

원자로 용기 외벽냉각시 용기와 단열재 사이의  
자연순환 유동에 관한 연구

A Study on the Natural Circulation Flow through an Annular Gap  
between the Reactor Vessel and the Insulation under External  
Vessel Cooling

하광순, 박래준, 조영로, 김상백, 김희동  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

APR1400 원전을 1/21.6로 축소한 실험장치를 이용하여 원자로용기와 단열재 사이의 자연순환 유동에 대해 고찰하였다. 원자로용기를 통해 가해지는 열속과 단열재의 상부에 위치한 순환유동 배출구의 위치 및 면적변화에 따른 자연순환 유량 측정 및 유동 특성을 관찰하였으며, 간단한 루프해석(simple loop analysis)을 수행하여 실험결과와 비교 분석하였다. 실험관찰 결과, 열속이 증가하고 배출구의 면적이 작을수록 유입구에서의 역류현상과 최소간극부분에서의 재순환 유동 현상이 심해졌다. 또한 배출구가 냉각수 수위보다 낮은 위치에 있는 경우에는 매우 불안정한 주기적 유동 특성이 나타났으며, 이를 방지하기 위해서는 추가의 기체 배출구를 설치하여야 함을 알 수 있었다. 자연순환 유동량은 배출구의 면적 증가보다 반구의 열속 증가, 냉각수의 아냉각도 감소에 더 민감하게 증가한다. 단순루프해석 결과는 많은 가정에도 불구하고, 실험결과와 평균 70% 범위의 오차를 가졌다.

Abstract

The behaviors of the boiling-induced two-phase natural circulation flow in the insulation gap were observed using an 1/21.6 scaled experimental facility to simulate the APR1400 reactor and insulation system. The liquid mass flow rates driven by natural circulation loop were measured by varying the wall heat flux, upper exit slot area and configuration. Simple loop analysis has also been performed and compared with the experimental data on the natural circulation flow rates. By the flow observation, the intensive back flow through the water inlet was generated periodically under the conditions of high heat flux and small area of the upper exit slot. Especially, when there was no steam vented slot on the upper part of water

level, the periodical processes of accumulated steam venting and fresh water incoming were observed. The natural circulation mass flow rate increased as the heat flux, coolant temperature, and outlet area increased. The heat flux and coolant temperature had a larger effect on the natural circulation flow than the outlet area. The simple loop analytical results had 70% average error bound compared with experimental ones.

## 1. 서 론

원전에서 중대사고 발생시 원자로용기가 파손 (reactor vessel failure)되기 전에 원자로용기 외벽을 냉각(external vessel cooling)함으로써 노심용융물을 원자로용기 내에 가두어 두어 (IVR: In-Vessel corium Retention) 원자로용기 건전성을 유지하여 격납건물 관련 중대사고 현상을 미연에 방지하는 방안이 세계적으로 고려되고 있다[1]. 이와 같은 중대사고 관리 방안은 핀란드의 Loviisa 원전과 미국의 AP600 원전에 반영이 되었고[2, 3, 4], 국내의 APR1400 원전에서도 이를 반영하고 있다[5]. 원자로용기 외벽냉각을 수행하였을 때 원자로용기가 건전하기 위해서는 원자로용기 하반구에 형성된 노심용융물로부터 원자로용기로 전달되는 열량이 원자로용기 외벽에서 충분히 제거되어야 한다. 따라서 노심용융물에서 원자로용기 외벽으로 전달되는 열량을 결정하기 위한 연구[6, 7]와 원자로용기 외벽에서 냉각수로의 열전달 최대값인 임계열유속(Critical Heat Flux: CHF)에 대하여 많은 연구가 수행되었다[8, 9].

원전의 정상운전 시 원자로용기 외벽에는 열손실을 최소화하기 위하여 단열재를 설치하고 있다. 기존 원전에서 중대사고 발생 시 원자로용기의 건전성을 유지하기 위하여 원자로용기 외벽냉각을 수행하면 원자로 공동(cavity)에 공급된 냉각수가 절연물질층을 통하여 원자로용기 외벽과 단열재 사이의 공간으로 충분히 공급되고 원자로용기 외벽에서 생성된 증기가 방출되어야 한다. 또한 원자로용기 외벽냉각을 고려하고 있는 원전에서도 원자로 공동에 냉각수를 공급하였을 때 단열재 하부에 설치되는 냉각수 유입구, 원자로용기 외벽과 절연물질 사이의 공간, 단열재 상부에 설치되는 증기 배출구를 통하여 냉각수가 충분히 순환되는 순환유동이 형성되어야 한다. 따라서 중대사고시 원자로용기 외벽냉각으로 원자로용기 건전성을 유지하는 방안을 채택한 APR1400 원전도 원자로 공동(cavity)에서 원자로용기 외벽과 단열재 사이의 공간으로 충분한 냉각수 순환유동이 형성되는지 평가하여야 한다. 이와 같이 APR1400 원전의 원자로용기 외벽냉각 시 냉각수 장기 열수력 거동을 평가하기 위한 연구를 한국원자력연구소에서 진행하고 있다[10]. 실제 APR1400 원전을 1/2로 축소하여 가해지는 열속 및 입출구에 따른 변화자연순환 유동량을 측정하는 실험을 계획하고 있다.

