

〈論 文〉

핵연료 집합체의 혼합날개가 임계 열유속에 미치는 영향에 대한 이상유동 영역별 고찰

박주환* · 이준식** · 석호천*

(1993년 10월 29일 접수)

The Effect of a Rod Bundle Mixing Vane on the Critical Heat Flux

J. H. Park, J. S. Lee and H. C. Suk

Key Words : Mixing Vand(혼합날개), Spacer Grid(지지격자), Critical Heat Flux(임계 열유속), Fuel Assembly(핵연료 집합체), Subchannel(부수로), Flow Regime(유동영역)

Abstract

The critical heat flux(CHF) was investigated by using a bundle composed of 25 rods as a test model of a PWR fuel assembly. Tests were performed in the loop with a vertically upward two-phase flow using freon-12 as a working fluid to evaluate the effect of the spacer grid mixing vane on CHF. Two different types of spacer grids were used ; one with mixing vanes, and the other without mixing vanes. The effects of mixing, vanes on CHF were identified in consideration of different flow conditions such as inlet subcooling, mass flux, and pressure. As results, it was found that the effect of mixing vanes on CHF difference(difference in CHF between the cases with and without mixing vanes) was significant with increasing the mass flux, and that it was dependent on the different flow regimes. In order to identify the effect of the mixing vanes on the CHF according to the different flow regimes, the experimental conditions were plotted on the flow pattern map. From the mapping, it was noted that the mixing vanes show different effects on the critical heat flux from one flow regime to another.

1. 서 론

지난 수십년간 많은 연구자들은 원자로내에 장전되는 핵연료 집합체의 열전달 성능을 향상시킴으로써 임계 열유속 증가, 출력 증가 및 안전성 향상을 위해 연구해 왔으나, 핵연료 집합체의 경우에는 기하학적 구조의 복잡성, 비등 열전달현상의 복잡성 등으로 인해 아직까지도 임계 열유속에 대해 해석

적인 방법에 의한 정확한 해를 얻지 못하고 단지 실험을 통해 2상 유동현상을 규명해 왔다.

가압 경수로형 원자로에 장전되는 핵연료 집합체는 각 핵연료봉의 구조적 형태를 유지하기 위해 축방향으로 여러 지점에 지지격자(spacer grid)를 설치한다. 이들 지지격자들은 핵연료 집합체의 열수역적 성능에 영향을 끼치게 되며, 이 영향들은 압력강하에 미치는 측면과 열전달에 미치는 측면이 있다.

이러한 지지격자가 핵연료 집합체의 압력강하 및 열전달에 미치는 영향으로써 지금까지는 지지격자의 형상, 지지격자가 인접된 부분에서의 유동형태,

*한국원자력연구소

**정희원, 서울대학교, 기계공학과

집합체 부수로의 유동 및 엔탈피분포에 미치는 영향 등의 지지격자 연구를 수행하였으나, 지지격자에 부착된 혼합날개가 임계 열유속에 미치는 영향에 대한 연구는 한정된 유동조건에 대해서 실험적 관찰을 통해 연구되어 왔을 뿐, 여러 유동조건에 대한 연구는 없었다.

혼합날개 (mixing vane) 가 지지격자에 부착된 경우에 대해서는 몇몇의 실험적 연구를 통해 임계 열유속에 미치는 영향을 평가하였다. Rosal 등⁽¹⁾은 지지격자에 혼합날개가 부착된 경우와 부착되지 않은 경우 실험적 결과로서 가열표면에 인접된 혼합날개 가장자리가 가열표면에서 성장되고 있는 기포층을 벗겨내므로써 열전달을 향상시켜 임계 열유속을 증가시킨다고 발표하였다. 또한, 혼합날개를 오리피스로 모형화하여 지지격자들 간의 거리에 따른 영향을 실험적으로 관찰한 Katsaounis, 등⁽²⁾ 혼합날개가 부착되지 않은 경우와 두 가지 종류의 혼합날개가 부착된 경우에 대해 지지격자들 간의 거리변화에 따른 임계 열유속 및 압력강하에 미치는 영향을 실험적으로 관찰한 Ryabov 등⁽³⁾과 비틀린 리본 형태 혹은 혼합날개를 가진 지지격자의 경우에 대해 임계 열유속의 영향을 실험적으로 연구한 Aden 등⁽⁴⁾은 지지격자의 혼합날개 설치로 인해 8~23%의 향상된 임계 열유속 결과를 얻었으나, 여러 유동조건에서 혼합날개가 임계 열유속에 미치는 영향은 제시하지 못하였다.

Groeneveld 등⁽⁵⁾은 기존의 많은 연구자들의 연구 결과를 기초로 하여, 여러가지 형태의 지지격자가 임계 열유속 및 압력강하에 어떻게 영향을 미치는가를 검토하였다. 특히, 환상류 유동지역에서는, 비틀린 리본 혹은 혼합날개가 관의 중심지역을 유동하는 액적의 가열면을 따라 유동하는 액면에 흡착을 증가시킴에 따라 임계 열유속이 증가된다고 제안하였다.

Yao 등⁽⁶⁾은 지지격자에 인접된 지역에서의 열전달률에 대해 실험적으로 연구하였으나, 단상류 액체 혹은 단상류 기체 유동에만 국한하였다. Nissely 등⁽⁷⁾은 동일 입구 과냉도에 대해 유동조건에 따라 혼합날개가 임계 열유속에 미치는 영향을 실험적으로 검토하였으며, Suchy 등⁽⁸⁾은 유동조건에 따라 혼합날개가 부착된 경우와 부착되지 않은 경우, 혼합날개의 영향을 실험적으로 연구하였으며, 고전도 지역에서 임계 열유속이 일어날 경우 혼합날개가 부착된 경우가 임계 열유속에 악영향을

미칠 수 있다고 제시하였다. Shen 등⁽⁹⁾은 최근에 비가열 상태에 대해 16개봉으로 구성된 실험집합체를 이용하여 부수로간 횡방향 유동량을 LDV (laser doppler velocimeter) 측정장치로 측정하였으나, 2상유동의 경우에 대해서는 실험하지 못하였다.

여러 연구들을 통해 볼 때 지지격자를 설치한 경우에는 지지격자 형태에 따라 혹은 유동영역에 따라 임계 열유속을 상승, 혹은 강하시킬 수 있으나, 지지격자에 혼합날개가 부착된 경우, 지지격자와는 달리 항상 임계 열유속 향상에 기여하는 것으로 나타났다. 혼합날개는 유동장내 회전유동의 유발, 난류강도의 증가, 봉들 사이 간격을 통한 횡방향으로의 강한 강제유동 발생 등에 의해 부수로간 유동 및 엔탈피 혼합을 향상시키므로써 임계 열유속을 증가시킨다. 환상류의 경우에도 혼합날개로 인한 액막의 파괴가 있다하더라도 중심의 빠른 증기 회전유동에 의해 전술한 현상들이 결합된 형태로 나타나 임계 열유속을 증가시킨다.

본 연구에서는 가압 경수로의 전형적인 표준 지지격자에 혼합날개가 부착되지 않은 경우와 부착된 경우의 임계 열유속을 실험적으로 비교·검토하였다. 혼합날개가 임계 열유속에 미치는 영향을 평가하기 위해 가압경수로의 핵연료 집합체 형태인 25개 스테인레스봉으로 구성된 실험집합체를 이용하였으며, 작동유체로서 프래온-12 냉매를 이용하였다.

임계 열유속 실험으로부터 혼합날개 유무에 따른 집합체 평균 유동조건, 즉 입구과냉도, 질량유속 및 압력 등의 유동조건 변화시 임계 열유속에 대한 혼합날개의 영향을 평가하였다. 이 결과로 볼 때 혼합날개가 유동영역 (flow regime)에 따라 영향이 달라지는 것을 알 수 있었으며, 유동영역에 따른 CHF에 혼합날개의 영향을 확인하기 위해 유동영역선도상에 CHF를 일으킨 유동조건들을 고찰하였다.

