

# 차세대원자로 SB-LOCA시의 붕산희석사고 해석

## An Analysis on Boron Dilution Events during SB-LOCA for KNGR

김영인, 황영동, 이기영, 심석구, 박종균

한국원자력연구소

### 요 약

전산유체 해석 프로그램 FLUENT 코드를 이용하여 차세대원자로의 소형냉각재상실사고시 발생가능성이 있는 붕산희석사고를 해석하였다. 해석격자의 크기, 입구면적 등의 기하학적 인자와 계산시간간격, 주입 무붕산수의 체적 및 주입속도에 대한 민감도분석을 수행하여 가장 보수적인 결과를 계산하는 2차원 축대칭 모델을 설정하였다. 또한 이 모델을 적용하여 소형냉각재상실사고시 원자로냉각재펌프의 재기동에 의해 원자로 용기내로 주입되는 무붕산 slug의 붕산혼합현상을 해석하여 노심내의 국부급속출력 가능성을 평가하였다. 해석결과 노심내의 최소붕산농도는 381 ppm으로 최소임계붕산농도( $C_{crit}$ , 314 ppm, 350°F)과 비교하여 67 ppm의 여유도를 가진 것으로 분석되었다.

### Abstract

An analysis on boron dilution events during small break Loss of Coolant Accident for Korean Next Generation Reactor was performed using Computational Fluid Dynamics computer program FLUENT code. Axisymmetric computational fluid dynamic analysis model was determined though the sensitivity study on the grid size, time step size, and flow parameters such as volume of the unborated water slug and inlet velocity, which calculates the most conservative results. Using this model an analysis was performed to investigate the mixing effects on the minimum boron concentration in the core as the unborated water slug transported into the core. The minimum boron concentration of 381 ppm was predicted for the KNGR. The predicted minimum boron concentration in the core meets the recriticality criteria(314 ppm at 350°F) by 67 ppm.

### 1. 개요

붕산희석사고는 노심의 반응도제어를 위해 냉각재에 주입되는 붕소 농도가 내적 혹은 외적인 요인에 의해 감소되어 노심 반응도의 급격한 증가를 유발하는 반응도 유발사고 중의 하나이다. 차세대원자로에서는 소형냉각재상실사고시와 저출력운전시 발생할 가능성이 있는 붕산희석사고가 새로운 인허가 현안 중의 하나로 제기되었다[1, 2, 3].

붕소희석사고는 기존발전소의 최종안전성분석보고서(FSAR)에 포함되어 있으나 FSAR에서는 외적요인에 의해 일차계통에 주입되는 순수(pure water) 또는 희석된 저농도의 붕산수(diluted boric acid water)가 원자로 냉각재와 균일하게 혼합되는 것을 가정한 사건만을 고려하고 있다. 그러나 붕소희석사고의 대한 연구에 의하면 외부 또는 내부적인 요인에 의하여 순수 또는 희석된 붕산수의 slug가 하향유로(downcomer)를 통하여 노심에 유입되어 노심의 반응도를 급격하게 증가시킬 가능성을 지적하고 있다[2].

주입되는 저농도붕산수 slug가 원자로 용기내의 고붕산 농도의 일차냉각재와 잘 혼합되지 않고 노심에 주입될 때 붕소희석사고의 위험성은 매우 심각하다. 그러나 slug는 노심으로 수송되는 과정에 고농도붕산수인 원자로냉각재와 혼합되면서 slug의 붕산농도가 증가되어 노심의 급격한 출력증가 가능성이 감소한다. 따라서 붕소희석사고의 잠재적 위험성에 대한 평가를 위해서는 저농도의 붕산수 slug가 하향유로 및 하부 플레넘을 통해 노심에 유입되는 유동경로에서의 slug의 혼합 및 확산거동에 대한 해석을 통한 노심내의 국부 급속출력증가에 대한 평가가 필요하다.

본 연구에서는 차세대원자로의 붕소희석사고 해석을 목적으로 다차원 전산유체(CFD:Computational Fluid Dynamics)해석 프로그램 FLUENT 코드의 2차원 해석모델을 설정하였다. 차세대원자로의 소형냉각재상실사고를 대상으로 붕소희석사고를 유발할 수 있는 저농도붕산수 slug의 형성기구, 크기 및 slug의 주입에 따른 유동장의 물리적 특성을 파악하고, FLUENT 코드에 내장된 물리적 모델들을 검토하여 붕소희석사고와 관련된 물리적 특성을 모사하기 위한 이들 모델의 적용 타당성을 평가하였다. 또한 CFD 해석결과는 해석격자의 크기, 입구면적 크기 등의 기하학적 인자와 계산시간간격(time step size), 주입 무붕산수의 체적 및 주입속도 등에 영향을 받으므로 이들 인자에 대한 민감도분석을 수행하여 가장 보수적인 결과를 계산하는 2차원 축대칭 모델을 설정하였다. 또한 이 모델에 보수적으로 설정된 무붕산수 slug의 양을 경계조건으로 적용하여 소형냉각재상실사고시 원자로냉각재펌프의 재기동에 의해 주입되는 무붕산수 slug의 혼합현상을 해석하여 노심내의 국부급속출력 가능성을 평가하였다[4, 5, 6].

