2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

고리 1 호기 내환경 기기검증을 위한 소형냉각재상실사고의 질량 및 에너지 방출 해석

Mass and Energy Release Analysis on Small Break LOCA for Environmental Equipment Qualification of Kori NPP Unit 1

최한림, 한기수, 김철우, 박찬억, 김태윤*, 최철진, 서종태

한국전력기술㈜ 원자로설계개발단, 전력기술개발연구소*
대전광역시 유성구 덕진동 150
경기도 용인시 구성읍 마북리 360-9*

송동수, 이재용, 이창섭

한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

국내 가동 중 원전에 대한 주기적 안전성 평가의 원자력법 시행규칙이 제정 공포됨에 따라 국내 최초 원전인 고리 1 호기에 대해 내환경 기기검증을 위한 사고해석을 검토한 결과 소형 냉각재상실사고시 질량 및 에너지 방출해석이 추가 필요한 것으로 나타났다.

따라서 본 논문에서는 먼저 내환경 기기검증을 위한 소형 냉각재상실사고시 질량 및 에너지 해석방법론을 새롭게 확립하였으며, 이를 고리 1 호기 원전의 소형 냉각재상실사고 질량 및 에너지 방출해석에 적용하였다. 이러한 일련의 방법론 확립 및 적용 분석 결과, 소형 냉각재상실사고에 대한 내환경 기기검증용 질량 및 에너지 방출 해석방법론의 적용 가능성을 제시하였으며, 생산된 질량 및 에너지 방출 자료를 입력으로한 격납건물 압력 및 온도 해석 결과는 내환경 기기검증용 격납건물 압력-온도 이력곡선에 충분한 여유가 있는 것으로 나타났다

Abstract

According to make public Korean nuclear enforcement regulations of periodic safety review(PSR) for operating reactors, as a result of preliminary review for Kori nuclear power plant(NPP) unit 1 which is the first commercial operation plant in Korea, it goes to show that it is additionally necessary to analyze mass and energy(M/E) release on small break loss-of-coolant accident(SBLOCA).

Therefore the present paper establishes the methodology of SBLOCA M/E release analysis for environmental qualification of equipment (EEQ) and performs the SBLOCA M/E release analysis for Kori 1 NPP using the analysis methodology. As the results, it is provided that the applicability of the SBLOCA M/E release analysis methodology for EEQ is feasible and there is still enough margin to Pressure-Temperature(P-T) profile from the containment pressure and temperature(P/T) analysis results with SBLOCA M/E release data.

1. 서론

국내 가동 중인 원자력발전소의 안전성을 종합적으로 평가하고 발전소의 안전성을 유지하는데 필요한 적절한 조치가 취해지고 있는 지를 평가하기 위한 원자력법(제23조의 3항: 주기적 안전성 평가)이 개정 공포됨에 따라 고리 1호기 원전에 대한 주기적 안전성 평가(PSR)의 필요성이 대두 되었다.

원자력법 시행규칙 제19조의 2항(주기적 안전성 평가의 세부내용)은 가동원전의 안전성과 관련된 제반 사항을 포함하는 11개의 주요 안전인자로 구성 기술되어 있으며, 이들 중 '기기검증'에 관한 사항으로서 원자로 시설의 주요 안전 관련 설비가 설계 수명기간 동안에 의도된 안전기능을 수행할 수 있음이 검증 확인하기 위해 내환경 기기검증(EEQ)용 소형 냉각재상실사고(SBLOCA) M/E 해석이 추가 요구된다.

격납건물의 내환경 기기검증을 위한 설계기준사고 해석에서는 사고시의 질량 및 에너지(M/E) 방출량을 이용하여 격납건물 압력 및 온도(P/T)를 정량적으로 해석할 필요가 있다. 그러나 현재 EEQ M/E 방출 사고해석에 대해서는 해석방법에 대한 독립된 기준이나 검토지침 없이 EEQ을 위한 설계기준사고시 M/E 방출량 분석은 NUREG-0588[1]에 의거하여 수행되고 있다. NUREG-0588에 따르면 기기검증을 위한 설계기준사고의 M/E 방출 분석은 격납건물 건전성 기능(integrity function)설계를 위한 분석방법론을 준용할 수 있도록 명시하고 있다. 기기검증을 위한 설계기준사고는 크게 냉각재 상실사고와 주증기관 파단사고(main steam line break, MSLB)로 나눌 수 있으며, 고리 1호기 최종안전성분석보고서[2]에 의하면 격납건물 건전성 기능설계를 위한 대형 냉각재상실사고(large break LOCA, LBLOCA)의 M/E 방출 및 격납건물 P/T 해석 결과만 제시되어 있다. 더구나 내환경 기기검증을 위한 SBLOCA와 MSLB 시의 M/E 방출해석과 격납건물 P/T 분석은 안전성분석보고서에 기술되지 않고 있으나, 기계 및 전기 기기의 환경검증에 관한 원전 안전심사지침의 제3.11절에 설계상의 확인절차에 따라 안전성분석보고서에는 설계기준사고 후의 운전에 대한 기기의 환경설계 및 검증에 대한 내용이 기술되어 있다.

본 논문에서는 고리 1호기에서 수행되지 않은 내환경 기기검증용 소형 냉각재상실사고(SBLOCA) M/E 방출해석 방법론을 새롭게 확립하고, 확립된 방법론을 이용하여 가동원전인 고리 1호기를 대상으로 내환경 기기검증을 위한 격납건물의 P/T

평가를 위해 설계기준사고인 SBLOCA의 M/E 방출해석을 수행하였다.

2. 해석방법

2.1 내환경 기기검증을 위한 SBLOCA 질량 및 에너지 방출 해석 방법

본 SBLOCA M/E 방출해석에서는 EEQ을 위한 M/E 방출 해석이 기기의 성능설계관점의 입력으로 사용되기 때문에 최적평가모델의 전산코드를 사용하였으나 LBLOCA M/E 방출 해석방법과 같이 노심 안전성 관점의 SBLOCA 해석에 보수적 초기 및 경계조건, 해석가정 등을 고려한 해석방법을 채택하였다. 해석에 사용된 전산코드체계는 RELAP5/MOD3를 사용하여 개발한 비상노심냉각계통의 최적평가 방법론인 KREM(KEPRI Realistic Evaluation Model)[3]을 사용하였다. KREM의 주요 전산코드체계는 노심 및 계통 해석에 사용되는 RELAP5/MOD3[4]와 격납건물 열수력 해석에 사용되는 CONTEMPT4/MOD5[5][6]가 연계되어 실시간 연계해석이 가능하여 취출(blowdown) 및 취출후(post-blowdown) 기간의 일회 통합계산, 원자로냉각재계통(reactor coolant system, RCS)과 격납건물 열수력 현상의 동시 연계계산으로 LOCA 해석시 격납건물의 실제 배압 변화를 반영하는 특징을 갖고 있다.

