

'2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

환상관의 좁은 간극에서
CCFL 실험적 연구

A Experimental Study on the CCFL
in the Narrow Gaps of Annular

이승진 · 박성근
한국전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 101-16

박래준 · 김상백
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

정지환
천안외국어대학
충청남도 천안시 안서동

요 약

SONATA-IV/VISU-II 실험을 통해 반구형 간극에서의 임계출력에 CCFL(Counter Current Flow Limitation) 현상이 큰 영향을 미친다는 것을 기존 연구를 통해 확인 한 바 있다. 따라서 본 실험의 목적은 CHF(Critical Heat Flux in Gaps) 실험과 같은 크기 및 구조에서 CCFL 실험을 수행함으로써 CCFL 이 반구형 간극 발열부 표면에서 전역건조를 일으키는 기구라는 사실을 증명하고 간극 크기(1, 2, 3, 5 mm)에 따른 CCFL 현상을 규명하는 것이다. 환형의 좁은 간극에서 일어나는 이상유동 현상을 이해하기 위해 실험부를 가시화 하였고 이를 통해 실험부 상단에 공급된 증류수가 축적됨과 동시에 간극 상·하부 차압이 선형적으로 증가하는 현상이 나타나면 CCFL 발생한 것으로 정의하였다. 실험결과 얻은 데이터는 Kutateladze 수로 표현하였고 기존 CCFL 상관식과 비교 분석을 수행하였으며 분석결과, 기존 상관식과 비슷한 경향을 보여주었다.

Abstract

A CCFL test has been performed in narrow annuli gaps with large diameter, because it has been confirmed that the CCFL phenomena affected the critical power in hemispherical narrow gap geometries from the SONATA-IV/VISU-II experiments. Therefore, the objectives of the CCFL experiments are to investigate the small gap size(1, 2, 3, 5 mm) effect on CCFL under the large diameter condition and to confirm the findings of the VISU-II study that global dryout in hemispherical narrow gaps 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 linear increase in the differential pressure across the gap was occurred, which was the definition of the CCFL occurrence in this experimental study. In the CCFL experiment, the occurrence of CCFL was corrected with the Kutateladze number, and CCFL correlations were presented. From analysis result, we could know that CCFL correlations showed excellent agreement with the existing correlations.

1. 서론

기체와 액체가 서로 반대 방향으로 유동하는 형태는 유체를 이용하는 화학 공장이나 원자력 발전소 등에서 자주 발생할 수 있다. 기체의 유량이 적을 때에는 위로 흐르는 기체의 유량은 아래로 흐르는 액체유량에 거의 영향을 주지 못하지만 기체 유량이 충분히 커지면 유연한 역류 유동형태는 깨지면서 액체와 공기가 접하는 부분에서 유동 형태가 매우 복잡해지고 아래로 흐르는 액체의 유량이 급격하게 감소하게 된다. 이러한 현상을 플러딩(Flooding) 또는 역류유동 제한현상(CCFL: Counter Current Flow Limit)이라 하며 CCFL 현상은 원자력 발전소 안정성과 관련하여 매우 중요시되고 있어 이에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.

1979년 TMI-2 사고에서 노심용융물이 원자로용기 하반구에 재배치되었어도 원자로용기 외벽을 냉각함이 없이 원자로 용기 내부로의 냉각수 주입만으로 원자로 용기가 파손되지 않은 실례가 있다. 이는 기존의 사고해석에서 예견하지 못했던 새로운 냉각 기구가 존재함을 의미하는 것으로 노심 용융물이 충분히 냉각되도록 작용을 한 냉각 기구가 여러 가지 유형이 있지만, Rempe 등 많은 연구자들은 고화된 노심 용융물과 원자로 용기 사이에 형성된 간극을 통한 냉각 효과가 이들 중 가장 크게 기여했을 것이라고 평가하였다.

한국원자력연구소에서는 재배치된 노심용융물과 원자로 압력용기 사이에 형성되는 간극을 통한 냉각능력을 평가하기 위해 CHF(Critical Heat Flux in Gaps) 실험을 수행하였고, CHF 실험이 수행되기에 앞서 반구형 간극에서 비등하는 이상 유체의 거동에 대한 이해를 구하고자 가시화 실험인 VISU-I, II 실험을 수행하여 그 결과를 이미 보고하였다. 이들 실험에 의하면 간극 발열부 표면에서 생성된 증기는 간극 상단에서 간극으로 들어오는 물과 역류 유동을 이루는데 이 곳에서 CCFL 현상이 발생하였고, 이로 인해 간극으로 공급되는 물이 제한됨으로써 가열된 반구 표면이 충분히 냉각되지 못하여 CHF가 발생하였다. 이러한 가시화 실험 결과로부터 반구형 간극에서 임계 열유속에 CCFL이 큰 영향을 미친다는 것을 확인하였다.

본 실험의 목적은 CHF 실험장치와 같은 간극 크기(1, 2, 3, 5 mm) 및 구조에서 CCFL 실험을 통해 간극 크기에 따른 CCFL 현상을 규명하고 CCFL 상관식을 개발하는 것이다. 또한, 개발한 CCFL 상관식을 근거로 반구형 간극에서 임계출력 상관식 형태를 검증함으로써 CCFL이 반구형 히터 표면에 전역건조를 일으키는 기구라는 사실을 증명하는 것이다. 대형 환상관의 좁은 간극(1, 2, 3, 5 mm)에서 일어나는 수력학적 현상을 이해하기 위해 가시화를 하였고 가시화를 통해 실험부 상단에 증류수가 쌓이거나 간극 상·하부의 차압 경향을 주시하면서 실험을 수행하였다. 실험시 주요 측정 변수는 공기 및 물 유량, 주입 공기압, 간극 상·하부 차압, 물 및 공기 온도, 계통 압력 등으로 이러한 변수는 HP-VXI 데이터 획득장치를 통하여 얻었고 실험에서 얻은 데이터는 무차원수로 표현하여 실험식의 형태를 제시하였다.