## 2. 소형냉각재 상실사고 scenarios

소형냉각재상실사고시 저농도의 붕산수가 원자로 냉각재 계통의 저온관에 축적되기 위해서는 증기발생기 상단을 통한 냉각재의 자연순환유로가 차단되어야하고, 증기발생기 이차측의 온도가 일차측 온도보다 낮게 유지되어야 한다. 소형냉각재상실사고가 발생하면 원자로냉각재가 손실되어 증기발생기 일차측 수위가 감소하게되며 증기발생기를 통한 냉각능력이 저하된다. 증기발생기의 냉각능력이 감소하면, 원자로냉각재의 온도가 상승하고 이에 따라 원자로냉각재는 비등하기 시작한다. 생성된 증기는 증기발생기에서 저온의 U-tube와 접하면서 붕산농도가 매우 낮은 저농도의 붕산수로 응축되기 시작하여 저온관의 loop seal에 축적된다.

차세대원자로의 참조발전소인 SYSTEM 80+는 등가직경 2.54~7.62 cm (1~3 inch) 크기의 소형 냉각재상실사고시에 일차계통은 역응축류(reflux condensation) 형태의 안정된 냉각상태에 도달한다[1, 2]. 이 크기보다 작은 크기의 파단사고시에는 원자로냉각재계통의 증기발생기를 통한 순환 유동이 건전하게 유지되며, 이 보다 큰 파단사고시에는 원자로냉각재계통이 재충수 되지 않고, 파단부위를 통하여 원자로에서 생성되는 에너지보다 많은 에너지가 제거되므로 생성되는 응축수의 양이 매우 작다. 이 경우에는 원자로냉각재펌프가 재기동되어도 원자로로 유입되는 저농도붕산수의 양은 매우 작아 노심의 급속출력증가 가능성은 없다.

역응축류 현상이 발생되게 되면 증기발생기 U-tube의 하향부위에서는 증기가 응축되어 매우 낮은 농도의 응축수가 형성된다. 이 응축수의 붕소농도는 사실상 0 ppm에 가까우며, 시간이 경과함에 따라 저온관에 다량의 저농도붕산수 slug가 축적된다. 이런 상황에서 자연순환 등에 의해서 저농도붕산수 slug가 고농도냉각수와 충분히 희석되지 않고, 저온관의 저농도붕산수 slug가 원자로냉각재펌프의 재가동 등으로 노심에 유입되면 정반응도 삽입에 의한 노심출력의 급속증가로 원자로의 안전성을 위협할 수 있으므로 slug의 수송과정에서의 붕산혼합현상에 대한 정밀한 평가가 필요하다.

### 3. 해석모델

#### 가. FLUENT 코드

FLUENT에서 제공되는 여러 가지 지배방정식들 중 붕산희석사고 해석에는 비정상 유동에 대한 연속 방정식, 운동량방정식, 에너지 보존 방정식과 난류 모델 및 species transport 방정식이 필요하다. 난류모델은 일반적으로 널리 쓰이는  $k-\epsilon$  모델을 사용하며 species transport는 species로 명명된 별도의 옵션을 선택하여 붕산 희석과 species 수송문제를 해석할 수 있다[7].

질량, 운동량, 에너지, 화학종의 보존방정식은 유한 차분법에 의한 제어체적을 사용하여 계산한다. 지배방정식은 곡면의 형상에 따른 유동장을 모델링 하기 위하여 곡면좌표계(curvilinear coordinate)에서 이산화(discretization) 처리된다. Interpolation을 위한 numerical scheme은 first order, power law, 또는 higher order up-wind scheme 등이 있다. 압력과 속도의 계산에는 SIMPLEC 알고리즘을 이용하고, discrete algebraic equation은 line-iterative 절차에 따라 해를 구한다. 이러한 해석방법은 USNRC과 DOE가 주관하여 개발된 TEMPEST[8], COMMIX[3] 코드와 상용프로그램인 PHOENICS, CFX 등의 비압축성 CFD 프로그램에서 사용하는 방법과 기본적으로 같은 방법이다.

FLUENT코드에서 이용 가능한 난류모델은 표준  $k-\epsilon$  모델, renormalization -group(RNG)  $k-\epsilon$  모델, higher-order Reynolds Stress Model (RSM) 등 세 가지가 있다. Standard  $k-\epsilon$  모델은 비록 일부해석에서 결점에 있는 것으로 알려져 있으나 난류 모델로 가장 광범위하게 사용되는 모델이다.  $k-\epsilon$  model은 다른 모델에 비해서 단순하고 계산시간이 작게 요구되기 때문에 일반적으로 선호된다. 혼합해석에서  $k-\epsilon$  model의 가장 큰 단점은 급속하게 가속되는 유동의 거동과 난류에 의한 부력(buoyancy)유동의 모델링에 따른 불확실성이 큰 점이다.

FLUENT의 porous media 모델은 격자크기에 비해 세밀하고 복잡한 기기에서의 압력손실특성 모델링에 사용된다. FLUENT의 porous media 모델은 여러 계수 값으로 계산된 압력결손 즉, momentum sink 항을 운동량방정식에 추가하여 계산하는 방법을 사용한다. 이 영역에서의 압력결손항은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{M}{a} V + C_2 \left( \frac{1}{2} \rho V |V| \right) \quad (1)$$

여기서,  $a$ 는 permeability in each component direction( $m^2$ ),  $C_2$ 는 inertial resistance factor( $m^{-1}$ )로서 경험적인 입력 값이다. Porous media에 추가로 필요한 입력으로는 porosity, 열전도도, 난류

인자와 열전달 문제를 포함할 경우 고체 media에 대한 밀도와 비열을 입력해 주어야한다. 이 유동 저항 값들은 유동방향에 대한 압력손실 값(forward pressure loss)으로부터 계산된다.

