

## RETRAN-3D를 이용한 한국표준형원전의 주증기관파단사고 인허가 해석방법론 구현 및 타당성 평가

### Tentative Approach to Implement Licensed Methodology for Steam Line Break Analysis using RETRAN-3D for KSNP

진영권, 이철신, 김신환, 최철진, 이상용, 서종태  
한국전력기술주식회사  
대전시 유성구 덕진동 150

#### 요약

한국전력기술주식회사는 기존 인허가 전산코드인 CESEC-III를 대체할 수 있는 RETRAN-3D 전산코드를 이용한 Non-LOCA 사고해석방법론 개발을 수행 중에 있다. 이의 일환으로 본 논문에서는 한국표준형원전의 주증기관파단사고를 대상으로 KSNP NSSS 계통의 특성과 열유체 실험 결과, 그리고 해당 규제요건 등을 반영한 기존의 사고해석 인허가 방법론을 RETRAN-3D에 접목하여 예비계산을 수행하고 CESEC-III 계산결과와 비교를 통해 열수력 거동을 분석하였다. 해석 결과, 계통의 일부 열수력 거동 등에서 뚜렷한 차이를 보이는 것도 있으나 이는 두 전산코드에 구현된 서로 다른 모델의 특성에 기인한 것으로 파악되었으며 각각의 결과에 대한 정당성을 확인하였다. 본 비교 계산 등을 통해 RETRAN-3D 사고해석 결과에 대한 타당성 평가가 수행되면 보다 현실적이고 신뢰할 수 있으며 또한 충분히 보수적인 방향으로 사고해석방법론이 정립될 수 있을 것이다.

#### Abstract

KOPEC has been developing the Non-LOCA safety analysis methodology using RETRAN-3D to replace the current methodology which uses CESEC-III as a licensed code. This paper presents the interim steam line break analysis results by using the RETRAN-3D code with the current licensed methodology which incorporates the KSNP NSSS design features, thermal-hydraulic experimental results and the regulatory requirements specific to steam line break analysis. The comparison between the results from RETRAN-3D and CESEC-III shows some noticeable differences in some thermal-hydraulic transient behaviors. The differences were found to be attributed to the unique and different modeling features implemented into each code. Through the comparison and evaluation of the two results, it is expected the new safety analysis methodology could be established in a more reliable, realistic, and sufficiently conservative way.

## 1. 서론

본 논문은 최적열수력 전산코드인 RETRAN-3D Mod. 03 [1]을 이용하여 한국표준형원전 (Korea Standardized Nuclear Power Plant; KSNP)의 증기관파단사고 (Steam Line Break; SLB) 예비 해석을 수행하고 사고 이후 노심 및 열수력 거동의 타당성을 분석한 결과를 기술하고 있다. 주증기관파단사고 해석방법으로 KSNP의 핵증기공급계통 (Nuclear Steam Supply System; NSSS) 계통의 특성과 열유체 실험 결과, 그리고 해당 규제요건 등을 반영한 기존의 사고해석 인허가 방법론을 RETRAN-3D에 접목하여 예비계산을 수행하였으며 Non-LOCA 사고해석 인허가 코드인 CESEC-III [2] 계산결과와 비교를 통해 열수력 거동을 분석하였다. 증기관 파단 사고는 주증기계통의 배관이 파단되는 사고로 정의되며, 파단부위를 통한 증기 방출로 인하여 원자로냉각재계통과 증기발생기로부터 에너지가 과도하게 제거된다. 그 결과 원자로냉각재계통의 온도와 압력 및 증기발생기의 압력이 감소한다. 이러한 냉각은 감속재 및 도플러 부반응도계수에 따른 반응도쇄환효과로 인해 노심내에 정반응도가 삽입되는데, 이로 인한 노심의 재임계도달 여부 및 핵연료성능평가와 안전정지여유도, 그리고 소외선량평가가 수행되어야 한다. 안전성분석보고서의 증기관 파단사고 해석에서는 원자로정지 후 재임계 도달 가능성이 가장 높은 경우와, 핵연료 피복재의 성능저하의 가능성이 가장 큰 경우 또는 제한구역경계에서 방사선량이 최대가 되는 경우의 파단사고를 선택한다. 증기관 파단면적은 주증기격리밸브 (MSIV) 상류의 증기관이 양단으로 파단될 때 최대가 되며 가장 큰 냉각효과를 가져온다. 한국표준형원전에는 각각의 증기발생기 증기 노즐에 일체형 유량제한기 (integral flow restrictor)가 설치되어 있다. 각 증기관의 최대 유효 증기방출면적은 유량제한기의 목 면적(throat area)에 의하여 제한된다. 증기관파단사고의 또다른 특징은 파단측과 건전한측 증기발생기의 냉각차이로 인해 비대칭적 노심 열수력거동을 나타내며, 이는 노심내 공간출력분포의 편차를 야기한다. SLB 사고시 비대칭 냉각효과를 고려하여 적합한 반응도쇄환효과를 모사하기 위해서는 3차원 노심 동특성계산이 필요하지만 KSNP의 경우 현재 점동특성 모델을 이용하여 노심의 동적거동을 예측하고 재임계도달 여부를 평가하고 있다. SLB 사고 이후 증기발생기 저압력에 따른 주증기관격리신호에 의해 건전한측 증기발생기가 격리되고 파단측 증기발생기가 고갈되면 계통의 냉각은 중지된다. 안전주입 작동신호 발생 후 안전주입펌프에 의해 주입된 붕소는 노심반응도를 감소시키며 사고결과를 완화시킨다.

