2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

주증기관 파단사고시 RCP작동에 따른 붕산수의 노심우회거동 해석

Core Bypass of Borated Water during Main Stream Line Break with RCP Running Mode

권태순, 최청렬, 송철화, 송진호, 정법동

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

3-D CFD 코드와 2-channel 계통해석 모델을 이용하여 주증기관 파단사고시 주냉각재 펌프가 작동되는 상황하에서 DVI로 주입된 붕산수의 노심우회현상을 해석하였다. 2-channel 계통해석 모델에서는 붕산수가 원자로용기의 상부 강수부로부터 상부 플레넘으로 흐르는 것으로 예측되었다. 주증기관 파단사고의 고압안전주입수 주입모드 동안에 붕산수는 주냉각재 펌프의 대유량 때문에 하부 강수부로 흐르지 못하기 때문이다. 그러나, CFD 해석 결과에서는 붕산수가 하부 강수부로 흐르는 것으로 예측되었다. 그러므로, 주증기관 파단사고의 해석을 위한 한 개 또는 두 개의 제어체적을 갖는 강수부 유로모델은 평가되어야 할 것으로 사료된다.

Abstract

The core bypass phenomena of borated water injected by DVI nozzle during steam line break accidents with RCP running mode has been calculated using 3-D CFD code and 2-channel system analysis model. The borated water is shown to flow from upper downcomer to upper head of a reactor vessel in the 2-channel system analysis model. The borated water does not flow into the lower downcomer due to the high RCP flows during the HPSI injection mode of main steam line break accidents. In the CFD analysis results, However, the borated water flows to the lower downcomer. Thus, the single or 2-channel downcomer models might be re-evaluated for realistic simulation of the steam line break accidents.

1. 서론

주증기관 파단사고 시 DVI를 장착한 APR1400 (Advanced Power Reactor 1400MWe) 형 원자로의 경우, 저온관 주입에 비해 주입 지점이 약 2.1m 상부에 위치해 있으므로 표준형 원자로 KSNP (Korea Standard Nuclear Plant)와 비교해 볼 때 DVI 주입노즐의 위치가 다르므로 붕산수의 노심도달 경로가 다른 영향이 나타날 수 있다. 주 냉각재 펌프가 작동하는 상황에서 고압안전 주입수가 강수부 상부로 주입되면, 저온관을 통해 원자로용기로 유입된 대량의 냉각수에 밀려 고압안전 주입수의 붕산수가 강수부 하부로 흘러내리지 못하게 될 수도 있다. DVI Nozzle을 통해 유입된 붕산수가 강수부로 흘러 내리지 못하게 되면 우회유로인 Upper Plenum으로 흐르게 되며, 이 경우 붕산수는 노심을 경유하지 않고 고온관으로 빠져 나가는 붕산수 노심우회 현상이 발생하여 노심의 노심 반응도에 영향을 미치는 상황을 초래하게 된다.

붕산수의 노심우회현상은 강수부를 모의하는 방법에 따라 크게 다를 것으로 예상된다. 강수부를 단위 노드나, 단일 또는 복수 유로(Flow Channel)로 모사하는 경우는 Node의 상부에 주입된 고압안전주입수의 붕산수가 압력차이에 의해 유발되는 유동특성에 따라 축방량으로 흐르므로 주 냉각재 펌프가 작동하는 기간에는 강수부 하부로 하부로 흘러내릴 수 없다. 이에 비해 횡유동이 허용되게 강수부를 여러 유동 채널로 모사하는 경우 어느 정도의 다차원적 유동 패턴을 모사할 수 있으므로 상부 강수부에서의 붕산수의 강하현상이 예측 가능할 것으로 예상된다. 반면에 미소 유동체적으로 유동장을 모사하는 CFD(computational Fluid Dynamics) 계산에서는 저온관 유동의 Impinging Jet 및 Spiral Motion으로 유발되는 유로를 따라서 상부 강수부에 주입된 붕산수가 강수부 하부로 유입될 수 있다.

