‘2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

SMART 의 가압기 습식단열재 열전달 해석

Heat Transfer Analysis of a Wet Thermal Insulation of the SMART Pressurizer

유승엽, 강한옥, 윤주현, 이두정

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

습식단열재의 열전달 특성에 대한 연구를 범용 전산유체코드를 이용하여 수행하였다. SMART (System-integrated Modular Advanced ReacTor)에서 일차측 압력은 상대적으로 큰 체적의 질소와 증기의 분압에 따라 피동적으로 작동하는 자기가압기에 의해 유지된다. 출력변화 운전시 일차계통의 압력변화폭을 최소화 하기위해 저온 자기가압기 개념이 도입되었으며, 이를 위해 SMART 의 자기가압기에는 냉각기와 습식 단열재가 설치되어있다. 본 연구에서는 자기가압기 성능에 중요한 역할을 하는 습식단열재에 대한 열전달 특성을 분석하였고, 습식단열재의 열전도저항에 대한 경험식을 실제 SMART 운전조건에 대한 수치해석을 통해서 평가하였다.

ABSTRACT

Heat transfer characteristics of a wet thermal insulation have been studied using a commercial CFD code. The self-pressurized pressurizer of the SMART(System-integrated Modular Advanced ReacTor) passively absorbs the system pressure variation by a relatively large volume of nitrogen and water vapor. In order to minimize the pressure variation during the power maneuvering, a low temperature pressurizer concept is adopted in the SMART. For this concept, the pressurizer cooler and the wet thermal insulation are installed in the SMART pressurizer. In this study, the heat transfer characteristics of the wet thermal insulation are analyzed numerically and the empirical correlations are evaluated to check the applicability to the SMART design.

1. 서 론

기존의 상용 원자로에서는 가압기내의 가열기 또는 살수기를 사용해 능동적으로 1 차계통내 압력을 제어한다. 반면 현재 원자력연구소에서 개발중인 일체형원자로 SMART 의 자기가압기는 출력변화시의 냉각재 부피변화를 피동적으로 수용하기위해 비응축가스인 질소와 수증기를 압력수용

매질로 사용한다[1]. 자기가압기는 1 차계통의 고온 쪽에 위치하고 있으며, 일정 냉각재 평균 온도 모드로 운전될 때, 출력변화에 따라 고온쪽 온도가 변하며 이에 의한 수증기의 응축/기화 과정이 압력변화의 폭을 증가시킨다. 이와 같은 문제점을 극복하기 위해 SMART 의 자기가압기는 수증기의 부분압력이 1 차계통에 기여하는 양을 최대한 줄이는 설계 개념을 가지고 있다. 이를 위해 저온에서 가압기가 운전될수 있도록 냉각기를 설치했으며, 냉각기의 용량을 줄이고 가압기를 가능한 한 1 차계통과 열적으로 차단시키기 위해 습식단열재(Wet thermal insulation)가 설치되어 있다[2].

본 연구의 목적은 기존의 실험으로 얻어진 습식단열재에 대한 열전달 상관식을 범용 전산유체 코드인 CFX 를 이용하여 SMART 운전조건에서 평가하여 보는 것이다.

2. 해석방법

2.1 기존의 열전달 상관식

두 수평평판사이에 있는 유체가 밑으로부터 가열되면 불안정한 온도 구배가 형성되어 유동이 발생한다. Rayleigh/Jefrace 는 수평관 가열에 대한 이론적 연구를 통해서 대류가 형성되기 시작하는 임계 Ra 수가 존재함을 보였다[3]. 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.

$$e = f(Ra) = l_e / l_f \qquad (1)$$

여기서 $Ra = \dfrac{gd^3 b\Delta T}{an}$

위 식에서 λ_f는 실제 전도도이고 λ_e는 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 1/3 인 식으로 잘 표현될 수 있음을 보였다. 이후 Chirkin 은 Boyarintsev 의 연구를 수평 평판에까지 확장시켜 다음과 같은 일반적인 상관식을 얻었다[4].

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

위 식에서 수직 평판일 경우 k 는 1 이고, 아랫면 가열의 수평 평판일 경우 k 는 3 이다. 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, ε 이 1 보다 커지기 시작하는 임계 Ra 수가 1000 부터 4000 사이에 분포하고 있으며 이 영역 이하에서는 오직 전도에 의해 열전달이 이루어진다.

