

복합혼합날개를 장착한 5x5 봉다발에서 부수로 혼합 및 임계열유속 실험 연구

강경호[†] · 신창환* · 추연준* · 윤영중* · 박종국* · 문상기* · 천세영*

Experimental Study on the Thermal Mixing and the Critical Heat Flux in the 5x5 Rod Bundle with the Hybrid Mixing Vane

K. H. Kang, C. H. Shin, Y. J. Choo, Y. J. Youn, J. K. Park, S. K. Moon and S. Y. Chun

Key Words : Critical Heat Flux(임계열유속), Turbulent Diffusion Coefficient(난류확산계수)

Abstract

Experiments were performed to determine the thermal (or turbulent) diffusion coefficient (TDC) and to investigate the critical heat flux (CHF) performance in the 5x5 rod bundle with 5 unheated rods which are supported by Hybrid Mixing Vane. In this study, HFC-134a fluid was used as working fluid and the fluid temperature were measured in the important subchannels. To determine the TDC value, the measured fluid temperatures were compared with the predicted values obtained from the MATRA code. The best optimized value of β was found to be 0.02 by considering prediction statistics, i.e., average and standard deviations of the differences between the experimental results and code calculations. Using the best optimized value of β as 0.02, the MATRA code predicts the test results of the fluid temperature within ± 1.0 % of error. According to the experimental results on CHF of 5 non-heating guide tubes, the case with non-heating guide tube showed a little good performance in terms of CHF.

1. 서 론

임계열유속(CHF: Critical Heat Flux) 현상은 비등 열전달 시스템에서 가열 조건이나 유동 조건이 변함에 따라 가열면 부근의 유체 상태가 액체에서 기체로 바뀌면서 열전달계수가 급격하게 감소하는 현상으로서, 효율적인 열전달 영역과 비효율적인 열전달 영역 사이의 경계를 이룬다[1]. 원자로의 핵연료봉과 같이 가열면의 열유속이 조절되는 시스템에서는 임계열유속 현상이 발생하면 핵연료봉 표면 온도가 급격하게 상승하게 되며, 경우에 따라서는 가열면 온도가 용융점에 도달하게 된다.

따라서, 핵연료봉의 안전 및 설계 타당성을 검증하기 위해서는 임계열유속 현상에 대한 정확한 이해와 신뢰성 있는 데이터베이스의 구축 및 예측 모델의 확보가 필수적이다.

원자로 운전 중에 핵연료 집합체의 안내관(guide tube) 속에 제어봉(control rod) 대신 차가운 냉각수가 차 있어 열중성자(thermal neutron)의 밀도가 높아져서 안내관 주변의 핵연료는 출력이 높게 된다. 그러므로 원자로 열수력 설계를 위한 임계열유속 해석을 수행할 때에 안내관이 위치하는 부수로(subchannel)가 원자로 노심에서 임계열유속의 발생 확률이 가장 높은 부수로 선정되는 경우가 발생한다. 과거에 핵연료 인허가를 받기 위하여 수행한 다발급 임계열유속 실험에서 안내관을 모사한 비가열봉 임계열유속 실험이 임계열유속 데이터베이스에 상당한 영역[2]을 차지하고 있으나 비가열봉 효과에 대한 구체적인 연구 결과는 미미한 실정이다.

경수로용 핵연료 집합체에는 핵연료의 공간 간

[†] 한국원자력연구원 열수력안전연구센터
E-mail : khkang@kaeri.re.kr
TEL : (042)868-2665 FAX : (042)863-3689

* 한국원자력연구원 열수력안전연구센터

격을 유지시키고 유동에 의한 진동을 방지하기 위하여 지지격자가 장착된다. 이러한 지지격자는 난류유동을 유발하고 인접한 부수로 간의 혼합을 증가시켜서 임계열유속을 증가시킨다. 한국원자력연구소에서는 지지격자의 열적 성능을 최대한 향상시키기 위해 혼합날개(mixing vane)를 부착한 복합 혼합날개(Hybrid mixing vane)를 개발하였다[3].

