

한국표준원전 원자로의 단열 설계에 관한 연구

백세진, 김석범, 주경인, 김영보, 정종식
한국원자력연구소

요 약

고온으로 유지되는 원자로에는 열손실을 줄이기 위하여 단열재가 설치되어 있다. 일반적으로 열손실 시험에서 나타난 실제 열손실은 설계상의 열손실보다 크며, 이의 원인은 단열설계의 부적절, 단열재 설치상의 미흡 등에 기인한다. 본 연구에서는 단열재 두께와 간격에 대한 열전달 특성을 분석하여 단열설계변수를 최적화하며, chimney effect에 의한 열손실 증가를 정량적으로 분석하였다. 본 연구의 결과는 원자로용기 뿐 아니라 가압기, 증기발생기 등의 큰 규모의 단열재 설계에 적용될 수 있다.

1. 서론

한국표준원전의 원자로 냉각재계통(RCS)은 원자로 용기에 연결된 두 개의 동일한 루프로 구성되어 있으며, 각 루프는 한 개의 증기발생기와 두 개의 펌프, 그리고 연결배관으로 이루어져 있다. 그리고 가압기는 원자로 출구배관에 연결되어 있다. RCS의 설계압력과 설계온도는 각각 2500psi와 630 °F이다. 고온으로 유지되는 원자로는 열손실을 막기 위하여 가압기를 포함한 RCS 뿐 아니라 증기발생기, 보조계통 등의 기기와 배관에 단열재가 설치된다. 대부분의 원자로의 열손실 시험에서 설계상의 열손실보다 실제 열손실이 2-3배 크게 나타났음을 EPRI 보고서는 밝히고 있으며, 영광3호기의 고온기 능시험에서도 RCS로부터의 열손실이 과다하게 나타났다.

영광3호기에 사용된 단열재는 반사형 단열재($k=0.0375 \text{ Btu/hr-ft-}^\circ\text{F}$)로서 원자로 벽면으로부터 위치에 따라 1.5-8.5인치 떨어져 설치되었다. 그 이유는 원자로 용기에서 발생할 수 있는 국소적인 고온 혹은 저온을 방지하며, 단열재에 묻어 있는 오염물질이 원자로용기에 화학적인 영향을 주지 않게 하고, 그리고 단열 성능을 향상시키기 위해서이다. 단열재는 여러 조각의 판으로 구성되며, 조각판들은 나사에 의하여 서로 연결된다. 단열재 설치시 허용되는 단열재간의 최대 틈새는 0.125 인치이며, 나사에 의해 겹쳐지는 부분의 최대허용틈새는 0.0625 인치이다.

영광3호기 시험에서는 기기별로 열손실 시험을 하지 않았으므로 각 기기별 열손실에 대한 자료가 없으나 총열손실이 시험기준에 비해 컸다. RCS의 열손실시험은 일정 시간동안 RCS에 가해진 총열량과 RCS로부터 전달된 열량과의 차이로부터 열손실을 계산하므로 여러 양의 측정시 발생한 계측오차나 시험시간 등에 따라 영향을 받을 수 있다.

영광3,4호기의 참조발전소인 팔로버디 발전소의 경우에는 시운전시 RCS의 열손실시험시 설계상 열손실 크기인 5.13 Mbtu/hr에 비해 실제 열손실은 12.36 Mbtu/hr로 크게 나타났다. 원자로, 가압기 및 증기발생기 등의 기기에 대하여 적외선 온도사진을 찍어 분석하여 각 기기별의 열손실량을 구하였으며 이를 설계치와 비교하여 단열재 보수에 활용하였다. 가압기의 경우 측정열손실 대 설계열손실의 비가 0.4/0.1 (Mbtu/hr / Mbtu/hr) 이며, 두 개의 증기발생기에서는 3.47/0.58, CEDMI을 제외한 원자로 용기에서는 1.68/0.22 로 나타나 설계열손실에 비해 측정열손실이 기기에 따라서 4-7배 큼을 알 수

