

주증기관 파단사고시 RCP작동에 따른 봉산수의 강수부 상부 우회 가시화

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

신용승, 권태순, 최청렬, 황선홍, 송철화

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

3-D CFD 코드와 2-channel 계통해석 모델을 이용하여 주증기관 파단사고시 주냉각재 펌프가 작동되는 상황에서 DVI로 주입된 봉산수의 노심우회현상을 해석하였다. 2-channel 계통해석 모델에서는 봉산수가 원자로용기의 상부 강수부로부터 상부 플레넘으로 흐르는 것으로 예측되었다. 주증기관 파단사고의 고압안전주입수 주입모드 동안에 봉산수는 주냉각재 펌프의 대유량 때문에 하부 강수부로 흐르지 못하기 때문이다. 그러나, CFD 해석 결과에서는 봉산수가 하부 강수부로 흐르는 것으로 예측되었다. 유동가시화 결과 또한 봉산수가 강수부하부로 흐르는 것을 보여주고 있다. 따라서, 단일 또는 두개의 유로를 갖는 강수부 모델은 강수부 상부로부터 원자로 용기 상부 플레넘으로의 우회율을 현실적으로 모사하기 위해서는 재 평가되어야 할 것으로 생각된다.

Abstract

The core bypass phenomena of borated water injected by DVI nozzle during steam line break accidents with RCP running mode has been simulated 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 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. Also, the visualization results show the flow pattern of downward flow to the lower plenum. Thus, the single or 2-channel downcomer models might be re-evaluated for realistic simulation of the borated water by pass to the upper head from the upper downcomer.

1. 서론

DVI를 장착한 APR1400 (Advanced Power Reactor 1400MWe) 형 원자로의 주증기관 파단사고 사고 모사시 단일 유로 혹은 두 개의 유로를 갖는 강수부 해석모델을 사용하면 봉산수의 경로가 강수부 상부에서 원자로 용기 상부 플레넘으로 우회되는 것으로 해석되어 노심에 봉산방응도 삽입 지연이 발생한다(권태순, 2003). 원자로 냉각재 펌프가 작동하는 상황에서 고압안전 주입수가 강수부 상부로 주입되면, 저온관을 통해 원자로용기로 유입된 대량의 냉각수에 밀려 고압안전 주입수의 봉산수가 강수부 하부로 흘러내리지 못하게 계산되기 때문이다. DVI Nozzle을 통해 유입된 봉산수가 강수부로 흘러내리지 못하게 되면 우회유로인 Upper Plenum으로 흐르게 되며, 이 경우 봉산수는 노심을 경유하지 않고 고온관으로 빠져 나가는 봉산수 노심우회 현상이 발생하여 노심의 노심 반응도에 영향을 미치는 상황을 초래하게 된다.

봉산수의 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 봉산수가 압력차이에 의해 유발되는 유동특성에 따라 축방향으로 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 봉산수의 강하 현상이 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 봉산수가 강수부 하부로 유입될 수 있다. 또한, 강수부 단면에서 원자로 용기와 노심베럴 벽면사이의 공간에서도 다채널 형 유동을 예측할 수 있으나, RELAP(MARS) 해석에서는 이를 고려하지 못하므로 중요한 요소가 배제되고 있다고 할 수 있다.

본 연구에서는 저속의 강수부 혼합상태를 가시화 하여 해석적 결과에 대한 평가를 하고자 한다. 이를 통해 CFD 코드의 강수부 혼합 해석의 정확성 평가와 RELAP(NARD) 코드의 한계성 등을 정성적으로 평가할 수 있다.

2. 연구방법

주증기관 파단사고시 HPSI 하나가 작동되고 주냉각재 펌프가 작동되는 상황에서 DVI 노즐로 주입된 봉산수의 노심유입경로의 CFD 계산결과와 MARS 경과 그리고 가시화된 강수부 유동 형상을 비교하고자 한다. 이를 위해 강수부의 상부에서 원자로 용기 상부 플레넘으로 우회되는 유로를 만들고 우회유량을 변경하면서 유동 패턴을 가시화 하였다. 그림.1 은 가시화 장치의 개략도를 보여주고 있다. 표.1 은 가시화 실험에 적용된 유동조건을 요약하였다. 본 가시화 실험에서는 4 개의 저온관 유량과 DVI 로 주입되는 비상노심 냉각수와, 원자로 용기 상부 플레넘으로 우회되는 유량을 각각 비율에 따라

실시하였다. 설계 우회율을 초과하는 범위에 대해서도 가시화를 실시하여, 우회 현상에 따른 혼합 유동을 확대시켜 가시화하려하였다.

