

## 반구형 간극에서 CHF 가 발생했을 때 히터표면의 온도변화와 CHF 측정

정지환, 박래준, 조영로, 김상백, 김희동

한국원자력연구소

### 요 약

반구형 간극에서 히터 출력이 임계열유속(CHF)에 이르렀을 때 히터표면의 온도 변화와 CHF 값을 측정하였다. 반구형 히터의 직경은 498mm 이고 간극은 1, 2mm 에서 실험을 수행하였다. 히터표면의 온도는 항상 간극 상단의 특정 부분에서부터 증가하기 시작하였다. 즉, 이 곳에서 국부적인 dryout 이 발생한 것으로 판단된다. 히터의 열속이 증가함에 따라 dryout 부분은 원주방향과 아래 방향으로 확장되었다. 한편 임계열유속보다 작은 열속에서는 dryout 영역이 변하지 않는 정상상태가 존재하였으나 임계열유속에서는 열속이 고정되어 있어도 dryout 영역이 스스로 확장되어 나갔다. 이 실험은 계속 진행중이며 현재까지 측정된 CHF 값을 제시하였다. CHF 값은 간극을 대상으로 개발된 기존의 실험식보다 낮게 측정되었다.

### 1. 개요

1979년에 발생한 TMI-2 원자력발전소 사고는 노심이 용융되는 중대사고로 진행되었기 때문에 중대사고 연구에 가장 큰 영향을 주었다. 기존의 중대사고 해석 코드들의 예측과 달리, 원자로 압력용기가 중대사고에도 건전성을 유지한 데에는 지금까지 생각하지 못했던 냉각 기구가 존재한다는 것을 의미한다. 노심용융물이 충분히 냉각되도록 작용한 냉각 기구로서 다음의 세 가지 기구가 제시되었다. 첫째, 크립(creep)에 의해서 압력용기가 늘어나거나 용융물이 수축되어 노심용융물과 압력용기 사이에 간극이 형성되고 이 간극을 통하여 냉각되는 경우이다. 둘째, 용융물이 고화되면서 그 사이에 크랙(crack)이 형성되고 이 크랙을 통하여 용융물이 냉각되는 경우이다. 셋째, 용융물이 수축될 때 상부 표면이 함몰되는 형태를 이룸으로써 냉각수와와의 열전달 면적이 증가하는 효과를 보는 경우이다. 이 세가지 유형의 열전달 기구중 실제로 어느 기구가 얼마 만큼 노심용융물 냉각에 기여했는 지는 아직까지 밝혀지지 않았다. Rempe 등[1] 은 간단한 계산을 통하여 고화된 용융물과 압력용기 사이에 형성된 간극을 통한 냉각 효과가 가장 크게 기여했을 것이라고 평가하였다. 간극을 통한 잔열 제거가 효과적이기 위해서는 간극을 통해서 냉각수가 계속 공급되고 핵비등 열전달이 지속적으로 유지되어야 한다. 간극을 통해 제거할 수 있는 열량의 최대치가 임계열유속(CHF) 이므로 간극을 통한 냉각 가능성을 평가하기 위해서는 일차적으로 간극에서의 CHF에 대한 연구가 필요하다.

현재까지 발표된 문헌에서 반구형 간극에서의 CHF에 관한 자료는 찾을 수 없으며 이러한 구조에서 일어나는 비등 현상 및 CHF 를 일으키는 기구 등을 연구한 문헌은 드물다. 반구형 간극과 유사한 형태로서 Sudo & Kaminaga[2]는 직사각형 유로에서, Chang & Yao[3]는 환형관에서

그리고 Monde et al.[4] 과 Katto & Kosho[5]는 원형 평판 사이의 간극에서 CHF 실험을 수행하였다. 반구형 간극에서 일어나는 이상 유체의 거동을 관찰하여 CHF 를 일으키는 구동 기구가 무엇인지를 밝히기 위한 가시화 실험을 수행하여 그 결과를 '한국원자력학회 97' 춘계학술 발표회'에서 발표하였다[6]. 이 연구에서 반구형 간극에서는 Counter-Current Flow Limit(CCFL) 현상이 CHF를 유발시킨다고 보고하였다. 본 실험의 목적은 반구형 간극에서의 CHF 값을 측정하고, CHF가 일어날 때 온도 분포의 변화를 측정하여 국부적인 dryout 과 CHF 와의 관계를 명확히 하는데 있다. 실험장치는 참고문헌[6]에 발표한 가시화 실험으로 부터 얻은 지식을 반영하여 제작하였다.