본 연구에서는 복합혼합날개를 장착한 5x5 봉다발의 중앙 부분에 5 개의 비가열봉을 장착하여 반경 방향의 비균일 출력분포가 임계열유속 성능에 미치는 영향을 평가하였다. 비교 대상 실험으로 비가열봉이 없는 5x5 봉다발 시험대에서 동일한 압력, 유량, 입구 온도 조건에서 수행한 임계열유속 실험 자료를 선정하였다. 5x5 봉다발 중앙에 5 개의 비가열봉이 위치하면 부수로 별로 유체 온도의 차이가 크게 발생한다. 본 연구에서는 임계열유속 실험과 더불어 부수로 내 유체 온도를 측정하여 열 혼합 실험을 수행하였다. 부수로 혼합 실험을 수행하여 노심 설계 및 열수력 안전 해석을 위해 일반적으로 사용되는 부수로 해석 코드에서 가장 중요한 입력 값의 하나인 난류 혼합 계수(turbulent diffusion coefficient, β)를 결정하였다.

2. 실험 장치

2.1 실험장치의 구성

본 연구는 한국원자력연구원에 설치, 운영 중인 프레온 열수력 실험장치(FTHEL: Freon Thermal Hydraulics Experimental Loop)를 이용하여 수행하였다. FTHEL 실험장치는 그림 1에 나타난 바와 같이 주냉각펌프, 가압기, 예열기, 유량계, 시험대, 응축기 및 열교환기로 구성되어 있다. 실험장치는 스테인레스 스틸로 제작되었으며, 최대 운전 압력 및 온도는 각각 4.5MPa, 150 °C 이다. 실험장치의 주 배관은 3 인치 Seamless STS304 파이프로 구성되어 있으며, 2 대씩 병렬로 연결되어 있는 각 기기의 입, 출구는 2 인치 파이프로 구성되었다. 주냉각재 펌프는 Non-Seal Canned Motor 펌프로서 최대 3600 rpm 의 회전속도를 가지며, 50m 수두에 12kg/s 의 유량을 제공할 수 있는 펌프 두 대를 직렬로 설치하여 최대 수두는 100m 이다. 펌프의 회전속도 제어를 위하여 펌프 모터에 회전속도 조절용 인버터 2 개를 설치하고, 유량의 미세 조절은 우회 밸브 및 입구 Throttling 밸브를 설치하여 조절하였다. 원자력에서는 Immersion Heater 방식의 가압기를 사용한다. 하지만 본 실험에서 작동 유체로 사용한 프레온(HFC-134a)은 비등점이 매우 낮아서(대기압 하에서 HFC-134a 는 비등점이 영하 26 °C 이다), 히터로 가열하게 되면 기포가 발생하여 히터의 수명이 짧아지게 된다. 이러한 문제점

때문에 질소가스를 이용한 Accumulator 를 가압기로 사용하였다. Accumulator 에 질소가스를 주입하면 프레온 유체와 질소가스 사이에 있는 Buna-N(탄소중합체의 일종) 막이 팽창하면서 계통 압력은 증가되고, Accumulator 상단에 질소가스 배출 밸브를 설치하여 계통 압력을 감소시킬 수 있다. 예열기는 시험대의 입구온도를 조절하는 장치로 SCR 조절장치로 동시 제어를 하도록 제작하였고, PID 제어 혹은 가변저항기를 이용하여 시험대 입구의 온도조절을 하였다. 응축기는 시험대에서 생성된 증기를 응축하는 장치로서, 쉘튜브형의 STS 304 로 제작된 개별 응축기의 용량은 40kW 로 두 개를 사용하여 총 용량은 80kW 이다. 시험대에서 가열된 냉각수를 냉각시켜 시험대 입구에서의 유체온도를 일정하게 유지시키기 위한 열교환기는 두 대가 병렬로 설치되어 있으며, 열전달 조절 범위를 넓히기 위하여 우회 유로를 설치하였다. 열교환기는 응축기와 같이 쉘튜브형의 STS 304 로 제작된 것으로, 각각의 용량은 150kW 급이다.