있다. 가압기와 증기발생기의 경우는 chimney effect에 의해 단열재의 틈새로 공기가 유입되어 찬공기가 직접 고온의 벽면에 닿아 열전달량을 크게 증가시켰다. 원자로의 경우는 chimney effect 뿐 아니라 원자로 하부의 reactor cavity가 약 0.6 인치 수두로 가압됨에 따라 neutron plug flow tube를 통하여 단열재 밖으로 뜨거운 공기가 새어나오는 강제대류가 일어나 열손실이 매우 컸으며, 출구공기의 온도도 콘크리트 허용온도인 150 °F 보다 큰 300 °F 정도 되었다. 따라서 열손실을 줄이기 위하여 가능한 단열재 틈새를 줄이도록 보수를 하고, 단열재와 원자로 플랜지 혹은 계측용 배관 사이의 공간을 fiber glass 매트로 메꾸었으며, 그리고 내부공간의 대류현상을 막기 위하여 수평밀봉재를 설치하였다.

규모가 큰 기기에서의 실제 열손실이 설계 열손실보다 큰 주원인은 하부의 단열재 틈새로 들어오는 차가운 공기가 원자로 벽면을 따라 상승하면서 가열된 후 상부의 틈새를 통해 격납건물 대기로 빠져 나가는 현상, 즉 chimney effect 때문이다. 본연구에서는 원자로의 단열에 관련된 단열재 간격 및 두께 등의 설계변수를 최적화하며, chimney effect를 고려할 때의 열전달 특성을 파악하고자 한다.

2. 해석

2.1 지배방정식

원자로벽면과 단열재 사이 공간에서의 공기유동 및 열전달 현상과 단열재내부의 온도장을 해석하였다. 공기는 고온의 원자로 벽면에 의하여 가열되므로 온도변화에 따른 공기의 밀도변화의 따라 부력이 작용하게 되어 유동, 즉 자연대류가 발생한다. 해석영역은 대류영역과 전도열전달만 일어나는 고체영역을 함께 포함한다. 대류가 발달함에 따라 난류유동이 지배적이 되며, 난류계산에는 k-ε 난류모델을 사용하였다.

지배방정식은 연속방정식, 운동량보존방정식, 에너지보존방정식 및 난류방정식으로 구성되며, 축방향과 반경방향의 2차원 원통좌표계를 사용하였다. 운동량방정식에서 밀도변화에 의한 부력항을 온도에 관한 함수로 나타내는 Boussinesq 모델을 사용하였다.

2.2 해석 모델

실제 원자로의 형태는 반구형 상,하부 헤드와 원통부분의 세 부분으로 나뉜다. 원자로 정지봉의 제어기구들이 설치되는 상부 헤드는 열전달이 매우 활발히 일어나 독립된 공조계통을 사용한다. 하부 헤드와 원통부분은 동일한 단열재로 덮혀 있으나 하부헤드와 원통부분의 경계에서는 원자로와 단열재 사이 공간이 매우 작아 하부 헤드와 원통 부분 간의 대류는 거의 일어나지 않으므로 원통부분만 분리하여 해석하였다.

해석에 사용된 기하학적 모형은 그림 1과 같다. 원통의 바깥 직경(r_a)은 89.22 인치이며, 높이(L)는 157 인치이다. 공기 공간 간격(d_s)은 0.5, 1, 2, 3, 4, 6, 8 인치로 변화시켰으며 (case 1), 단열재 두께(d_i)는 1, 2, 3, 4.5, 6.0 인치 경우(case 2)에 대하여 분석하였다.

원자로 벽면의 온도조건은 모든 해석 경우에 대해 원자로 입구온도인 564.5 °F로 유지된다고 가정하였으며, 단열재 바깥면의 열전달계수는 1.0 Btu/hr-ft²-°F, 대기온도는 95 °F로 가정하였다.

