

## 구형 간극에서의 임계출력에 관한 상관식 검증 및 보완

하광순\*·박래준\*·김상백\*·김희동\*

### Correlation Verification and Revision of Critical Power in a Hemispherical Narrow Gap

Kwang-Soon Ha\*, Rae-Joon Park\*, Sang-Baik Kim\*, and Hee-Dong Kim\*

**Key Words :** Critical Power(임계출력), Hemispherical Narrow Gap(반구형간극), Two Phase Flow(이상유동), Boiling(비등)

#### Abstract

The CHF(Critical Heat Flux in Gap) test results have been evaluated to quantify the critical powers in hemispherical narrow gaps and Park's correlation has been verified. For verification of the Park's correlation, the critical powers in hemispherical narrow gaps have been measured using water at a pressure of 0.1-0.3 MPa for the hemispherical gap thickness of 1.0mm, and the heated top diameter of 238mm. The measured critical powers were compared with Park's and Monde's correlation. As a results, the Park's correlation was most accurate of other correlations, however, estimated the critical powers somewhat larger than measured ones. So, it was suggested that the diameter factor in Park's correlation should be revised.

#### 1. 서론

원자력 발전소에서 노심 물질이 용융하는 중대사고(severe accident)가 발생하였을 경우 원자로의 안전성을 평가하기 위해서는 원자로용기에 가해지는 열부하를 정확히 예측하는 일[1, 2]이 필요하다. 특히 TMI-2 원전 중대사고 이후 원자로용기 반구와 노심용융물 사이에 존재하는 간극을 통한 냉각 가능성이 부각되었으며, 따라서 간극에서의 열제거량을 정량화하는 것은 원자로의 안전 여유도를 계산하는데 있어서 필수적인 사항이 되었다.

최근 한국원자력연구소에서는 SONATA-IV/CHF(Critical Heat Flux in Gap) 실험[3]을 수행한 바 있다. 이 실험은 직경 498mm 반구형 발열체 주변에 형성된 미소 간극을 통해서 제거할 수 있는 임계열량을 정량화한 실험이다. 이 실험의 수행 목적은 직경 498mm 반구형 간극에 있을 수 있는 고유의 냉각기구를 밝히고 이러한 구조에 적용 가능한 임계열속 상관식을 개발하여 반구형 간극을 통하여 제거할 수 있는 최대열량을 결정하는 것이었다. 이 실험은 증류수와 비등점이 46.5. C로 낮은 프레온 R-113을 이용하여 간극의 크기(0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0 mm)와 계통압력(1-10 기압)에 따라 수행하였다. 또한 실험결과를 바탕으로 기존의 평판과 환형 및 반구형 간극에서 개발된 상관식과 종합적으로 비교·분석하였으며, 증류수 실험결과를 이용하여 반구형 간극에 적용할 수 있는 상관식을 임계열속 무차원수를 도입하여 개발하였다.

본 연구의 목적은 직경 238mm 반구형 발열체 주변에 형성된 1mm 간극에서의 임계출력(critical power)을 1, 2, 3기압의 압력범위에서 측정하고, 기존 연구에서 제시한 상관식들의 예측값과 비교, 검증하는 것이다.

#### 2. 실험장치 및 실험방법

Fig.1은 임계출력 실험장치의 전체 개략도이다. 그림에서 보는 바와 같이 본 실험장치는 실험용기, 냉각수 주입계통, 밀폐 냉각수 유동계통, 열교환기, 열교환기 2차측 냉각수 유동계통, 실험결과 획득 및 처리장치(DAS: Data Acquisition System)로 구성되어 있다. 실험용기는 전기 봉히터를 장착한 가열 반구, 반구형 구리곽(shell)의 내부용기, 외부 압력용기로 구성된다. 내부 구리반구는 제작 정밀도를 높이기 위하여 CNC 선반으로 정밀하게 가공하여 제작하였다. 발열부에서 발생된 열은 구리곽을 통해 외부의 간극으로 전달되므로 히터는 구리곽의 안쪽 표면과 잘 접촉하도록 제작되었다.

