'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

대형 환상관의 좁은 간극에서 역류유동 제한현상 연구

A Study on the CCFL in the Narrow Gaps of Annular with Large Diameter

이승진 · 박래준 · 김상백 · 김희동
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

정지환
천안외국어대학 환경관리과
충청남도 천안시 안서동

요 약

반구형 간극에서의 비등열전달 가시화 실험(VISU-II)을 통하여 간극에서의 임계출력에 역류유동 제한 현상(Counter Current Flow Limitation: CCFL)이 큰 영향을 미친다는 것이 확인되었다. 본 CCFL 실험의 수행 목적은 CCFL이 반구형 간극 발열부 표면에서 전역건조를 일으키는 기구라는 사실을 증명하고 간극 크기에 따른 CCFL 현상을 규명하는 것이다. 환형의 좁은 간극에서(1, 2 mm) 일어나는 이상유동 현상을 관측하기 위하여 실험부를 가시화하였고 이를 통해 실험부 상단에 공급된 증류수가 축적됨과 동시에 간극 상·하부 차압이 급격하게 증가하는 현상이 나타나면 CCFL 발생한 것으로 정의하였다. 실험 측정결과는 Wallis 인자 형태의 CCFL 상관식으로 제시하였다. 제시한 CCFL 상관식은 1 mm 간극에서의 기울기가 2 mm 간극 보다 약간 크게 나타났다. CCFL 상관식을 근거로 하여 임계출력 상관식을 도출하고 간극에서의 임계출력 실험(CHFG) 결과와 비교.분석하였다. 분석 결과 2 mm 간극의 경우에는 도출한 임계출력 상관식이 간극에서의 임계출력 실험 결과를 잘 예측하였지만 1mm 간극의 경우 다소 차이를 보였다.

Abstract

A CCFL(Counter Current Flow Limitation) test has been performed in narrow annuli gaps with large diameter, because it has been confirmed that the CCFL phenomena affected the critical power from the visualization(VISU-II) experiments on boiling heat transfer in the hemispherical narrow gaps. The objective of this test is to confirm the findings of the VISU-II experiment that global dryout in hemispherical narrow gaps(1, 2 mm) was induced by the CCFL. The test section was made of acrylic resin to allow visual observation on the two-phase flow behaviors inside annular gaps. It was observed from visualization that a part of water supplied was accumulated in the upper plenum and a significant increase in the differential pressure across the gap was occurred, which was the definition of the CCFL occurrence. The occurrence of CCFL was corrected with the Wallis parameter. From the CCFL correlations, it could be known that the incline in 1 mm gap was a little greater than that of in 2 mm gap. The CHF correlations were derived from the CCFL correlations for verification and analysis of the CHFG(Critical Heat Flux in Gap) test results on the critical power. The CHF correlation in 2 mm gap showed excellent agreement with the CHFG test results, but that in 1 mm gap showed a little difference with the CHFG test results on the critical power.

1. 서 론

기체와 액체가 서로 반대 방향으로 유동하는 형태는 유체를 이용하는 화학 공장이나 원자력 발전소의 사고조건 등에서 자주 발생할 수 있다. 기체의 유량이 적을 때에는 위로 흐르는 기체의 유량은 아래로 흐르는 액체의 유량에 거의 영향을 주지 못하지만 기체 유량이 충분히 커지면 유연한 역류 유동형태는 깨지면서 액체와 공기가 접하는 부분에서 유동형태가 매우 복잡해지고 아래로 흐르는 액체의 유량이 급격하게 감소하게 된다. 이러한 현상을 플러딩(flooding) 또는 역류유동 제한현상(CCFL: Counter Current Flow Limit)이라 한다. 이와 같은 CCFL 현상은 이상 유동의 기본 현상 중의 하나로서 많은 연구가 진행되고 있다.

1979년 TMI-2 원전의 중대사고에서 노심용융물이 원자로용기 하반구에 재배치되었지만 원자로 용기의 건전성은 유지되었다. 이는 기존의 사고해석에 예견하지 못했던 새로운 냉각기구가 존재함을 의미하는 것이다. 노심용융물이 충분히 냉각되도록 작용을 한 냉각기구로 여러 가지 유형이 있지만 Rempe 등[1]은 고화된 노심용융물과 원자로용기 사이에 형성된 간극을 통한 냉각효과가 이들 중 가장 크게 기여했을 것이라고 평가하였다.

한국원자력연구소에서는 반구형 간극에서 수력학적 현상을 관찰하는 VISU-II 실험[2]과 임계출력을 정량화하는 SONATA-Ⅳ/CHFG (Critical Heat Flux in Gap) 실험[3, 4]을 수행하였고, 이를 통하여 반구형 간극에서의 임계출력에 CCFL이 큰 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 따라서 본 실험 연구의 목적은 CHFG 실험장치와 같은 간극 크기(1,2 mm)에서 CCFL 상관식을 실험을 통하여 개발함으로써 반구형 간극에서의 임계출력 상관식의 형태를 검증하고 대형 환상관에서 간극의 크기가 CCFL에 미치는 영향을 정량화하며, CCFL이 반구형 히터 표면에 전역건조를 일으키는 기구라는 사실을 증명하는 것이다.