또한 EEQ SBLOCA 질량 및 에너지 방출해석에서는 RELAP5/MOD3에 단순화된 장기냉각(long term cooling, LTC)모델을 추가하여 LOCA시 취출 및 취출후 단계뿐만 아니라 장기냉각 단계까지의 M/E 방출 통합해석 체계를 마련하였다. LTC 단계의 RCS 거동이 안정화되어 준평형상태로 진행된 후에는 RELAP5/MOD3로 해석할 경우 계산시간이 매우 길어질 뿐만 아니라 상세한 열수력 계산이 필요하지 않기 때문에 간략한 LTC모델을 개발하여 기존의 수계산에 의존하던 장기냉각단계의 M/E 방출 해석방법을 전산화시켜 RELAP5/MOD3에 단순화된 증기발생(boil-off) 모델로 추가하였다.

2.2 취출 및 취출후 단계 질량 및 에너지 방출해석 방법

냉각재상실사고시 재관수 기간(LBLOCA시 reflood) 또는 노심수위회복 기간(SBLOCA시 core recovery) 동안에 일차 계통에서 파단 부위를 통하여 방출되는 M/E는 격납건물의 배압 영향을 받음에 따라 일차 계통에서 방출되는 M/E 방출 계산과 격납건물 압력 계산을 서로 다른 전산코드를 사용하여 해석할 경우에는 계산 결과가 수렴할 때까지 여러번 반복 계산을 수행하여야 한다. 이에 따라 기존의 격납건물 기능설계를 위한 LOCA M/E 방출 해석에서는 계산의 복잡성을 피하기 위하여 재관수 기간 동안에 배압으로 작용하는 격납건물 압력을 보수적인 측면에서 일정한 압력으로 가정하여 분석한다.

계통 열수력학적 해석을 위해 사용된 RELAP5/MOD3은 원전의 정상상태 및 과도상태 분석을 위해 세계적으로 널리 사용되고 있는 노심 및 계통 열수력 최적해석용 전산코드로 일차원 2상 유동에 대한 비균질(non-homogeneous) 비평형(non-equilibrium) 모델로 각

상에서의 질량, 운동량 및 에너지 방정식 등 6개의 지배방정식으로 구성되어 있다.

본 M/E 해석방법 체계에서는 격납건물 압력을 직접 반영하기 위해 RCS의 열수력 해석코드인 RELAP5/MOD3와 격납건물 P/T 해석용 전산코드인 CONTEMPT4/MOD5를 결합한 통합 전산코드를 사용하고 있으며, 이의 연계 전산코드 체계에 대한 개념도가 그림 1에 주어져 있다.

접합 전산코드간의 자료 연계를 위해서는 먼저 격납건물 및 배관 파단면을 나타내는 경계 체적 및 유로가 정의되어야 하는데 이는 접합 전산코드 사용자 입력을 통해 지정될 수 있다. 파단면 유로를 통한 M/E 방출 자료는 격납건물 열수력 계산용 프로그램으로 전송되어 격납건물 열수력 거동을 계산하는데 사용되고 격납건물 배압 등의 주요 열수력 변수는 다시 계통 열수력 해석용 프로그램으로 전송되어 격납건물로 정의된 경계 체적의 열수력 변수를 갱신하도록 되어 있다.

계통 및 격납건물 열수력 자료 교환은 기본적으로는 매 계산 시간 및 단계마다 이루어진다. 격납건물 열수력 해석 중 내부 열구조물 표면에서의 증기 응축 열전달에 대하여 Tagami 상관식을 사용할 경우에는 취출기간 중에 격납건물 열수력 해석은 수행하지 않고 단지 M/E 방출 자료만을 수집하여 시간에 따른 표 형태로 기억한다. 따라서 이 기간 동안에는 격납건물 열수력 자료는 계통 해석용 프로그램으로 전송되지 않는다. 취출기간 종료 시에는 그 동안 수집된 M/E 방출 자료를 사용하여 취출기간 초기부터 종료 시점까지의 격납건물 열수력 해석을 수행하고 취출 종료 시점의 격납건물 열수력 자료를 계통해석 프로그램으로 전송한다. 취출 기간 이후에는 매 시간 단계마다 자료 교환을 수행함으로써 계통 및 격납건물 열수력의 연계 해석을 수행한다. 이렇게 다소 복잡한 연계 과정은 취출 기간 중의 전체 에너지 방출량이 주어져야만 계산이 가능한 Tagami 상관식을 취출 기간의 초기부터 적용하고자 고안된 것으로, 취출 기간 중에는 파단면을 통하여 임계 유동이 형성되는 점을 고려할 때 타당하다고 판단된다. 파단면에서 임계 유동이 발생하는 경우에는 파단면 유동의 상류에 해당하는 계통 배관의 열수력 자료는 하류인 격납건물 체적에 영향을 줄 수 있지만, 반대로 배압을 포함한 하류의 열수력 자료는 상류에 아무런 영향을 주지 않기 때문이다.

2.3 장기냉각 단계 질량 및 에너지 방출 해석방법

기존의 LOCA 장기냉각 단계의 M/E 방출해석에서는 긴 계산시간(약 10^6초)으로 인해 정교한 계통 모델로는 해석이 어렵고 상대적으로 에너지 방출 현상이 단순하므로 적절한 가정을 통하여 단순화된 수계산을 수행하였다. 본 해석방법론에서도 유사한 가정을 통해 단순화된 계통 모델을 수립하여 RELAP5/MOD3 전산코드 내에 관련 모델들을 편입하였다.

LTC 단계 M/E 방출모델은 LBLOCA시 재관수후 단계 종료(end of post-reflood, EOPR) 또는 SBLOCA시 노심 수위회복 단계 종료(end of core recovery, EOCREC)시점부터 10^6초까지 적용되며 보수적으로 다음과 같은 기본가정을 사용하였다.

1) 일차계통과 격납건물간 압력 평형상태
2) 일차계통 냉각재의 포화수 상태
3) 24시간내 붕괴열 이외의 모든 잔여 에너지 방출
4) 붕괴열을 포함한 모든 열원에 의한 증기발생

이상과 같은 가정 하에서 발생되는 증기량은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{m}_{stm} = \frac{q - M\dfrac{du_f}{dt}}{h_g - h_{in}}$$

$$(\dot{m}h)_{release} = \dot{m}_{stm} h_g$$

여기서,

$\dot{m}_{stm}$ = 증기 방출유량
q = 붕괴열, 일차 및 이차계통 잔여에너지
$M\dfrac{du_f}{dt}$ = 압력변화로 인한 일차계통 냉각재 내부에너지 변화율
h_g = 격납건물 압력에서의 포화증기 엔탈피
h_{in} = 노심으로 주입되는 안전주입 또는 재순환냉각수의 엔탈피
$(\dot{m}h)_{release}$ = 총 에너지 방출률