본 논문에서는 전술한 1/2 규모 대형실험을 수행하기에 앞서 실험의 전략과 기법을 확립하고자 진행하고 있는 소형실험에 관해 소개하고자 한다. 소형실험에서는 APR1400 원전을 1/21.6로 축소한 실험장치를 이용하여 원자로용기와 단열재 사이의 자연순환 유동에 대해 고찰하였다. 원자로용기를 통해 가해지는 열속과 단열재의 상부에 위치한 순환유동

배출구의 위치 및 면적변화에 따른 자연순환 유량 측정 및 유동 특성을 관찰하였으며, 간단한 루프해석(simple loop analysis)을 수행하여 실험결과와 비교 분석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

APR1400 원자로용기와 단열재의 기본적인 구조는 Fig.1과 같다. 현재 APR1400 원자로용기의 구조는 확정되었지만 단열재 설계는 완료되지 않은 상태이다. 따라서 Fig.1의 단열재 구조는 표준원전(KSNP)의 기본구조를 참조하여 구성한 것이다. 외벽냉각시 원자로 고온관의 중심선에서 0.91m 아래부분까지 냉각수를 채우도록 되어있다. 자연순환 유동의 원활한 형성을 위해서 단열재 상부와 하부에 각각 배출구와 유입구를 설치하도록 계획되어 있지만 아직 그 위치와 크기는 정해지지 않았다.

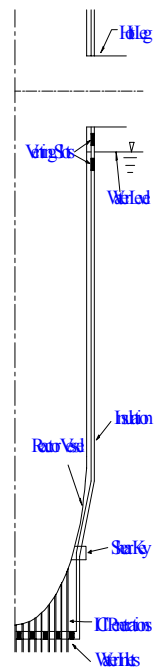


Fig.1 Reactor vessel/insulation system of APR1400

본 연구에서 구성한 실험장치는 Fig.2와 같다. 실제 APR1400 원전과 비교하여 원자로용기 직경, 높이 등은 1/21.6의 선형으로 축소하였으며, 원자로용기와 단열재 사이의 간극부

분은 Cheung [9]의 상사분석을 참고하여  $\sqrt{1/21.6}$ 로 축소하였다. 따라서 실험용기의 직경은 119mm, 원자로용기와 단열재 사이의 원통부 간극은 31mm로 하였다. 단열재 하부는 원뿔형의 구조이므로 원자로용기와 최소간극을 이루는 부분이 존재하게 된다. 이 최소간극부분은 자연순환 유동의 병목부분으로 매우 중요한 의미를 갖는다. 본 실험에서는 최소간극을 KSNP의 구조와 같이 원자로용기 중심 수직선을 기준으로 56.6도에 위치하도록 하였으며, 간극의 크기는 19mm로 하였다. 원자로용기 원통부분과 단열재 부분의 재질은 스테인리스 스틸로 제작하였으며, 투명 poly-carbonate를 단열재 원통부에 설치하여 유동을 가시화 할 수 있도록 하였다.

