

구형 간극에서의 임계 출력에 대한 상관식 개발

박래준* · 하광순* · 김상백* · 김희동* · 정지환**

Correlation Development on Critical Power in a Spherical Narrow Gap

Rae-Joon Park, Kwang-Soon Ha, Sang-Baik Kim, Hee-Dong Kim, and Ji-Hwan Jeong

Key Words : Critical Power (임계 출력), Counter Current Flow Limit (역류유동 제한), Spherical Narrow Gap (구형 간극), Two Phase Flow (이상 유동), Boiling (비등)

Abstract

The CHF (Critical Heat Flux in Gap) test results have been evaluated to quantify the critical power in hemispherical narrow gaps and a new correlation has been developed. The CHF test results have shown that increases in the gap thickness and pressure lead to an increase in critical power. The pressure effect on the critical power was found to be much milder than predictions by CHF correlations of other researches. From the CHF test results, a new correlation on critical power in the hemispherical gap has been developed using the non-dimensional parameters as follows:

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

The developed correlation has been expanded to apply the spherical geometry using the Siemens/KWU's correlation.

기호설명

a : 임의의 상수

A_{GAP} : 반구형 간극 상부 표면적, m^2

A_{HS} : 발열하는 구면의 표면적, m^2

b : 임의의 상수

c : 임의의 상수

D : 직경, m

g : 중력가속도, m/s^2

h_{fg} : 기화열, J/kg

$j_{g,top}$: 반구형 간극 상부에서 증기 속도, m/s

L : 실험장치 길이, m

q_{CHF} : 임계열유속, w/m^2

s : 간극의 크기, m

그리스 문자

ρ_g : 기체 밀도, kg/m^3

ρ_l : 액체 밀도, kg/m^3

$\Delta \rho$: 액체와 기체의 밀도차이, kg/m^3

θ : 용융물이 차지하는 각도, $^\circ$

σ : 표면장력, N/m

1. 서론

반구형 간극에서의 임계출력(critical power) 값을 정량화하기 위하여 CHF(Critical Heat Flux in Gap) 실험 결과를 분석하였다. CHF 실험[1, 2]은 증류수를 이용하여 간극의 크기(0.5, 1.0, 2.0, 5.0

* 한국원자력연구소 열수력안전연구팀

** 천안외국어대 환경관리과

mm)와 계통압력(1-10 기압)에 따라 반구형 발열체 주변에 형성된 좁은 간극을 통해서 제거할 수 있는 임계열유속을 측정할 실험이다. 이 실험 수행의 목적은 반구형 간극에 있을 수 있는 고유의 냉각기구를 밝히고 이러한 구조에 적용 가능한 임계열유속 상관식을 개발하여 반구형 간극을 통하여 제거할 수 있는 최대열량을 결정하는 것이다. 평판 간극이나 곡면 간극에서의 임계열유속 실험에 관한 자료는 다소 있으나 반구형 간극에서 수행된 연구결과는 전혀 없으며, 단지 구형 간극에 대하여 독일 Siemens/KWU에서 실험한 것[3]이 하나 있다.

본 연구에서는 CHFQ 실험결과를 기존의 평판과 환형 및 구형 간극에서 개발한 기존 상관식과 종합적으로 비교 분석하였으며, 이 실험결과를 이용하여 반구형 간극에 적용할 수 있는 상관식을 개발하였다. 이 개발 상관식은 본 실험의 반구형 간극에만 적용할 수 있기 때문에 TMI-2 경우를 모의하여 개발한 Siemens/KWU 상관식을 이용하여 용융물이 반구를 다 차지 않는 일반적 구형 간극에 적용할 수 상관식을 개발하였다.

2. 실험내용 및 방법

CHFQ 실험은 간극의 크기(0.5, 1.0, 2.0, 5.0 mm)와 압력(1-10 기압)의 변화에 따라 출력을 증가시키면서 임계출력을 결정하는 정상상태 실험을 수행하였다. Fig. 1은 CHFQ 실험장치의 전체 개략도를 보여주고 있다. 본 실험장치는 그림에서 보는 바와 같이 실험용기, 냉각수 주입계통, 밀폐 냉각수 유동계통, 열교환기, 열교환기 2차측 냉각수 유동계통, 실험결과 획득 및 처리장치(DAS: Data Acquisition System)로 구성하였다. 실험용기는 그림에서 보는 바와 같이 반구형 가열부, 반구형 구리곽(shell)의 내부용기, 외부 압력용기로 구성하였다.

