

KALIMER 계통분석 코드 SSC-K 용 PSDRS 모델개발

Development of the PSDRS Model for the KALIMER System Analysis Code SSC-K

장원표, 권영민, 김경두, 한도희, 석수동

한국원자력연구소
대전광역시 유성우체국 사서함 105 호

요 약

KALIMER(Korea Advanced LIquid MEtal Reactor) 설계에서는 원자로 열제거 상실 사고 시 최종 열제거 방법중 하나로 피동열제거 특성을 가진 PSDRS (Passive Safety Decay Heat Removal System)를 이용한다. 이 계통은 대기를 이용해 중력에 의해 격납용기 외부벽면을 냉각하는 데, 본 연구는 이 계통의 사고시 열제거량을 예측할 수 있는 모델을 개발하는 것이다. 이 모델은 벽면들 사이 열전달에 의한 에너지 균형, 그리고 공기통로사이의 중력차와 유동저항의 균형으로부터 구한 공기유동량을 이용해 격납용기 외부벽면으로부터의 열제거량을 계산한다. 지배방정식중 비선형 미분방정식은 Runge-Kutta 방법을 이용해 해를 구하고, 공기온도 분포는 이론적 계산에 의해 해를 구했다.

모델을 시험한 결과 정상상태 및 과도상태에서 모두 해는 안정적이었으며 또한 수렴함이 입증되었다. 향후 개발된 모델은 계통분석 코드 SSC-K 에 연결함과 동시에 상세한 이론적 배경을 바탕으로 현재의 모델을 계속 발전시켜 나갈 계획이다.

Abstract

PSDRS(Passive Safety Decay Heat Removal System) is a safety feature adopted in the KALIMER design for passive decay heat removal as an ultimate heat sink under loss of heat sink accident. The system removes the heat generated in the reactor by cooling the containment vessel using gravity driven air flow. The present study is to develop a model to predict the heat removal rate by this system. The model calculates not only energy balances by the heat transfers between the walls, but also the air flow rate driven by gravitational force between air flow channels to estimate the heat removal rate. Non-linear differential equations are solved using the Runge-Kutta method while the air temperature profile is obtained from a theoretical manipulation.

The tests show that the solutions obtained turn out to be stable and convergent. The model will be connected to the SSC-K, and the present model will be continuously improved through more rigorous theoretical bases.

I. 서론

KALIMER 설계의 안전장치중 사고시 열제거 방법중 하나는 격납용기 외부벽면에서 공기를 이용해 피동열제거 특성을 가진 PSDRS(Passive Safety Decay Heat Removal System)을 이용하는 것이다. PSDRS는 그림 1에서와 같이 격납용기 상부의 입구에서 대기의 찬공기가 들어와 분리벽(Divider) 외부와 콘크리트 내부벽사이의 환형갭(Annulus Gap)을 통해 하단으로 내려와서 다시 격납용기 외부벽과 분리벽 내부의 환형갭을 통해 격납용기 상부의 출구를 통해 더워진 공기가 빠져나가면서 격납용기 벽면을 냉각시킨다. 이 공기의 유동량은 분리벽을 중심으로 내부 및 외부 환형갭 내의 공기온도차, 유로형태 혹은 유량조절을 위해 설치된 Orifice에 의한 압력손실, 그리고 공기유로 벽면에서의 마찰에 의해 주로 결정된다.

공기 유동은 분리벽 내·외부의 공기온도차에 의해 결정되므로, 공기 유동량을 증가시키기 위해서는 분리벽의 단열이 중요하다. 또한 원자로 용기 외부벽과 격납용기 내부는 비응축성 기체인 헬륨(Helium)에 의해 채워져 있으므로 복사에 의한 열전달이 대부분이다. 따라서 복사열전달의 모델링과 공기 유동량 계산이 모델링에서 가장 중요한 부분을 차지한다.

KALIMER에서 특히 PSDRS의 중요성은 원자로의 열제거원 상실사고시 최종 열제거 수단이기 때문에, 이 계통의 열제거능력이 이런 사고시 노심손상을 결정하는 결정적 역할을 한다. 따라서 이 계통의 설계에 대한 성능 이해와 정확한 모델링은 안전해석을 통한 원자로의 안전성 입증에 필수적이라 할 수 있다.