'chimney effect'를 고려하기 위하여 공간간격 8인치, 단열재 두께 4.5인치 경우에 대하여 단열재 설치시 발생할 수 있는 틈새를 적용하였다. 단열재 상하부에 같은 크기의 틈새(t)를 가정하였으며 0.033인치와 0.066 인치 두 경우(case 3)에 대하여 해석하였다. 각 틈새에는 압력경계조건을 적용하였으며, 높이차에 따른 대기의 압력차를 고려하여 상부틈새에서의 압력을 하부틈새압력보다 0.0064psi 낮게 가정하였다.

격자수는 200(x방향)x50(r방향)와 200x100의 두 경우를 비교하여 충분히 수렴된 결과가 얻어졌음을 확인하였으며, case 1과 2에서는 200x50을, case 3에서는 200x100을 사용하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 원자로와 단열재 사이 공간의 간격 변화에 따른 열전달 특성 (Case 1)

Case 1에서는 원자로와 단열재 사이 공간의 간격 변화에 대한 열전달 특성을 고찰하였다. 원자로와 단열재 사이 공간에서의 유동속도를 그림 2에 나타내었다. 이 공간의 간격이 커짐에 따라 대류속도가 증가함을 알 수 있으며, 간격이 0.5 인치일 때 공기는 거의 정지해 있으며 그림 3에서와 같이 공기 온도가 선형적으로 변하는 전도열전달 현상을 보이므로 대류보다는 전도열전달이 지배적이다. 그림 3에서는 0.5인치 경우를 제외하고는 대류열전달이 발달함에 따라 $x=L/2$ 에서 반경방향으로의 단열재 내부의 온도분포는 거의 변화가 없음을 알 수 있다.

그러나 공간간격이 커짐에 따라, 즉 자연대류가 커짐에 따라 $x=0$ 와 $x=L$ 근처의 양단 부근에서의 대류 영향은 커진다. 간격이 0.5 인치인 경우는 전도가 지배적이므로 거의 전 영역에서 온도가 균일하나 간격이 증가할수록 대류의 영향이 커져서 8인치인 경우는 전 범위에서 x 방향으로 온도변화를 보이고 있다. 원자로 벽면을 따라서 올라가며 가열된 공기는 단열재 벽면을 따라 내려오며 냉각되므로 원자로 상부의 온도는 하부의 온도보다 높게 된다. 공간간격의 변화에 따른 단열재 안쪽 면 및 바깥면의 x 방향 온도 분포는 그림 4,5에 나타나 있다. 단열재 바깥면의 온도는 모든 경우에 140 °F 이하이다. 단열재 내부 공간의 자연대류에 의하여 원자로 벽면에서의 heat flux는 변하게 되며, 이는 그림 6과 같다. 대류가 지배적일 때는 x 방향을 따라 균일한 heat flux를 보이거나 간격이 커질수록 하부에서의 heat flux가 커짐을 알 수 있다. 자연대류에 의하여 원자로 상하부의 온도차 및 heat flux가 크게 차가 나는 것은 바람직하지 못하므로 이를 설계시 고려하여야 한다.

3.2 단열재 두께 변화에 따른 열전달 특성 (Case 2)

Case 2에서는 원자로와 단열재 사이 간격이 8인치인 경우 단열재 두께의 변화에 따른 열전달 특성을 고찰하였다. 단열재 두께가 얇을수록 열손실이 증가하며 내부의 자연대류도 증가하게 되어 벽면을 따라서 온도변화도 커지게 된다. 각 경우의 속도분포와 온도분포는 그림 7,8과 같다. 그림 9에 나타난 바와 같이 단열재 두께가 2 인치 이하에서는 단열재 바깥면의 온도가 140 °F를 초과하며, 3 인치 경우는 상부에서 140 °F를 초과하였다. 열손실은 두께 1인치인 경우가 4.5인치에 비하여 약 2.5배 크다.

3.3 Chimney effect를 고려한 열전달 특성 (Case 3)

Case 3에서는 chimney effect를 고려한 열전달 특성을 고찰하였다. 단열재 틈새를 통해 유입된 차가운 외부 공기는 열전달에 큰 영향을 주었다. 대류속도가 크게 증가 했으며 (그림 10), 단열재 내부 공간의 공기 온도도 외부 공기 유입이 없는 경우에 비해 약 150 °F 이상 낮아졌다(그림 11). 전반적으로 원자로 벽면에서의 heat flux는 증가하였으며, 특히 공기가 유입되는 하부 영역에서는 매우 크게 증가하였다(그림 12). 하부 영역에서 heat flux 분포가 굴곡을 나타내는 것은 유입공기에 의해 하부 모서리 부근에서 재순환영역이 발생했기 때문이다.