대형 환상관의 간극(1, 2 mm)에서 일어나는 수력학적 현상을 이해하기 위해 가시화를 하였고 가시화를 통해 실험부 상단에 증류수가 쌓이거나 간극의 상·하부의 급격한 차압 증가가 일어나는가를 관찰하면서 실험을 수행하였다. 실험시 주요 측정변수는 공기와 물의 유량, 주입 공기관 압력, 간극 상·하부 차압, 물 및 공기 온도, 계통압력 등으로 이러한 변수는 HP-VXI 데이터 획득장치를 통하여 얻었다. 실험에서 얻은 데이터는 무차원수로 표현하여 실험식의 형태를 제시하였다.

2. CCFL 연구 내용

좁은 간극에서 역류유동 제한현상에 대해 수행된 기존의 연구를 살펴보면 Mayinger[5] 등에 의한 비상 노심 냉각수의 bypass, Lee[6] 등에 의한 원자로 압력용기 직접주입 성능평가, Cheng[7], Mishima 와 Nishihara[8] 및 Sudo와 Kaminaga[9] 등에 의한 연구용 원자로의 직각

연료 성능평가 등이 수행되었다. Koizumi[10] 등은 본 실험과 유사한 목적을 가지고 환형 간극에서 역류유동 제한현상 실험을 수행하였지만 직경이 10 cm 이하의 작은 유로에서 수행하였다. 이러한 조건에서는 수력학적 현상이 원주방향의 전체 유로에서 나타날 수 있지만 직경이 커지면 위치에 따라 수력학적 현상이 다르게 나타날 수 있다. 따라서 본 실험에서는 곡률 반경이 큰 환상관의 간극에서 일어나는 현상을 이해하기 위해 가시화를 통해 간극에서의 수력학적 현상을 육안으로 관찰하도록 하였다. 역류유동 제한현상은 매우 복잡한 특성을 가지고 있어서 해석 모델을 개발하기 위해서는 여러 가지 가정들을 사용해야하기 때문에 해석상 많은 어려움이 있다. 이러한 어려움을 피하기 위해 많은 실험식이 개발되었고 가장 널리 사용되는 실험식의 형태는 Wallis 인자와 Kutateladze 수이다. 본 연구에서는 다음 식과 같이 나타나는 Wallis 인자를 사용하여 실험결과를 정리하였다.

$$j_g^{*1/2} + m_w j_l^{*1/2} = C_w \tag{1}$$

여기서, $j_k^* = j_k \sqrt{\dfrac{\rho_k}{g D_w (\rho_l - \rho_g)}}$

위 식에서 ρ, g, D_w 는 각각 밀도, 중력 가속도, 특성 길이다, 본 연구에서는 내부 실린더의 원주길이를 특성 길이로 선택하여 해석하였다.

한국원자력연구소에서 수행하였던 VISU-II 실험결과[2]에 의하면 반구형의 좁은 간극에서 생성된 증기는 간극 상단에서 간극으로 들어오는 물과 역류유동현상을 보이고 이곳에서 CCFL이 발생하였다. 이로 인하여 간극으로 공급되는 물이 제한되어 가열된 반구 표면을 충분히 냉각시키지 못하기 때문에 CHF가 발생한다. 따라서 CHF 상관식의 기본 형태는 CCFL 상관식으로부터 유도된다. 본 연구에서는 임계출력에 대한 CHFG 실험결과를 검증하기 위하여 Wallis 인자를 이용하여 식 (1)과 같은 CCFL 상관식을 유도하였고 식 (1)을 이용하여 다음과 같은 형태의 CHF 상관식을 유도하였다. .

$$\frac{q''_{CHF}}{\rho_g h_{fg}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_g}{g D_w (\rho_l - \rho_g)}} = \frac{S}{D_{CHF}} \cdot \frac{2 c_w^2}{(1 + m_w \sqrt[4]{\rho_g / \rho_l})^2} \tag{2}$$

위의 식에서 S, D_{CHF}, h_{fg}, q''_{CHF}, 는 각각 유로의 간극 크기, 가열되는 반구의 직경, 기화 엔탈피, 임계 열속을 각각 나타내고 m_w 와 C_w 값은 CCFL 실험을 통하여 구한 상수이다.