이 논문은 먼저 모델링에 대한 가정과 지배방정식을 소개하고, 다음으로 현재까지의 수집가능한 KALIMER 자료를 이용해 수행한 민감도 분석결과와 해의 타당성을 논의한다. 마지막으로 지금까지 얻은 결론과 향후 개선점에 대해 기술하기로 한다.

II. 본론

1. 기본가정

- 분리벽을 제외한 부품들은 반경방향으로 평균된 한 개의 온도로 가정한다. 벽간의 간격이 벽의 두께에 비해 Order of magnitude로 작으며, 벽면 열전도도가 갭에 비해 월등히 크기 때문이다. 그러나 분리벽은 열전도도가 작을수록 유리하므로 양쪽의 온도차를 고려하여야 한다.
- 벽면의 온도변화에 대한 시간정수(Time Constant)가 공기보다 훨씬 클 것이 예상되므로 벽면온도에 비해 공기 유동은 준평형상태(Quasi Steady State)로 가정한다. 따라서 공기온도 변화는 유로에 따라서만 변하는 것으로 계산한다.
- 모든 벽면 및 공기유로의 노드는 동일한 크기로 같은 수평높이를 가정하고, 노드간 축방향 열전달은 무시한다. (그림 1)
- 공기의 물성치는 온도의 함수로만 나타낸다.

2. 지배방정식

지배방정식에 대한 내용은 문헌[1]를 주로 참고하여 식을 유도하였다.

2.1 원자로 용기

원자로 용기에서는 용기내 높이에 따라 Sodium 혹은 He 과 원자로 벽면사이의 열전달계수와 원자로 용기 외부벽면과 격납용기 내부사이의 열전달 균형에 의해 온도가 결정된다.

$$m_{w1}c_{w1} \frac{dT_{w1}}{dt} = h_{NW1}A_{NW1}(T_N - T_{W1}) + h_{W12}A_{W12}(T_{W2} - T_{W1}) \quad (1)$$

여기서,

- m_{w1}, C_{w1} : 단위길이당 원자로 용기의 질량 및 용기의 비열
- T_N, T_{W1}, T_{W2} : 냉각재 혹은 밀봉기체, 원자로 용기, 그리고 격납용기의 온도
- h_{NW1}, h_{W12} : 용기 내부벽면과 냉각재 혹은 밀봉기체, 그리고 원자로 용기와 격납용기 사이의 열전달계수
- A_{NW1}, A_{W12} : 해당 열전달 면적

2.2 격납용기

격납용기에서는 원자로용기에서 전달되는 열량과 상향공기로 대류열전달되는 열량, 그리고 Radiation 에 의해 직접 공기 분리벽의 내부로 전달되는 열량에 의해 격납용기의 온도가 결정된다. 따라서

$$m_{w2}c_{w2} \frac{dT_{w2}}{dt} = h_{w12}A_{w12}(T_{W1} - T_{W2}) + h_{w23}A_{w23}(T_{W3} - T_{W2}) + h_{w2a}A_{w2a}(T_{a1} - T_{W2}) \quad (2)$$

이 되며, 여기서 사용된 계수는 식 (1)의 정의와 같다. 다만, h_{2a} 와 A_{2a} 는 격납용기와 공기 사이의 열전달 계수 및 면적이며, T_{a1} 은 상향통로의 공기온도를 나타낸다.

2.3 공기 분리벽 내.외부

같은 방법으로 분리벽 내부에 대해 에너지 균형을 세우면

$$m_{w3}c_{w3} \frac{dT_{w3}}{dt} = h_{w34}A_{w34}(T_{W4} - T_{W3}) + h_{w23}A_{w23}(T_{W2} - T_{W3}) + h_{w3a}A_{w3a}(T_{a1} - T_{W3}) \quad (3)$$

이 되고, 분리벽 외부는

$$m_{w4}c_{w4} \frac{dT_{w4}}{dt} = h_{w45}A_{w45}(T_{W5} - T_{W4}) + h_{w34}A_{w34}(T_{W3} - T_{W4}) + h_{w4a}A_{w4a}(T_{a2} - T_{W4}) \quad (4)$$

이 된다. 다만, 여기서 T_{a2} 는 하향통로의 공기온도를 의미한다.