본 연구에서는 강수부를 2-Channel로 모델한 복수 채널 모델과, 미소체적의 CFD 코드에 의한 계산 결과를 비교하여 주증기관 파단사고시 주냉각재 펌프가 작동하는 상황하에서 붕산수의 노심우회현상 발생 여부를 평가하였다. HPSI 유량이 작은 경우 Reactor Vessel Bypass 유량 정도에 해당하는 유량이므로 고유량의 HPSI 주입에 비해 붕산수의 노심우회 (강수부 상부로의 우회) 현상이 강하게 나타나는 조건이 된다. 따라서 HPSI 하나가 작동되고 주냉각재 펌프가 작동되는 상황 하에서 상부 강수부 DVI 노즐로 주입된 붕산수의 유입경로를 CFD 해석을 통하여 예측하였으며, 이 결과를 2-Channel 노드 모델을 갖는 MARS코드 해석 결과와 비교하였다.

2. 연구방법

본 연구에서는 주증기관 파단사고시 HPSI 하나가 작동되고 주냉각재 펌프가 작동되는 상황하에서 DVI 노즐로 주입된 붕산수의 노심유입경로의 초점을 맞추었다. CFD 계산은 MARS 등이 해석할 수 없는 유동현상인 DVI 노즐 및 저온관의 강수부에서의 Impinging 제트 와류에 의한 혼합과, 실제 유로에 접근하는 붕산수의 궤적을 추적하기

위하여 이용되었다. MARS를 이용한 2-Channel 강수부 모델의 계산은 인허가 환경과 유사한 계산 조건에서 강수부 붕산수가 원자로 용기의 상부 강수부에서 상부플레넘으로 우회되는 현상을 관측하기 위하여 수행되었다.

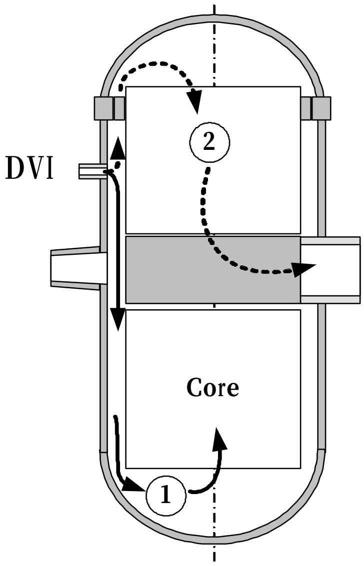


그림. 1 붕산수 주입경로

2.1. 수학적 모델링

FLUENT Ver.5.5를 이용한 해석은 3차원 정상상태 조건 하에서 수행되었으며, 연속방정식, 운동량 방정식 그리고 에너지 방정식을 사용하였으며, 난류유동 효과를 고려하기 위하여 Standard k-ε 난류모델을 적용하였다. Standard k-ε model은 난류운동에너지(k)와 소산율 (ε)의 수송방정식에 기초한 반 경험적 모델이다. 이 모델은 유동이 완전 난류유동이고, 분자점성의 효과는 무시한다는 가정을 포함하고 있다. 따라서 이 모델은 완전난류유동에 적합한 모델이다. 열전달에 의한 유체의 자연대류현상을 고려하기 위하여 Boussinesq Model을 적용하였다. 해석 시 사용된 지배방정식은 아래와 같다.

Mass Conservation:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \qquad (1)$$

Momentum Conservation:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v}\vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}} - \rho_0 \beta (T - T_0) g + S_i \qquad (2)$$

여기서, $\bar{\bar{\tau}} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right]$

Energy Conservation:

$$\frac{\partial}{\partial t}(T)+\nabla g(\overset{r}{v}T)=a\nabla(\nabla gT)-r_0 b(T-T_0)g \qquad (3)$$

Turbulence Model (Standard k- e Model):

$$\frac{\partial}{\partial t}(rk)+\frac{\partial}{\partial x_i}(rku_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(m+\frac{m_t}{s_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k+G_b-re+S_k$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(re)+\frac{\partial}{\partial x_i}(reu_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(m+\frac{m_t}{s_e}\right)\frac{\partial e}{\partial x_j}\right]+C_{1e}\frac{e}{k}(G_k+C_{3e}G_b)$$
$$-C_{2e}\,r\,\frac{e^2}{k}+S_e \qquad (4)$$

여기서, $C_{1e}=1.44, C_{2e}=1.92, C_m=0.09, s_k=1.0, s_e=1.3$ 을 적용하였다.