2. 연구 내용

CCFL 현상은 지난 50년 동안 꾸준히 연구되어 왔지만 현상이 복잡하여 아직도 충분히 이해되지 못하고 있다. 오랜 기간동안 수많은 연구들이 진행되어 해석적 모델과 실험식 등이 다양하게 개발되었으나 모두들 한계를 가지고 있다. CCFL 현상은 매우 복잡한 특성을 가지고 있어서 해석모형을 개발하기 위해서는 여러 가지 가정들을 이용해야 한다. 이러한 어려움을 피하기 위해서 많은 실험식이 개발되었고 가장 널리 사용된 무차원수는 Wallis parameter 와 Kutateladze number 이다.

기존의 해석적인 CCFL 모델과 측정 데이터는 다음의 식과 같이 Wallis parameter 나 Kutateladze number 로 표현되었다.

$$j_g^{*1/2} + m_w j_w^{*1/2} = C_w \quad (2.1)$$

$$K_g^{*1/2} + m_k K_w^{*1/2} = C_k \quad (2.2)$$

여기서,

$$j_k^* = j_k \sqrt{\frac{\rho_k}{gD(\rho_w - \rho_g)}} , \quad K_k^* = j_k \sqrt[4]{\frac{\rho_k^2}{g\sigma(\rho_w - \rho_g)}} \quad (2.3)$$

위 식에서 ρ , g , D , σ 는 각각 밀도, 중력가속도, 실험부 직경, 그리고 표면장력을 나타낸다. 위의 두 무차원수의 유일한 차이는 특성길이(characteristic length)의 선택이다. 특성길이로서 Wallis parameter 가 직경, 간극의 크기, 폭 등과 같은 유로의 기하학적 길이를 이용하는 반면 Kutateladze number 는 Taylor wave length를 이용한다. 이러한 근거로 판단하면 CCFL과 같이 유체가 불안정하여 일어나는 현상을 설명할 때 Kutateladze number가 보다 더 적절할 것으로 생각되나 Wallis parameter도 널리 사용되고 있다. CCFL 모델을 개발하거나 측정값을 수식화 할 때 어떠한 길이를 특성 길이로 이용할 것인지를 결정해야 한다. 시험부의 구조가 원형 파이프가 아닌 경우에는 특성길이 선택에 대한 일반적인 정설이 존재하지 않는다. 직각 유로에서의 측정값을 이용하여 실험식을 개발하는 경우 저자에 따라 다양한 특성길이가 이용되었다. Sudo 와 Kaminaga 는 간극의 크기 S 를, Osakabe 와 Kawasaki는 유로의 넓이 W 를 Mishima 와 Ishihara 는 2 배의 유로 넓이 $2W$ 를 특성길이로 채택하였다. 이와 비슷한 상황이 환형 유로에서도 있다. Lee 등과 Koizumi 등은 등가직경을 특성 길이로 이용한 반면 Richter 는 환형 유로의 평균 원주를 이용하였다. 이처럼 특성길이의 선택이 다양한 이유는 특성길이를 선택할 때 물리적인 이유보다는 측정값을 회귀분석 하는 과정에서 잘 맞는 값을 임의로 선택하였기 때문이라 판단된다.

식(2.1) 과 식(2.2) 중 어느 형태의 실험식이 CCFL 현상의 파이프 직경 효과를 보다 잘 설명하고 있는지 검토할 필요가 있다. Bankoff & Lee 는 기존의 실험값들을 비교·분석하여 직경이 다른 파이프에서 측정된 실험 값들이 파이프 직경의 제곱근에 비례하지 않는다고 하였다. Wallis 변수로 표현된 많은 해석적 모델과 실험식들은 고정된 액체 유속에서 무차원 직경 D^* 가 증가함에 따라 CCFL 현상을 일으키는 기체 유속이 감소한다고 예측하고 있다. D^* 는 다음과 같이 정의된다.

$$D^* = D \left[\frac{g(\rho_w - \rho_g)}{\sigma} \right]^{1/2} \quad (2.4)$$

Kutateladze number 자체는 직경을 변수로 포함하고 있지 않기 때문에 유로의 직경은 식(2.2)의 계수에서 고려하는 형태의 실험식이 개발되어 왔다. 한편 Pushkina & Sorokin 는 다양한 직경의 파이프에서 아래로 향하는 액체가 전혀 흐르지 않게 되는 기체 유량을 측정하여 다음의 실험식을 구하였다.

$$K_g = 3.2 \quad (2.5)$$

이들은 파이프 직경이 측정값에 전혀 영향을 주지 않는다고 결론지었다. 이처럼 파이프 직경이 CCFL 에 미치는 영향에 대해서 일치하지 않는 결론들이 제시되었다. Wallis & Makkenchery 와 Richter 는 이러한 혼돈된 결과들을 구분할 수 있는 새로운 결과를 제시하였다. 이들은 위의 서로 상반된 두 가지 결과 중 하나가 틀린 것이 아니라 그 적용범위가 다를 뿐이라는 연구결과를 제시하였다. 즉, $D^* \leq 40$ 인 영역에서는 Wallis 변수를 이용한 관계식이 잘 맞고 $D^* \geq 40$ 에서는 Kutateladze 수를 이용한 식이 잘 맞는다고 보고하였으며 원형관이 아닌 복잡한 구조의 실험장치에서 수행된 CCFL 실험들은 Kutateladze 수에 기초를 둔 상관식이 더 잘 예측한다고 하였다. 지금까지 수행된 역류유동제한현상에 관한 해석적 및 실험적 연구들 중 대부분은 원형관을 대상으로 수행되었다.