2. 실험

2.1 실험장치 및 측정

2.1.1 실험장치 및 실험집합체

본 실험에 이용된 실험장치는 프랑스 Grenoble 원자력연구소에 설치된 GRAZIELL-II⁽¹⁰⁾ 실험장치

로 작동유체가 프레온-12이며, 실제크기의 실험집합체를 이용하였다. 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같으며, 크게 프레온-12가 작동유체인 일차계통과 일차계통의 프레온 응축을 위해 설치된 물이 작동유체인 이차계통으로 구성된다.

일차계통의 최대압력은 3.2 MPa이고, 최대온도는 100°C, 프레온-12의 액체상태 총 체적은 약 900 l이다. 일차계통의 주계통은 계통압력 조절을 위한 가압기, 프레온-12 순환펌프, 두개의 예열기, 및 실험집합체 가열봉을 가열시키기 위한 전력공급장치와 실험조건외의 조정 및 제어를 위한 안전판 등으로 구성된다.

실험을 수행하기 위해서는 초기의 작동유체가 없는 상태인 실험장치내로 압축기를 이용하여 액체상태의 프레온-12를 주입시킨다. 작동유체의 주입 후 일차계통의 주순환계통을 부순환계통으로부터 고립시키고, 가압기를 이용하여 원하는 실험 압력까지 가압한다.

다음으로 순환펌프를 이용하여 작동유체의 순환유량을 조정하고, 예열기 혹은 실험집합체의 가열봉을 이용하여 작동유체의 온도를 상승시킨다. 실험부 입구의 온도조정은 직류를 이용한 주열효과에 의해 총 출력 105 kW (7000 A, 15 V)의 직렬로 연결된 두 개의 예열기를 이용한다.

실험부 출구를 지난 후, 단상 혹은 2상류 상태의 작동유체는 혼합응축기로 유입되며, 혼합응축기를 지난 후에는 계통 압력조절을 위해 가압기를 설치

하였다. 증기압력을 이용한 가압은 가압기내 상부에 설치된 한개의 가열선과 프레온-12 액체내에 잠겨있는 두개의 가열선을 이용하여 가압시킨다. 또한, 가압기내 설치된 대형 및 소형의 분사기를 이용하여 냉각상태의 프레온을 가압기내에 분산시키므로써 상압시킨다. 대형분사기는 실험장치의 안전을 위해 설치하였으며, 소형분사기는 가압기내 온도의 미소조정을 위해 설치하였다.

일차계통의 냉매 순환계통과 이차계통의 물순환계통 사이의 열전달을 위해 4대의 열교환기를 직렬 및 병렬로 연결하였으며, 열교환기의 총 용량은 약 900 kW이다.

열교환기를 지난 작동유체는 순환펌프를 거쳐 유량의 10%는 혼합응축기로, 90%는 예열기를 거쳐

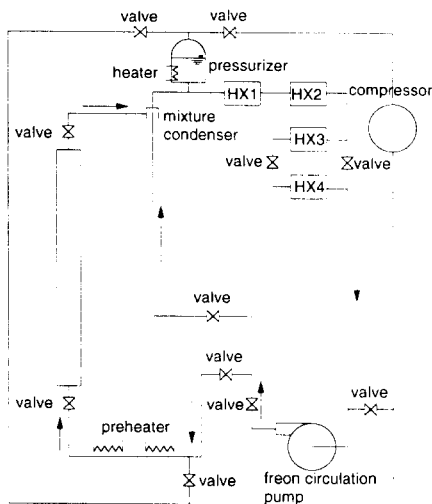


Fig. 1 Schematic diagram of two-phase flow test loop (GRAZIELLA-II)

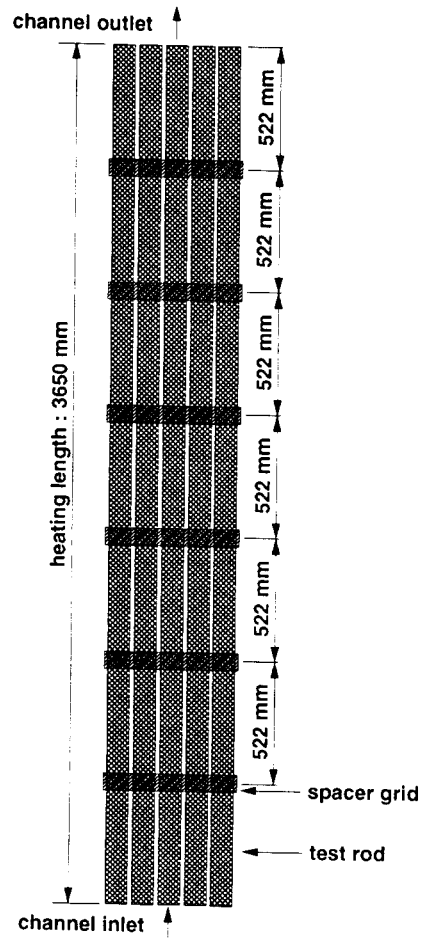


Fig. 2 Test rod bundle and axial positions of spacer grids

실험부로 순환되며, 프레온-12 순환펌프는 회전자가 액체내에 잠겨있는 형태 인 원심형 펌프(HERMETIC)를 이용하였으며, 공칭유량은 90°C에서 80 m³/h로써 최대 양정은 140 m 프레온 12액주이다.

실험에 이용된 실험집합체는 Fig. 2와 같으며, 프랑스 표준규격(normalization francais)의 스테인레스강(NF, Z6CNDT 17-12)으로 된 25개의 가열봉을 이용하였다. 이들 가열봉들은 직류전원을 이용한 주울효과에 의해 가열되며, 직류 총 출력은 825 kW(1500 A, 55 V)이다. 가열봉 길이는 가압경수로용 핵연료봉 길이와 같은 3650 mm이고, 실험봉 직경은 9.5 mm이며, 실험집합체의 상세한 기하학적인 제원을 Table 1에 요약 정리하였다.

핵연료 집합체의 임계 열유속에 혼합날개(mixing vane)가 미치는 영향을 검토하기 위해 두가지 형태의 지지격자(spacer grid)를 이용하였으며 실험 집합체 구조는 동일하다. 이용된 두가지 형태의 지지격자는 Fig. 3의 혼합날개가 부착된 지지격자(spacer grid with mixing vane, SG/WM)와 Fig. 3의 혼합날개를 제거한 형태의 지지격자(spacer grid without mixing vane, SG/WOM)이다. 이들 지지격자들은 Fig. 2와 같이 522 mm의 일정한 간

격으로 떨어진 여섯지점에 설치하였으며, 이 실험 집합체들을 원통형 관속에 장치하고 단열재를 이용하여 외부로부터 단열시켰다.

실험집합체의 축방향 출력분포는 균일하게 유지함으로써 가열 끝단에서 임계 열유속이 일어나도록 하였다. 또한, 비가열 외곽 벽면의 영향을 최소화 하고, 임계 열유속이 내부 부수로지역에서 일어날 수 있도록 실험봉 출력으로서 Fig. 4와 같이 내부 9개 가열봉들이 외부 16개 가열봉들보다 높은 반경 방향 비균일 출력분포를 이용하였다.