Porous media modeling (flow skirt, lower support, active core)

원자로 내에 설치되어 있는 flow skirt, lower support, active core는 다공성 판 및 튜브 뱅크로 구성되어 있다. 이러한 부분의 압력강하를 고려하기 위해서 다공성 판 및 튜브 뱅크를 porous media로 가정하여 운동량 방정식 (식 2) 의 생성항으로 처리하여 이들 구조물에 의한 유동 저항을 고려하였다. 이 경우 다공성판의 blockage 효과는 단지 다공성판을 지나는 속도벡터의 연속성을 유지하고자 체적유량에 기초한 가상 속도를 사용하므로 다공성 판에서의 압력강하만을 고려하게 된다.

Porous media는 운동량방정식의 운동량 생성항으로 식 (5)와 같이 두 개의 항으로 모델링 된다. 첫 번째 항은 viscous loss term 이고, 두 번째 항은 inertial loss term 이다.

$$S_i=-\left(\sum_{j=1}^{3}D_{ij}mv_j+\sum_{j=1}^{3}C_{ij}\frac{1}{2}r\left|v_j\right|v_j\right) \qquad (5)$$

S_i 는 운동량 방정식의 생성항이다. 이 운동량 sink는 porous 영역에서 압력구배에 기여하게 된다. 이 식은 간략히 다음과 같이 표현된다.

$$S_i=-\left(\frac{m}{a}v_i+C_2\frac{1}{2}r\left|v_i\right|v_i\right) \qquad (6)$$

여기서 a 는 permeability이고, C_2 는 inertial resistance factor이다.

압력손실계수(pressure loss coefficient)가 알려진 경우 다음과 같이 C_2 를 계산할 수 있다.

$$C_2 = \frac{K}{t}\left(\frac{v_{flow}}{v_{100\%}}\right)^2 = \frac{K}{t}\left(\frac{A_{100\%}}{A_{flow}}\right)^2 \tag{7}$$

여기서 K = pressure loss coefficient
t = thickness of porous media
$A_{100\%}$ =100% open area of porous media
A_{flow} =flow area of porous media