2.2 단열재 층의 개수와 총 열저항과의 관계

열저항 계산시 매우 작은 두께에서는 Ra 수가 작아져 임계 Ra 수보다 작아진다. 이보다 작은 Ra 수에서는 열전도에 의해서만 열전달이 이루어진다. 이 점은 식(2) 에서 Ra=4200 이 되는 점이고, 평균 온도가 200 ℃ 이고 10 ℃ 의 온도차가 있는 층에서 임계두께가 약 1mm 정도이다. 일반적으로 습식단열재의 열저항은 전체 두께를 고정시킨 상태에서 층의 개수를 증가시킴에 따라 증가하나 각 층의 간격이 임계간격보다 작아질 경우 더 이상의 개수의 증가는 열저항을 증가시키기보다는 전체 간격에서 금속판이 차지하는 비율이 커져 반대로 열저항을 감소시킬 수 있다. ε=1 인 경우, 식(2)에서 금속판의 열저항을 무시하고 각 층의 온도차가 일정하다고 가정하면 다음과 같은 총열저항에 대한 식을 유도할 수 있다.

$$R = \frac{7.5}{l_f}\left(\frac{an}{b\Delta T}\right)^{1/3} \cdot n^{4/3} \tag{3}$$

이 식에서 총열저항은 층의 개수 n 의 4/3 승에 비례한다. 이 식을 적용할 때 물성치는 단열재 평균온도에서 계산한다. 여기서 주의할 것은 식(3)을 유도할 때 ε=1 인 경우이기 때문에 전도가 일어날 수 있는 층의 최대간격, 즉 δ 가 유일하게 정해져 있다.

2.3 CFX 코드를 사용한 상관식 평가

2.3.1 지배방정식

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

질량보존식 :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{4}$$

운동량방정식 :

$$ru\frac{\partial u}{\partial x} + rv\frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + m\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) \tag{5}$$

$$ru\frac{\partial v}{\partial x} + rv\frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial (p + r_\infty gy)}{\partial y} + m\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) - rgb(T - T_\infty) \tag{6}$$

에너지 방정식 :

$$u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}=a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \tag{7}$$

2.3.2 수치해석 방법

본 연구에 사용된 범용 전산유체코드인 CFX-4.2 는 일반좌표계, 제어체적방법, 비엇물림격자(Non-staggered grid)와 SIMPLE 알고리즘[5]을 사용한다. 해석하고자 하는 대상에 대한 경계조건은 그림. 2 에 나타내었다. 그림에서 보듯이 해석하고자 하는 구조가 긴 사각형 모양이고 밀폐된 공간이므로 입구조건이나 출구조건은 필요없고 벽면에 대한 온도조건과 단열조건만 주었다. 정상운전시 1 차측 온도가 310 ℃ 이고 가압기 공동내의 냉각재 온도는 약 70 ℃ 가 되므로 이 온도차를 양쪽 벽면에 경계조건으로 주었고 습식단열재의 층수는 20 개이므로 각 층에서의 온도강하가 일정하다고 가정하면 1 층마다 12 ℃ 의 온도차이가 나게 된다[6,7]. 이를 경계조건으로 주었으며 수렴성을 개선하기 위해 CFX-4.2 의 False time step[8]을 사용하였다.

