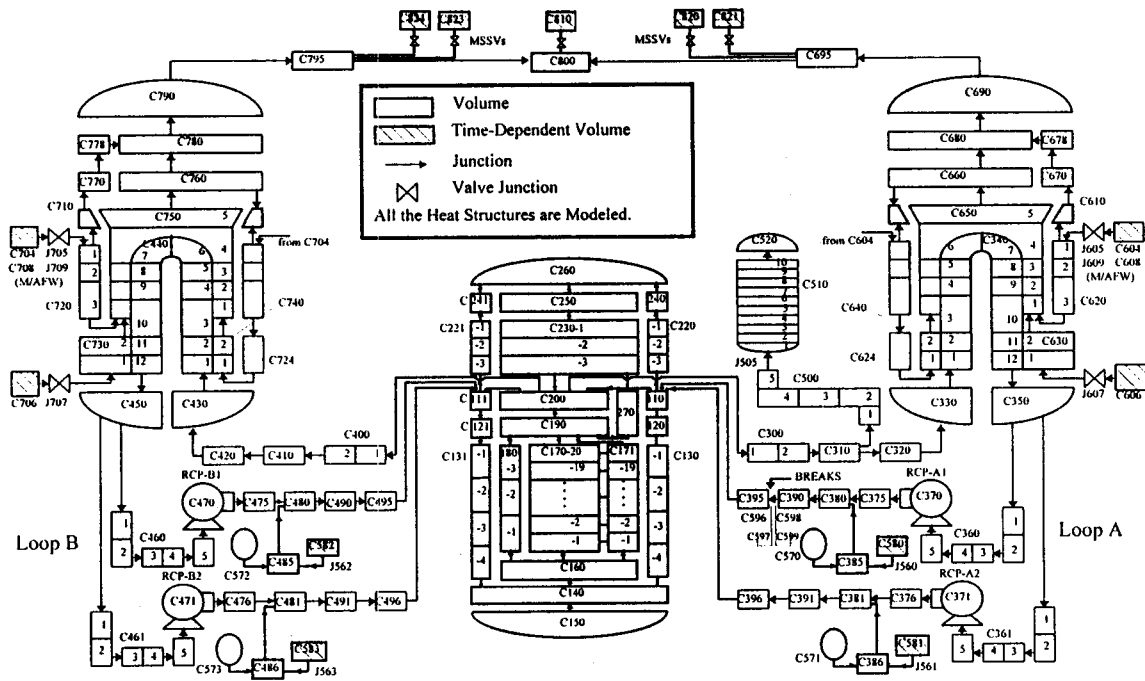


FIGURE 1 RELAP5 Nodalization for UCN 3&4 LBLOCA Analysis

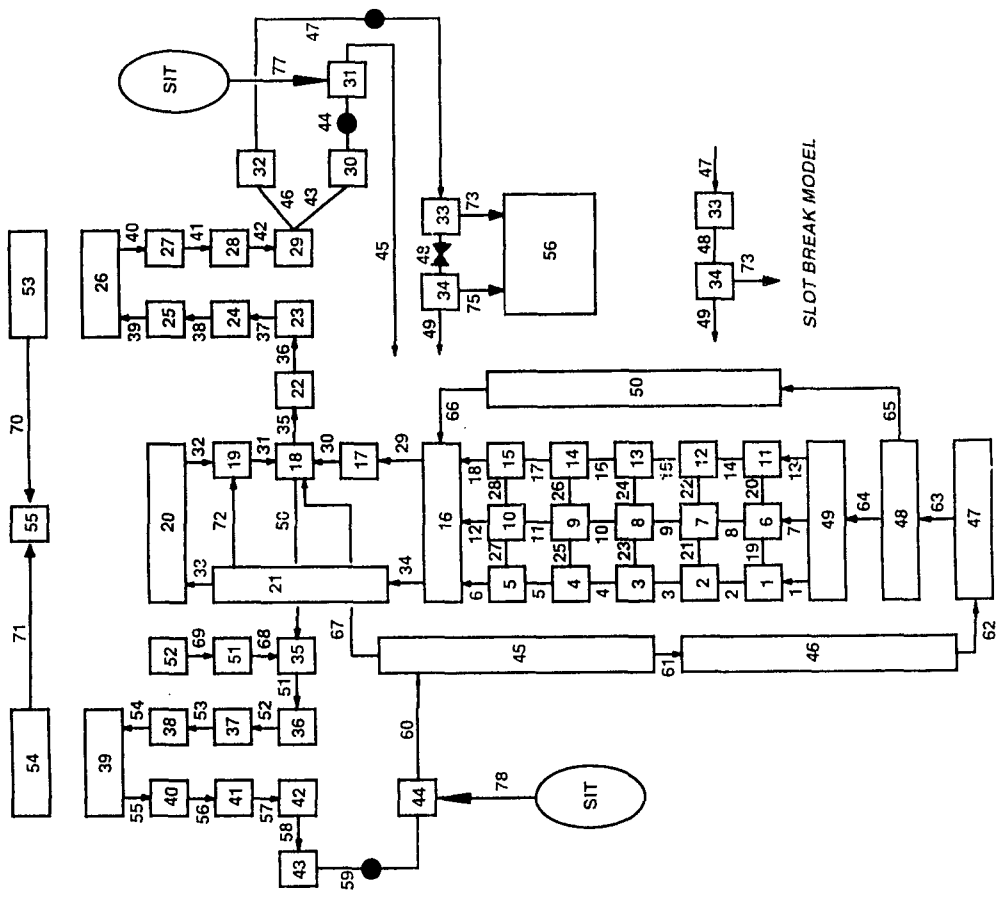


FIGURE 2 CEFLASH-4A LARGE BREAK NODE DIAGRAM

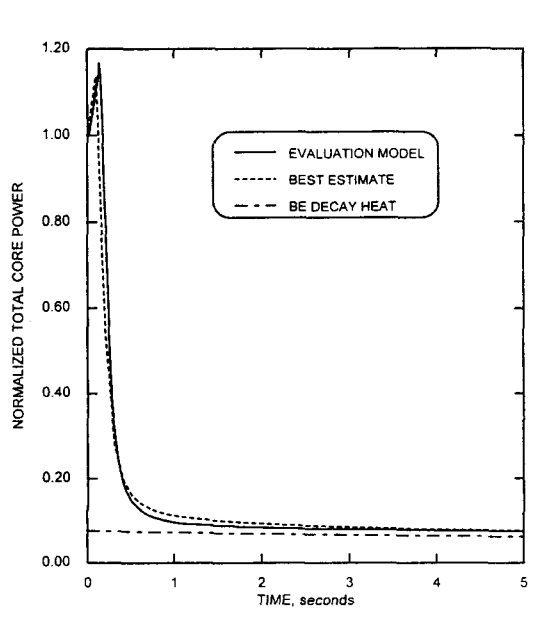