## 2. 해석가정 및 방법론

### 2.1. KSNP 해석방법론

KSNP의 사고해석방법론의 경우 안전해석 전산코드인 CESEC-III를 이용하여 증기관파단사고를 모델링하고 사고 후 과도상태 동안의 열수력 거동을 분석한다. CESEC-III 전산코드에 구현된 증기관파단사고 모델의 주요 특성과 KSNP SLB 사고해석에 적용된 안전해석방법론

의 주요 특징은 다음과 같이 요약할 수 있다 [3].

### 2.1.1. 파단부 모델링

증기관 파단면적은 냉각효과를 가장 크게 하고 노심의 정반응도 삽입을 최대로 하기 위해 주증기격리밸브 상류의 증기관이 양단으로 파단 되는 것을 가정한다. 한국표준형원전에는 증기발생기 증기 노즐에 일체형 유량제한기 (integral flow restrictor)가 설치되어 있다. 주증기관이 양단으로 파단될 경우 각 증기관의 최대 유효 증기방출면적은 유량제한기의 목 면적(throat area)에 의하여 제한되며, 증기관 단면적의 약 30%에 해당되는  $0.94 \text{ ft}^2$  이다. CESEC-III의 경우 SLB 사고시 주증기관 배관의 기하학적 모델을 고려하지 않고 있으며 이로 인해 배관의 저항으로 인한 유체의 압력강하가 고려되지 않는다. 따라서 SLB 해석결과에 의하면 주증기격리신호에 의해 격리밸브가 닫히기 전까지 파단측과 건전한측 증기발생기로부터의 증기 방출량이 동일하며 이는 파단유량을 극대화시키기 위한 보수적인 가정이다.

### 2.1.2. 노심동특성 모델

SLB 사고시 비대칭 냉각효과를 고려하여 적합한 반응도궤환효과를 모사하기 위해서는 3차원 노심 동특성계산이 필요하지만 KSNP의 경우 현재 점동특성 모델을 이용하여 노심의 동적거동을 예측하고 재임계도달 여부를 평가하고 있다. 감속재온도계수 (Moderator Temperature Coefficient; MTC)는 냉각재 밀도변화에 따른 반응도 변화의 척도이며 SLB 사고시 파동에 따른 재임계도달 관점에서 가장 중요한 변수이다. MTC는 주기말 붕소농도가 가장 낮은 시점에서 가장 큰 음의값을 가지게 되며 또한, 원자로정지후는 냉각재온도가 감소함에 따라 중성자 감속효과보다 붕소의 흡수효과가 작기 때문에 MTC도 진출력에 비해 감소하게 된다. SLB사고해석에서는 이를 고려하여 주기말 감속재온도계수와 전제어봉삽입 (N-1) 조건에서 냉각재온도변화로 따른 반응도곡선을 생성하여 노심에 삽입되는 양의 반응도양을 계산하고 있다. 또한 도플러 반응도도 해석목적에 보수적인 핵연료온도 계수값을 선택하며 점동특성계산에 필요한 지발중성자분율 ( $\beta$ )과 즉발중성자수명 등도 주기기간 동안 가장 보수적인 값을 적용하고 있다.

### 2.1.3. 노심상부헤드 모델

원자로용기 상부헤드 영역은 유동이 정체됨으로 인해 냉각재 온도가 가장 높게 유지되는 영역이므로 증기관파단 후 급격한 계통의 감압과 가압기가 고갈되면 이 영역에서 기포가 발생할 수 있다. CESEC-III의 경우 상부헤드영역을 구체적으로 모델링하여 기포의 생성과 응축을 모사할 수 있다. 또한 상부헤드영역에서 재순환유동과 우회유동을 통한 냉각효과를 고려하고 있지 않기 때문에 증기의 생성을 상대적으로 용이하게 한다. 또한 이 영역의 경

우 금속저장열인 wall heat으로 인한 열전달을 증대시켜 상대적으로 증기생성을 증대시키므로 과도상태동안의 RCS의 압력을 상대적으로 높게 유지시켜 안전주입을 지연시키기 때문에 보수적인 결과를 유도하고 있다.