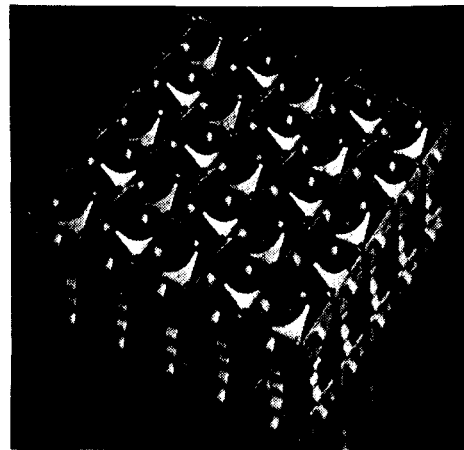


Fig. 3 Photograph of spacer grid with mixing vane

Table 1 Dimensions of test section and test tube bundle

Items	Dimension(mm)
No. of tubes	25
Heating length	3650
Tube outside diameter	9.50
Tube inside diameter	
Outer 16 tubes	7.00
Inner 9 Tubes	6.00
Gap distance between tubes	3.10
Gap distance between tube and plate	3.20
Pitch to diameter ratio	1.33
Flow area	2623.6
Wetted perimeter	1011.3
Heated perimeter	746.1
Equivalent hydraulic diameter	10.4

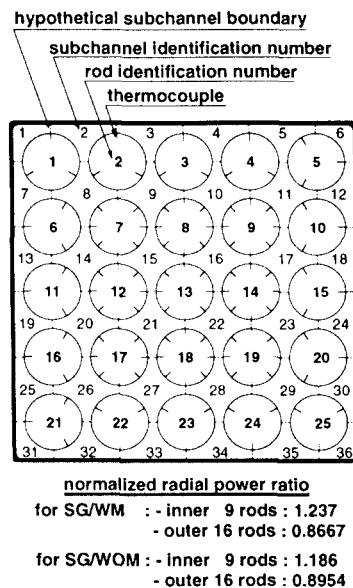


Fig. 4 Cross-section of test rod bundle and positions of rod thermocouples

2.1.2 측정

유량측정은 일차 순환 프레온-12의 총 순환유량은 Venturi미터계(상류지역 직경 : 105.3 mm, 목부분 : 58.7 mm)에 의해 측정하였다. 실험부의 유량측정은 유량측정기(EXAC)를 이용하였으며, 측정가능범위는 2~20 kg/s이다.

실험부의 입·출구 부분에서의 압력측정은 Schlumberger 압력변환기를 이용하였으며, 측정가능 범위는 0~3.5 MPa이다. 실험부 각 지점에서의 압력강하 측정을 위해서는 축방향 다섯 지점에 압력변환기를 설치하였다.

온도측정은 크게 세가지로 나뉘어진다. 냉매 순환계통의 각 지점에서의 작동유체 온도와 실험부 입·출구에서의 온도측정, 36개 부수로 중심의 작동유체 온도측정, 그리고 임계 열유속 발생을 관찰하기 위한 실험부의 온도측정 등이다.

냉매 순환계통의 열군데 지점에서 스테인레스강으로 피복된 직경 3~10 μm 의 Chromel-Alumel 열전대를 이용하여 작동유체 온도를 측정 및 조정하였다. 실험부 입·출구 각 부수로에서의 작동유체 온도측정을 위해서는 36개의 열전대를 실험집합체가열끝단의 각 부수로 중심에 설치하였다.

또한, 실험부 입구 및 출구에서의 작동유체 평균 온도측정을 위해 입구 및 출구에 각각 2개씩의 백금 저항선을 설치하였다.

다음으로, 임계 열유속 발생시 가열봉 표면온도의 급격한 증가를 확인하기 위해 외부가열봉 16개에는 봉당 3개씩 총 48개의 열전대를, 내부가열봉 9개에는 봉당 8개씩 총 72개의 열전대를 설치하였으며, 집합체 단면에서의 열전대 위치는 Fig. 4와 같다. 이들 열전대 재질은 4/4-28 type HF/D-30-KK이고 직경은 0.3 mm이다. 임계 열유속 측정시 실험부에 설치된 열전대들의 온도신호를 온도기록계(BRYAN)로 자동전달 및 기록하므로써 실험중

온도거동을 확인할 수 있도록 하였다.

2.2 실험방법

혼합날개가 부착된 지지격자를 설치한 실험집합체(이하 SG/WM 실험집합체라 칭함)와 혼합날개가 부착되지 않은 지지격자를 설치한 실험집합체(이하 SG/WOM 실험집합체라 칭함)인 두가지 종류이 실험집합체에 대해 전술한 바와 같이 축방향 가열길이, 가열봉 직경, 피치대 직경비 등 모든 기하학적 조건은 동일하며, 임계 열유속에 미치는 영향을 평가하기 위해 설치된 혼합날개 유무만 다르다.

임계 열유속 실험시, 가열봉 끝단의 온도 거동 가시화를 위해 한개의 모니터와 여섯대의 온도기록계(BRYAN) 및 Hewlett Packard 9836/810을 이용하여 실험결과들을 저장한다. 가열봉에 설치된 120개 열전대의 가열봉 내면의 온도거동 가시화를 위해 설치된 모니터에 나타난 온도가 동일 수평선상에 나타나도록 조정하며, 즉 임의의 가열봉 원주방향 지점에서 임계 열유속이 일어나기 전까지는 25개 가열봉 내면의 온도가 동일 수평선상에 나타나게 된다.

이 실험의 경우, 먼저 실험부의 작동유체 유량, 압력 및 입구온도 등 실험조건을 결정한 후 실험집합체 가열봉들의 열출력을 증가시키면서, 가열봉 온도거동 가시화용으로 설치된 모니터에 나타나는 온도거동을 조사한다. 이 온도거동을 관찰하면서 실험집합체의 열출력을 서서히 증가시키면서 가열봉 임의의 지점의 온도가 인접된 온도보다 상승하는 것을 관찰할 수 있다. 이때 가열봉 내면의 온도가 육안으로 관찰할 수 있을 정도로 미소 변화하는 지점이 임계 열유속이 먼저 일어날 가능성이 있는 지점이 되며, 이와 인접된 가열봉 온도거동을 여섯대의 온도기록계에 기록한다. 이때는 임계 열유속

Table 2 Test conditions for two-phase flow test

Items	Unit	SG/WM bundle	SG/WOM bundle
Outlet pressure	MPa	1.65~2.95	1.28~2.95
Inlet temperature	°C	20.4~84.7	18.38~83.13
Outlet temperature	°C	61.2~93.1	48.94~92.39
Heat flux	kW/m ²	31.90~197.7	34.40~181.2
Mass flux	kg/m ² s	1000~4000	1000~4000

이 일어나기 전의 상태인 가열봉 표면에서의 온도 변동이 일어나는 경우로, 이때의 상태를 유지하는 경우 가열봉 내면의 온도는 계속 변동하지만 온도 상승은 더 이상 일어나지 않는 상태가 된다. 이 상태에서 열출력을 미소 증가시키면 온도거동 가시화를 위해 설치된 모니터로부터 임의의 가열봉 원주 방향 지점의 온도상승이 커지는 것을 확인할 수 있다. 이 상태를 유지하는 경우 가열봉 내면의 온도는 계속 상승하게 되고 이때의 상태가 임계 열유속이 발생하는 것으로 볼 수 있으며, 주어진 열출력, 압력, 유량 및 그밖의 모든 실험조건을 Hewlett Packard 9836/810에 저장한다.

Table 2에는 혼합날개가 임계 열유속에 미치는 영향을 유동조건에 따라 조사하기 위해 수행된 임계 열유속 실험조건들을 요약하였다.

3. 실험결과 및 검토

3.1 임계 열유속과 발생지점

SG/WM 실험집합체 및 SG/WOM 실험집합체의 경우 25개 가열봉의 임계 열유속 발생지점을 확인하기 위해 Fig. 4와 같이 설치된 120개의 열전대를 이용하여 임계 열유속 지점을 조사하였다. 25개의 가열봉에서 측정된 임계 열유속 지점을 Fig. 5의 1/8 대칭구조에 대해 검토하였으며, SG/WM 실험집합체 및 SG/WOM 실험집합체의 임계 열유속 발생빈도 확률을 Fig. 6(a), (b)에 비교하여 나타내었다.

Fig. 6(a)에는 1/8 대칭 구조의 6개의 가열봉에서 임계 열유속이 발생한 확률을 SG/WM 실험집합체와 SG/WOM 실험집합체에 대해 비교하였다. 그림에서 알 수 있듯이 혼합날개가 없는 실험집합체의 경우 대부분의 임계 열유속이 6번 가열봉에서 일어났으며, 혼합날개가 있는 경우에는, 가열봉 3번 및 5번에서 임계 열유속이 대부분 발생하였다.

