

SMART 냉각재순환펌프의 일차냉각수 유입 저감장치에 대한
설계 및 수치적 평가

Design and Numerical Assessment of Primary Coolant Ingress Reducing
Device for SMART Main Coolant Pump

김민환, 김종인, 박진석

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

일체형원자로 SMART 자연순환 운전시 저온의 MCP 내부 일차냉각수와 고온의 일차냉각수의 온도차에 의하여 MCP 축과 유로안내체 사이에 있는 환형틈새를 통하여 질량교환이 발생한다. MCP 로 유입된 고온의 일차냉각수가 온도에 따른 용해도 차에 의해 질소가스를 방출한다. 방출된 질소가스는 MCP 상부의 저널베어링을 가스에 노출시켜 무윤활 상태를 유발할 수 있다. 자연순환 운전시 MCP 내부로 고온의 일차냉각수 유입을 줄이기 위한 장치를 설계하고 범용 CFD 코드를 이용하여 성능을 평가하였다. 해석 결과에 따르면 설계된 저감장치는 일차냉각수 유입을 저감장치가 없을 경우보다 3배 이상 줄일 수 있다.

Abstract

In the case of natural circulation operation of integral reactor SMART, there is a mass transfer through the annular gap between MCP axis and flow guide due to the temperature difference between hot primary coolant in the reactor and cold primary coolant inside MCP. The hot coolant ingress into the MCP is cooled by surroundings. The coolant flushes nitrogen gas by the solubility difference according to the temperature. The accumulated gas in the MCP upper plenum may result in the upper journal bearing unlubricated condition. In order to reduce the hot coolant ingress during the natural circulation operation, a device was invented and its performance analysis was carried out using commercial CFD code. The results have shown that the device reduces the primary coolant ingress to one-third of the case without the device.

1. 서론

한국원자력연구소에서 개발 중인 냉각재순환펌프(Main Coolant Pump: MCP)는 일체형원자로 상단에 수직으로 4대가 설치되며 임펠러가 생성하는 수두를 이용하여 노심에서 가열된 냉각재를 증기발생기로 강제 순환시키는 역할을 한다[1][2].

MCP는 정상운전시 온도에 따른 용해도 차이에 의해 상부에 포집되는 질소가스를 제거하기 위해 기포제거유로를 제공하며 보조임펠러에서 생성되는 수두를 이용하여 MCP 상부의 질소가스를 원자로 내부로 재순환시킨다. 원자로가 자연순환 운전모드에서 작동할 경우 MCP는 동력이 차단되며 축에 연결된 보조임펠러도 정지되어 더 이상 질소가스 제거를 위한 수두를 제공하지 못한다. 따라서 자연순환 운전시간 동안 질소 가스는 MCP 상부에 계속 포집되어 상부저널베어링이 질소가스에 노출되고 MCP의 재기동시 베어링의 손상으로 이어질 수 있다. 자연순환 운전가능시간은 질소 가스가 포집되어 상부저널베어링을 질소 가스에 노출시키는데 걸리는 시간으로 제한된다. 따라서 자연순환 운전시간을 늘리기 위해서는 MCP 내부로 유입되는 고온의 일차냉각수 량을 제한하는 설계가 필요하다.

본 논문의 목적은 자연순환운전 시에 MCP로 유입되는 일차냉각수의 량을 줄이기 위한 설계를 제시하고 전산유체해석(CFD)를 통한 해석으로 그 효과를 확인해 있다.

2. 일차냉각수 유입 저감장치

그림 1인 자연순환운전 시 MCP가 고온의 일차냉각수와 경계를 이루고 있는 부분의 유동을 개략적으로 나타낸 것이다. 자연순환 운전모드에서 MCP가 정지되면 원자로 내의 고온의 일차냉각수와 기기냉각계통에 의해 상대적으로 저온인 MCP 내의 일차냉각수의 온도차에 의해 자연순환 유동이 발생한다. 이 유동은 MCP의 회전축과 유로안내체 사이에 존재하는 환형 틈새에서 발생하며 고온의 일차냉각수가 계속하여 MCP 내부로 유입되도록 한다. MCP 운전 시 100 °C 이하로 유지되던 MCP 내부온도는 MCP 정지에 의해 전동기에서 발생하는 열원이 제거되고 지속적인 기기냉각계통의 작동으로 인하여 더욱 낮은 온도(50 °C 정도로 가정)로 유지된다. MCP 내부로 유입된 고온의 일차냉각수는 N₂ 가스를 포함하고 있으며 온도에 따른 용해도 차에 의하여 MCP 내부에서 N₂ 가스를 방출한다. 방출된 가스는 MCP 상부에 포집되며 시간이 지날수록 그 양이 증가하여 결국 상부 저널베어링이 가스에 노출되도록 한다. 가스에 노출된 베어링은 MCP 재기동시 베어링의 손상으로 이어져 정상운전시 MCP 정지라는 결과를 초래할 수 있다.