FIGURE 3 TOTAL CORE POWER

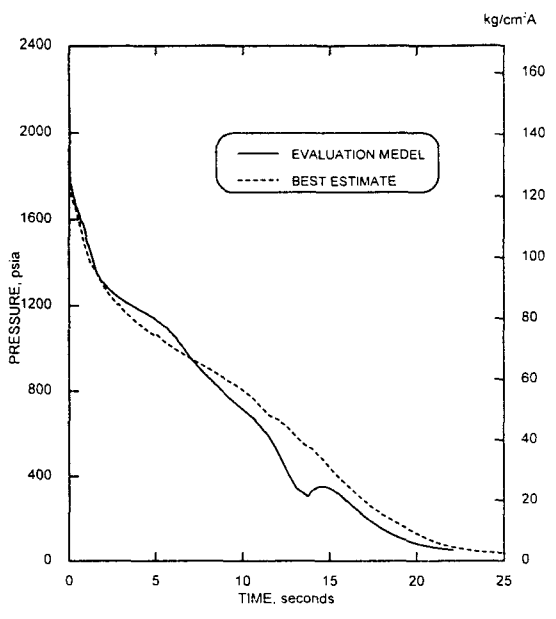


FIGURE 4 CORE PRESSURE

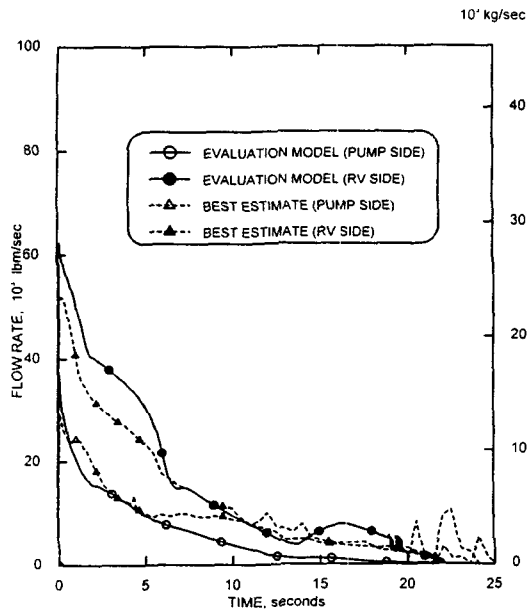


FIGURE 5 BREAK FLOW

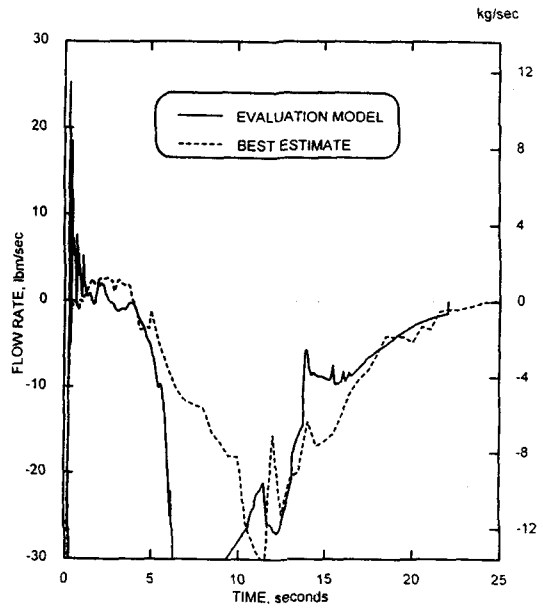