2.2. 수치해석 방법

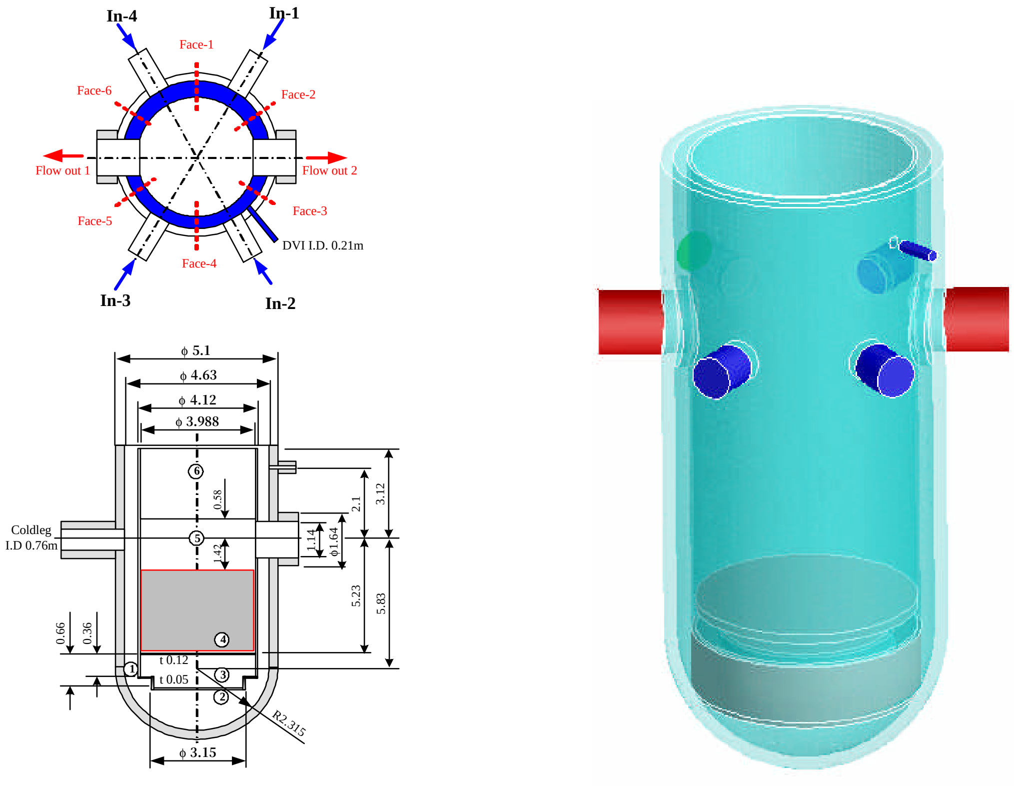
수치계산 시 대류항의 차분기법으로는 DVI 내의 유동 양식이 매우 복잡하므로, 고차의 도식을 사용하면 해의 수렴성이 좋지 않으므로 수렴해의 정확도는 다소 낮지만 안정적인 해의 수렴성을 보여주는 1차 상류도식 (first order upwind scheme)을 사용하였다. 압력장을 얻기 위해서는 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) 방법을 사용하였다. 격자를 구성하는 좌표계는 경계밀착 좌표계(body fitted coordinate system)를 사용하였다.

반복계산 시의 해의 수렴성을 향상시키기 위하여 모든 종속변수에 대하여 하향이완 (under relaxation)을 도입하였다. 압력장과 난류량에 대해서는 선형이완(linear relaxation)방법을 적용하여 이완계수로서 각각 0.3과 0.7을 사용하였으며, 속도성분들에 대해서는 0.5의 값을 부여하였다. 방정식을 계산하는 과정에서 해의 수렴은 잉여값이 10^{-3} 이하이면 수렴한 것으로 간주하였다.

3. 해석 모델 및 계산 조건

3.1. 해석 모델

APR1400의 1:1 형상이 그림 2에 나타나 있다. 4개의 저온관과 2개의 고온관 그리고 1개의 DVI 노즐이 모사되었으며, flow skirt, lower support, active core 또한 모사되었다. Core 내의 노심과 기타 구조물들은 수학적으로 모델링 (porous media로 처리)하여 해석을 수행하므로 형상 작업을 수행하지 않았다. 전체 격자는 육면제 격자로 구성되었으며, 셀의 수는 727,216개이다. 유동영역과 고체영역을 모두 고려하여 격자를 구성하여 유체영역과 고체영역 간의 열전달을 해석할 수 있도록 구성하였다.



(a) 주요치수 (b) 3-D 모델

그림 2 계산모델

3.2. 계산 조건

계산에 사용된 유체는 물로 가정하였으며, 고체영역은 SUS304로 설정하였다. 두 물체의 물성치는 온도에 관한 함수로 구성하였다. 4개의 저온관을 통하여 116 °C 의 고온수가 공급되고 하나의 DVI노즐을 통하여 50 °C 의 비상노심냉각수 (Boron)가 유입된다. 두 개의 고온관을 통하여 동일량의 냉각수가 유출된다고 가정하였다. Upper plenum을 통한 bypass 유량은 전체 유입유량의 3%가 된다고 설정하였다. 원자로 압력용기 외부 벽면에는 단열 조건을 적용하였다. Flow skirt, lower support, active core 영역과 core 내의 노심은 porous media로 모델링 되었으므로 이를 고려하기 위하여 pressure loss coefficient (K)를 사용하여 압력강하를 모사하였다. 이를 요약하여 표 1과 표 2에 나타내었다.