## 2. 실험 장치 및 수행 절차

그림 1은 실험장치의 개략도를 보여준다. 40kW 출력의 반구형 몰드히터는 구리로 만든 반구형 팍(shell) 안에 설치되며, 이들은 외부 압력용기 상단에 연결되어 지지된다. 구리팍의 외경은 498mm 이고 압력용기는 0.5, 1, 2mm 간극을 만들도록 내경을 달리한 세개를 제작하였다. 냉각유체로는 물을 사용하며 발생된 증기는 150cm 위에 설치된 열교환기에 의해서 냉각된다. 응축수는 다시 압력용기 안으로 되돌아와 폐쇄회로를 이룬다. 열교환기는 히터에서 발생된 열을 제거하는 역할 뿐만아니라 계통의 압력을 원하는 값으로 유지하게 하는 역할도 한다. 즉, 열교환기의 이차측 냉각수는 공기로 작동되는 제어 밸브를 이용하여 자동제어된다. 실제 실험 수행중에 관찰한 결과 계통압력은  $\pm 0.5\text{psia}$  의 오차범위 안에서 제어되었다. 히터가 항상 물속에 잠겨있는지 감시하기 위하여 수위 측정기를 설치하였고 발생된 증기와 응축수 및 열교환기 냉각수의 입출구 온도 및 유량을 측정한다. CHF 발생여부 감지와 각 부분의 열속을 측정하기 위하여 히터를 안에 두고 있는 구리팍에 33쌍의 K-형 열전대를 설치하고 열손실을 측정하기 위해 압력용기에도 5쌍의 열전대를 설치하였다. 그림 2 는 구리팍에 설치된 열전대의 위치와 설치 깊이를 나타낸다. 대부분의 열전대는 열속측정을 위해 구리팍 안에 설치되었지만, 5-8, 21-24 번 열전대는 하나가 히터표면의 온도를 측정하도록 설치되어 있다. 모든 계측 신호들은 HP-VXI 데이터획득 장치로 읽어진다.