3. 실험 장치

1 mm 간극에서 수행한 CCFL 실험결과를 '99 춘계 원자력학술대회[11]에 발표한 바 있다. CCFL 실험은 공기 및 증류수의 입·출구 조건에 따라 많은 영향을 받는데, 기 발표한 CCFL 실험에서는 주입되는 공기의 흐름을 일정하게 유지하기가 어려웠고, 또한 실험장치의 하부 공동으로 흘러내린 증류수 수위를 일정하게 유지할 수 없었다. 본 실험에서는 공기 완충 탱크 대신 Regulator를 사용하여 공기 흐름을 부드럽게 하였고 교류 펌프 대신 직류 모터 펌프를 사용하여 실험장치 하부 공동의 수위를 일정하게 유지함으로서 불확실성을 제거하였다. 본 CCFL 실험에 사용된 유체는 물과 증기이고 대기압에서 실험을 수행하였다. 그림 1은 CCFL 실험 장치도를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 실험장치는 Regulator, 주입수 탱크, 두 개의 직류 모터 펌프, 파이프와 밸브 및 계측기들로 구성하였다. 저장수 탱크에 담긴 증류수는 직류 모터(motor)에 연결된 펌프에 의해 공급되고 물 유량계에 의해 측정된 증류수는 아크릴 내부에 연결된 파이프에 의해 실험부 상단에 공급이 되며 실험부의 간극을 통해 하부 공동으로 흘러내린 증류수는 직류 모터 펌프를 통하여 다시 저장수 탱크로 보내진다. 두 개의 직류 모터 펌프 사용으로 하부 공동에 축적되는 증류수 수위를 일정하게 유지하였고 수위 변화에 따른 불확실성을 제거하였다.

Regulator를 통해 공급된 공기는 공기 유량계에 의해 계측이 된 후 실험장치 내부로 주입된다. 실험장치 내부로 주입된 공기는 유동이 균일하지 않기 때문에 하부 공동에 다공판을 설치하였고 다공판을 통과한 공기는 상부의 실험부를 지나 대기로 방출된다. 실험의 주요 측정 변수는 간극 상·하부의 차압, 계통 압력, 주입 공기관 압력, 공기 및 물 온도, 공기 및 물 유량이며, 이러한 측정치들은 HP-VXI 데이터 획득장치를 통하여 얻었다.

좁은 간극에서 일어나는 수력학적 현상을 육안으로 관찰하면서 이해하기 위해 실험부를 아크릴로 제작하였고 외부 파이프와 내부 실린더의 내경과 외경은 각각 500 mm와 250 mm 이다. 외경이 다른 내부 실린더를 제작하여 실험을 수행하였고 실험장치의 크기는 CHFG 실험장치와 동일한 크기로 하였는데 이는 실험 데이터를 기존의 실험식과 관계지을 때 스케일링 문제가 명확하지 않기 때문이다. CNC 선반에 의해 제작된 내부 실린더는 곡률 반경이 비교적 정확하였지만 직경이 500 mm 인 외부 실린더의 경우 0.1%(0.6mm) 정도의 기계적인 공차를 가지고 있었고 이로 인해 1 mm 간극의 경우 불확실성은 30% 였고 2 mm 간극에서는 이러한 불확실성은 15% 였다.

4. 실험 방법 및 절차

본 실험에서는 간극에서 차압이 급격하게 증가하거나 실험부 상단에 공급된 증류수가 축적될 때를 CCFL 이 일어난 것으로 정의하였으며, 이러한 정의는 다른 많은 연구에서 널리 사용되는 정의이다. 안전해석 관점에서 볼 때 이러한 상황은 문제를 일으키지 않을 것으로 판단

된다. 즉, 부분적으로 CCFL 이 발생하였다 하더라도 실험부 상단에 공급된 물은 간극을 통과하여 실험부 하단으로 모두 내려오기 때문이다. CCFL 실험 수행을 위해 먼저 외부 파이프와 내부 실린더를 장착함으로써 간극의 크기를 고정시키고 실험부 상단에 공급 할 증류수 유량을 정한다. 이 상태에서 공기 유량을 최소 3 30분 정도의 간격을 두고 계단식으로 증가를 시키면서 간극에서의 수력학적 현상을 육안으로 관찰함과 동시에 실험부 상·하단에 설치된 차압계 신호를 통하여 CCFL 이 일어났는지를 판단한다. 실험부 상단에 주입된 증류수가 쌓이거나 간극 상·하부에서 차압의 급격한 증가가 일어나면 CCFL 이 발생한 것으로 간주하고 실험을 종료한다. 상세한 실험 수행절차는 다음과 같다.

(1) 외부 파이프와 내부 실린더를 장착하여 간극의 크기를 고정한다.
(2) 실험부 상단에 공급할 증류수의 양을 정해진 값으로 유지한다.
(3) 공기 유량을 0 에서부터 시작하여 3 30분 간격을 두고 계단식으로 증가시킨다.
(4) 공기 유량을 증가시킨 후 간극에서의 수력학적 현상과 실험부 상단에 증류수가 축적되는지를 육안으로 관찰함과 동시에 HP-VXI 데이터 획득장치를 통해 간극 상·하부의 차압 변화를 관찰한다.
(5) 실험부 상단에 증류수가 축적되지 않으면 공기 유량을 증가시키고 (3)와 (4)의 과정을 반복하여 수행한다.
(6) 간극에서 차압이 급격하게 증가하거나 공급된 증류수가 실험부 상단에 쌓이면 CCFL 실험을 종료하고 데이터를 저장한다.
(7) 증류수 유량을 증가시키고 (2)에서 (6)의 과정을 반복 수행한다.