#### 2.1.4. 원자로용기내 유동혼합 (loop flow mixing)

SLB 사고의 경우 파단측 증기발생기에 의해 파단측 냉각계통 loop에서 제거되는 열이 훨씬 많기 때문에 극심한 비대칭적 열수력 및 노심 특성을 지니고 있다. 양쪽 저온관을 통한 RCS 유동이 원자로용기내에서 완전히 혼합된다면 비현실적이고 비보수적인 해석 결과를 가져온다. KSNP 의 경우 2개의 증기발생기를 갖는 4-loop NSSS 계통의 1/4 축소모델을 이용한 실제 실험을 통해서 노심 입구와 출구에서의 원자로냉각재 혼합률을 유도하였고 그 결과를 SLB 사고해석에 보수적으로 적용하고 있다.[2]

### 2.2. RETRAN-3D를 이용한 SLB 사고 모사

#### 2.2.1. 초기 조건 및 가정

RETRAN-3D의 경우 NSSS 계통의 현실적인 모델링을 통해 최적 열수력 계산을 수행할 수 있으나 CESEC-III를 이용한 단순화되고 보수적인 KSNP의 SLB 방법론을 RETRAN-3D에 접목시킨 후 비교 계산을 통한 평가를 수행하였다. 실제 안전성분석을 위한 사고해석의 경우 운전제한조건 범위내 임의의 초기조건을 선택하여 결과에 가장 나쁜 영향을 미치는 조건을 선택하여 보수적으로 평가하지만 본 해석에서는 비교 평가를 목적으로 발전소 전출력 정상상태를 동일하게 초기조건으로 적용하였다. 비교검증계산에 이용된 주요 초기 조건 및 가정은 표 2-1에 제시되어 있다. 사고기간 동안 원자로조절계통, 증기우회제어계통 등 주요 제어계통의 작동과 단일 고장을 고려하지 않고 소외전원은 가용한 것으로 가정하였다.

#### 2.2.2. 현행 인허가 방법론 구현

주증기관 파단의 경우 전출력 정상운전상태에서 주증기격리밸브 상류 증기발생기 증기노즐 인접부위에서 배관의 양단파단을 가정하였으며 CESEC-III와 동일한 모델 효과를 구현하기 위해 각 루프 증기배관과 공통배관의 저항을 무시하였다. 증기관 파단을 모사하기 위한 파단부 모델링은 그림 2-1에 제시되어 있다. 그림 2-1에서 보는 바와 같이 파단측 루프의 MSIV 전단 배관을 두개의 노드로 나누고 해당 유로에 정상 개방 상태와 정상 폐쇄 상태의 밸브 3개를 추가하여 사고발생시 각각의 밸브를 열고 닫음으로써 양단 파단 상태를 모사하였다. 그림 2-2는 노심의 계통분석모델을 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 SLB 사고시의 양 루프간의 비대칭 효과에 의한 열수력 특성을 반영하기 위해 노심을 양쪽 2개의 채널로 분할하였다. 저온관을 통한 유동은 노심하부 플레넘 영역과 노심상부 플레넘 영역

에서 혼합된 후 양쪽 고온관으로 빠져나간다. 각각의 혼합률 (mixing ratio)은 1/4 축소모델의 실험결과를 반영한 CESEC-III 계산에 이용되는 값과 동일하게 적용하였다. 유동의 혼합 효과를 고려하기 위해 RETRAN-3D의 비전도열교환기 모델 특성을 이용하였으며, 혼합되는 유량과 엔탈피를 정량적으로 고려하여 노심하부 플레넘 (그림 2-2의 120, 121 노드)과 노심상부 플레넘 영역 (그림 2-2의 170, 171 노드)에서 각각의 혼합률에 상응하는 에너지의 교환이 이루어지도록 하였다. 노심동특성 계산을 위해 노심을 축방향으로 6개의 노드로 분할하여 각각의 노드에 가중치를 달리하여 노심 반응도계산을 수행하였다. CESEC-III의 경우 노심하부에서 혼합되기 전의 과단축 저온관 온도를 이용하여 감속재 밀도를 구하며 이를 이용하여 냉각에 따른 노심의 정반응도 삽입을 보수적으로 예측한다. CESEC-III의 경우 저온관 downcomer 영역에서 상부헤드 영역으로의 우회 유로가 형성되어 있지 않아서 기포의 생성이 상대적으로 용이하게 모델링 되어 있다. 따라서 RETRAN-3D의 경우도 사고시점에서 이 경로를 통한 우회 유동을 차단하도록 모델링하였다. 또한 상부헤드영역을 bubble rise volume으로 지정하여 기포의 생성과 응축 등 이 영역에서의 이상유동 현상이 CESEC-III와 유사한 특징을 갖도록 모사하였다.

