

## An Experimental Study of 5x5 Bundle Critical Heat Flux with Four Unheated Rods

Sung Deok Hong, Jong Kuk Park, SeYoung Chun, Won Pill Baek

Korea Atomic Energy Research Institute, Yuseong-Gu, Daejeon, Korea, 305-600, sdhong1@kaeri.re.kr

### 1. 서론

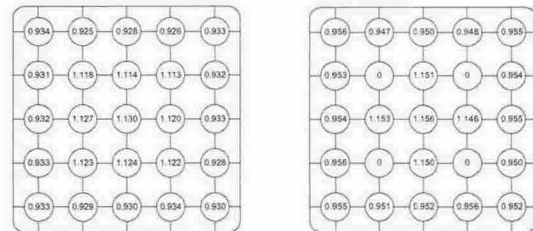
원자로 열수력설계의 기본 요소인 부수로 (subchannel)는 핵연료구성이 사각채널인 경우 matrix subchannel, guide tube subchannel, side subchannel 등 세 가지로 구분한다. matrix subchannel 은 핵연료봉으로만 구성된 정사각형의 부수로이며, side subchannel 은 핵연료집합체 사이에 형성된 직사각형 모양의 부수로이다. guide tube subchannel 은 제어봉을 핵연료봉 사이로 안내하는 안내관이 포함된 부수로이다. 원자로 운전 중에 안내관 속에 제어봉 대신 차가운 냉각수가 차 있어 열중성자의 밀도가 높아져 안내관 주변의 핵연료는 상대적으로 출력이 높게 된다. 그러므로 열수력 설계에 매우 중요한 CHF(Critical Heat Flux) 해석을 수행할 때에 guide tube subchannel 이 원자로심에서 가장 CHF 확률이 높은 부수로 선정되는 경우가 간혹 발생한다. 과거에 핵연료 인허가를 받기 위하여 수행한 다발급 CHF 실험에서 안내관을 모사한 비가열봉(unheated rods) CHF 실험이 CHF 데이터베이스에 상당한 영역을 차지하고 있으나 [1] 비가열봉 효과에 대한 구체적인 연구는 그리 많이 수행되지 않았다.

본 연구에서는 2003 년에 S. D. Hong 등[2]이 5x5 봉다발 시험대에서 수행한 matrix subchannel 에 해당하는 CHF 실험 자료를 비가열봉 효과 연구를 위한 기준 자료로 설정하였다. S. D. Hong 등이 사용한 시험대에 4 개의 비가열봉을 가열봉과 교체 설치하여 guide tube subchannel 를 형성하였으며, 같은 압력, 유량, 입구온도 조건에서 CHF 실험을 수행하고 비가열봉 효과를 비교 관찰하였다.

### 2. 프레온열수력실험장치

프레온열수력실험장치는 유체 이송장비인 펌프와 가열장비인 예열기 및 그밖에 가압기, 시험대, 세퍼레이터, 컨덴서, 열교환기 등으로 구성되어 있다. 열교환기, 컨덴서, 가압기 및 예열기는 각 2 대씩 병렬로 구성하였다. 작동유체는 신 냉매인 프레온 R-134a(CH2FCF3)를 이며, 실험장치의 최대운전 압력 및 온도는 각각 45 기압, 150 °C 이다[2]. 5X5 비가열봉시험대에 필요한 25 개의 봉들 중에서 21 개는 인코넬 601 튜브로 직접가열방식의 가열봉이며, 나머지 4 개는 비가열봉을 모의한 Fiber glass 봉으로 구성하였다. 비가열봉시험대는 그림 1 과 같이 기준실험에 사용한 시험대의 중간에 있는 4 개의 가열봉을 4 개의 비가열봉으로 교체하여 설치하였다. 기준실험의 반경방향출력분포는 4 개의 비가열봉실험을 위한 출력분포로 그림 1- (b)과 같이 normalized 출력분포로 재 계산하였다. 유동채널과 형성된 부수로에 대한 열수력특성자료를 Table 1 에 수록하였다. 압력용기 내부는 유동채널을 이루기 위해서 4 인치 크기의 배럴을 두고 내부에 세라믹으로

하우징을 만들었다. 시험대 상부에는 Tie Plate 로 봉다발을 고정하고 전기 단자대 역할을 하도록 하고, 하부에는 오링블럭을 두어 가열봉이 열팽창으로 늘어날 때 바닥 쪽으로 늘어나도록 하여 봉이 휘는 것을 방지하였다.



