

## FLUENT 코드를 이용한 차세대원자로의 붕산혼합 현상 해석

황영동, 김영인, 심석구, 박종균  
한국원자력연구소

박홍준  
서울대학교

### 요 약

차세대원자로의 붕산희석사고시 노심에 유입되는 저농도 붕산수 slug의 혼합현상에 대한 해석을 수행하였다. FLUENT V4.47을 이용하여 inherent event와 external event로 분류되는 SBLOCA시와 SIS 주입에 따른 급속붕산희석현상에 대해 이차원 축대칭을 가정하여 해석을 수행하였다. 각각의 경우에 대하여 사고시 노심에 추가되는 정반응도는  $1.86\% \Delta\rho$  이하로 계산되었으며, 이 결과는 원자로정지여유도  $6.5\% \Delta\rho$  보다 작은 값을 가지므로 원자로의 안전성을 유지하기에 충분한 여유를 갖는 것으로 해석되었다.

### 1. 서론

붕산희석사고는 전체적인 노심반응도제어를 위해 냉각재에 주입하는 붕산의 농도가 내적 혹은 외적인 요인에 의해 감소하여 노심의 반응도가 급격히 증가하여 발생하는 반응도 유발 사고중 하나이다. 차세대원자로에서는 새로운 인허가 현안으로 소형냉각재상실사고 또는 저출력운전시 발생할 가능성이 있는 붕산희석사고에 대해 주목하고 있다. 붕산희석사고는 기존 발전소의 최종안전성분석보고서(FSAR)에 포함되어 있으나 FSAR에서는 1차계통에 주입되는 무붕산수(unborated water) 혹은 저농도 붕산수(diluted water)가 냉각재와 균일하게 혼합되는 것을 가정한 external dilution event 만을 포함하고 있다. 그러나 붕산희석사고의 다양한 시나리오에 대한 연구결과에 의하면 사고요인이 외적이건 혹은 내적이건 간에, 무붕산수 혹은 저농도 붕산수가 slug 형태로 노심에 유입되는 특징을 보이고 있다.

붕산희석사고와 관련된 주요 물리현상은 저농도 붕산수 slug의 형성, 수송 및 RCS 냉각재와의 혼합, 저농도 붕산수 slug에 의한 노심의 급격한 출력증가 및 이에 따른 핵연료의 반응 특성 등이며, 저농도 붕산수 slug가 일차냉각재와의 혼합 없이 노심에 주입될 때 붕산희석사고의 위험성은 매우 심각한 것으로 평가되고 있다. 그러나 slug가 노심으로 주입되는 수송 과정에서 원자로냉각재와의 혼합 노심내의 급격한 출력증가를 완화시킨다. 따라서 붕산희석사고의 잠재적 위험성에 대한 평가에는 저농도 붕산수의 slug가 노심에 유입되는 과정에서의 slug의 붕산혼합 효과를 고려한 노심내의 국부 급속출력증가에 대한 평가를 포함하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 이러한 목적으로 다차원 열수력 코드인 FLUENT코드를 차세대원자로의 붕산혼합현상 해석에의 적용성을 검토하고, 이 코드를 이용하여 차세대원자로에서 예상되는 붕산희석사고에서 가장 보수적인 case를 선정하여 원자로의 하향유로 및 노심내 유동장의 붕산혼합현상을 해석하였다.

## 2. 해석대상 선정

붕산희석사고는 크게 외부요인에 의한 것(external boron dilution or rapid boron dilution)과 내부요인에 의한 것(inherent boron dilution)으로 나눌 수 있다. External boron dilution은 다양한 외부요인에 의하여 형성된 무붕산수 또는 저농도 붕산수의 slug가 노심에 유입되어 발생하며, inherent boron dilution은 SBLOCA 후 일차계통의 비등 및 응축열전달 모드, 1, 2차계통의 누출 사고시 2차 냉각수의 유입 등과 같은 내부요인에 의하여 형성된 저농도 붕산수 slug의 노심내 주입으로 발생한다. Bounding 해석에 의해 급속붕산희석사고는 두 case를, inherent boron dilution은 한 case를 해석대상으로 선정하였다.