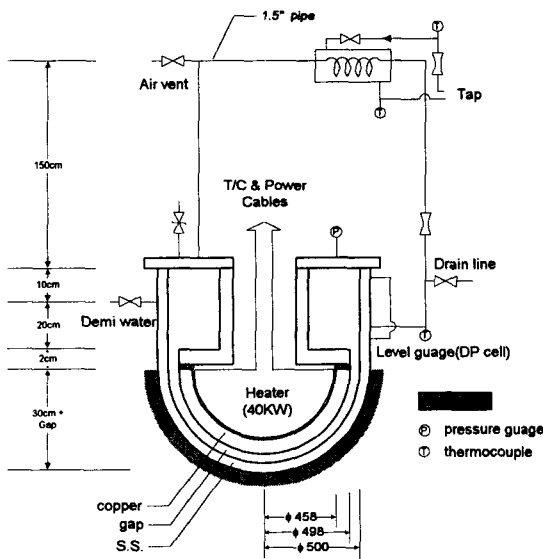


그림 1. 실험장치 개략도

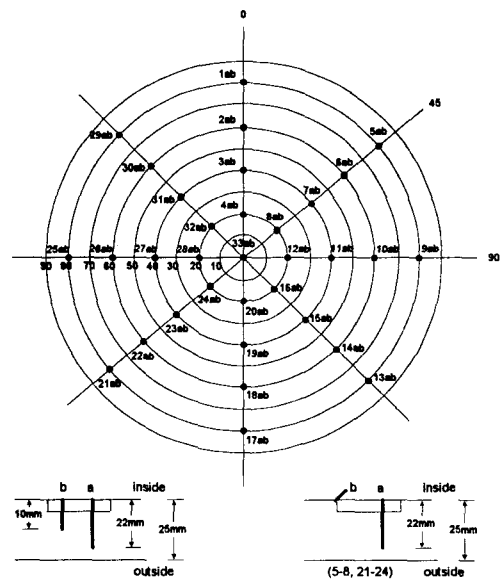


그림 2. 구리팍에 설치된 열전대

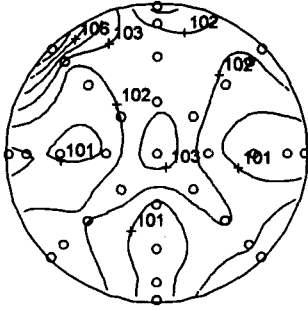
실험 수행 절차는 다음과 같다. 실험 시작 전에 원하는 간격을 만드는 압력용기를 설치하고 히터 상단과 압력용기 상단 중간에 수위를 유지시킨다. 히터 출력을 약 50%에 조정한 후 압력계어의 설정치를 원하는 값으로 조정한다. 계통 압력이 설정치에 이르면 테이타 획득 장치를 가동하고 실험을 시작한다. 히터 출력을 약간 올리고 히터표면과 구리판의 온도가 더이상 변하지 않는 정상 상태에 이를 때까지 기다린다. 이 과정을 반복하면 온도가 멈추지 않고 계속 증가하는 지점에 이른다. CHF 발생이 확실해지면 히터출력을 낮추고 테이타 획득 장치를 정지시킨다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

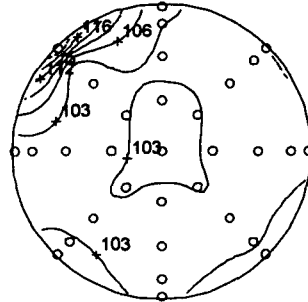
그림 3과 4는 간극이 2mm일 때 대기압 조건에서 측정한 온도변화를 보여준다. 이 그림은 반구를 평면에 사영시킨 모습이므로 원의 가장자리는 반구의 상단, 즉, 간극이 풀(pool)과 연결되는 부분이고 원의 중심은 반구의 제일 하단에 해당한다. 원 안에 방사형 방향으로 그려진 조그만 원들은 온도측정에 사용된 열전대의 위치를 나타낸다. 그림 3(a)에서 3(d)는 구리판 표면에서의 평균열속이 32, 42, 52, 60 kW/m<sup>2</sup> 일 때 구리판 바깥면으로부터 3mm 깊이에 설치한 열전대로부터 측정된 온도분포이다. 히터 출력을 변화시키면 약 10-30분 경과 후에 구리판과 히터 온도가 정상상태에 도달한다. 이 그림들은 정상상태에서 측정된 것 들이다. 열속이 32 kW/m<sup>2</sup> 일 때 까지는 온도가 거의 균일하게 분포한다. 즉, 반구면 전체에서 비등열전달이 고르게 일어나고 있는 것이다. 열속이 42 kW/m<sup>2</sup> 일 때에는 왼쪽 상단의 온도가 상승한 것을 볼 수 있다. 열속이 증가할수록 이 부분의 온도는 증가하며 원주방향과 아래 방향으로 전파되어가는 것을 알 수 있다. 이는 가시화 실험[6]에서 관찰한 결과로 유추해볼 때 이 곳에서 국부적인 dryout 이 발생하여 열속 증가와 함께 그 영역이 확장되었기 때문으로 판단된다. 이 곳에서 국부적인 dryout 이 먼저 발생한 이유는 이 곳의 간격이 상대적으로 작았기 때문이라고 생각된다. 그러나 그 이유와 정확한 간극 크기의 편차는 알 수 없었다. 이 곳의 간극이 다른곳에 비하여 얼마나 작은지 알아보기 위하여 실험후 같은 온도 조건에서 초음파 탐상기를 이용하여 간극을 측정하였다. 그러나 초음파 탐상기의 측정오차 범위 미만의 차이만 감지된 것으로 보아 실제 간극의 차이는 미미한 것으로 여겨진다.