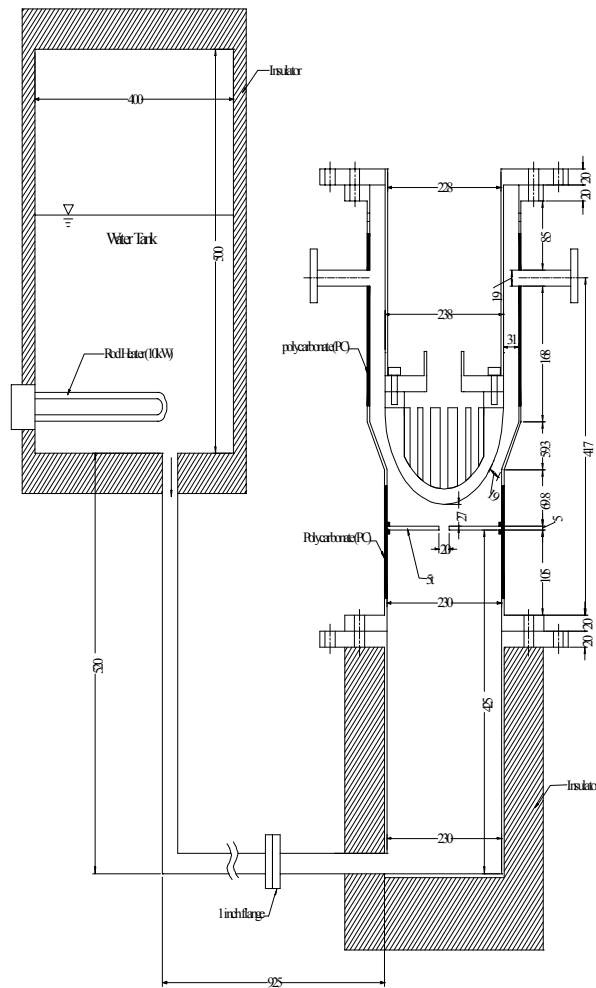


Fig.2 Experimental facility

원활한 자연순환 유동의 형성을 위해서 단열재 하부에 직경 20mm, 1개의 원형 유입구와, 단열재 상부에 내경 19mm의 원형 배출구를 90도 간격으로 4개 설치하였다.

실제 외벽냉각시에는 Fig.1과 같이 단열재 외부에 일정수위의 냉각수가 채워져 있지만, 가시화를 용이하게 하기 위해서 등가의 수두압력조건을 단열재 하부 유입구에 맞춰주는 방식을 채택하였다. 즉, 단열재 하부 유입구에서의 수두압력조건은 별도의 물탱크 수위를 통해 조절할 수 있도록 하였다.

실제 원전 하부에는 4개의 shear key와 61개의 ICI 관통부(penetrations)가 설치되어 있으나 본 실험장치에서는 이 부분을 모사하지 않았다.

원자로용기 하부에 전기히터를 장착한 가열반구를 설치하여 직접 열속을 가하였다. 즉, 전기 봉히터를 이용하여  $173\text{kW/m}^2$ 의 최대 평균 열속이 가해지도록 가열반구를 설계하여 실험장치의 원자로용기 하반구 부분에 장착하였다. 또한 히터반구의 내부에 총 33개의 K형 열전대를 방사선 형태로 설치하여 표면의 온도 변화를 감지할 수 있도록 하였다. 자세한 히터의 구성 및 열전대 위치는 기존의 급냉실험 장치[11]에서의 구성과 동일하다.

### 3. 단순 루프 해석 (simple loop analysis)

앞장에서 기술한 실험장치를 통해 얻어진 자연순환 유량을 해석적으로 평가하기 위해 단순루프해석(simple loop analysis)을 수행하였다. 즉, 질량, 운동량, 에너지 보존식을 유로에 따라 적분하여, 벽면의 열속, 입출구의 면적, 냉각수의 아냉각도에 따른 자연순환유량을 평가하고자 하였다. 이를 위해 정상상태(steady state)의 순환유동을 가정하고, 각 유로 단면에서 액상과 기상이 골고루 분포하며(homogeneous flow)동일 속도를 갖는다고 단순화하였다. 또한 액상에서의 온도에 따른 밀도변화를 고려하지 않았으며, 가열면에서 발생된 증기는 배출구를 빠져나갈 때 모두 응축된다고 가정하였다.

기본적인 질량보전식과 수직방향인  $z$  방향의 운동량보전식, 에너지 보전식은 식(1), (2), (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{m} = \rho_m u_m A_c = \text{const.} \quad (1)$$

$$\rho_m u_m \frac{\partial u_m}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho_m g - \Phi_{\text{loss}} \quad (2)$$

$$\frac{dh_m}{dz} = \frac{q'' \xi}{\rho_m u_m A_c} \quad (3)$$

여기서  $\dot{m}$ ,  $\rho_m$ ,  $u_m$ ,  $A_c$ ,  $p$ ,  $g$ ,  $\Phi_{\text{loss}}$ ,  $h_m$ ,  $q''$ ,  $\xi$  는 각각 자연순환 유량, 혼합유체 (mixture)의 밀도, 혼합유체의 속도, 유로 단면적, 압력, 중력가속도, 손실항(loss term), 혼합유체의 엔탈피(enthalpy), 가열면의 열속(heat flux), 가열면의 둘레(perimeter)를 나타

낸다.

편이 상 소형실험장치를 Fig.3과 같이 냉각수유입구로부터 배출구까지를 4개의 구역으로 나누어 식(2)의 운동량 보전식을 적분하였다. 각 위치에서의 높이에 따른 간극의 크기와 유로단면적( $A_c$ )은 Fig.4와 같다. 비록 2'에서 간극이 최소이기는 하지만 상부로 갈수록 원주둘레가 커지므로 유로 단면적이 최소가 되지는 않는다. 구간 2-2'에서의 냉각수의 유로는 점선에 표시한 바와 같이 반구의 하단부(2)와 최소간극부분(2')에서의 간극을 기초로 선형적으로 근사하여 제한하였다. 즉 재순환 영역에 대한 모델을 고려하지 않았다.