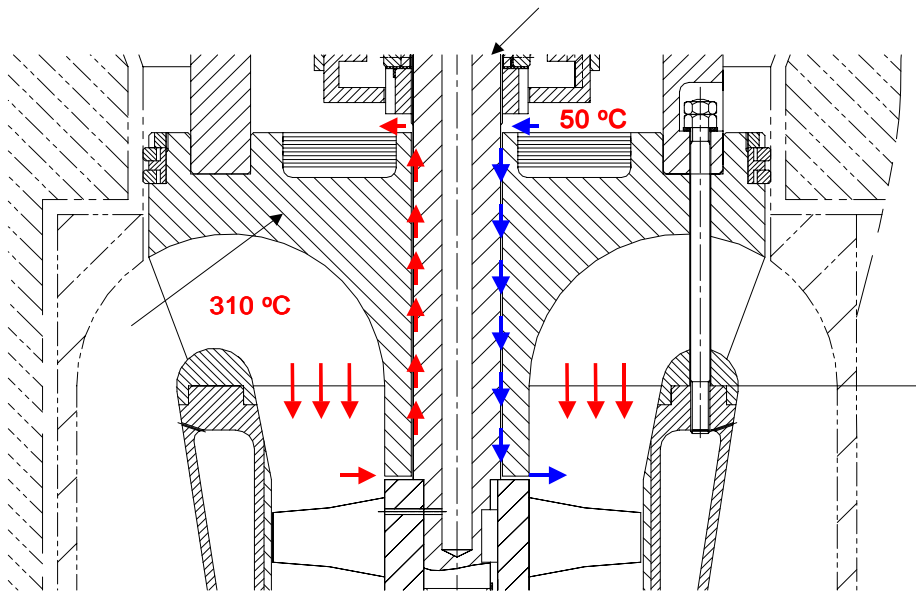


그림 1 자연순환 운전시 MCP 회전축 틈새를 통한 유동형태

MCP 회전축 틈새를 통한 일차냉각수 유입을 줄이기 위한 저감장치의 조건은 정상운전 시에 기포제거유로에 영향을 미치지 않고 자연순환운전 시에만 작동하는 피동장치(passive device)이어야 한다. 본 논문에서는 일차냉각수 유입 저감장치의 설계를 위하여 자연순환력 자체를 이용하였다. 자연순환력이 반대방향으로 작용하도록 유로를 구성하면 자연순환력을 서로 상쇄시켜 고온의 일차냉각수가 MCP 내부로 유입되는 것을 방지한다. 그림 2는 MCP 자연순환유동 저감장치의 형태와 위치를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 유로안내체의 상단부에 환형공간을 만들고 축에 연결된 환형 캡을 끼우면 원래 하나의 환형공간으로 일차냉각수와 연결되었던 곳에 3개의 환형통로가 만들어진다. 그림 3은 일차냉각수 유입 저감장치의 유동형태를 나타낸 것이다. 3개의 환형통로의 상부와 하부는 열전달에 의해 각각 저온과 고온으로 유지되며 온도차에 의해 각각의 통로에서 독립적인 자연순환유동이 발생한다. 이 독립적인 자연순환유동은 질소가스의 용해도가 높은 고온의 일차냉각수가 MCP 내부로 유입되는 것을 방지하는 역할을 수행할 것이다.