저농도봉산수 slug는 대류(advection)와 확산(diffusion)에 의해 혼합되면서 노심으로 이동된다. 봉산의 보존방정식은 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{\partial \rho C}{\partial t} + U_i \frac{\partial \rho C}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( D \frac{\partial \rho C}{\partial x_i} \right) + S \quad (2)$$

여기서  $D$ 는 확산계수(diffusion coefficient),  $S$ 는 source term, 아래첨자  $i$ 는 직교좌표계에서의 좌표 방향을 나타낸다. 난류유동에서 국부적인 농도차는 난류와 분자의 확산에 의해 감소된다. 일반적으로 원자로 용기의 하향유로 유동에서 molecular effect는 거시적인 관점의 혼합현상해석에서는 무시할 수 있을 정도로 작다.

봉산희석사고의 종합적인 해석결과에 대하여 대해서 FLUENT 코드나 다른 CFD 코드를 사용 계산한 결과가 검증된 바는 없으나, 봉산희석사고의 과도해석에 사용된 각각의 기본적인 모델특성은 여러 예제에서 검증계산이 수행되었다[9]. 이 해석에 관련된 주요 특성들은 수치해석절차(numerical solution procedure), 난류유동(turbulent boundary layer flows), 과도유동(unsteady flows), 화학종 이송(species transport) 등이다. 이 예제들은 원자로의 유동문제를 모델링하는데 필요한 FLUENT 코드의 물리적 모델을 평가한 것으로 원자로에서의 봉산혼합해석 적용성에 대하여 충분한 신뢰를 줄 수 있을 것이다[10].

#### 나. 해석격자 및 경계조건

차세대원자로의 봉산희석사고를 해석하기 위해, 원자로를 planer jet에 의한 2차원 축대칭격자로 모델링하고 원자로내의 봉산농도변화를 시간과 위치의 함수로 결정하였다. 해석에 사용된 원자로의 기하학적 형상자료는 KNGR의 참조발전소인 System 80+의 원자로용기 설계자료인 참조문헌 [1]의 자료를 사용하였다. 2차원 축대칭모델은 원자로 하단의 하부플레넘으로부터 상부플레넘 일부까지를 모델하였다. 단, 냉각재 입구는 입구노즐 하단에서 시작된다. 하향유로의 반경방향 격자는 충분히 세밀한 격자를 사용하여 유동의 압력손실과 혼합현상을 정확히 예측할 있도록 하였다. 또한 하향유로 하부와 하부플레넘 영역에서도 유체의 방향전환과 난류 및 혼합현상을 정확히 예측할 수 있도록 세밀한 격자를 사용하였다. 원자로 내부의 하부플레넘영역과 노심영역 등의 복잡한 구조물은 porous media 모델을 사용하여 단순화하였다. Porous media 모델에서는 실제 형상으로부터 계산된 평균유동저항을 입력으로 사용하여 유동을 계산할 수 있다. 이 저항 값은 System 80+ parameter list로부터 얻은 정방향 유동에 대한 압력손실 데이터로부터 계산된다[11].

보수적인 해석을 위하여 초기에 노심은 4000 ppm의 봉산수가 채워져 있고, 원자로내의 냉각재는 정지상태에 있으므로, 봉산수 slug의 봉산농도는 0 ppm으로 가정하였다. 또한 수송과정의 확산효과를 보수적으로 계산하기 위하여 열전달을 고려하지 않았다. 유동의 크기에 비해서 봉산농도 및 온도의 변화에 따른 부력(buoyancy force)은 무시할 수 있을 정도로 작으므로 밀도는 일정한 것으로 가정하였다.

또한 System 80+의 원자로냉각재펌프 특성 [1]에 따라 15초의 펌프기동시간을 고려하여, 0초부터 15초까지는 입구유량이 선형적으로 증가하고 15초 이후에는 일정한 속도를 유지하는 것으로

가정하였다. System 80+의 분석자료[1]에 의하면 원자로냉각재펌프 1대만 가동될 경우 펌프에서 방출되는 최대용량은 정상운전시의 펌프용량의 150%이다. 이 유동은 원자로용기 하향유로의 환형공간에서 펌프가 가동되지 않는 다른 유로로 분산되어 최종적으로 98%의 유량이 노심을 통과하게 된다. 보수적으로 펌프용량을 98%와 150%로 변화시켜 봉산혼합현상을 계산결과를 비교하였다. 원자로냉각재펌프 흡입구 쪽의 저농도붕산수가 원자로용기로 주입되기 위해서는 먼저 원자로냉각재펌프와 원자로냉각재펌프 방출유로를 거쳐야 한다. 이 체적은 입구에서 봉산이 주입되기 전에 지연되는 시간으로 처리되며 이 지연시간은 5.36초이다.

