

핀이 달린 봉 다발을 이용한 임계열속 시험

Critical Heat Flux Tests using Finned Rod Bundles

채희택, 김현일, 한기양, 박 철, 임인철, 백원필
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

이용호, 장순홍
한국과학기술원
대전광역시 유성구 구성동 373-1

요 약

하나로 핵연료에 대해 저유속에서 고유속까지의 전 유량범위를 포함하는 CHF 실험 데이터 세트를 갖추기 위하여 저유속 조건에서 봉다발 CHF 실험을 수행하였다. 핀이 달린 시험봉은 가열관인 stainless steel (SUS) 튜브에 알루미늄 피복재를 동심 압출하여 제작하였으며, 핵연료봉과 외형상 동일하고 전길이를 모의하였다. 다발 시험관은 육각, 삼각, 사각 형태의 3개 세트가 있으며 각 시험관에는 시험봉이 7개, 3개, 4개가 장착되고 축방향으로 시험봉들을 지지하는 3개의 간격판이 삽입된다. 시험관 상부에는 내부 유동을 관측할 수 있도록 유동 관측창을 두고 실험 전과정의 유동 변화를 관찰 기록하였다. 시험관 내 유동은 가열봉이 임계열속에 도달하기 전까지 기포류(bubbly flow)로부터 전형적인 유동패턴을 거쳐 환상류(annular flow)가 상당시간 지속된 후에 임계열속에 도달하였다. 다발 임계열속 실험에서는 3개의 시험다발에 대하여 각 12개씩 총 36개의 CHF 데이터를 얻었다. 다발 임계열속 실험 결과들을 유사한 조건의 단일봉 결과와 비교하였을 때 다발 CHF 결과가 4% ~ 32% 큰 것으로 나타났다. 이는 시험다발에 축방향으로 위치하는 3개의 간격판에 의해 난류 및 열혼합 현상이 증가함에 따라 나타난 결과로 판단된다. 이러한 결과는 단일봉 CHF 자료를 바탕으로 개발된 CHF 상관식을 적용하여 노심의 열적 여유도를 평가하는 기존의 열수력 해석방법에 보수성이 포함되어 있음을 간접적으로 보여준다.

Abstract

Rod bundle CHF tests were performed under the low flow conditions to supplement CHF data for HANARO fuel. Test rod has the same geometric configuration as the real HANARO fuel and aluminum cladding with fins is co-extruded on SUS heating tube. There are 3 types of test sections that their shapes are hexagonal with 7 rods, triangular with 3 rods and rectangular with 4 rods. Test bundle has 3 spacers axially and a view window is located in upper region of the test section. Flow patterns until CHF condition are typically varied from bubbly flow to annular flow and then CHF is occurred through long annular flow period. 36 bundle CHF data were obtained in 3 test sections. When bundle CHF data are compared

with single rod CHF data, bundle CHF data are larger than single rod CHF data by 4% ~ 32%. It is considered that these results are induced by enhancement of turbulence and thermal mixing generated by spacers. It can be seen indirectly that the existing thermal margin analysis for HANARO core has a conservatism because CHF correlation was developed based on single rod data.

1. 서론

임계열속(CHF, Critical Heat Flux)은 가열 표면에서 냉각 조건 또는 출력 변화에 따라 급작스런 열전달의 저하로 핵연료 온도가 급격히 상승하는 현상으로 핵연료 손상과 직접적으로 관련되는 중요한 열수력 현상이다. 따라서, CHF는 원자로 설계 및 안전성 평가 시 가장 중요하게 고려하는 설계 변수의 하나이며, 노심 최대 출력 또한 CHF에 의해 제한된다. 원자로에서 CHF 현상은 핵연료의 기하학적 모양 및 운전 조건 등에 따라 매우 복잡하게 나타나므로 이를 정확하게 예측하는 것은 쉬운 일이 아니다. 일반적으로 원자로 설계에는 특정 원자로의 핵연료 모양 및 운전 조건에서 실험한 CHF 자료를 근거로 CHF 상관식을 개발하여 CHF 예측에 사용하고 있다.