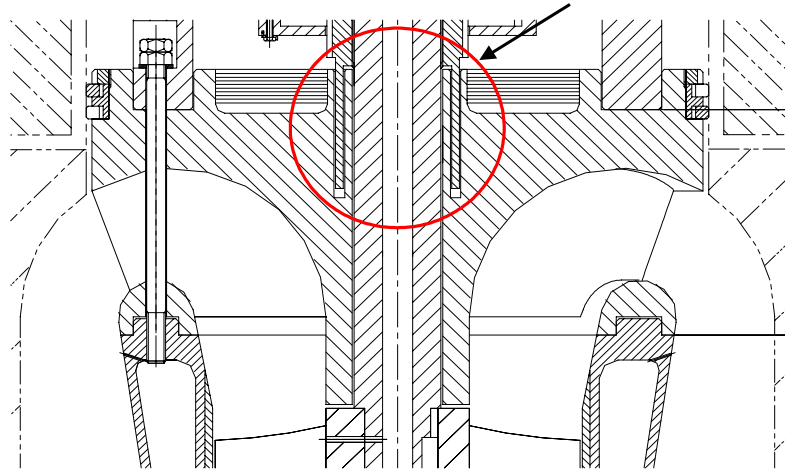


그림 2 일차냉각수 유입 저감장치의 형상과 위치

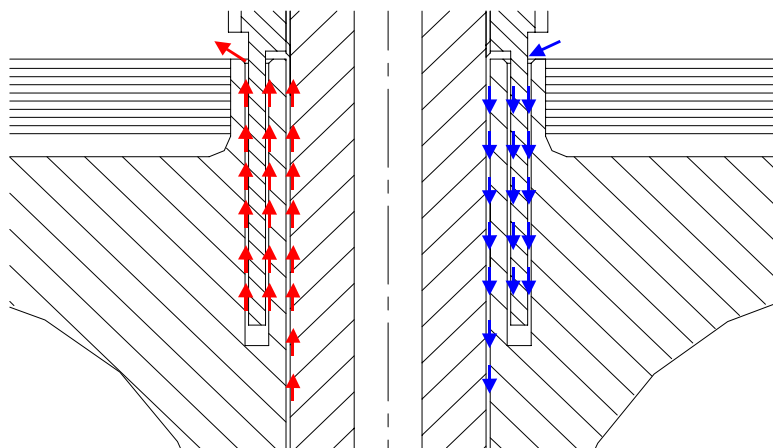


그림 3 일차냉각수 유입 저감장치의 유동형태

3. 전산유체해석의 의한 성능예측

전산유체해석을 위하여 유동장을 단순화할 필요가 있다. 그림 4는 해석에 사용된 유동장을 나타낸 것이다. Case 1은 일차냉각수 유입 저감장치가 없을 경우이고 Case 2는 일차냉각수 유입 저감장치가 있을 경우이다.

해석에 사용된 소프트웨어는 FLUENT[3]이며 유동장을 고체영역과 함께 해석하였다. 그림 4에 나타낸 입구와 출구를 제외하고 나머지영역은 벽으로 싸여 있다고 가정하였다. 고온의 일차냉각수 유동장의 입구조건으로 자연순환운전 조건인 압력 15MPa, 온도 310°C와 질량유량으로부터 구한 속도를 균일하게 가정하였다. 출구에서는 외압조건을 적용하였다. 그림 4에서 온도가 정의된 벽면과 유체-고체의 경계면을 제외하고는 모두 단열조건을 적용하였다.

난류모형은 벽함수를 이용한 표준 $k-\epsilon$ 모형[4]을 사용하였다. 온도차에 의한 부력의 영향은 Boussinesq 모델을 사용하였다.