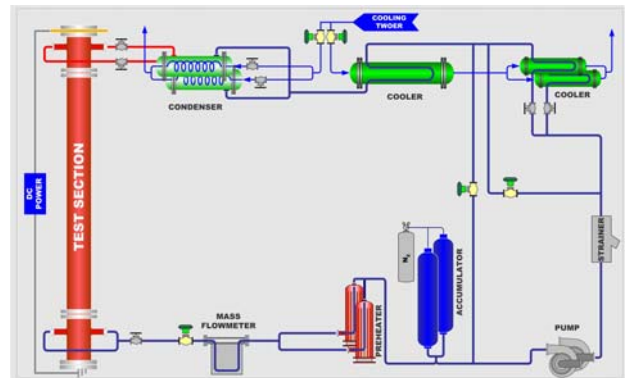


Fig. 1 Schematic diagram of the FTHEL facility

2.2 5x5 봉다발 시험대

5x5 봉다발의 중앙 부분에 5 개의 비가열봉을 장착하였고 지지격자는 복합유동 혼합날개(Hybrid mixing vane)를 사용하였다. 가열봉은 직접가열방식을 이용하는데, 이는 상용전기를 정류한 직류전원을 인코넬 601 재질의 봉에 직접 인가하여 봉의 자체저항으로 열을 발생시키는 방식이다. 가열봉의 출력은 가열봉의 두께를 조절하여 결정하며, 봉의 두께가 얇을수록 높은 열을 발생한다. 가열봉의 축방향 출력분포는 모두 균일하다. 그림 2는 비가열봉을 장착한 시험봉다발의 반경방향 출력분포를 보여준다. 그림 2에서 가열봉 내부에 표시된 숫자는 출력 인자(power factor)를 나타내며, 부수로에 표시한 14 개의 숫자는 부수로 유체 온도 측정을 위해 설치한 열전대의 위치를 나타낸다. 비가열봉이 위치함에 따라 부수로는 가열봉의 출력

분포에 따라 5 가지로 구분된다. 그림 2 에 나타난 것처럼 높은 출력을 갖는 가열봉 4 개를 비가열봉을 감싸면서 안쪽에 위치하고, 낮은 출력을 갖는 가열봉 16 개를 외곽에 장착하였다. 높은 출력을 갖는 가열봉의 경우 가열봉의 벽면온도를 측정하고 임계열유속 발생 여부를 판단하기 위하여 직경이 0.5mm 인 K-type 열전대를 가열구간 최상부에서 10 mm 하단 지점에 설치하였다. 열전대는 봉주위를 90 도 간격으로 4 개 설치하였는데, 각 열전대는 부수로의 중양을 향하도록 하였다. 한편 낮은 출력을 갖는 외곽 가열봉의 경우 임계열유속이 일어날 확률이 낮으므로 열전대를 2 개만 180 도 간격으로 심었으며 방향은 부수로 중양을 향하도록 하였다.

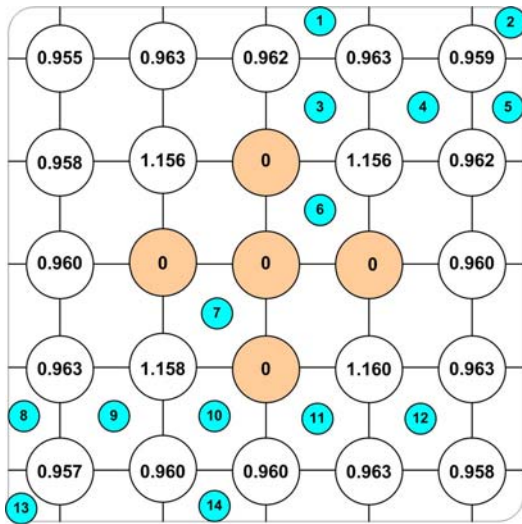


Fig. 2 Arrangement of heater rod

그림 3 은 시험봉다발의 축방향 주요 치수 및 지지격자의 위치를 보여준다. 시험봉다발에는 복합혼합날개 지지격자가 총 6 개가 설치되며 그 중 가열구간인 2m 내에는 3 개가 놓인다. 중간 지지격자 간격은 564 mm 이고, 가열 부의 마지막 지지격자와 열전대까지의 거리는 500 mm 이다. 일반적으로 축방향 출력분포가 균일한 경우 임계열유속은 가열길이 끝에서 발생하므로 실제 시험된 지지격자 간격은 500 mm 이다.