FIGURE 6 CORE FLOW AT HOT SPOT

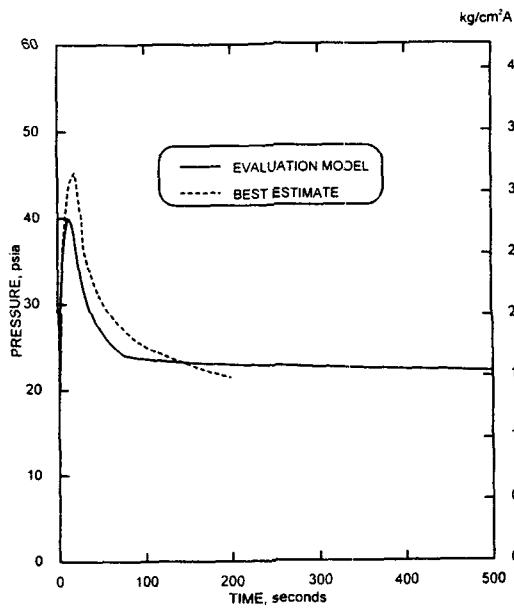


FIGURE 7 CONTAINMENT PRESSURE

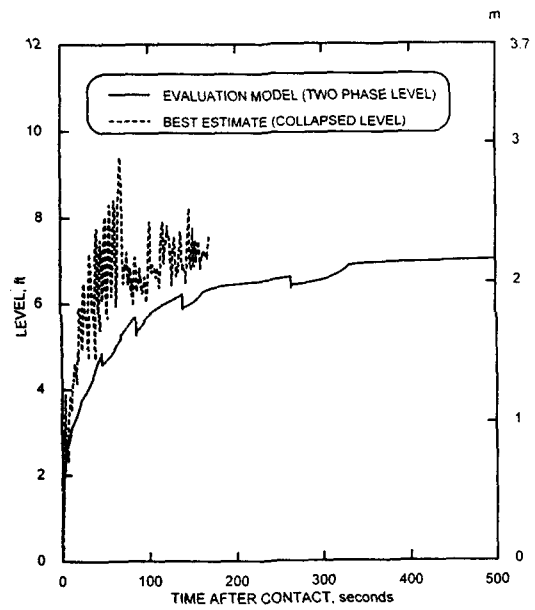


FIGURE 8 CORE WATER LEVEL

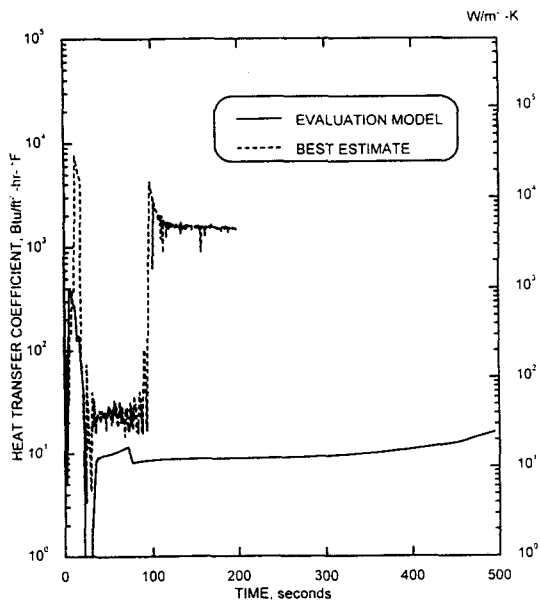