5. 실험 결과 및 고찰

표 1은 환형 간극의 크기가 1, 2 mm인 경우 실험에서 온도와 압력 및 유량 범위를 보여주고 있다. 그림 5는 실험부 상단에 증류수를 주입한 후 공기를 전혀 흘려 보내지 않은 상태의 그림을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 좁은 간극에서 표면장력의 영향으로 간극사이에 물막과 함께 기포가 존재하는 것을 볼 수 있다. 따라서 1 mm의 좁은 간극 실험에서는 표면장력 효과가 크게 나타났다. 그림 6, 7, 8은 공기 유량을 CCFL 이 발생하기 바로 전 단계까지 증가시킨 후 시간경과에 따라 순차적으로 사진 촬영한 것이다. 그림 6, 7, 8을 순차적으로 보면 미소하지만 실험부 상단에 증류수가 축적되었다가 다시 빠지는 것을 볼 수 있으며 이러한 현상은 불규칙적으로 반복되었다. 이 상태에서 공기 유량을 조금 증가시켜도 실험부 상단에 증류수가 시간경과에 따라 축적되기 시작하며 이러한 경향은 그림 9, 10, 11이 보여주고 있다. 그림 9, 10, 11을 보면 시간경과에 따라 실험부 상단에 증류수가 축적되는 것을 볼 수 있고

CCFL이 발생하고 난 후에는 유로가 형성되는 것을 볼 수 있다.

간극의 상•하부에 설치한 차압를 분석한 결과 공기 유량이 적은 상태에서는 차압 증가가 미소하였지만 CCFL 이 일어나기 직전과 CCFL 이 발생하였을 때에는 차압이 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있었으며, 이러한 경향을 1 mm 간극에 대해서 그림 2에 나타내었다. 그림 2에 나타낸 바와 같이 1000 4500 초사이에서는 차압 변화가 크지 않음을 알 수 있고, 4500 7000 초 사이에서는 CCFL이 일어나기 직전의 차압 변화를 보여주고 있으며 차압이 진동하는 것을 불 수 있다. 이는 실험부 상단에 공급된 증류수가 쌓였다가 다시 하부 공동으로 흘러내리기 때문이다. 7000 초 이후는 CCFL이 발생하였을 때의 차압 변화를 보여주고 있으며 차압이 일정하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 선형적인 차압 증가는 실험부 상단에 증류수가 축적되기 때문이다.

CCFL이 발생하였을 때의 실험결과인 공기 유량과 증류수 유량을 무차원화하여 이들 관계를 Wallis 인자 형태로 나타낸 것이 그림 3이다. 그림에서의 실험결과들은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$j_g^{*1/2} + 1.08 j_w^{*1/2} = 0.287 \quad (1\ \text{mm 경우}) \qquad (3)$$

$$j_g^{*1/2} + 0.93 j_w^{*1/2} = 0.337 \quad (2\ \text{mm 경우}) \qquad (4)$$

그림에서 보는 바와 같이 1, 2 mm 모두 비슷한 경향을 보여 주지만 1 mm 간극에서의 기울기가 약간 크게 나타남을 알 수 있고 1 mm 간극에서 공기유량이 $j_g^{*1/2}$=0.183 이고, 물유량이 $j_w^{*1/2}$=0.227 인 점에서 기울기가 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 1mm 간극에서 이러한 경향을 자세히 관찰할 필요가 있어서 CCFL 발생이 발생하였을 때 기울기가 급격하게 변하는 지점을 기준으로 하여 사진 촬영을 수행하였다. 그림 12, 13, 14, 15는 사진 촬영한 결과를 보여주고 있다. 그림 12, 13, 14에서는 간극의 어느 한 부분에서 국소적으로 CCFL이 발생하지 않았지만 그림 15에서는 국소적으로 CCFL이 발생하였고 유로가 형성되는 것을 볼 수 있다. 이 상태에서 실험부 상단에 공급하는 증류수 유량이 작아질수록 dryout 되는 면적은 확산되었다. 간극유량이 1 mm 간극에서 이러한 경향을 보이는 것을 다음과 같이 분석할 수 있다.

(1) 직경이 500 mm 인 외부 실린더 가공시 0.1%(0.6 mm) 의 기계적 공차로 인해 1 mm 간극의 불확실성은 30 %로 매우 컸지만, 2 mm 간극에서는 이러한 불확실성은 15 %로 감소하였다. 즉 기계적 공차로 인한 불확실성이 1 mm 간극에서 더 크게 나타난 것으로 판단되며, 이로 인해 1 mm 간극에서는 기울기가 2 mm 간극 보다 더 크게 나타난 것으로 판단된다.

(2) 가시화 결과, 1 mm의 좁은 간극에서는 표면장력에 대한 효과를 무시할 수 없었지만 2

mm 간극 실험의 경우 이에 대한 효과는 나타나지 않았다.