표 2-1. 초기 조건 및 가정

계통변수	CESEC-III	RETRAN-3D
노심출력	2815 MWt(100%)	2815 MWt(100%)
원자로냉각재유량	121.5 x 10 <sup>6</sup> lbm/hr	121.5 x 10 <sup>6</sup> lbm/hr
가압기 수위	52.6% (900 ft <sup>3</sup> )	52.6% (900 ft <sup>3</sup> )
증기발생기 수위	정상수위 (79 %WR)	정상수위 (79 %WR)
가압기 압력	2250 psia	2250 psia
소외전원	가용	가용
노심입구온도	564.5 °F	564.5 °F
감속재온도계수	감속재 냉각 반응도 곡선 (ARI 조건)	감속재 냉각 반응도 곡선 (ARI 조건)
도플러반응도계수	Least negative	Least negative
정지제어봉가 (% $\Delta k$ )	-9.0	-9.0
유효 지발중성자 분율	0.007879 (최대값)	0.007879 (최대값)
즉발중성자 수명 ( $\mu$ sec)	15 (최소값)	15 (최소값)

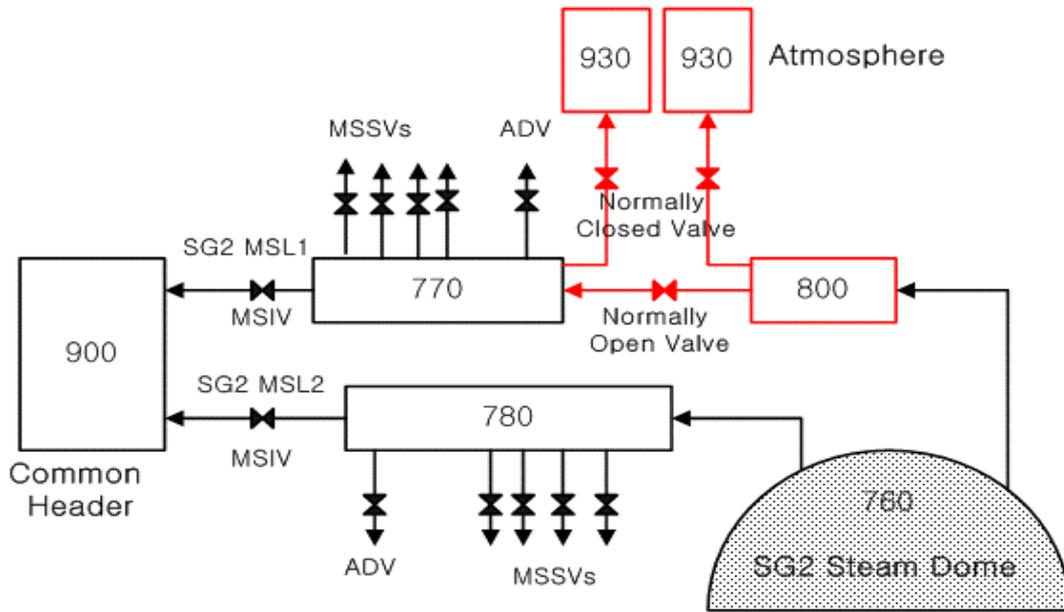


그림 2-1. 주증기관파단 모델링

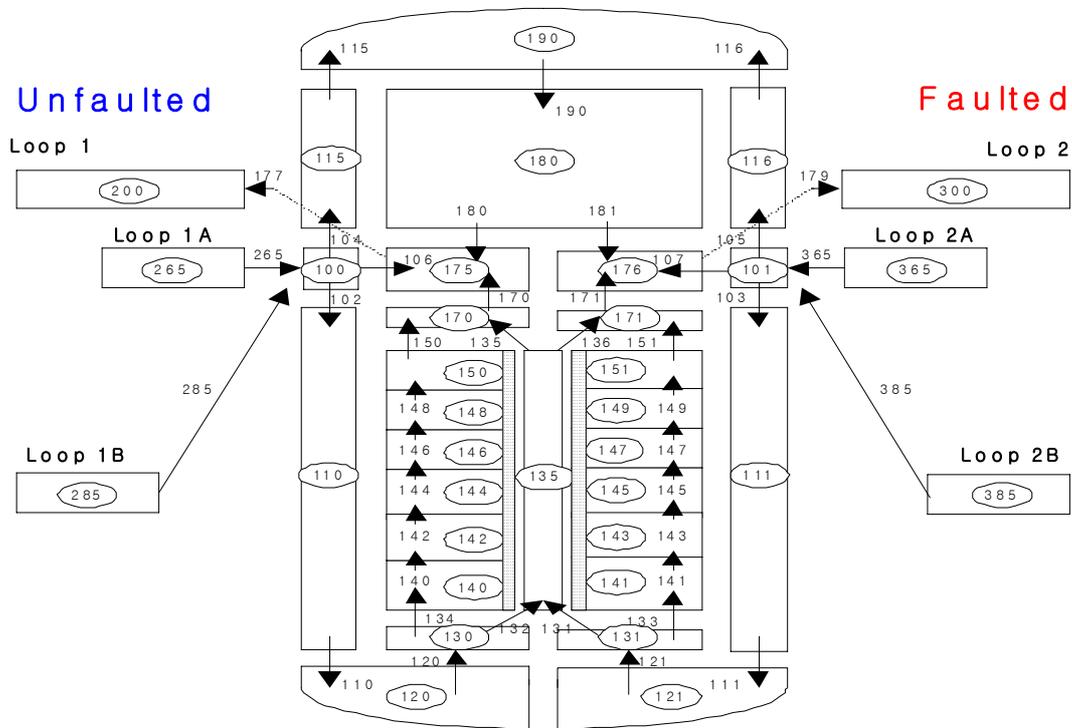


그림 2-2. 압력용기 Nodalization

### 3. 해석결과 및 토의

#### 3.1. 계통의 열수력 거동 분석

##### 가. 사건 경위

CESEC-III와 RETRAN-3D을 이용하여 해석한 SLB 주요 사건 경위는 표 3-1에 제시되어 있다. CESEC-III의 경우 노심 고출력에 의해 원자로정지가 발생하였으나, RETRAN-3D의 경우 CESEC-III와 비슷한 시점에서 증기발생기 저압력에 의한 원자로정지신호가 고출력신호에 비해 약간 일찍 발생하였으며, 이는 CESEC-III에 비해 RETRAN-3D의 2차측 압력감소가 빠름을 나타내고 있다. SLB 이후 초기 가압기 압력의 거동의 경우 압력 감소가 CESEC-III에 비해 상대적으로 작아서 안전주입이 약간 늦게 발생하였으며 또한 파단측 증기발생기의 수위 감소에 따른 보조급수의 작동도 CESEC-III에 비해 약간 늦은 것으로 나타났다.