무붕산수 slug의 체적은 loop seal과 저온관 배관의 중심선 하부(below centerline)가 무붕산수로 채워진 것으로 가정하면  $7.42 \text{ m}^3(262 \text{ ft}^3)$ 이다. 그러나 원자로냉각재펌프 1대가 기동되면 증기발생기 출구플레넘에 연결된 반대쪽 저온관의 loop seal에 축적된 무붕산수도 가동된 원자로냉각재펌프의 흡입구 쪽으로 유입될 가능성이 있으므로, 이 체적을 고려하면 무붕산 slug의 총 체적은  $14.84 \text{ m}^3(524 \text{ ft}^3)$ 이다. 이 체적은 생성될 수 있는 최대의 응축수량 보다 많은 양이다[12].

봉산희석사고 해석은 노심에 주입되는 저농도붕산수의 slug에 의한 노심출력의 급격한 상승 가능성을 평가하여 사고시 원자로의 안전성 확인하는데 있으므로 해석에 사용된 모델의 보수성이 충분히 확보되어야 한다. 2차원 축대칭 모델은 원자로 용기내 저농도붕산수의 복잡한 3차원 혼합 유동특성을 단순화하여 해석하기 위한 모델로서 RCP와 RCP 방출배관( $251 \text{ ft}^3 : 7.1 \text{ m}^3$ ), 입구 노즐의 상부공간( $439 \text{ ft}^3 : 12.4 \text{ m}^3$ ), 출구플레넘( $423 \text{ ft}^3 : 12.0 \text{ m}^3$ ) 등 해석격자에 포함되지 않은 영역에서의 혼합현상을 고려하지 않았으며, Flow skirt, 하부헤드 및 하부구조물을 porous media로 모델링함으로써 복잡한 구조물과 jet 유동에 의하여 생성되는 난류에 의한 추가적인 혼합효과도 무시되어 3차원 모델보다는 보다 보수적인 접근방식이다.

#### 4. 민감도 분석

과도유동의 수치해석에 있어서 수치해의 정확성을 보장받기 위한 여러 가지 요구사항들 중 가장 기본적인 것은 수치해에 대한 해석격자와 계산시간간격(time step size)에 대한 비의존성이다. 따라서 본 연구에서는 2차원 축대칭 모델의 해석격자와 시간간격에 대한 민감도분석을 수행하여 이들 인자가 해석결과에 미치는 영향을 파악하고 가정 보수적인 격자를 차세대원자로 봉산희석사고의 해석격자로 설정하였다. 또한 사고시 노심내의 최소붕산농도에 영향을 미치는 유동인자, 무붕산수 slug의 체적 및 입구면적(입구속도)에 대한 민감도 분석을 수행하였다.

##### 가. 해석격자(Grid Size)

그림 1은 해석격자크기에 대한 민감도 분석을 위해 생성된 2차원 축대칭모델의 기본해석격자로서 비정상 상태의 초기혼합 단계에서의 정확한 계산을 위해 경계면밀착그리드(body fitted grid)를 사용하고 하향유로와 하부헤드의 유동장은 세밀한 그리드를 채택하였다.

소형냉각재상실사고시 봉산희석사고 해석 결과의 격자의 크기에 대한 민감도 분석은 유동장의 격자수를 변화시킨 네 가지 경우에 대하여 수행하였다. Table 1의 case 1~4는 격자크기의 민감도 분석에 사용된 주요변수 및 해석결과를 보여주고 있다. 민감도 분석은 그림 1의 해석격자(case 1 :  $44 \times 30$ )를 기본으로 격자수를 반경방향 또는 축방향으로 2배씩 증가시켜 냉각재 펌프의 기동시에 원자로 용기로 주입되는 slug의 봉산농도 변화를 계산하였다.

그림 2는 민감도 분석결과로서 slug의 봉산농도는 해석격자의 크기에 민감한 것으로 나타났다.

즉, 격자수가 증가(격자의 크기는 감소)함에 따라 노심으로 유입되는 slug의 최소붕산농도는 급격히 감소하다가 (case 1, 2 and 3) 미소한 크기로 다시 증가였다 (case 4). 민감도 분석에 사용된 해석격자 중 case 3 (격자수 : 170x58) 는 최소붕산농도는 무붕산수의 주입 후 15초에서 524 ppm (mass fraction : 0.02)으로 가장 낮은(가장 보수적인)값으로 계산되었으며, 이후 격자수를 더욱 증가시켜도 노심내로 유입되는 slug의 최소붕산농도는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 따라서 case 3를 차세대원자로의 붕산혼합현상을 분석하기 위한 해석격자로 설정하였다.

#### 나. 시간간격 (Time Step Size)

과도유동의 수치해석결과는 해석에 사용된 시간간격에 영향을 받는다. 계산 시간 간격에 대한 민감도 분석은 시간간격을 0.1초를 기준으로 0.05, 0.01, 0.005초로 감소시켜 수행하였다. 표3의 case 5~8은 계산 시간간격에 대한 민감도분석에 사용된 주요변수들을 나타내었다. 노심입구에서의 최소붕산농도는 그림 3에서와 같이 해석에 사용된 계산시간간격에 크게 영향을 받으며 계산시간간격의 감소에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 계산시간간격 0.1초에서는 699ppm으로 계산되었으며 0.01초의 경우에는 490ppm로 감소하였다. 0.01초보다 작은 시간간격에 대해서는 최소붕산농도가 약간 증가하였으나 큰 변화는 없는 것으로 나타났다.