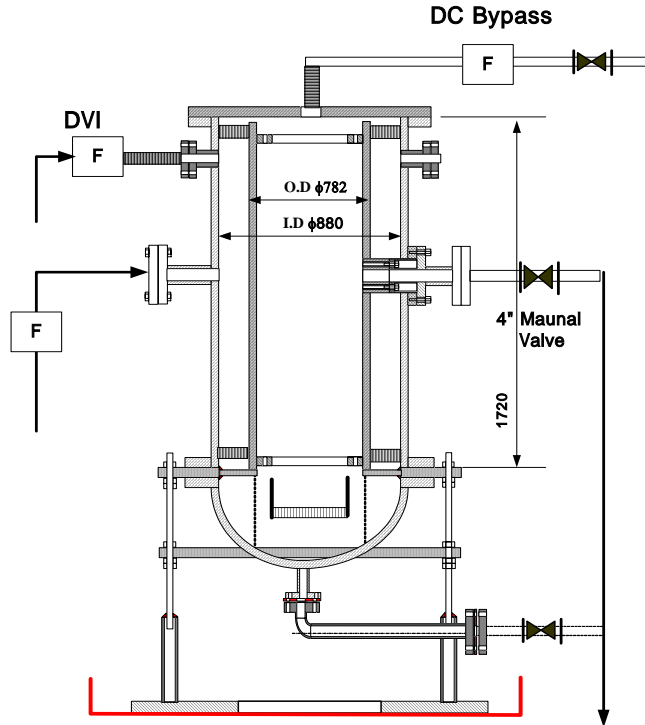


그림. 1 봉산수 주입경로 가시화 장치

표.1 주입 및 우회율

Test ID	Single Injection DVI Injection Kg/sec	Vent Top Vent Kg/sec	Top Vent/(4-CL-Flow) Bypass Fraction-I, %	Top Vent/(4-CL-Flow+DVI) Bypass Fraction-II, %
Case-1	0.028	0.00	0.000	0.000
Case-2	0.028	0.05	0.329	0.328
Case-3	0.028	0.10	0.658	0.657
Case-4	0.026	0.20	1.316	1.314
Case-5	0.026	0.40	2.632	2.627
Case-6	0.026	1.00	6.579	6.568

2.1. 수학적 모델링

FLUENT Ver.5.5를 이용한 해석은 3차원 정상상태 조건 하에서 수행되었으며, 연속 방정식, 운동량 방정식 그리고 에너지 방정식을 사용하였으며, 난류유동 효과를 고려하기 위하여 Standard $k-\epsilon$ 난류모델을 적용하였다. Standard $k-\epsilon$ model은 난류운동에너지 (k)와 소산율 (ϵ)의 수송방정식에 기초한 반 경험적 모델이다. 이 모델은 유동이 완전 난

류유동이고, 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:

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

Momentum Conservation:

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

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

Energy Conservation:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho T) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} T) = \alpha \nabla \cdot (\nabla T) - \rho_0 \beta (T - T_0) g \quad (3)$$

Turbulence Model (Standard k- ϵ Model):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon + S_k \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) \\ &\quad - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \end{aligned} \quad (4)$$

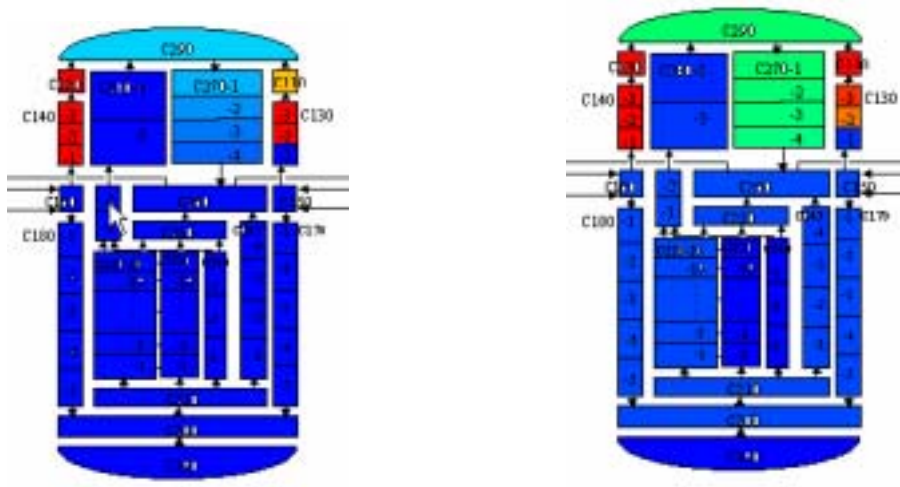
여기서, $C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$ 을 적용하였다.