그림 4는 그림 3과 같은 조건에서 열출력을 68 kW/m<sup>2</sup> 로 조정하였을 때 시간 경과에 따른 온도변화를 보여준다. 그림 4는 그림3에서와는 달리 열출력을 고정시켜도 온도가 계속 증가하고 dryout 영역이 확장되어 가는 것을 볼 수 있다. 그림 4(a)에서 등온선이 밀집되어 있지 않은 우측 하단 부분은 100°C 가량의 온도를 유지하고 있으며 이 영역은 시간 경과와 함께 계속 좁아진다. 즉, dryout 영역이 확장되어 가는 것이다. dryout 영역이 확장되는 속도는 시간이 경과할수록 빨라지며, 새로이 dryout 된 부분의 온도 증가율은 이미 dryout 된 영역의 온도 증가율보다 크다. 이 영역이 반구 바닥까지 확장되면 반구 바닥의 온도는 급격히 증가하게 된다. 반구 바닥의 급격한 온도 증가를 관찰하면 히터를 보호하기 위해 실험을 중지하였다. 본 실험에서는 이 때의 열출력을 임계열유속 (CHF) 값이라고 정의하였다.

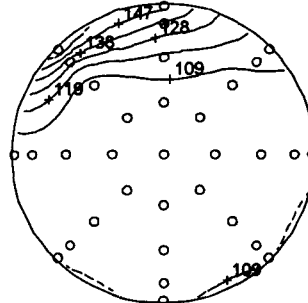
본 실험에서는 열용량이 큰(구리 200kg) 히터를 사용하고 폭이 좁은 반구형 간극에서 실험을 수행하여 열용량이 작은 히터를 사용한 풀(pool)비등 경우나 강제대류 경우와 비교하여 CHF를 정의할 때 차이가 있다. 작은 평판이나 파이프 및 선재를 이용한 CHF 실험의 경우 시편의 열용량이 작기 때문에 안정된 막비등영역에 이르면 시편의 온도가 급격히 증가한다. 이 때를 CHF



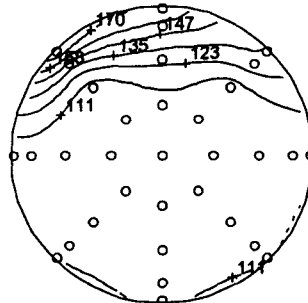
(a)



(b)

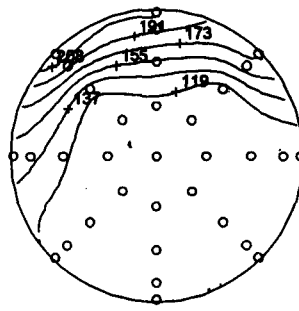


(c)

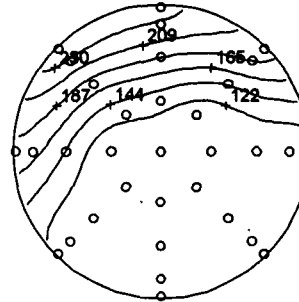


(d)

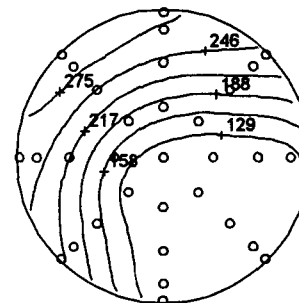
그림 3. 열속증가에 따른 온도변화  
Gap size : 2mm  
평균열속( $\text{kW/m}^2$ ) :  
(a)32 (b)42 (c)52 (d)60



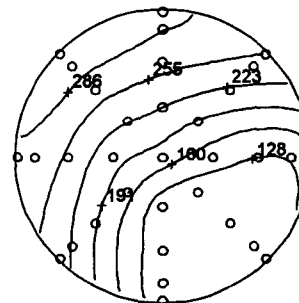
(a)



(b)

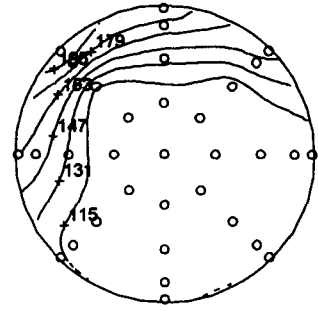


(c)

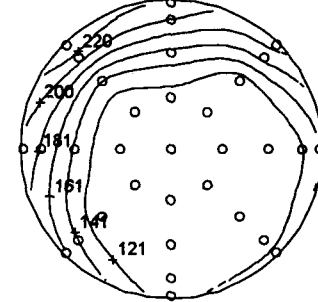


(d)