본 연구에서는 부수로내 국부적인 열역학적 조건을 구하기 위해 유체 온도 측정용 열전대를 설치하였다. 총 14 개의 K 형 열전대를 그림 2 에 표시한 부수로 위치에 장착하였다. 유체 온도 측정용 K 형 열전대는 정밀급(교정 오차: $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$)을 선정하였고 가열 구간 상단 끝 부분에 고정되도록 별도의 지지대를 이용하여 설치하였다. 열전대와 열전대 지지대 사이의 전기 절연을 위해 테프론

튜브 내부에 열전대를 삽입하여 측정 위치에 고정시켰다. 표 1 은 비가열봉을 장착한 5x5 봉다발 시험대의 주요 열수력 및 기하학적 특성을 정리한 것이다.

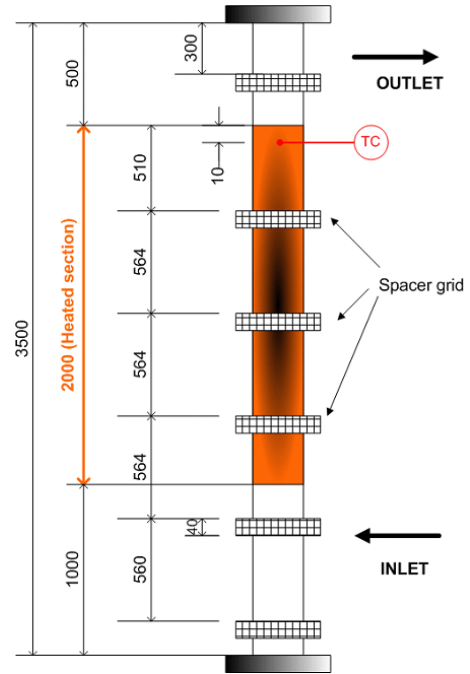


Fig. 3 Spacer grid location in the rod bundle

Table 1 Specifications of 5x5 rod bundle

Parameter	Value
Total number of heater rods	20
Total number of non-heating rods	5
Rod pitch (mm) / Rod diameter (mm)	12.85 / 9.5
Rod to wall gap (mm)	3.25
Heated length (mm)	2000
Distance between spacer grid (mm)	564
Flow area (mm ²)	2762.98
Heated equivalent diameter (mm)	18.07
Axial power distribution	Uniform
Radial power distribution	Non-uniform
Mixing vane	Hybrid
Working fluid	HFC-134a

3. 실험 결과 및 토의

3.1 부수로 혼합 실험

원자로 핵연료 설계를 위해서는 핵연료 집합체의 국부적인 열수력 거동을 파악하는 것이 필수적

이름 이를 위해 부수로 코드를 이용한 해석을 수행하는 것이 일반적이다. 핵연료 집합체와 같은 봉다발 형태에 대한 부수로 코드 해석 결과는 부수로 간의 횡류와 난류 혼합을 타당하게 모의하는가에 절대적인 영향을 받는다. 부수로 해석 코드에서 가장 중요한 입력 값의 하나인 난류 혼합 계수(turbulent diffusion coefficient, β)는 부수로 간의 횡류와 난류 혼합 특성을 고려하는 인자로서 별도의 단상 열 혼합 실험을 수행하여 결정한다. 본 연구에서는 5 개의 비가열봉이 존재하는 5x5 봉다발 시험대를 이용하여 부수로 혼합 실험(TDC: Turbulent Diffusion Coefficient)을 수행하였다. 부수로 혼합 실험 결과와 부수로 해석 코드인 MATRA[4] 해석 결과를 비교하여 최적 난류 혼합 계수를 결정하였다. 부수로 혼합 실험에서는 출구 압력, 유량, 히터 출력, 입구 온도를 일정하게 유지한 후 정상 상태 실험을 수행하여 총 22 개의 데이터를 생산하였다. 표 2 는 부수로 혼합 실험의 조건을 정리한 것이다.