Fig. 6(b)에는 1/8 대칭 부수로의 각 부수로 및 봉간 간격에서 임계 열유속이 발생한 확률을 나타낸 그림이다. Fig. 6(b)에서 알 수 있듯이 혼합날개가 부착되지 않은 실험집합체인 SG/WOM의 경우 부수로 번호 6번에서 임계 열유속이 모두 발생하였다. 그러나, SG/WM 실험집합체의 경우는 임계 열유속지점이 3번 및 6번 부수로와 5번과 6번 부수로사이 간격지점에서 임계 열유속이 발생하므로써 혼합날개가 임계 열유속 발생지점에 영향을

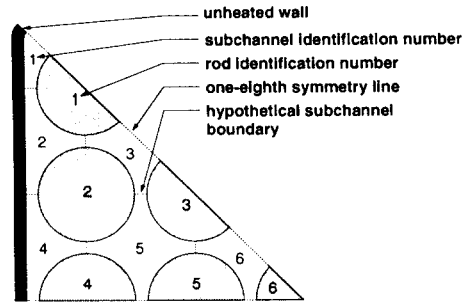
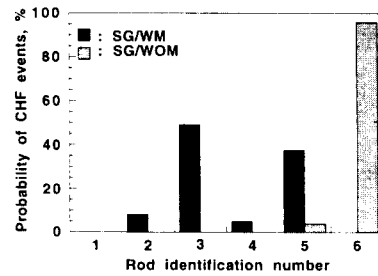
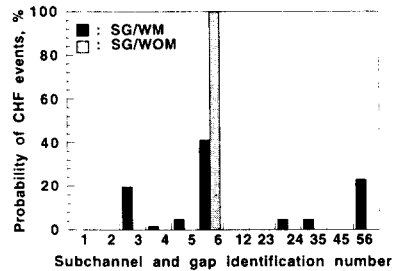


Fig. 5 One-eighth geometrical symmetry channel



(a) Probability of CHF events for hot rod



(b) Probability of CHF events for hot channel and hot gap

Fig. 6 Probability of CHF events for hot rod, hot channel and hot gap

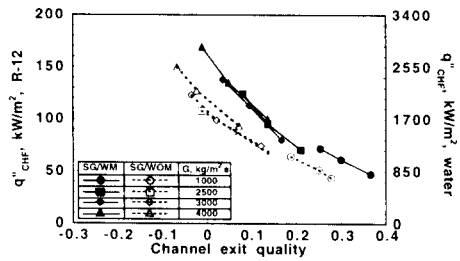
미친 것을 알 수 있다.

임계 열유속이 발생한 가열봉은 혼합날개 부착으로 인해 6번 가열봉에서 3번과 5번으로 이동하였고, 임계 열유속 발생 부수로 혹은 부수로간 간격은 혼합날개 부착으로 인해 6번 부수로에서 6번과 3번 및 5번 6번 간격으로 이동하였다. 이러한 원인은 Fig. 2와 같이 축방향 6개지점에 설치된 지지격자의 혼합날개가 각 부수로 내의 회전유동과 횡방향 강제유동 및 부수로간 난류혼합을 증대시켜 부수로들의 유동 및 엔탈피를 균일화시켰기 때문이다.

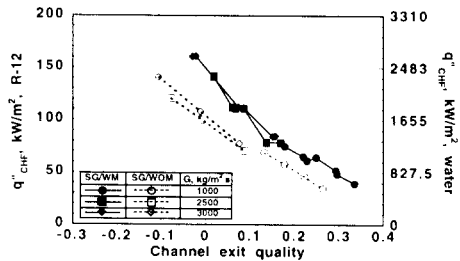
실험결과들을 SG/WM 실험집합체 및 SG/WM 실험집합체 출구 평균건도에 대한 임계 열유속으로 나타내 보면 Fig. 7(a)~Fig. 7(d)와 같으며, 각각, 압력이 1.65 MPa, 2.08 MPa, 2.49 MPa 2.95 MPa에 대한 임계 열유속 실험결과이다. 이들 그림에서 혼합날개가 없는 경우에는 점선으로, 혼합날개가 있는 경우에는 실선으로 나타내었으며, SG/WM 실험집합체 및 SG/WOM 실험집합체 모두 출구 평균건도에 따른 임계 열유속 변화 경향이 동일함을 나타내고 있다.

먼저 Fig. 7(d)는 유량증가시 출구건도에 대한 임계 열유속 기울기가 커짐을 보여주고 있으며, 이는 유량증가시, 낮은 출구건도에서 임계 열유속 상승과 높은 출구건도에서 임계 열유속 감소경향을 나타낸다. 압력이 각각 2.08 MPa, 2.49 MPa인 Fig. 7(b) 및 Fig. 7(c)는 질량유속 증가시 임계 열유속 증감의 경향이 압력이 2.95 MPa인 Fig. 7(d)보다 적지만 압력이 1.65 MPa인 Fig. 7(a)보다는 두드러짐을 나타내 준다. 이러한 결과는 유량증가시 낮은 건도 혹은 과냉각 상태에서는 임계 열유속이 증가하고 포화상태를 넘어선 높은 건도에서는 임계 열유속이 감소하는 경향을 제시하고 있으며, 유량증가시 압력이 2.95 MPa인 경우 약 20% 출구건도 부근에서 임계 열유속 증감 변환점이 됨을 알 수 있다. 또한, Fig. 7(a)~Fig. 7(c)가 Fig. 7(d)와는 달리 유량증가시 임의의 출구건도에서 임계 열유속 증감 경향이 적은 이유는 대부분의 실험결과들이 임계 열유속 증감 전환건도 부근에 분포하였기 때문이다. 따라서, Fig. 7(a)~Fig. 7(c)에서 출구건도 좌표상의 왼쪽, 즉, 과냉각상태의 임계 열유속 상태로 외삽시켜 본다면 (일반적으로 임계 열유속은 건도의 선형함수), 유량증가시 임계 열유속 상승이 두드러지는 경향이 나타났을 알 수 있다.

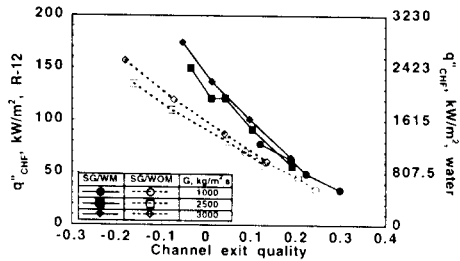
지금까지 문헌에 제시된 임계 열유속 실험결과들을 보면, 입구과냉도 증가시 임계 열유속은 선형적으로 증가하는 경향이 있으며, 동일 입구과냉도에 대해 유속증가는 임계 열유속을 증가시킨다. 그러나, 이 결과를 출구건도에 대해 나타낼 경우 출구건도 증가시 임계 열유속은 거의 선형적으로 감소하며, 과냉각 상태에서 임계 열유속이 발생한 경우에는 동일 출구건도에 대해 유속이 증가할수록 임계 열유속이 증가하지만, 출구건도가 양인 포화상태를 넘어선 경우 유속의 증가에 따라 임계 열유속



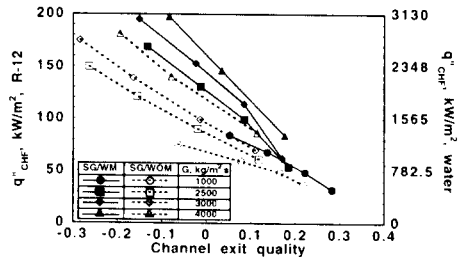
(a) $p_{R-12} = 1.65 \text{ MPa} (p_{\text{water}} = 10.4 \text{ MPa})$



(b) $p_{R-12} = 2.08 \text{ MPa} (p_{\text{water}} = 12.7 \text{ MPa})$



(c) $p_{R-12} = 2.49 \text{ MPa} (p_{\text{water}} = 14.9 \text{ MPa})$



(d) $p_{R-12} = 2.95 \text{ MPa} (p_{\text{water}} = 17.0 \text{ MPa})$

Fig. 7 CHF for different mass flux conditions

은 감소하는 경향, 즉 대체로 포화상태 지점을 전환점으로 출구건도 변화에 따라 유량증가시 임계 열유속이 증가 혹은 감소경향을 나타낸다. (11) 이로부터, 상기한 실험결과로 부터 얻어진 Fig. 7(a)~(d)는 단일관이 아닌 집합체의 경우에 얻어진

결과라 하더라도 기존 경향을 잘 나타내주는 결과라 할 수 있다.

