

## SMART-P 가압기 습식단열재 성능해석

유승엽, 이준, 윤주현, 지성균  
원자력연구소

### Performance Analysis of a Wet Thermal Insulation of the SMART-P Pressurizer

Ryu Seung Yeob, Lee Jun, Yun Juhyeon, Zee Sung-Qunn  
KAERI

#### 1. 서론

기존의 상용원자로에서는 가압기내의 가열기 또는 살수기를 이용해 능동적으로 원자로 냉각재계통내 압력을 제어한다. 반면 현재 원자력연구소에서 개발중인 일체형 원자로 SMART-P의 자기가압기는 출력변화시의 냉각재 부피변화를 피동적으로 수용하기 위해 비응축가스인 질소와 수증기를 압력수용매질로 사용한다. 자기가압기는 원자로 냉각재계통의 고온쪽에 위치하고 있으며, 일정 냉각재 평균온도 모드로 운전될 때 출력변화에 따라 고온 쪽 온도가 변하며 이에 의한 수증기의 응축/기화 과정이 압력변화의 폭을 증가시킨다. 이와 같은 문제점을 극복하기 위해 SMART-P의 자기가압기는 수증기의 부분압력이 원자로 냉각재계통에 기여하는 양을 최대한 줄이는 설계 개념을 가지고 있다. 이를 위해 저온에서 가압기가 운전될 수 있도록 냉각기를 설치했으며, 냉각기의 용량을 줄이고 가압기를 가능한한 원자로 냉각재 계통과 열적으로 차단시키기 위해 습식단열재가 설치되어 있다[1].

본 연구의 목적은 기존의 습식단열재 열전달 상관식을 범용 전산유체코드인 CFX를 이용하여 SMART-P 운전조건에서 평가하여 보는 것이다.

#### 2. 해석방법

##### 2-1. 기존 열전달 상관식

두 수평평판사이에 있는 유체가 밑으로부터 가열되면 불안정한 온도 구배가 형성되어 유동이 발생한다. Rayleigh/Jefrace는 수평판 가열에 대한 이론적 연구를 통해서 대류가 형성되기 시작하는 임계 Ra 수가 존재함을 보였다[2]. 이 임계 Ra 수 보다 커지면 두 평판사이에 육각형 형태의 셀 유동이 발생해 열전달을 촉진시킨다. 두 평판 사이의 자연대류에 대한 열전달 상관식은 대부분 다음과 같은 형태로 표현되었다.

$$\varepsilon = f(Ra) = \lambda_c / \lambda_f \quad (1)$$

$$\text{여기서 } Ra = \frac{g \delta^3 \beta \Delta T}{\alpha \nu}$$

위 식에서  $\lambda_f$ 는 실제 전도도이고  $\lambda_c$ 는 대류효과가 반영된 유효전도도이다. 수직평판 또는 원통형 구조에서의 자연대류 열전달에 의한 실험이 Mull/Recher, Griffiths/Davis, Schmit, Nusselt 등에 의해 수행된 바 있다[2]. Boyarintsev 는  $10^4 < Ra < 10^7$  영역의 수직평판에서 얻어진 실험데이터의 Ra 지수가 1/3인 식으로 잘 표현될 수 있음을 보였다. 이후 Chirkin

은 Boyarintsev의 연구를 수평 평판에까지 확장시켜 다음과 같은 일반적인 상관식을 얻었다 [3].

$$\varepsilon = 0.062(Ra \cdot k)^{1/3} \quad (2)$$

위 식에서 수직 평판일 경우  $k$ 는 1이고, 아랫면 가열의 수평 평판일 경우  $k$ 는 3이다. 수직 평판에 대한 대부분의 실험결과는  $Ra < 10^4$  에서 대류에 의한 열전달이 점차 감소하기 시작해  $Ra < 10^3$  에서 완전히 사라지는 경향을 보여주었다. 특히 기존 실험에서 대류효과가 나타나기 시작하는 지점 즉,  $\varepsilon$  이 1보다 커지기 시작하는 임계  $Ra$ 수가 1000부터 4000 사이에 분포하고 있으며 이 영역이하에서는 오직 전도에 의해 열전달이 이루어진다.