위에서 살펴본 각 경우에서의 전체 열손실크기는 표 1과 같다. Case 1에서는 공간간격의 증가에 따라 열손실은 간격 2 인치에서 최소치를 보인 후 증가하는 경향을 보였다. chimney effect에 의한 열손실의 증가는 틈새가 0.033 인치 (0.8mm)와 0.066 인치 (1.6mm) 경우 각각 약 4배 및 8배 정도이므로 그 영향은 매우 심각함을 알 수 있다. chimney effect에 의해 유입된 공기는 다시 격납 건물 대기로 빠져나가므로 이는 원자로 냉각재 계통의 효율을 떨어뜨릴 뿐만 아니라 격납건물의 공

조설비 용량에도 영향을 주게 된다. EPRI에서 밝힌 바와 같이 원자로 냉각재 계통의 열손실 시험 결과가 설계치에 비해 2-3배 큰 이유는 단열재 설계의 잘못보다는 단열재 설치상의 잘못으로 열손실이 증가되었을 것으로 사료된다. 따라서 단열재의 보관 및 설치시에 단열재가 손상을 입지 않도록 주의하여 다루어야 하며, 단열재의 틈새가 최소화 되도록 하여야 한다.

4. 결론

본 연구에서는 원자로에 사용되는 단열재의 설계를 최적화하고, 단열재의 부적절한 설치에 의해 발생하는 틈새의 영향을 분석하기 위하여 열전달 현상을 수치해석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

가. 열손실을 최소화하는 원자로 벽면과 단열재 사이의 공간 간격은 2 인치이다.

나. 단열재 바깥면의 온도를 140 °F 이하로 유지하기 위해서는 현 설계의 단열재 두께인 4.5 인치가 적절하다.

다. 단열재 설치시 틈새의 허용한도 내에서도 chimney effect에 의해 열손실이 4배이상 증가하므로 틈새를 최대한 줄여야 한다.

참고문헌

1. FLUENT user's guide
2. J. Mahlmeister, Evaluation of Heat Loss to Containment from the Reactor Coolant System. PVNGS, Sep. 1983
3. J. Mahlmeister, Evaluation of Heat Loss to Containment from the Reactor Coolant System. PVNGS, Study No. 13-MS-31, Rev.1 Oct, 1884
4. 영광3,4호기 원자로용기 단열재 설계시방서
5. Transco Products Inc., EW-5711-ATR1, Analytical Thermal Report for YGN3,4, 1991
6. EPRI, NP-2694, Control of Containment Air temperature, 1982

표 1 열손실 비교

Case 1 단열재와 원자로 사이 간격 변화에 따른 열손실 ($d_r=4.5$ in)

단열재 공간간격	0.5 in	1 in	2 in	3 in	4 in	6 in	8 in
열손실 ($\times 10^3$ Btu/hr)	3.79	3.56	3.55	3.65	3.73	3.78	3.86

Case 2 단열재 두께변화에 따른 열손실 ($d_a=8$ in)

단열재 두께	1 in	2 in	3 in	4.5 in	6 in
열손실 ($\times 10^3$ Btu/hr)	9.69	6.69	5.07	3.86	3.15

Case 3 단열재에 틈새가 있는 경우 열손실 ($d_r=4.5$ in, $d_a=8$ in)