### 2.1 급속 붕산희석 사고

차세대원자로의 모든 운전모드에서 급속붕산희석 사고를 유발할 수 있는 무붕산수 slug의 source는 정지냉각계통이 연결되어 있는 4개의 안전주입배관(DVI)으로 최대체적은  $60\text{ft}^3$  ( $15\text{ft}^3 \times 4$ )을 갖는다[1]. 표 1은 차세대 원자로의 운전모드이다. 이들 운전모드에서 붕산희석 사고해석의 보수적인 조건을 결정하는 변수는 RCS 압력, 온도, 붕산농도, 역붕산치(inverse boron worth)와 주입유량, 주입수의 온도와 원자로 정지여유도 등이다. 출력운전(mode 1)중 발생하는 붕산희석사고에 의한 노심의 출력증가는 RCCAS(Rod Control Cluster Assemblies) withdrawal 사고에 의하여 bounding 되므로[2], 이를 제외하고 원자로냉각재의 온도와 압력을 최대와 최소, 주입유량은 최대, 붕산농도는 최대와 최소, 그리고 저농도 붕산수 slug 주입온도를 최소로 가정하면 급속붕산희석사고의 bounding 해석 조건은 mode 3과 mode 5의 두 가지 경우로 단순화시킬 수 있다.

표 2의 case 1은 mode 5의 감소된 냉각재 상태로서 ARO(All Rods Out) 조건에서  $K_{\text{eff}}=0.99$ 의 붕산농도를 가정하였다. 이 상태는 slug가 주입되기 전에 가장 높은 붕산농도를 가지며 냉각재 재고량이 최소인 상태를 나타낸다. Case 2는 mode 3에서 감소된 냉각재 재고량과 ARO 조건에서 붕산농도를 가정한 조건으로 case 1에 비하여 냉각재 밀도는 감소되고 붕산농도는 증가되는 결과를 가져온다. Case 2는 DVI를 통해 주입되는 물과 RCS 냉각재 사이의 온도와 붕산농도 차이에 의한 반응도 변화를 가장 크게 하므로 mode 3, 4, 그리고 6(냉각재 재고량의 감소가 없는 경우)을 포함하는 가장 보수적인 조건이 된다.

이들 case는 mid loop 수위까지의 감소된 냉각재 재고량을 가정하고 원자로 정지여유도  $6.5\% \Delta\rho$ 에서 예상되는 붕산농도 보다 높은 값을 사용한다. 또한 원자로 냉각재는 포화상태를 가정하고, 초기 RCS 체적은 최소값을 사용하기 때문에 mode 3~5에서 예상되는 사고결과를 보수적으로 계산하게 된다. Mode 6의 붕산농도는 mode 3에서의 붕산농도보다 높지만, mode 6은 노심에 주입되는 저농도 붕산수 slug의 붕산농도는 초기의 높은 붕산농도 (4000 ppm) 때문에 mode 3의 결과에 비하여 높은 붕산농도를 갖는다. Mode 3 경우의 붕산농도 최소값은 mode 6 ARO조건에서의 임계붕산농도보다 높기 때문에 mode 3의 해석결과를 mode 6에 적용할 수 있다.

### 2.2 Inherent Boron Dilution(SBLOCA)

차세대원자로의 경우 등가직경 2.54~7.62 cm (1~3 inch) 크기의 소형냉각재상실사고시 일차계통은 역응축류(reflux condensation) 형태의 안정된 냉각상태에 들어갈 수 있다. 이때 증기발생기 U-tube의 하향부위에서 응축된 응축수는 저온관의 loop seal에 축적된다. 이 응축수의 붕산농도는 사실상 0 ppm에 가깝기 때문에 시간이 경과함에 따라 저온관의 loop seal에 저농도 붕산수의 slug가 형성된다. 이런 상황에서 RCP를 재가동하거나 자연순환이 재개되면 loop seal에 축적된 slug가 노심에 유입되면서 노심출력이 급격히 증가한다. 특히 RCP의 재가동시에는 loop seal에 축적된 slug가 빠른 속도로 주입되어 원자로의 안전성을

위험할 수 있으므로 slug의 수송과정에서의 봉산혼합효과를 고려한 평가가 필요하다.