그림 4 는 부수로 혼합 실험에서 측정된 출구 압력과 유량에 따른 부수로 내 유체 온도의 분포를 보여준다. 5 개의 비가열봉이 5x5 봉다발 시험대 중앙 부분에 위치함에 따라 부수로는 출력 분포 기준으로 5 가지 경우로 구분되며 부수로 내 출력 분포에 따라 유체 온도의 차이가 발생한다. 본 연구에서는 부수로 해석코드인 MATRA 를 이용하여 부수로 혼합 실험 결과를 검증, 비교하였다. 부수로 혼합 실험 조건과 동일한 해석 조건을 설정한 후 난류 혼합 계수에 대한 민감도 분석을 수행하여 부수로 내 유체 온도에 관한 실험 결과를 가장 잘 예측하는 난류 혼합 계수를 결정하였다. 실험에서 측정된 14 개 위치의 유체 온도를 출력 분포에 따라 5 가지로 구분한 후 평균값을 구하여 해석 결과와 비교하였다.

그림 5 는 난류 혼합 계수의 변화에 따른 MATRA 해석에서 계산된 부수로 내 유체 온도와 실험에서 측정된 유체 온도를 차이에 대한 평균값과 표준오차를 보여준다. 본 연구에서는 난류 혼합 계수에 대한 민감도 해석 결과, 최적 난류 혼합 계수를 0.02 로 결정하였다. 그림 6 은 난류 혼합 계수를 0.02 를 사용한 경우 부수로 혼합 실험에서 측정된 유체 온도와 MATRA 해석에서 계산된 유체 온도를 비교한 것이다. 그림 6 에서 알 수 있듯이 최적 난류 혼합 계수를 적용한 결과 부수로 내 유체 온도를 $\pm 1.0\%$ 이내에서 잘 예측함을 확인하였다. 본 연구에서는 5x5 봉다발 형상에 대한 최적 난류 혼합 계수를 결정하였으므로 임계열

유속 실험에 대한 부수로 해석을 수행하여 부수로 내 국부적인 열역학 특성을 분석할 수 있는 기반을 마련하였다.

Table 2 Experimental conditions of TDC test

Outlet Pressure (kPa)	Mass Flux (kg/m ² s)	Inlet Coolant Temp (°C)	Total Heater Power (kW)	Number of Data
2000	1500	50	100	3
	2000	50	100	
	2500	50	100	
2500	1500	50	100 / 150	9
	2000	50	100 / 150	
	2500	50	100 / 150	
	3000	50	100	
	3500	50	100	
	4000	50	100	
3000	1000	50	100	7
	1500	50	100 / 150	
	2000	50	100 / 150	
	2500	50	100 / 150	
3500	600	50	100	3
	800	50	100	
	1000	50	100	
Total Number of Data				22