#### 다. 주입 무붕산수의 체적 및 주입속도

표 2의 case 9~12은 무붕산수의 체적과 원자로냉각재펌프의 pumping velocity 변화에 따른 노심내 최소붕산농도의 해석에 사용된 주요변수들을 요약하였다. 그림 4에는 노심입구에서의 최소붕산농도의 시간에 따른 변화를 보여주고 있다. 그림 4에서 같은 입구속도를 가진 case 9과 case11, case 10와 case12를 비교하면 노심내의 최소붕산농도는 해석에 사용된 무붕산수의 체적 (size of the unborated water slug)에 크게 영향을 받음을 보여주고 있다. Slug양이 동일하고 입구속도가 다른 case 9 과 case 10, case 11과 case 12에서는 속도가 증가함에 따라 난류에 의한 영향이 증가하여 최소붕산농도가 다소 감소하였다. 따라서 차세대원자로의 붕산희석사고해석에는 해석의 보수성을 확보하기 위하여 주입되는 무붕산수의 체적을 524 ft<sup>3</sup>으로 가정하고, 원자로내로 주입되는 유체의 유속을 pump의 용량대비 98%로 설정하는 것이 적절한 것으로 평가된다.

#### 라. 입구면적

그림 5에는 냉각수와 저농도붕산수가 주입되는 입구면적의 변화에 따른 노심내의 최소붕산농도의 변화를 보여주고 있다. 해석에 사용된 주요변수들은 Table 1의 Case 13~16에 요약하였다. 해석결과 노심내 붕산농도의 분포는 입구면적의 변화에 따라 많은 차이가 있으며 입구면적이 증가함에 따라서 감소하였다. 해석에 사용된 2차원축대칭 모델의 경우 입구면적이 원자로용기 하향유로의 면적과 같은 크기로 설정된 경우(Case 13) 최소붕산농도는 324 ppm 으로 입구면적이 가로 단면적의 1/4의 경우 (Case 16)의 942 ppm 보다 매우 작은 값으로 계산되었다. 이러한 붕산농도의 차이는 입구면적이 변함에 따라 사고시 펌프의 작동에 의하여 같은 유량을 주입하므로 입구에서의 유속이 변하고, 저농도붕산수와 고농도붕산수의 경계면(접촉면) 크기가 변하기 때문에 발생된다. 즉 입구면적의 감소는 유속을 증가시키고, 유속의 증가는 난류에 의한 붕산의 확산을 증가시킨다. 또한 주입되는 저농도붕산수의 slug와 고농도붕산수의 접촉면적의 증가는 붕산의 확산을 촉진시킨다.

노심입구에서의 최소붕산농도는 입구면적의 크기에 따라 크게 달라지므로 2차원 축대칭 모델을 이용하여 붕산희석사고를 해석할 경우 주입되는 입구조건을 적절히 반영할 수 있도록 입구면적을 설정하는 것이 중요한 것으로 나타났다.

## 5. 해석결과 및 고찰

민감도 분석을 통하여 선정된 해석격자와 계산시간간격 및, slug의 체적과 노심주입유량을 이용하여 차세대원자로를 대상으로 소형냉각재상실사고시 발생이 예상되는 붕산희석사고를 해석하였다. 해석결과에 큰 영향을 미치는 입구면적은 차세대원자로의 참고노형인 SYSTEM 80+ 의 붕산희석사고 해석자료를 이용하였다. Table 1의 case 17에 해석에 사용된 주요변수를 요약하였다.

그림 6과 7은 시간에 따른 붕산농도의 변화를 보여주고 있다. 붕산농도는 저농도 붕산수의 slug가 원자로 용기의 하향유로를 통하여 노심으로 이동함에 따라서 점진적으로 증가하고 있다. 이 경우 최소붕산농도는 노심입구의 외측 셀에서 발생하고 있으며 slug가 노심을 통과하면서 노심의 중앙으로 이동하고 있다. 계산된 최소붕산농도는 381 ppm으로 노심의 재임계도달을 방지 위한 임계농도 314 ppm (350 °F) 기준을 만족하고 있다[13]. 그러나 임계농도에 대한 여유도는 67 ppm으로 참고노형인 SYSTEM 80+의 여유도 800 ppm (임계농도 550 ppm, 해석결과 1350 ppm[1,2])에 비하여 매우 작은 값으로 해석결과와 충분한 여유도 확보를 위한 연구가 필요하다.

2차원 축대칭 모델은 모델특성상 해석격자에 포함시킬 수 없는 영역이 발생하며, 붕산의 혼합현상을 2방향 만 고려하게 되어 지나치게 보수적인 해석결과를 나타낼 수 있다. 또한 해석에 사용된 2차원 축대칭 모델은 해석결과에 심각한 영향을 미치는 입구면적의 적절한 산정에 많은 불확실성을 포함하고 있다. 따라서 추가적인 여유도 확보를 위해서는 이들 요인에 의한 과도한 보수성의 제거가 가능한 3차원 모델링에 의한 붕산희석사고의 해석이 필수적인 것으로 판단된다.