간극에서의 CCFL에 대한 실험결과를 Wallis 인자형태로 나타낸 식 (3)과 (4)는 제 2장에서 기술한 바와 같이 다음과 같은 임계열우속 상관식으로 변형이 가능하다.

$$\frac{q''_{CHF}}{\rho_g h_{fg}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_g}{g D_w (\rho_l - \rho_g)}} = \frac{S}{D_{CHF}} \cdot \frac{0.165}{(1+1.08\sqrt[4]{\rho_g/\rho_l})^2} \quad \text{(1 mm 경우)} \tag{5}$$

$$\frac{q''_{CHF}}{\rho_g h_{fg}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_g}{g D_w (\rho_l - \rho_g)}} = \frac{S}{D_{CHF}} \cdot \frac{0.23}{(1+0.93\sqrt[4]{\rho_g/\rho_l})^2} \quad \text{(1 mm 경우)} \tag{6}$$

그림 4는 식 (5)와 (6)을 이용하여 계산한 임계출력값과 CHFG 실험결과[12]를 비교하여 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 2 mm 간극의 경우에는 제시한 CHF 상관식이 CHFG 실험결과보다 약간 높게 나타나지만 실험치를 잘 예측하고 있음을 볼 수 있다. 그러나 1 mm 의 경우 제시한 CHF 상관식은 압력이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이지만 CHFG 실험결과는 압력에 대한 영향은 거의 나타나지 않았다. CHFG 실험결과에 의하면 간극의 크기가 증가함에 따라 압력이 증가하는 경향을 보였다. CHFG 실험에서는 CCFL 이 간극의 상단부에서 발생하였을 때 간극에서 생성된 증기는 하반구로 흘러 들어오려는 냉각수를 밀어냄으로서 유로를 발해하는 역할을 하게된다. 이러한 영향으로 인해 간극이 좁을수록 냉각수가 간극 발열부를 적시지 못하기 때문에 간극이 클 때 보다 dryout이 더 빨리 발생하는 것이다.

6. 결 론

곡률 반경이 큰 대형 환상관의 간극(1, 2 mm)에서 상부에 공급하는 증류수 유량을 고정시키고 공기 유량을 단계적으로 증가시키면서 CCFL 실험을 수행한 결과, 공기 유량이 작을 때는 간극 상.하부의 차압 변화가 크지 않음을 알 수 있었고 공기 유량이 CCFL 근처에 도달했을 때는 차압이 급격하게 증가함과 동시에 실험부 상부에 증류수가 축적되었다가 하부 공동으로 흘러내리는 것을 관측하였다. 이 상태에서는 공기 유량을 조금만 증가시켜도 증류수는 실험부 상부에 축적되었고 차압은 증가하였다. 실험에서 얻은 CCFL 결과를 Wallis 인자 형태로 무차원화시켜 공기 유량과 증류수 유량의 관계로 나타낸 결과, 1 mm 간극에서의 CCFL 상관식이 2 mm 간극에 비해 기울기가 약간 크게 나타났고, 1 mm 간극의 경우는 기계적 공차로 인한 간

극 크기의 불확실성이 2 mm 간극에 비해 크고, 가시화 결과 나타난 표면장력 현상 때문에 기울기가 급격하게 변하는 부분이 나타났다.

CCFL 실험을 통하여 제시한 CHF 상관식을 임계출력에 대한 CHFG 실험결과와 비교.분석한 결과, 2 mm 간극에서는 CHF 상관식이 CHFG 실험 결과에 비해 약간 높은 경향을 보였지만 임계출력을 잘 예측하였다. 그러나 1 mm 간극에서는 CHF 상관식이 CHFG 실험결과보다 높게 예측하였고 압력이 증가함에 따라 다소 차이를 보여주었다. 이와 같은 차이에 대해서는 차후 규명할 예정이다. 간극 크기가 CCFL 현상에 미치는 영향을 규명하기 위해서는 간극 크기를 증가한 추가 CCFL 실험이 필요하여 3 mm 간극에 대한 실험을 차후 수행할 예정이다. 또한 간극의 크기의 불확실성에 대한 추가적 연구와 좁은 간극에서 표면장력이 CCFL에 미치는 영향을 평가하는 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 과제의 일환으로 수행하였습니다.

참고 문헌

(1) Rempe, J. L., Wolf, J. R., Chavez, A.A., Condie, K. G., Hagrman, D. L., Carmack, W. J., Investigation of the coolability of a continuous mass of relocated debirs to a water-filled lower plenum, EG &G Idaho Report, EGG-RAAM-11145, 1994

(2) Jeong, J. H., Park, R. J., Kim, S. B., 1998, Visualization Experiments of the Two-Phase Flow inside a Hemispherical Gap, Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol. 25, No. 5, pp. 693-700.