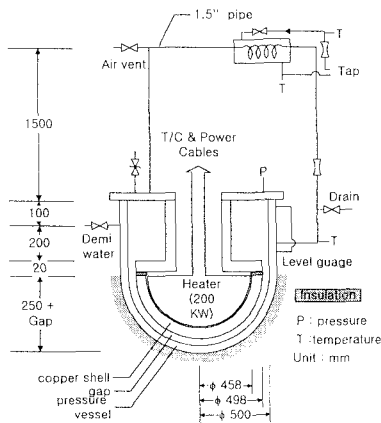


Fig. 1 Schematic Diagram of the CHFQ test facility.

가열부는 직경이 448 mm 인 반구형 황동 볼드에 봉히터를 주입할 수 있는 구멍을 파고 이들 구멍에 각각 크기와 출력이 다른 봉 히터를 4 열로 설치하였다. 장착한 이들 봉 히터의 최대 출력은 200 kW 였다. 설치한 봉히터는 네 영역으로 구분하여 출력을 제어실에서 4 개의 SCR 을 이용하여 독립적으로 제어할 수 있도록 하였다. 본 CHFQ 실험에서 가장 중요한 측정장치인 열전대 66 개를 설치한 내부 구리반구는 제작 정밀도를 높이기 위하여 CNC 선반으로 정밀하게 가공하여 제작하였다. 내부 구리반구의 두께와 외경은 각각 25 mm, 498 mm 이며, 히터에서 발생된 열은 구리곽을 통해 외부의 간극으로 전달되므로 히터는 구리곽의 안쪽 표면과 잘 접촉하도록 제작하였다. 상세한 실험장치는 참고문헌[1, 2]에 잘 기술되어 있다.

본 실험에서 측정한 임계출력(critical power)은 반구형간극에서 제거할 수 있는 최대 열량을 나타낸다. 즉, 비록 국부적으로 임계 열유속(critical heat flux)에 도달하여 건조 영역이 존재할 수 있으나, 다른 비건조 영역에서 지속적인 열제거가 이루어질 수 있다. 따라서 반구 전체에서 dry-out 이 발생하는 시점을 찾아 그 때의 열유속을 임계출력으로 정의하였다.

3. 임계출력에 대한 실험결과 및 고찰

Fig. 2 는 간극의 크기와 압력에 따라 측정한 임계출력에 대한 CHFQ 실험결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 일반적으로 간극의 크기가 증가하고 압력이 증가할수록 임계출력값이 증가하는 것으로 나타났다. 특히 압력이 증가할 때 임계출력은 조금씩 증가하나 간극의 크기 증가에 따라서는 다소 많이 증가하는 것으로 나타났다

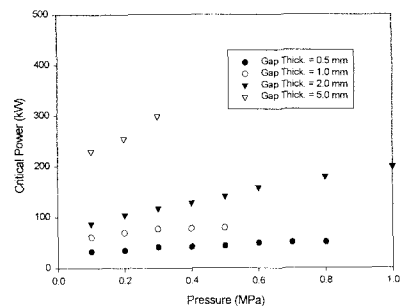


Fig. 2 CHFQ test results on critical power.

Fig. 3 은 CHFG 실험결과와 Chang 과 Yao 의 실험결과, Monde 등의 실험결과, Siemens/KWU 의 실험결과 등을 비교하여 보여주고 있다. Chang 과 Yao[4]는 환형 간극에서의 열수력학적 거동을 이해하고자 임계열유속 실험을 수행하였다. 이들은 가열된 표면을 냉각시킬 수 있는 물의 공급이 제한될 때 임계열유속이 발생한다고 생각하여 CCFL(Counter Current Flow Limitation) 상관식으로부터 다음의 임계열유속 상관식을 유도하였다.

$$\frac{q_{CHF}}{\rho_g h_{fg}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_g}{gD\Delta\rho}} = \frac{0.38}{(1+4\sqrt{\rho_g/\rho_l})^2} \cdot (L/s) \quad (1)$$

Monde 등[5]은 수직평판의 사각 유로를 이용한 임계열유속 실험을 수행하여 다음의 임계열유속 상관식을 개발하였다.