한편, 혼합날개가 있는 경우와 없는 경우를 비교해 볼때, Fig. 7(a)~(d)는 출구건도 증가시 임계 열유속이 대체로 선형적으로 감소함을 보여주고 있고, 또한 이들 그림들로부터 혼합날개 유무에 따른 임계 열유속차이가 유동조건 및 유동영역에 따라 상당히 다를 것임을 알 수 있으며, 이에 대해서는 다음항에서 상세히 검토하였다.

3.2 유동조건에 따른 혼합날개의 영향

혼합날개가 임계 열유속에 미치는 영향을 평가하기 위해 SG/WM 실험집합체와 SG/WOM 실험집합체의 임계 열유속 값 차를 다음식과 같이 정의하였다.

$$\Delta \ddot{q}_{CHF} = \ddot{q}_{CHF,SG/WM} - \ddot{q}_{CHF,SG/WOM}$$

위의 식을 이용하여 혼합날개가 임계 열유속에 미치는 영향을 평가하였으며, 유동조건인 입구과냉도, 질량유속 및 압력변화에 따른 혼합날개의 영향을 고찰하였다.

여러개의 부수들로 구성된 핵연료 집합체와 같은 경우 각 부수로들은 좁은 공간 간격에 의해서만 유동장이 연결되어 있으므로, 부수로들간의 유동혼합이 일어난다하더라도 부수로별로 유동조건이 다르고, 이에 따라 유동영역도 다르다. 즉, 임계 열유속을 일으킨 고온부수로의 경우에는 환상류영역이 될 수 있는 반면에 저온부수로는 기포류 혹은 과냉 액체류영역이 될 수 있다. 본 실험으로부터 얻어진 결과는 각 부수로별 유동조건이 아닌 집합체 출구 평균 유동조건이므로 이 평균 유동조건으로부터 유동영역을 표시한다는 것은 각 부수로의 유동영역을 대표한다고 볼 수 없다. 그러나, 평균치에 근거한 유동영역을 살펴봄으로써 고온부수로는 유동조건 평균치 보다 높은 엔탈피지역(혹은 평균치가 환상류영역에 있을 경우 고온부수로는 고건도 환상류영역에 속함)에 있음을 알 수가 있으며, 저온부수로의 경우에는 평균치보다 낮은 엔탈피지역(혹은, 평균치가 환상류-슬러그류/천류 전이영역에 있을 경우 저온부수로는 기포류 혹은 과냉 액체류영역에 속함)에 있음을 알 수 있다. 이러한 가정에 근거하여, 임계 열유속을 일으키는 부수로 출구지점에서의 유동영역 선도상에 유동조건을 고찰하기 위해 Taitel 등⁽¹²⁾의 유동영역 선도를 이용하였다.

3.2.1 입구과냉도의 영향

입구과냉도 변화에 따른 $\Delta \ddot{q}_{CHF}$ 영향은 Fig. 8에 나타나 있으며, 입구과냉도 변화에 따라 임계 열유속을 일으킬 때의 유동영역 고찰을 위해 가상 액체속도(j_f)와 가상 기체속도(j_g)를 구해 Taitel 등의 유동영역 선도상에 나타내 보면 Fig. 9와 같다.

Fig. 8에서 압력이 1.65 MPa이고, 질량유속이 1000 kg/m²인 경우, 입구과냉도 증가에 따라 $\Delta \ddot{q}_{CHF}$ 의 변화가 미소하며, 이는 혼합날개가 임계열유속에 미치는 영향이 미약함을 나타내는 것이다. 이 경우 유동영역상 그림인 Fig. 9는 입구과냉도가 증가하더라도 임계 열유속은 혼합날개가 있는 경우나 없는 경우나 모두 환상류영역에서 발생하는 것을 나타내 준다. 질량유속이 1000 kg/m²이고 압력이 2.95 MPa인 경우에는 입구과냉도 증가에 따라 혼합날개가 임계 열유속에 미치는 영향이 커지는 것으로 나타났으며, 이 경우 유동영역 선도상의 그림인 Fig. 9는 입구과냉도가 증가할 때 질량유속이

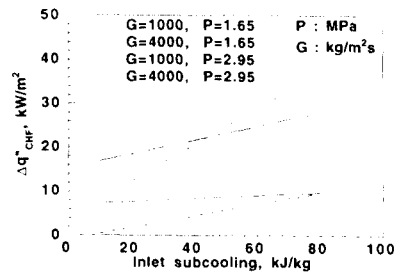


Fig. 8 Effect of mixing vane on $\Delta \ddot{q}_{CHF}$ for channel averaged conditions under the various inlet subcoolings

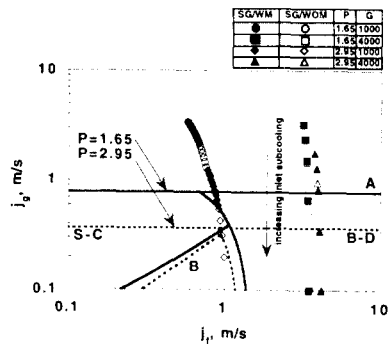


Fig. 9 Flow pattern at channel exit for various inlet subcoolings(A : Annular flow, B : Bubbly flow, B-D : Bubbly-Dispersed flow, S-C : Slug/Churn flow)

1000 kg/m²s이고 압력이 1.65 MPa인 경우보다 환상류영역에서 슬러그류/천류 혹은 기포류로 이동해 있음을 나타내고 있다. 질량유속이 4000 kg/m²s인 경우, 질량유속이 1000 kg/m²s의 결과와 비교해 볼때, 압력이 1.65 MPa이고 질량유속이 1000 kg/m²s의 Δq_{CHF}^* 보다 압력이 1.65 MPa이고 4000 kg/m²s인 Δq_{CHF}^* 의 절대값 및 증가율이 커졌으며, 동일 질량유속에 있어서, 압력이 2.95 MPa일 때 1.65 MPa 압력에 대한 Δq_{CHF}^* 결과에 비해 입구과냉도 증가에 따라 Δq_{CHF}^* 의 증가율이 커졌다. 이러한 결과에 대해 유동선도상 그림인 Fig. 9는 압력이 높은 경우가 낮은 경우에 비해 입구과냉도 증가시 환상류영역에서 기포류로의 천이를 빨리 일으키는 것을 나타내고 있다.

상기한 결과를 종합하면, 질량유속이 높을 경우 입구과냉도 증가에 따라 임계 열유속 발생조건이 환상류에서 슬러그류/천류 혹은 기포류영역으로 빨리 이동해 가는 반면, 질량유속이 낮을 경우 입구과냉도가 증가하더라도 대체로 환상류영역에 속하였다. 또한, 압력이 높을 경우에는 압력이 낮은 경우에 비해 입구과냉도가 증가할 때 임계 열유속은 건도가 낮은 환상류영역에서 기포류로의 천이영역으로 이동하였다. 이로 볼 때, 혼합날개가 Δq_{CHF}^* 에 미치는 영향은 환상류영역에서는 미약하며, 기포류 영역 혹은 기포류영역에 가까울수록 커짐을 알 수 있다.

3.2.2 질량유속의 영향

질량유속의 변화에 따른 Δq_{CHF}^* 영향은 Fig. 10에 나타나 있으며, 질량유속 변화에 따라 임계 열유속을 일으킬 때의 유동영역 고찰을 위해 전술한 유동영역 선도에 나타내 보면, Fig. 11과 같다.