위와 같은 기본 모델에 따라 붕괴열, 일차계통 냉각재 과포화에너지 방출률, 일차계통 금속에너지 방출률, 이차계통으로부터의 열전달 등 모든 발생 가능한 열이 노심의 포화냉각수에서 증기가 발생하는데 사용하도록 가정하는 증기발생(boil-off) 모델을 개발하였다. 이는 증기발생량을 실제보다 크게 가정하는 보수적인 접근 방법이다. 또한 노심의 냉각수를 모두 포화냉각수로 가정하여 증기발생량이 증가하도록 하였다. 안전주입유량에서 증기유량을 제외한 나머지는 집수조로 유출되며, 이때의 유출수 엔탈피는 안전주입수 엔탈피로 가정하였다. 재장전수저수조 수위 감시논리를 개발하고 수위 감소에 따라 안전주입 모드가 재순환 모드로 전환되는 시점을 결정할 수 있도록 하였다. 또한 재순환 모드 개시여부에 따라 안전주입수 엔탈피를 다르게 고려할 수 있도록 하였다. 고리 1호기 해석에서는 재순환모드 개시후 안전주입수가 잔열제거계통 열교환기를 거쳐 RCS에 주입되므로 열교환기 출구 엔탈피로 일정하다고 가정하였다. 붕괴열을 제외한 계통내의 나머지 모든 열은 사고후 24시간 내에 격납건물로 모두 일정하게 방출되는 것으로 가정하였다. 단 운전원에 의해 RCS 냉각이 시작되면 증기발생기의 터빈우회밸브 또는 대기방출밸브를 통해 증기가 방출되므로 이 시점부터는 증기발생기 잔여에너지에 의한 격납건물로의 증기방출은 고려하지 않는 것으로 가정하였다.

그림 2는 LTC 단계의 전산코드 연계도이다. 표 1은 현행 격납건물 기능설계에서의 LTC 단계의 M/E 방출 모델과 본 연구에서 개발된 EEQ LOCA M/E 방출 모델의 비교표이다.

결과적으로 기존 방법론에서 복잡한 별도 수계산에 의한 M/E 방출 계산과정이 RCS 열수력 해석용 전산코드에 직접 모델됨으로써 감압에 의한 증기 발생, 안전주입수량, 재순환 모드에서의 안전주입수 엔탈피 등 격납건물 열수력 조건에 따라 계통 열수력 조건을 실제적으로 반영할 수 있게 하였다. 따라서 장기냉각 단계에서의 M/E 방출 계산과 격납건물 열수력 해석의 분리 처리과정에서 수반되는 보수적인 가정들이 제한되었다.

RELAP5/MOD3 전산코드내 M/E 방출 계산용 장기냉각 모델을 사용하기 위하여 다음과 같은 계통 변수들의 초기조건이 필요하다.

1) 장기냉각 단계 시작시점
2) 일차계통 냉각재 재고량 및 에너지
3) 일차계통 금속 에너지
4) 증기발생기 이차계통 냉각재 에너지
5) 증기발생기 이차계통 금속에너지
6) 안전주입펌프에 의한 총 안전주입수량

2.4 격납건물 압력 및 온도 해석 모델

격납건물 P/T 해석에 사용되는 CONTEMPT4/MOD5는 BNL(Brookhaven National Laboratory)이 개발한 다격실, 다유로(multi-compartment, multi-junction) 격납건물 열수력 해석용 전산코드로서, 가압경수로형 원자로의 격납건물 열수력 계산을 위해 필요한 기본적인 모델에 관해서는 현행 격납건물 기능설계를 위한 격납건물의 P/T 계산에 사용되는 인허가용 전산코드인 CONTEMPT-LT[7]과 동일한 특징을 가지므로 열수력 모델상의 인허가성은 확보된 것으로 판단된다.

CONTEMPT4/MOD5의 질량 및 에너지 보존식에 사용된 기본 가정은 다음과 같다.

1) 과냉각수 영역(liquid pool)과 증기 영역(atmosphere)에 의한 격실 모델
2) 증기 영역에서의 액체 및 증기 상태의 물과 비응축 가스의 균일 혼합(homogeneous mixture) 가정
3) 과냉각수 영역에서의 액체상태 가정

또한 영역간 상호작용에 관해서는 다음과 같은 동일한 모델을 사용하고 있다. 즉,

1) 각 영역 사이의 열 및 물질 전달 모델
2) 증기 영역에서의 de-entrainment 모델
3) 과냉각수 영역에서의 비등(boiling) 모델

그 밖에 능동형 열제거원 및 파단부 방출수에 관해서는 다음과 같은 모델을 사용하고 있다.

1) 격납건물 살수 효율 모델
2) 팬냉각기(fan cooler) 열제거 모델

3) 질량 및 에너지 방출표에 의한 파단부 질량 및 에너지 방출 모델
4) 파단부 방출수의 순간기화(flashing) 모델

열전달 구조물 표면에서의 열전달에 관해서는 Tagami/Uchida 상관식을 포함하여 난류에 의한 자연대류 열전달, 복사 열전달, 과냉각 물로의 열전달, 단열 등의 모델이 제공되므로 취출 기간 중에 Tagami 상관식 그리고 취출후 기간 중에는 Uchida 상관식을 적용할 수 있다. 본 논문의 해석방법에서는 CONTEMPT4/MOD5의 모델에 취출 기간 중에는 선형 보간법을 적용하였으며 취출 시작시점에서의 최소 열전달 계수를 사용하였다. Tagami 열전달 계수는 취출 기간 중의 강제 대류열전달 시에만 적용되고, 취출 종료시점 이후에는 Uchida 상관식이 적용된다. 또한 Tagami 상관식으로부터 Uchida 상관식으로 갑자기 이행될 때 발생하게 되는 열전달 계수의 불연속성을 완화하기 위해 연결곡선을 도입하였다.

앞에서 설명한 M/E 방출 해석시의 격납건물 응축 열전달 모델은 LBLOCA 시에 적용하는 일반적인 모델이다. 그러나 SBLOCA M/E 방출 해석에서는 LBLOCA 현상처럼 취출기간과 취출후기간의 구분이 뚜렷하지 않을 뿐만 아니라 주증기관 파단사고시의 격납건물 내에서의 열수력적인 현상과 유사하게 파단유량이 계속적으로 감소하여 취출기간이 매우 길어지므로 강제 대류의 Tagami 응축 열전달 상관식을 적용하기는 어렵다. 따라서 본 논문의 기기검증용 SBLOCA 질량 및 에너지 방출 해석을 위해 Tagami 상관식보다는 자연대류의 Uchida 응축 열전달 상관식을 적용하여 격납건물 열수력 해석을 수행할 수 있도록 조정하였다.

