

곡률 반경이 큰 환상관 간극에서 CCFL에 대한 실험 연구

이승진* · 정지환** · 박래준*** · 김상백**** · 김희동*****

An Experimental Study on the CCFL in Narrow Annular Gaps with Large Diameter

Seung-Jin Lee, Ji-Hwan Jeong, Rae-Joon Park, Sang-Baik Kim, and Hee-Dong Kim

Key Words: CCFL(역류유동 제한), Annular Gap(환형 간극), Two-Phase Flow(이상유동)

Abstract

A CCFL(Counter Current Flow Limit) test have been performed in narrow annular 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(Simulation Of Naturally Arrested Thermal Attack)-IV(In-Vessel)/VISU(Visualization)-II experiments. The objectives of the CCFL experiments are to investigate the small gap sizes(1, 2 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 significant increase in the differential pressure across the gap was occurred, which was the definition of the CCFL occurrence in this experimental study. From the experimental results in annular gap with large diameter it can be known that an increase in the differential pressure was not big at small air flow-rates. When the CCFL was occurred, the differential pressure across gaps was increased significantly and a water accumulated in the upper plenum. The occurrence of CCFL was correlated using the Wallis parameter.

1. 서 론

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 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 원자력 발전소의 안정성과 관련하여 매우

* 한국원자력연구소, 열수력안전연구팀
** 천안외국어대학, 환경관리과
*** 한국원자력연구소, 열수력안전연구팀
**** 한국원자력연구소, 열수력안전연구팀
***** 한국원자력연구소, 열수력안전연구팀

중요시되고 있으며, 이에 대하여 많은 연구가 진행되고 있다.

1979년 TMI-2 원전의 중대사고에서 노심용융물이 원자로용기 하반구에 재배치되었지만 원자로 용기의 건전성은 유지되었다. 이는 기존의 사고해석에 예견하지 못했던 새로운 냉각기구 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 공기압력, 간극 상·하부 차압, 물 및 공기 온도, 계통압력 등으로 이러

한 변수는 HP-VXI 데이터 획득장치를 통하여 얻었다. 실험에서 얻은 데이터는 무차원수로 표현하여 실험식의 형태를 제시하였다.

2. 기존 연구현황 및 실험내용

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 10cm이하의 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 사용해야 하기 때문에 해석상 많은 어려움이 있다. 이러한 어려움을 피하기 위해 많은 실험식이 개발되었고 가장 널리 사용되는 실험식의 형태는 Wallis parameter와 Kutateladze number이다. 본 연구에서는 다음 식과 같이 나타나는 Wallis parameter를 사용하여 실험결과를 정리하였다.

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

여기서,

$$j_k^* = j_k \sqrt{\frac{\rho_k}{gD(\rho_l - \rho_g)}}$$

위 식에서 ρ , g , D 는 각각 밀도, 중력 가속도, 특성 길이이다. 본 연구에서는 내부실린더의 원주길이를 특성 길이로 선택하여 해석하였다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

본 CCFL 실험에 사용된 유체는 물과 증기이고, 그림 1은 CCFL 실험 장치도를 보여주고 있다. 그림 1에서 보는 바와 같이 실험장치는 Regulator, 주입수 탱크, 직류 모터 펌프, 파이프와 밸브 및 계측기들로 구성하였다. 저장수 탱크에 담긴 증류수는 직류 모터(moter)에 연결

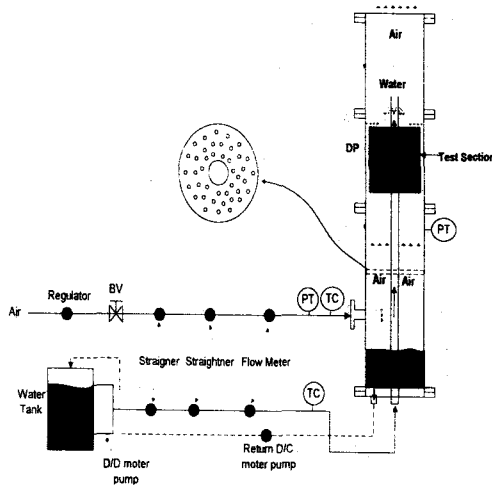


Fig 1. The Schematic Diagram of Experimental Facility

된 펌프에 의해 공급되고 물 유량계에 의해 측정

된 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.