(3) Jeong, J. H., Park, R. J., Kim, S. B., 1998. Thermal-Hydraulic phenomena relevant to global dryout in a hemispherical narrow gap, Heat and Mass Transfer 34, 321-328

(4) 정지환 외, 1997. 반구형 간극에서 CHF가 발생했을 때 히터표면의 온도분포와 CHF 측정, 한국원자력학회 추계학술발표회 논문집, pp. 675-680, 경북대학교, 대구

(5) Mayinger, F., Weiss, P., Wolfert, K. 1993. Two-phase flow phenomena in full-scale reactor geometry, Nuclear Engineering and Design 145, 47-61

(6) Lee, S. C., Mo, C., Nam, S. C., Lee, J. Y., 1995. Thermal-hydraulic behaviours and flooding of ECC in DVI systems, KAERI Report, KAERI/CM-045/95, 1995

(7) Cheng, L. Y, 1990. Counter-current flow limitation in thin rectangular channels, BNL Report, BNL-44836

(8) Mishima, K., Nishihara, H., 1985. The effect of flow direction and magnitude on CHF for low pressure water in thin rectangular channels, Nuclear Engineering and Design 86, 165-181

(9) Sudo, Y., Kaminaga, M. 1989. A CHF characteristic for downward flow in a narrow vertical rectangular channel heated from both sides, Int. J. Multiphase flow 15, 755-766

(10) Koizumi, Y., Nishida, H., Ohtake, H., Miyashita, T., 1987. Gravitational water

penetration into narrow-gap annular flow passages with upward gas flow, NURETH-8, Kyoto, Japan, Proceedings Volume 1, pp. 48-52
(11) 이승진 외, 1999, 곡률 반경이 큰 대형 환상관 간극에서 CCFL에 대한 실험적 연구, 한국원자력학회 춘계학술발표회 논문집, 포항공과대학교
(12) 박래준 외, 반구형 간극에서의 임계 열유속에 대한 실험 연구, 대한기계학회 추계 열공학 학술대회 논문집, 설악 한화콘도

표 1. 실험 인자 및 조건

내 용	범 위
공기 온도	5.3 21.0 °C
증류수 온도	2.6 21.6 °C
공기 및 증류수 압력	대기압
공기 유량	0.006 0.065 Kg/sec
증류수 유량	0.073 1.91 Kg/sec
내부 실린더 직경	496, 498 mm
내부 실린더 높이	250 mm
외부 파이프 직경	500 mm (± 0.6 mm)
간극의 크기	1, 2 mm