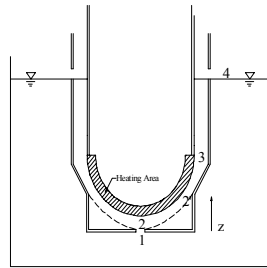
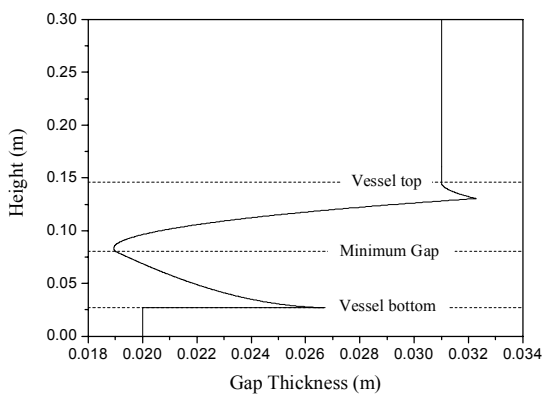
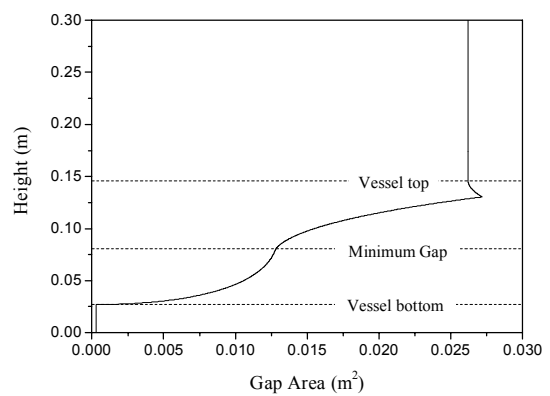


Fig.3 Definition of integration sectors for simple loop analysis (1 : inlet, 2 : vessel bottom, 2' : minimum gap region, 3 : vessel top, 4 : outlet)



(a) Gap thickness



(b) Gap area

Fig.4 Variations of gap thickness and area with respect to the height

위치에 따른 혼합유체의 밀도( $\rho_m$ )는 에너지 보전식을 적분하여 구할 수 있다. 즉 식(3)을 적분하여 각 위치별 엔탈피를 식(4)와 같이 구하고, 이를 이용하여 유체의 질(quality,  $\chi$ )를 계산한다[식(5)]. 유체의 기포율(void fraction,  $\alpha$ )을 식(6)의 정의에 의해 계산하면 혼합유체의 밀도( $\rho_m$ )를 알 수 있다[식(7)]. 식(5)에서  $h_f$ 는 액상의 포화엔탈피를,  $h_{fg}$ 는 액상과 기상의 엔탈피 변화를 각각 나타낸다.

$$\int_2 dh_m = h - h_2 = \int_2 \frac{\dot{q}'' \xi}{\rho_m u_m A_c} dz = \frac{1}{\dot{m}} \int_2 \dot{q}'' \xi dz \quad (4)$$

$$\chi \equiv \frac{h - h_f}{h_{fg}} = \frac{(h_2 - h_f) + \frac{1}{\dot{m}} \int_2 \dot{q}'' \xi dz}{h_{fg}} \quad (5)$$

$$\alpha \equiv \left( 1 + \frac{1 - \chi}{\chi} \frac{1}{s} \frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{-1} = \left( 1 + \frac{1 - \chi}{\chi} \frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{-1} \quad (6)$$

$$\rho_m \equiv (1 - \alpha) \rho_f + \alpha \rho_g \quad (7)$$

식(2)의 운동량 보전식의 각 항을 Fig.3의 1→2→3→4→1의 루프에 대하여 적분하면 결과적으로 식(13)을 얻을 수 있다.

$$\oint \rho_m u_m \frac{\partial u_m}{\partial z} dz = \int_1^4 \rho_m u_m dz = A \quad (8)$$

$$\oint - \frac{\partial p}{\partial z} dz = 0 \quad (9)$$

$$\oint \rho_m g dz = \rho_l g (z_b - z_4) + g \int_b^4 \rho_m dz = B \quad (10)$$

$$\oint \Phi_{loss} dz = \frac{\dot{m}^2}{2} \int_2^4 \frac{f}{D_h A_c^2 \rho_m} dL + \frac{\dot{m}^2}{2} \left( \frac{K_1}{\rho_f A_{inlet}^2} + \frac{K_2}{\rho_f A_{outlet}^2} \right) = C \quad (12)$$

$$A + B + C = 0 \quad (13)$$

여기서 4→1 구간은 단면적이 무한대인 수조(pool)를 가정하여  $u_m$ 을 0으로 하였다. 식(12)에서  $f$ 는 유로벽면의 마찰계수(friction coefficient)를  $K_1$ ,  $K_2$ 는 유입구 및 배출구에서의 형상저항계수(resistance coefficient)를 각각 나타낸다. 결과적으로 식(13)을 풀면 자연순환 유량( $\dot{m}$ )을 구할 수 있다.