좁은 간극에서 CCFL 에 대해 수행된 기존의 연구를 살펴보면 Mayinger 등에 의한 비상노심 냉각수의 bypass, Lee 등에 의한 원자로 압력용기 직접주입 성능평가, Cheng, Mishima 와 Nishihara 및 Sudo 와 Kaminaga 등에 의한 연구용 원자로의 직각 연료 성능평가 등이 수행되었다. Koizumi 등은 본 실험과 유사한 목적을 가지고 환형 간극에서 CCFL 실험을 수행하였다. 이들은 내부 파이프 직경을 100 mm 로 고정시키고 간극을 5 ~ 10 mm 범위에서 변화시키며 CCFL 값을 측정하였다. 환형간극에서 수행된 기존의 CCFL 실험은 대부분 직경이 10 cm 이하의 작은 유로에서 수행하였다. 반면, Richter et al. (1979)는 444.5 mm 크기의 외부 직경과 393.7, 342.97 mm 인 내부 직경사이에 형성된 환상관 간극에서 top flooding 실험을 수행하였다. 그들은 실험부 상단에 축적되는 증류수 수위가 일정한 값 이상이면 overflow 시킴으로서 증류수 수위를 일정하게 유지하였고 사용한 구조 및 크기는 본 연구에서 수행하였던 구조와 비슷하지만 간극 크기는 25 ~ 50 mm 로 상당히 넓다. Nakamura et al. (1990)는 외부 직경이 220 mm 이고, 내부 직경이 200 mm인 환상관에서 top flooding 실험을 수행하

였다.

3. 실험 장치

그림 1은 CCFL 실험장치의 전체 개략도를 보여주고 있다. 실험장치의 구성은 그림 1에서 보는 바와 같이 실험부, 주입수 탱크, Regulator, 두 개의 직류 모터 펌프, 관련 파이프와 밸브 및 계측기, 데이터 획득 및 처리장치(DAS: Data Acquisition System)로 구성하였다. 실험부는 CHFG 실험장치와 같은 크기로 제작하였고 그림 1에서 보는 바와 같이 내부 실린더, 외부 파이프, 하부 공동, 다공판으로 구성하였다. 실험부에 주입되는 공기의 흐름을 균일하게 유지하기 위하여 공기 완충 탱크와 Regulator를 사용하여 공기 흐름이 부드럽게 변화도록 제어하였다. 제어용 직류 모터 펌프를 사용하여 실험장치 하부 공동으로 흘러내린 증류수를 저장수 탱크로 일정하게 보냄으로써 하부 공동의 수위를 일정하게 유지하여 입·출구 조건에 의한 불확실성을 최소화하였다.

저장수 탱크에 담긴 증류수는 제어용 직류 모터(motor)에 연결된 펌프를 통해 배관라인에 주입된다. 배관라인의 중간에 설치된 유량계에 의해 계량된 증류수는 하부 공동 내부의 중앙 기둥에 뚫린 파이프를 통해서 높이가 180 cm 인 실험부 상단에 공급된다. 중앙 기둥은 내경 5cm 의 스테인레스 스틸로 제작된 파이프로서 실험장치 중심원의 중앙에 위치하여 실험부를 정렬시키는 역할과 증류수를 실험부 상단에 공급해주는 배관 역할을 한다. 실험부 상단에 공급된 증류수는 외부 파이프와 내부 실린더 사이에 형성된 간극을 통하여 하부 공동으로 흘러 내리고, 하부 공동에 축적된 증류수는 제어용 직류 모터에 연결된 펌프에 의해 다시 저장수 탱크로 보내진다. 두 개의 제어용 직류 모터 펌프를 사용함으로써 실험부 상단에 공급되는 증류수 유량과 하부 공동에 축적되는 증류수 수위를 일정하게 유지할 수 있도록 하였다. 한국원자력연구소의 중앙 공급 장치에서 공급하는 압축 공기는 약 6~7기압 정도이고 Regulator 와 유량계를 거쳐 실험 장치로 공급된다. Regulator 는 출구 쪽의 압력이 입구 압력보다 낮을 때 출구 압력을 일정하게 유지시켜 줌으로써 Regulator 를 통하여 방출되는 압축 공기의 유량을 일정하게 내보내는 역할을 한다. 공기 유량계와 Regulator 사이에 밸브를 설치하여 수동적으로 공기유량을 조절할 수 있도록 하였다. 라인선상에 설치된 공기 유량계에 의해 계량된 압축 공기는 실험 장치 하부 공동으로 주입되고, 공기 유동을 균일하게 분포 시켜주기 위해 실험 장치 내부 중간에 설치한 다공판을 통과 한 후 외부 파이프와 내부 실린더 사이에 형성된 간극을 지나 결국 대기로 방출된다.

실험장치는 CHFG 실험 장치와 동일한 크기로 하였는데 CCFL 데이터를 CHFG 데이터와 비교할 때 스케일링 차이에 의한 왜곡(distortion)문제를 배제하기 위함이다. 대형 환상관의 좁은 간극에서 일어나는 수력학적 현상을 육안으로 관찰하면서 이해하기 위해 실험부를 아크릴로 제작하였다. 외부 파이프의 내부 직경은 499 mm 이고, 내부 실린더 높이는 250 mm 이다. 내부 실린더의 외경을 497, 495, 493, 489 mm 로 각각 다르게 제작하여 교체함으로써 1, 2, 3, 5 mm 간극을 형성시켜 실험을 수행하였다. 실험부는 CNC 선반으로 가공하였으나 기계적인 공차 때문에 간극이 균일하지 않았다. 측정 한 결과 내부 실린더의 직경은 정확하였지만 직경이 499 mm 인 외부 파이프의 기계적인 오차는 ± 0.3 mm 로 비교적 정확하게 가공하였지만 주요 실험 인자인 간극 크기가 기계적 공차 범위에 있어서 간극 크기를 균일하게 유지하기가 상당히 어려웠다. 이러한 간극 크기의 불확실성을 최소화하기 위해 내부 실린더 상·하단부에 약 10 mm \times 10 mm 크기의 아크릴로 제작된 얇은 플레이트를 90° 로 부착함으로써 실험부 상·하단의 간극 크기를 균일하게 유지하였다.