3. 결과

본 연구에서는 수직평판의 간격을 0.8mm, 8mm, 15mm, 50mm 로 변화시켜 가면서 계산을 수행하였으며 그림. 3 은 y=2m 인 위치에서 각각의 온도분포이다. 그림에서 보면 간격이 0.8mm 인 경우에는 온도 분포가 거의 전 영역에 걸쳐 선형적이고 전도가 지배적인 현상으로 나타나고 간격이 커질수록 대류의 효과가 증가하여 곡선적인 온도 분포를 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 간격이 커질수록 벽면에서의 온도구배가 커지며 0.8mm 인 경우를 제외하고 중심부에서의 온도는 거의 일정한 값으로 유지되고 있다. 그림. 3 에서 보는 바와 같이 평판 간격이 0.8mm 이하인 경우에는 거의 전도에 의한 열전달 현상만 일어난다고 생각할 수 있다. 그림. 4 는 각각의 경우 y=1m, 2m, 3 m 의 위치에서의 온도분포를 나타내고 있다. 그림에서 0.8mm 인 경우에는 위치에 따른 온도분포의 차이가 나타나지 않고 있으며 거의 1 차원으로도 해석이 가능하다는 것을 알 수 있다. 간격이 커질수록 위치에 따른 온도분포도 차이가 나고 있고 평판 중심에서의 온도도 위로 갈수록 큰 것을 볼 수 있는데 이는 밀도차에 의해 온도가 높은 물이 위로 올라가기 때문이다. 그리고 평판 간격이 커질수록 평판 중심에서 온도가 일정한 부분이 넓어지고 있는 현상도 볼 수 있다. 그림. 5 는 각각의 경우 y=2m 의 위치에서 최대속도로 무차원화된 속도분포로서 중심축에 대해 대칭을 이루고 있으며 평판의 간격이 넓어질수록 평판 중심에서 정체되어 있는 구간이 넓어짐을 볼 수 있다. 또한 간격이 넓어질수록 속도 분포의 굴곡도 심해지고 벽면 근처에서만 국소적인 유동이 나타난다. 벽면에서의 속도 구배가 가파르기 때문에 온도구배도 가파르게 나타나고 열전달도 촉진된다. 그림. 6 은 각각의 경우 y=1m, 2m, 3m 의 위치에서의 속도분포를 나타내고 있다. 그림에서 보면 0.8mm 인 경우에는 평평한 부분이 없는데 이는 벽사이의 간격이 짧아서 뜨거운 벽과 차가운 벽에서 생긴 경계층이 서로 중첩되어 있기 때문이다. 하지만 간격이 커질수록 평평한 부분도 점점 커지고 양 쪽 벽면에서 경계층이 서로 중첩되지 않고 있으며 속도의 굴곡도 커지고 있음을 볼 수 있다. 그림. 7 은 식(2)와 수치적으로 계산된 값을 비교한 것으로서 간격이 증가함에 따라 ε 값도 선형적으로 증가함을 볼 수 있고, 수치해석 값이 전도만 일어난 경우와 식(2)에 의한 값 중간에 위치하고 있음을 알 수 있다. 벽으로 둘러싸인 공동에서 자연대류 실험결과는 항상 일치하지 않고,

각각의 경우 상당한 차이를 보이고 있고 그 실험결과로 유도한 상관식 또한 상당한 오차를 포함하고 있다[9]. 이 상관식을 SMART 에 적용할 때 신뢰성을 확인하기 위해서 SMART 운전조건에서 수치해석을 하였고 식(2)에 의한 설계는 충분한 설계여유를 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 식(3)은 습식단열재 층수에 의한 열저항을 나타내는데 이를 평가하기 위해서 그림. 8 과 같이 5 개의 층을 계산영역으로 선택하였다. 그림. 9 는 y=1, 2, 3m 인 위치에서의 온도분포로서 금속판에 의한 온도 강하는 거의 없고 주로 물에 의한 온도 강하만 선형적으로 일어난다. 식(3)을 유도할 때 금속판에 의한 열저항은 무시하고 각 층에 대한 온도강하는 선형적으로 일어난다고 가정하였는데 타당한 가정이었음을 알 수 있다. 그림. 10 은 5 개층에 대한 열저항을 계산한 것으로 식(3)과 수치해석 결과를 비교하였다. 여기서 수치해석 결과가 전도만 일어난 경우보다는 작고 상관식에 의한 값보다는 크게 나왔는데 이는 그림. 7 과 일치하는 경향이다.

4. 결론

본 연구에서는 SMART 의 가압기 온도를 낮게 유지하기 위해서 도입한 습식단열재에 사용된 상관식을 평가하기 위하여 실제 운전조건에서 수치해석을 수행하였으며 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(ㄱ) SMART 의 실제운전조건에 대해서 수치해석을 수행한 결과 평판사이의 자연대류 열전달에 대한 실험결과로 얻은 경험식(2)는 충분한 설계여유를 가지고 있다.

