'2000춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

회전유동이 임계열유속에 미치는 영향의 실험적 연구
An Experimental Study of the Swirl Vane Effect on CHF

전 태현, 홍성덕, 신창환, 오동석, 인왕기, 양선규

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

회전유동이 임계열유속에 미치는 영향을 조사하기 위해 원형관내에 회전유동날개가 없는 지지격자와 있는 지지격자를 각각 삽입하여 임계열유속 시험을 수행하였다. 또한 회전유동날개 최적 설계를 위해 회전유동날개의 각도를 25, 30, 35。에대해 시험하였다. 시험의 목적이 회전유동발생으로 인한 임계열유속의 상대적인 특성 차이를 보기 위한 것이므로 시험의 편의성을 위해 냉매 R-134a를 사용하였다. 시험결과로부터 회전유동날개가 있을 때 임계열유속은 조사된 시험범위내에서 항상 회전유동날개가 없을 때보다 크게 나타났고, 세 날개 각도중에서는 종합적으로 35。일 때 최고의 임계열유속 증가를 보였는데 경수로의 노심 정상운전 부근에 해당하는 냉매의 조건인 압력 2.6 Mpa와 질량유속 1,500 kg/m^2s에서는 최소 15 %이상의 출력증가를 나타냈다.

Abstract

The effect of rotational flow on Critical Heat Flux (CHF) is experimentally examined using with and without swirl vane grid units in a round tube. In addition, the optimum design of the swirl vane is also investigated with three kinds of vane angles such as 25, 30 and 35。. Refrigerant R-134a is used as the working fluid for the test convenience, since this test is to understand the relative CHF enhancement due to the existence of a swirl vane in the grid. For the results, the swirl vaned grids always showed better CHF performance than no vane grid within the tested conditions. Among the three vane angles, the 35。 swirl vane revealed the highest CHF in most of the cases. Particularly, for the condition of a pressure of 2.6 Mpa and a mass flux of 1500 kg/m^2s (water equivalent to the normal operation condition of PWR) the CHF enhancement is, at least, above 15%.

1. 서 론

핵연료집합체에 있는 지지격자의 주 기능은 크게 핵연료의 기계적 건전성 유지와 연료봉 사이의 냉각수 유로 확보를 통한 노심 냉각 기능 확보이다. 여기에 부가적으로 핵연료의

열전달 효과를 높이기 위해 최근에는 유동혼합장치를 지지격자에 부착하고 있다. 일반적으로 지지격자의 유동혼합장치는 노심을 흐르는 냉각수의 온도 불균형을 완화시켜 국부적으로 빨리 열적 한계조건인 임계열유속에 도달하는 것을 억제한다. 그러므로 이러한 장치는 주어진 노심조건에서 임계열유속을 증가시켜 원자로의 안전성과 운전의 유연성을 높이는 열적여유도 확보에 기여하고 있다. 따라서 핵연료개발시 지지격자 유동혼합장치 설계는 핵연료의 성능을 좌우하는 중요한 기술중의 하나이다.

유동혼합장치가 임계열유속에 영향을 미치는 것은 이로 인해 유동장에 다양한 유동형태를 발생시키기 때문인데, 예를 들면 난류운동의 증가, 수로간의 강제 횡류 발생 또는 수로내의 회전유동등이다. 지금까지의 연구결과들를 보면, 유동혼합장치로 인한 난류운동은 지지격자를 지나면서 급격히 증가하지만 대신 빨리 감쇄하는 경향이 있는데 Yang 과 Chung[1]에 의하면 대개 수력직경의 10배 내에서 거의 사라지는 것으로 관찰되었다. 강제횡류 발생의 경우도 유동혼합장치 하류의 짧은 거리 내에서만 효과가 있을 것이다. 그러나 수로내 회전유동의 경우는 다른 유동형태에 비해 상대적으로 더 길게 영향이 유지되는데 Karoutas et al [2]와 In [3]에 의해 수력직경의 30배 이상인 것으로 보고되었다 . 회전유동은 원심력을 발생시키므로 특히 이상유도의 경우 큰 밀도차로 인해 기포를 수로 중심으로 유도하므로서 열전달 효율을 높이는 장점이 있다. 유동혼합장치는 실제 상기의 유동형태를 복합적으로 모두 나타내지만 그 중에서 어떤 유동형태가 주로 발생하며 또한 어느 정도의 강하게 나타나느냐가 그 장치의 성능을 결정할 것이다.

기존의 유동혼합장치로는 대표적으로 웨스팅하우스의 혼합날개 (Split Type mixing vane)가 있는데, 일반적으로는 미포화나 낮은 건도에서는 임계열유속을 증가시키지만, 건도가 높아지고 유량이 낮을 경우는 지지격자의 혼합날개의 영향이 줄어들거나 역으로 임계열유속에 부정적인 결과를 줄 수 있는 것으로 알려져 있다[4]. 본 실험은 상기의 유동형태중 특히 회전유동을 주로 발생시키기 위해 최근 고안된 회전유동날개[5]에 대해 임계열유속 성능을 예비 평가하기 위해 수행되었다. 이를 위해 원형관내에 회전유동날개가 없는 단순 지지격자 또는 회전유동날개 지지격자를 각 각 삽입하여 임계열유속을 측정하고 이를 비교하였다. 시험의 주 목적이 단순 지지격자와 회전유동날개가 있는 지지격자와의 상대적인 임계열유속의 특성를 확인하기 위한 것이므로 시험의 편의성을 위해 냉매 R-134a를 사용하였다. 한편 회전유동날개의 각도에 따른 영향도 평가되었는데, 이 시험 결과는 회전유동날개 지지격자의 성능을 극대화시키기 위한 최적설계에 활용될 것이다.