4. 실험 방법

먼저 실험하고자 하는 간극 크기(1, 2, 3, 5 mm)에 해당하는 내부 실린더를 증류수 배관라인 상단에 연결한 후, 직경이 499 mm 인 외부 파이프를 내부 실린더 상단으로 끼워 넣음으로써 실험부가 조립된다. 실험부를 설치하고 실험부 상·하단의 간극 크기를 균일하게 고정된 후 공기 밸브를 닫아 실험부에 주입되는 공기를 차단하고 직류모터 펌프를 작동시켜 실험부 상단에 증류수를 공급한다. 실험부 상단에 공급된 증류수는 중력에 의해 내부 실린더와 외부 파이프 사이에 형성된 간극을 통해 흘러내려 실험부의 하부 공동에 축적되고 제어용 직류모터 펌프에 의해 다시 저장수 탱크로 보내짐으로써 순환루프를 구성한다. 이때 간극을 통해 흘러내려 하부 공동으로 축적된 증류수 수위 변화를 육안으로 관찰하고 만약 시간이 지남에 따라 수위가 변하게 되면 직류모터 펌프의 가변저항을 제어하여 저장수 탱크로 보내지는 증류수 유량을 제어함으로써 수위 변동에 따른 불확실성을 최소화한다.

하부 공동의 수위 변동을 제거한 상태에서 공기 밸브를 열어 실험부 하단으로 주입할 공기 유량을 3 ~ 30 분 간격을 두고 단계적으로 증가시키면서 간극에서 일어나는 수력학적 현상을 육안으로 관찰함과 동시에 간극 상·하부에 설치된 차압계 신호를 통하여 CCFL 이 일어났는지를 판단한다. 만약 실험부 상단에 공급된 증류수가 상부 수조에 축적되지 않거나 간극 상·하부 차압이 선형적으로 증가하지 않으면 공기 유량을 더 증가시킨다. 공기 유량을 증가시켜 실험부 상단에 증류수가 축적되고 차압이 선형적으로 증가할 경우 CCFL 이 발생한 것으로 간주하고 실험을 종료한다. 공기 유량을 증가시킬 때 매 단계마다 최소 3 분에서 최대 30 분의 간격을 두었다. 즉 CCFL 이 발생하기 전까지는 3 분 정도의 간격을 두었고 CCFL 근처에서는 3 ~ 30 분의 시간 간격을 주고 간극에서 일어나는 현상을 비교적 자세히 관찰하였다. 또한 CCFL 이 발생하기 직전까지는 공기 유량 증가폭을 상대적으로 크게 하였고 CCFL 발생유량 근처에서는 공기 유량을 미세하게 증가시키면서 실험을 수행하였다. 상세한 실험 수행 절차는 아래와 같다.

- ㉠ 외경이 다른 내부 실린더를 증류수 배관라인 상단에 연결한다.
- ㉡ 외부실린더를 내부실린더 상단으로 끼워 넣음으로써 간극 크기(1, 2, 3, 5 mm)를 고정한다.
- ㉢ 기계적인 공차로 인해 간극 크기가 일정하지 않기 때문에 실험부 상·하단의 간극을 균일하게 조절한다
- ㉣ 공기 밸브를 닫은 공기의 흐름을 제거한다.
- ㉤ 두 대의 직류 모터 펌프를 구동하여 실험부 상단에 공급한 증류수 양을 고정하고 하부공동으로 흘러내린 증류수 수위를 관찰한다.
- ㉥ 하부 공동의 수위가 시간에 따라 변할 경우 제어용 직류 모터 펌프의 가변 저항을 변화시켜 시간에 따른 수위의 변동을 없앤다.
- ㉦ 공기 유량을 3 ~ 30 분 간격을 두고 계단식(수동적)으로 증가시킨다
- ㉧ 간극에서의 수력학적 현상과 실험부 상단에 증류수가 축적되는지를 육안으로 관찰함과 동시에 HP-VXI 데이터 획득장치를 통해 간극 상·하부의 차압 변화를 관찰한다.
- ㉨ 실험부 상단에 증류수가 축적되지 않으면 공기유량을 더 증가시키고 ㉠ 의 과정을 반복하여 수행한다.
- ㉩ 간극에서 차압이 선형적으로 증가하고 공급된 증류수가 실험부 상단에 쌓이면 CCFL 실험을 종료하고 데이터를 저장한다.
- ㉪ 실험부 상단에 공급할 증류수 유량을 변화시키고 ㉠ 에서 ㉩ 의 과정을 반복 수행한다.
- ㉫ 내부 실린더를 교체하여 간극 크기를 변경시킨 후 ㉠ 부터 ㉫ 까지의 과정을 반복 수행한다.