2.4 콘크리트 벽면

$$m_{w5}c_{w5} \frac{dT_{w5}}{dt} = h_{w56}A_{w56}(T_{W6} - T_{W5}) + h_{w45}A_{w45}(T_{W4} - T_{W5}) + h_{w5a}A_{w5a}(T_{a2} - T_{W5}) \quad (5)$$

여기서, T_{w6} 는 항상 일정한 콘크리트 외부면 온도를 나타낸다.

2.5 상.하향 공기통로의 온도

상향 공기통로는 격납용기와 공기 분리벽 내부사이의 환형갭이므로 온도와 관련한 방정식은 기본 가정에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$w_a c_a \frac{dT_{a1}}{dz} = h_{wa2} A_{wa2} (T_{W2}(z) - T_{a1}(z)) + h_{wa3} A_{wa3} (T_{W3}(z) - T_{a1}(z)) \quad (6)$$

그리고 하향통로는 분리벽 외부와 콘크리트벽 내부사이의 환형갭이므로

$$w_a c_a \frac{dT_{a2}}{dz} = h_{wa4} A_{wa4} (T_{W4}(z) - T_{a2}(z)) + h_{wa5} A_{wa5} (T_{W5}(z) - T_{a2}(z)) \quad (7)$$

와 같이 나타낸다. 여기서 W_a 는 공기 유동량이고, C_a 는 공기의 비열이다.

2.5 공기 유동량의 결정

공기 유동량은 하향 및 상향공기 유로의 중력차와 유동저항의 균형 즉,

$$\Delta p_{gr} = \int \rho g dz = g \left\{ \rho_{in} \Delta z_{\epsilon} - \rho_{stack} \Delta z_{stack} + \sum_j \overline{\rho_{a2}}(j) \Delta z_j - \sum_j \overline{\rho_{a1}}(j) \Delta z_j - \rho_{in} (z_{st} - z_{in}) \right\} \quad (8)$$

과

$$\Delta p_{loss} = \sum \frac{w_a^2}{2 \rho_a A_a^2} \left(f \frac{L}{D_h} + k_{or} \right) \quad (9)$$

의 균형에 의해 계산된다. 여기서, $(z_{st} - z_{in})$ 은 입출구의 높이차를 뜻하며, $\overline{\rho_a}(j)$ 는 j 노드의 공기밀도, 그리고 K_{or} 은 지형 혹은 Orifice 에 의한 압력손실계수를 의미한다.

2.6 해의 결정

식 (1)에서 (5)까지의 비선형 미분방정식은 Runge-Kutta Method [2]에 의해 해를 구하는 반면, 식 (6)과 (7)은 노드내 벽면 온도변화를 무시하면 이론적인 해가 가능하다. 여기서 구한 온도값은 노드경계에서의 값이므로 노드내에서 평균값을 구하여 노드의 공기온도로 정의한다. 식 (8)과 (9)는 대수식이기 때문에 식을 구성하는 계수가 결정되면 직접 공기온도를 계산할 수 있다.

3. 시험계산결과 및 해의 타당성 논의

3.1 입력작성

PSDRS 의 입력작성을 위한 벽면온도에 대한 모델링은 그림 1 에서 나타내었으며, 각

부품들의 치수(Dimension)는 참고문헌 [3]의 값들을 사용했다. 원자로 용기내 Sodium 과 He 의 온도는 560 C 로 가정하였고, 정상상태 값을 구하기 위해 수행한 Null Transient 시 간은 3000 초로 정했다. 과도기 시험은 ULOF(Unprotected Loss of Flow)시 EBR-II 실험 [4] 모의시 사용했던 원자로 용기내 Sodium 온도변화율을 대략 가정하여 입력하였다.

초기 벽면온도의 예측이 적당하지 못해 공기온도의 수렴성을 만족하기 위한 반복횟수 를 2000 번 까지로 하고 수렴은 상대적인 값 차이가 10^{-4} 이하일 때 만족되는 것으로 하 였다.