단열재 틈새크기	0.033 in	0.066 in
열손실 ($\times 10^3$ Btu/hr)	15.71	31.98

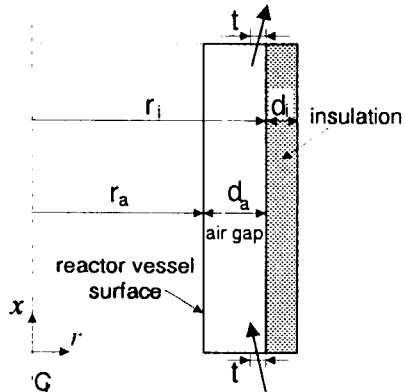


Fig. 1 Analysis Model

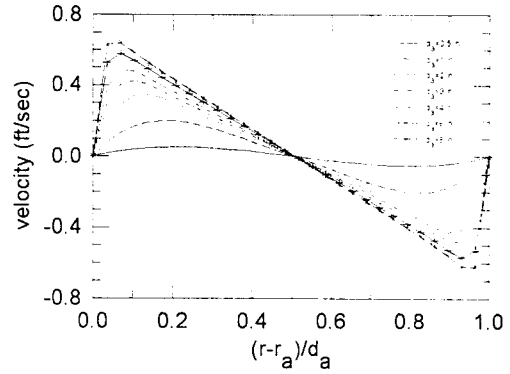


Fig. 2 Velocity Distribution at $x/L=0.5$ (case 1)

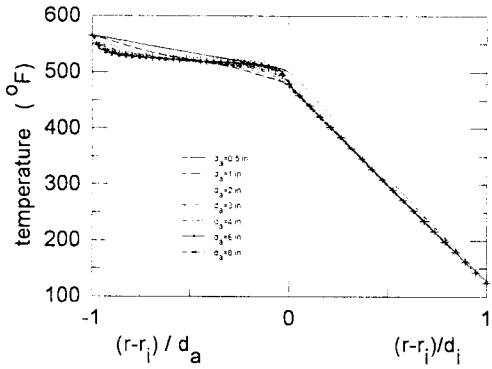


Fig. 3 Temperature Distribution (case 1)
 $x/L=0.5$

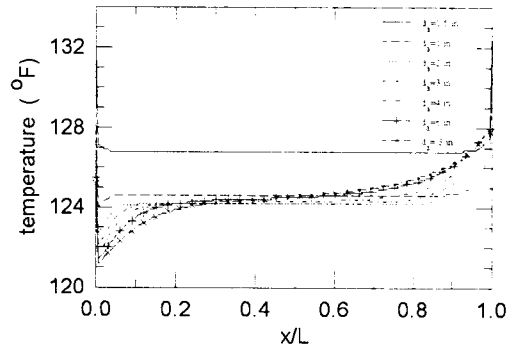


Fig. 4 Temperature of the insulation outer surface (case 1)

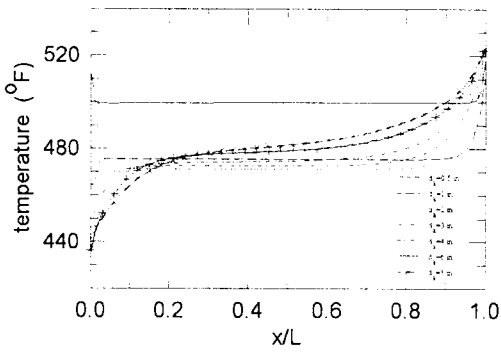


Fig. 5 Temperature of the insulation inner surface (case 1)

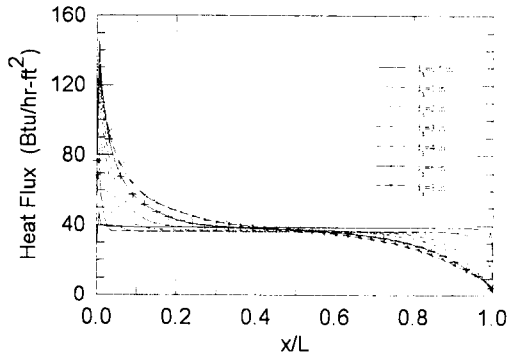


Fig. 6 Heat flux of the reactor surface (case 1)