본 CCFL 실험에서는 간극 상·하부에서 차압이 선형적으로 증가하고 실험부 상단에 공급된 증류수가 축적될 때를 CCFL 이 일어난 것으로 정의하였으며 이러한 정의는 다른 많은 연구에서 널리 사용되고 있다. 직경 10 cm 이하의 소형 환상관에서는 수력학적 현상이 원주 방향의 전체 유로에서 균일하게 나타날 수 있지만 직경이 커지면 위치에 따라 수력학적 현상이 다르게 나타날 수 있다. 또한, 직경 499 mm 길이의 외부 파이프 제작시 발생한 기계적인 공차 등으로 좁은 간극의 일부분에서 부분적으로 CCFL 이 발생한다 하더라도 실험부 상단에 공급된 증류수가 축적되지 않으면 본 실험에서는 CCFL 이 발생하지 않은 것으로 판단하였다. 안전해석 관점에서 볼 때 이러한 상황은 문제를 일으키지 않을 것으로 판단된다. 즉, 간극의 일부분에서 CCFL 이 발생하였다 하더라도 실험부 상단에 공급된 증류수는 축적되지 않고 간극을 통과하여 실험부의 하부 공동으로 모두 내려오기 때문이다.

5. 실험 결과 및 고찰

본 실험에 사용된 유체는 공기와 증류수이고 온도, 압력 및 유량 범위를 표 1.에 나타내었다. 0.5 mm 간극 실험은 현재의 시스템으로는 실험이 불가능하여 수행하지 않았다. 실험 결과 간극에 따른 경향을 분석하였으며 실험을 통해 제시한 CCFL 상관식을 검증하기 위해 기존 CCFL 상관식과 비교·분석을 수행하였다.

5.1 간극에 따른 CCFL 현상

실험부 상단에 공급할 증류수 유량을 고정한 후 공기 유량을 0 에서부터 계단식으로 증가시키면서

실험부에서 일어나는 현상을 관찰한 결과 공기 유량이 적은 상태에서는 공급된 유량이 간극을 통해 하부 공동으로 전부 흘러내리는 것을 볼 수 있었고 공기 유량을 CCFL 이 발생하기 직전까지 증가시키면 공급된 증류수가 실험부 상단에 축적되었다가 다시 하부 공동으로 흘러내리는 것을 확인할 수 있었다. 이 상태에서 공기 유량을 조금 증가시키면 증류수는 실험부 상단에 축적되었고 차압은 선형적으로 증가하였다.

그림 2는 3 mm 간극에서 공기유량 증가에 따른 차압 경향을 그림 3는 계단식으로 증가시킨 공기 유량을 보여주고 있다. 그림 2의 차압 경향을 보면 200 초 근방에서 차압이 갑자기 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 경향을 보이는 것은 실험부 상단에 공급된 증류수가 간극을 통해 하부 공동으로 흘러내리고 있는 상태에서 갑자기 공기유량 조절 밸브를 열어 많은 양의 공기가 실험부 하단으로 유입됨으로써 차압이 급격하게 증가하는 것이다. 즉, 실험부 공동으로 공급된 공기는 간극을 통해 대기로 방출되는데 이 때 간극을 통해 하부 공동으로 흘러내리는 증류수에 의해 저항을 받아 되고, 이로 인해 공기가 빠져나갈 수 있는 유로가 줄어들면서 하부 공동의 압력이 증가하는 것이다. 200 초 근방에서 차압이 jump하는 경향을 보이고 있지만 증류수는 간극을 통해 하부 공동으로 전부 흘러내렸고 상부 수조에 축적되지 않았다. 700 ~ 1500 초 사이의 차압 경향을 보면 차압이 증가하였다가 다시 감소하는 것을 볼 수 있는데 이는 실험부에 공급된 증류수 축적되었다가 간극을 통해 다시 하부 공동으로 흘러내리기 때문이다. 1500 초 이후는 CCFL 이 발생하여 증류수는 상부 수조에 축적되었고 차압은 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다.

1 mm 간극 실험결과 간극의 일부분에서 국부적으로 CCFL 이 발생하였고 이 상태에서 공기 유량을 증가시키면 건조된 영역이 점차 확대되어 가는 현상을 보였다. 이러한 경향을 보이는 것은 외부 파이프 가공시 발생한 기계적 공차에 기인한 것으로 판단되며 간극이 좁을수록 기계적 공차로 인한 간극 크기의 불확실성이 크게 나타나기 때문이라 판단된다.

5.2 CCFL 상관식

실험을 통해 제시한 CCFL 상관식을 비교 검증하기 위해 Richter et al. 의 실험 결과를 이용하였고 그들이 444.5 mm 크기의 외부 직경과 393.7, 342.97 mm 인 내부 직경사이에 형성된 환상관 간극에서 top flooding 실험을 수행하여 표현한 상관식은

$$j_g^{*1/2} + 0.8 j_w^{*1/2} = 0.38 \quad (5.1)$$

Nakamura et al. (1990)는 외부 직경이 220 mm 이고, 내부 직경이 200 mm인 환상관에서 top flooding 실험을 수행하였으며 제시한 CCFL 상관식의 형태는

$$j_g^{*1/2} + 0.78 j_w^{*1/2} = 0.37 \quad (5.2)$$

그림 4는 실험 결과를 Richter 의 상관식과 비교 & 검증하기 위해 특성 길이로 원주길이를 선택하여 Wallis 변수로 도시한 그림이다. 그림 4에 보이듯이 본 연구에서 제시한 데이터와 달리 Richter 는 넓은 증류수 유량 범위에서 실험을 수행하였음을 확인할 수 있다.