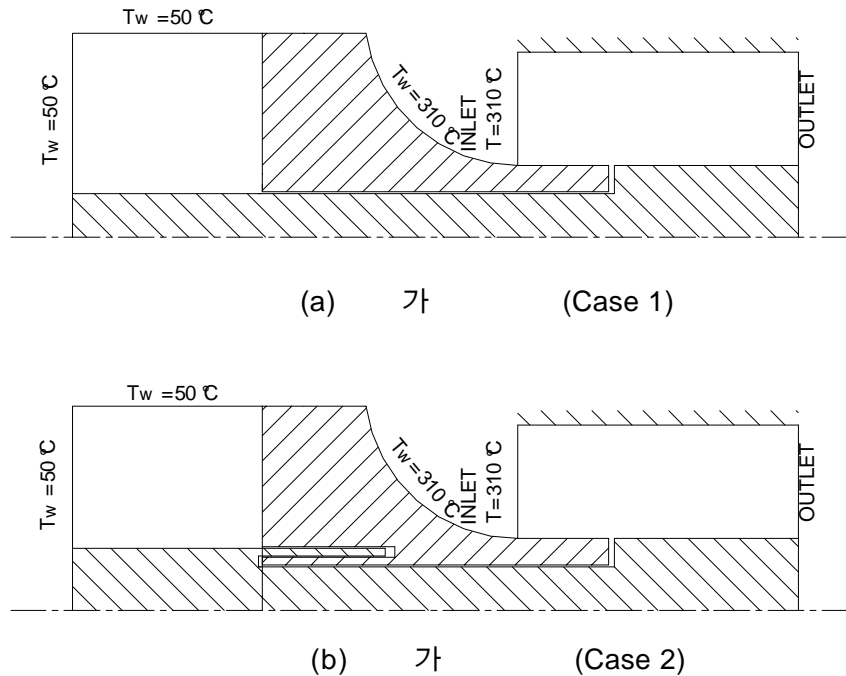


그림 4 CFD 해석에 사용된 유동장 개략도

가. 일차냉각수 유입량 예측방법

해석결과로부터 축의 틈새를 통한 자연순환유동에 의한 일차냉각수 유입량을 직접 계산할 수가 없다. 그 이유는 본 해석모델에서는 질량보존의 법칙에 의해 들어온 질량만큼 나가기 때문에 자연순환유로의 어떤 유로단면을 선택하더라도 질량유량은 영이다. 따라서 열균형(heat balance)을 계산하여 간접적으로 유입량을 예측할 수밖에 없다. 그림 5는 각 단면을 통한 열교환량을 표시한 것이다. 그림 5로부터 유체를 통한 MCP로의 열전달량 \dot{q}_{MCP} 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{q}_{MCP} = \Delta \dot{q} - \dot{q}_{wall} \quad \text{where} \quad \Delta \dot{q} = \dot{q}_{inlet} - \dot{q}_{outlet} \quad (1)$$

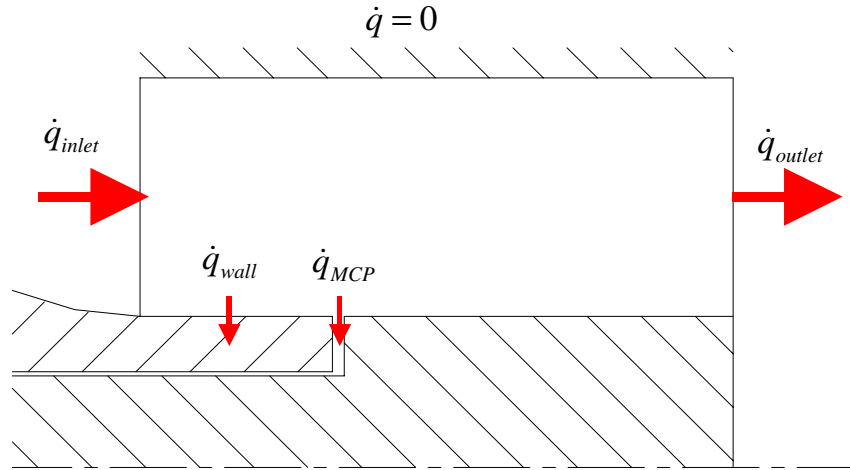


그림 5 질량유량 계산을 위한 열전달 개략도

여기서 \dot{q}_{inlet} : 입구에서 들어온 열량

\dot{q}_{outlet} : 출구로 나간 열량

\dot{q}_{wall} : 벽면으로 전달된 열량

질량유량은 열전달량으로부터 다음 식으로 예측 가능하다.

$$\dot{m}_{MCP} = \frac{\dot{q}_{MCP}}{C_p \Delta T} \quad (2)$$

여기서 $C_p = 4169.674 \text{ J/kg/K}$ (평균온도 $T_m = (310 - 50)/2 = 130^\circ\text{C} = 403\text{K}$, 압력 14MPa에서 값)이고 $\Delta T = (583 - 323)\text{K} = 260\text{K}$ 이다.