## 6. 결론

다차원 전산유체(Computational Fluid Dynamics)해석 프로그램인 FLUENT 코드를 이용하여 차세대원자로의 붕산희석사고를 해석하였다. FLUENT 코드에 내장된 물리적 모델들을 검토하여 이들 모델의 적용타당성을 평가하였으며, 소형냉각재상실사고시 원자로냉각재펌프의 작동에 의하여 노심으로 주입되는 unborated slug의 붕산혼합현상을 해석할 수 있는 2차원 축대칭모델을 개발하였다. 2차원 축대칭 모델의 해석격자에 대한 민감도분석을 수행하여 가장 보수적인 해석격자를 설정하였으며 또한 이 모델에 보수적으로 설정된 unborated slug의 양을 경계조건으로 적용하여 소형냉각재상실사고시 1대의 원자로냉각재펌프의 작동에 의해 주입되는 water slug의 혼합현상을 해석하였다.

차세대원자로의 소형냉각재상실사고시 붕산희석사고 해석결과 노심내의 최소붕산농도는 381 ppm으로 최소임계붕산농도( $C_{GRK}$ , 314 ppm) 보다도 높은 붕산농도를 나타내므로 노심이 임계상태에 도달하는 것을 억제하기 위한 요건을 충족하는 것으로 해석되었으나 임계붕산농도에 대한 여유도가 67 ppm으로 매우 작기 때문에 추가여유도를 확보하기 위한 연구가 필요한 것으로 분석되었다. 특히 해석에 사용된 2차원 축대칭 모델은 해석결과에 심각한 영향을 미치는 입구면적의 적절한 산정에 많은 불확실성을 포함하고 있기 때문에 해석결과와 보수성 입증에 많은 어려움이 있을 것으로 예상된다. 3차원 모델링에 의한 붕산희석사고 해석은 원자로 하향유로에서의 붕산수의 혼합현상을 3방향 모두 고려하기 때문에 추가적인 여유도 확보에 기여할 수 있을 것으로 평가

된다.

### Acknowledgement

본 연구는 한국전력공사의 차세대원자로개발 프로그램의 일환으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. C.B. Martin, "System 80+ Reactor Vessel Boron Mixing Following a Small Break LOCA Assuming Restart of RCP", Design Analysis QPF 0304-1, Combustion Engineering, April, 1994.
2. J. Longo, Jr., et al., "The SYSTEM 80+ Response to the Small Break LOCA Boron Dilution Issue", OECD CSNI Specialist Meeting on Boron Dilution Reactivity Transients, State College, PA, U.S.A, 1995
3. H.M. Domanus, et al., COMMIX-1C: a Three-Dimensional Transient Single-Phase Computer Program for Thermal-Hydraulic Analysis of Single-Component and Multicomponent Engineering Systems, NUREC/CR-5649, November 1990
4. Y.I. Kim and Y.D. Hwang, et al., "An Analysis on Boron Dilution Events during SBLOCA for the KNGR", KAERI/TR-1228/99, February 1999
5. 황영동, 박홍준 외 "FLUENT 코드를 이용한 차세대원자로의 붕산혼합 현상 해석" '98 춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 1998.5
6. 최영상 외 "차세대원자로기술개발 2단계 최종보고서", 산업자원부, 과학기술부, 1999.2
7. "FLUENT User's Guide Version 4.3", Fluent Inc., January, 1995.
8. D.S. Trent and L.L. Eyster, TEMPEST: A Three-Dimensional Time-Dependent Computer Program for Hydrothermal Analysis: Vol. I Numerical Methods and Input Instructions, PNL-4348, Pacific Northwest Laboratory, 1989.
9. Technical Specification for System 80+, CESSAR-DC, Chapter 16.
10. FLUENT V4.2 Validation Problems, TM-127, Fleunt, Inc., July 1993
11. Janczewski, A.J., "Transmittal of Revision 3 of the System 80+ Parameter List", FSP-91-039, June, 1991.
12. CESSAR DC, Appendix 6B, 6C, 1994
13. Private communication with Lew Kae Yeol of KNFC, 1998.



Table 1. Case Summary

Case	No	Grid	Time Step Size (sec)	Max. inlet velocity (ft/sec)	Unborated Water Volume (ft <sup>3</sup> )	inlet size (inch)	Minimum Boron Concentration (wt-ppm)	Time for Minimum (sec)
grid	1	44 X 30	0.05	13.4	631	5	2203	15.2
	2	86 X 58	0.05	13.4	631	5	525	15
	3	170 X 58	0.05	13.4	631	5	367	15
	4	170 X 114	0.05	13.4	631	5	734	16.5
time step size	5	86 X 58	0.1	13.4	631	5	699	15.5
	6	86 X 58	0.05	13.4	631	5	525	15
	7	86 X 58	0.01	13.4	631	5	490	15
	8	86 X 58	0.005	13.4	631	5	507	15

Case	No	Grid	Time Step Size (sec)	Annulus Flow Rate	Unborated Water Volume (ft <sup>3</sup> )	inlet size (inch)	Minimum Boron Concentration (wt-ppm)	Time for Minimum (sec)
sub volume and velocity	9	86 X 58	0.1	0.98	261	5	1870	13.5
	10	86 X 58	0.1	1.5	261	5	2198	11.2
	11	86 X 58	0.1	0.98	524	5	733	14.2
	12	86 X 58	0.1	1.5	524	5	1,047	11.9
inlet size	13	170 X 58	0.05	0.98	524	10	324	14.2
	14	170 X 58	0.05	0.98	524	7.5	388	14.2
	15	170 X 58	0.05	0.98	524	5	581	14.3
	16	170 X 58	0.05	0.98	524	2.5	942	14.7
selected case	17	170 X 58	0.01	0.98	524	5	381	13.6