공기의 요동을 완화시켜주고 공기 유량의 변화를 최소화하기 위해 설치한 Regulator를 통해 공급된 공기는 공기 유량계에 의해 측정이 되어 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 외부 실린더의 경우 0.1%(0.6mm) 정도의 기계적인 공차를 가지고 있었다. 이로 인해 간극의 크기가 일정하지 않았고 얇은 plate를 사용하여 간극 크기를 일정하게 유지하였다.

3.2 실험방법

실험수행시 먼저 외부 파이프와 내부 실린더를 장착함으로써 간극의 크기를 조절한 후, 실험부에 주입할 증류수 유량을 고정하고, 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. 만약 실험부 상단에 주입된 증류수가 쌓이지 않거나 간극 상·하부에서 차압이 급격하게 증가 현상이 나타나지 않으면 공기 유량을 더 증가시킨다. 공기 유량을 증가시켜 실험부 상단에 증류수가 축적되거나 차압이 급격하게 증가할 경우 CCFL 이 발생한 것으로 간주하고 실험을 종료한다.

이 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 판단된다. 즉, 부분적으로 CCFL 이 발생하였다 하더라도 실험부 상단에 공급된 물은 간극을 통과하여 실험부 하단으로 모두 내려오기 때문이다. 상세한 실험 수행절차는 다음과 같다.

- (1) 외부 파이프와 내부 실린더를 장착하여 간극의 크기를 고정한다.
- (2) 기계적인 공차로 인해 간극이 일정하지 않을 경우 얇은 plate를 사용하여 간극을 일정하게 유지시켜 준다.
- (3) 실험부 상단에 공급할 증류수의 양을 정해진 값으로 유지한다.
- (4) 공기 유량을 0 에서부터 시작하여 3~30분 간격을 두고 계단식으로 증가시킨다.
- (5) 공기 유량을 증가시킨 후 간극에서의 수력학적 현상과 실험부 상단에 증류수가 축

적되는지를 육안으로 관찰함과 동시에 HP-VXI 데이터 획득장치를 통해 간극 상·하부의 차압 변화를 관찰한다.

- (6) 실험부 상단에 증류수가 축적되지 않으면 공기 유량을 증가시키고 (4)와 (5)의 과정을 반복하여 수행한다.
- (7) 간극에서 차압이 급격하게 증가하거나 공급된 증류수가 실험부 상단에 쌓이면 CCFL 실험을 종료하고 데이터를 저장한다.
- (8) 증류수 유량을 증가시키고 (3)에서 (7)의 과정을 반복 수행한다.

4. 실험결과 및 고찰

1, 2 mm 환형 간극에서 실험을 수행한 결과 온도, 압력 및 유량 범위를 표 1에 나타내었다. 가시화를 통해 간극에서 이상유동 현상을 육안으로 관찰한 결과, 공급되는 공기 유량이 작은 상태에서도 국부적으로 CCFL이 발생하였지만 실험부 상단에 증류수는 쌓이지 않았다.

Table 1. The Experimental Conditions

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 (\pm 0.6 mm)
간극의 크기	1. 2 mm

공기 유량을 단계적으로 증가시키며 실험부에서

일어나는 현상을 주시한 결과 공기 유량을 CCFL point 근처까지 증가시켰을 때 실험부 상단에 증류수가 축적되었다가 다시 하부 공동으로 흘러내리는 것을 볼 수 있었고 이러한 현상은 불규칙적으로 반복되었다. 이 상태에서 공기 유량을 조금만 증가시켜도 실험부 상단에 증류수가 축적되는 것을 볼 수 있었다. 또한 간극의 상·하부의 차압의 변화를 분석한 결과 공기 유량이 적은 상태에서는 차압 증가가 미소하였지만 CCFL 이 일어나기 직전과 CCFL 이 발생하였을 때 차압이 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있었으며 이러한 경향을 그림 2에 나타내었다.