하나로는 열출력 30MW의 연구용 원자로로서 육각형의 36봉 핵연료집합체와 원형의 18봉 핵연료집합체를 사용한다. 일반적인 핵연료와 달리 열전달 효율을 증가시키기 위하여 핀(fin)이 부착된 연료봉 형으로 설계되어 있으므로 적용 가능한 일반 자료가 거의 없다. 이에 따라 핵연료 개발사인 캐나다의 AECL(Atomic Energy of Canada Limited)에서 원자로 정상 운전 조건인 고유속 조건에서 임계열속 실험을 단일봉과 봉다발에 대해 수행하였다[1,2,3]. 한편 한국원자력연구소(KAERI)에서는 하나로의 자연대류 냉각 운전 조건과 급격한 냉각수 감소 사고 시 정량적 안전성 평가를 위해 저유속 조건에서 단일봉에 대해 CHF 실험을 수행하였다[4]. 본 연구에서는 하나로 핵연료에 대해 저유속에서 고유속까지의 전범위를 포함하는 CHF 실험 자료 세트를 갖추는 것을 목표로 저유속 조건에서 봉다발 CHF 실험을 수행하였다.

2. 다발 임계열속 실험

2.1 실험장치

1) 시험봉

시험봉은 전기적으로 열을 발산하는 것을 제외하고는 가능한 실제 하나로 핵연료봉과 재질 및 기하학적 모양이 같도록 제작하였으며 제작 도면은 그림 1과 같다. 시험봉의 전체 가열 길이는 700mm이고, 상단에 500mm와 하단에 780mm 길이의 비가열 확장 튜브가 연결된다. 시험봉 내부의 가열관은 외경 6.2mm 두께 0.85mm인 SUS 튜브이며 축방향으로 일정한 열속을 갖는다. 임계열속 발생을 감지할 수 있도록 외경 2.0mm, 길이 700mm인 K type 열전대를 구리봉 내부에 인입하여 SUS 튜브 상단 10mm 아래에 \varnothing 2mm로 뚫은 구멍에 고정시킨 후 전자빔(EB, Electron Beam) 용접을 하였다. 알루미늄 피복관과 가열부인 SUS 튜브와의 전기적인 절연을 위하여 알루미늄 분말을 플라즈마 코팅 방법(plasma flame deposited aluminum oxide)을 이용하여 SUS 튜브 표면에 0.12mm 두께로 입혔다. 시험봉의 알루미늄 피복은 KAERI에서 하나로 핵연료 피복에 사용하는 cladding die 집합체를 사용하여 피복하였다.

2) 시험다발

시험다발은 시험봉, 상하부 봉단접합관 및 3개의 간격판으로 구성되며 시험봉 수에 따라 3가지로 제작되었다. 첫째는 7개의 시험봉이 삼각 부수로 형태로 배열되고 봉 사이의 거리는 12mm이

며 이는 하나로 36봉 핵연료집합체의 삼각 부수로와 육각 모서리 부수로를 모사하기 위하여 제작되었다. 둘째는 4개의 시험봉이 사각배열을 하여 18봉 핵연료집합체의 사각 부수로를 모사하였다. 셋째는 3개의 시험봉이 삼각배열을 하는 다발이다. 이는 7개 봉인 육각 다발 시험에서 과전류로 전원공급장치가 제한되므로 봉 수를 줄여 전기 저항을 크게 하였고 같은 전류에서 전압이 증가하므로 결과적으로는 봉당 출력과 표면 열속을 증가시켰다. 또한 유로 단면적의 감소로 인하여 같은 유량에서 질량 유속이 증가하므로 측정 범위를 확장할 수 있었다. 세 종류 다발의 기하학적 단면은 그림 2에 나타나 있다.

3) 시험관

봉다발 임계열속 시험을 위한 시험관은 시험다발이 위치하는 유동관과 안정된 입출구 유동을 얻기 위한 상하 플리넘으로 구분된다. 이러한 시험관 구조는 하나로 핵연료 조건을 모사할 수 있도록 고려하였다. 시험다발이 위치하는 유동관 (flow tube)은 시험다발의 형상에 따라 육각형, 삼각형 및 사각형 채널로 구분된다. 처음에는 전체 시험다발을 관찰하는 것이 가능하도록 유동관을 강화 아크릴(poly-carbonate)로 제작하였으나 냉각수 온도변화에 따른 재질의 신축으로 누수가 발생하였다. 이에 따라 유동관 재질을 SUS 플레이트로 변경하고 CHF가 발생할 것으로 예상되는 상부 봉단접합관과 상부 간격체 사이에 유동 관측용 창을 두었다. 그림 3에는 사각 SUS 시험관과 유동관측창 및 상부 출구부분에 대한 사진이 실려있다.