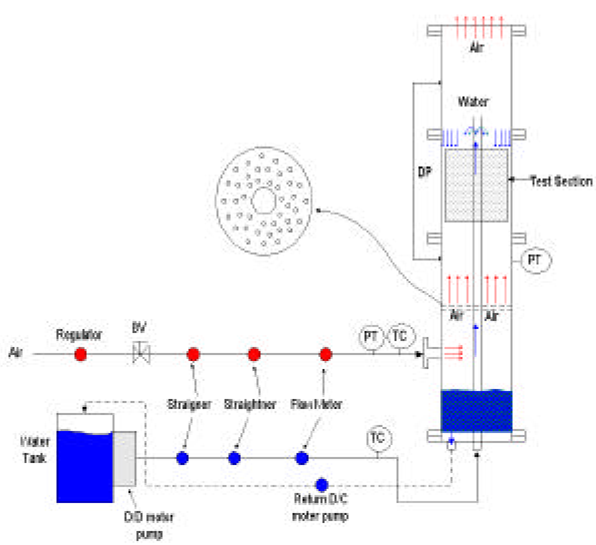

그림 1. CCFL 실험 장치도

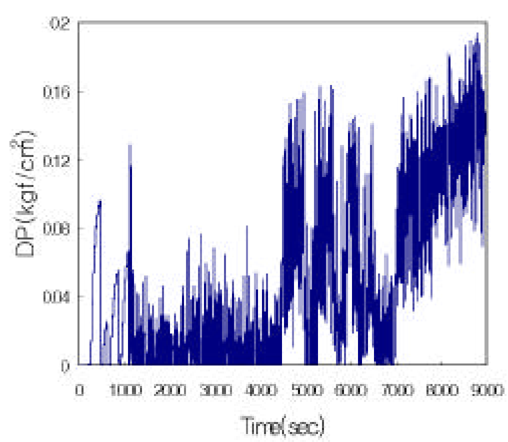

그림 2. 간극 상·하부에서 차압과 공기 유량과의 관계

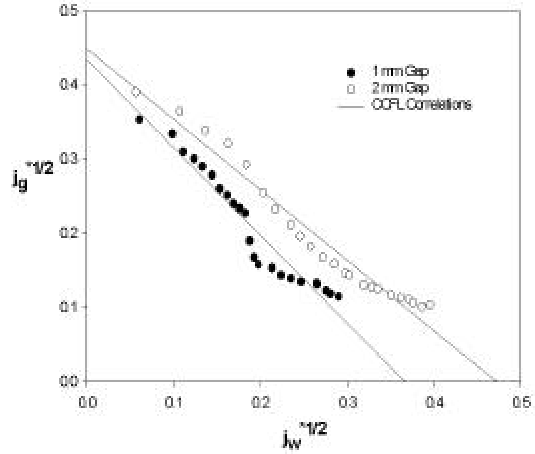

그림 3. CCFL 발생시 공기 유량과 물 유량과의 관계

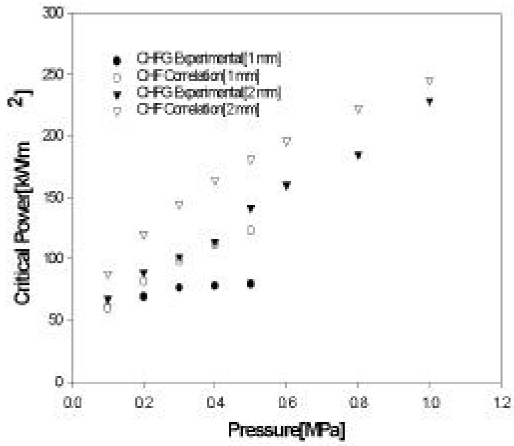

그림 4. 임계출력에 대한 CCFL 결과와 CHFG 실험 결과 비교

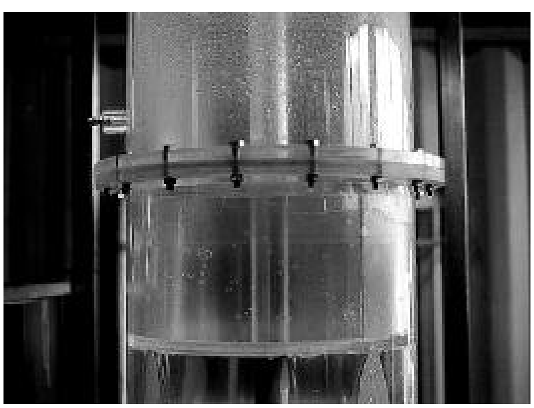

그림 5 $j_w^{*\ 1/2}$ 가 0.183 이고 공기 유량이 없을 때

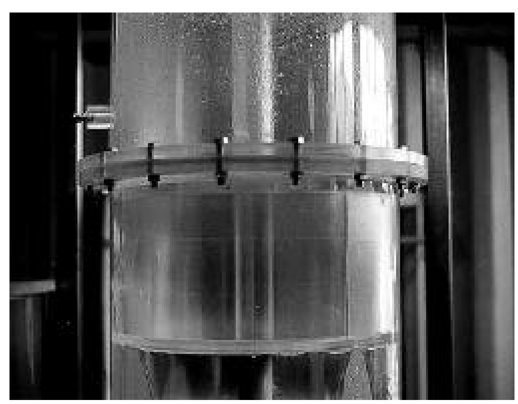

그림 6 $j_w^{*\ 1/2}$ 가 0.183 이고 공기 유량을 CCFL 발생 직전까지 증가시켰을 때(1)

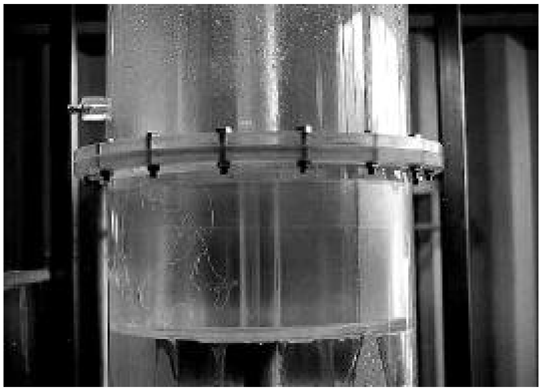

그림 7 $j_w^{*\ 1/2}$ 가 0.183 이고 공기 유량을 CCFL 발생 직전까지 증가 시켰을 때(2)

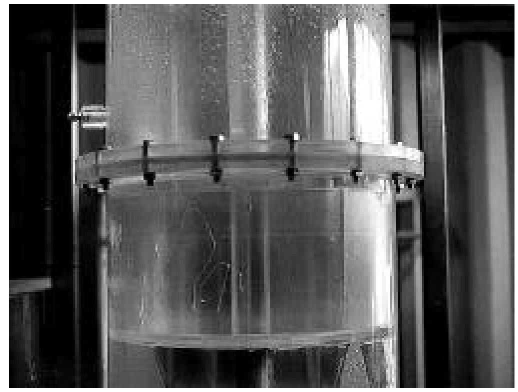

그림 8 $j_w^{*\ 1/2}$ 가 0.183 이고 공기 유량을 CCFL 발생 직전까지 증가 시켰을 때(3)

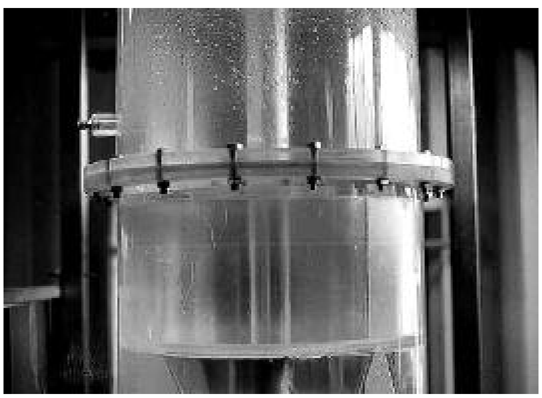

그림 9 $j_w^{*\ 1/2}$ 가 0.183 이고 공기를 CCFL 유량까지 증가 시켰을 때(1)