3. 해석 가정 및 초기조건

3.1 고리 1 호기 EEQ SBLOCA M/E 방출해석 기본 가정

RELAP5/MOD3 전산코드는 소형 냉각재상실사고는 물론 대형 냉각재상실사고를 포함한 가상사고 및 원전 과도현상에 대하여 해석 결과의 신뢰성이 확보되어 있다고 볼 수 있다. 따라서 격납건물 기능설계를 위한 LOCA M/E 방출 해석에 적용되고 있는 다음과 같은 보수적인 기본 가정을 내환경 기기검증용 M/E 해석에도 사용하였다.

1) 최대 원자로냉각재계통 압력 및 온도
2) 최소 원자로냉각재계통 초기 유량
3) 최대 증기발생기 압력
4) 최대 가압기 및 증기발생기 수위
5) 원자로냉각재계통 체적 공차 및 열팽창 고려
6) 원자로냉각재계통 배관에서의 최소 마찰계수 및 형상손실계수 적용
7) 최대 배관 파단 면적
8) 소외전원 상실
9) 단일고장에 따른 비상노심냉각계통과 격납건물 살수 영향 고려

10) 증기발생기 동시 격리 가정
11) 보조급수 모델 배제
12) 최소 증기발생기 전열관 관막음율

해석에서 고려된 에너지원은 다음과 같다.
1) 102%의 노심출력에 원자로냉각재펌프 출력 추가
2) ANS73 표준붕괴열에 불확실도 추가
3) 최대 핵연료 초기 저장에너지
4) 금속 저장 에너지
5) 이차계통 에너지

3.2 초기 조건 및 주요 입력변수

고리 1 호기 EEQ SBLOCA M/E 방출 해석에서 고려된 해석범위는 파단 위치는 저온관(RCP discharge leg), 고온관(hot leg), 원자로냉각재펌프 흡입관(RCP suction leg, 이하 흡입관) 파단이며, 파단크기는 각 파단위치에 전형적인 소형파단 크기인 3 인치, 4 인치, 6 인치, 8 인치 직경의 Slot 파단으로 국한하였다.

그림 3 은 고리 1 호기 EEQ SBLOCA M/E 방출 해석에 사용된 RELAP5 노드구성을 보여주고 있으며, RCS 의 주요 입력조건으로 발전소 초기 조건의 불확실성 등을 반영하여 LOCA M/E 방출해석을 위한 보수적인 발전소 초기조건을 선택하였으며, 이를 표 2 에 요약 기술하였다. 격납건물의 주요 입력조건으로 격납건물의 초기 및 경계조건은 발전소 관련 자료[2]를 주로 사용하였으며, 표 3 에 요약하였다.

4. 해석 결과

앞 절에서 설명한 전산코드와 보수적인 기본가정을 사용하여 M/E 방출 해석을 위한 원전 정상상태 모의해석을 수행하였으며, 그 결과 초기조건의 목표값과 잘 일치함을 표 2 에 보여주고 있다.

고리 1 호기의 저온관, 고온관, 흡입관에 대해 각각 3 인치, 4 인치, 6 인치, 8 인치 직경의 파단사고를 가정하여 LOCA M/E 방출을 해석하였으나, 과도상태 해석 결과의 주요 열수력학적 거동 분석은 6 인치 저온관 파단사고에 대해서만 간략하게 논의하고, M/E 방출 해석은 파단크기와 파단위치별로 분석결과를 기술하였다. 본 해석방법론에 따라 LTC 단계 모델이 적용되는 시점 즉 6 인치 파단사고의 노심수위회복후 단계 종료 시점은 750 초로 가정하였다.

저온관 6 인치의 소형 파단사고의 이력은 표 4 에 나타나있으며 주요 열수력학적 거동은 그림 4 에서 그림 7 에 나타나 있다. 그림 4 에서 0 초에 저온관 파단이 일어나 LOCA 가 발생하면 파단면을 통한 M/E 방출로 인하여 RCS 의 압력은 빠르게 감소한다. 그림에서 약 56

초 이후부터는 증기발생기 2 차측 압력이 일차계통 압력보다 높게 유지되므로 증기발생기 2 차측이 M/E 방출의 열원으로 작용하게 된다. 저온관 6 인치 파단사고 초기에 RCS 는 높은 압력을 유지하고 있기 때문에 파단부를 통해 과냉각된 물이 임계유동상태로 방출된다. 그림 5 는 저온관 소형파단 사고시 RCS 으로부터 파단부를 통해 방출되는 질량유량을 보여주고 있다. 사고 후 156 초에 원자로용기 측의 방출유량은 순간적으로 최대가 되는데, 이는 축압기 유량과 저압안전주입유량이 동시 주입되고 있기 때문이다. 그림 6 에서 보는 바와 같이 저온관과 상부공간(upper plenum)에 고압안전주입이 먼저 된다. 저온관 압력이 축압기(accumulator) 주입압력인 4.8263MPa 에 도달되면 축압기로부터의 물이 저온관으로 공급되나 약 170 초에 완전히 고갈된다. 약 151 초에 RCS 압력은 저압안전주입펌프의 운전영역으로 들어감에 따라, 상부공간으로 저압안전주입유량이 공급된다. 그림 7 은 하향유로와 노심의 수축수위를 나타내었다. 수축 수위는 약 150 초 동안 사고초기에 파단면을 통한 냉각수 방출로 빠르게 감소하다가 축압기 냉각수가 공급된 직후에 최소가 된 후 빠르게 회복된다.

그림 8 은 본 논문의 해석방법론으로 계산된 6 인치 SBLOCA M/E 방출 결과를 나타내었다. 사고발생 후 약 100 초까지는 파단부를 통하여 많은 액체가 방출되므로 M/E 방출량의 진동이 적지만 이후 LTC 단계 모델이 적용되는 시점까지는 파단부를 통하여 2 상유체가 간헐적으로 방출되므로 M/E 방출량의 진동이 매우 심하다. LTC 단계 모델이 적용되면 파단크기나 파단위치별로 M/E 방출량 크기가 크게 달라지지 않는 것으로 나타났고 그림에서 재순환작동신호가 발생한 이후에는 M/E 방출량의 급격한 하락이 발생한다. 앞에서 여러 경우를 요약하기 위해 그림 9 는 6 인치 파단의 위치별 LOCA M/E 적산량을 나타내었다. 사고후 약 400 초까지의 초반 과도상태기간에서는 저온관, 흡입관, 고온관 파단위치 순이나, 이후에는 고온관이 저온관과 흡입관보다 적산량이 큼을 알 수 있다. 그림 10 은 소형파단의 대표적인 위치인 저온관 파단에 대해 파단크기별 적산 M/E 방출량을 보여주고 있다. 사고 초반 약 1000 초까지 보면 파단크기가 클수록 M/E 방출량이 많음을 알 수 있다. 그러나 급격한 과도상태 이후 LTC 단계의 전 기간 동안은 원전의 한정된 총에너지가 방출됨에 따라 한 점으로 수렴됨을 그림 9 와 그림 10 에서 보여주고 있다.

