

대형 환상관 간극에서의 CCFL에 대한  
실험 연구

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

이승진 · 박래준 · 김상백 · 강경호

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

정지환

천안외국어대학

충청남도 천안시 안서동

요 약

SONATA-IV/VISU-II 실험을 통하여 반구형 간극에서의 임계출력에 CCFL(Counter Current Flow Limit)이 큰 영향을 미친다는 것을 확인하여 대형 환상관 간극에서의 CCFL 실험을 수행하고 있다. 본 실험의 목적은 대형 환상관에서 형성된 좁은 간극(1 mm)이 CCFL에 미치는 영향을 정량화하고 CCFL이 반구형 히터 표면에 전역건조를 일으키는 기구라는 사실을 증명하는 것이다. 환형 간극에서 일어나는 이상유동 현상을 이해하기 위해 실험부를 가시화하였고 이를 통해 실험부 상단에 공급된 증류수가 축적되는지를 육안으로 관찰함과 동시에 간극의 상·하부 차압이 급격하게 증가하는 시점을 CCFL이라 정의하여 실험을 수행하였다. 곡률 반경이 큰 환상관 간극에서 실험을 수행한 결과, 공기 유량이 적을 때 차압 증가는 크지 않았고 공기 유량을 충분히 증가시켜 CCFL이 발생하였을 때는 차압이 급격하게 증가함과 동시에 증류수는 실험부 상단에 축적되었다.

Abstract

A CCFL test have 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. The objectives of the CCFL experiments are to investigate the small gap size(1 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 a 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.

## 1. 서론

기체와 액체가 서로 반대 방향으로 유동하는 형태는 유체를 이용하는 화학 공장이나 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 유동 형태는 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 하며 원전의 안정성과 관련하여 매우 중요시 되고 있으며 이에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 1979년 TMI-2 원전의 중대사고에서 노심용융물이 원자로용기 하반구에 재배치 되었지만 원자로 용기의 건전성은 유지되었다. 이는 기존의 사고해석에 예견하지 못했던 새로운 냉각기구가 존재함을 의미하는 것이다. 노심용융물이 충분히 냉각되도록 작용을 한 냉각기구로 여러가지 유형이 있지만 Rempe 등[1]은 고화된 노심용융물과 원자로 용기 사이에 형성된 간극을 통한 냉각효과가 이들 중 가장 크게 기여했을 것이라고 평가하였다.

반구형 간극에서 수력학적 현상을 관찰하는 VISU(Visualization)-II 실험과 임계출력을 정량화하는 SONATA-IV/CHFG 실험[2, 3]을 통하여 반구형 간극에서의 임계출력에 CCFL 이 큰 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 따라서 본 실험적 연구의 목적은 CHFG 실험장치와 같은 간극 크기(1 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 전역조건을 일으키는 기구라는 사실을 증명하는 것이다. 대형 환상관의 간극(1 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. 기존 연구 현황 및 실험 내용

좁은 간극에서 역류유동 제한현상에 대해 수행된 기존의 연구를 살펴보면 Mayinger[4] 등에 의한 비상노심 냉각수의 bypass, Lee[5] 등에 의한 원자로 압력용기 직접주입 성능평가, Cheng[6], Mishima 와 Nishihara[7] 및 Sudo와 Kaminaga[8] 등에 의한 연구용 원자로의 직각 연료 성능평가 등이 수행되었다. Koizumi[9] 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 number이며 다음과 같다.

$$[\text{Wallis parameter}] \quad j_g^{+1/2} + m_w j_l^{+1/2} = C_w \quad (1)$$

$$[\text{Kutateladze number}] \quad K_g^{+1/2} + m_k K_l^{+1/2} = C_k \quad (2)$$

여기서,

$$j_k^+ = j_k \sqrt{\frac{\rho_k}{gD(\rho_l - \rho_p)}}, \quad K_k^+ = j_k^4 \sqrt{\frac{\rho_k^2}{g\sigma(\rho_l - \rho_p)}}$$