3.2 계산결과

(1) 각 부품의 온도계산에 대한 타당성 평가

가. 정상상태

각 부품의 정상상태 온도는 시간에 따라 초기값에서 일정한 최종값으로 수렴하며, 벽 면온도와 공기온도의 반복계산은 Null Transient 초기를 제외하고는 반복횟수가 거의 없었 다. Time-Step 에 따른 수렴성에 대한 시험 결과를 원자로 용기의 경우 그림 2 에 나타내 었는 데, Time-Step 과 상관없이 일정한 축방향 분포를 가지는 것으로 나타나 벽면온도는 Time-step 에 민감하지 않음이 입증된다. 약 13 m 근처에서 온도의 변화는 원자로 용기 벽 면내부와 He 밀봉기체 경계가 존재하는 지점으로 열전달계수가 Na-영역에 비해 상당히 작기 때문이다. 그림 3 에 나타난 공기유로내의 공기온도도 하향통로는 분리벽의 단열 때 문에 온도증가가 거의 없으나, 상향통로에서는 공기온도가 Time-Step 에 상관없이 거의 일정하게 증가함을 볼 수 있다.

공기 유동량은 그림 4 에서 보여지듯이 Time-step 에 따라 초기부터 차이를 보이며, 결 국 Time-step 이 작을수 록 수렴함을 알 수 있다. 그러나 노드수에 대해서는 Oscillatory 거 동을 보이며 결국 수렴함을 보여준다. (그림 5) 따라서 구한 해는 안정성과 수렴성이 확 인된 것으로 평가되므로 SSC-K 코드에 연결될 수 있음이 입증되었다

나. 과도기

사용자가 제공한 과도기 Na 온도에 대한 각 부품의 온도는 그림 6 에 나타내었는 데, 입력으로 제공된 과도기 Sodium 온도에 대해 원자로용기 온도는 사용자가 제공한 열전 달 계수에 의해 결정되며, 원자로 용기와 격납용기 사이의 온도차는 약 200 K 정도인 데, 이 중 Radiation 에 의한 열전달이 대부분을 차지한다. 공기와 격납용기 벽면사이의 열전 달은 대류에 의해 이루어 지지만, 분리벽 내부온도는 격납용기로 부터의 Radiation 효과 로 상당히 높은 값을 보여준다.(그림 7) 그림 8 과 9 에 나타난 과도기시 공기의 유동량 과 온도의 결과는 이들 값이 Time Step 에 대해 민감하지 않음을 보여준다.

III. 결론 및 향후연구

앞의 여러가지 민감도 분석결과에서 살펴보았듯이 격납용기의 벽면을 공기의 자연순 환에 의해 냉각시키는 PSDRS 의 지배방정식은 안정되고 수렴된 해를 정상상태 계산뿐 아니라 과도기 계산에서도 구해졌다. 따라서 이 프로그램은 SSC-K 에 연결하여 열제거 상실과 같은 이 계통이 최종 열제거수단으로 사용되어야 할 사고 뿐 아니라, 유량상실과 같은 사고시에도 잔열제거량을 계산하여 보다 현실적인 계산을 수행할 수 있을 것으로

판단된다.

그러나 현재의 이 모델은 사용자가 제공해야 할 입력이 많기 때문에 사용자의 의도에 따라 상당히 상이한 결과를 나타낼 수 있다는 점에서 이론적인 보완이 필요하다. 또한 특히 공기 유동량 계산에 사용된 상관식의 타당성에 대해서는 이 값이 가지는 중요성을 감안하여 이론적 연구 뿐 아니라 실험적 입증도 필요하다. SSC-K와의 연결시 Time-step에 있어서는 SSC-K의 값이 0.1 초 보다 큰 경우가 거의 없는 것으로 알려져 있기 때문에, SSC-K의 Time-step 값을 사용하면 항상 해의 안정성과 수렴성이 보장될 수 있을 것으로 판단된다.

* 이 연구는 과기부에서 주관한 원자력 중장기 연구계획의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 김경두외, 'SSC-K 기존 모델분석 및 신 모델이론 개발', KAERI/TR-990/98
- [2] Lee W. Johnson et al, 'Numerical Analysis', Addison-Wesley Publishing Company
- [3] 김영철외, 'KALIMER Design Concept Report', KAERI/TR-888/97
- [4] 권영민외, 'DSNP 코드를 사용한 비보호 유량상실사고 모의; EBR-II SHRT-45 실험', KAERI/TR-986/98