질량유속의 변화시 입구과냉도의 변화에 따른 영향과는 달리 질량유속 증가에 따라 임계 열유속에 혼합날개가 미치는 영향이 매우 커짐을 알 수 있다. Fig. 10에서 보는 바와 같이, 입구과냉도, Δh_i 가 20 kJ/kg인 경우 질량유속 증가에 따라 Δq_{CHF}^* 증가 경향이 Δh_i 가 60 kJ/kg인 경우보다 둔화된 것을 볼 수 있다. 또한, 입구과냉도가 20 kJ/kg이고, 압력이 1.65 MPa인 경우보다 동일 입구과냉도에 대해 압력이 2.95 MPa인 경우에 Δq_{CHF}^* 의 증가율이 커졌으며, 입구과냉도가 60 kJ/kg인 경우에도 마찬가지로 경향을 나타내었다. 이때의 유동조건을 유동선도에 나타낸 Fig. 11의 그림을 보면, 질

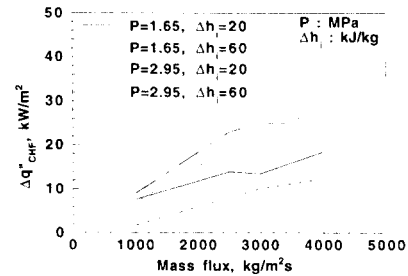


Fig. 10 Effect of mixing vane on Δq_{CHF}^* for channel averaged conditions under the various mass fluxes

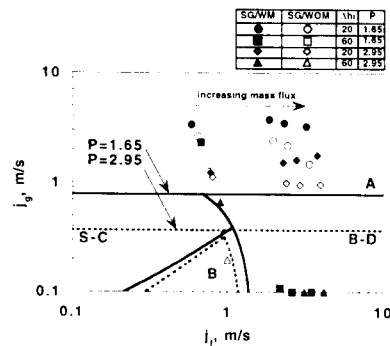


Fig. 11 Flow pattern at channel exit for various mass flux(A : Annular flow, B : Bubbly flow, B-D : Bubbly-Dispersed flow, S-C : Slug/Churn flow)

량유속 증가시 Δh_i 가 20 kJ/kg인 경우에는 작동유체의 건도가 매우 높은 환상류영역에 속해 있다. 한편 Δh_i 가 60 kJ/kg인 경우, 질량유속이 낮을 때에는 건도가 대체로 낮은 환상류영역 혹은 슬러그류/천류에 분포되고 있으나, 질량유속이 증가할수록 기포류영역으로 이동되고 있음을 알 수 있다.

한편, 질량유속 증가에 따라 Δq_{CHF}^* 가 단조 증가하는 것으로 나타났으나, 압력이 2.95 MPa이고 입구과냉도가 20 kJ/kg인 경우 질량유속 2500 kg/m²s 혹은 3000 kg/m²s 지점까지는 Δq_{CHF}^* 의 단조증가를 보이다가, 이 이상의 질량유속 증가에서는 Δq_{CHF}^* 의 변화가 나타나지 않았다. 즉, 질량유속이 어떤 값 이상 클 경우에는 질량유속이 증가하더라도 혼합날개가 임계 열유속에 미치는 영향에는 변화가 없음을 알 수 있다. 이 결과를 유동영역 선도에 나타낸 Fig. 11에서 볼 때 Δh_i 가 20 kJ/kg인 경우에는 질량유속이 변화하더라도 임계 열유속이 항상 환상류영역에서 발생하나, Δh_i 가 60 kJ/kg으로 높은 경우에는 질량유속 증가시 임계 열유속이 환상

류영역에서 일어나던 것이 슬러그류/천류로의 천이지역에서 일어나거나, 혹은, 기포류영역에서 발생함을 알 수 있다.

3.2.3 압력의 영향

압력변화에 따라 혼합날개가 임계 열유속에 미치는 영향을 보기 위해 압력증가에 따른 $\Delta q_{CHF}''$ 의 변화를 나타내 보면 Fig. 12와 같다. 이들 그림에서 보면, 질량유속이 낮을 때보다 질량유속이 클 때 $\Delta q_{CHF}''$ 가 항상 크지만 $\Delta q_{CHF}''$ 의 감소율은 비슷한 것으로 나타났다.

Fig. 12에서 알 수 있듯이 입구과냉도가 20 kJ/kg인 경우에는 압력증가에 따라 $\Delta q_{CHF}''$ 가 미소하게 감소해감을 알 수 있다. 즉, 혼합날개가 임계 열유속에 미치는 영향이 미소 감소하며, 입구과냉도가 크고, 질량유속이 높은 경우에는, 압력증가의 영향이 거의 없음을 알 수 있다. 압력증가에 따른 임계 열유속이 일어나는 유동영역의 변화를 보면, Fig. 13과 같고 이 그림에 의하면, 입구과냉도가 낮을 때에는 유동영역이 환상류영역에 있으며, 입구과냉도가 높을 때에는 유동영역이 기포류 혹은 과냉액

체류 영역에 있다. 즉, 환상류영역에서는 압력이 증가할수록 혼합날개에 의해 $\Delta q_{CHF}''$ 를 미소 감소시키는 경향이 나타나며, 기포류 혹은 과냉 액체류영역에서는 압력증가시 혼합날개가 $\Delta q_{CHF}''$ 에 미치는 영향이 거의 없는 것으로 나타남을 알 수 있다.

4. 혼합날개 영향의 유동영역별 고찰

상기한 입구과냉도, 질량유속 및 압력 등의 영향을 통해 볼때 유동조건(flow condition) 혹은 유동영역(flow regime)에 따라 혼합날개가 임계 열유속에 미치는 영향이 달라지는 것으로 나타났다.

먼저, 유동영역별로 혼합날개가 임계 열유속에 미치는 영향을 논의하기 위해 유동영역에 대한 기존의 일반적 분류인 Fig. 14와 같이 다섯가지의 유동영역, 즉, 액체 단상 강제유동, 기포류, 슬러그류, 천류 및 환상류를 택하였다. 혼합날개가 임계 열유속에 미치는 영향을 유동영역별로 고찰해 보면 다음과 같다.

4.1 과냉 액체류영역

과냉 액체류영역에서는 Fig. 14(a)의 경우와 같이 단상액체 강제유동 영역으로 지지격자의 혼합날개에 의해 각 부수로 내에서 회전유동 및 부수로간 강제유동을 유발시켜 혼합날개가 부착된 지점에서 부수로간 유동혼합과 열전달을 향상시키며,^(6,9) 이러한 유동혼합 및 향상된 열전달률은 혼합날개 하류로 진행할수록 강화되어, 혼합날개에서 충분히 떨어진 하류에서는 지지격자 혹은 혼합날개가 없는 경우의 완전 발달 난류유동으로 회복됨을 여러 논문들에서 찾아 볼 수 있다.

과냉 액체류영역에서의 혼합날개 영향은 단상류에 대한 실험적 연구⁽¹³⁾에서와 같이 부수로 온도분포를 균일화시킴에 따라 부수로 온도분포가 평탄해지며, 여러 개 부수로들로 이루어진 핵연료집합체의 구조와 같은 경우, 단일 원관인 경우보다 임계 열출력이 항상 낮게 나타난다.⁽¹⁴⁾ 이 원인은 임계 열유속이 최고온 부수로에서 먼저 발생되고 인접된 다른 봉들로 전파되기 때문이다. 따라서, 핵연료 집합체의 경우 부수로간의 유동 및 엔탈피 불균일도를 줄임으로써 임계 열출력을 상승시킬 수 있다.