내부 구리용기와외의 사이에 1.0 mm의 간극이 형성되도록 외부 압력용기를 스테인리스강으로 제작하였다. 외부 압력용기는 내부 구리반구와의 사이에 균일한 간극을 만들고 반구형 부분과 원통형 부분이 정확하게 같은 표면상에 위치할 수 있도록 하기 위해서 하부의 반구 부분, 중간의 원통 부분, 상단의 플렌지 부분으로 구분한 후 한 몸체로 제작하였다. 이후 내부 구리반구와 같이 제작 정밀도를 높이기 위하여 CNC 선반으로 가공하였다. 실험에서 간극의 크기는 매우 작으므로 냉각수의 비등점에서도 이 간극이 균일하게 유지되도록 하기 위하여 바닥으로부터 45도 위치에 등 간격의 네 방향에 간극의 크기와 두께가 동일한 핀을 설치하였다.

냉각수 유동계통은 실험과 동시에 밀폐계통을 유지하며, 압력을 일정하게 유지하도록 실험용기에서 생성된 기포가 열교환기에서 응축되어 다시 실험용기로 돌아오는 유로이다. 열교환기는 1차측의 비등된 증류수를 응축시킬 수 있도록 2차측에 외부 냉각수인 물을 공급하고 이 냉각수량을 조절하여 1차측 압력을 조절할 수 있도록 하였다. 즉, 계통압력은 열교환기 2차측의 외

부 냉각수 유량을 조절하여 일정하게 유지되게 하였다. 냉각수 유량은 압력신호를 입력값으로 하고 밸브 개폐정도를 제어값으로 하는 자동제어기에 의해서 제어된다.

내부 반구의 두께와 외경이 각각 19 mm, 238 mm 이다. 열 발생 가열 반구는 총 출력 15.4 kW의 봉 히터를 제작하여 반구에 장착하였다. 실험수행 중 가열면의 온도를 측정하기 위해 내부 구리반구에 Fig.2와 같이 K형 열전대를 설치하였다. 열전대는 Fig.2(a)와 같이 깊이 방향으로 다른 두 개의 열전대를 설치하여 이들로부터 열속(heat flux)을 계산할 수 있도록 하였다. 외부반구의 온도변화를 측정하기 위해서 Fig.2(a)의 내부반구와 같은 17곳의 위치에 열전대를 설치하였다. 내부반구와 마찬가지로 외부반구에도 Fig.2(c)와 같이 깊이 방향으로 다른 두 개의 열전대를 설치하여 열속을 계산할 수 있도록 하였다.

모든 계측기의 신호는 휴렛 팩커드(HP)사의 VXI 데이터 획득 장치로 읽혀지고 컴퓨터에 기록된다.

실험수행 중 임계출력의 발생여부는 Fig.2에 나타난 내·외부 반구의 열전대로 감지하였다. 즉 반구의 내벽온도가 준정상 상태(quasi-steady state)에 머물지 않고 지속적으로 증가하는 경우를 임계출력에 도달한 상태로 판단하였다. 실험방법 및 절차는 기존의 CHF 실험[3]의 경우와 동일하다.

실험조건은 다음과 같다.