식(13)을 풀기 위해서 유로벽면의 마찰계수는 smooth wall을 가정하여, 층류영역에서는 식(14)를, 난류영역에서는 Moody chart의 근사식인 식(15)를 각각 이용하였다.

$$f = \frac{64}{Re_{eff}}, \quad Re_{eff} = \frac{1}{\zeta} Re_{D_h}, \quad \zeta = \frac{(r_o - r_i)^2 (r_o^2 - r_i^2)}{r_o^4 - r_i^4 - (r_o^2 - r_i^2)^2 / \ln(r_o/r_i)} \quad (14)$$

$$f = 0.1791 Re_{D_{eff}}^{-0.1923}, \quad D_{eff} = 2(r_o - r_i) / \zeta \quad (15)$$

식(16)에 근거한 혼합유체의 점도(viscosity)와 수력학적 직경(hydraulic diameter,  $D_h$ )을 이용하여 Reynolds 수를 계산하였다.

$$\mu_m = \chi \mu_g + (1 - \chi) \mu_f \quad (16)$$

형상저항계수(resistance coefficient)는 유입구에서는 sharp entrance와 flow dividing 효과를 고려하고, 배출구에서는 side branch 및 sharp exit 효과를 고려하여  $K_1 = 2.65$ ,  $K_2 = 35.9$ 를 각각 사용하였다[12].

## 4. 결과 및 토의

### 4.1 단열재 배출구의 영향

단열재의 상부에는 원활한 자연순환 유동을 만들기 위해 배출구가 설치되어 있다. 단열재 상부의 자연순환 유동 배출구의 위치를 평가하기 위해 두가지 형태의 실험을 수행하여 비교하였다.

Fig.5는 배출구가 냉각수 수위의 위쪽에 설치되어있는 경우, 실험에서의 유동 형태를 도식화한 것이다. 배출구가 냉각수 수위보다 위쪽에 설치되어 있는 경우에는 비교적 안정적인 자연순환 유동을 나타내었다. 즉, 원자로용기 하반구의 가열표면으로부터 발생한 증기와 이로 인해 순환되는 냉각수가 모두 배출구를 통해 안정적으로 빠져나갔다. 가열표면의 열속과 배출구의 면적이 증가할수록 발생하는 자연순환양도 증가하였다. 가열표면의 열속이 크고, 배출구의 면적이 작을 경우에는 Fig.5에서 보는 바와 같이 단열재 하부의 유입구(water inlet)를 통해 오히려 원자로용기와 단열재 사이의 물이 빠져나가는 역류(back flow)현상과 최소간극 아래쪽의 재순환유동(recirculation flow)이 관측되었다. 이는 하부에서 발생한 많은 증기가 최소간극부분을 통해 완전히 빠져나가지 못하여 발생하는 것으로 해석된다. 따라서 최소간극의 크기 및 위치가 전체 이상유동장에 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

Fig.6는 단열재 상부의 자연순환 유동 배출구가 냉각수 수위의 아래쪽에 설치되어 있는



경우, 실험에서의 유동 형태를 나타낸 것이다. 이 경우 유동은 매우 불안정한 형태를 보였다. Fig.6(b)에서 보는 바와 같이 가열→비등→증기축적→증기방출→냉각수 유입과 같은 일련의 과정이 수십초의 주기로 반복되어 나타났다. 즉, 차가운 냉각수의 유입으로 가열반구의 표면이 순간적으로 비등점 이하로 냉각된다. 그 후 서서히 가열표면의 온도가 상승하여 비등이 시작되면, 발생한 증기가 배출구를 통하여 배출되지 않고 배출구 상부에 축적되게 된다. 축적된 증기의 압력이 하부의 물의 압력보다 크게되면 순간적으로 배출구를 통해 빠져나간다. 이때 단열재 하부의 유입구에서도 강력한 역류가 관찰되었다. 유입구 중심에서 수직방향으로 50mm 아래쪽에는 유입되는 냉각수의 온도를 측정하기 위해 열전대가 설치되어 있다. Fig.6(b)에서 보는 바와 같이 증기배출시 발생하는 역류로 인해 단열재 유입구의 아래쪽 냉각수의 온도가 순간적으로 상승하는 것을 볼 수 있다. 순간적인 증기배출이 끝나면 수두압력차로 인해 냉각수가 유입구를 통해 밀려들어온다. 이때 가열반구 표면의 온도가 비등온도 이하로 급격히 하강한다. 이와 같은 가열→비등→증기축적→증기방출→냉각수 유입의 주기는 가열반구로 가해지는 열속이 증가할수록 감소하였다. 이것은 열속이 증가할수록 증기의 시간당 발생량이 많아지고 따라서 상부의 증기축적 시간이 짧아지기 때문이다.