표 3-1. 사건 경위 비교

사 건	설정치 혹은 수치	시간 (초)	
		CESEC-III	RETRAN-3D
주증기관 양단파단 발생	-	0.0	0.0
원자로고출력에 의한 원자로정지신호발생	-	5.6	6.5
증기발생기저압력에 의한 원자로정지신호 발생	888.5 psia	8.6	5.9
원자로정지, 터빈 정지 및 주급수 유량 감소 (ramp down)	-	5.7	6.1
증기발생기 저압력에 의한 주증기격리신호 발생	888.5 psia	7.4	4.7
주증기격리밸브 폐쇄	5 sec valve stroke time	12.4	9.7
가압기 저압력 안전주입작동신호 발생	1762 psia	38.4	49.9
파단측 증기발생기 보조급수작동신호 발생	23.5 %WR	46.7	49.5
노심에 안전주입유량 유입	30 sec delay after SIAS	68.4	79.9
파단측 증기발생기 보조급수 유입	45 sec delay after AFAS	91.7	94.5

나. 계통거동분석

냉각재 온도

증기관 파단은 양쪽 증기발생기 압력을 급격히 감소시키고 원자로냉각재를 냉각시킨다. 그림 3-1에 나타난 바와 같이 저온관 온도는 즉각적인 감소현상을 보이나 원자로 정지전 고온관 온도는 상대적으로 감소율이 낮으며 이는 RCS냉각에 따른 노심 출력의 증가효과가 파단측 증기발생기의 과도한 열제거 효과에 의한 영향을 완화시키기 때문이다. 그림 3-1은 노심하부 플레넘과 상부 플레넘에서 파단측과 건전한측 냉각재 루프의 유동혼합을 고려하고 있는 경우의 저온관과 고온관 온도변화를 나타낸다. 노심 상부와 하부에서 냉각재가 혼합되는 정도는 기존 인허가 방법론과 동일한 값을 적용하였다. 그림 3-2는 노심내의 유동혼합을 고려하지 않은 경우의 저온관 및 고온관 온도변화를 나타내고 있으며 사고 이후 파단측 온도감소 현상이 유동혼합을 고려한 경우에 비해 현저해 짐을 알 수 있다.