본 해석방법으로 계산된 SBLOCA M/E 방출량은 파단 위치와 파단 크기별로 정리되어 Architecture Engineer(A/E)의 격납건물 P/T 분석을 위해 제공되었다. 그림 11 과 그림 12 에서 보면 SBLOCA 의 격납건물 P/T 분석 결과 압력-온도 이력곡선에 훨씬 못 미치고 있어 충분한 내환경 기기검증의 설계여유도가 있음을 보여주고 있다.

5. 결론

본 논문에서는 격납건물 기능설계 관점의 압력 및 온도 해석을 위한 질량 및 에너지 방출 해석방법을 참조하여 계통 열수력 해석 전산코드인 RELAP5/MOD3 에 장기냉각 모델을 추가한 내환경 기기검증용 냉각재상실사고 해석방법을 확립하였으며, 이를 고리 1 호기 소형 냉각재상실사고의 질량 및 에너지 방출 해석에 적용한 결과, 내환경 기기검증을 위한 소형

냉각재상실사고 질량 및 에너지 방출 해석에의 적용 가능성이 있는 것으로 나타났다. 또한 이 해석방법으로 산출한 질량 및 에너지 방출자료를 사용하여 격납건물의 압력 및 온도를 해석한 결과, 내환경 기기검증용 격납건물 압력-온도 이력곡선은 여유도가 있다.

6. 감사말씀

본 연구는 한국수력원자력주식회사 정비기획처의 주관으로 '고리 1 호기 내환경검증 체계 구축(1 단계) 용역 설계'를 위해 한전전력연구원의 위탁용역 사업으로 수행되었음을 밝히며, 이에 감사말씀 드립니다.

7. 참고문헌

[1] USNRC, Interim Staff Position on Environmental Qualification of Safety-Related Electrical Equipment, NUREG-0588, Rev.1, July 1981.

[2] KEPCO, Final Safety Analysis Report for Kori-1, Amendment 89, 5.28, 1998.

[3] 한국수력원자력주식회사, 비상노심 냉각계통의 최적평가 방법론 특정기술 주제보고서 (Rev.0), TR-KHNP-0002 제 1 권 및 제 2 권, 제 1 권: 대형 냉각재상실사고에 대한 최적평가 방법론의 기술, 제 2 권: 웨스팅하우스 3-루프 발전소에의 적용, 2002.12.

[4] USNRC, Fletcher, C.D. and Schultz, "RELAP5/MOD3 Code Manual," NUREG/CR-5535, Aug. 1991.

[5] USNRC, CONTEMPT4/MOD4: A Multicompartment Containment System Analysis Program, NUREG/CR-3716, March 1984.

[6] USNRC, CONTEMPT4/MOD5: An Improvement to CONTEMPT4/MOD4 Multicompartment Containment System Analysis Program for Ice Containment Analysis, NUREG/CR-4001, Sep. 1984.

[7] USNRC, "CONTEMPT-LT/028 A Computer Program for Predicting Containment Pressure Temperature Response to a Loss-of-Coolant Accident," NUREG/CR-0255, EG&G, 1979.

표 1 장기냉각단계의 질량 및 에너지 방출 모델 비교

구분	기존 방법론		본 해석방법론
	주요 변수	계산 모델	
압력 평형화 단계 (Equilibration)	재관수후 단계 종료 시점	증기발생기 압력=격납건물 배압	파단면 방출 에너지 (Long Term(LT) M/E ≥ RELAP5)
	에너지 방출률 (P_{back}>P_{EOPR})	장기냉각 이전 단계에 가정된 일정한 배압이 재관수후단계 종료시점(EOPR)의 격납건물 압력보다 높을 경우 감압에 의한 에너지 방출 모의	격납건물 열수력 연계, (P_{back}=P_{EOPR})
안전주입 단계	격납건물 배압	재순환단계 시작시점의 일정한 격납건물압력 가정	격납건물 배압 반영
	감압에 의한 증기 발생	재순환단계 이전에 1차계통 잔여에너지 방출 및 일정 증기 생성률 가정	배압 변화에 따른 증기 생성률
	안전주입수 유출량	안전주입 – 증기 발생률	좌동
	유출수 엔탈피	안전주입수 입구 엔탈피	좌동
	붕괴열	1971년 표준 1차 계통 포화 가정에 따른 증기발생 모델 (CONTEMPT/LT-028 전산코드 내 1차계통 모델)	좌동
	1차 계통 금속 및 2차계통 에너지	사고후 24시간 내 격납건물로 완전 방출 (현열로 고려)	사고후 24시간 내 격납건물로 완전 방출 (증기발생)
	계산 방식	수계산	RELAP5/MOD3 전산코드 내 LT M/E 모델
재순환 단계	재순환단계 시작시점	RWST empty (일정한 안전주입 및 살수유량 가정)	재장전수조 저수위 신호 감시
	격납건물 배압	N/A	격납건물 배압 변화 반영
	감압에 의한 증기발생	N/A	배압 변화에 따른 증기 생성률
	안전주입수 유출량	N/A	안전주입 – 증기 발생률
	유출수 엔탈피	N/A	집수조 온도 조건 고려
	붕괴열	1971년 표준 (1차계통의 포화상태 가정에 따른 증기발생 모델)	좌동
	1차계통 금속 및 2차계통 에너지	사고후 24시간 내 격납건물로 완전 방출 (현열로 고려)	사고후 24 시간 내 격납건물로 완전 방출 (증기발생)
	계산 방식	수계산	RELAP5/MOD3 전산코드 내 LT M/E 모델

표 2 SBLOCA M/E 방출 해석을 위한 원자로냉각재계통의
초기 조건 설정값 및 정상상태 해석값

원전 변수	목표 초기값	해석값
노심 열출력, MWt	1723.5 * 1.02 = 1757.97	1723.5 * 1.02 = 1757.97
가압기 압력, MPa	15.872	15.872
가압기 수위, %	69.9	69.93
원자로냉각재계통 유량, kg/sec	4115.8	4115.0
노심 우회유량 분량, %	-	4.474
원자로냉각재계통 평균온도, K	578.04	575.39
증기발생기 압력, Mpa	5.695	5.695
증기발생기 수위, m	13.90	13.75
주증기관 유량, kg/sec	483.23	483.23
급수 온도, K	496.48	496.48
증기발생기 순환비	-	3.77

표 3 고리 1호기 SBLOCA M/E 해석을 위한 격납건물 계통의 해석값

항목	해석값
순자유체적, m^3 (ft^3)	41059.39 ($1.45x10^6$)
초기 내부 온도, K (^oF)	322.04 (120)
초기 내부 압력, MPa (psia)	0.1048 (15.2)
초기 상대습도, %	50 (50)
외부 온도, K (^oF)	322.04 (120)
외부 압력, MPa (psia)	0.10135 (14.7)
외부 열전달 계수, J/s-K-m^2 (Btu/hr-^oF-ft^2)	11.35654 (2)
살수계통 초기설정치, MPa (psig)	0.2599 (23)
살수 유량, m^3/s (gpm)	0.11365 (1500)
살수 온도, K (^oF)	322.04 (120)
팬냉각기 작동 시작/정지 온도, K (^oF)	383.15/322.04 (230/120)