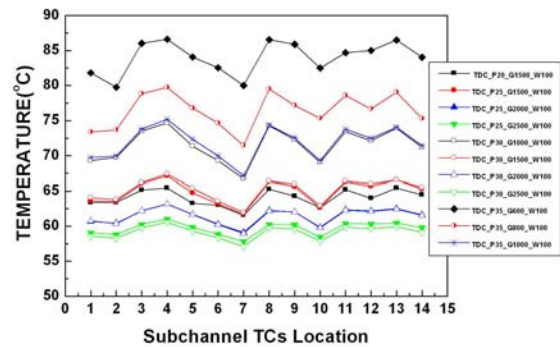


Fig. 4 Fluid temperature in the subchannel

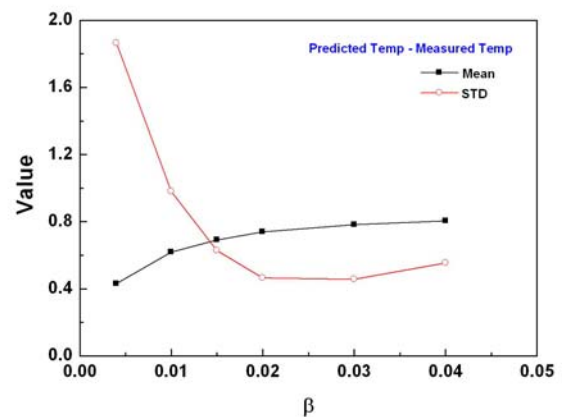


Fig. 5 Statistics against turbulent mixing parameter

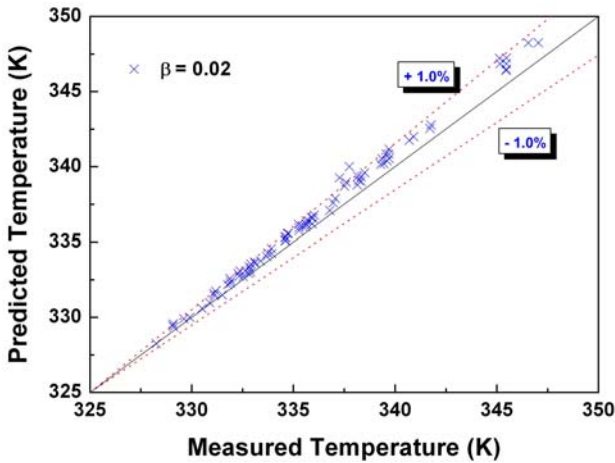


Fig. 6 Comparison of the fluid temperatures between the measurement and MATRA prediction

3.2 임계열유속 실험

원자로 운전 압력 조건에서 임계열유속 특성에 대한 비가열봉의 효과를 분석하기 위하여 임계열유속 실험을 수행하였으며, 총 83 개의 실험 데이터를 생산하였다. 표 3 은 5 개의 비가열봉이 존재하는 5x5 봉다발 시험대에서 수행한 임계열유속 실험 조건을 정리한 것이다. 비교 대상 실험으로 비가열봉이 없는 5x5 봉다발 시험대에서 동일한 압력, 유량, 입구 온도 조건에서 수행한 임계열유속 실험 자료를 선정하였다. 그림 7 과 그림 8 은 입구 압력 3000kPa 조건에 대하여 기준 실험과 비가열봉 실험에서 유량에 따른 임계 출력과 임계열유속의 비교를 각각 보여준다. 유량, 과냉도, 입구 압력 등의 실험 인자에 따른 임계열유속의 특성은 기준 실험 결과와 유사한 경향을 나타내었다. 비가열봉이 존재하는 경우, 임계열유속 관점에서 가열봉에 투입된 총 출력은 기준 실험에 비해 낮고, 임계열유속은 높게 나타났다.

비가열봉에 대한 임계열유속 실험에서 유량 1000 ~ 2000kg/m²s 사이의 일부 구간에서 유량에 따라 선형적으로 증가하던 임계열유속의 경향에 제동이 걸려 잠시 주춤하는 현상이 발생하였다. 이 구간이 지나면 임계열유속은 다시 유량에 따라 선형적으로 증가하는데 그 기울기는 유량이 낮을 때보다 더 커졌다. 이 현상은 압력이 높을수록 입구 미포화도가 클수록 두드러지게 나타났다. 임계열유속 값의 경향에 왜곡이 발생하는 구간은 임계건도(critical quality)가 포화상태에서 미포화 상태로 천이되는 공통점이 있음을 확인하였다. 그림 9 는 유량에 따른 임계건도와 임계열유속의 변화를 보여준다.