4) 실험 계통

다발 임계열속 측정을 위한 실험장치로 한국과학기술원(KAIST)에 있는 중간 압력 임계열속 실험장치에 시험관을 연결하여 실험계통을 구성하였다. 시험다발이 들어 있는 시험관(test section)을 제외한 실험계통의 구성기기는 수직 열교환기(vertical heat exchanger), 응축기(condenser), 피스톤 펌프(piston pump), 터빈 유량계(turbine flowmeter), 저장 탱크(surge tank), 각종 밸브 그리고 각 구성 기기들을 연결하는 1인치 SUS 강관 등이다. 실험계통의 유동 저항을 조절하기 위하여 시험관의 입구 부분에 니들 밸브(needle valve)를 설치하였으며 실험계통에 대한 개략도는 그림 4와 같다.

2.2 임계열속 실험

1) 실험 조건

다발 임계열속 실험 조건은 하나로의 자연 순환 냉각 조건 및 사고 조건을 고려한 저압, 저유속 조건이다. 실제적인 실험에서는 시험다발에 직류 전원을 공급하는 정류기의 용량에 의해 제한을 받아 최대 출력이 200kW(40V, 5000A)인 점을 고려하여 시험봉과 시험다발을 설계하였다. 시험 유량도 실험장치의 펌프 용량과 정류기의 한계 출력 안에서 임계열속에 도달할 수 있는 범위로 결정되었다. 유량은 질량유량(mass flux) 기준으로 50 ~ 250kg/m²sec 범위이고 온도와 압력에 대해서는 실험 변수로 취급하지 않았지만 입구 온도는 25 ~ 50℃ 범위에서, 출구 압력은 150 ~ 400kPa 범위에서 실험이 수행되었다.

2) 실험 방법 및 절차

저압, 저유속 조건에서 임계열속은 실험 설비가 "stiff" 또는 "soft" 여부에 큰 영향을 받는다[5, 6]. 즉, 입구 유량을 조절하지 않는 경우("soft" system) 유량의 수력적 불안정성에 따른 유량 진동이 발생하여 임계열속이 일찍 발생할 수 있다. 이를 피하기 위하여 시험관 입구와 펌프 사이의

압력차를 3기압 이상 두었다. 각각의 실험 측정치들은 약 1초간의 간격으로 데이터 획득 시스템에 의해 기록되어 시간 평균을 적용하여 모든 데이터를 처리하였다. 실험 회로의 냉각수는 정수 장치에 의해 공급되는 이온 및 기타 불순물이 제거된 증류수를 사용하였으며 시험다발을 예열하여 유체에 녹아 있는 공기 등을 배출한 후 실험을 수행하였다.

실험 수행의 단계별 절차는 다음과 같다.

- ① 측정하고자 하는 기하학적 형태의 시험관을 수직 지지대에 설치하고 입출구 배관과 상하 전극을 전류 공급선에 연결한다.
- ② 시험봉과 입출구 온도를 측정하는 열전대, 출구 압력과 간격판에서의 차압을 측정하는 압력 및 차압계를 연결한다.
- ③ 데이터 시스템을 구동하고, 기록되는 모든 입력 및 출력인자를 확인한다.
- ④ 실험회로의 배기밸브를 열고 펌프를 구동하여 회로 내부에 있는 공기를 배출시킨다.
- ⑤ 펌프 인버터의 주파수를 조정하여 유량을 설정값으로 맞추고 시험관 입구에 설치된 트로틀링 밸브를 조작하여 밸브 전단의 압력이 3기압 이상이 되도록 승압한다.
- ⑥ 2차 냉각계통의 냉각수 유입밸브를 열어 열교환기 2차 측에 냉각수를 공급한다.
- ⑦ 유동과 관련된 모든 인자들이 정상상태를 유지하면 전원공급장치의 전원을 켜 후 시험다발을 서서히 가열한다.
- ⑧ 시험다발로의 전력 공급은 단계적으로 전압을 올리면서 시험봉 온도가 일정해지면 전압, 전류, 시험관 입구온도 및 출구 압력을 기록지에 기록하고 다음 단계로 넘어 간다.
- ⑨ 시험봉의 내부 벽면 온도가 순간적으로 급격히 상승하면 전력공급을 차단하여 시험다발의 손상을 방지한다.
- ⑩ 컴퓨터에 저장된 데이터 파일을 확인하고 CHF 및 관련 인자들을 점검한 후 실험을 종료한다.

3. 실험 결과 및 논의

봉다발 임계열속 실험 자료는 각 시험관에서 12개씩 총 36개를 얻었다. 육각, 삼각 및 사각 시험관에서 질량 유속을 변화시키며 각 조건에서 3개 ~ 4개의 임계열속 데이터를 생산하였다. 실험 자료의 정확성을 위해 3회 ~ 5회 반복 실험을 한 후 시험봉들을 새 봉으로 교체하였다.