표 4 저온관 소형파단 사고 이력 및 경계조건 (6인치 파단)

사건	시간 (초)
저온관 6" 소형 파단사고발생	0
가압기 저압력 원자로 정지 설정치 도달	6.05
안전주입 설정치 도달	7.2
원자로 정지 및 터빈 정지, 소외전원 상실 발생	11.05
주급수 펌프 정지	13.06
안전주입 시간	34.21
축압기 물 주입 시간 (파단측, 비파단측)	122.60, 122.63
축압기 물 주입 종료 시간 (파단측, 비파단측)	168.81, 169.495
노심수위 회복 종료 (재관수후단계 종료 또는 장기냉각단계 시작)	750
ANS73 붕괴열 (multiplier 1.2 $\rightarrow$ 1.1)	1000
안전주입수원 전환 (RWST $\rightarrow$ Sump)	1609.90
운전원 대기방출밸브 개방	1800

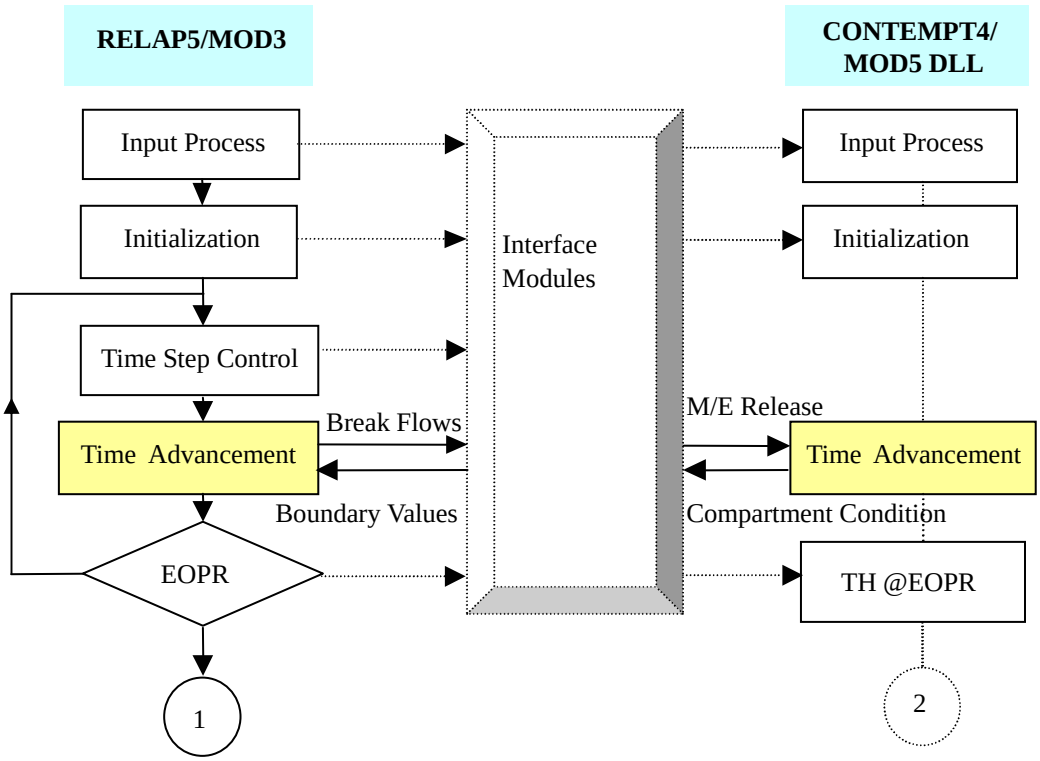