### 3. 해석방법 및 절차

FLUENT V4.47은 일반적인 유체유동 현상, 열전달 현상, 화학작용 등을 모델링, 해석/분석하기 위해 만들어진 유동해석 code로서 직각좌표계, 원통형 좌표계뿐 아니라 곡선 좌표계에 있어서 2, 3차원 구조에 대한 모사가 가능하므로 비선형 유로 등을 해석할 수 있다.[3] FLUENT에서 제공되는 여러 가지 지배방정식들 중, 봉산 회석사고에 대한 해석을 위해 비정상 유동에 대한 연속 방정식, 운동량, 에너지 보존식을 채택하고, 난류 모델링을 위해 일반적으로 널리 쓰이는  $k-\epsilon$  모델을 사용할 경우, 난류 에너지와 소산률에 대한 식 이외에 species transport 방정식이 필요하다. FLUENT에서는 species로 명명된 별도의 옵션을 선택하여 봉산 회석과 species 수송문제를 해석할 수 있다.

#### 3.1 기본가정

노심내 봉산회석 사고를 모델링하기 위해, 유동에 대한 축대칭 2차원 해석을 통해, 노심내 봉산 농도를 시간과 위치의 함수로 결정하였다. 이 모델은 lower head부터 fuel alignment plate의 상단까지의 원자로 용기 즉, 하향유로, flow skirt, 노심, 그리고 다른 내부를 포함한다. 하향유로에서 lower plenum 사이와 노심내부의 구조적 복잡성을 피하기 위해 이 두 영역을 porous media로 모델링하였다. 이 단순화된 모델에서는 실제 구조를 모델링하는 대신 평균 유동저항을 포함하는 면적을 고려하고 있다. 이 저항 값은 System 80+ parameter list로부터 얻은 정방향 유동에 대한 압력손실 데이터로부터 계산된다.[1] 그림 1은 해석에 사용된 해석격자로서 비정상 상태의 초기혼합 단계에서의 정확한 계산을 위해 하향유로 부분에서는 세밀한 그리드를 채택하였다.

FLUENT에서 porous model을 사용하기 위해서는 porous media model이 적용되는 특정 cell을 정의하고 유동 압력결손을 입력하여야 한다. 이는 운동량방정식에서 momentum sink 항을 추가하여 모델링하는 구조에 적절한 값의 계수를 계산하여 입력하는 것과 같다. 즉, 이 영역에서의 압력결손항은 다음과 같이 표현된다.

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

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 차세대원자로의 유동방향에 대한 압력손실 값(forward pressure loss)으로부터 계산된다.

#### 3.2 초기 및 경계조건

##### 3.2.1 급속 봉산회석 사고시

무봉산수 slug는 4대의 고압안전주입펌프에 의하여 DVI 배관을 통하여 최대유량으로 원자로 용기에 주입되는 것으로 가정하였다. 주입 후 slug가 빠른 속도로 노심으로 주입될 수 있도록 RCP가 작동하는 것을 가정하였다. 우선 초기에 노심은 일정한 봉산농도를 가진 냉각재로 채워져 있고, 0초에 주입을 시작하면서 무봉산수 slug가 하향유로입구를 통하여 균일한 속도로 유입된다. 0초부터 6초까지 이러한 상태가 지속되고 6초 이후에는 단일 RCP가 재가동함에 따라 초기 노심 봉산농도와 같은 농도의 봉산수가 유입된다고 가정한다. Mode 3과 mode 5에 해당하는 초기 봉산 농도는 각각 1325 ppm과 1533 ppm이 되며, 6초 후에도 초기 농도와 같은 봉산수가 주입된다. SIS 주입을 통한 급속 봉산회석 사고에 대한 경계조

건은 표 3과 같다.