3.1 출력 검증 시험

실험을 시작하기 전에 공급 출력과 냉각수로 전달된 열출력을 확인하기 위하여 출력 검증시험을 육각 시험관에서 수행하였다. 시험 방법은 단상 유동상태에서 일정 유량을 유지하고 출력을 단계적으로 올리면서 시험관 입출구 온도를 측정하여 구한 열출력과 정류기 계기판에 표시되는 정류기 출력을 비교하였다. 비교 결과, 그림 5와 같이 정류기 출력과 열출력이 출력이 정확하게 일치함에 따라 정류기에 표시되는 전압과 전류값으로 실험 출력을 결정하기로 하였다.

3.2 임계열속 현상 관찰

임계열속과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려진 유동 패턴을 관찰하기 위하여 실험 전과정을 비디오 카메라로 촬영하였으며 특히 임계열속 발생 근처의 유동 변화를 자세히 관찰하였다. 저유속 조건에서 임계열속은 annular flow 영역에서 주기적으로 진동하는 냉각수에 의해 냉각되는 가열 표면이 냉각되기 전에 시험봉 끝 근처의 액막이 증발될 정도의 높은 열속에서 발생하였다. 저유속 조건의 냉각수 비등에서 상류 지역의 슬러그 유동의 불안정성에 주로 기인하는 chugging 또

는 진동 현상의 간격은 상대적으로 길다. 그리고 큰 진폭의 wave가 있는 환상 유동이 주로 관측된다. 입계열속이 발생하기 전까지 시험봉에서 발생하는 열은 환상 유동 시작과 함께 생기는 강한 pulsation에 의한 액막류에 의해 제거된다. 유량과 열속이 증가함에 따라 같은 방향으로 흐르는 증기와 액막 속도가 점차 빨라지고 pulsation 주기도 급격히 짧아지고 안정된 환상 유동이 형성된다. 이는 증기류의 속도 증가가 액막의 wave amplitude를 안정시키기 때문인 것으로 추정된다. 그러나 가열 표면은 입계열속 발생 전까지는 빠른 액막류에 의해 냉각되는 것으로 판단된다.

3.3 다발 입계열속 시험 결과

1) 육각 시험관

육각 시험다발에 대해서는 질량 유속이 50, 75, 100kg/m²sec인 상태에서 각 4회씩 12회 입계열속 시험을 수행하였다. 그림 6은 시간에 따라 출력을 상승시키면서 나타난 시험봉의 온도 변화를 대표적으로 보여 주고 있다. CHF 발생 시점에 대한 판단은 시험봉의 온도가 150℃ 이상 급격히 증가하는 현상을 기준으로 하였다. 그림 6에서 질량 유속이 75kg/m²sec인 결과를 보면 CHF에 근접해 가면서 여러 시험봉들의 온도 변동폭이 커지다가 CHF 발생봉에서 급작스럽게 온도가 증가하는 현상을 볼 수 있다. 이러한 경향은 온도 변동폭이나 온도 변화 양상에서 차이는 있으나 다른 시험관에서도 나타나는 전형적인 현상이었다. 시험봉들 사이에 측정 온도가 차이가 나는 것은 열전대가 시험봉 내부의 SUS 튜브에 용접될 때 열전대 끝단의 심어진 깊이에 따라 발생하는 것으로 판단된다. 그러나 실험에서는 실험봉의 순간적인 온도 증가가 중요하므로 봉간의 온도차는 무시하였다.

육각 시험관에서 얻어진 12개의 CHF 데이터는 그림 7에 도시되어 있다. 질량 유속 100kg/m²sec에서의 데이터 한 개를 제외하고는 반복성이 좋은 결과를 보여 주고 있다. 육각 시험다발은 중앙봉과 6개의 모서리봉으로 이루어져 있는데 CHF는 비가열면(cold wall)을 갖는 모서리봉에서 모두 발생하였다. 이는 같은 출력이라면 비가열면을 갖는 부수로(subchannel)에서 CHF가 발생한다는 연구 결과[7]와 일치하였다. 그림 7에서와 같이 질량 유속이 증가할수록 입계 출력은 커지는 것을 볼 수 있다. 저유속 조건에서는 액막 증발에 의해 입계열속이 발생하는 것으로 추정되므로 질량 유속이 증가할수록 액막 유량도 증가하므로 입계열속이 증가하는 것으로 판단된다. 그림 8에서는 입구 온도가 입계출력에 미치는 영향을 각 시험관별로 비교하였다. 일부 명확한 경향을 나타내지 않는 자료도 있으나 대부분 입구 냉각수 온도가 증가하면 입계 출력은 낮아지는 경향을 보이고 있다. 이는 입구 온도가 낮을수록 과냉각의 증가로 인해 액막 두께가 두꺼워짐에 따라 입계열속이 증가하는 것으로 생각된다.