- (1) 간극 : 1mm
- (2) 내부반구 직경 : 238mm
- (3) 압력범위 : 1, 2, 3 기압
- (4) 냉각재 : 증류수

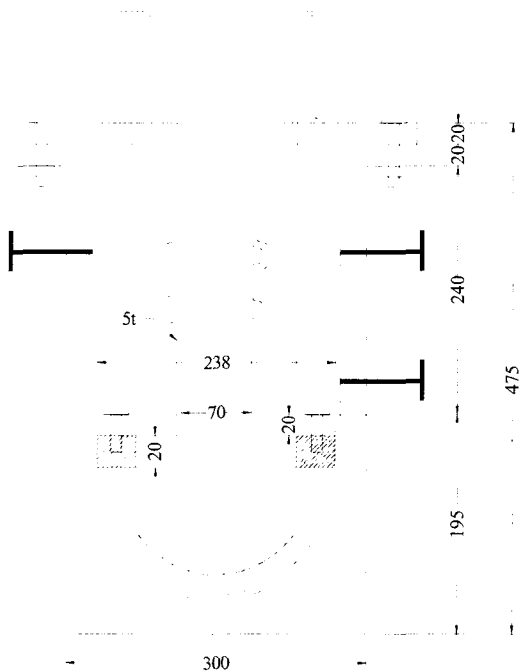


Fig.1 Schematic diagram of experimental facility

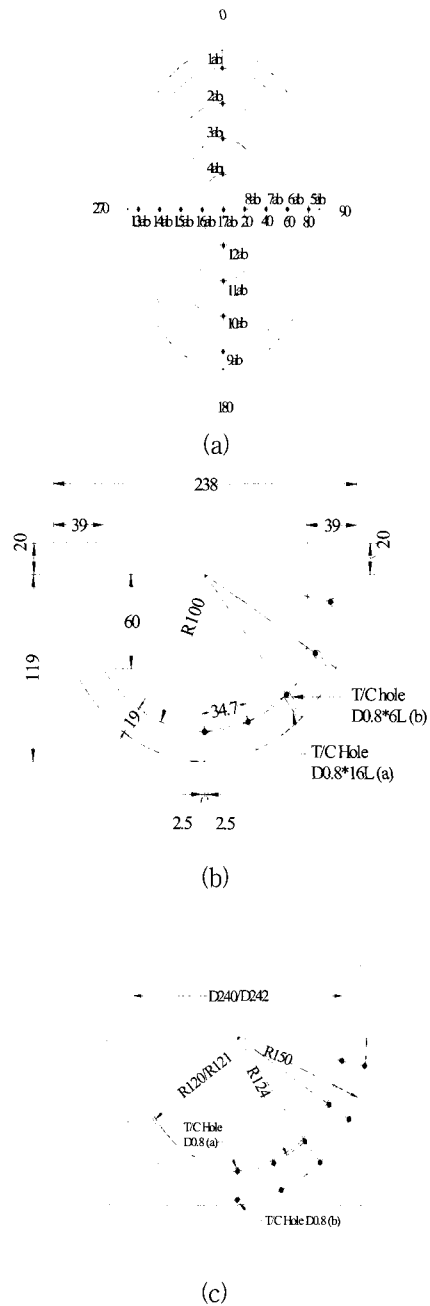


Fig.2 Thermocouple locations (a) bottom view (b) cross sectional view - internal heater shell (c) cross section view - external pressure vessel

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig.3과 4는 실험장치의 내부반구에 설치한 열전대로부터 측정된 온도값을 회귀분석하여 작성한 등온선도이다. 이 그림들은 내부 구리반구의 반구형 표면을 하부방향의 평면으로 투사시킨 그림이다. 각 그림을 둘러싼 외부의 큰 원은 내부 구리반구의 상단에 해당하며 원의 중심은 구리반구의 중앙 하부에 해당한다. 내부에 방사방향으로 위치한 작은 원들은 열전대를 설치한 위치를 각각 나타낸다.

Fig.3은 히터직경 498mm, 계통압력 1기압, 간극 크기 1mm 일 때 임계출력을 발생시키는 출력( $60.3\text{kW/m}^2$ )하에서 측정된 히터 표면의 시간에 따른 온도변화를 표시한 것이다[3]. 히터 출력이 고정되어 있어도 국부적인 건조 영역이 스스로 확장되어가는

것을 보여주고 있다. 국부적인 건조는 좌측 상단 부근에서 시작되었다. 간극 크기가 1mm 인 경우에는 건조영역이 아래 방향보다는 원주 방향으로 더 빠르게 확장되어 갔다. Fig.3(c)에서 보는 바와 같이 히터 상단 부분이 모두 건조될 때까지 바닥 부분은 냉각수와 접촉하고 있다. Fig.3(d)에서는 건조 영역이 히터의 바닥까지 전파되었으며 표면 전체의 온도가 200℃ 이상으로 증가하였다.