### 3.2.2 SBLOCA시

무붕산수 slug의 수송과정에서 혼합특성을 보수적으로 계산하기 위하여 열전달을 고려하지 않고 단순히 원자로 냉각재와 동일한 온도의 무붕산수 slug가 유입되는 조건을 가정하였다. loop seal과 저온관(below centerline)이 무붕산수로 채워진 것으로 가정하였다. 체적은  $7.42 \text{ m}^3 (262 \text{ ft}^3)$  해석결과의 보수성을 위하여 다음의 가정을 하였다. SYSTEM 80+의 CESSAR-DC를 참조하여 차세대원자로의 경우 SBLOCA시 reflux boiler 모드에 의해 loop seal에 저농도 붕산수 slug가 축적되는 파단부의 크기는  $2.54 \sim 7.62 \text{ cm}$  (직경 1~3 inch)를 가정하였다. 보수적인 해석을 위하여 증기발생기의 공통플레넘에 연결된 RCP의 backflow에 의한 영향을 고려하여 RCP 기동시 원자로 용기에 주입되는 응축수의 체적은 RCP suction에 연결된 loop seal 체적의 2배를 사용하였다.

초기에 노심은 4000 ppm의 정제된 붕산수로 채워져 있고, 15초의 pump flow rate acceleration을 가정하여 0초부터 15초까지는 입구유량이 선형적으로 증가하다가 15초 이후에는 일정한 속도로 냉각수가 유입된다. 무붕산수는 5.36초부터 9.41초 사이에 주입된다고 가정한다. 소형냉각재 상실사고 후 RCP 재가동에 의한 붕산회석사고에 대한 경계조건은 표 4와 같다.

## 4. 해석결과 및 고찰

FLUENT 코드는 유동장내의 각 species에 대한 질량분율을 그림 또는 데이터로 직접 출력할 수 있다. 최소붕산농도는 wt. % 붕산치를 이용하여 FLUENT의 결과에서 얻은 최소 질량분율로부터 구할 수 있다.[4] 즉,  $1 \text{ wt. \% boron} = 1748.34 \text{ ppm boron}$  이고,[5] 따라서 최소붕산농도( $C_{\min}$ ) = 최소질량분율  $\times 100 \times 1748.34 \text{ ppm}$ 의 관계식에서 최소붕산농도를 산출해 낼 수 있으며, 급속붕산회석사고후 정지여유도는 최소임계붕산농도( $C_{\text{crit}}$ )와 국부적인 최소붕산농도의( $C_{\min}$ ) 차이( $\Delta \text{ppm}$ )를 역붕산치, 즉  $66 \text{ ppm} / \% \Delta \rho$ 로 나누어줌으로써 역으로 산출한다.[1] Case 1의 경우 최소임계붕산농도( $C_{\text{crit}}$ ) 1325 ppm이고, case 2의 경우는 1533 ppm으로 주어진다.[5]

Case 1에 대한 해석결과 노심내의 최소붕산 농도는 9초와 11초에서 발생하였다. 그림 2는 case 1의 9초에서의 해석결과로서 최소붕산농도가 하향유로의 하단부에 나타났다. 이때 노심의 최소붕산농도는 1208.36 ppm으로 mode 5에서의 최소 임계붕산농도 1325 ppm 보다 116.64 ppm 낮게 계산되었다. 그림 3은 11초에서의 붕산농도분포로 저농도 붕산수 slug의 중심이 노심내로 유입되고 있으며 이때의 최소붕산농도는 1250.12 ppm으로 임계붕산농도보다 78.88 ppm 낮게 나타났다. 11초 이후에는 노심내 모든 영역에서 최소 붕산농도가 1250.12 ppm보다는 크게 된다.