그림 1 계통 열수력 및 배압 연계 해석 체계

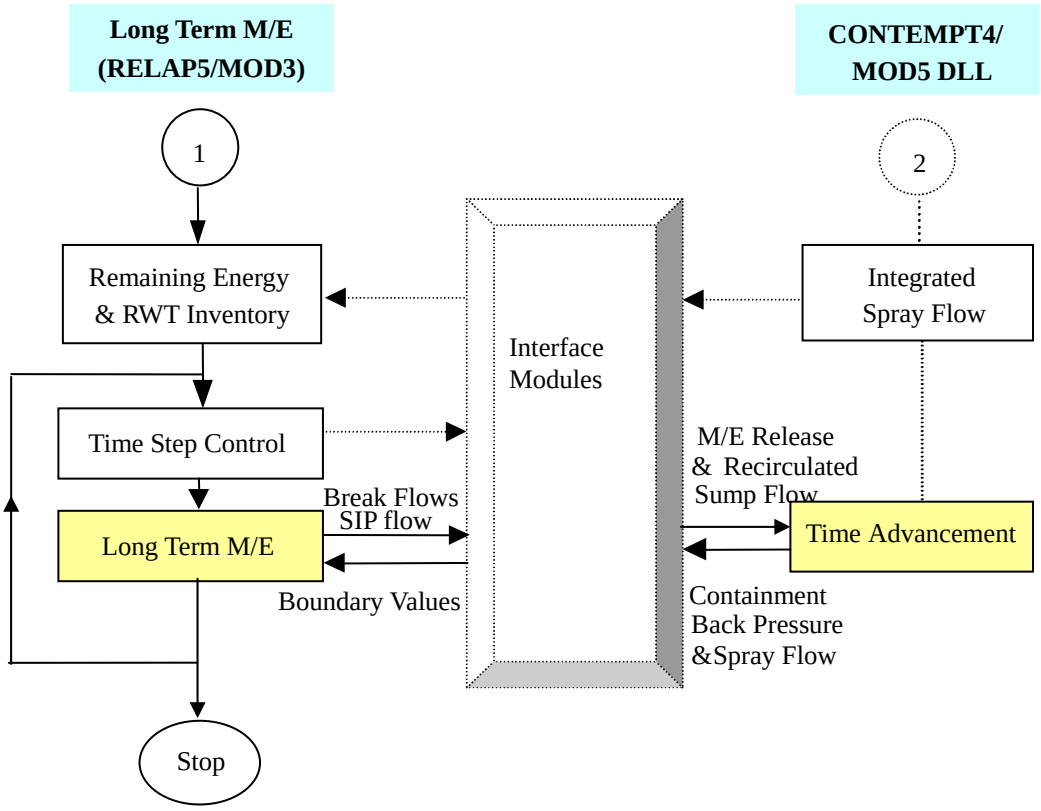

그림 2 장기냉각 단계의 질량 및 에너지 통합 해석 체계

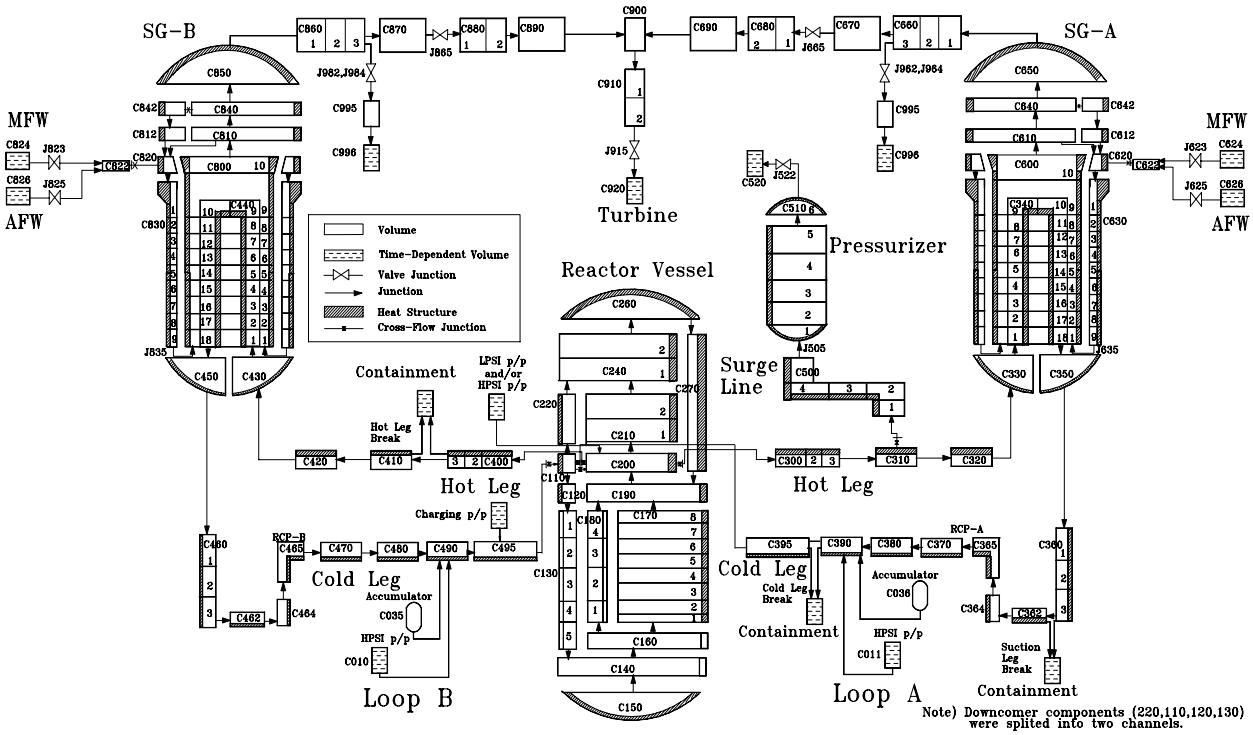

그림 3 고리 1호기 EEQ SBLOCA M/E 방출 해석을 위한 RELAP5 Nodalization

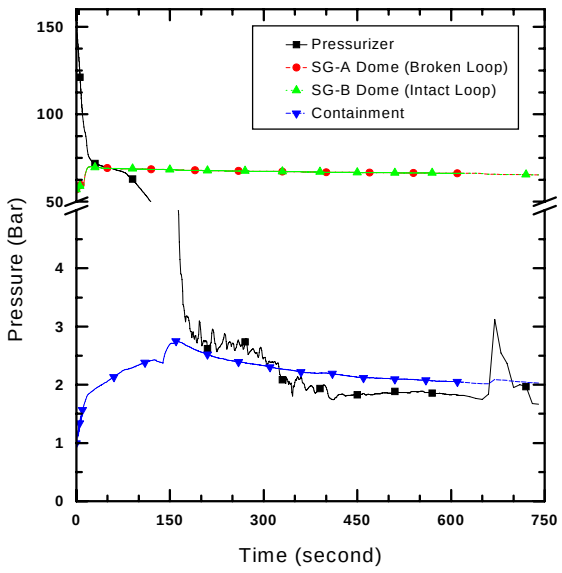

그림 4 가압기, 증기발생기, 격납건물 압력
(저온관 6" SBLOCA)

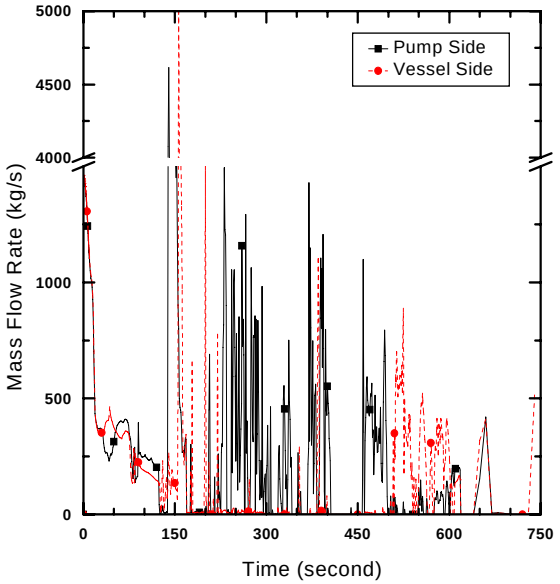

그림 5 파단부를 통해 방출되는 질량 유량
(저온관 6" SBLOCA)

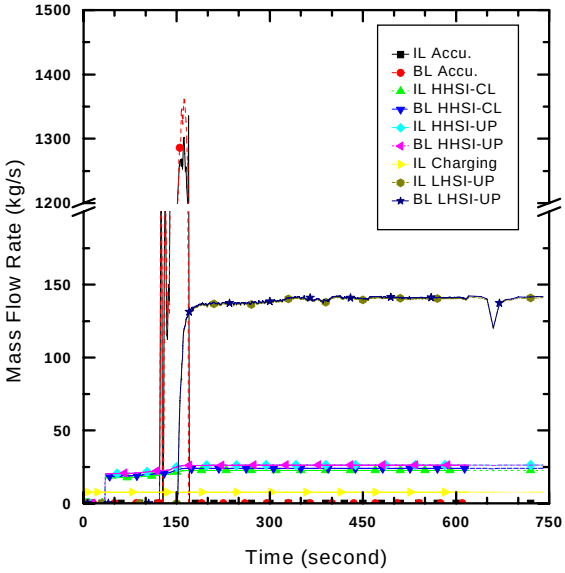

그림 6 안전주입계통의 안전주입유량
(저온관 6" SBLOCA)