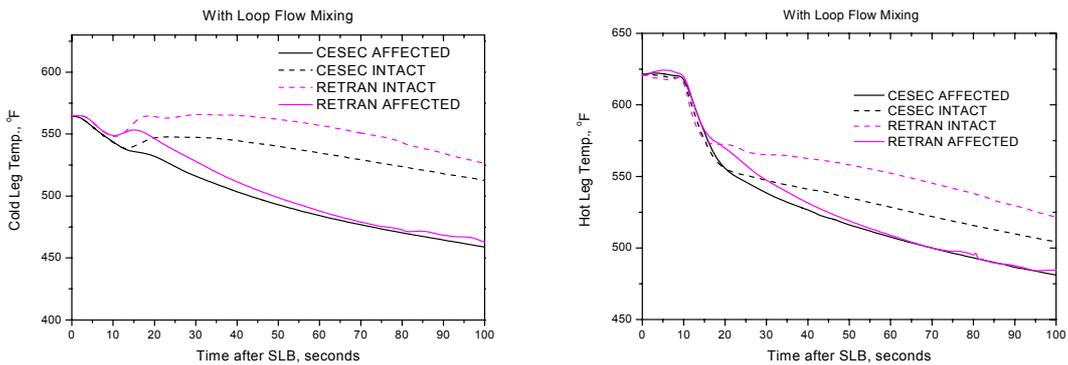


그림 3-1. loop flow mixing을 고려한 RCS 온도 변화

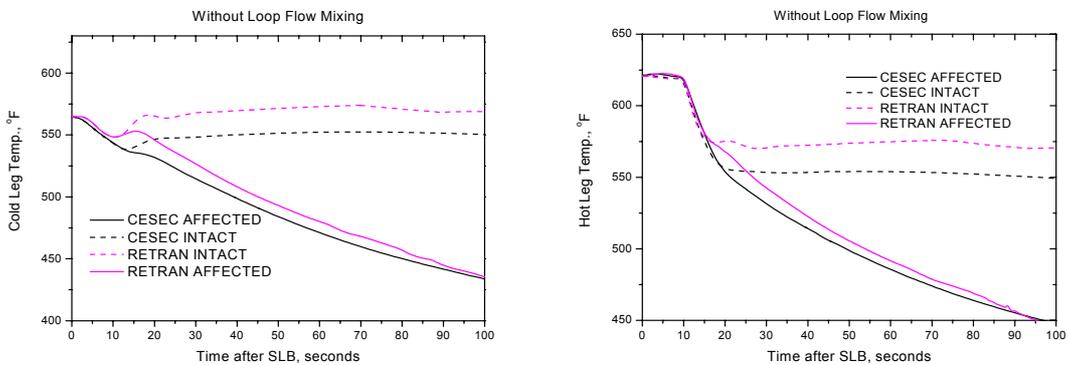


그림 3-2. loop flow mixing을 고려하지 않은 RCS 온도변화

### 노심출력 및 반응도

노심출력변화는 그림 3-3에 제시되어 있다. 사고 이후 과도한 증기방출로 과냉된 증기발생기의 1차측 냉각재온도가 노심에 도달하여 냉각재 밀도변화로 인해 노심에 정반응도가 삽입되기 까지 약 3~4초의 시간지연이 발생하며 이후 노심출력은 급격히 상승함을 알 수 있다. 분석결과 CESEC-III의 출력상승시점이 약간 빨라 고출력정지신호 설정치 (정격출력의 109.6%)에 먼저 도달하고 원자로정지 지연시간 및 제어봉낙하지연시간 등에 따른 추가적인 출력상승 후 제어봉이 삽입되어 원자로가 정지된다. RETRAN-3D의 경우 고출력정지신호 도달 전에 증기발생기 저압력에 의한 원자로 정지신호가 먼저 발생하였다. 그림 3-4에 나타난 바와 같이 감속재 밀도변화로 인한 노심의 정반응도 삽입률은 노심전체반응도 변화에 지배적인 영향을 미친다. CESEC-III의 경우 온도변화에 따른 반응도를 입력으로 제공하고 노심하부 플레넘에서 건진한측 1차 냉각재와 혼합되기전의 파단측 저온관 온도와 계통의 압력의 함수로 밀도를 구한 후 정반응도삽입률을 계산한다. 반면 RETRAN-3D는 밀도변화에 따른 반응도변화를 입력으로 제공하며 분할된 노심의 각 노드에 가중치를 적용하여 전체노심의 반응도를 계산하기 때문에 동일한 노심의 평균온도변화로 삽입되는 정반응도가 상이할 수 있다. RETRAN-3D의 경우 노심의 각 노드의 반응도가중치를 조절함으로써 혼합전의 파단측 저온관 온도를 이용하는 CESEC-III 반응도 계산 특성을 어느 정도 구현할 수 있는 것으로 판단된다. 도플러반응도의 경우 동일한 핵연료온도계수를 이용하였지만 gap conductance 차이로 인해 초기 핵연료 온도상승률이 상이하게 나타났으며 이후 그 차이가 일정하게 유지됨을 알 수 있다.

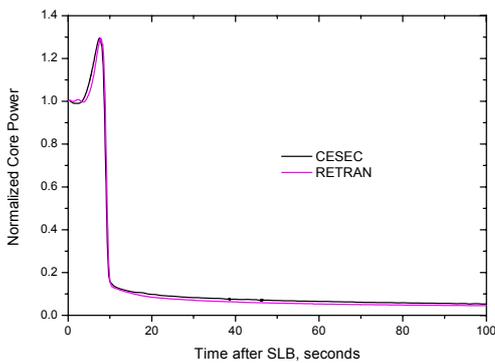


그림 3-3. 노심출력 변화

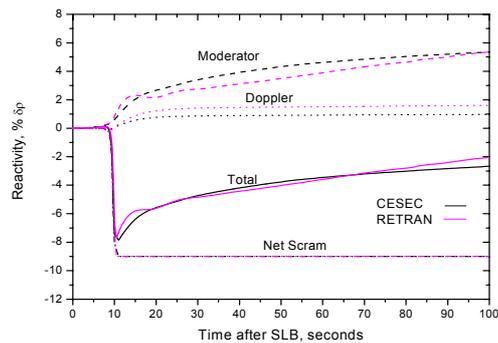


그림 3-4. 노심 반응도 변화

### 가압기 압력 및 수위

그림 3-5와 6에서 나타난 바와 같이 RETRAN-3D가 예측한 가압기 압력과 수위는 CESEC-III와 뚜렷한 차이를 보이고 있다. CESEC-III의 경우 그림 3-7에 나타난 바와 같이