앞서 기술한 바와 같은 불안정한 유동의 형태는 증기배출구가 따로 마련되지 않았기 때문이다. 즉, 배출구가 냉각수의 수위보다 낮은 위치에 있을 경우에는 발생한 증기가 안정적으로 빠져나지 못하므로 별도의 증기배출구를 냉각수 수위 위쪽에 충분한 크기로 설치하여야 한다.

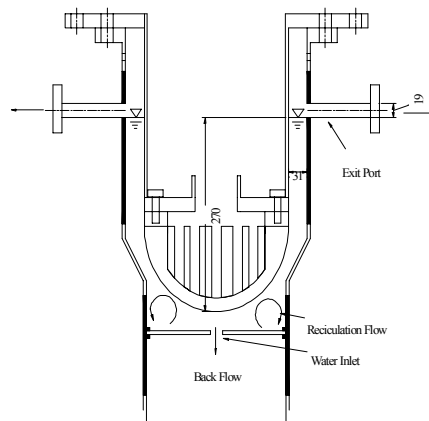
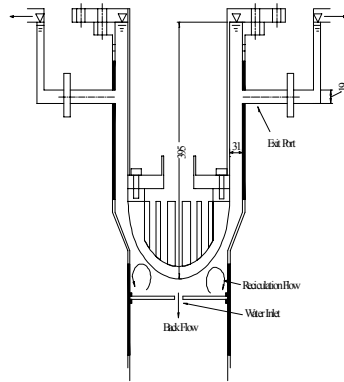
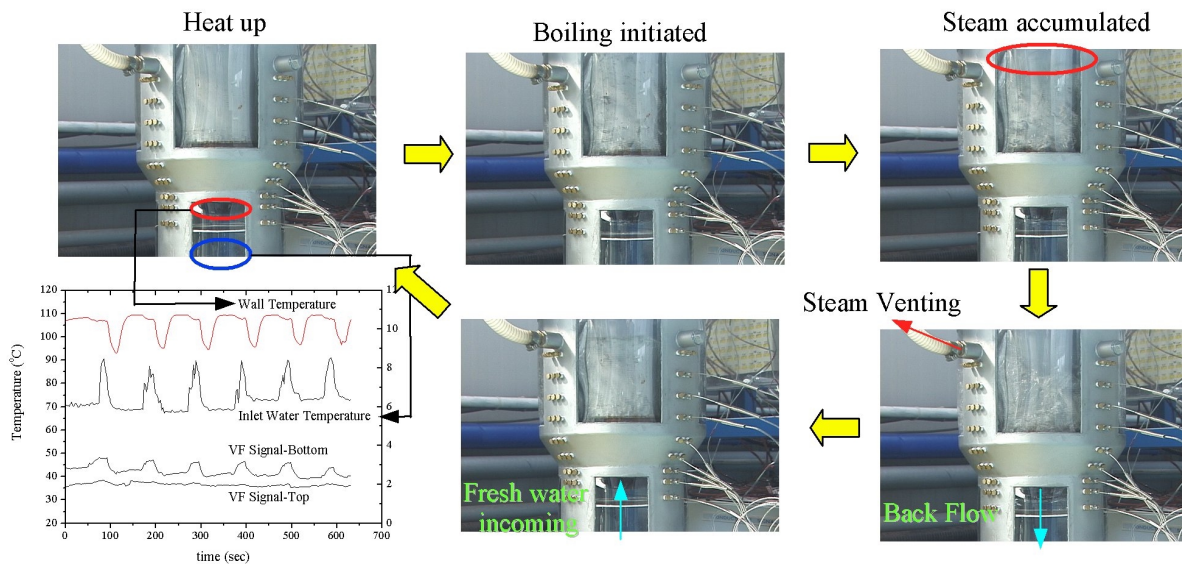


Fig.5 Flow characteristics of heating experiments (higher exit port case)



(a) Experimental condition



(b) Temporal variation of flow characteristics (heat flux:  $95\text{kW/m}^2$ )

Fig.6 Flow characteristics of heating experiments (lower exit port case)

#### 4.2 실험결과와 해석결과의 자연순환 유량 비교

Table 1은 단열재 상부의 배출구가 수위보다 높은 위치에 있는 경우, 실험에 의해 측정된 자연순환 유량을 단순루프해석결과와 비교한 것이다.

두 경우 모두 열속과 배출구 면적이 증가할수록 자연순환 유량이 증가하는 것을 알 수 있다. 단순루프해석에 의한 자연순환 유동량은 실험값에 비해 평균 약 70%정도 큰 값을

나타내었다. 전체적으로 자연순환 유량은 배출구의 면적 증가보다 반구의 열속 증가, 냉각수의 아냉각도 감소에 더 민감하게 증가하고 있다.