표 1 계산조건

Position		Velocity	Temperature
Inlet	In-1	15 m/sec	116 [$^{\circ}C$]
	In-2	15 m/sec	116 [$^{\circ}C$]
	In-3	15 m/sec	116 [$^{\circ}C$]
	In-4	15 m/sec	Adiabatic
	DVI	1.6 m/sec	50 [$^{\circ}C$]
Outlet	Out flow 1	50% Shared	-
	Out flow 2	50% Shared	-
	Reference pressure = 1.8 bar		
Cross Flow	Upper plenum	3%	
Wall	Wall outer	-	Adiabatic

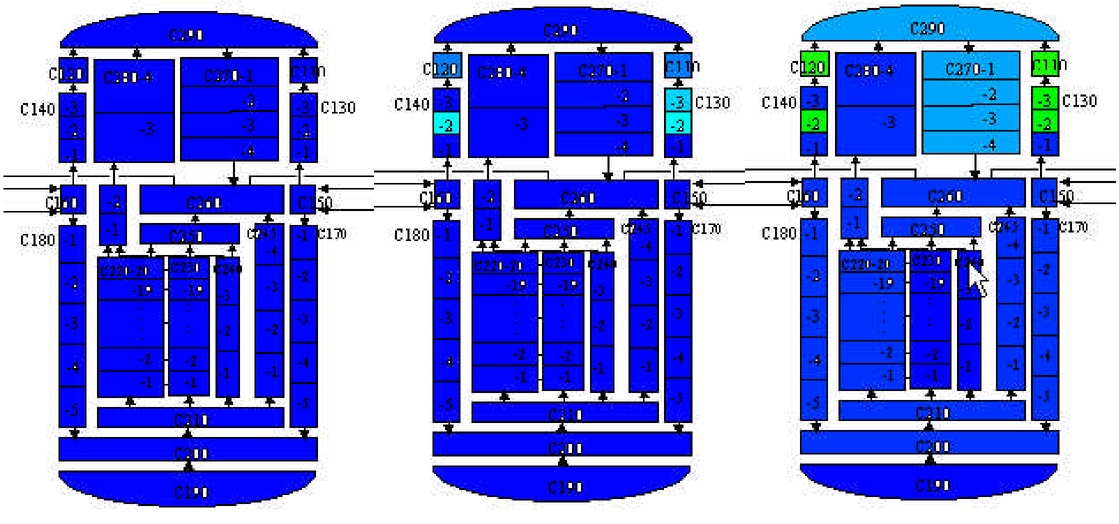
표 2 Porous media 압력손실계수

Position	Thickness [m]	K	Porosity ($A_{flow}/A_{100\%}$)	C2
Zone - : Flow Skirt	0.066	0.208	0.42	17.866
Zone - : Lower S. S.	0.050	0.052	0.42	5.941
Zone - : Core Inlet	0.170	0.013	0.42	0.427
Zone : Core	3.810	0.579	0.42	0.861
Zone : Upper S.	2.540	0.189	0.42	0.421

4. 결과

4.1 MARS 해석 결과

주증기관 파단 사고가 진행되어 주냉각재 펌프가 작동하는 상황하의 고압안전주입펌프에 의한 붕산수의 시간에 따른 분포를 그림 3의 (a)에서 (c)에 나타내었다. 주 냉각재 펌프의 대유량에 밀려 강수부의 상부를 통한 유로가 형성되어 비상노심냉각수가 강수부로 흐르지 못하는 붕산 농도분포를 보여주고 있다. 그림 3 (c)에서 보듯이 충분한 시간이 경과되어도 원자로 용기의 상부 플래넘을 경유하는 노심우회 우로를 따라 붕산수가 흐르며, 결과적으로 붕산수의 노심 우회 현상이 발생하고 있음을 보여주고 있다. 그림 4 에는 노심 반응도를, 그림 5에는 고안안전주입수 유량을 각가 나타내었다. 그림 4 와 5의 사고전개는 300 초에서 주증기관이 파단되는 시점이다.