나. 계산결과

일차냉각수 유입 저감장치가 없는 경우(Case1)와 있는 경우(Case2)에 대하여 2차원 축대칭 해석과 3차원 해석을 각각 수행하였다.

그림 6은 2차원 축대칭 해석의 Case 1의 온도분포를 나타낸 것이다. 환형틈새에서 온도분포 변화가 크지 않은 것으로 미루어 전도에 의한 열전달이 지배적인 것을 알 수 있다. 또한 질량유량 교환도 당연히 적을 것으로 예상된다. 그림 7은 2차원 축대칭 해석의 Case 1의 환형틈새에서 속도분포를 보이고 있다. 틈새를 통한 유동이 상하로 나뉘어 유량이 균일하게 유입되고 유출되는 형상을 보이고 있다.

그림 8과 그림 9는 2차원 축대칭 해석의 Case 2에 대한 결과에서 온도분포와 환형틈새의 속도 벡터를 보인 것이다. 온도분포는 Case 1과 마찬가지로 고온영역에서 저온영역으로 균일하는 분포 하고 있다. 속도벡터에 나타난 유동도 틈새를 통하여 균일하게 유입과 유출이 발생하고 있다. Case 2의 유로가 Case 1의 유로보다 복잡함으로 인한 유로저항의 증가 때문에 Case 2의 질량 교환량이 Case 1보다 적을 것으로 예상된다.

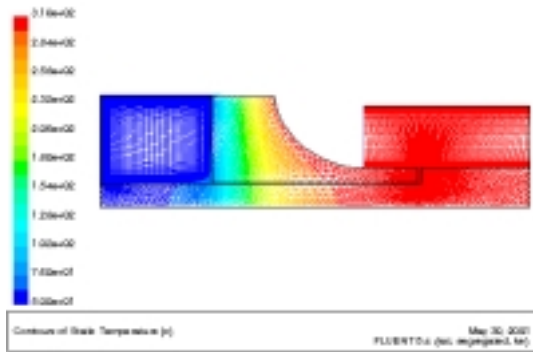


그림 6 온도분포(Case 1, 2차원 축대칭 해석)

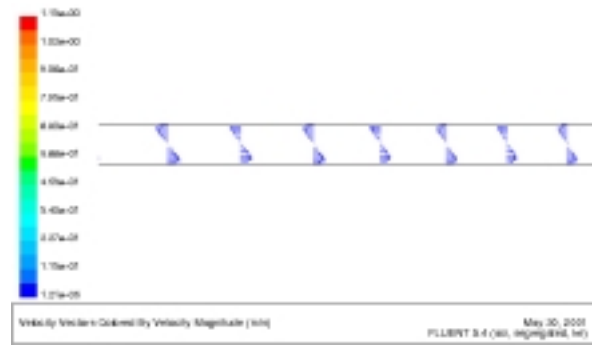


그림 7 환형틈새에서 속도벡터(Case 1, 2차원 축대칭 해석)

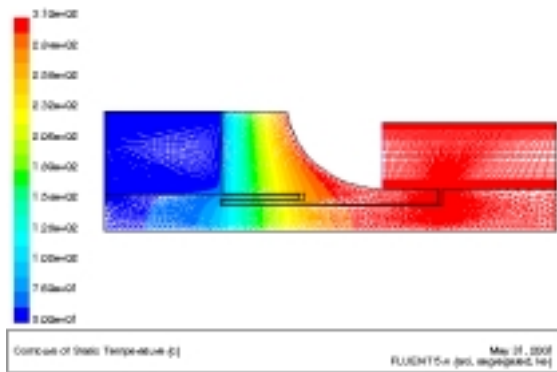


그림 8 온도분포(Case 2, 2차원 축대칭 해석)

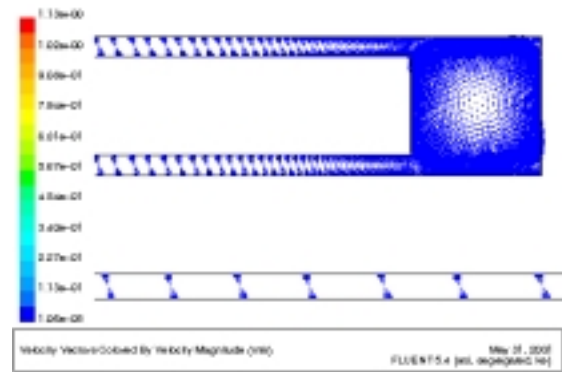


그림 9 환형틈새에서 속도벡터(Case 2, 2차원 축대칭 해석)