본 실험에서 공기 유량을 단계적으로 증가시키면서 실험부에서 일어나는 현상을 육안으로 관찰한 결과 CCFL 발생 전에도 공급된 증류수가 상부 수조에 축적되었다가 다시 하부 공동으로 흘러내렸고 상부 수조의 수위 변화에 따라 실험부에 주입되는 공기 및 증류수 유량도 연동하면서 변하는 것을 볼 수 있었다. 이러한 물리적 현상 때문에 증류수 유량이 적은 실험에서는 측정 오차가 상당히 많아 실험을 수행하기가 어려웠다. 그림 4를 보면 같은 경향을 보이고 있음을 알 수 있지만 Richter 의 실험치에서는 간극에 대한 효과는 나타나고 있지 않는 반면 본 연구에서 제시한 결과는 간극이 커짐에 따라 C 값이 증가하고 있음을 볼 수 있다. 또한 Nakamura 상관식과 Richter 상관식을 비교해 보면 직경이 200 mm 이상이고 간극이 10 mm 이상인 환상관에서 거의 같은 값을 가지고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서도 5 mm 인 간극에서 C 값은 0.36 으로 이들이 제시한 값에 근접하고 있었고, 이러한 결과로부터 직경이 200 mm 이상이고 간극 크기가 10 mm 이상이 되면 이들이 표현한 상관식을 사용하여

도 문제가 되지 않을 것으로 판단된다.

그림 5는 2, 3, 5 mm 실험 결과를 무차원화하여 Kutateladze 수로 표현한 것이다. 그림에서 보면 m 값은 0.8 로 간극 크기에 관계없이 같은 값을 나타냈고 C 값의 경우 간극이 커짐에 따라 다소 차이가 있었다. 즉, 2, 3, 5 mm 간극에서 각각 1.49, 1.56, 1.70 의 값을 나타내었다.

PWR 하향 통로에 공급되는 ECC(Emergency Core Coolant)의 거동에 관련된 실험들이 많은 연구가들에 의해 수행되었는데, Glaser 는 큰 직경의 경우는 다른 연구가들과 같이 Kutateladze 형태의 상관식이 더 적적함을 보여주었고 PWR 의 1/4 스케일인 Karlstein 실험에서는 $m=0.77$, $C=1.80$ 을 제시하였고, 1/5 스케일인 CREARE 실험에서는 $m=0.82$, $C=1.80$ 값을, 1/1 스케일인 UPTF 실험에서는 $m=0.77$, $C=1.64$ 를 추천하였다. 비록 이들은 상변화를 고려한 파이프에서 실험을 수행하였지만 파이프의 내부 직경이 상당히 큰 실험으로 기존의 연구 결과가 잘 일치하는 것으로 판단된다. 즉, Wallis & Makkenchery 와 Richter 는 무차원 직경 D^* 가 40 이상인 영역과 원형관이 아닌 복잡한 구조의 실험 장치에서 수행된 CCFL 실험들은 Kutateladze 수에 기초를 둔 상관식이 더 잘 예측한다고 보고한 결과와 잘 일치하는 것이다. ECC 의 거동에 관한 실험들을 종합해보면 비교적 큰 스케일에 있어서 m 은 0.7 ~ 0.8 이고 C 는 1.6 ~ 1.8의 값을 보여주었다. 본 실험에서 사용한 크기는 실제 원전의 1/8 스케일로 이들이 수행한 크기에 비해 다소 작고 구조가 다르지만 실험결과 제시한 Kutateladze 형의 CCFL 상관식을 기존의 상관식과 비교 & 분석한 결과 m 값은 0.8 로 이들이 제시한 값과 같았고 C 값은 간극이 커질수록 증가하였으며 이들이 제시한 C 값에 접근하고 있었다

기존의 연구 결과를 근거로 본 연구에서도 실험 결과 얻은 데이터를 Kutateladze 형태의 상관식으로 표현하였고 제시한 CCFL 상관식은 아래와 같다.

$$K_g^{*1/2} + m_k K_w^{*1/2} = 0.07x + 1.35 \quad (5.3)$$

여기서 x 는 간극 크기이다.

6. 결론

곡률 반경이 499 mm 인 대형 환상관의 좁은 간극에서 간극 크기(1, 2, 3, 5 mm)에 따른 이상유동 현상을 규명하고 상관식 개발을 위해 CCFL 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1, 2, 3, 5 mm 간극에서 CCFL 실험을 수행한 결과 외부 파이프 제작시 발생한 기계적인 공차로 인해 간극 크기의 불확실성은 간극이 좁을수록 크게 나타났다. 특히, 1 mm 간극에서는 국부적으로 CCFL 이 발생하였고 이 상태에서 공기유량을 더 증가시키면 건조된 영역이 점차 확대되어 가는 현상을 보였지만 간극이 커짐에 따라 국부적인 CCFL 은 발생하지 않았다.
- 3 mm 간극에서 공기유량을 계단식으로 증가시키면서 간극에서 일어나는 현상을 분석한 결과 공기유량이 적은 상태에서는 상부 수조에 증류수는 축적되지 않았고 차압 증가는 일어나지 않았다. 그러나 공기유량을 CCFL 근처까지 증가하였을 때 차압은 급격하게 증가하였으나 증류수는 축적되었다가 간극을 통해 다시 하부 공동으로 흘러내리는 현상을 보여주었다. 이 상태에서 공기 유량을 조금만 증가시켜도 증류수는 축적되었고 차압은 선형적으로 증가하였다.
- 대형 환상관의 좁은 간극에서 수행한 실험결과를 Wallis 변수 형태로 무차원화하여 Richter 상관식과 & 분석한 결과 같은 경향을 보여주었다. 실험에서 제시한 m 값은 0.8로 이들이 제시한 값과 동일하였고 C 값은 간극이 커짐에 따라 Richter 및 Nakamura 가 제시한 값에 근접하는 경향을 보였다.
- 무차원 직경 D^* 가 40 이상인 영역과 원형관이 아닌 복잡한 구조에서는 Kutateladze 수에 기초를 둔 실험식이 CCFL 현상을 더 잘 예측한다고 Wallis & Makkenchery 와 Richter 는 보고하였다. 이러한 기존 연구 결과를 근거로 직경이 500 mm 이고 간극이 5 mm 이하인 환상관 간극에서 적용할 수 있는 상관식을 실험을 통해 아래와 같이 제시하였다.