(ㄴ) 5 개층에 대한 수치해석을 통해 액체내에서 선형적으로 온도강하가 일어나는 것을 알 수 있었고 습식단열재에서 열저항은 사용된 금속판의 열전도에 실제적으로 의존하지 않는다. 이는 물과 금속의 열전도도의 큰 차이때문인데, 식(3)을 유도한 가정이 타당함을 보이고 있다. 그러나 식(3)을 적용할 때는 $\varepsilon=1$ 인 경우이므로 순수한 전도가 일어나는 최대간격에서만 적용하여야 한다.

(ㄷ) 평판사이의 간격을 줄임에 따라 열전달계수가 더 이상 감소하지 않는 최소 간격이 존재하고 이 이하로 간격을 줄이면 열적 단열효과를 감소시키고 제작상의 어려움이 생길 수 있다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 장문희 외, “신형원자로 계통개념 연구,” KAERI/RR-1438/94, 한국원자력연구소, 1995.7.
2. 강한옥 외, “일체형원자로내 가압기 습식단열재 열전달 특성 연구,” 한국원자력학회 ’97 년도 춘계학술발표회 논문집, Vol. 1, pp. 380-385, 1997.
3. Boyarintsev, D. I., “Heat Transfer in Fluid and Gaseous Layers,” Engineering Physics Journal, 20, issue

9,1950.

4. Chirkin, V. S., *Thermal Properties of Materials(Reference Manual)*, State Publishing House of Mathematical and Physical Literature, Moscow, 1959.
5. Partankar, S. V., *Numerical heat transfer and fluid flow*, Hemisphere, 1983.
6. 서재광, "일체형 원자로에 장착되는 증기발생기 및 가압기의 정상상태 성능 분석 프로그램 개발," 한국원자력연구소, 1997.
7. 강연문 외, "SMART 의 Heatup 시 자기가압기의 영역별 온도 및 계통압력 변화 해석과 습식 단열재 및 냉각기 크기 계산," KAERI/TR-1253/99, 한국원자력연구소, 1999.
8. CFX-4.2 User Manual, AEA, 1997.
9. Holman, J. P., *Heat Transfer*, McGraw-Hill, 1996.