그러나 Fig.3에서 온도는 좌측 상부부터 증가한다. 이것은 이 부분의 간극이 다른 부분에 비하여 상대적으로 간극의 크기가 작기 때문에 판단된다. 실험장치의 모든 곡면은 CNC 선반으로 가공되었지만 가공오차나 운전중의 열팽창 때문에 간극의 크기가 정확히 일정하게 유지되는 것은 현실적으로 불가능하다. 이러한 실험장치의 간극 불균일성이 CHF 기구에 영향을 미칠 가능성이 있다.

Fig.4는 히터직경이 238mm 인 경우, 계통의 압력 1기압, 간극크기 1mm일 때 CHF를 발생시키는 출력(73.4kW/m<sup>2</sup>)하에서 측정된 히터 표면의 시간에 따른 온도변화를 표시한 것이다. 히터의 직경이 작아져 간극의 균일도를 맞추는 일이 보다 쉬워졌다. 그림에서 보는 바와 같이 히터의 윗부분부터 CHF가 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 등온선의 모양도 거의 원형을 이루어 열전달 현상의 차이가 경도의 변화에 무관한 축대칭을 이룸을 명확히 알 수 있다.

Fig.3과 4에서와 같이 간극이 좁을 경우, 상부에서부터 CHF가 발생하는 것은 CCFL(Count Current Flow Limitation) 현상으로 설명할 수 있다. 즉, 좁은 간극을 통해 액상의 냉각제가 흘러들어와 히터 반구를 냉각하는 간극냉각의 경우, 간극으로부터 발생한 기체가 부력효과에 의하여 상부로 이동하여 빠져나간다. 이때 상부로 이동하는 기체의 속도가 하부로 유입되는 액체의 흐름을 억제 할 수 있을 정도로 커지면 간극내부로 액체의 유입이 차단되며, 이때 CHF가 발생하게 된다. 수조비등 하에서는 히터표면으로 유입하는 액체의 경로가 많지만, 간극냉각의 경우에는 간극의 입구쪽 하나로 제한되게 된다. 즉, 간극냉각에서는 CCFL에 의해 지배되는 CHF가 발생하는 것이다. 이와 같은 결과는 기존의 3차원 반구형 간극에 대한 결과[3, 4]와 일치한다.

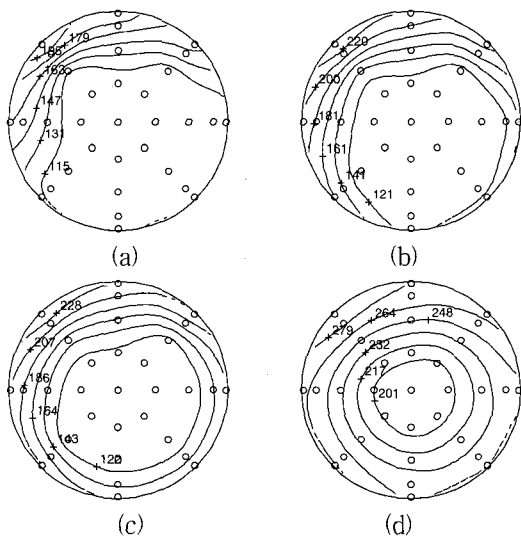


Fig.3 Contour plots of temperatures on the inner heater shell [3] : elapsed time (a) 0sec (b) 1000sec (c) 1500sec (d) 2500sec, heating diameter: 498mm, heat flux: 60.3kW/m<sup>2</sup>