$$K_g^{*1/2} + m_k K_w^{*1/2} = 0.07x + 1.35$$

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 debris 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. Thermal-Hydraulic phenomena relevant to global dryout in a hemispherical narrow gap, Heat and Mass Transfer 34, 321-328
- [3] Mayinger, F., Weiss, P., Wolfert, K. 1993. Two-phase flow phenomena in full-scale reactor geometry, Nuclear Engineering and Design 145, 47-61
- [4] Lee, S.C., Mo, C., Nam, S.C., Lee, J.Y., Thermal-hydraulic behaviours and flooding of ECC in DVI systems, KAERI Report, KAERI/CM-045/95, 1995
- [5] Cheng, L.Y. Counter-current flow limitation in thin rectangular channels, BNL Report, BNL-44836, 1990
- [6] 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
- [7] 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
- [8] 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, 48-52.
- [9] M. Osakabe and Y. Kawasaki., "Top flooding in thin rectangular and annular passages", Int. j. Multiphase flow Vol. 15, No. 5, pp. 747-754, 1989.
- [10] Horst J. Richter., "Flooding in tubes and annuli", Int. J. Multiphase Flow Vol. 7, No. 6, pp. 647-658, 1981.
- [11] Horst Glaeser., "Downcomer and tie plate countercurrent flow in the upper plenum test facility(UPTF)", Nuclear Engineering and Design 133(1992) 259-283
- [12] M. Osakabe and H. Futamata, "Effect of inserted rod and cross flow on top flooding of pipe", Int. j. Multiphase Flow Vol. 22, No. 5, pp. 883-891
- [13] 정영중, 장원표, "플러딩 현상 및 반류유동한계 모델의 개발동향", KAERI/AR-452/96, 한국원자력연구소, 1996.
- [14] 이상천, 정모외, "DVI 시스템에서 비상노심 냉각제의 열수력학적 거동 및 플러딩현상", KAERI/CM-045/95, 한국원자력연구소, 1996.
- [15] 박래준, 정지환외, "중대사고시 노심용융물의 노내 냉각과 관련한 열진달 특성 분석", KAERI/TR-1027/98, 한국원자력연구소, 1998.

표 1. 실험 조건

| 내 용 | 범 위 |
|-------------|-----------------------|
| 공기 및 증류수 온도 | 대기온도 |
| 공기 및 증류수 압력 | 대기압 |
| 공기 유량 | 0.006 ~ 0.092 Kg/sec |
| 증류수 유량 | 0.073 ~ 2.96 Kg/sec |
| 내부 실린더 직경 | 497, 495, 493, 489 mm |
| 내부 실린더 높이 | 250 mm |
| 외부 파이프 내경 | 499 mm (± 0.3 mm) |
| 간극의 크기 | 1, 2, 3, 5 mm |

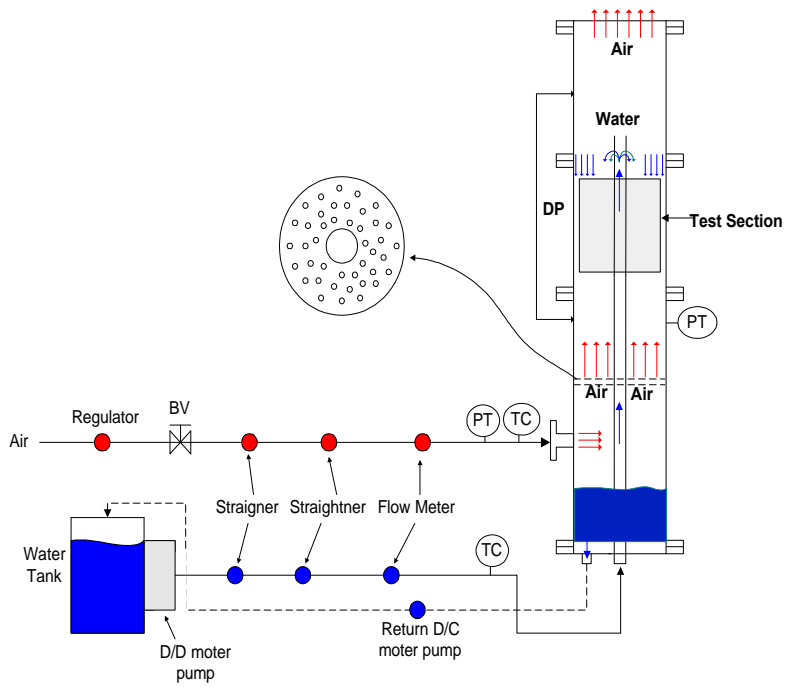


그림 1. CCFL 실험장치 전체 개략도

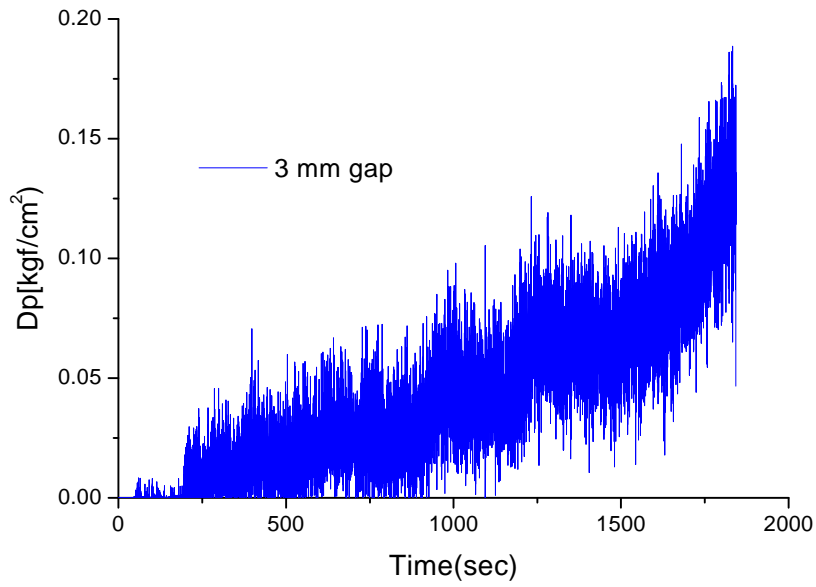


그림 2. 증류수 유량($j_w^{*1/2}$)이 0.18인 점에서의 차압 경향(3mm)