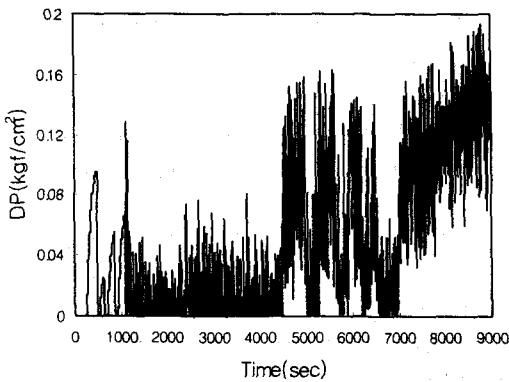


Fig 2. The Relation Between Air Flow Rate and Differential Pressure

그림 2에 나타낸 바와 같이 1000~4500sec 사이에서는 차압 변화가 크지 않음을 알 수 있고, 4500~7000 sec 사이에서는 CCFL이 일어나기 직전의 차압 변화를 보여주고 있으며 차압이 oscillation 하는 것을 볼 수 있다. 이는 실험부 상단에 공급된 증류수가 쌓였다가 다시 하부 공동으로 흘러내리기 때문이다. 7000 sec 이후는 CCFL 이 발생하였을 때의 차압 변화를 보여주고 있으며 차압이 일정하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 차압의 증가는 실험부 상단

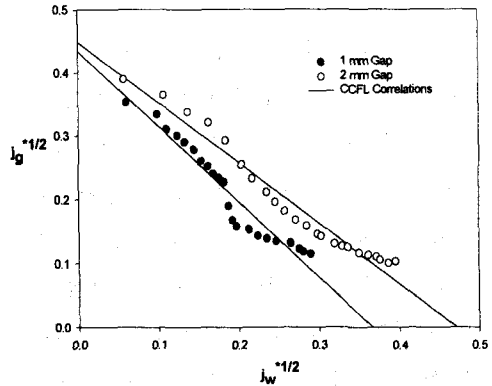


Fig 3. The Relation Between Air Flow Rate and Water Flow Rate in Condition with CCFL Occurrence

에 공급된 증류수가 시간이 경과함에 따라 축적되기 때문이다. CCFL 이 발생하였을 때 실험에서 얻은 데이터를 무차원화한 형태로 공기 유량과 증류수 유량과의 관계를 Wallis parameter로 그림 3에 도시하였다. 그림 3에서 보는 바와 같이 1, 2 mm 간극에서 실험 결과는 비슷한 경향을 보여주고 있음을 알 수 있지만 1 mm 간극($j_g^{1/2}=0.183$, $j_w^{1/2}=0.227$)인 지점에서 공기유량이 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 1 mm의 좁은 간극에서 기계적 공차로 인한 간극 크기의 불확실성과 표면장력에 기인된 것으로 판단된다. 2 mm 간극 실험에서는 간극 크기에 대한 불확실성이 어느 정도 상쇄되고 표면장력의 효과는 나타나지 않은 것으로 판단된다. 1, 2 mm 간극 실험결과 Wallis parameter 형태로 제시한 실험식을 아래와 같다.

$$j_g^{*1/2} + 1.08j_w^{*1/2} = 0.287 \text{ for 1 mm (2)}$$

$$j_g^{*1/2} + 0.93j_w^{*1/2} = 0.337 \text{ for 2 mm (3)}$$

5. 결론

가시화를 통해 곡률 반경이 큰 대형 환상관의 간극 크기(1.2 mm)에서 실험부 상단에 공급하는 증류수 유량을 고정시키고 공기 유량을 단계적으로 증가시키면서 실험을 수행한 결과, 공기 유량이 작을 때는 차압 변화가 크지 않음을 알 수 있었고 공기 유량이 CCFL 근처에 도달했을 때는 차압이 급격하게 증가함과 동시에 실험부 상단에 증류수가 축적되었다가 하부 공동으로 흘러내리는 것을 볼 수 있었다. 이 상태에서 공기 유량을 조금만 증가시켜도 증류수는 실험부 상단에 축적되었고 차압은 증가하였다. 실험에서 얻은 데이터를 Wallis parameter 형태로 무차원화시켜, 공기 유량과 증류수 유량의 관계로 도시한 결과 1 mm 간극에서는 기계적 공차로 인한 간극 크기의 불확실성이 상당히 컸다. 또한, 1 mm 실험부의 좁은 간극에서 표면장력의 효과가 CCFL 현상에 크게 작용하였다. 이러한 영향으로 인해 1 mm 간극에서 CCFL 상관식이 jump 하는 경향을 보였지만 2 mm의 간극 실험에서는 이러한 두 가지의 효과가 미미하였다. 간극의 크기가 증가함에 따라 기계적인 공차로 인한 간극 크기의 불확실성이 감소하였지만 이에 대한 영향을 무시할 수 없을 것으로 생각되며 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 과제의 일환으로 수행하였습니다.

참고문헌

- (1) Rempe, J. L., Wolf, J. R., Chavez, A.A., Condie, K. G., Hargman, 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, 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) Sudō, 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, 48-52.

(1)