그림 10와 그림 11은 Case 1의 3차원 해석결과에서 $z = 0$ 와 $y = 0$ 인 직교하는 두 평면에서 온도분포를 나타낸 것이다. 3차원 해석결과는 2차원 축대칭 해석결과와 상당히 다른 온도분포를 보이고 있으며 축대칭성도 존재하지 않는다. 특히 유동부 근처에서 온도분포의 변화가 많이 존재하므로 이 영역에서 전도보다 대류에 의한 열전달이 지배적인 것을 알 수 있다. 또한 저온의 MCP 근처가 고온의 냉각수 쪽보다 높은 온도를 유지하는 영역이 존재하고 있다. 이는 대류에 의한 열교환이 크게 발생하고 있다는 것을 의미한다.

그림 12는 Case 1의 3차원 해석결과에서 환형틈새를 통한 유동 경로선을 나타낸 것이다. 2차원 축대칭 결과와 다르게 원주방향의 속도성분이 존재하고 있으며 더 이상 축대칭 흐름을 유지하지 못하고 있다. 온도차에 의해 MCP 내부에서 환형틈새로 유입된 저온의 냉각수가 고온의 일차냉각수와 혼합되면서 온도가 증가하여 다시 MCP 내부로 되돌아가는 유동형태를 보이고 있다. 따라서 2차원 축대칭과 다르게 원주방향으로 순환유동이 발생하면서 고온 냉각수와 저온 냉각수의 혼합이 증가하여 많은 열전달이 발생하게 된다.

그림 13과 14는 Case 2의 3차원 해석결과에서 $z = 0$ 와 $y = 0$ 인 평면에서 온도분포를 나타낸 것이다. Case 1과 마찬가지로 온도분포의 축대칭성은 존재하지 않고 있다. 하지만 Case 1에서 보여주었던 저온의 MCP 영역에 고온영역이 국부적으로 존재하는 온도분포는 나타나지 않고 있다. 이는 일차냉각수 유입 저감장치가 대류에 의한 열교환을 줄이는 역할을 수행한다고 볼 수 있다.

그림 15, 그림 16 및 그림 17은 Case 2의 3차원 해석결과에서 중심축을 기준으로 내측, 중간 및

바깥의 환형틈새를 통한 유동경로선에 대하여 나타낸 것이다. Case 1에서 보았던 그림 12와 같은 유동이 각각의 환형틈새에 존재하고 있다. 이것은 각 틈새에서 독립적인 자연순환 유동이 형성되고 있음을 나타내는 것이며 환형틈새의 독립적인 유동은 고온의 일차냉각수와 저온의 MCP 내부 냉각수 사이의 열 및 질량 전달을 차단하는 역할을 수행할 것이다.

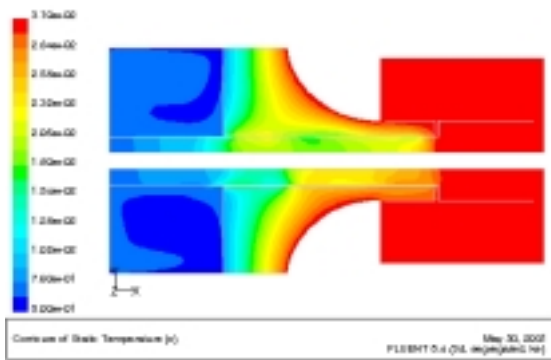


그림 10 $z = 0$ 평면에서 온도분포(Case1, 3차원 해석)