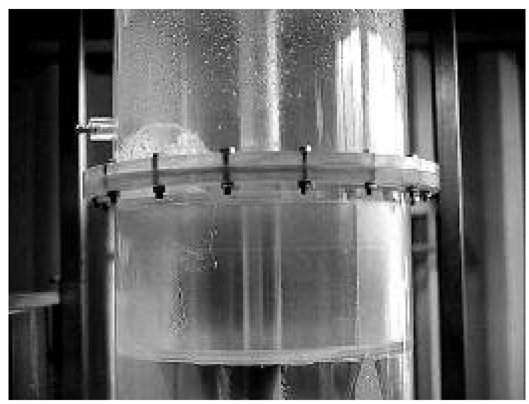

그림 10 $j_w^{*\ 1/2}$ 가 0.183 이고 공기를 CCFL 유량까지 증가 시켰을 때(2)

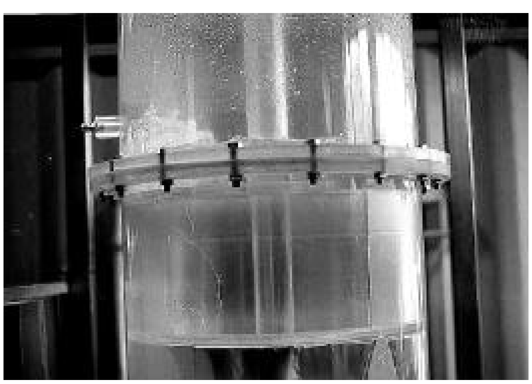

그림 11 $j_w^{*\ 1/2}$ 가 0.183 이고 공기를 CCFL 유량까지 증가 시켰을 때(3)

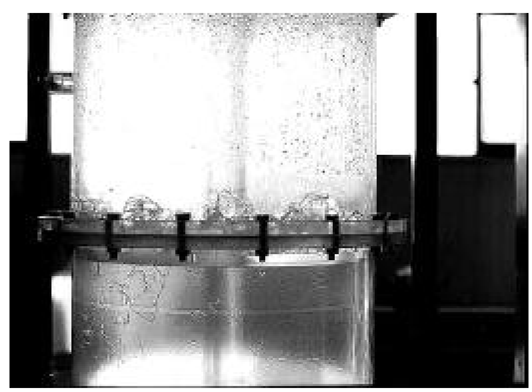

그림 12 CCFL 발생 시 사진 촬영 결과($j_w^{*\ 1/2} = 0.198$, $j_g^{*\ 1/2} = 0.158$)

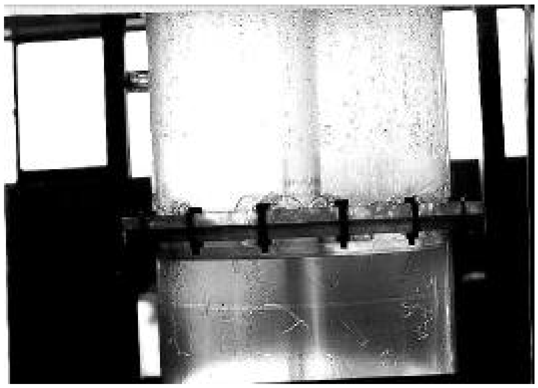

그림 13 CCFL **발생 시 사진 촬영 결과**($j_w^{*\,1/2} = 0.193$, $j_g^{*\,1/2} = 0.168$)

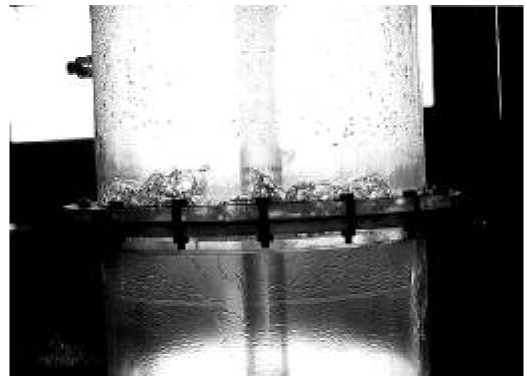

그림 14 CCFL **발생 시 사진 촬영 결과**($j_w^{*\,1/2} = 0.188$, $j_g^{*\,1/2} = 0.19$)

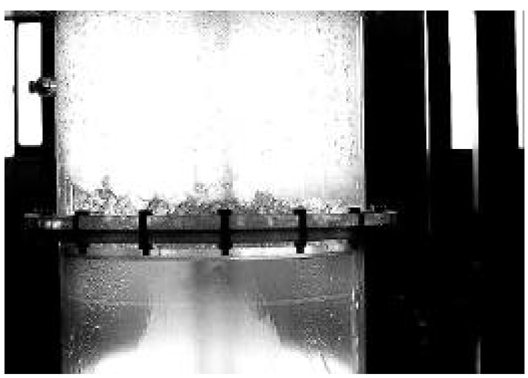

그림 15 CCFL **발생 시 사진 촬영 결과**($j_w^{*\,1/2} = 0.183$, $j_g^{*\,1/2} = 0.227$)