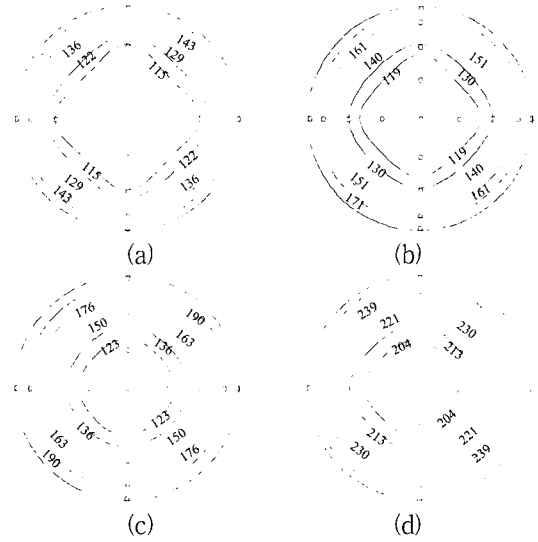


Fig.4 Contour plots of temperatures on the inner heater shell : elapsed time (a) 0sec (b) 400sec (c) 600sec (d) 1000sec, heating diameter: 238mm, heat flux: 73.4kW/m<sup>2</sup>

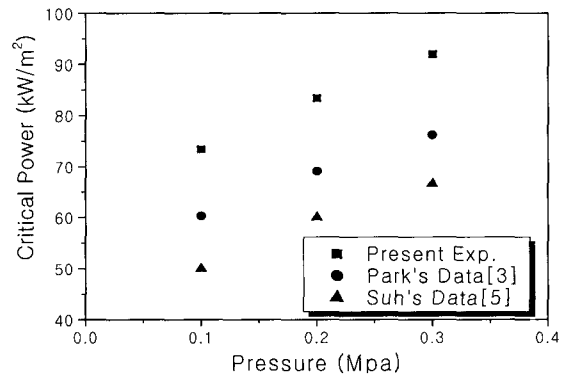


Fig.5 Comparison of present experimental results on the critical powers with other ones (gap thickness - 1mm, coolant - distilled water)

Fig.5는 본 실험결과와 기존연구 결과들을 비교한 것이다. 박래준 등[3]은 직경 498mm의 3차원 반구형 히터를 사용하여 임계출력을 측정하였고, 서균렬 등[5]은 직경 500mm, 폭 100mm의 2차원 slice형태의 히터를 사용하였다. 서균렬 등[5]의 결과는 2차원 시편의 특성상 dryout의 전과과정과 임계출력값에 있어서 3차원의 경우와 차이를 나타낸다. 박래준 등[3]과 본 실험결과와 차이는 비록 기하학적 구조는 같지만 히터 직경의 차이로 인해 발생하는 것이다. 3개의 결과가 절대값에 있어서는 차이를 보이지만 압력 증가에 따라 임계출력이 증가하는 경향은 서로 일치하고 있다.

박래준 등[3]은 히터직경 498mm의 실험결과를 토대로 다음과 같은 반구형 간극에서의 임계출력에 관한 상관식을 제시하였다.

$$\frac{q_{CHF}}{\rho_g h_{fg}} \cdot 4\sqrt{\frac{\rho_g^2}{g\sigma\Delta\rho}} = \frac{0.1042}{1 + 0.1375(\rho_g/\rho_l)^{0.21}} (D/s) \quad (1)$$

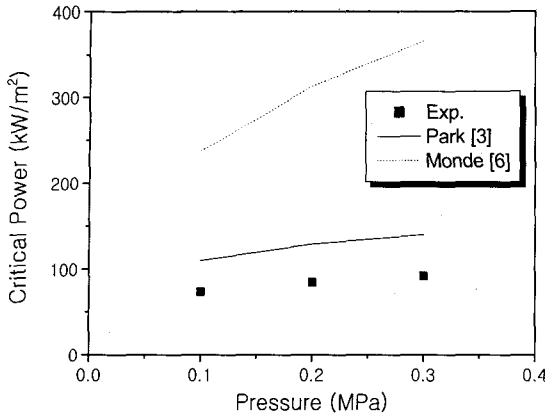


Fig.6 Comparison of the present experimental data on the critical powers with existing correlations (gap thickness - 1mm, coolant - distilled water)

$q_{CHF}$  : 임계열속,  $\rho_g$  : 기체밀도,  
 $\rho_l$  : 액체밀도,  $h_{fg}$  : 기화열,  $g$  : 중력가속도,  
 $\Delta\rho$  : 액체와 기체의 밀도차,  $\sigma$  : 표면장력,  
 $D$  : 직경,  $s$  : 간극 크기