Table 3 Experimental conditions of CHF test

Pressure (kPa)	Inlet Subcooling (kJ/kg)	Mass Flux (kg/m ² s)	No. of Data
2000	25	250 / 550 / 750 / 1000 / 1100 / 1250 / 1350 / 1500 / 2000 / 3000	10
	40	550 / 750 / 1000 / 1100 / 1250 / 1350 / 1500 / 2000 / 3000	9
2500	25	250 / 550 / 750 / 1000 / 1100 / 1250 / 1350 / 1500 / 2000 / 3000	10
	40	250 / 550 / 750 / 1000 / 1250 / 1500 / 2000 / 2500	8
	55	250 / 550 / 750 / 1000 / 1100 / 1250 / 1350 / 1400 / 1450 / 1500 / 1550 / 1750 / 2000 / 2500	14
3000	25	250 / 550 / 750 / 1000 / 1100 / 1250 / 1350 / 1500 / 2000 / 3000	10
	40	250 / 550 / 750 / 850 / 1000 / 1100 / 1250 / 1350 / 1500 / 2000 / 2500 / 3000	12
	55	250 / 550 / 750 / 850 / 1000 / 1100 / 1250 / 1350 / 1500 / 1750	10
Total Number of Data			83

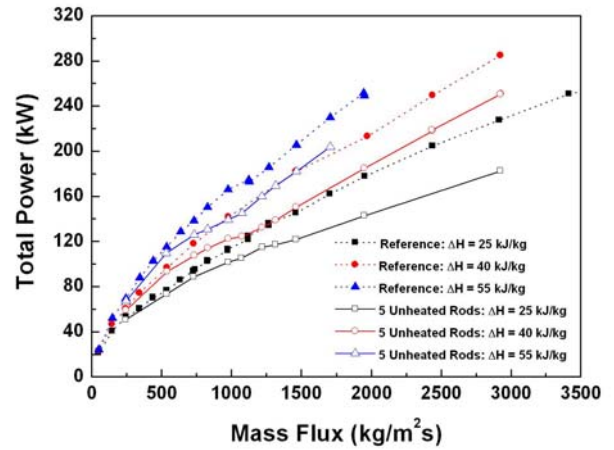


Fig. 7 Comparison of the critical power

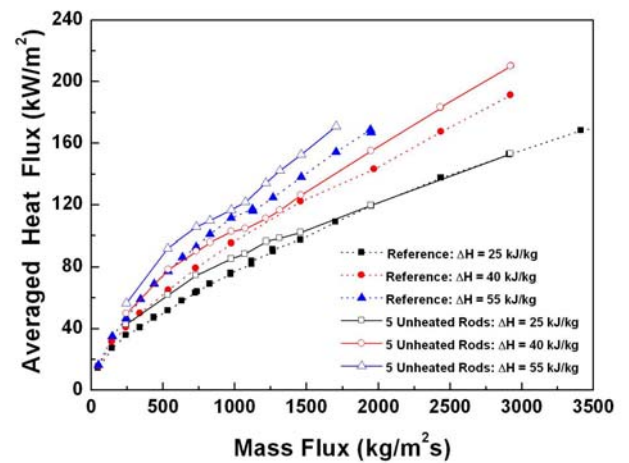
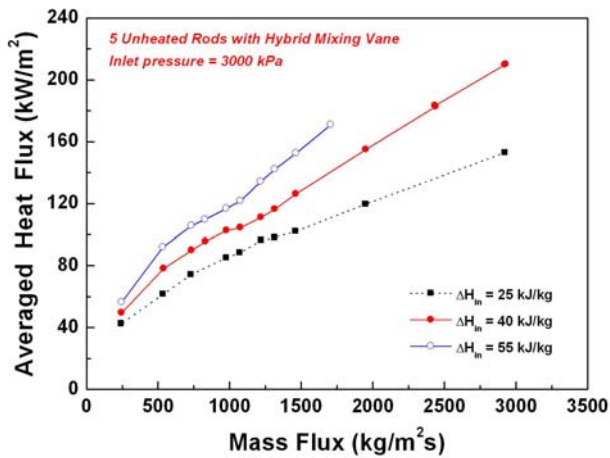
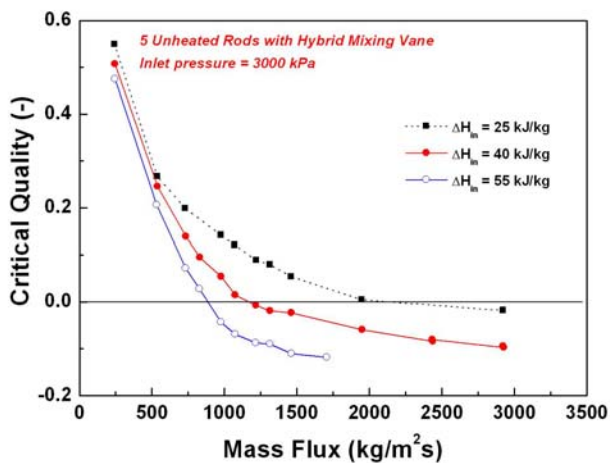