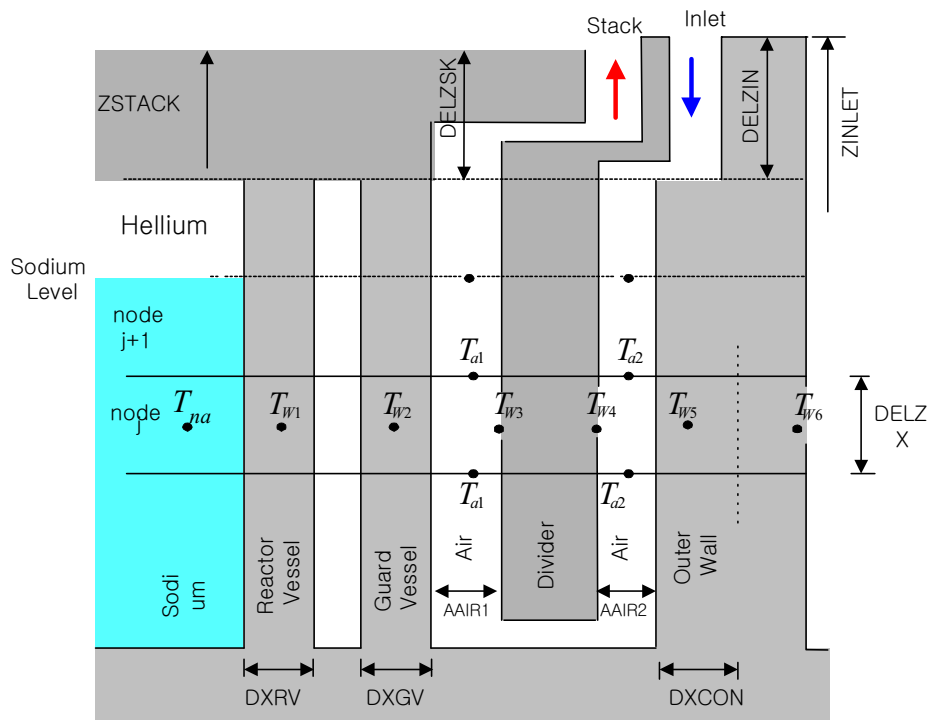


그림 1 PSDRS 모델링

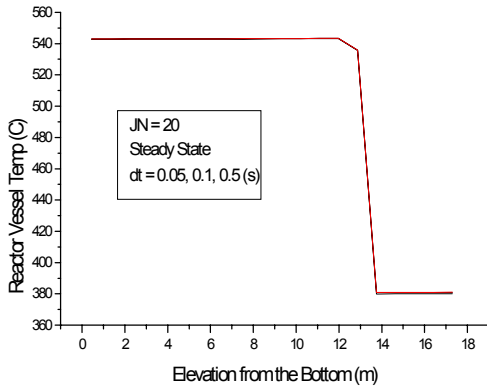


그림 2 원자로 용기 축방향 온도

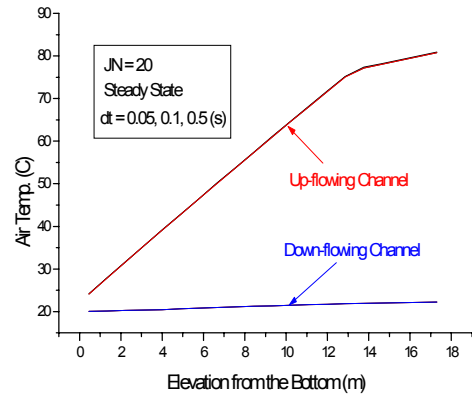


그림 3 상.하향 통로의 축방향 공기온도

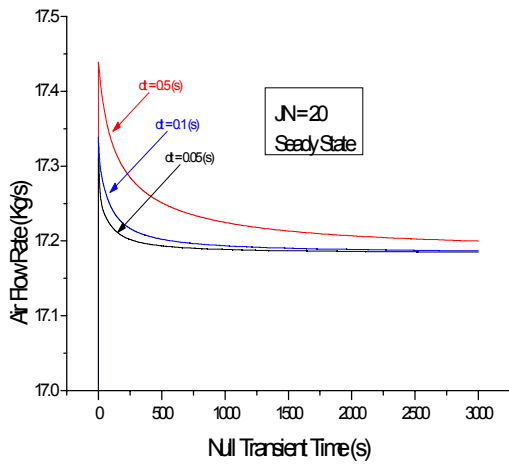


그림 4 Time-step에 따른 공기 유동

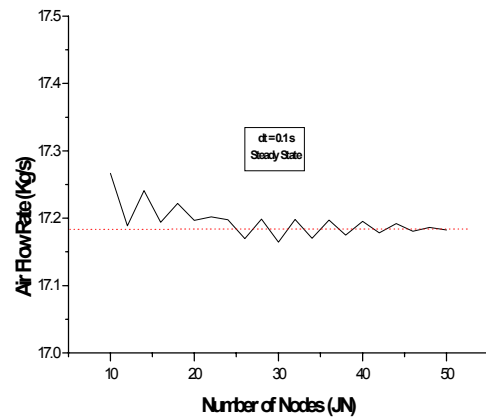