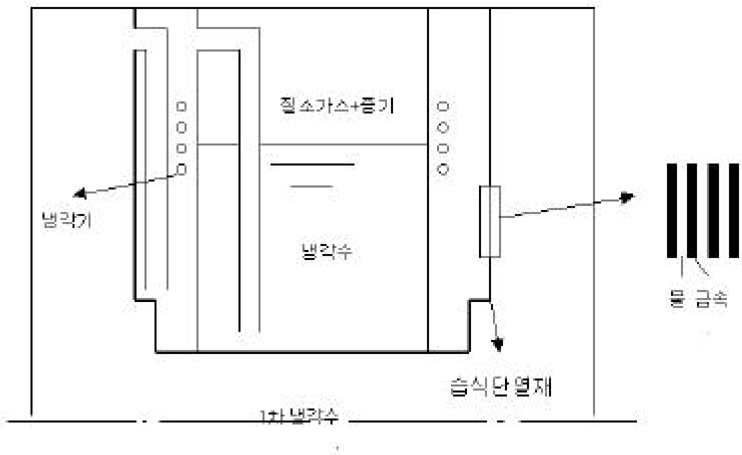

그림. 1 자기가압기 개략도

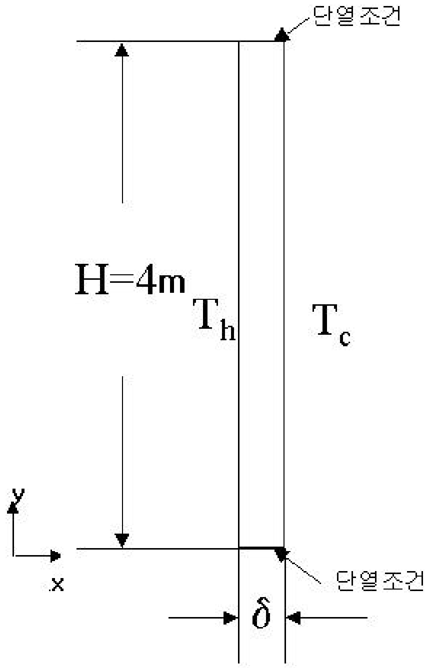

그림. 2 기하학적 형상과 경계조건

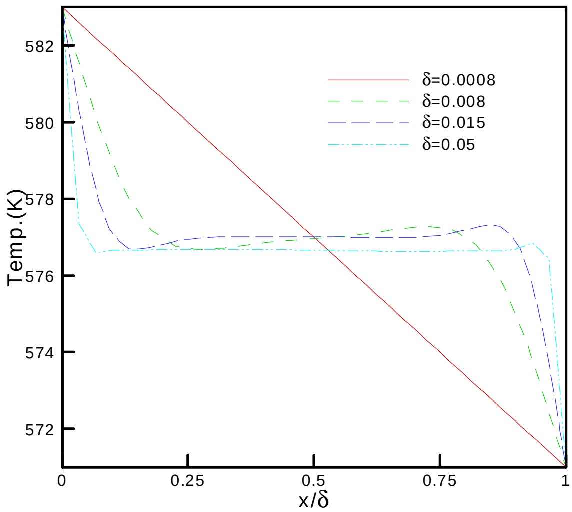

그림. 3 y=2m **에서 온도분포**