Monde와 Mitsutake[6]는 환형관(annulus tube)의 내부를 가열하여 임계열속을 측정하고 다음과 같은 상관식을 제안하였다.

$$\frac{q_{CHF}}{\rho_g h_{fg}} \cdot 4 \sqrt{\frac{\rho_g^2}{g \sigma \Delta \rho}} = \frac{0.16}{1 + 0.075 (L/D_{he})} \quad (2)$$

$$D_{he} = D_i \left[ \left( \frac{D_o}{D_i} \right)^2 - 1 \right]$$

$D_i$  : 내부관 외경,  $D_o$  : 외부관 내경

Fig.6은 박래준[3], Monde[6] 등의 상관식에 본 실험조건을 대입하여 얻은 결과와 실험결과를 비교한 것이다. 기하학적 특성상 박래준 등[3]의 상관식이 본 실험결과와 가장 잘 일치하는 것으로 나타났다. Monde[6]의 상관식은 반구형 간극이 아닌 환형 간극에 대하여 만들어진 것이기 때문에 매우 큰 오차를 가지는 것으로 판단된다.

본 실험을 통해 측정된 히터직경 238mm, 간극 1mm에서의 측정결과는 박래준 등[3]이 제시한 상관식과 평균 51.6%의 오차를 나타냈다. 이와 같은 오차는 히터직경 498mm의 실험결과를

바탕으로 상관식을 개발할 때의 오차  $\pm 20\%$  보다 큰 값이다. 따라서 히터직경에 관한 상관식의 보완이 필요한 것으로 판단된다.

#### 4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 직경 238mm 반구형 발열체 주변에 형성된 1mm 간극에서의 임계출력을 1, 2, 3기압의 압력조건에서 측정하였다. 임계출력 하에서 건조영역의 전과과정은 상부에서 하부로 축대칭 형태로 진행되었다. 이로서 좁은 반구형 간극에서의 CHF 현상은 CCFL에 의해 주도된다는 기존의 연구결과를 확인할 수 있었다. 또한 측정결과를 박래준[3], Monde[6] 등이 제안한 임계출력 상관식들과 비교하였으며, 그 결과 박래준[3]이 제시한 상관식이 가장 근접하게 예측하는 것으로 나타났다. 그러나 상관식의 정확도를 높이기 위해서는 히터 직경 영향을 보완할 필요가 있는 것으로 판단되었다.

#### 후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 중장기 계획사업 과제에 일환으로 수행하였습니다.

#### 참고문헌

- [1] C.S. Kim and K.Y. Suh, Sensitivity Studies on Thermal Margin of Reactor Vessel Head During a Core Melt Accident, Journal of the Korean Nuclear Society, Vol.32, No.4 (2000), pp.379-394.
- [2] Y.H. Kim and K.Y. Suh, Sensitivity Analyses for Maximum Heat Removal from Debris in the Lower Head, Journal of the Korean Nuclear Society, Vol.32, No.4 (2000), pp.395-409.
- [3] 박래준 외, 간극에서의 임계출력에 대한 연구, 한국원자력 연구소 기술보고서, KAERI/TR-1800/200 (2001).
- [4] J.H. Jeong, R.J. Park, and S.B. Kim, Visualization Experiments of the Two-Phase Flow Inside a Hemispherical Gap, Int. Comm. Heat and Mass Transfer, Vol.25, No.5 (1998), pp.693-700.
- [5] 서균렬 등, 반원하향 평판간극에서의 유동제한과 열전달 실험, 한국원자력연구소 위탁과제 보고서, KAERI/CM-528/2001 (2002).
- [6] M. Monde and Y. Mitsutake, Critical Heat Flux during Natural Circulation Boiling of Saturated Liquid in Annulus with Uniformly Heated Outer Tube, J. of Heat Transfer, Vol.22 (2000), pp.74-79.