## 2-2. 수치해석방법

본 연구에서 해석하고자 하는 대상은 그림 1에서 보는 것과 같이 원통형 가압기를 둘러싸고 있는 습식단열재이다. 원통의 지름에 비해 습식단열재의 두께가 매우 작으므로 2차원으로 가정할 수 있다. 그리고 자연대류 유동을 해석하기 위하여 밀도차에 의한 중력항을 제외한 다른 항에서는 밀도가 일정하다고 가정한 Boussinesq 근사를 적용하였다. 그러므로 비압축성, 2차원, 정상상태, 자연대류 유동에 대한 질량 보존식, 운동량 방정식, 에너지 방정식은 다음과 같다.

질량보존식 :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

운동량방정식 :

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

$$\rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial(p + \rho_{\infty}gy)}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \rho g \beta (T - T_{\infty}) \quad (5)$$

에너지 방정식 :

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (6)$$

본 연구에 사용된 범용 전산유체코드인 CFX-4.3는 일반좌표계, 제어체적방법, 비엇물림격자(Non-staggered grid)와 SIMPLE 알고리즘[4]을 사용한다. 해석하고자 하는 대상에 대한 경계조건은 그림 2에 나타내었다. 그림에서 보듯이 해석하고자 하는 구조가 긴 사각형 모양이고 밀폐된 공간이므로 입구조건이나 출구조건은 필요없고 벽면에 대한 온도조건과 단열조건만 주었다. 정상운전시 1차측 온도가 310 °C 이고 가압기 공동내의 냉각재 온도는 약 70 °C 가 되므로 이 온도차를 양쪽 벽면에 경계조건으로 주었고 습식단열재의 층수는 20개이므로 각 층에서의 온도강하가 일정하다고 가정하면 1층마다 12 °C의 온도차이가 나게 된다[5]. 이를 경계조건으로 주었으며 수렴성을 개선하기 위해 CFX-4.3의 False time step[6]을 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

계산의 신뢰성을 높이기 위해서 먼저 CFX 코드가 자연대류 문제를 얼마나 정확하게 계산하는지를 검증할 필요가 있다. 그림 2와 같은 기하학적인 구조(Asspect ratio=1,  $A=H/\delta$ )에서 공기에 대해서 Hortmann et al[7]이 640x640 격자수까지 벤치마크 테스트를 하였는데 같은 경계조건과 기하학적 조건에 대해서 100x100 격자를 가지고 계산을 수행하였다. 그림 5에서 보듯이 훨씬 적은 격자를 가지고도 벤치마크 테스트 결과와 최대 3%의 오차를 가지고 일치하고 있음을 볼 수 있다. 그림 3은 종횡비(Asspect ratio)  $A=1$ 인 경우이고 그림 4는  $A=5$ 인 경우이다. 두가지 모두 수직평판의 두께는 같으면서 높이만 변화시킨 경우이고, 그림에서 보듯이 온도장이나 속도분포의 전체적인 형태는 거의 비슷하다. 하지만 종횡비가 커질수록 중앙공동에 정체되어 있는 부분이 상대적으로 적어지고 있는 것을 볼 수 있고 위쪽 벽면효과에 의한 영향이 적어져 혼합이 잘 일어나지 않는 것을 볼 수 있다. 그리고 높이가 길어짐에 따라 경계층이 계속 성장하여 서로 반대 방향으로 흐르던 유체가 서로 만나게 된다. 그로 인해 대류에 의한 열전달 효과도 감소하게 된다. 이를 다르게 설명하면 종횡비가 커질수록 유체가 흐르는 경로가 길어지고 반대방향으로 흐르던 유체사이의 전단응력이 증가된다. 그러므로 대류에 의한 물질전달이 지연되게 되고 열전달 효과도 감소하게 된다. 위의 결과에서 습식단열재의 열전달 성능에 영향을 미치는 인자는 Ra 수와 종횡비라는 것을 알 수 있다. 그림 6은 종횡비를 변화시켜 가면서 계산한 결과이다. 그림에서 보면 같은 Ra 수인 경우에 종횡비가 커질수록  $\epsilon$  값이 점점 작아지는 것을 볼 수 있다. 즉 종횡비가 커질수록 대류의 영향이 적어지고 전도가 지배적인 현상으로 나타난다는 사실을 보여주고 있다. 식 (2)는 점선으로 나타나 있는데 수치적인 결과와 잘 일치하지 않는 경향을 보이고 있다. 이는 서로 다른 실험결과를 취합하는 과정에서 종횡비를 고려하지 않은 결과라고 보인다. 그림 7(a)와 (b)는 계산한 결과를 밀폐된 사각형 공동내의 자연대류에 대한 기존의 실험과 수치해석에 의한 상관식과 비교하여 보았다[8]. 그림 7(a)는 현재 계산한 결과와 기존 실험에 의한 상관식과 비교한 결과로서 종횡비의 증가로 인한 열전달 감소효과에 대한 영향이 잘 나타나 있다. 또한 현 계산 결과와 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 그림 7(b)는 현재 계산한 결과와 기존 수치해석결과와 비교한 그림으로 거의 같은 정확도로 일치하고 있음을 볼 수 있다.