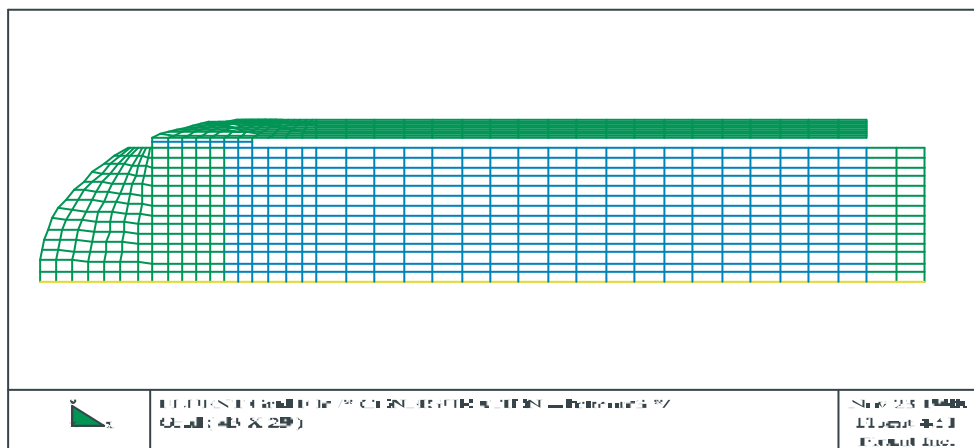


Fig. 1 Computational Grid (43 X 29)

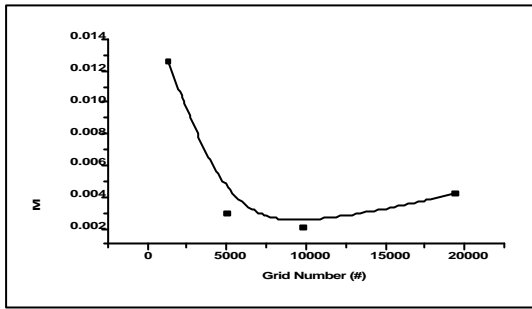


Fig. 2 Variation of the boric acid mass fraction with respect to grid size

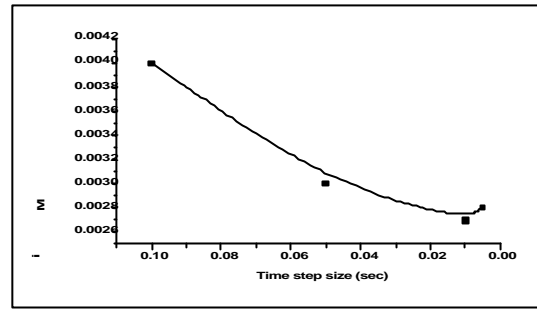


Fig. 3 Variation of the boric acid mass fraction with respect to time step size

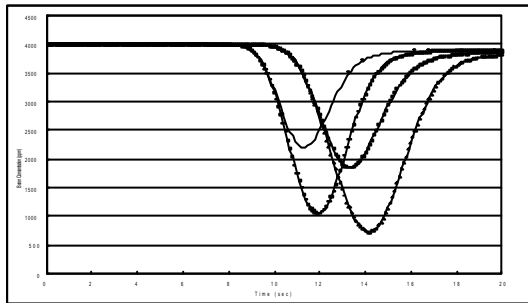


Fig. 4 Boron concentration histories at the core inlet (sulg volume & inlet velocity)