그림 4는 case 2에 대한 9초에서의 붕산농도분포를 나타낸다. Case 1, 2는 농도값은 차이가 다소 있지만, slug의 이동 경향 및 분포가 매우 유사함을 볼 수 있다. 이는 두 경우 모두 온도와 농도 및 압력을 제외한 주입되는 slug의 유량에 대한 초기 및 경계조건이 동일하고, 붕산의 혼합이 순전히 대류(convection)에 의하여 일어난다는 사실에 기인한다고 판단된다. 특히, 두 경우는 각각 다른 온도를 사용하고 있지만 해석에서는 물성치를 온도의 함수로서 사용하지 않기 때문이다. Case 2는 노심내의 최소붕산농도가 9초에서 발생하며 이때의 최소붕산농도는 1410.21 ppm으로 mode 3의 최소 임계붕산농도 1533 ppm보다 122.79 ppm 낮다. 이 값을 역붕산치를 이용하여 반응도를 계산하면  $1.86 \% \Delta \rho$ 에 해당한다.

그림 5는 SBLOCA 후 RCP 재가동에 의한 붕산회석사고의 혼합현상에 대한 해석 결과이다. 이 경우 water slug의 수송과정에서 혼합특성을 보수적으로 계산하기 위하여 열전달

을 고려하지 않고 단순히 원자로 냉각재와 동일한 온도의 무붕산수가 유입되는 조건을 가정하였다. 해석결과 loop seal에 형성된 저농도 붕산수 slug는 노심으로 주입되는 과정에서 원자로냉각재와 충분한 혼합이 이루어져 노심의 붕산농도는 최소 임계농도 보다 높게 유지되고 있다. SBLOCA시 노심 온도가 300 °F일 경우 최소임계붕산농도는 550 ppm이고,[6] 본 해석에서의 노심내 최소붕산농도는 659.30 ppm이므로 노심이 임계상태에 도달하는 것을 억제하기에 충분한 농도를 유지한다.

### 5. 요약 및 결론

차세대원자로의 붕산희석사고를 검토하여 가장 보수적인 결과가 예상되는 case를 선정하여 slug의 수송과정에서의 붕산혼합현상을 해석하였다. 무붕산수 또는 저농도붕산수의 slug가 하향유로를 통해 노심에 유입될 경우, 노심내에서 slug의 혼합현상을 2차원 축대칭 모델로 단순화하여 다차원 열수력 코드인 FLUENT코드를 이용하여 해석하였다. 급속붕산희석사고시의 해석결과 각각의 경우에 대하여 사고시 노심에 추가되는 정반응도는  $1.86 \% \Delta \rho$  이하임을 보여주고 있다. 이 결과는 기술지침서에서 제시하는 원자로정지여유도  $6.5 \% \Delta \rho$  보다 매우 작은 값이다.[7] SBLOCA시 최소임계붕산농도( $C_{crit}$ ) 보다도 높은 붕산농도를 나타내므로 노심이 임계상태에 도달하는 것을 억제하기에 충분한 여유를 가진 것으로 해석되었다. 그러나 이 해석결과는 혼합현상을 보수적으로 계산하기 위하여 유로를 단순화하였기 때문에 물리적인 현상을 보다 정확히 파악하기 위해서는 기하형상 및 해석모델에 대한 민감도 분석이 요구된다. 또한 비정상 유동을 수치적으로 해석하는데 있어서 수치해의 정확성을 보장받기 위한 여러 가지 요구사항들 중 가장 기본적인 것은 수치해에 대한 그리드와 시간간격의 비의존성이다. 향후 본 연구에서는 그리드와 시간간격에 대한 민감도 해석을 수행한 후 많은 단순화에서 배제된 부분을 보강하고 실제에 가까운 물리적 현상을 모델링하기 위해 3차원 해석을 수행할 계획이다.