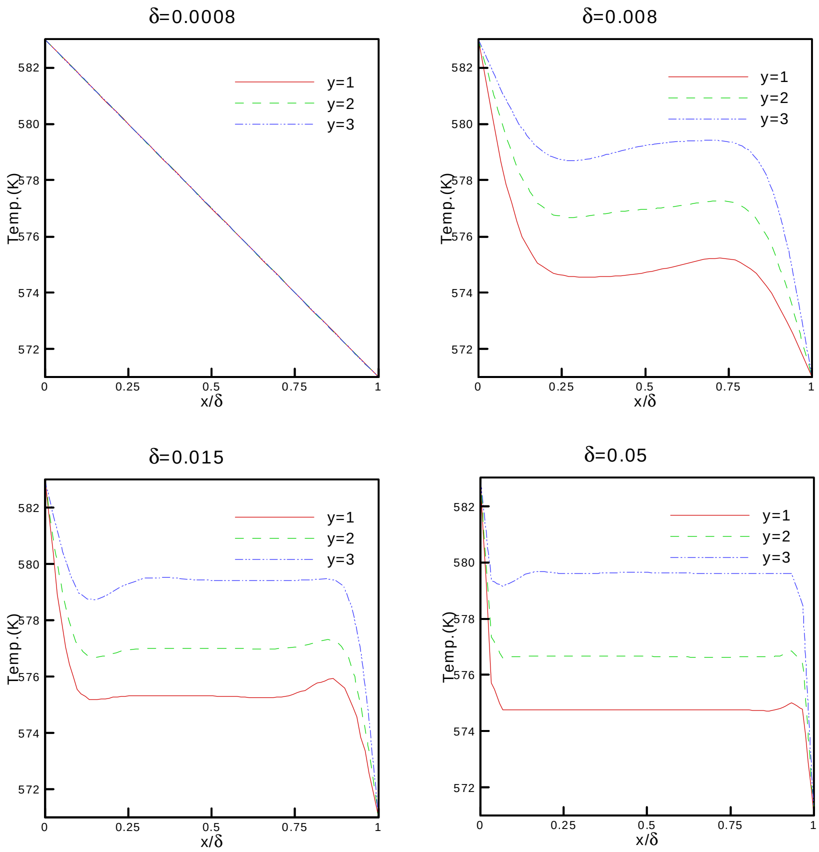

그림. 4 세 위치의 온도분포

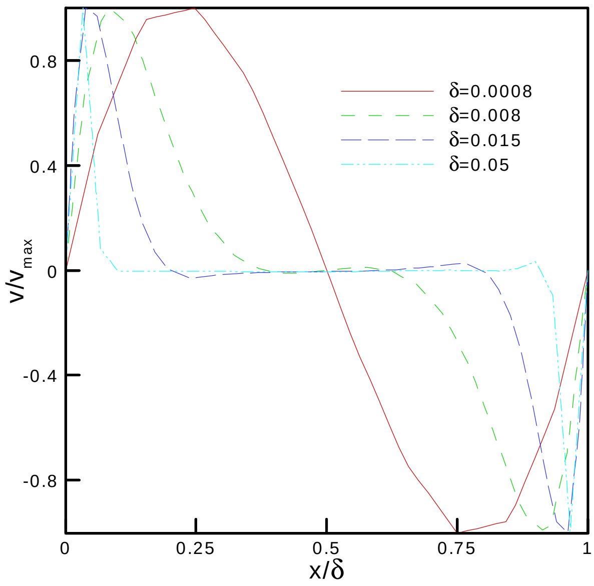

그림.5 y=2m **에서 속도분포**

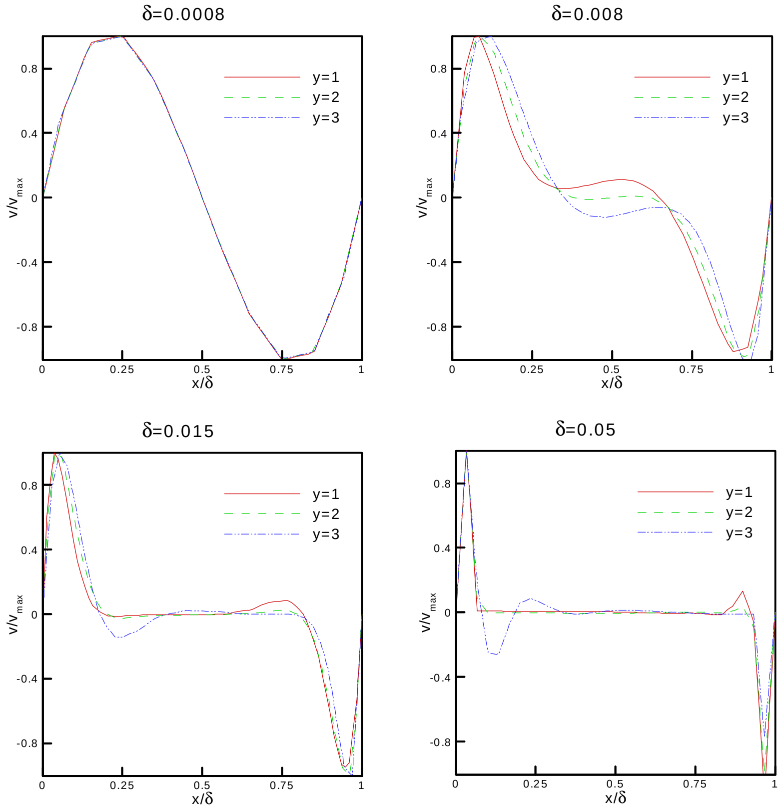

그림. 6 세 위치의 속도분포.