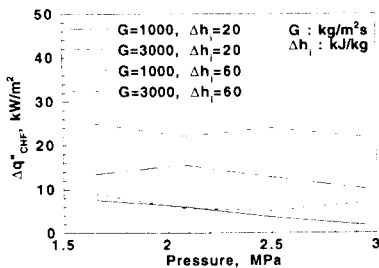


Fig. 12 Effect of mixing vane on $\Delta q_{CHF}''$ for channel averaged conditions under the various pressures

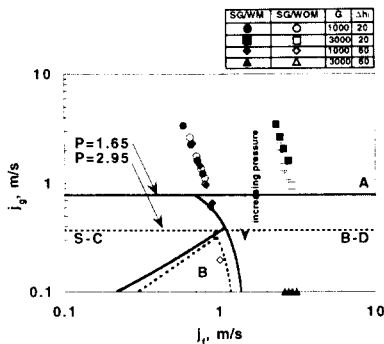


Fig. 13 Flow pattern at channel exit for various pressure(A: Annular flow, B: Bubbly flow, B-D: Bubbly-Dispersed flow, S-C: Slug/Churn flow)

4.2 기포류 영역

가열면에서 성장된 기포가 가열벽면 이탈을 도움

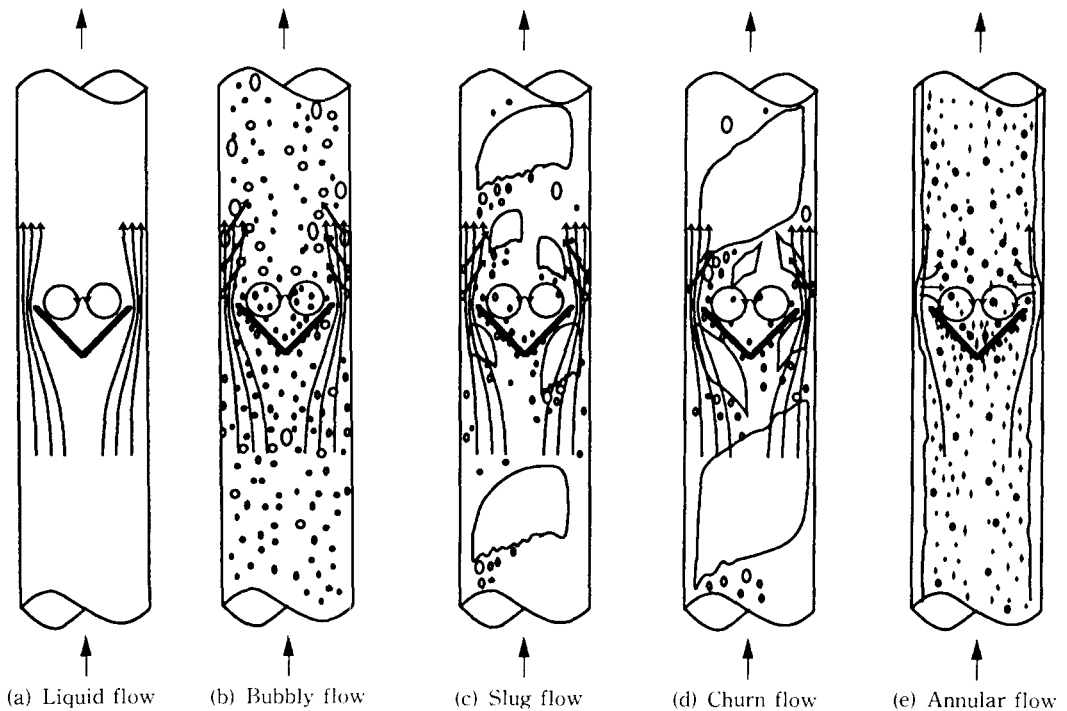


Fig. 14 Effect of mixing vane on the typical flow regime in a vertical flow

만큼 충분한 과열도에 도달하면, 유동상태는 Fig. 14(b)와 같이 유동 중심방향으로 기포들이 이동하여, 액체와 작은 기포가 함께 유동하는 기포류 영역이 된다. 이들 기포들은 벽면으로부터의 가열에 의해 유동중 서로 결합되면서 기포들의 크기가 성장하지만, 기포들의 크기가 대체로 작고, 액체에 고루 분산된 형태로 흐르기 때문에 균일 혼합류 형태라 볼 수 있다. 과냉 액체류에서 기포류로 전환될 때 벽면에 성장하고 있는 기포들의 이탈을 도우게 되면 가열면에서의 열전달이 향상되며, 가열면 온도가 낮아지게 된다.

일반적으로 가열면의 증기 기포층을 파괴시키고 가열면과 액체의 접촉을 도우는 경우 임계 열유속이 증가되는 것으로 알려져 있으며,⁽¹⁵⁾ 핵연료 집합체의 지지격자에 부착된 혼합날개는 유동장을 강하게 교란시키고 회전유동을 유발시켜 가열면의 기포들을 여기시키고, 가열면에서 기포들을 이탈하도록 도우므로써 가열면의 열전달을 향상시킨다.

지지격자에 혼합날개가 있는 경우에는 유동장의 교란이 특히 강하게 나타나며, Fig. 8(c) 및 Fig. 8(d)에서 나타난 바와 같이 유동영역이 기포류인 경우 혼합날개가 임계 열유속에 미치는 영향이 크

게 나타남을 알 수 있다.

4.3 슬러그류/천류영역

기포류에서 성장된 기포들은 벽면의 가열이 계속됨에 따라 유동장내의 기포들이 점점 크게 결합되고, 여러 개의 기포들이 몇개의 커다란 기체 슬러그로 형성되어 Fig. 14(c)와 같이 유동장 중심을 흐르고 벽면을 따라서는 액체막이 흐르게 된다.

이 슬러그류영역에서는 지지격자에 부착된 혼합날개가 과냉 액체류 혹은 기포류에서와 같은 강한 회전유동, 혹은 횡방향 상류유동을 크게 일으키지 못하다. 기체 슬러그들이 혼합날개가 설치된 영역을 지나갈 때 혼합날개에 의해 파괴되어 많은 액적 혹은 작은 기포들을 생성시키고, 혼합날개 하류지역의 유동장 형태를 기포류 혹은 액막이 두꺼운 환상류로 바꾸어 생성된 액적들을 가열면의 액막에 부착시킴으로써 벽면 액체막의 두께를 성장시킨다. 이로인해 가열면은 열전달이 향상되어 결국 임계 열유속 발생을 늦추게 된다.

한편, 천류의 경우에도 슬러그류에서와 마찬가지로 혼합날개가 대형의 기체 슬러그들을 파괴시켜 임계 열유속 향상에 기여하지만, 유동이 상당히 빠

를 경우, 대형의 기체 혹은 액체 슬러그들이 혼합날개가 설치된 지역을 지날 때 유동면적의 축소로 인해 혼합날개 상류지역에서 유동 정체현상이 발생할 수 있으며,⁽²⁾ 이에 따라 열전달을 강하시켜 임계 열유속의 상승에 크게 기여하지 못할 수가 있다.

Fig. 10에 제시하였듯이 질량유속이 증가함에 따라 혼합날개에 의한 강한 회전유동 및 부수로간 강제유동을 유발시켜 $\Delta q_{CHF}''$ 의 변화가 상당히 크게 나타났으나, Fig. 11의 입구과냉도가 60 kJ/kg인 경우 대부분 부수로의 유동장이 환상류에서 슬러그류 혹은 천류로 천이할 경우로서 질량유속이 매우 빠를 때에는 질량유속이 더욱 증가하더라도 $\Delta q_{CHF}''$ 는 일정한 값으로 나타남을 알 수 있다. 즉, 슬러그류/천류에서는 혼합날개가 기체 슬러그들을 파괴시키므로써 임계 열유속을 향상시키는 측면이 있는 반면, 유체속도가 매우 빠른 경우에는 혼합날개가 유동저항체로 작용하므로 인해 임계 열유속을 강하시키는 면이 존재하므로 매우 빠른 질량유속에서는 질량유속이 계속 증가해도 $\Delta q_{CHF}''$ 에는 변화를 주지 못하였다.

4.4 환상류영역

Fig. 14(e)와 같이 가열면에는 얇은 액체막이 유동하고, 중심에는 증기 및 액적이 유동하는 환상류 영역에서는 지지격자 혹은 혼합날개가 유동장에 미치는 영향은 전술한 영역의 경우와는 다르다. 일반적으로 환상류영역에서의 지지격자는 임계 열유속에 악영향을 줄 수 있다.⁽¹⁶⁾ 즉, 지지격자가 설치된 지역을 가열면에 접촉된 얇은 액체막이 지나갈 때 지지격자에 의해 액체막이 소멸 혹은 두께가 얇아질 수 있으며, 이로 인해 조기에 임계 열유속에 이르게 할 수 있다.