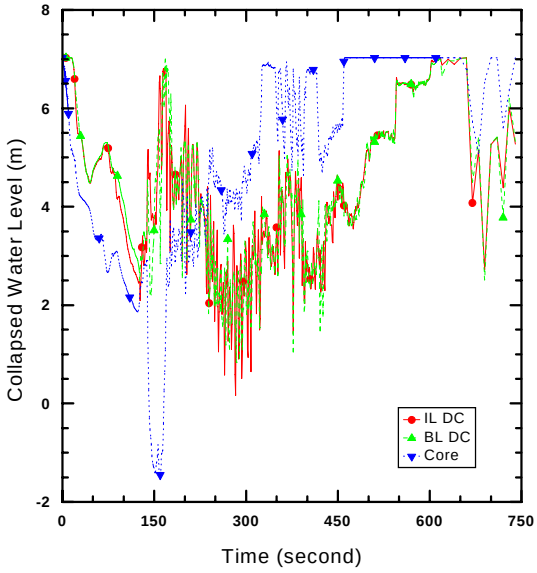

그림 7 하향유로와 노심의 수축수위
(저온관 6" SBLOCA)

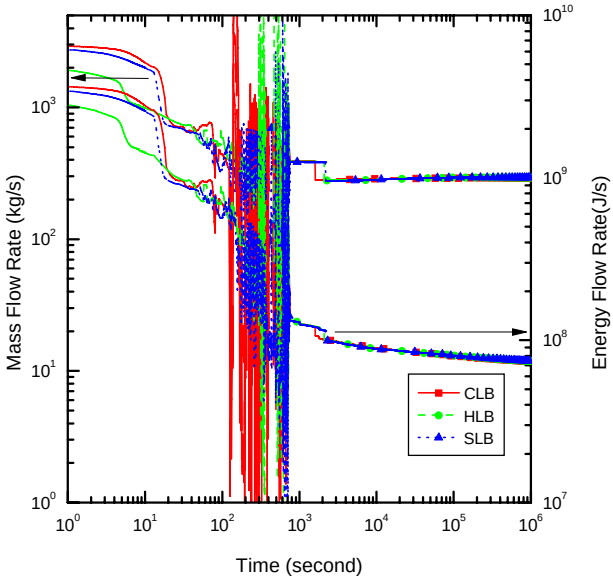

그림 8 6" SBLOCA M/E 방출량

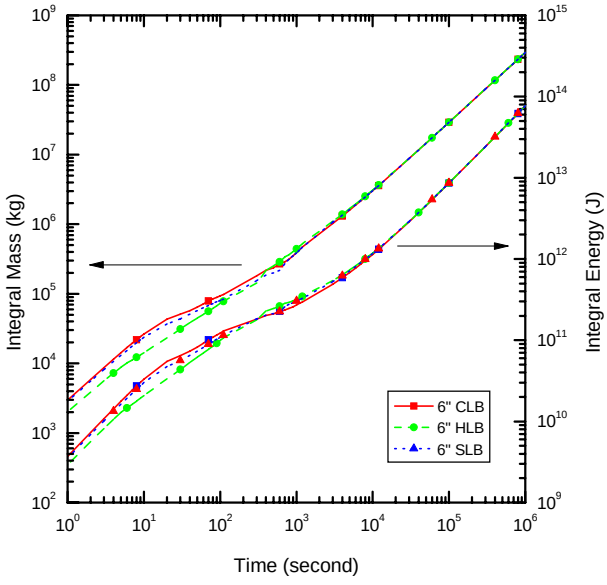

그림 9 SBLOCA의 적산 M/E
(6"파단의 각 위치별)

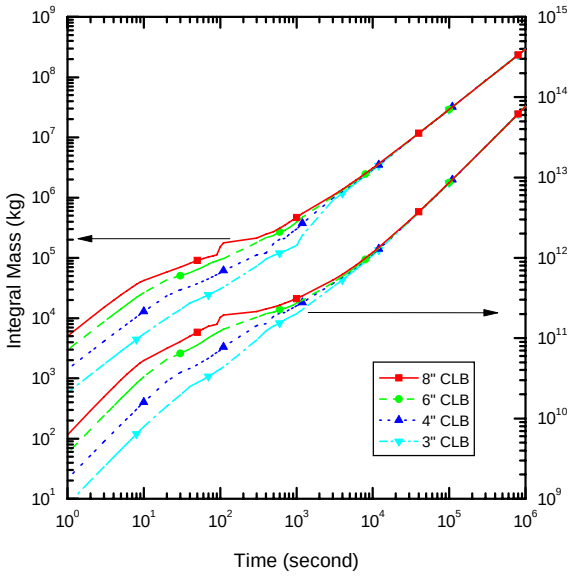

그림 10 SBLOCA의 적산 질량 및 에너지
(저온관 파단의 각 크기별)

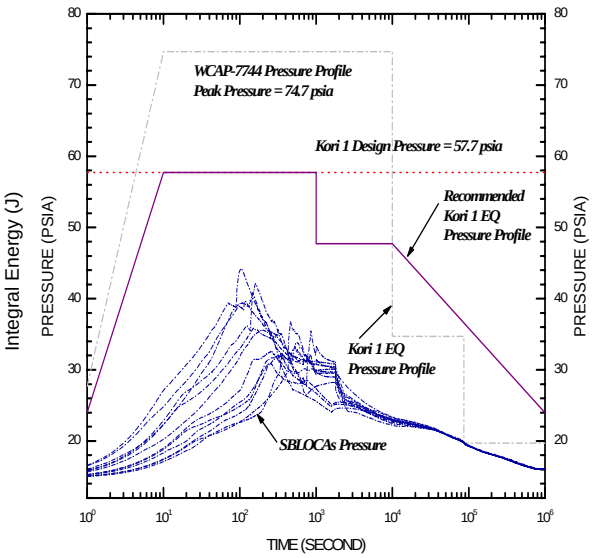

그림 11 고리 1호기 압력이력 곡선
및 격납건물 압력 해석결과

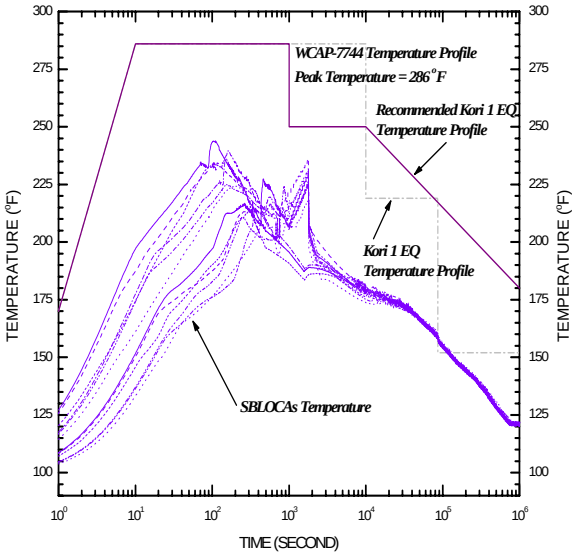

그림 12 고리 1호기 온도이력 곡선
및 격납건물 온도 해석결과