FIGURE 9 HEAT TRANSFER COEFFICIENT AT HOT SPOT

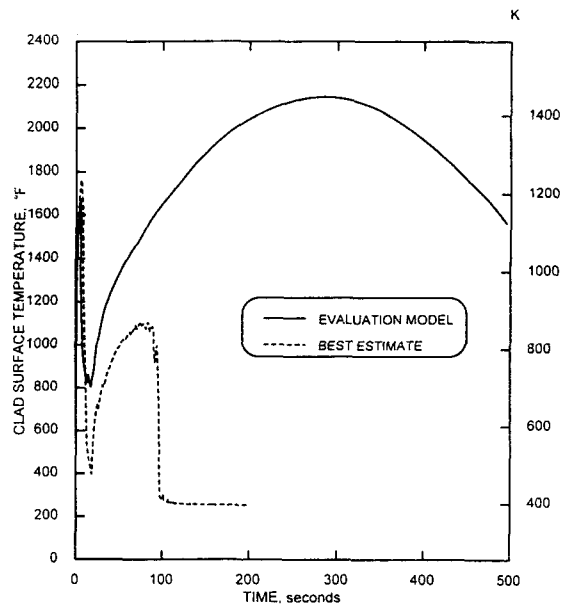


FIGURE 10 PEAK CLADDING TEMPERATURE

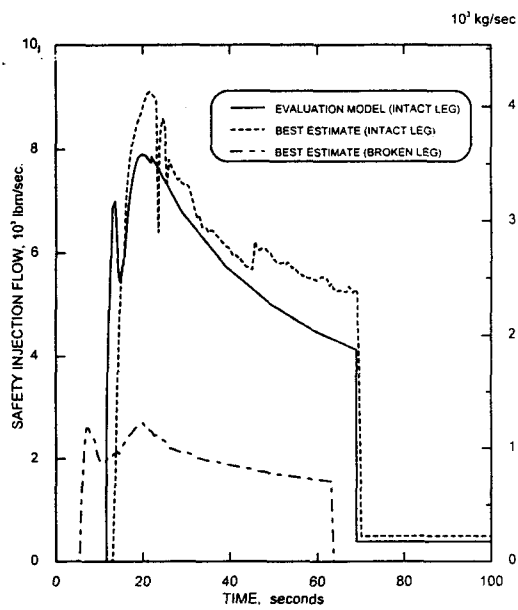


FIGURE 11 SAFETY INJECTION FLOW