한편, 배출구의 면적 증가에 대한 자연순환 유량의 증가 경향에 있어서는 실험에서 보다 계산값에서의 증가율이 작게 나타난다. 즉, 배출구의 면적 변화에 따른 단순루프해석에 의한 자연순환 유량의 변화는 매우 둔감하다. 이는 실제 실험에서 배출구 면적이 두 배 증가한다는 것은 180도를 사이에 두고 각기 다른 두 개의 배출구를 열었다는 것을 의미하지만, 해석에서는 이러한 효과를 제대로 반영하지 못하고, 단순히 면적이 증가하는 것으로만 평가하였기 때문이다. 이를 보다 정확히 모사하기 위해서는 배출구의 면적 변화가 있을 경우 그에 상응하는 형상저항계수를 변화시키는 일이 필요하다.

단순루프해석을 통하여 냉각수의 아냉각도에 따른 자연순환 유량을 평가할 수 있다. 즉, 냉각수의 온도가 높아지면 자연순환 유량이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 냉각수의 온도가 높을수록 증기의 발생이 촉진되어 단열재 내부의 기포율이 증가하기 때문이다.

Table 1. Comparison of natural circulation flow rates obtained by analytical and experimental methods (inlet area =  $3.14 \times 10^{-4} \text{m}^2$ )

Heat Flux (kW/m <sup>2</sup> )	Outlet Area ( $\times 2.835\text{E}-4 \text{m}^2$ )	Coolant Temp.(°C)	Flow Rate (Experiment) (kg/s)	Loop Analysis	
				Flow Rate(kg/s)	Error(%)
95	1	20	0.0119	0.02533	113
	1	100	-	0.1020	-
	2	20	0.0207	0.02534	22.4
	1/2		-	0.02527	-
56	1	20	0.0086	0.01494	73.7
		100	-	0.1010	-
	2	20	0.0088	0.01494	69.8

Fig.7은 열속  $95 \text{kW/m}^2$ , 유입구면적  $3.14 \times 10^{-4} \text{m}^2$ , 배출구면적  $2.835 \times 10^{-4} \text{m}^2$  일 때, 단순루프해석을 통해 얻어진 냉각수 온도에 따른 유체의 속도와 질(quality)을 나타낸 것이다. 냉각수의 아냉각도가 큰 경우(냉각수 온도  $20^\circ\text{C}$ )에는 비등이 시작되는 지점이 반구의 상단 끝에서 시작되고 있다. 따라서 반구의 거의 모든 부분에서 기포율은 0이며, 따라서 순환유동의 속도는 점점 감소한다. 이것은 Fig.4(b)에서 보는 바와 같이 유동의 단면적이 높이가 증가함에 따라 꾸준히 증가하기 때문이다. 단순루프해석 시 액상의 온도에 따른 밀도 변화를 고려하지 않았기 때문에 액상에서의 유체 속도는 단순히 면적 변화에 의해 기인한다. 반면에 냉각수가 포화온도일 때(냉각수 온도  $100^\circ\text{C}$ )에는 반구의 하부에서 시작된 비등에 따른 급격한 밀도 증가로 인해 유체의 속도는 매우 크게 증가한다. 이 경우

유체의 속도는 최소간극 위쪽에서 감소하기 시작하는데 이것은 비등에 의한 밀도의 증가율보다 유도 단면적의 증가율이 더 크기 때문이며, 유로 단면적이 극대점을 나타내는 위치에서 유체의 속도는 극소점을 갖게 된다.