### 참고문헌

1. Janczewski, A. J., "Transmittal of Revision 3 of the System 80+ Parameter List", FSP-91-039, June, 1991.
2. 백승수 외, "FLOW3D를 이용한 급속붕산희석 사고해석", 한국원자력학회 학술발표회 논문집, 1994.
3. "FLUENT User's Guide Version 4.3", Fluent Inc., January, 1995.
4. "Boric Acid Makeup Tank Concentration Reduction Effort CEN-316(S)", Combustion Engineering, March, 1986.
5. Litke, C. P., "System 80+ Reactor Core Boron Concentration Calculations Using FLUENT, July, 1992.
6. Tae-soon Kwoon, "Post-LOCA Boron Dilution, April, 1995.
7. Technical Specification for System 80+, CESSAR-DC, Chapter 16,

표 1. 운전모드

Operational Mode	Reactivity Condition( $K_{eff}$ )	Rated Thermal Power(%)*	Cold-leg Temperature( $T_{cold}$ )
1. Power Operation	$\geq 0.99$	$> 5\%$	$\geq 350$ °F
2. Startup	$\geq 0.99$	$\leq 5\%$	$\geq 350$ °F
3. Hot Standby	$< 0.99$	0	$\geq 350$ °F
4. Hot Shutdown	$< 0.99$	0	$T_{cold} < 210$ °F $< 350$ °F
5. Cold Shutdown	$< 0.99$	0	$\leq 210$ °F
6. Refueling	$\leq 0.95$	0	$\leq 135$ °F

\* Excluding Decay Heat.

표 2. 급속 붕소회석시 가정 및 초기조건

변 수	Case 1(Mode 5)	Case 2(Mode 3)
1. RCS Liquid Volume	Reduced Inventory (mid-loop)	Reduced Inventory (mid-loop)
2. RCS Temperature	210 °F	572 °F
3. RCS Pressure	atmospheric	1250 psia
4. CEA Configuration	N-1	N-1
5. RCS Boron Concentration	1% Subcritical(ARO)	1% Subcritical(ARO)
6. Available Shutdown Margin	7/6.5 % Δρ	7/6.5 % Δρ
7. Water Slug Volume, Boron Concentration	60 ft <sup>3</sup>	60 ft <sup>3</sup>
8. Water Slug Injection Method	0 ppm 4HIPSI Pumps, Maximum Flows	0 ppm 4HIPSI Pumps, Maximum Flows
9. Water Slug Temperature	40 °F	40 °F
10. Single Failure	*	*

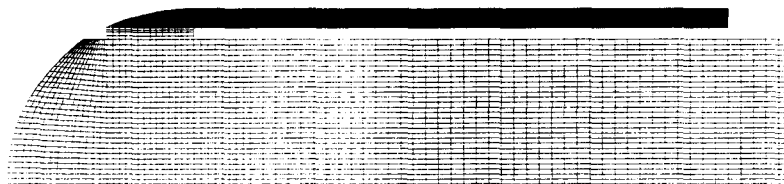
\* No single failure will impact the event consequences.

표 3. 급속 붕소회석시 경계조건

Time at 0sec	Case 1	Case 2
Inlet Flow gpm	0	0
Boron Conc. ppm	1325	1533
Fluid Temp. °F	210	570
0<Time<6sec	Case 1	Case 2
Inlet Flow gpm	4900	4900
Inlet Conc. ppm	0	0
Inlet Temp. °F	40	40
Time>6sec	Case 1	Case 2
Inlet Flow gpm	133,920	133,920
Inlet Conc. ppm	1325	1533
Inlet Temp. °F	210	570

표 4. SBLOCA시 경계조건

Time at 0 sec	SBLOCA Case
Inlet Flow gpm	0
Boron Conc. ppm	4000
5.36 < Time < 9.41 sec	SBLOCA Case
Boron Conc. ppm	0
Time > 9.41 sec	SBLOCA Case
Boron Conc. ppm	4000
15 sec, Inlet Flow gpm	133920
30 sec, Inlet Flow gpm	133920



BORON DILUTION (CASE 2)  
Grid ( 85 X 57 )

Apr 10 1998  
Fluent 4.47  
Fluent Inc.