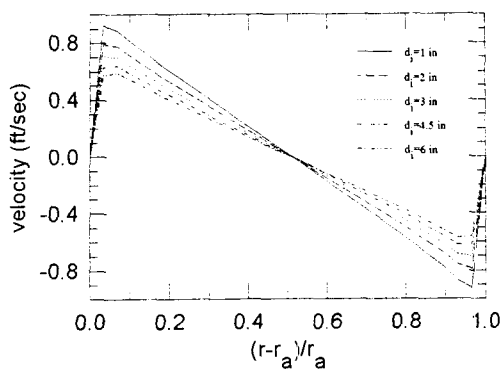


Fig. 7 Velocity Distribution at $x/L=0.5$ (case 2)

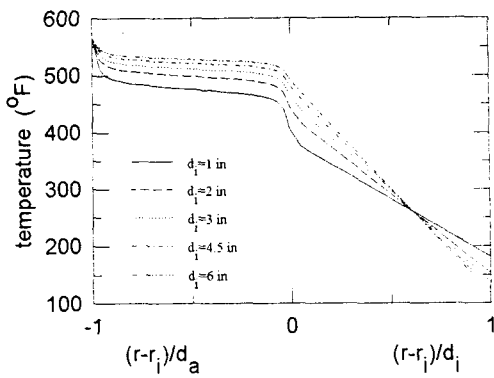


Fig. 8 Temperature Distribution at $x/L=0.5$ (case 2)

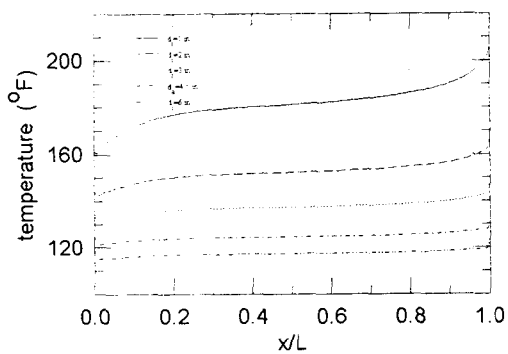


Fig. 9 Temperature of the insulation outer surface (case 2)

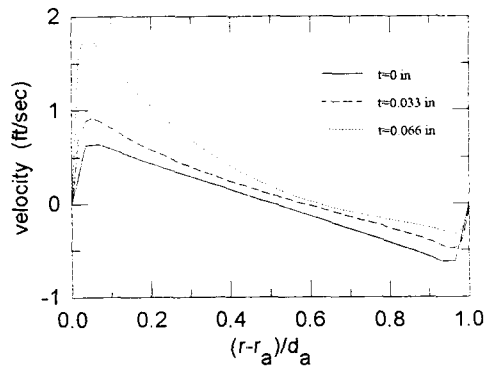


Fig. 10 Velocity Distribution at $x/L=0.5$ (case 3)

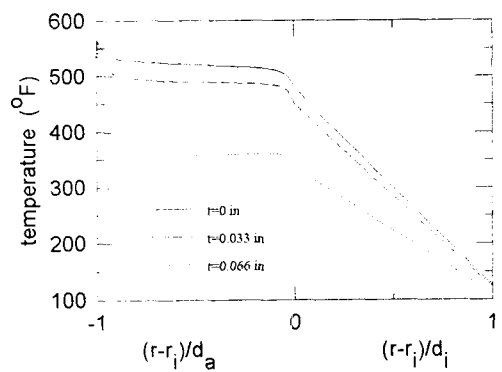


Fig. 11 Temperature Distribution at $x/L=0.5$ (case 3)

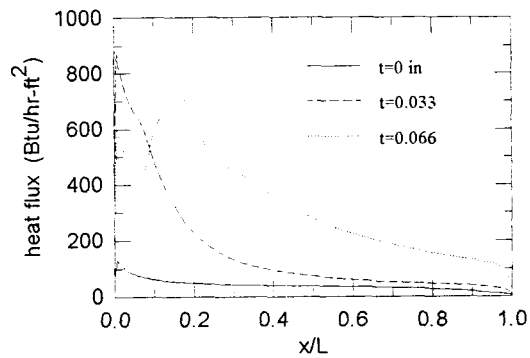


Fig. 12 Heat flux of the reactor surface (case 3)