(a) HPSI 주입전 (b) HPSI 주입후 130 초경과 (c) HPSI 주입520초 경과

그림 3 2-Channel모델의 붕산농도 천이

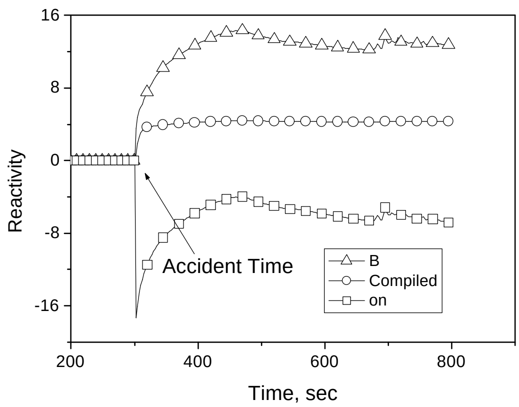


그림 4 노심 반응도

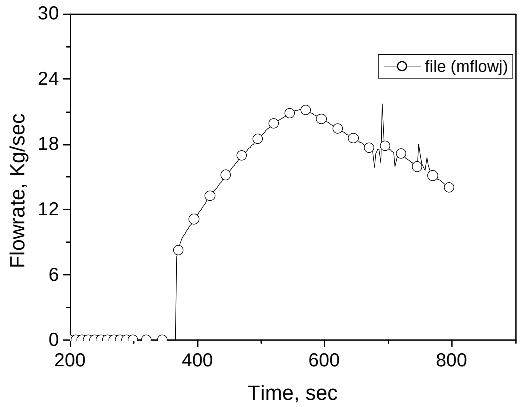


그림 5 안전주입수 유량

4.2 FLUENT 해석 결과

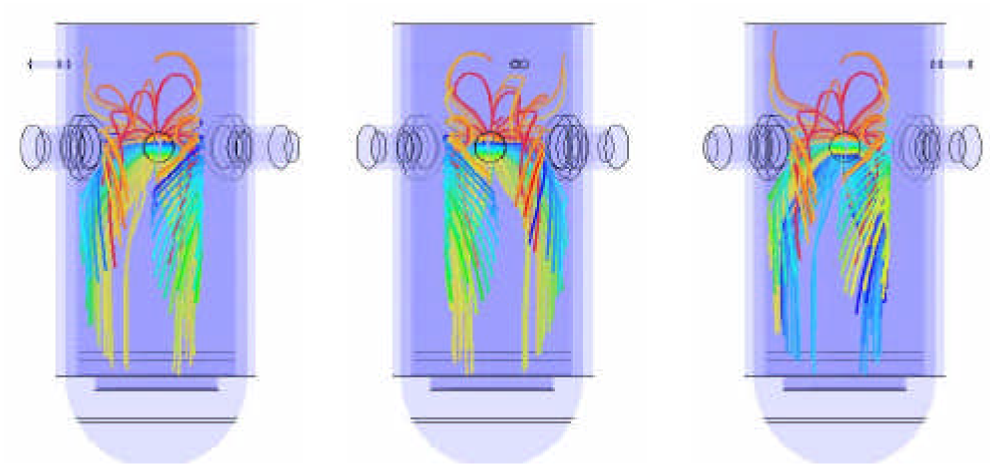
주냉각재 펌프가 작동하면 대량의 냉각수가 저온관을 통하여 원자로 용기 강수부에 유입되며, 이때 강수부 저온관 노즐 부근에는 impinging jet에 의한 와류유동이 형성된다. 그림 6의 (a)~(d)는 이러한 강수부 유동패턴을 보여주고 있다. 저온관과 고온관의 상대 설치각의 차이로 인해 소용돌이 모양의 차이는 다소 발생하지만, 주냉각재 펌프 작동에 따른 저온관 제트유동은 거의 유사한 경향을 주여준다. 즉 저온관 4곳에서의 강수부 유동형상은 매우 유사하며, 두 개의 저온관 제트가 서로 부딪히는 수직선상에 정체 영역이 좌우 기둥모양으로 존재함을 볼 수 있다.