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

독일의 Siemens/KWU 사에서는 구형 곡면 간극에서의 임계 열유속에 대한 실험을 수행하였다[3]. 이 실험은 TMI-2 원자로용기 하부를 모의하여 TMI-2 사고에서 원자로용기가 손상되지 않도록 기여한 냉각기구를 연구하기 위한 실험이다. 이들은 1, 3, 5, 10 mm 의 간극의 크기와 10, 50, 100, 155 기압의 압력 및 0, 10 K 의 아냉도에 대한 실험을 수행하여 다음과 같은 상관식을 개발하였다.

$$q_{crit} = 145 s^{0.406} p^{0.163} + 2.14 \Delta T_u \quad (3)$$

위 식에서 s 는 간극의 크기 (단위는 mm), p 는 압력(단위는 기압), ΔT_u 는 용기내 냉각수의 아냉도(단위는 K) 을 각각 나타낸다.

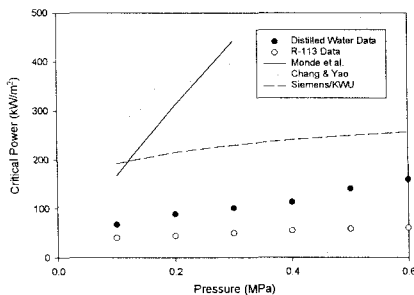


Fig. 3 Comparison of the CHF test results on critical power with other correlations.

Chang 과 Yao 의 실험결과와 Monde 등의 실험결과를 CHFG 실험결과와 비교하기 위하여 식 (1)과 (2)에 CHFG 실험장치의 규격을 대입하였고 간극의 크기는 2 mm 로 하였다.

그림에서 보는 바와 같이 Chang 과 Yao 및 Monde 등의 상관식은 CHFG 실험 측정결과보다 큰 값을 예측하고 있다. CHFG 실험에서는 CCFL 이 발생하여 간극으로의 냉각수 공급을 방해함으로써 전역건조를 유발시켰기 때문에 전통적인 임계열유속 실험보다 낮은 열속에서 전역건조가 일어난 것으로 판단된다[6]. Chang 과 Yao 및 Monde 등의 상관식은 압력 영향이 크게 나타났으나 CHFG 실험의 측정 결과는 계통 압력의 영향이 크게 나타나지 않았다. 두 임계열유속 상관식은 대기압 조건에서 수행된 실험의 측정값을 가지고서 개발되었으므로 두 상관식이 정확한 압력 경향을 보일 것이라고 기대할 수 없다. 특히 Monde 등의 상관식은 계통의 압력이 증가함에 따라 임계열유속 값이 계속적으로 급격히 증가하는 경향을 보이고 있다. 따라서 Monde 등의 실험식을 대기압이 아닌 고압 영역에서 사용하는 것은 적절치 못한 것으로 판단한다. 반구형 간극 일부분에서 수행된 Siemens/KWU 실험결과가 CHFG 실험결과보다 높게 나타난 것은 반구형 간극 전체를 모의하지 않고 일부분을 모의하였기 때문일 것으로 판단된다. 즉, 임계출력은 발열부의 면적과 밀접한 관계가 있다는 것을 의미한다.

4. 임계출력에 대한 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 CHFG 실험결과를 이용하여 반구형 간극에서의 임계출력 값을 일반화하는 상관식을 개발하였다. 본 연구에서의 상관식 개발은 열유속에 대한 차원해석에서 무차원수를 도입하는 방법으로 수행하였다. 간극에서 임계열유속에 영향을 미치는 무차원수는 점성, 밀도, 직경과 간극, 중력가속도 등을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다[7].

$$\frac{q_{CHF}}{\rho_g h_{fg}} \cdot 4 \sqrt{\frac{\rho_g^2}{g\sigma\Delta\rho}} = f(\rho_g/\rho_l, D/s) \quad (4)$$

이때 (4) 식의 좌변 항을 1/value 로 놓고 실험결과에 대하여 value 와 D/s 를 구하여 그래프로 나타내면 Fig. 4 와 같이 나타낼 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 실험결과는 다음의 일차식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{q_{CHF}}{\rho_g h_{fg}} \cdot 4 \sqrt{\frac{\rho_g^2}{g\sigma\Delta\rho}} = \frac{0.1042}{1+a(\rho_g/\rho_l)^b (D/s)} \quad (5)$$

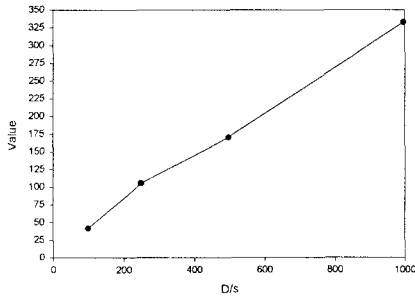


Fig. 4 First order equation of non-dimensional parameters to get a correlation on critical power.