Fig. 8 Comparison of the critical heat flux



(a) Critical heat flux



(b) Critical quality

Fig. 9 Variation of the CHF and the critical quality according to the mass flux

4. 결론

본 연구에서는 복합혼합날개를 장착한 5x5 봉다발의 중앙 부분에 5 개의 비가열봉을 장착하여 반경 방향의 비균일 출력분포가 임계열유속 성능과 부수로 혼합에 미치는 영향을 평가하였다. 비교 대상 실험으로 비가열봉이 없는 5x5 봉다발 시험대에서 동일한 압력, 유량, 입구 온도 조건에서 수행한 임계열유속 실험 자료를 선정하여 임계열유속 특성을 비교 분석하였다. 임계열유속 실험과 더불어 부수로 혼합 실험을 수행하여 노심 설계 및 열수력 안전 해석을 위해 일반적으로 사용되는

부수로 해석 코드에서 가장 중요한 입력 값의 하나인 난류 혼합 계수(turbulent diffusion coefficient, β)를 결정하였다.

MATRA 코드를 이용하여 난류 혼합 계수에 대한 민감도 해석 결과, 본 연구에서 수행한 부수로 혼합 실험결과를 가장 잘 모의할 수 있는 최적 난류 혼합 계수를 0.02 로 결정하였다. 최적 난류 혼합 계수를 적용한 결과 부수로 내 유체 온도를 $\pm 1.0\%$ 이내에서 잘 예측함을 확인하였다. 유량, 과냉도, 입구 압력 등의 실험 인자에 따른 임계열유속의 특성은 기존 실험 결과와 유사한 경향을 나타내었다. 비가열봉이 존재하는 경우, 임계열유속 관점에서 가열봉에 투입된 총 출력은 기존 실험에 비해 낮고, 임계열유속은 높게 나타났다. 입구 압력과 미포화도가 큰 경우, 임계건도(critical quality)가 포화상태에서 미포화 상태로 천이되는 구간에서 유량에 따라 선형적으로 증가하던 임계열유속의 경향에 제동이 걸려 잠시 주춤하는 특이한 현상이 발생하였다. 이 같은 결과는 임계열유속의 발생 기구에 따른 특이 현상으로 이해되며 이에 대한 추가적인 분석이 요구된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 중장기 사업의 일환으로 수행하였습니다.

참고문헌

- (1) Chang, S. H. and Baek, W. P., 1997, "Critical Heat Flux: Fundamentals and Applications," Chung Mun Gak, pp. 1 ~ 14.
- (2) Fighetti, C.F. and Reddy, D.G., 1982, "Parametric study of CHF data," EPRI Report NP-2609.
- (3) Chun, T.H. et al., 2005, "Spacer Grid with Hybrid Flow-Mixing Device for Nuclear Fuel Assembly," U.S. Patent No. 6845138.
- (4) Yoo, Y. J. and Hwang, D. H, 1998, "Development of a Subchannel Analysis Code MATRA (Ver. α)," KAERI/TR-1033/98.