(a) Reference T/S (b) 4-unheated rods T/S  
Figure 1. Radial power distributions

### 3. 5x5 비가열봉다발 실험

실험 중에 CHF 발생시 가열봉의 벽온도가 급격히 증가하여 녹는 것을 방지하기 위하여 자동전력트립장치를 구성하였다. 자동전력트립장치는 유체의 포화온도보다 가열봉의 벽면온도가 40~50 °C 이상 높게 되면 전력공급을 중단시키도록 설정하였다. 실험 시작 전에 시험대의 Heat balance test 를 수행하고 전원에서 인가된 열과 루프에서 측정된 열의 차이가 3% 이내에 있으면 실험을 수행하였다. 압력, 유량 및 입구 과냉도에 대한 5x5 봉다발의 실험범위는 아래와 같다.

압력 1500 ~ 3000 kPa,  
유량 50 ~ 4000 kg/m<sup>2</sup>-s, 입구과냉도 10 ~ 70 kJ/kg,

Table I. T/H data of the 5X5 bundle test section

Parameter	5x5 Bundle
Number of heated rods	21
Number of unheated rods	4
Rod pitch (mm)	12.85
Rod dia. (mm)	9.5
Heated length (mm)	2000
Rod to wall gap (mm)	2.55
Corner radius (mm)	2.5
Distance between spacer grids (mm)	564
Bundle geometry data	
Length of one-side (mm)	66.9
Flow area (mm <sup>2</sup> )	2695.8
Hydraulic dia. of central channel	12.63
Hydraulic dia. of side channel	17.19
Axial power distribution	Uniform

### 4. 결과 및 논의

그림 2 는 비가열봉실험과 기준실험의 CHF 와 해당되는 시험대의 총출력을 비교한 그림이다. CHF 가

일어나는 총 출력은 기준실험이 높게 나타났으나 CHF 자체는 비가열 봉실험이 높다. 시험대 중간에 위치한 고온부수로 관점에서 바라보면 비가열봉이 있는 부수로는 상대적으로 기준 시험대의 matrix subchannel 보다 같은 열속에서 부수로의 엔탈피가 작다. 즉 차가운 냉각수로 인하여 열전달이 잘 될 것으로 예측할 수 있으며 실제 실험결과도 상대적으로 차가운 냉각수의 영향으로 CHF 가 커진 것이다. 그러나 기준실험의 총출력까지는 따라가지 못하고 CHF 를 허용하고 있음을 그림 2 의 실험 결과에서 잘 보여주고 있다.

그림 3 은 압력 3000 kPa 에서 입구미포화도를 10, 25, 40 kJ/kg 로 바꾸어 가며 유량 변화에 대한 CHF 경향을 나타낸 것이다. CHF 는 기준실험과 마찬가지로 입구미포화도가 커질수록 커지고 유량이 증가할 수록 증가하고 있다. 유량이 약 500kg/m<sup>2</sup>-s 이하인 낮은 유량에서 CHF 는 유량에 매우 민감하여 그림 3 에서 보는 바와 같이 비선형적인 경향을 보이나 유량이 상대적으로 높은 영역에서는 거의 선형적인 경향을 보인다. 비가열봉실험에서 한가지 특이한 현상이 나타났는데, 이는 유량 1000 에서 2000kg/m<sup>2</sup>-s 사이의 일부 구간에서 유량에 따라 선형적으로 증가하던 경향에 제동이 걸려 잠시 주춤하는 현상이다. 이 구간이 지나면 CHF 는 다시 유량에 따라 선형적으로 증가하는데 그 기울기는 유량이 낮을 때보다 더 커진다. 이 현상은 압력이 높을수록 입구 미포화도가 클수록 (그림 3 의 미포화도 40kJ/kg 자료 참조) 두드러지게 나타나고 있다. 이 구간에서의 임계건도 (critical quality)를 조사해본 결과 (그림 3 의 하부) 임계건도가 포화상태에서 미포화 상태로 천이되는 공통점이 있음을 관찰하였다. 임계건도가 항상 포화상태에 있는 미포화도 10kJ/kg 실험의 경우는 이 현상이 보이지 않으며, CHF 가 주춤하는 현상은 비가열봉실험보다 두드러지지 않지만 비가열봉이 없는 기준실험에서도 압력이 높고 입구미포화도가 큰 경우에도 미약하게 나타나고 있음을 그림 3 의 실험결과에서 잘 알 수 있다.