그림 5 Node 개수에 따른 공기 유동

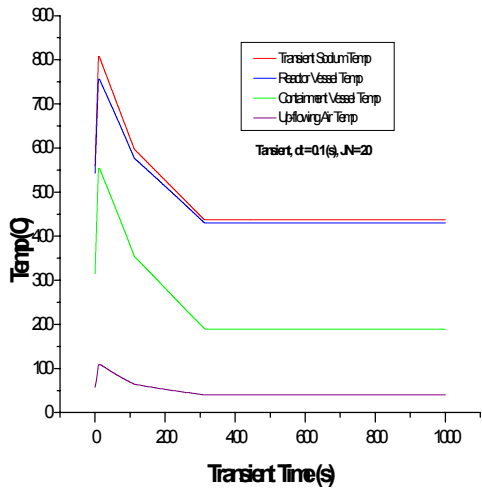


그림 6 각 부품의 시간에 대한 온도

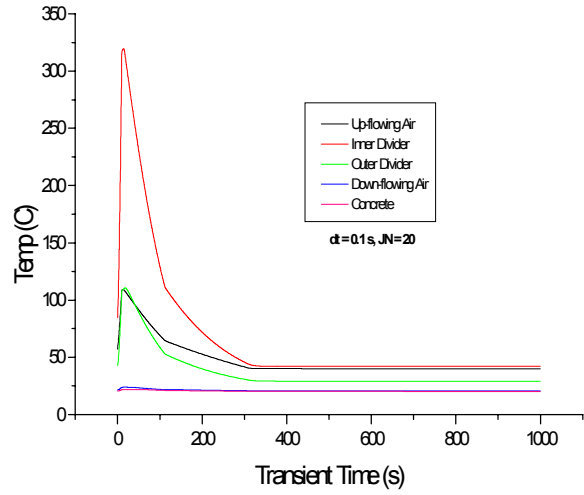


그림 7 각 부품의 시간에 대한 온도

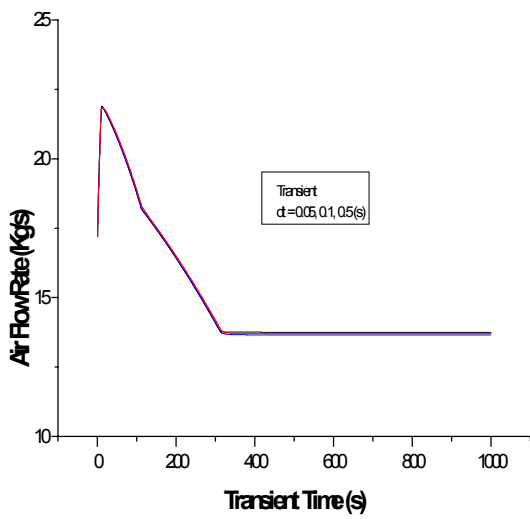


그림 8 공기 유동량의 시간에 대한 변화

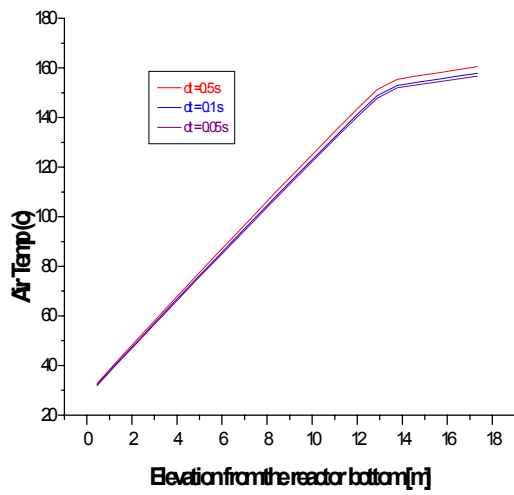


그림 9 상향 공기유로내 축방향 온도