40초 이후 상부헤드영역에 기포가 발생하기 시작하고 이후 압력감소 현상이 뚜렷이 완화되기 시작하는데 이는 CESEC-III에 구현된 상부헤드영역의 모델의 특이성에 기인한다. 원자로용기 상부헤드영역은 유동의 정체로 인해 냉각재 온도가 가장 높게 유지되며 이 영역에서 사고 후 급격한 계통의 감압에 따라 기포가 발생할 수 있다. CESEC-III의 경우 노심 상부헤드 영역에서 재순환유동과 우회유동을 통한 냉각효과를 고려하고 있지 않기 때문에 증기의 생성을 상대적으로 용이하게 할 뿐만 아니라 이 영역에서의 금속 저장열 (현열)인 wall heat 열전달을 상대적으로 증대시켜 증기생성을 증대시키므로 과도상태동안의 RCS의 압력을 높게 유지시키고 안전주입 유량을 감소시켜 보수적인 해석결과를 유도한다. RETRAN-3D의 경우 유사한 효과를 모사하기 위해 증기관과단과 동시에 저온의 우회유동을 차단하고 상부헤드영역을 bubble rise volume으로 모사하여 기포의 생성여부를 확인하였으나 CESEC-III에 비해 상당히 시간이 지연된 후 (100초 이후) 기포가 발생됨을 확인하였고 이후는 압력 거동이 다소 완만하게 유지되었다. 현재 사용된 RETRAN-3D 모델은 wall heat 모델을 반영하고 있지 않기 때문에 이 영역에서의 금속 저장열에 의한 기포의 생성 기여도는 고려되고 있지 않다. 또한 상부헤드영역 노드 체적이 CESEC-III에 비해 상당히 작게 모델링 되었기 때문에 기포의 생성과 응축에 따른 압력거동 현상이 CESEC-III에 비해 뚜렷한 현상을 보이고 있지 않은 것으로 나타났다.

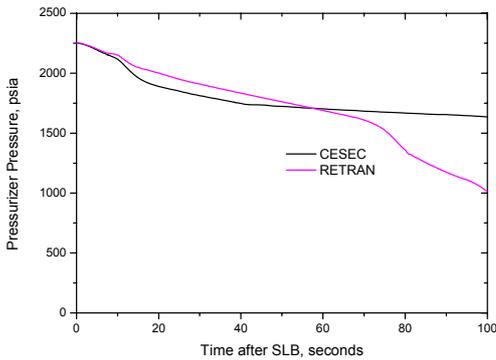


그림 3-5. 가압기 압력 거동

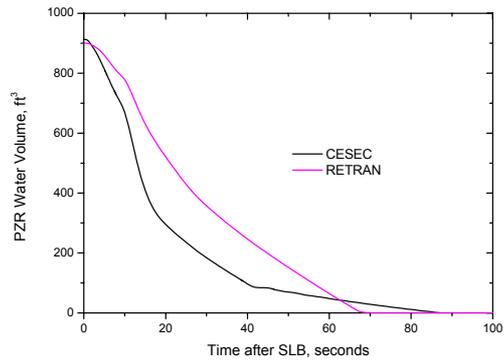


그림 3-6. 가압기물 체적 변화

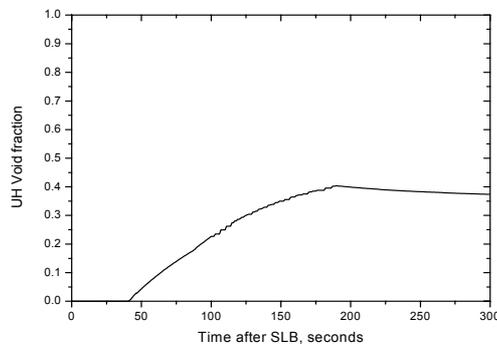


그림 3-7. 상부헤드 기포 변화 (CESEC-III)

## 2차측 계통 거동

그림 3-8부터 3-11까지는 사고 이후의 2차측 주요 거동을 보여주고 있다. 그림에서 나타난 바와 같이 동일한 급수유량 조건에서 파단부를 통한 초기 방출 유량과 이에 따른 양쪽 증기 발생기 질량 감소도 유사한 결과를 나타낸다. 반면 증기방출에 따른 2차측 압력감소는 RETRAN-3D가 상대적으로 빨라서 주증기격리신호가 일찍 발생하는데 이는 두 전산코드 간에 뚜렷한 차이를 보이는 2차측 모델의 특성에 기인한 것으로 판단된다. CESEC-III의 경우 증기발생기 2차측 모델은 포화증기와 포화액체로 분리된 단일노드로 구성된 반면 RETRAN-3D는 각 영역별 특성을 고려하여 14개의 노드로 구성되어 있으며 또한 2차측 열 전달 계산에서도 상이한 열전달상관식을 적용하기 때문에 2차측 압력 거동의 차이는 예상된 결과이다. 2차측 증기방출량 계산에 사용된 임계유량 상관식의 경우 CESEC-III의 경우 CRITCO에 국한되어 적용 가능하지만 RETRAN-3D의 경우 임계유속 상관식 중 Moody 상관식을 선택하였으며 방출계수는 동일하게 1.0을 적용하였다. RETRAN-3D에 CRITCO 상관식을 접목하여 민감도 계산을 수행한 결과 두 상관식의 적용에 따른 방출유량의 차이는 미미한 것으로 파악되었다.