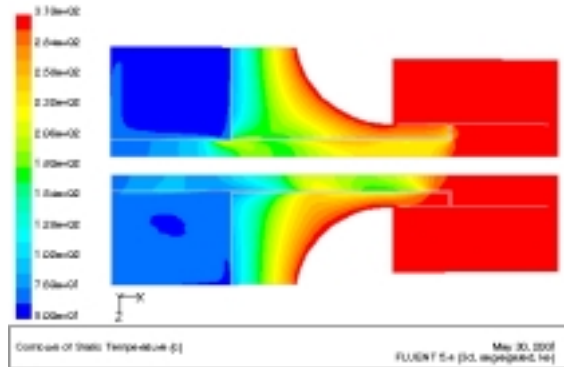


그림 11 $y = 0$ 평면에서 온도분포(Case1, 3차원 해석)

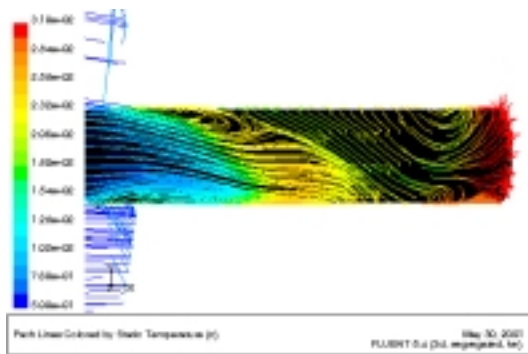


그림 12 환형틈새에서 유동경로선(Case 1, 3차원 해석)

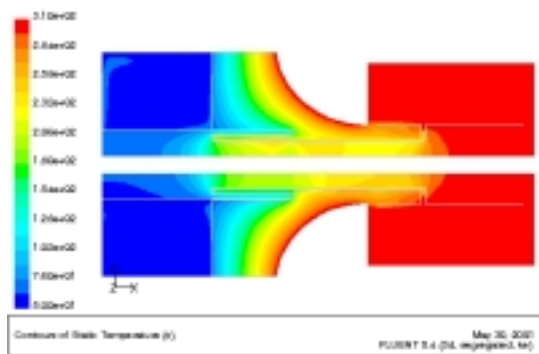


그림 13 $z = 0$ 평면에서 온도분포(Case 2, 3차원 해석)

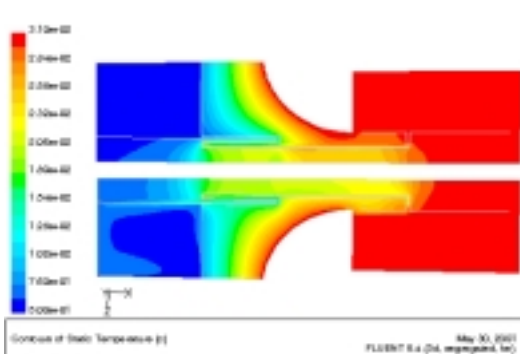


그림 14 $y = 0$ 평면에서 온도분포(Case2, 3차원 해석)

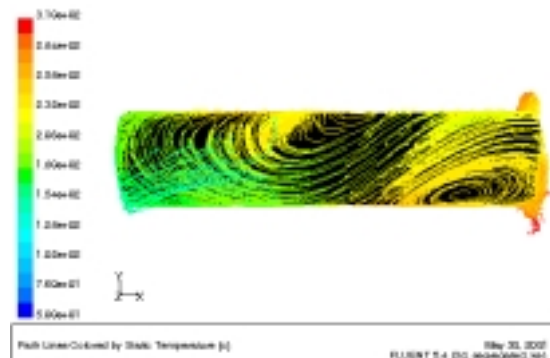


그림 15 내부 환형틈새에서 유동경로선(Case 2, 3차원 해석)

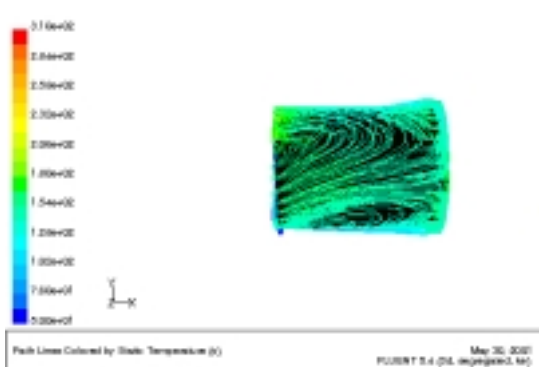


그림 16 중간 환형틈새에서 유동경로선(Case 2, 3차원 해석)