2) 삼각 시험관

삼각 시험다발에 대해서는 질량 유속이 100, 150, 200 및 250kg/m²sec인 상태에서 각 3회씩 12회 입계열속 시험을 수행하였다. 출력을 올리면서 측정된 시험봉들의 온도 변화는 육각 시험다발과 같은 형태를 보였다. 삼각 시험관에서 얻어진 12개의 CHF 데이터는 그림 7에 도시되어 있으며 질량 유속에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보여 주고 있다. 삼각 시험다발에서는 3개의 시험봉 중 같은 위치의 한 봉에서만 CHF가 발생하였다.

3) 사각 시험관

사각 시험다발에 대해서는 질량 유속이 100, 150 및 200kg/m²sec인 상태에서 각 4회씩 12회 입계열속 시험을 수행하였다. 출력 상승에 따른 시험봉의 온도 변화는 이전의 육각 및 삼각 시험다발과 유사한 양상을 보여 주었으며 12개의 CHF 데이터는 그림 7에 도시되어 있다. 삼각 시험

관의 결과와 비교하면 사각 시험관에서의 CHF 데이터가 질량 유속이 증가할수록 값이 크고 기울기 또한 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 차이는 삼각과 사각 채널인 부수로 형태에 따른 것으로 판단된다. CHF 발생 위치는 사각 시험다발의 4개 시험봉 모두에서 CHF가 발생하였다.

3.6 단일봉 실험 결과와의 비교

그림 9에서는 저압 저유속 조건에서 동일한 형상의 단일 시험봉에 대한 임계열속 실험 결과[4]와 다발 임계열속 결과를 비교하였다. 가능한 입구 온도와 압력이 유사한 자료를 선정하였으며 등가 수력 직경은 봉다발이 약 5.5mm이고 단일봉의 경우는 7.3mm로 약간의 차이가 있다. 그림에서와 같이 다발 실험에서의 임계출력이 단일봉 결과보다 전반적으로 큰 것으로 나타났다. 이러한 경향은 봉다발에서는 축방향으로 3개가 삽입된 간격판에 의한 유동 및 열혼합 현상에 기인하는 결과로 판단된다.

4. 결론

핀이 달린 봉다발 형태인 하나로 핵연료집합체에 대하여 저유속 상태에서의 다발 임계열속 시험을 수행하였다. 시험봉은 가열관인 SUS 튜브에 핵연료봉과 동일한 형상으로 알루미늄 피복재를 동심압출한 전길이 모의 핵연료봉으로 제작하였다. 시험다발로는 각각 7개, 3개 및 4개 시험봉으로 이루어진 육각, 삼각 및 사각 시험다발을 제작하였으며 동일한 형상의 단면을 갖는 시험관에 설치하였다. 실험은 질량 유속을 기준으로 $50 \sim 250\text{kg/m}^2\text{sec}$, 입구 온도 $25 \sim 50^\circ\text{C}$, 출구 압력 $150 \sim 400\text{kPa}$ 범위에서 수행되었다. 임계열속에 도달하기까지의 시험봉 온도 변화는 CHF에 근접해 가면서 여러 봉들의 온도 변동폭이 커지다가 CHF 발생봉에서 순간적으로 온도가 증가하는 형태를 보였다. 시험관 내 유동은 가열봉이 임계열속에 도달하기 전까지 기포류(bubbly flow)로부터 전형적인 유동패턴을 거쳐 환상류(annular flow)가 상당시간 지속된 후에 임계열속에 도달하였다. 실험에서는 3개의 시험다발에 대하여 각 12개씩 총 36개의 CHF 데이터를 얻었다. 이들은 질량 유속이 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하였으며 입구온도가 높을수록 감소하는 일반적인 경향을 나타내었다. 다발 임계열속 실험 결과들을 유사한 조건의 단일봉 결과와 비교하였을 때 다발 CHF 결과가 4% ~ 32% 큰 것으로 나타났다. 이는 시험다발에 축방향으로 위치하는 3개의 간격판에 의해 난류 및 열혼합 현상이 증가함에 따라 나타난 결과로 판단된다. 이러한 결과는 단일봉 CHF 자료를 바탕으로 개발된 CHF 상관식을 적용하여 노심의 열적 여유도를 평가하는 기존의 열수력 해석방법에 보수성이 포함되어 있음을 간접적으로 보여준다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 정책연구기술개발 용역과제로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