이다. 위 식에서  $\rho$ ,  $g$ ,  $D$ ,  $\sigma$  는 각각 밀도, 중력가속도, 표면장력, 내부실린더의 직경, 밀도이며, 위의 두 무차원수의 유일한 차이는 특성길이의 선택이다. Kutateladze number 가 Taylor 파장 이론을 이용하는 반면 Wallis parameter 는 직경, 간극의 크기, 폭 등과 같은 유로의 기하학적 길이를 이용한다. 이러한 근거로 판단하면 CCFL 과 같이 유체가 불안정한 형태로 일어나는 현상을 설명할 때 Kutateladze number 가 보다 더 적절할 것으로 생각되나 Wallis parameter 도 널리 사용되고 있다. CCFL 모델을 개발하거나 측정값을 수식화 할 때 어떠한 길이를 특성 길이로 이용할 것인지를 결정해야 하는데 본 실험에서는 실험부의 직경을 특성 길이로 선택하여 실험식을 제시하였다.

### 3. 실험 장치

본 CCFL 실험에 사용된 유체는 물과 증기이고, 그림 1과 그림 2는 CCFL 실험 장치 개략도와 실험 장치도(사진)를 보여주고 있다. 실험장치는 그림에서 보는 바와 같이 주입수 탱크, 공기 완충 탱크, 펌프, 파이프와 밸브 및 계측기들로 구성하였다. 저장수 탱크에 담긴 증류수는 직류 모터(moter)에 연결된 펌프에 의해 공급되고 터빈 유량계에 의해 측정된 증류수는 아크릴 내부에 연결된 파이프에 의해 실험부 상단에 공급이 되며 실험부를 지나 실험장치 하부로 흘러내린 증류수는 펌프를 통하여 다시 저장수 탱크로 보내진다.

공기의 요동을 완화시켜주고 공기 유량의 변화를 최소화하기 위해 설치한 완충 탱크를 통해 공급된 공기는 질량 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, 계통압력, 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 길이는 각각 500 mm 와 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 1~ 1.3 mm 로 일정하게 유지하였다.

### 4. 실험 방법

실험수행시 먼저 외부 파이프와 내부 실린더를 장착함으로써 간극의 크기를 조절한 후, 실험부에 주입할 증류수 유량을 고정하고, 이 상태에서 공기 유량을 최소 5분 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 짧아지 않거나 간극 상·하부에서 차압이 급격하게 증가 현상이 나타나지 않으면 공기 유량을 더 증가시킨다. 공기 유량을 증가시켜 실험부 상단에 증류수가 축적되거나 차압이 급

격하게 증가할 경우 CCFL 이 발생한 것으로 간주하고 실험을 종료한다.

이 실험에서는 간극에서 차압이 급격하게 증가하거나 실험부 상단에 공급된 증류수가 축적 될 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 최소 5분 간격을 두고 계단식으로 증가시킨다.
- (5) 공기 유량을 증가시킨 후 간극에서의 수력학적 현상과 실험부 상단에 증류수가 축적되는 지를 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.

## 5. 실험 결과 및 고찰

1mm 환형 간극에서 실험을 수행한 결과를 온도, 압력 및 유량의 범위에 대하여 표 1에 나타내었다. 가시화를 통해 간극에서 이상유동 현상을 육안으로 관찰한 결과, 공급되는 공기 유량이 작은 상태에서도 국부적으로 CCFL이 발생하였지만 실험부 상단에 증류수는 쌓이지 않았으며 이런 현상은 실험부 제작상 기계적인 공차에 기인한 것으로 판단된다.

실험 수행시 공기 유량을 5분 간격으로 단계적으로 증가시켰고 CCFL 이 발생하기 직전과 발생하였을 때는 10~30분 정도를 기다리면서 육안으로 주시한 결과 CCFL point 근처에서는 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 3와 그림 4에 나타내었다. 그림에서 보면 실험부에 공급된 증류수 유량이 큰 경우 간극의 상·하부에서 차압의 변화가 약간 크게 나타나고 있음을 볼 수가 있다. 이러한 현상은 간극 크기는 일정한데 주입되는 물이 양이 많으면 그만큼 물과 공기가 접촉하는 면적이 많아지게 되고 공기의 유로를 방해하는 역할을 하며 이로 인해 차압 변화가 더 크게 나타나는 것이다.