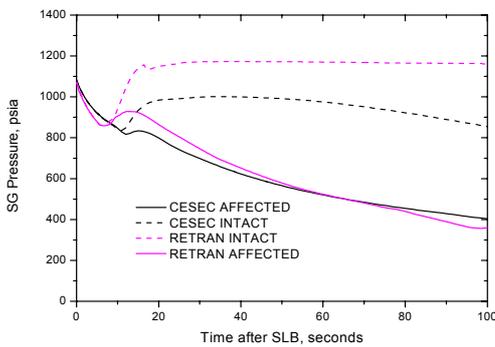


그림 3-8. 증기발생기 압력

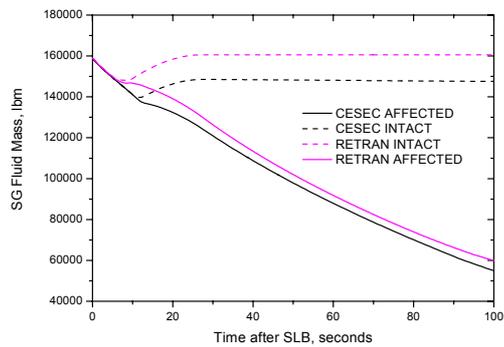


그림 3-9. 증기발생기 유체질량

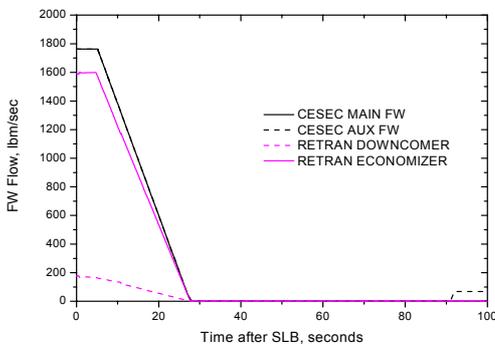


그림 3-10. 급수 유량

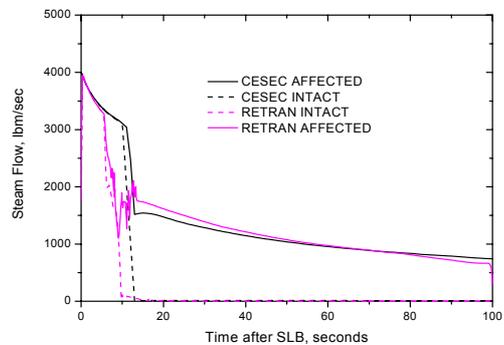


그림 3-11. 파단 유량

#### 4. 결론 및 향후 업무

전출력 정상운전 상태의 계통운전변수를 초기조건으로 동일하게 선정하고 CESEC-III에 적용된 주증기관과단사고 해석모델 및 방법론을 가능한 유사하게 적용하여 RETRAN 3-D Mod.03 전산코드를 이용하여 시범계산을 수행하였고 그 결과를 분석하였다. 분석 결과 1차 측 2차측 계통변수에서 일부 상이한 결과를 보여주고 있으나 이는 각 코드에 구현된 일차 및 이차 계통열수력 모델의 상이함과 CESEC-III에서 보수적으로 구현된 노심상부헤드 영역 모델 등의 특수성에 기인하는 것으로 파악되었다. 향후 RETRAN-3D를 이용한 사고해석방법론의 인허가 시현성을 위해서도 SLB 사고 해석 결과에 민감한 영향을 미치는 인자인 비대칭 냉각효과를 반영하기 위한 노심내 유동혼합, 이상 유동 상태를 모사하기 위한 노심상부헤드영역 모델, 그리고 반응도 계산에서의 보수적인 가정 등 현행 인허가 방법론의 보수적인 인자에 의한 영향을 정량화할 필요성이 있으며 이를 위한 민감도분석이 필요한 것으로 파악된다. 최적 열수력코드인 RETRAN-3D를 이용하고 현행 인허가 방법론의 주요 인자의 영향을 정량화하여 SLB 사고에 적용되는 기존 방법론의 과도한 불확실성을 줄이면 보다 현실적이고 신뢰할 수 있으며 아울러 충분히 보수적인 방향으로 국내 고유의 안전해석방법론을 정립할 수 있는 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

원전기술고도화 연구개발 과제의 위탁사업인 '과도해석 방법론 개발' 세부 과제의 일환으로 본 연구를 수행하였습니다.

#### 참고문헌

- [1] M.P. Paulsen 외, "RETRAN-3D - A Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Complex Fluid Flow Systems," July 2001.
- [2] CESEC - Digital Simulation of a Combustion Engineering Nuclear Steam Supply System, CE-CES-78-Rev.0, May 1987.
- [3] 영광 5,6호기 최종안전성분석보고서 15장 부록 15B "주증기관과단사고에 대한 해석방법," 한국전력공사.