참고문헌

1. R.L.Hembroff et. al., "Single-phase and Boiling Heat Transfer Measurements Conducted in the MAPLE-X10 Heat Transfer Test facility", MX10-03300-233-TN, Technical Note, AECL, Canada, 1991.
2. G.R. Dimmick and et al., "Results from the DRNU5 Bundle CHF Test", MX10-03300- 419-TN, ARD-TD-446, 93-06.
3. G.R. Dimmick and et al, "Results from the DRNU7 Bundle CHF Test", MX10-03300- 429-TN, ARD-TD-460, 94-02.
4. 박 철, 채희택, 한기양, "저유속 조건에서 하나로 의 단일봉에 대한 임계열유속 실험", 기술보고서, KAERI/TR-880/97, 1997.
5. Mishima, K. and Ishii, M.(1982), CHF Experiments under Low-flow Conditions in a Vertical

Annulus, NUREG/CR-2647.

6. Ruan et al. , "Characteristics of the Critical Heat Flux for Downward Flow in a vertical Tube at Low Flow rate and Low Pressure Conditions," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.7, 1993.
7. Tong L.S.(1972), *Boiling Heat Transfer and Two-Phase Flow*, John Wiley & Sons Inc.

표 1. 시험다발과 시험관의 기하학적 데이터

항 목		육각다발	삼각다발	사각다발
Number of heated rods		7	3	4
집합체 길이 (mm)	Heated length	700	700	700
	Bottom unheated length	780	780	780
	Top unheated length	500	500	500
Pitch between rods(mm)		12	12	12
Sheath dimension (mm)	Outer diameter at base of fins	7.87	7.87	7.87
	Outer diameter over fins	9.91	9.91	9.91
Fin dimension	Number of fins	8	8	8
	Height of fins(mm)	1.02	1.02	1.02
	Width of fins(mm)	0.76	0.76	0.76
Flow tube dimension	Flat to flat(mm)	32.9	28.5 (height)	24.1
	Cross sectional area(mm ²)	937.7	467.7	578.2
	Inner perimeter(mm)	114.0	98.6	96.2
Bundle dimension	Net flow area(mm ²)	553.7	303.1	358.8
	Hydraulic diameter(mm)	5.52	5.47	5.51
	Total heat transfer area without fins(mm ²)	121149	51921	69228

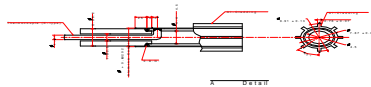
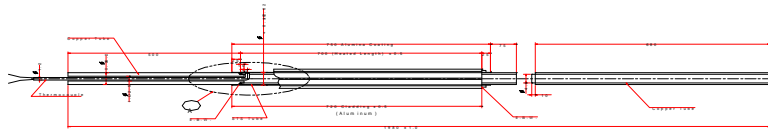
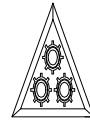
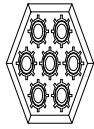