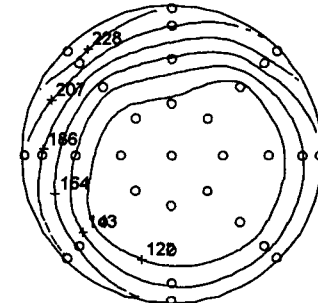
그림 4. CHF 발생시 dryout 영역의 자체확장  
Gap size : 2mm  
평균열속을  $68\text{kW/m}^2$  로 올린후 경과시간(초)  
(a)0 (b)500 (c)1400 (d)1600



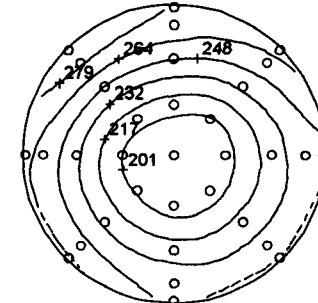
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 5. CHF 발생시 dryout 영역의 자체확장  
Gap size : 1mm  
평균열속을  $60.3\text{kW/m}^2$  로 올린후 경과시간(초)  
(a)0 (b)1000 (c)1500 (d)2500

로 정의하면 된다. 그러나 열용량이 매우 크면 시편의 온도를 상승시키는데 많은 열이 필요하므로 온도가 서서히 증가한다. 국부적인 dryout이 발생하여도 그 곳의 온도는 서서히 증가하며 전도에 의해 다른 곳을 통하여 냉각이 이루어질 수 있으므로 온도증가가 제한될 수 있다. 이 실험에서 국부적인 dryout을 그 위치에서의 CHF 발생으로 정의하지 않은 이유는 다음과 같다. (i) 유동 형태를 관찰할 수 없으므로 온도 측정 결과만 보고서 안정된 막비등이 일어나고 있는지 정확히 판단할 수 없다. (ii) 앞 절에서 언급했듯이 국부적인 dryout 발생은 간극의 크기가 약간만 달라도 영향을 받는다. 따라서 정량화하기 어렵다. (iii) 국부적인 dryout이 발생하여도 전도가 이루어져 결국 물과 접촉한 면을 통하여 냉각된다. 즉, 온도가 계속 증가하지 않고 특정값으로 제한된다. 따라서 간극 전체를 통하여 제거할 수 있는 총 열량을 초과하게 되어 히터의 온도가 계속적으로 증가하게 될 때 CHF가 발생한 것으로 보는 것이 타당하다고 여겨진다. 한편, CHF 값은 구리곽 전체 표면에 대한 평균 열유속 값을 이용하였다.

그림 5는 간극이 1mm일 때 대기압 조건하에서 수행된 결과이다. 평균열속이 60.3kW/m<sup>2</sup> 일 때 CHF가 일어났으며 이 때 시간 경과에 따른 온도변화를 보여준다. 간극이 2mm인 경우와 마찬가지로 좌측 상단에서 국부적인 dryout이 시작되었으며 시간 경과와 함께 이 영역이 확장되어 갔다. dryout은 원주 방향으로 빠르게 확장되어 구리곽의 바닥이 dryout되기 전에 간극 상단 전체가 먼저 dryout되었다. 간극이 2mm인 경우에는 구리곽의 바닥이 dryout되었을 때에도 우측 하단부의 간극은 핵비등을 일으키며 물과 접촉하고 있었음을 그림 4(d)에서 볼 수 있다.

측정된 CHF 값을 본 실험과 유사한 간극에서 CHF 실험을 수행한 Monde 등[4] 과 Chang & Yao[3]의 실험식 값과 비교하여 그림 6에 나타내었다. Monde 등[4]은 수직 평판 사이에 형성된 간극에서 실험을 수행하였고 Chang & Yao[3]는 수직 환상관에서 실험을 수행하여 각각 다음의 관계식을 구하였다.

$$\frac{q_{CHF}''}{\rho_g h_{fg}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_g}{gD\Delta\rho}} = \frac{0.38}{\left(1 + \sqrt{\rho_g / \rho_l}\right)^2 \cdot (L/S)} \quad (1)$$

$$\frac{q_{CHF}''}{\rho_g h_{fg}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_g^2}{g\sigma\Delta\rho}} = \frac{0.16}{1 + 6.7 \times 10^{-4} (\rho_l / \rho_g)^{0.6} (L/S)} \quad (2)$$