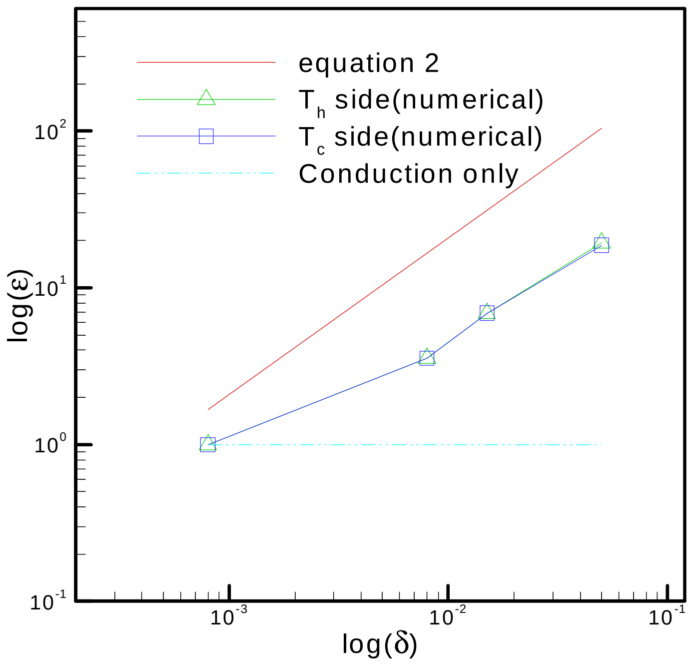

그림. 7 수치해석 결과와 상관식(2)의 비교

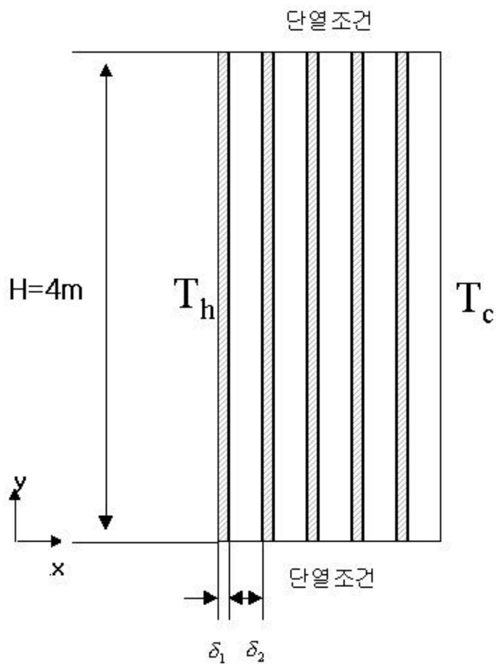

그림. 8 기하학적 형상과 경계조건 (H=4m, δ_1=0.2mm, δ_2=0.8mm)

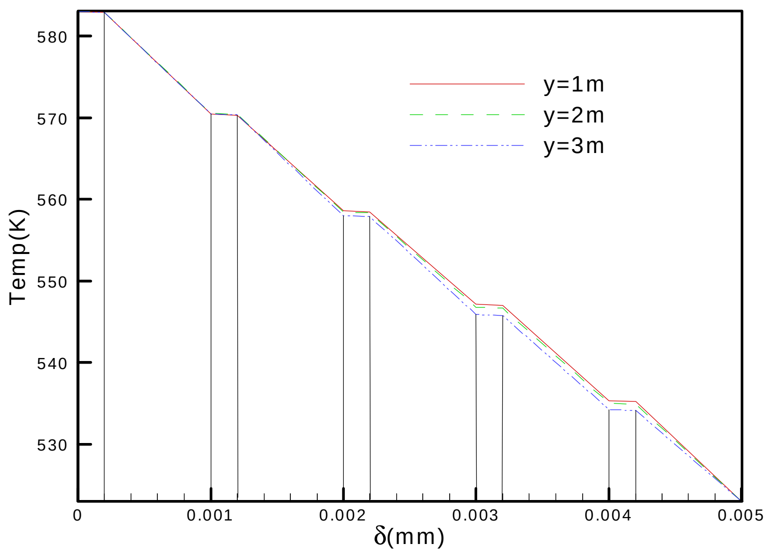

그림. 9 5 **개층의 습식단열재 온도분포**

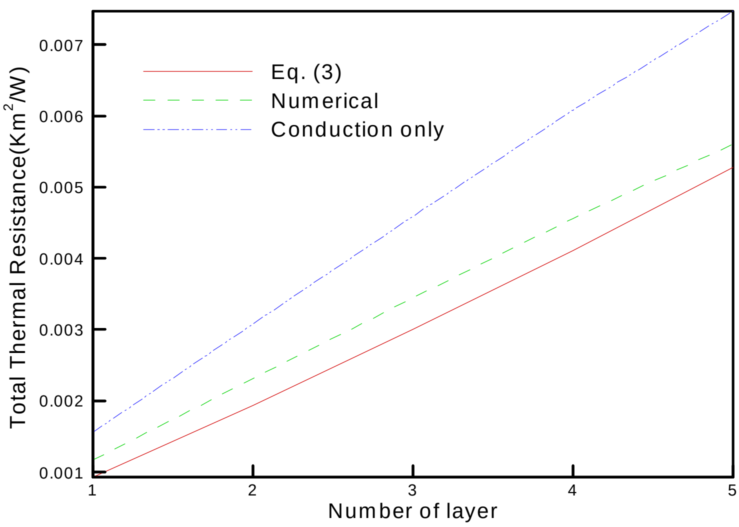

그림. 10 5 **개층의 총 열저항**