### 4. 결론

일체형 원자로인 SMART-P의 가압기 온도를 낮게 유지하기 위해서 도입한 습식단열재의 열전달 특성에 대한 연구를 수행하였다. 습식단열재의 기하학적 형상은 밀폐된 사각형 공동이며 이 공동내에서의 열전달은 자연대류가 지배적인 현상이다. 경계조건은 실제 운전 조건으로 적용하였으며 수치해석은 범용 전산 유체역학코드인 CFX를 이용하였다. 수행한 결과 습식단열재 열전달 특성에 영향을 미치는 인자는 평판의 두께, 즉 Ra 수와 종횡비(Asspect Ratio)라는 것을 알 수 있었다. 현재 습식단열재에 적용한 열전달 상관식은 종횡비(Asspect Ratio)를 고려하지 않았지만 습식단열재의 큰 종횡비(>2000)로 인해 충분한 설계여유를 가지고 있음을 확인하였다.

### 후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 5. 참고문헌

1. 강한옥 외, 일체형원자로내 가압기 습식단열재 열전달 특성 연구, 한국원자력학회 97년도 춘계학술발표회 논문집, Vol. 1, pp. 380-385, (1997)
2. Boyarintsev, D. I., Heat Transfer in Fluid and Gaseous Layers, Engineering Physics Journal, Vol. 20, issue 9, (1950)
3. Chirkin, V. S., *Thermal Properties of Materials(Reference Manual)*, State Publishing House of Mathematical and Physical Literature, Moscow, (1959)
4. Partankar, S. V., *Numerical heat transfer and fluid flow*, Hemisphere, (1983)
5. 서재광, 일체형 원자로에 장착되는 증기발생기 및 가압기의 정상상태 성능 분석 프로그램 개발, 한국원자력연구소, (1997)
6. CFX-4.3 User Manual, AEA, (1999)
7. Hortmann, M., and Peric, M., and Scheuerer, G., Finite volume multigrid prediction of laminar natural convection: Bench-mark solutions, Int. J. Numerical Methods in Fluids, Vol. 11, pp189-207, (1990)
8. Bejan, A., Note on Gills solution for free convection in a vertical enclosure, J. Fluid Mech., vol. 90, pp. 561-568, (1978).