3. 결과

3.1 MARS 해석 결과

주증기관 파단 사고가 진행되어 주냉각재 펌프가 작동하는 상황하의 고압안전주입펌프에 의한 봉산수의 시간에 따른 분포를 그림 2의 (a)와 (b)에 나타내었다. 주 냉각재 펌프의 대유량에 밀려 강수부의 상부에서 비상노심냉각수가 원자로 용기 상부로 밀려들어가 봉

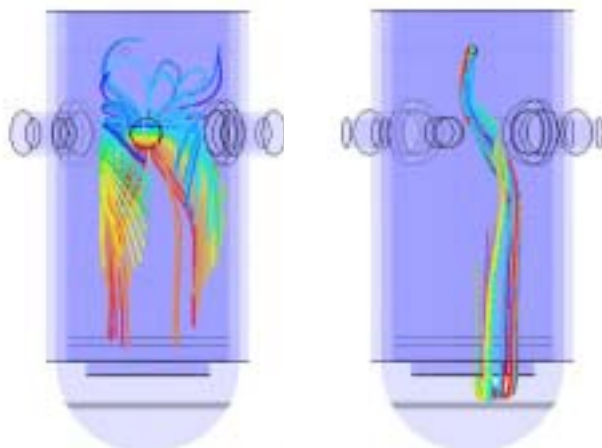
붕산수가 강수부하부로 흐르지 못하는 붕산 농도분포를 보여주고 있다.



(a) HPSI 주입후 264 초경과 (c) HPSI 주입400초 경과
그림.2 SLB Pump 작동시의 붕산수 분포

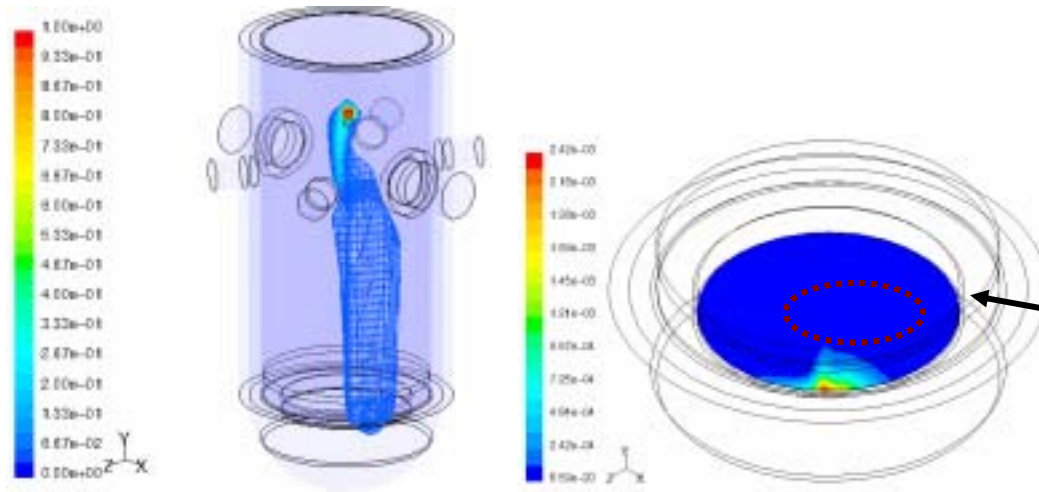
3.2 FLUENT 해석 결과

그림.3은 강수부에서의 궤적을 나타내고 있다. 비상노심 냉각수가 저온관 정체 와류축을 타고 강수부 하류로 강하되어 노심 입구에 도달하기 까지의 경로를 잘 보여주고 있다. 그림.4는 강수부와 노심입구 단면에서의 온도분포를 보여 주고 있다. CFD 해석 결과는 REALAP(MARS) 결과와는 다르게 강수부 하부로의 붕산수 유입이 잘 나타나고 있음을 보여주고 있다.