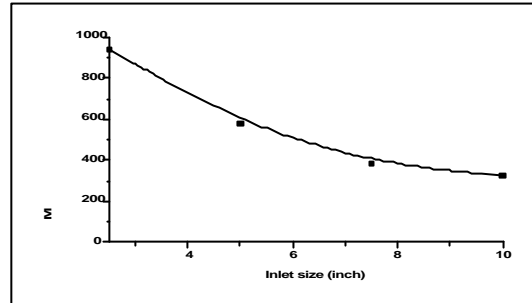


Fig. 5 Variation of the boron concentration with respect to inlet sizes

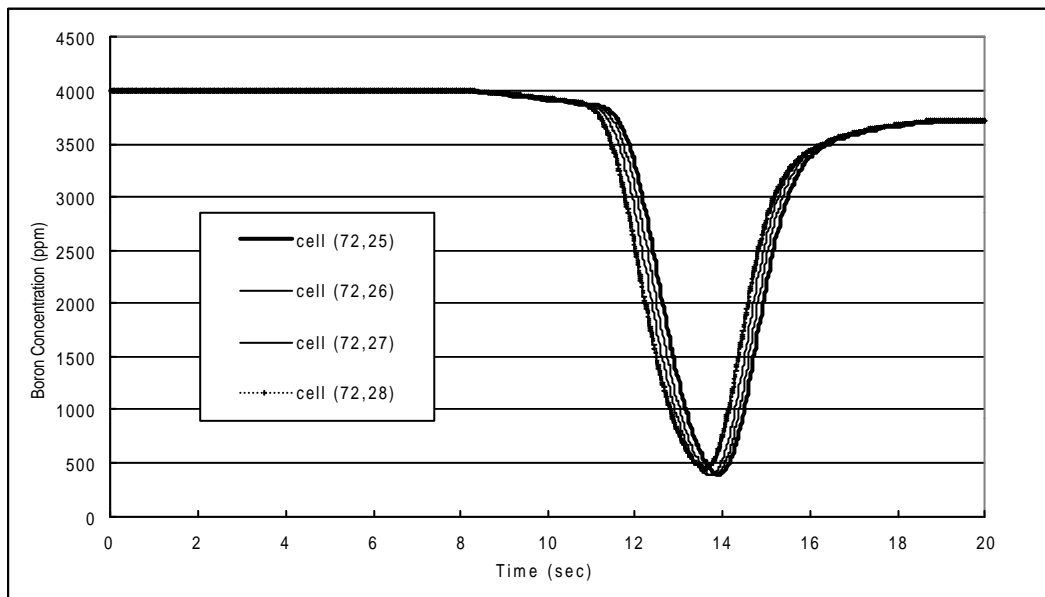
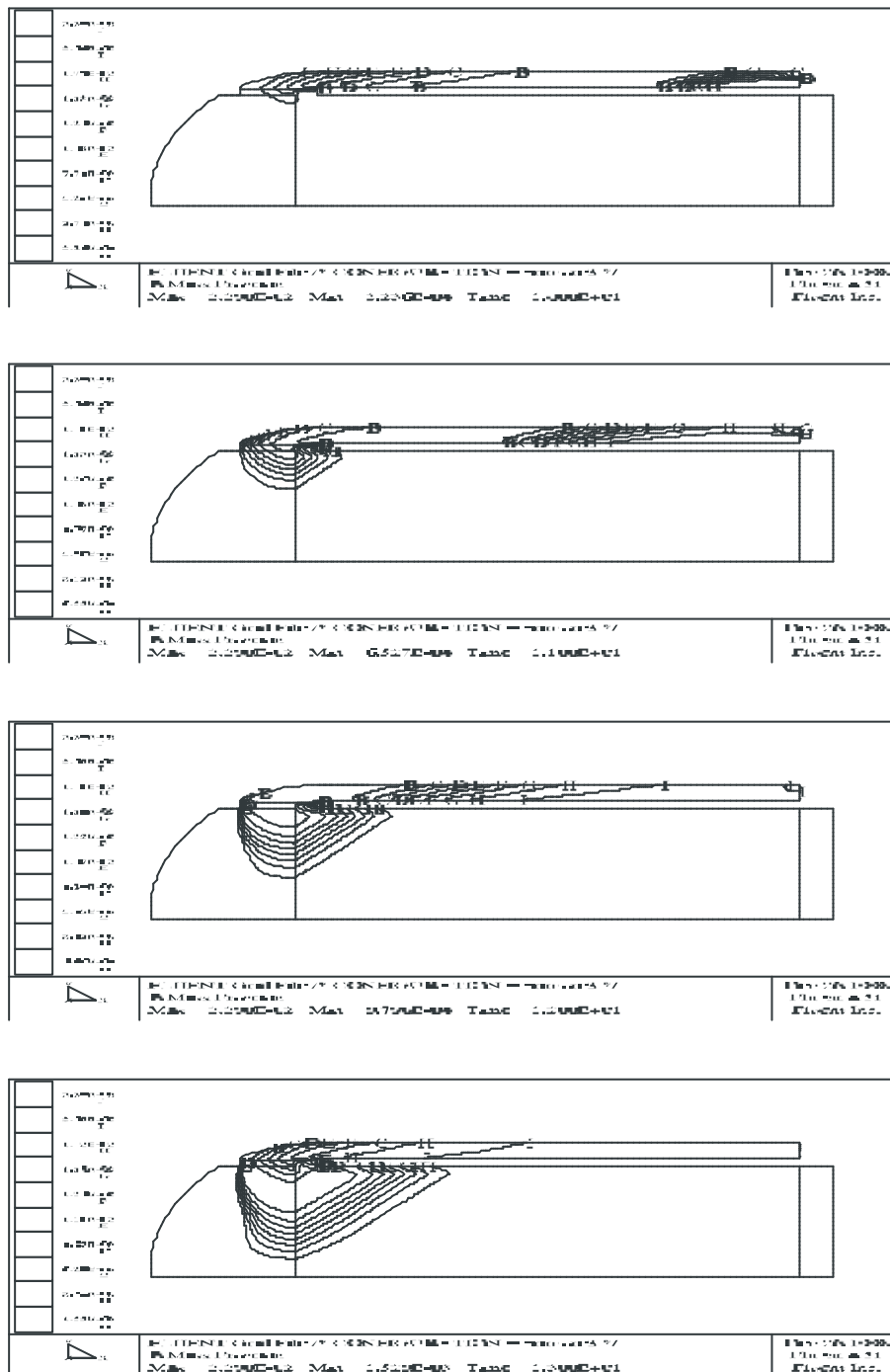


Fig. 6 Boron concentration histories (case 17)



**Fig. 7 Contours of the Boric Acid Mass Fraction  
(time step: 0.01sec, slug volume: 524 ft<sup>3</sup>, pump annulus flow rate: 98%)**