그림 6의 (e)는 이러한 저온관 유동조건 하에서 상부 강수부로 유입된 안전주입수의

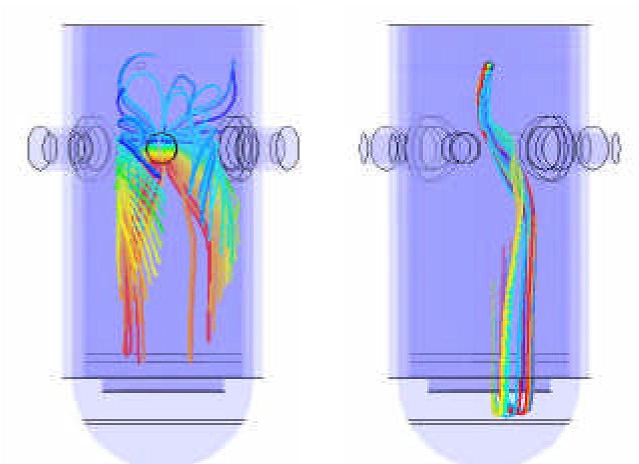
궤적을 나타내고 있다. 안전주입수의 수직방향 유로는 저온관 제트가 소용돌이를 일으키는 정체기둥을 따라 아래로 하향됨을 나타내고 있다. MARS 계산에서 상부 강수부로 주입된 비상노심 냉각수가 하향 유로를 형성하지 못하는 것과는 대조되는 유동형태를 CFD 계산에서는 보여주고 있다.

그림 7는 저온관 노즐 근처의 비상노심냉각수 하향유로를 자세히 나타낸 그림이다. 그림에서 보 듯이 비상노심 냉각수는 저온관 제트의 재순환 정체 vortex 축선을 따라 강수부 하부로 강하됨을 알 수 있다.

그림 8은 강수부에서의 궤적과 노심 하부지지대에서의 온도분포를 나타내고 있다. 비상노심 냉각수가 저온관 정체 와류축을 타고 강수부 하류로 강하되어 노심 입구에 도달하기 까지의 경로를 잘 보여주고 있다. 그림 6에서의 굵은 선은 비상노심 냉각수의 주유동선을 나타내며, 단면에서의 온도분포차는 비상노심 냉각수의 혼합에 의한 열전달 영역의 분포를 의미한다. 그림 8은 단일 DVI에 의한 열 혼합 및 주입 경로를 나타내고 있으므로 4개의 DVI nozzle에 의한 열혼합 형상은 전 평면에서 관찰되어질 것 임을 예상할 수 있다.