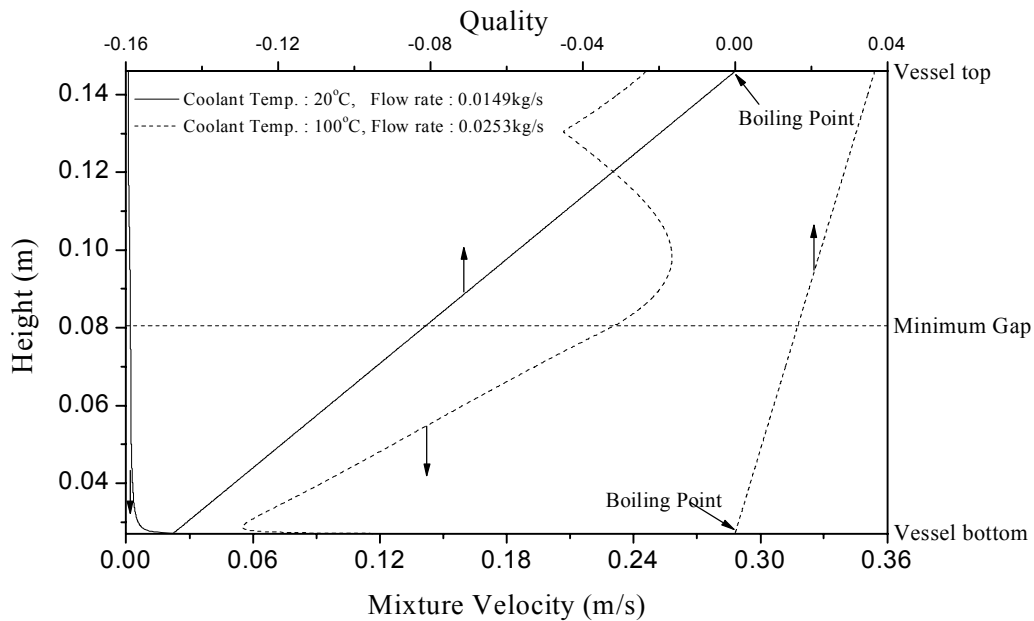


Fig.7 Mixture velocity and quality distributions with respect to the height (heat flux  $95\text{kW/m}^2$ , inlet area :  $3.14 \times 10^{-4}\text{m}^2$ , outlet area :  $2.835 \times 10^{-4}\text{m}^2$ )

## 5. 결론

본 논문에서는 원자로용기 외벽냉각시 원자로 공동에서의 장기 열수력 거동에 대한 연구의 일환으로서 APR 1400 원전을 1/21.6로 축소된 소형실험장치를 이용하여 원자로용기와 단열재 사이의 자연순환 유동에 대해 고찰하였다. 원자로용기를 통해 가해지는 열속과 단열재의 상부에 위치한 순환유동 배출구의 위치 및 면적변화에 따른 자연순환 유량 측정 및 유동 특성을 관찰하였으며, 단순루프해석을 수행하여 실험결과와 비교 분석하였다.

실험관찰 결과, 열속이 증가하고 배출구의 면적이 작을수록 유입구에서의 역류현상과 최소간극부분에서의 재순환 유동 현상이 심해졌다. 또한 배출구가 냉각수 수위보다 낮은 위치에 있는 경우에는 매우 불안정한 주기적 유동 특성이 나타났으며, 이를 방지하기 위해서는 추가의 기체 배출구를 설치하여야 함을 알 수 있었다.

자연순환 유동양은 배출구의 면적 증가보다 반구의 열속 증가, 냉각수의 아냉각도 감소에 더 민감하게 증가한다. 단순루프해석 결과는 많은 가정에도 불구하고, 실험결과와 평균 70% 범위의 오차를 가졌다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 중장기 사업의 일환으로 수행하였습니다.

## 참고문헌

- (1) T. G. Theofanous et al., 1995, In-Vessel Coolability and Retention of a Core Melt, DOE/ID-10460.
- (2) T. G. Theofanous R. R. 1997, Nourgaliev, Turbulence Modeling for Large Volumetrically Heated Liquid Pools, Nuclear Engineering & Design, Vol.169, p.131-150.
- (3) T. N. Dinh, R. R. Nourgaliev, and B. R. Sehgal, 1997, On Heat Transfer Characteristics of Real and Simulant Melt Pool Experiments, Nuclear Engineering & Design, Vol.169, p.151-164.
- (4) O. kymalainean et al., 1997, In-Vessel Retention of Corium at the Loviisa Plant, Nuclear Engineering & Design, Vol.169, p.109-130.
- (5) 한국전력공사 전력연구원, 1998, 차세대원전 중대사고 관리를 위한 In-Vessel Retention 워크샵, 한국전력공사 전력연구원 발간.
- (6) T. N. Dinh and R. R. Nourgaliev, 1997, Turbulence Modeling for Large Volumetrically Heated Liquid Pools, Nuclear Engineering & Design, Vol.169, p.131-150.
- (7) T. N. Dinh, R. R. Nourgaliev, and B. R. Sehgal, 1997, On Heat Transfer Characteristics of Real and Simulant Melt Pool Experiments, Nuclear Engineering & Design, Vol.169, p.151-164.
- (8) S. H. Yang et al., 1994, An Experimental Study of Pool-Boiling CHF on Downward Facing Plates, J. of KNS, Vol.26, No.4, p.493-501.
- (9) F. B. Cheung and Y. C. Liu, 1999, CHF Experiments to Support In-Vessel Retention Feasibility Study for an Evolutionary ALWR Design, EPRI WO# 5491-01, PSU/MNE- 99-2633.
- (10) R. J. Park, K. S. Ha, S. B. Kim, and H. D. Kim, 2002, Analysis of Coolant Flow in the Reactor Cavity under External Vessel Cooling, 2002 Fall Meeting Proc. of the Korean Nuclear Society.
- (11) 하광순, 박래준, 김상백, 2002, 벽면의 가열조건에 따른 반구형 소형 간극 내에서의

냉각과정에 관한 실험적 연구, 대한기계학회 2002년도 춘계학술대회 논문집, p.1375-1381.  
(12) I. E. Idelchik, 1986, Handbook of Hydraulic Resistance, 2nd Ed., Hemisphere Publishing Corporation.