실험에서 얻은 데이터를 무차원화한 형태로 공기 유량과 증류수 유량과의 관계를 Wallis parameter 와 Kutateladze number 로 그림 5와 그림 6에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 공기 유량과 증류수 유량과의 관계는 증류수 유량이 0.27 Kg/sec 일 때를 전후로 하여 거의 선형적인 경향을 보이고 있었다. CCFL 실험은 현상이 매우 복잡한 특성을 가지고 있어서 해석 모델을 개발하기 위해서는 많은 어려움이 있다. 따라서 이러한 어려움을 피하기 위해 많은 많은 실험식이 개발되고 있는데 이중 가장 널리 사용되는 실험식의 형태는 Wallis parameter 와 Kutateladze number 이며 본 실험에서도 이러한 무차원수의 형태로 실험식을 개발하였다. 개발

한 실험식은 실험에서 얻은 데이터를 근거로 하여 선형보간법을 적용하였고 실험식의 형태는 아래와 같다.

증류수 유량이 0.27Kg/sec 보다 적을 때

$$[\text{Wallis parameter}] \quad j_g^{*1/2} + 0.384 j_f^{*1/2} = 0.618 \quad (3)$$

$$[\text{Kutateladze number}] \quad K_g^{*1/2} + 0.37 K_f^{*1/2} = 2.25 \quad (4)$$

증류수 유량이 0.27Kg/sec 보다 클 때는

$$[\text{Wallis parameter}] \quad j_g^{*1/2} + 1.10 j_f^{*1/2} = 1.00 \quad (5)$$

$$[\text{Kutateladze number}] \quad K_g^{*1/2} + 1.12 K_f^{*1/2} = 3.78 \quad (6)$$

이로 개발한 실험식 결과를 그림 5와 그림 6에서 실험 데이터와 함께 보여주고 있다. 그림에서 증류수 유량이 0.27kg/sec 인 경우를 기준으로 하여 거의 선형적인 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

## 6. 결론 및 향후 연구 계획

곡률 반경이 큰 대형 환상관의 간극 크기(1 mm)에 공급하는 증류수 유량을 고정하고 공기 유량을 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 축적되었고 차압은 약간 증가하였다. 또한 CCFL이 발생하였을 때 공급되는 증류수 유량에 따른 차압의 변화를 관찰한 결과 공급되는 유량이 적을 때보다는 많을 때 차압이 약간 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 1 mm의 환형 간극에서 개발한 실험식은 Wallis parameter와 Kutateladze number를 근거로 하였으며, 공급되는 증류수 유량이 0.27 kg/sec인 경우를 기준으로 하여 거의 선형적인 경향을 보여 주었다.

직경이 500 mm 인 외부 파이프 가공시 기계적인 공차로 인하여 간극의 크기는 일정하지 않았고 이에 따라 간극을 통한 공기 유량은 큰 차이를 보였으며 이러한 현상은 차후에 수행 할 0.5 mm 간극에서는 더욱 민감하게 나타날 것으로 판단된다. 간극의 크기를 일정하게 유지하기 위해 얇은 plate를 사용하였고 그 결과, 환상관의 모든 간극을 통과해 흐르는 공기 유량은 거의 일정하였다. 현재까지는 1 mm 간극 크기에 대해 실험을 수행하였고, 차후 0.5, 2, 5mm 간극에서 실험을 수행하여 환형 간극의 크기가 CCFL에 미치는 영향을 평가함과 동시에 상관식의 형태를 제시하고자 한다.

## 감사의 글

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 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] 정지환 외, 1997, 반구형 간극에서 CHF가 발생했을 때 히터표면의 온도분포와 CHF 측정, 한국원자력학회 추계학술발표회 논문집, pp. 675-680, 경북대학교, 대구
- [4] Mayinger, F., Weiss, P., Wolfert, K., 1993, Two-phase flow phenomena in full-scale reactor geometry, Nuclear Engineering and Design 145, 47-61
- [5] 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
- [6] Cheng, L.Y., Counter-current flow limitation in thin rectangular channels, BNL Report, BNL-44836, 1990
- [7] 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
- [8] 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
- [9] 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.