식 (5)에 증류수 실험결과를 대입하고 만족하는 a 와 b 를 구하면 a 는 0.1375 이고 b 는 0.21 이다. 따라서 본 연구에서의 실험결과에 대한 상관식은 다음과 같이 나타난다.

$$\frac{q_{CHF}}{\rho_g h_{fg}} \sqrt{\frac{\rho_g^2}{g\sigma\Delta\rho}} = \frac{0.1042}{1 + 0.1375(\rho_g / \rho_l)^{0.21}(D/s)} \quad (6)$$

Fig. 5 는 본 연구에서 개발한 상관식과 CHF 실험결과를 비교하여 보여주고 있다. 간극의 크기가 간극의 크기가 2.0mm 인 경우에 조금 차이를 보여주나 전반적으로 개발한 상관식이 실험결과를 잘 대표하고 있다. Fig. 6 은 식 (6)의 새 상관식의 실험결과에 대한 정확도를 보여주고 있다. 새 상관식은 $\pm 20\%$ 이내로 실험결과를 잘 대변하고 있다. 본 연구에서 개발한 상관식 (6)은 용융물이 반구면을 완전히 채웠을 때 용융물과 반구 사이에 형성될 수 있는 간극을 통해 제거할 수 있는 열량 계산에 유용하게 사용될 수 있다.

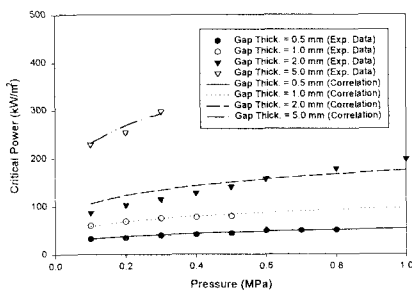


Fig. 5 Comparison of new correlation on critical power with the experimental data.

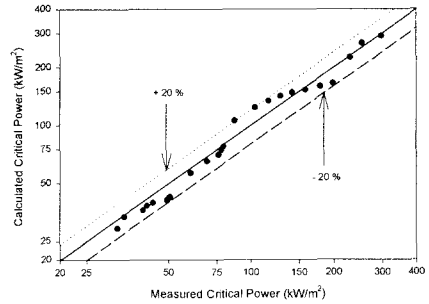


Fig. 6 Detailed Comparison of new correlation on critical power with the experimental data.

본 연구에서 개발한 상관식을 용융물이 반구를 완전히 채우지 않은 경우에도 적용하기 위해서는 (6) 상관식을 일반화하는 작업이 필요하다. Fig. 7 에서 보는 바와 같이 본 실험결과를 이용하여 개발한 상관식 (6)은 Siemens/KWU 상관식에 비하여 매우 낮은 값을 예측하고 있다. 이와 같이 임계출력 값이 낮은 원인은 반구에서 용융물이 차지하는 각도와 밀접한 관련이 있기 때문이다. 즉, 용융물이 차지하는 각도는 가열길이와 직접적인 관련이 있기 때문이다.

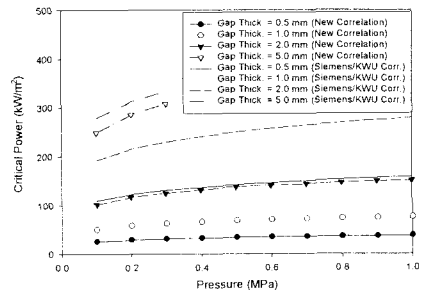


Fig. 7 Comparison of the predictions of new correlation on critical power with the Siemens/KWU's correlation.