비교를 위하여 위 실험식에 본 실험장치의 규격을 대입하였다. Monde et al.은 대기압에서의 본 실험 결과보다 약간 큰 값을 예측하며 Chang & Yao는 훨씬 큰 값을 예측하고 있다. 이는 본 실험 장치의 구조 때문에 CCFL이 간극의 상단에서 일어나 물의 침투를 방해하여 보다 낮은 열출력으로도 CHF가 발생하기 때문으로 여겨진다. 한편 두 실험식의 예측에 비하여 본 실험 결과는 압력 상승에 따른 CHF 값의 증가가 상대적으로 작게 나타났다. 이들 두 실험식은 대기압 조건에서 측정된 값을 이용하여 개발된 관계식이므로 압력증가 효과를 적절히 예측한다고 볼 수는 없다. 따라서 CHF에 대한 압력의 영향은 보다 많은 실험을 수행하여 평가해야 한다.

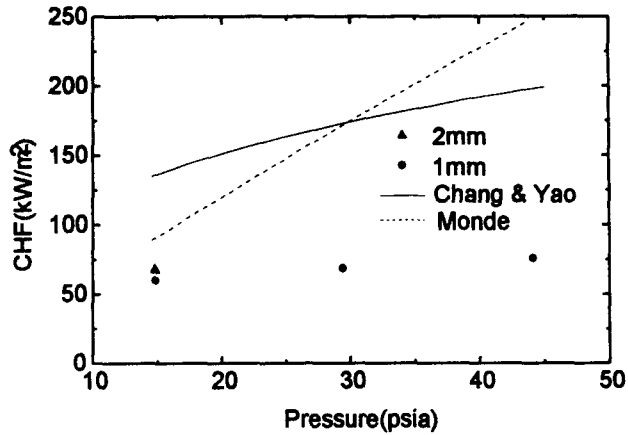


그림 6. 측정된 CHF 값의 비교

#### 4. 결론

반구형 간극을 통한 열제거 용량을 평가하기 위하여 폭이 좁은 반구형 간극에서의 CHF 실험을 수행하고 있다. 현재 1mm 와 2mm 간극에서 냉각수로 물을 이용한 실험을 완료하여 이 결과를 제시하였다. 열출력이 특정 값보다 작을 때는 간극 상단의 특정 위치에서 정상상태의 국부적인 dryout이 발생하며 이 영역은 열출력 증가와 함께 원주 방향 및 반구 아래 방향으로 확장되어 나갔다. 그러나 특정 열출력에 이르면 이 영역은 시간 경과와 함께 저절로 확장되어 나갔다. 이 때를 CHF가 발생한 것으로 정의하였다. 측정된 CHF 값은 다른 형태의 간극에서 개발된 실험식이 예측하는 값보다 작게 나타났다. 본 실험 장치의 구조 때문에 CCFL이 간극의 상단에서 일어나 물의 침투를 방해하여 보다 낮은 열출력에서 CHF가 발생한 것으로 판단된다. 하지만 CHF에 대한 압력의 영향을 평가하기 위해서는 넓은 범위에서 보다 많은 실험이 수행되어야 할 것으로 생각된다.

#### 5. 참고문헌

1. Rempe, J.L., Wolf, J.R., Chavez, S.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. Sudo, Y., Kaminaga, M., A CHF characteristic for downward flow in a narrow vertical rectangular channel heated from both sides, Int. J. Multiphase Flow 15(5), pp.755-766, 1989
3. Chang Y., Yao, S., Critical heat flux of narrow vertical annuli with closed bottoms, J. of Heat Transfer Vol.105, pp.192-195, 1983
4. Monde, M., Kusuda, H., Uehara, H., Critical heat transfer during natural convective boiling in vertical rectangular channels submerged in saturated liquid, J. Heat Transfer 104, pp.300-303, 1982
5. Katto, Y., Kosho, Y., Critical heat flux of saturated natural convection boiling in a space bounded by two horizontal co-axial disks and heated from below, Int. J. Multiphase Flow 5, pp.219-224, 1979
6. 정지환, 이성재, 김종환, 김상백, 반구형 간극에서의 비등 가시화실험, 한국원자력학회 97' 춘계 학술발표회 논문집, pp.575-580, 1977