표 1. CCFL 실험 인자 및 조건

내 용	범 위	비 고
공기 온도	5.3 ~ 10.9 °C	
증류수 온도	2.6 ~ 11.3 °C	
공기 및 증류수 압력	대기압	거의 대기압 상태로 주입됨
공기 유량	0.006 ~ 0.034 Kg/sec	
증류수 유량	0.073 ~ 0.474 Kg/sec	
내부 실린더 직경	498 mm	기계적 공차는 없었음
내부 실린더 높이	250 mm	기계적 공차는 없었음
외부 파이프 직경	500 mm (+ 0.6 mm)	기계적 공차(0.1 %)
간극의 크기	1 ~ 1.3 mm	얇은 plate를 사용함

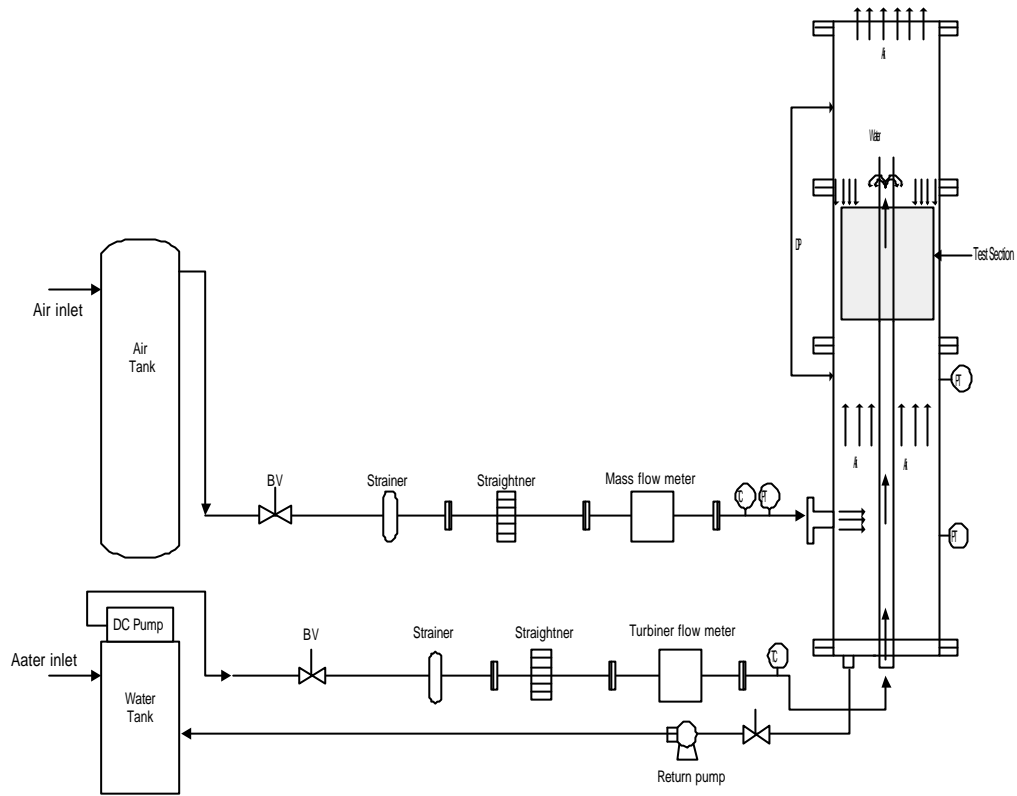


그림 1. CCFL 실험 장치 설계도



그림 2. CCFL 실험 장치도

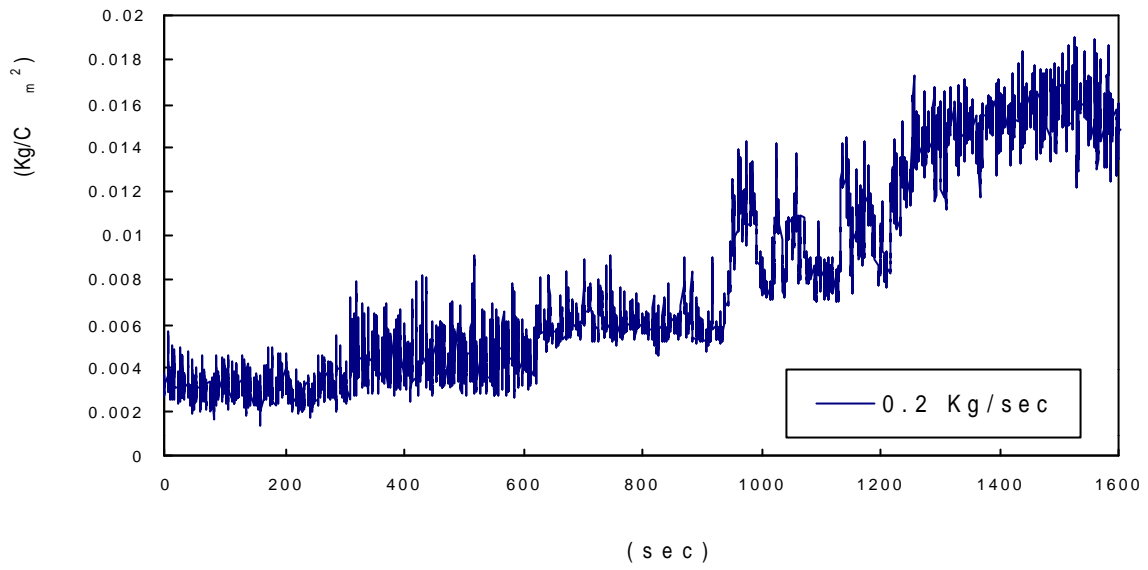


그림 3. 공기 유량과 차압의 관계