반구형 원자로용기 하부 plenum 에서 용융물이 차지하는 각도를 Fig. 8 과 같이 나타낼 수 있다. CHF 실험에서는 각도가 $\pi/2$ 인 반구에 대한 실험을 수행하였다. 독일의 Siemens/KWU 에서는 TMI-2 사고를 모의하였기 때문에 용융물이 차지하는 각도가 $5\pi/36$ 이다. 이와 같이 용융물이 차지하는 각도 차이 때문에 본 연구에서 개발한 상관식이 낮게 나타났다. 따라서 본 연구에서는 Siemens/KWU 상관식을 이용하여 개발 상관식을

일반화하는 작업을 수행하였다.

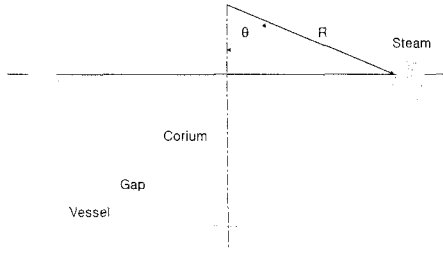


Fig. 8 Angle in the corium.

반구형 간극에서 임계출력 발생은 CCFL 이 많은 영향을 미친다는 결과를 이용하여 임계출력에 용융물이 차지하는 각도가 미치는 영향을 평가할 수 있다. 반구형 간극의 상부에서 증기 속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$j_{g,top} = \frac{\dot{m}_g}{\rho_g A_{GAP}} = \frac{q_{CHF}}{\rho_g h_{fg}} \cdot \frac{A_{HS}}{A_{GAP}} \quad (7)$$

반구형 간극 상부에서 CCFL 이 발생한다면 증기의 속도는 용융물이 차지하는 각도 θ 의 크기에 상관없이 일정하다고 할 수 있다. 따라서 θ 의 크기가 $\pi/2$ 인 지점의 증기의 속도와 임의의 θ 에서 증기의 속도가 동일하다고 하면 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$\frac{q_{CHF,\theta}}{q_{CHF,\pi/2}} = \frac{A_{HS,\pi}}{A_{HS,\theta}} \cdot \frac{A_{GAP,\theta}}{A_{GAP,\pi/2}} \quad (8)$$

이때 용융물이 차지하는 각도가 $\pi/2$ 와 θ 인 경우의 발열하는 구면의 면적은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$A_{HS,\theta} = \int_0^\theta 2\pi R^2 \sin\theta d\theta = 2\pi R^2 (1 - \cos\theta) \quad (9)$$

$$A_{HS,\pi/2} = 2\pi R^2 \quad (10)$$

또한 용융물이 차지하는 각도가 $\pi/2$ 와 θ 인 경우의 간극 면적은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$A_{GAP,\theta} = 2\pi R.s.\sin\theta \quad (11)$$

$$A_{GAP,\pi/2} = 2\pi R.s \quad (12)$$

식 (9)에서 식 (12)를 식 (8)에 대입하고

정리하면 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$\frac{q_{CHF,\theta}}{q_{CHF,\pi/2}} = \frac{2\pi R^2 2\pi R.s.\sin\theta}{2\pi R^2 2\pi R.s.(1 - \cos\theta)} = \frac{\sin\theta}{1 - \cos\theta} \quad (13)$$

Fig. 9 는 용융물이 차지하는 각도 θ 가 0 도에서 90 도까지 변화할 때 임계출력 변화량을 각도 θ 가 $\pi/2$ 인 경우와 비교하여 보여주고 있다. 용융물이 차지하는 각도가 작아질수록 발열하는 면적이 작아지기 때문에 임계 출력 값이 증가하는 것을 알 수 있다.

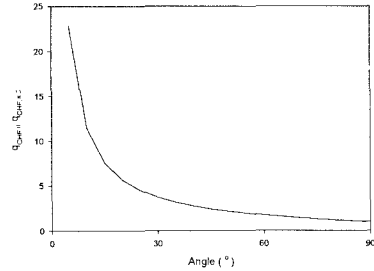


Fig. 9 Angle effect on critical power.