(a) In-4 (b) DVI Path

그림.3 붕산수 입자궤적



(a) 강수부 온도 분포

(b) 노심 입구 온도 분포

그림.4 강수부에서의 봉산수 평균온도 분포

3.3 가시화 실험 결과

그림.5는 강수부 상부에서 원자로 용기 상부플래넘으로의 우회율 0.328% 인 경우이다. DVI 환형 강수부의 RCP 유동을 모사하는 저온관 유동이 있는 상태에서 DVI를 실시한 경우, 강수부 상부에서의 혼합수 유동을 나타내는 가시화 사진이다. 그림.5(a)의 DVI가 주입된 직후의 방사형 퍼짐에서, 주입후 강수부 하부로 내려가는 그림.5(b)와 그림.5(c)의 저온관 고도 이하에서의 혼합수 유동은 강수부의 하류 침투가 매우 잘 이루어지고 있음을 나타내고 있다. 그림.5(d)는 그림.5(a)에서 그림.5(c)까지 경과한 이후의 강수부 상부에서의 혼합거동을 나타내고있다. 그림.5(d)에서 보듯이 충분한 시간이 경과 하였음에도 불구하고 강수부 상부에서 원자로 용기 상부플래넘으로의 우회에 따른 비상노심냉각수의 우회가 심하지 않음을 알 수 있다.

그림.6는 강수부 상부에서 원자로 용기 상부플래넘으로의 우회율 6.568% 인 경우이다. 그림.6(a)의 DVI가 주입된 직후의 방사형 퍼짐에서, 주입후 강수부 하부로 내려가는 그림.6(b)와 그림.6(c)의 저온관 고도 이하에서의 혼합수 유동은 강수부의 하류 침투가 매우 잘 이루어지고 있음을 나타내고 있다. 그림.6(d)는 그림.6(a)에서 그림.6(c)까지 경과한 이후의 강수부 상부에서의 혼합거동을 나타내고있다. 그림.6(d)에서 보듯이 충분한 시간이 경과 하였음에도 불구하고 강수부 상부에서 원자로 용기 상부플래넘으로의 우회에 따른 비상노심냉각수의 우회가 심하지 않음을 알 수 있다. 이는 우회율이 0.328%에서와 거의 동일한 유동형상이며, 두 경우 모두 강수부 상부에서 원자로 용기 상부 플래넘으로의 우회가 활발하지 않음을 나타내고 있다.



(a) DVI 주입직후



(b) DVI 주입 후



(d) DVI 주입후 저온관 하부



(e) DVI 주입후 강수부 상부

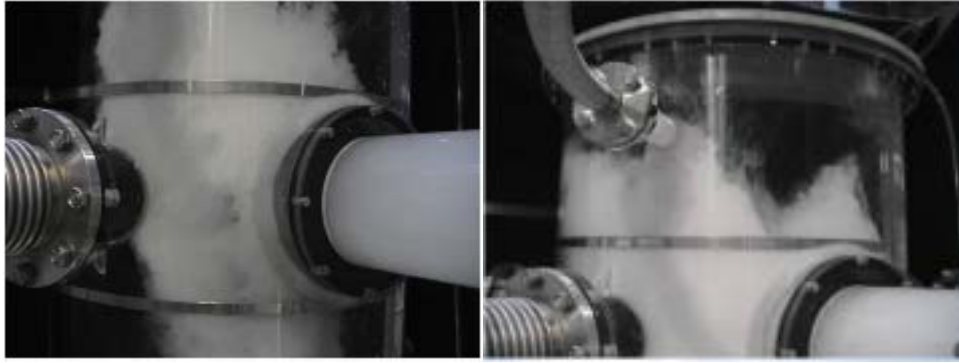
그림.5 강수부 상부 우회율 0.328%



(a) DVI 주입직후



(b) DVI 주입 후



(d) DVI 주입후 저온관 하부 (e) DVI 주입후 강수부 상부

그림.6 강수부 상부 우회율 6.568%

4. 결론

HPSI 하나가 작동되고 주냉각재 펌프가 작동되는 상황에서 상부 강수부의 DVI 노즐로 주입된 붕산수의 유입경로를 MARS 코드를 이용한 2-channel 모델 결과와, 3차원 CFD 해석결과와 가시화를 통한 유동 패턴과 비교하였다. 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. 가시화 실험 결과에서는 RELAP(MARS) 에서의 원자로 용기 상부 플래넘으로의 전적인 우회현상은 관측되지 않았다. 오히려, DVI로 주입된 비상노심냉각수는 저온관의 유동에 이끌리며 강수부 하부로 매우 활발하게 침투하는 유동 형상을 보여 주고 있으며, 이는 3차원 CFD 해석 결과와 매우 흡사한 모양이다. 이러한 결과로 볼 때, 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 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. 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.
6. Tae-Soon kwon et al, "A three-dimensional CFD calculation for boron mixing behaviors at the core inlet", NURETH-10, 2003, Seoul, Korea.