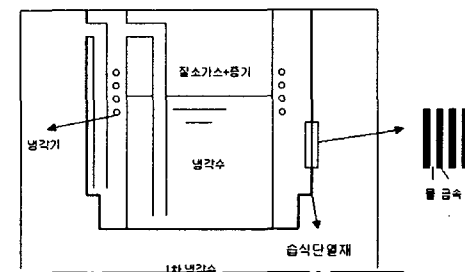


그림 1 자기가압기 개략도

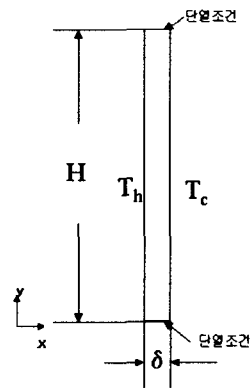


그림 2 기하학적 형상과  
경계조건

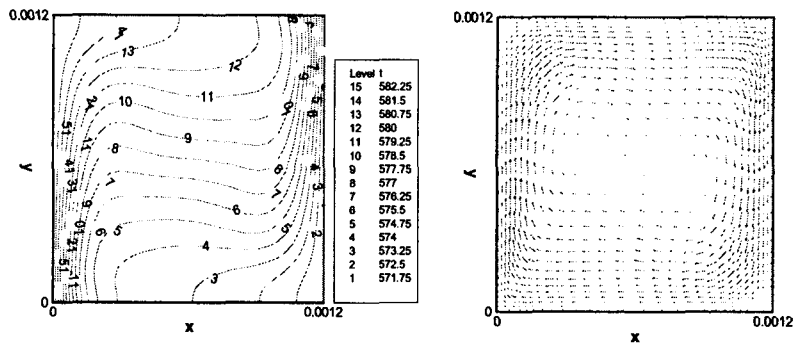


그림 3 온도분포와 속도벡터(A=1)

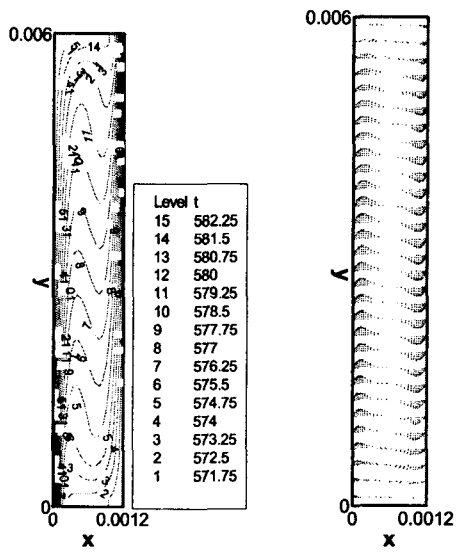


그림 4 온도분포와 속도벡터(A=5)

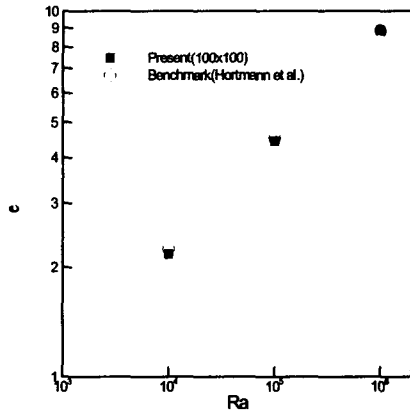


그림 5 Benchmark 결과와 비교

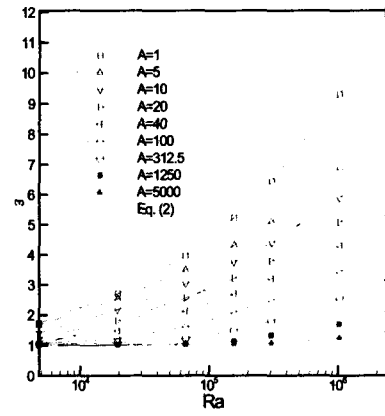
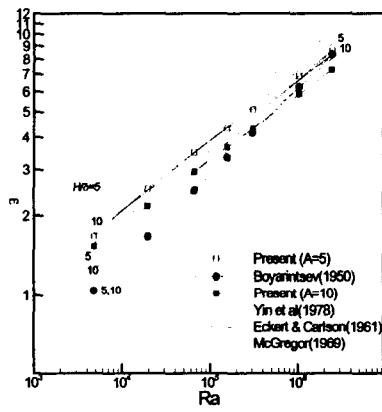
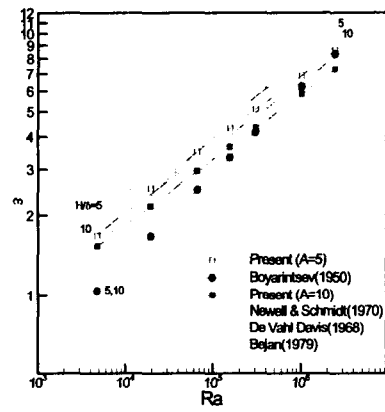


그림 6  $\epsilon$ -Ra 관계에 대한 종횡비 효과



(a)



(b)

그림 7 현 계산결과와 비교; (a) 실험 상관식 (b) 수치상관식