식 (14)에 용융물이 차지하는 각도 θ 가 $\pi/2$ 인 본 연구에서 개발한 상관식을 대입하고 수정계수 c 를 도입하면 다음식과 같이 나타난다.

$$\frac{q_{CHF}}{\rho_g h_{fg}} \cdot 4 \sqrt{\frac{\rho_g^2}{g\sigma\Delta\rho}} = \frac{0.1042}{1 + 0.1375(\rho_g / \rho_l)^{0.21} (D/s)} \left(\frac{\sin\theta}{1 - \cos\theta} \right)^c \quad (14)$$

식 (14)에 Simens/KWU 상관식을 만들 때 조건인 용융물이 차지하는 각도가 $5\pi/36$, 반구 직경을 4.44 m 를 대입하고 이 상관식과 일치시키면 수정계수 c 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$c = -0.3944 \ln(s/1.0) + 2.02 \quad (15)$$

식 (15)에서 s 는 간극의 mm 크기를 나타내며 s 의 적용 범위는 0.5 mm 부터 5.0 mm 까지이다. Fig. 10 은 식 (14)의 상관식과 Simens/KWU 상관식을 비교하여 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 본 연구에서 개발한 상관식 (14)는 Simens/KWU 에서 개발한 상관식과 거의 일치하고

있다. 따라서 식 (14)의 상관식은 Siemens/KWU 에서 개발한 상관식을 잘 대변하고 있다는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 개발한 이 상관식은 원자로용기 하반구에 용융물이 재배치되어 용융물과 원자로용기 사이에 간극이 형성되었을 때 간극을 통하여 제거할 수 있는 최대 열량을 결정하는 데 유용하게 사용할 수 있다.

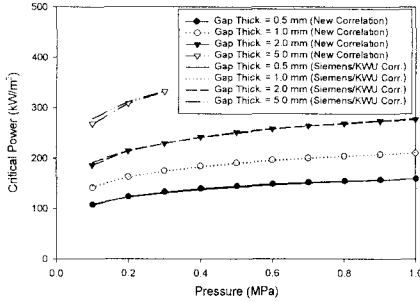


Fig. 10 Comparison of the predictions of extended correlation on critical power with the Siemens/KWU's correlation.

5. 결론

구형 간극이 제거할 수 있는 최대 열량을 결정하기 위하여 CHF 실험 결과를 해석한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 일반적으로 간극의 크기가 증가하고 압력이 증가할수록 임계출력값이 증가하는 것으로 나타났으며, 특히 압력이 증가할 때 임계출력은 조금씩 증가하나 간극의 크기 증가에 따라서는 다소 많이 증가하는 것으로 나타났다.
- CHF 실험결과는 기존의 CHF 상관식들이 예측하는 값보다 낮게 나타났고 계통압력의 영향도 작게 나타나 대기압에서 수행한 실험결과를 이용하여 개발한 기존 상관식을 고기압 조건에 사용하는 것은 다소 문제가 있음을 밝혔다.
- CHF 실험결과를 이용하여 반구형 간극이 제거할 수 있는 최대 열량에 대한 다음과 같은 상관식을 개발하였다.

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

- 독일의 Siemens/KWU 상관식을 이용하여 반구형 간극에 대한 상관식을 일반화하여 모든 구형 간극에 사용할 수 있게 하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 과제 of 일환으로 수행하였습니다.

참고문헌

- (1) 박래준 외, 1999, "간극에서의 임계 열유속에 대한 연구," KAERI/TR-1321-99
- (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*, Vol. 34, pp. 321-328
- (3) Schmidt, H. et al., 1998, "Experiments on Heat Removal in a Gap between Debris Crust and RPV Wall," 1st European-Japanese Two-Phase Flow Group Mtg., Portoroz, Slovenia
- (4) Chang Y., and Yao, S., 1983, "Critical Heat Flux of Narrow Vertical Annuli with Closed Bottoms," *J. of Heat Transfer*, Vol. 105, pp. 192-195
- (5) Monde, M., Kusuda, H., Uehara H., 1982, "Critical Heat Transfer during Natural Convective Boiling in Vertical Rectangular Channels Submerged in Saturated Liquid," *J. Heat Transfer*, Vol. 104, pp.300-303
- (6) Jeong, J. H., Park, R. J., Kim, S. B., 1998, "Visualization Experiments of the Two-Phase Flow Inside a Hemispherical Gap," *Int. Commu. Heat & Mass Transfer*, Vol. 25, No. 5, pp. 693-700
- (7) Katto, Y., Kosho, Y., 1979, "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*, Vol. 5, pp.219-224