(a) In-1 (b) In-2 (c) In-3



(d) In-4 (e) In-e

그림 6 붕산수 입자궤적

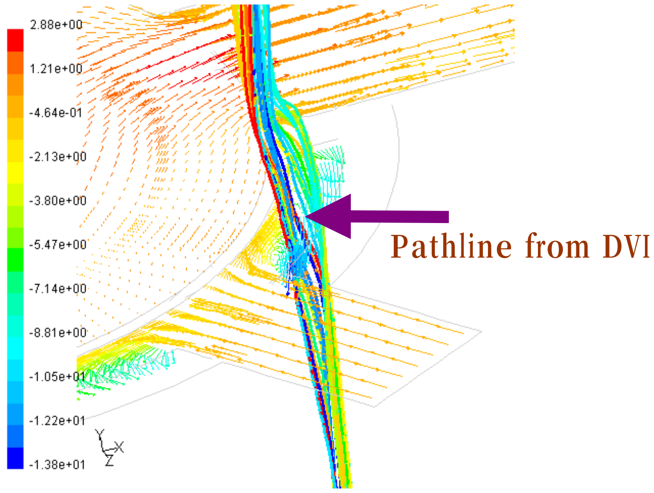
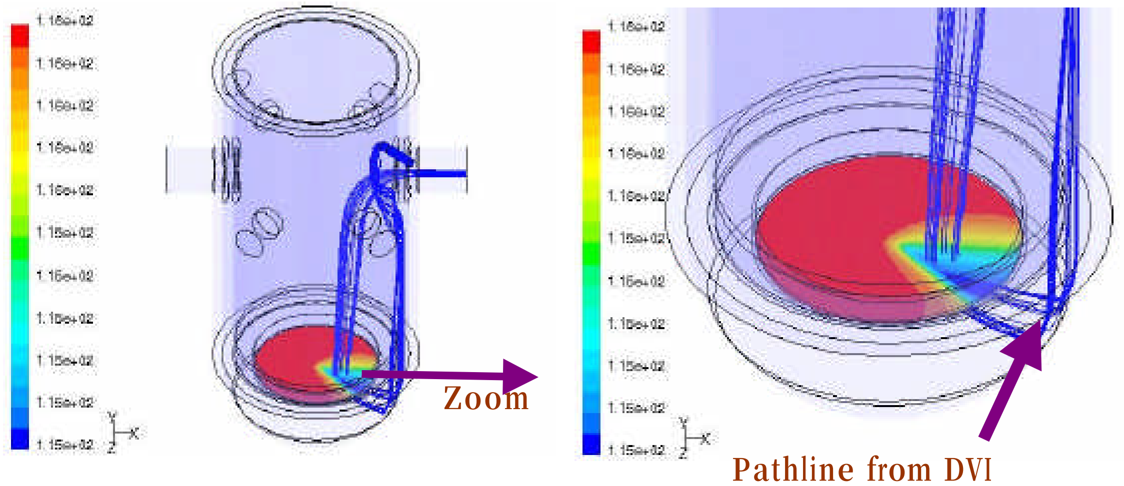


그림 7 저온관부근 와류 사이의 붕산수 통로



(a) 강수부 궤적　　　　　(b) 노심하부 지지판에서의 온도분포

그림 8　강수부에서의 붕산수 평균 궤적 및 단면분포

5. 결론

HPSI 하나가 작동되고 주냉각재 펌프가 작동되는 상황하에서 상부 강수부의 DVI 노즐로 주입된 붕산수의 유입경로를 MARS 코드를 이용한 2-channel 모델과 유한체적법(Finite Volume Method: FVM)을 사용하는 3차원 CFD 코드(FLUENT 5.5)를 사용하여 해석을 수행하였다. 해석 결과 2-channel 계통안전해석 모델을 사용한 1차원 모델의 MARS 해석 결과는 상부 강수부로 주입된 비상노심 냉각수가 강수부 하부로 강하되어 노심으로 유입되지 못하고 강수부 상부에서 노심 상부 플래업으로 유회되어 고온관으로

배출되는 노심 유회현상을 예측하는 결과를 보여주고 있다. 이와는 대조적으로 CFD 코드를 이용한 해석 결과에서는 DVI로 주입된 비상노심 냉각수가 저온관 제트의 정체와 와류축선을 타고 강수부 하부로 잘 강하되는 유동을 형성한다. 따라서 붕산수의 노심도달 경로를 매우 다르게 보여주는 계통안전해석 코드의 강수부 모델링 방법에 대하여 심도있는 재검토가 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

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 Speciallist 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. Gvrilas M., B. Woods, M. Antowiak, V. Palazov, G. Perter, and M. Saly, " Rapid Boron Dilution Transient Investigations in a PWR Integral Test facility", Proceeding, NURETH-9, CA, October, 1999.