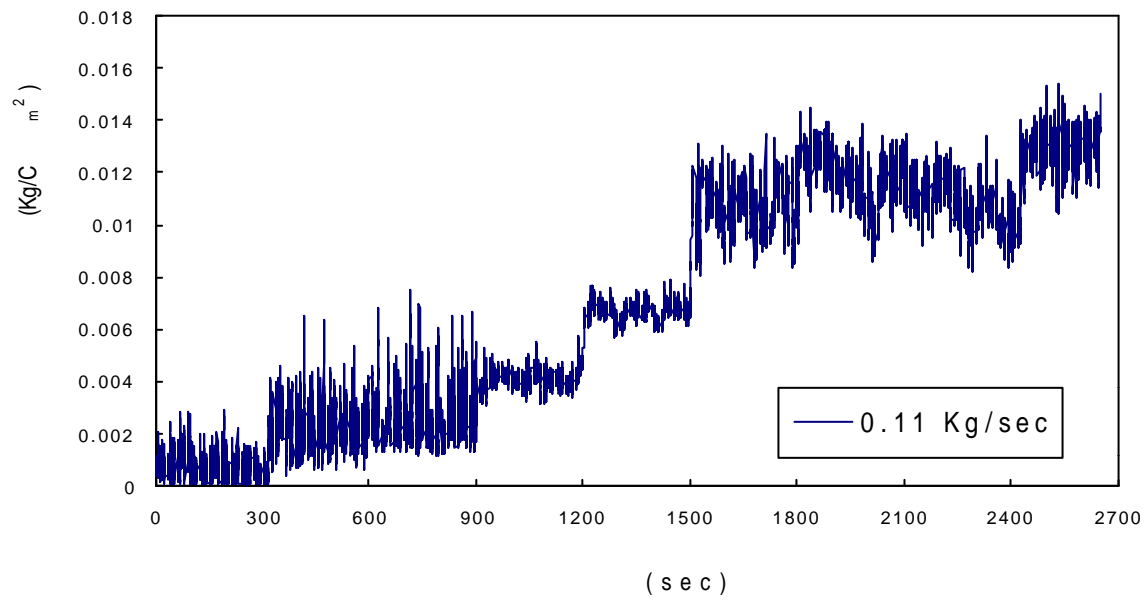


그림 4. 공기 유량과 차압의 관계



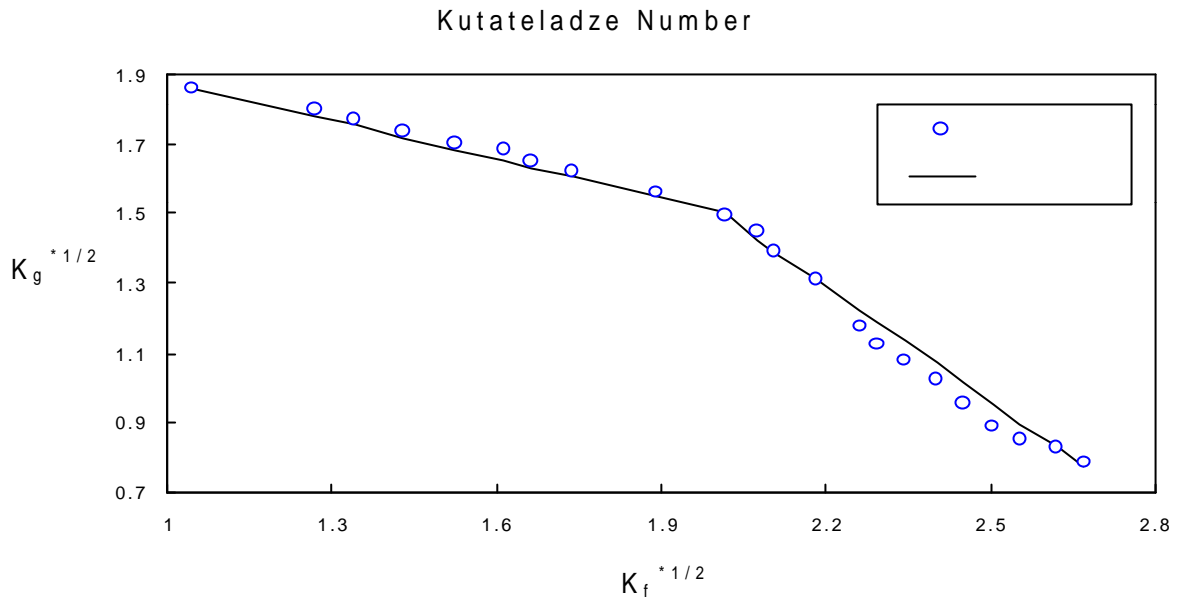


그림 5. CCFL 발생시 공기 유량과 증류수 유량의 관계

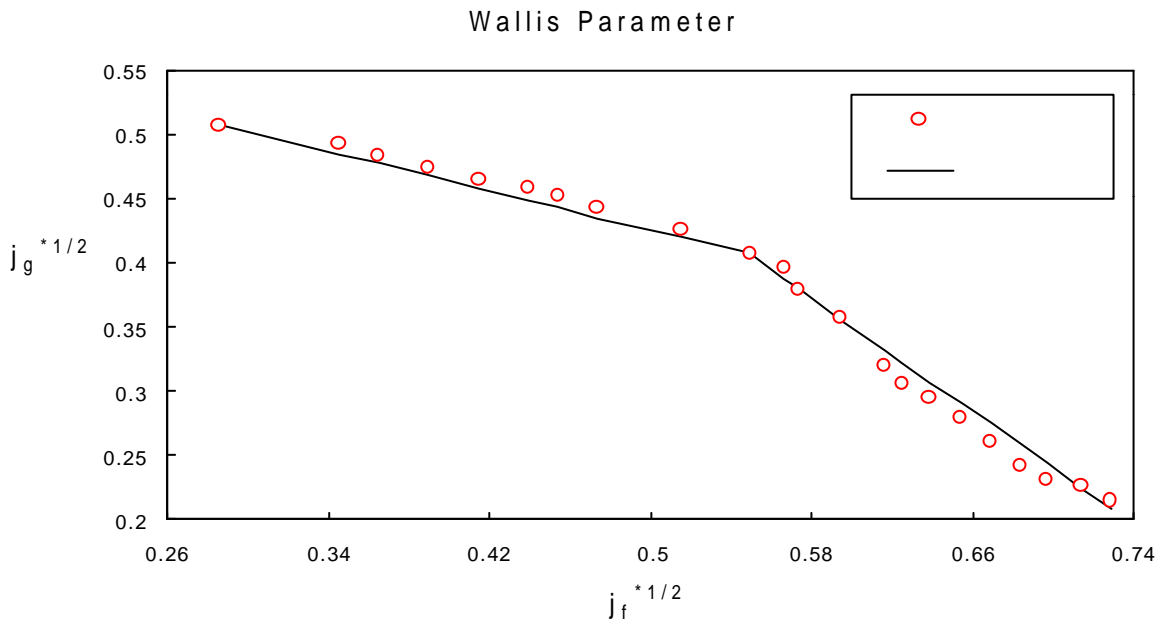


그림 6. CCFL 발생시 공기 유량과 증류수 유량의 관계