그림 1. 핀이 달린 시험봉의 제작 도면



1) 육각 시험다발

2) 삼각 시험다발



3) 사각 시험다발

그림 2. 세 종류의 시험다발 단면

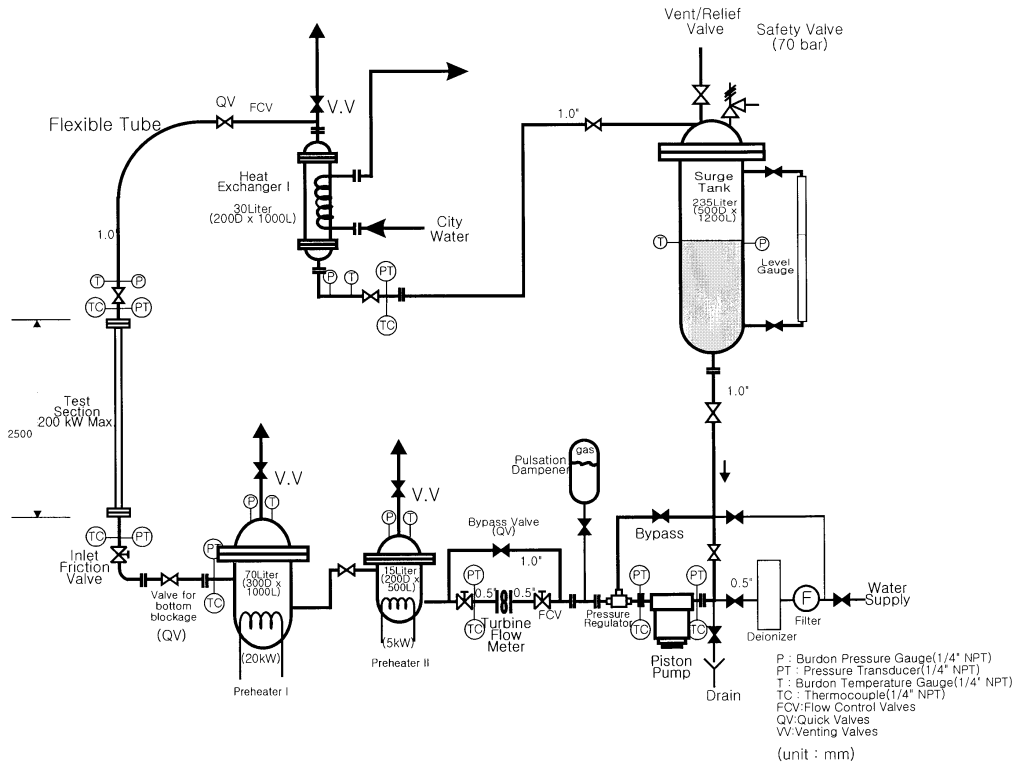


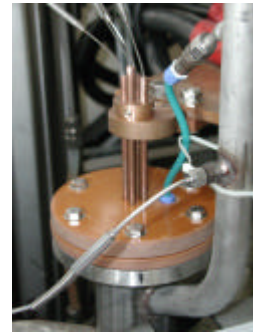
그림 3. KAIST의 입계열속 실험계통



1) 시험관



2) 유동 관측창



3) 출구 부분

그림 4. 다발 임계열속 시험장치 (사각 시험관)