혼합날개가 부착된 지지격자의 경우에는 혼합날개에 의해 단상 액체류에서의 액체속도보다 빠른 증기유동에 의해 강한 증기 회전유동 및 강제유동을 일으켜 부수로 유동 분포를 균일하게 하고, 이에 따라 임계 열유속을 상승시킬 수 있다. 또한, 환상류의 경우에는 유동중심에 기체와 액적들이 동시에 흐르기 때문에 혼합날개 지점을 지날 때 혼합날개 주변에 액적들이 모여 가열면의 두께를 상승시킬 수도 있으며,^(3,4) 혼합날개에 의해 발생한 강한 회전유동에 의해 원심력으로 액적들이 액막에 부착될 수도 있다.

환상류의 경우에는 혼합날개에 의한 임계 열유속 향상에 기여하는 인자가 있는 반면, 악영향을 미치는 현상도 동시에 존재하게 된다. 혼합날개가 부착된 지점에서의 유동형태는 Fig. 14(e)에서와 같이 혼합날개가 부착된 지점의 유동면적이 매우 작아 혼합날개는 마치 오리피스 역할을 하게 된다. 얇은 액막으로 형성되어 가열면을 따라 흐르는 액체유동이 혼합날개가 설치된 지점을 지날 때 중심에 고속으로 흐르는 증기유동이 액막과 혼합날개 사이를 지나면서 액적이탈을 가속시켜 액막의 두께를 줄이거나 혹은 액막을 완전 파괴시켜 부분적으로 임계 열유속을 발생시킬 수도 있다.

이와같이 환상류영역에서는 혼합날개가 임계 열유속에 악영향을 미치는 현상과 전술한 상승효과를 일으키는 현상이 결합되어 나타나므로 환상류영역에서는 혼합날개가 유동조건 변화에 따라 임계 열유속에 미치는 영향이 미약할 것으로 보인다. Fig. 8의 질량유속이 1000 kg/m²s인 조건에서는 유동영역이 대부분 환상류영역에 속해 있으며, 이에 따라 입구과냉도의 변화에 따라 $\Delta q_{CHF}''$ 의 변화가 없는 것으로 나타났음을 알 수 있으며, 전술한 바와 같이 혼합날개의 오리피스 역할에 의한 임계 열유속에 악영향이 나타나므로 유동조건이 바뀌더라도 $\Delta q_{CHF}''$ 의 변화가 크지 않음을 알 수 있다.

5. 결 론

상기한 가압 경수로용 핵연료 집합체의 한 모형인 25개 핵연료 집합체를 대상으로 임계 열유속 실험한 결과를 종합 분석하면, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 혼합날개 유무에 따라 임계 열유속 발생 부수로 및 발생 가열봉의 위치가 바뀌었다.
- (2) 임계 열유속이 과냉 액체류 혹은 기포류에서 발생하는 경우, 혼합날개가 임계 열유속 향상에 크게 기여한 것으로 나타났다.
- (3) 임계 열유속이 슬러그류/천류에서 발생하는 경우, 혼합날개가 임계 열유속을 향상시키나, 고건도가 될수록 혼합날개의 영향이 감소하였다.
- (4) 임계 열유속이 슬러그/천류-환상류로의 천이지역에서 발생하는 경우에는, 질량유속이 클 때 혼합날개가 유동저항체로 작용할 수 있을 것으로 보인다.
- (5) 임계 열유속이 환상류 영역에서 발생하는 경

우, 혼합날개의 영향은 임계 열유속에 미치는 악영향과 향상에 기여하는 영향이 결합되어 나타난 것으로 볼 수 있다.

이들 결과들은 임계 열유속을 일으키는 출구에서의 평균 유동조건에 근거한 결과들이므로 상세한 검토를 위해서는 임계 열유속을 일으키는 부수로의 유동조건 및 유동영역을 고찰해야할 것으로 보인다.

참고문헌

- (1) Rosal, E. R., Cermak, J. O., Tong, L. S. Casterline, J. E., Kokolis, S. and Matzner, B., 1974, "High Pressure Rod Bundle DNB Data with Axially Non-Uniform Heat Flux," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 31, pp. 1~20.
- (2) Katsaounis, A., Fulfs, H. and Stein, M., 1977, "Effects of the Core Grids on the Burnout," *GKSS 77E/22*.
- (3) Ryabov, A. N., Kamen'shchikov, F. T., Filipov, V. N., Chalykh, A. F., Yugay, T., Stolyarov, Ye., V., Blagovestova, T. I., Mandrazhitskiy, V. M. and Temel'yanov, A. I., 1977, "Boiling Crisis and Pressure Drop in Rod Bundles with Heat Transfer Enhancement Devices," *Heat Transfer-Soviet Research*, Vol. 9, pp. 112~122.
- (4) Aden, V. G., Asmolov, V. G., Blagovestova, T. I., Kapustin, V. A., Kudriartzev, L. L., Yu., V., Osmachkin, V. S., Ryabov, A. N. and Philippov, V. N., 1978, "The Study of Heat Exchange Enhancement in Models of Fuel Elements Bundles at the Coolant Boiling," *Sixth International Heat Transfer Conference*, Vol. 5, pp. 41~44.
- (5) Groeneveld, D. C. and Yousef, W. W., 1980, "Spacing Devices for Nuclear Fuel Bundles: A Survey of Their Effect on CHF, Post-CHF Heat Transfer and Pressure Drop," *ANS/ASME International Topical Meeting Nuclear Reactor Thermohydraulic*, Saratoga Spring, New York.
- (6) Yao, S. C., Hochreiter, L. E. and Leech, W. J., 1982, "Heat Transfer Augmentation in Rod Bundles Near Grid Spacers," *Transaction ASME*, Vol. 104.
- (7) Nissely, M. E. and Knott, R. P., 1984, "The Effects of Mixing Vaned Grids on CHF Performance," *ANS Annual Meeting*, New Orleans, June, 3~7, p. 842.
- (8) Suchy, P. and Ulrych, G., 1985, "Comparison of CHF-Results for Non-Mixing and Mixing Vaned Grids," *Presented at the European Two-Phase Flow Group Meeting, Machwood Engineering Laboratory*, England.
- (9) Shen, Y. F., Cao, Z. D. and Lu, Q. G., 1991, "An Investigation of Crossflow Mixing Effect Caused by Grid Spacer with Mixing Blades in a Rod Bundle," *Nuclear Engineering and Design*, 125, pp. 111~119.
- (10) Thomas, P., 1985, "Descriptif de la Boucle GRAZIELLA-II," *Note TT/SETRE161*.
- (11) Collier, J. G., 1972, *Convective Boiling and Condensation*, 2nd Edition, McGraw Hill Book Co.,
- (12) Taitel, Y., Bornea, D. and Dukler, A., 1980, "Modelling Flow Pattern Transitions for Steady Upward Gas-Liquid Flow in Vertical Tubes," *AIChE Journal*, Vol. 26, No. 3, pp. 345~354.
- (13) Park, J. H. J. S. Lee, and 1993, M. Gros d'Aillon, "The Effect of a Spacer Grid Mixing Vane on the Critical Heat Flux on a Rod Bundle," *6th International Symposium of Transport Phenomena in Thermal Engineering*, Vol. II, pp. 329~334.
- (14) Macbeth, R. V., 1964, "Burnout Analysis, Part 5: Examination of Published World Data for Rod Bundles," *AFEW-R358*.
- (15) Weisman, J. and Pei, B. S., 1983, "Prediction of Critical Heat Flux in Flow Boiling at Low Qualities," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 26, No. 10, pp. 1463~1477.
- (16) Janssen, E., et al., 1969, "Sixteen-Rod Heat Flux Investigation, Steam-Water at 600 to 1250 psia, Two-Phase Flow and Heat Transfer in Rod Bundles," *ASME Winter Annual Meeting*, pp. 74~79.