그림 1. 계산에 사용된 그리드

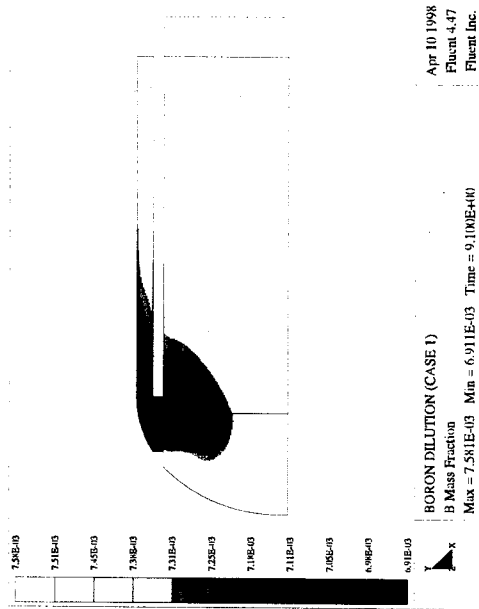


그림 2. 9초에서의 보론 질량분포 (Case 1)

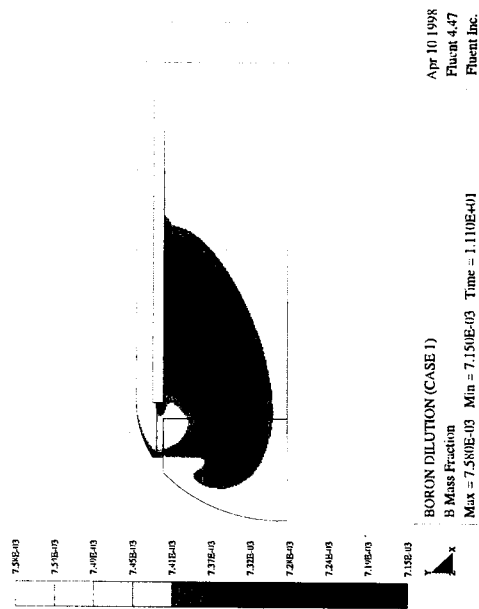


그림 3. 11초에서의 보론 질량분포 (Case 1)

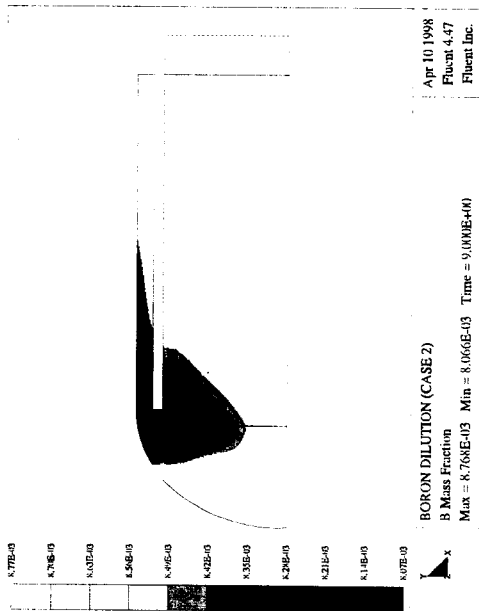


그림 4. 9초에서의 보론 질량분포 (Case 2)

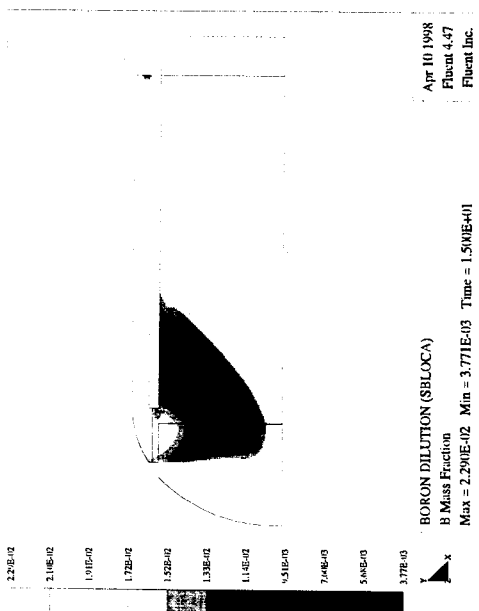


그림 5. SBLOCA시 15초에서의 보론 질량분포