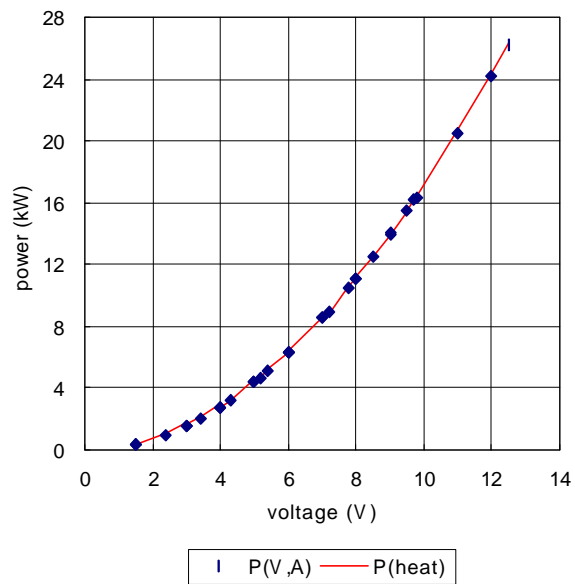


그림 5. 정류기 공급 출력과 열출력의 비교 검증 결과

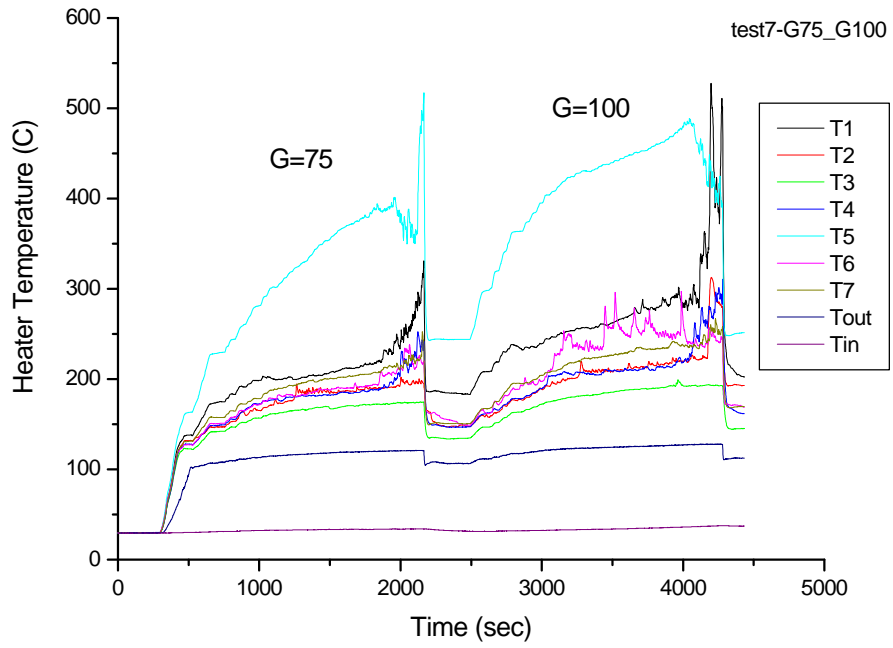


그림 6. 육각 시험관의 시험봉 온도 변화

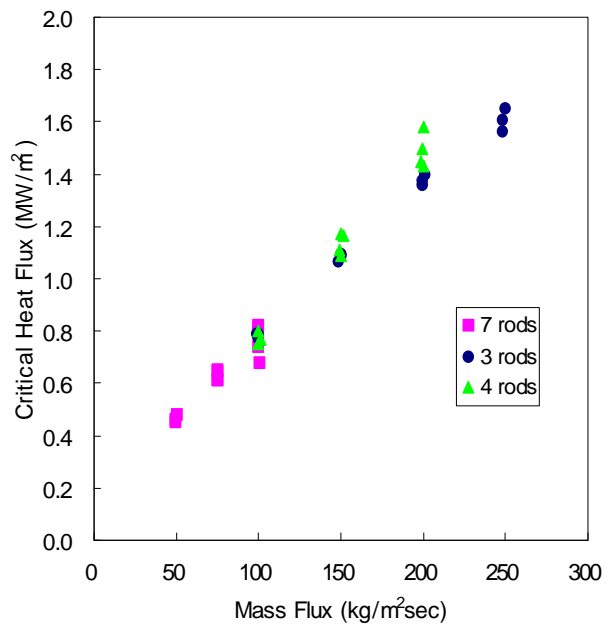
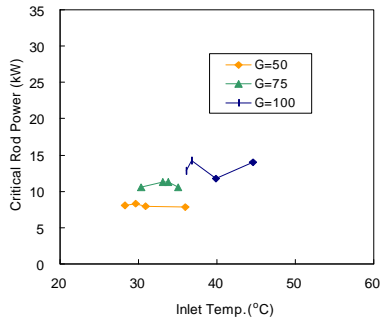
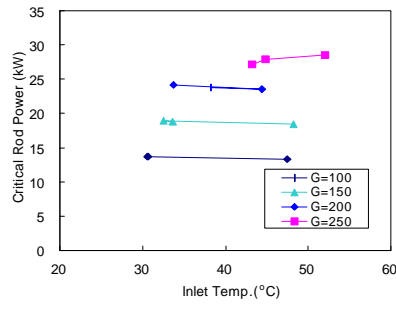


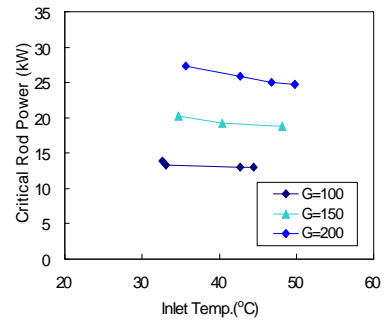
그림 7. 질량 유속에 따른 봉다발 임계열속 측정 결과



1) 육각 시험관

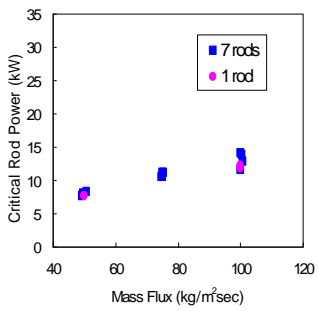


2) 삼각 시험관

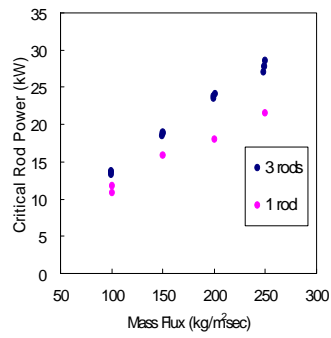


3) 사각 시험관

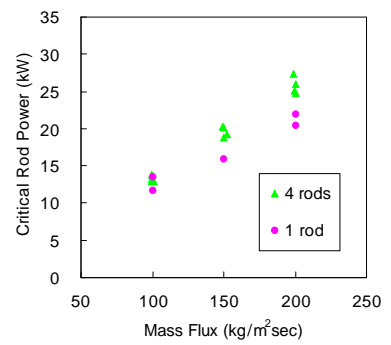
그림 8. 시험관 입구 온도에 따른 임계열속 변화



1) 7봉 다발 실험



2) 3봉 다발 실험



3) 4봉 다발 실험

그림 9. 각 시험관의 임계 봉출력과 단일봉 실험 결과와의 비교