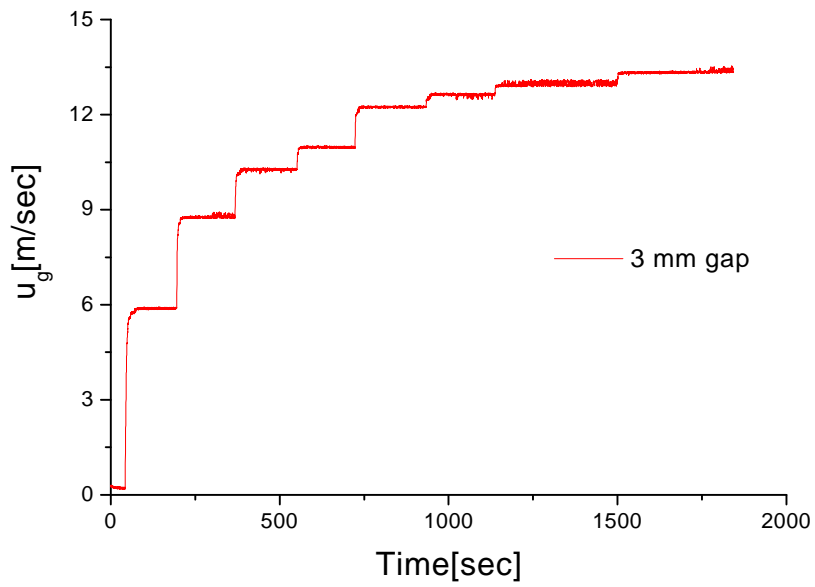


그림 3. 증류수 유량($j_w^{*1/2}$)이 0.18인 점에서의 공기속도(3mm)

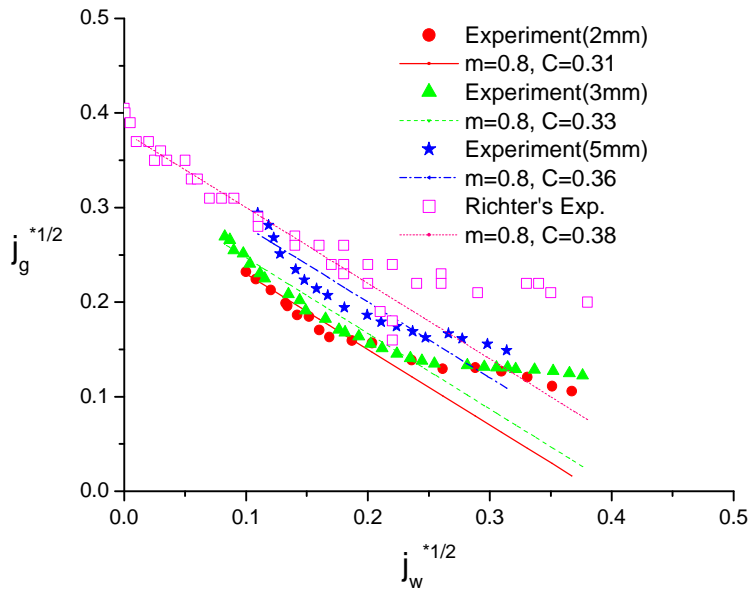


그림 4. Richter 상관식과 CCFL 상관식비교

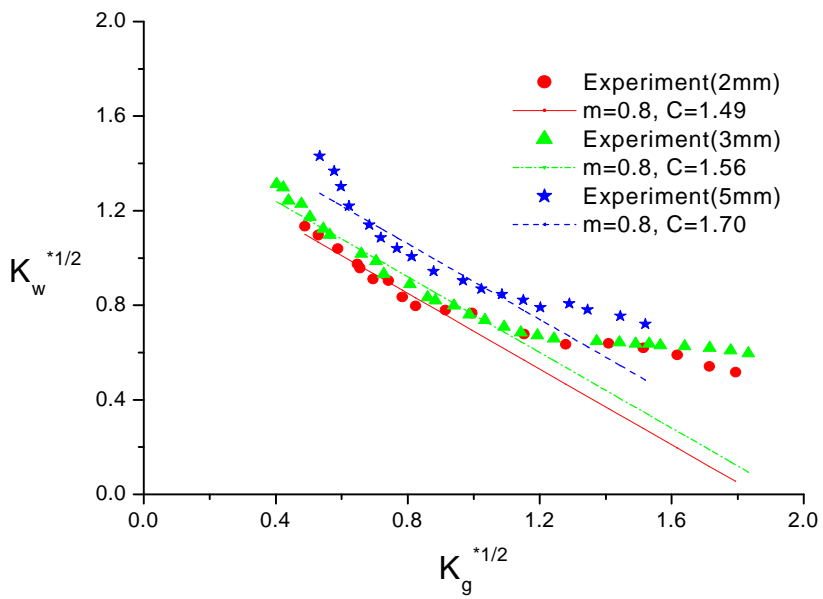


그림 5. Kutateladze 수로 표현한 CCFL 상관식