5. 결론

프레온 열수력실험장치에서 5x5 다발에 대한 기준실험과 4 개의 비가열봉이 있는 실험을 수행하고 비가열봉이 CHF 에 미치는 영향을 비교 관찰하였다. CHF 가 일어나는 총 출력은 기준실험이 높게 나타났으나 CHF 자체는 비가열 봉실험이 높았다. 그러나 CHF 경향은 기준실험과 마찬가지로 입구미포화도가 커질수록 커지고 유량이 증가할 수록 증가하였다. 비가열봉실험에서 냉각수가 포화상태에서 미포화상태로 천이하는 구간에서 유량에 따라 증가하던 CHF 에 제동이 걸리는 현상이 관찰되었다. 이 현상은 압력이 높고 입구미포화도가 클수록 두드러 졌으며 미약하지만 기준실험에서도 이 현상이 나타남을 알 수 있었다.

참고문헌

[1] Fighetti C. F. et al. (1982). "Parametric Study of CHF Data Volume 3, Part 1 & 2: Critical Heat Flux Data," EPRI Report NP-2609, Volume 3.  
 [2] S. D. Hong, S. K. Moon, S. Y. Chun, W. P. Back, "프레온열수력실험장치를 이용한 5X5 봉다발 임계

열유속 실험 연구 (Critical Heat Flux Experiments on a 5X5 Rod Bundle Using a Freon Thermal Hydraulic Experimental Loop)," Korean Nuclear Society, Spring Meeting, Gyeong-ju, May, 2003.

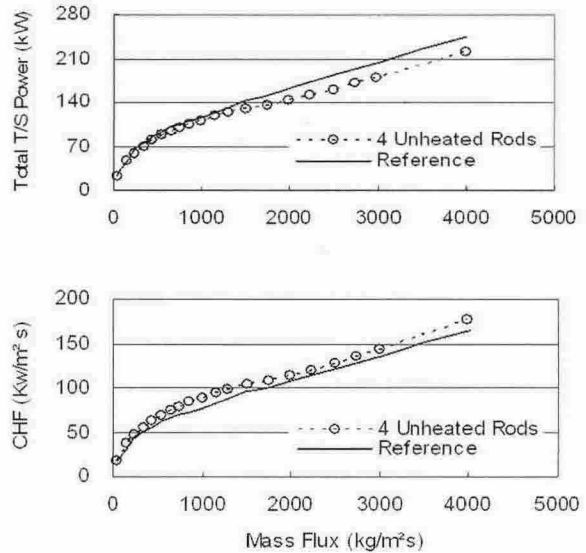


Figure 2. Comparison of total power and CHF of the four unheated rods test section with those of the reference test section (pressure= 2500 kPa, inlet subcooling = 25 kJ/kg)

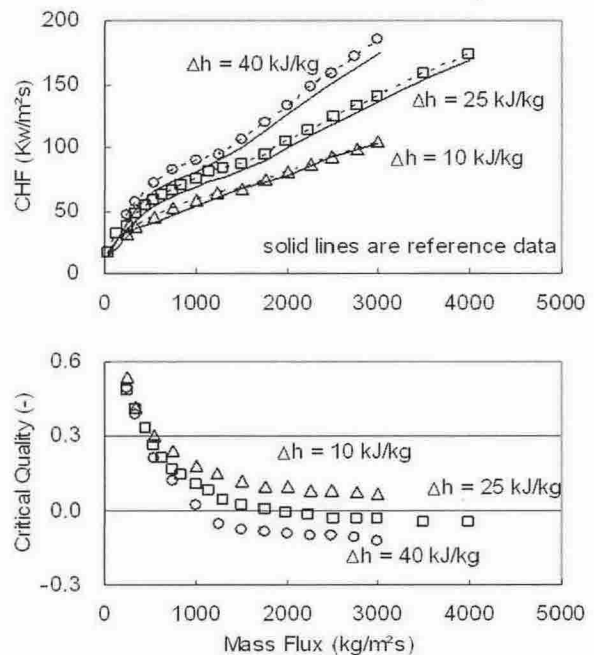


Figure 3. T/S average CHF and corresponding critical quality distribution on mass flux for the four unheated rods test section (pressure= 3000 kPa, solid lines in upper graph are the experimental results of reference T/S)