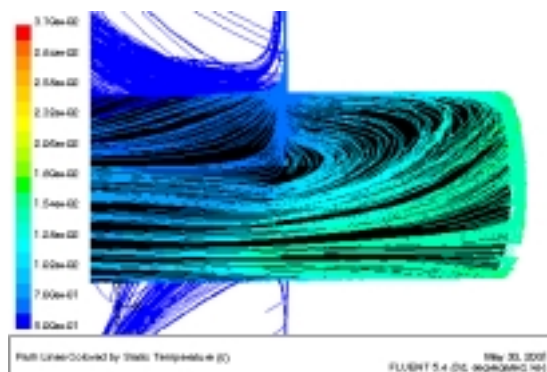


그림 17 바깥 환형틈새에서 유동경로선(Case 2, 3차원 해석)

표 1은 해석결과로부터 구한 고온의 일차냉각수와 MCP 내부의 일차냉각수의 질량교환 유량을 계산한 것이다. 2차원 축대칭 해석과 3차원 해석 결과가 상당한 차이를 보이고 있다. 2차원 축대칭의 경우에 앞의 해석결과에서 나타난 바와 같이 회전방향의 속도가 영인 구속조건이 있기 때문에 환형틈새를 통한 유동이 축방향으로만 형성되고 유속 또한 작다. 따라서 대류에 의한 열교환량이 전도에 의한 것보다 적으며 질량유량의 교환도 적게된다.

표 1 Case에 따른 2차원 축대칭 및 3차원 해석결과 비교

대상 문제		$\Delta \dot{q}(W)$	$\dot{q}_{wall}(W)$	$\dot{q}_{MCP}(W)$	$\dot{m}_{MCP}(kg/hr)$
2차원 축대칭 해석	Case 1	8	6.06	1.94	0.00644
	Case 2	4	5.01	-1.01	0.00335
3차원 해석	Case 1	1178	257	921	3.06
	Case 2	430	98.8	331.2	1.10

3차원 해석 결과를 보면 환형틈새를 통한 열교환량이 2차원 축대칭 해석보다 상당히 크다(약 500배). 이것은 3차원 효과가 유동장에 미치는 영향이 크다고 할 수 있다. 따라서 2차원 축대칭 해석은 본 문제에서는 타당한 해석방법이 아니다. Case 1은 질량교환량이 3.06 kg/hr인데 비하여 저감장치를 부착한 Case 2의 경우엔 약 1/3정도인 1.1 kg/hr로 자연순환 유량이 줄어들었다. 이는 본 설계의 의도에 따라 일차냉각수 유입 저감장치가 작동함을 보여주는 것이다. 또한 이 결과는 식 (2)에서 열교환량 모두를 질량교환으로 환산했기 때문에 충분히 보수적인 값으로 볼 수 있다.

4. 결론

MCP 기포제거 루프가 작동하지 않는 일체형원자로의 자연순환 운전동안 MCP 상부에 포집되는 질소가스량을 줄이기 위하여 MCP 축과 유로안내관 사이의 자연순환 유량을 감소시키는 장치를 설계하였다. 또한 일차냉각수 유입 저감장치를 평가하기 위하여 2차원 축대칭 해석과 3차원 해

석을 수행하였다.

2차원 축대칭 해석을 원주방향의 유동을 제한하기 때문에 대상문제에 내재한 3차원 효과를 모사하지 못하였다. 3차원 계산결과에 따르면 일차냉각수유입 저감장치가 설계의도에 부합되는 유동을 발생시키며 저감장치가 없을 경우보다 MCP 내부로 유입되는 고온의 일차냉각수의 질량유량을 1/3 정도로 줄일 수 있었다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 박진석, 허형, 김종인, 구대현, "SMART 냉각재순환펌프 개념설계," '98 춘계학술발표회 논문집(II), 한국원자력학회, pp. 995-890, 1998
- [2] 김민환, 김종인, 박진석, 송재욱, 정명균, "SMART 냉각재순환펌프의 임펠러 설계," '98 추계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 1998.
- [3] FLUENT 5 User's Guide, Fluent Incorporated, July, 1998.
- [4] Jones, W.P. and B.E. Launder, " The Prediction of Laminarization with a Two-Equation Model of Turbulence," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 15, pp. 301-314, 1972