2. 시험 개요

본 시험은 한국원자력연구소의 냉매 임계열유속시험장치에서 수행되었으며 사용된 유체는 R-134a이다. 시험장치는 그림 1과 같이 냉각 펌프, 가열기, 시험단면, 열교환기, 및 응축

기로 구성되었다. 냉매는 그림2에 제시된 시험단면의 하부로부터 유입되며 원형관은 핵연료 다발의 단일수로를 모사한 직경 12mm의 Inconel관으로 총 가열길이는 82.5 cm이며 입구로부터 34.8 cm 지점에 단순한 지지격자 (그림 2(가)) 또는 회전유동날개 지지격자(그림 2(나))를 삽입하였다. 회전유동발생장치는 지지격자 상부에 Fan 형상의 4개 날개로 구성되는데, 날개의 굽힘 각도는 3가지 (25, 30, 35。)에 대해 수행하였다. 그러므로 총 4 종류의 시험단면에 대한 시험이 이루어진 것이다. 냉매는 아래에서 위로 유입되며, 시험 조건은 대략 경수로의 노심 운전 조건에 해당하는 냉매의 조건을 찾기 위해 Katto[6]의 Fluid-to-Fluid Modeling을 이용하였는데, 이때 conversion factor는 대략 압력의 경우 6.1이고 유속은 1.4이다.

- 압력 : 1.2 Mpa (T_{sat}=49.4。C), 2.6 Mpa (T_{sat}=86.4。C)
- 유속 : 750 - 2200 kg/m^2s
- 입구온도 : Room Temp - 70。C

시험단면의 열유속 조절은 직류 전원단자를 원형관의 상하단에 연결하여 원형관 저항에 의해 가열되는 직접가열 방식으로 하였다. 원형관은 균일한 출력분포를 가지므로 일반적으로 임계열유속은 가열길이 끝 부분에서 일어나므로 시험단면의 가열길이 끝에 T-type 열전대 두개를 서로 180。 위치에 설치하여 벽면 온도변화를 측정할 수 있도록 하였다. 시험자료 취득은 DAS를 통해서 이루어지며, 유량, 압력, 가열출력, 시험단면 입구 및 출구에서의 냉매 온도 그리고 시험단면 끝의 가열표면 온도등이 기록된다. 시험절차는 시험조건중 입구온도, 유속 및 압력을 먼저 맞춘 다음 이를 유지하면서 원형관에 공급하는 출력 (또는 열유속)을 서서히 증가시킨후 다시 출력을 일정하게 유지하여 준 정상상태로 만든다. 이러한 과정을 반복하여 출구에 위치한 전열대에서 온도가 급격히 증가하여 250。C에 도달하면 출력을 끄는데 이때를 임계열유속이 발생한 것으로 보았다.

3. 시험 결과

시험결과는 입구온도 및 출구건도의 변화에 따라 제시하였는데, 이때 상기의 시험영역에서 임계열유속은 100에서 380 kW/m^2 범위에 있었다. 그림 3(가),(나)는 압력 1.2 Mpa와 질량유속 750 및 1500 kg/m^2s 조건에서 입구온도 증가에 따른 임계열유속을 각 회전유동날개 각도에 대해 나타내고 있다. 그림3에서 알 수 있듯이 입구온도에 따른 임계열유속은 모든 경우 거의 선형적으로 감소하는 경향을 보이고 있고, 또한 회전유동날개가 없을 때가 항상 가장 낮은 임계열유속을 나타내고 있다. 그러고 회전유동날개가 있을 경우도 유속이 낮은 750 kg/m^2s 일때는 회전유동날개 유무 및 회전유동날개 각도간의 임계열유속 차이가 매우 미미함을 알 수 있다. 반면 질량 유속이 큰 경우인 1500 kg/m^2s 일 때는 회전유동날개의 유무에 따른 임계열유속 차이가 입구온도 조사범위에 걸쳐 분명하며 날개각도에 따라서도

차이가 약간 나타나고 있다. 조사된 3종류의 날개 각도중 가장 작은 각도인 25。인 경우가 임계열유속이 가장 낮고 30。, 35。 인 경우는 입구온도에 따라 서로 크기가 바뀌는데 그 차이가 시험오차 범위 내이므로 유사한 성능을 보인다고 할 수 있다.

그림 4(가),(나)는 압력이 2.6 Mpa에서 질량유속이 750 및 1500 kg/m^2s에 대한 것으로, 질량유속이 작은 750 kg/m^2s경우는 1.2 Mpa에서와 같이 회전유동날개 유무 및 날개 각도에 따른 임계열유속의 차이가 거의 부각되지 않고 있다. 그러나, 질량유속이 1500 kg/m^2s일 때는 압력이 1.2 Mpa의 경우와 달리 회전유동날개 유무뿐만 아니라 날개각도에 대해서도 임계열유속의 차이가 뚜렷이 나타나고 있으며 날개각도가 클수록 임계열유속이 커져 35。일 때 최대치를 보이고 있다.

그림5 (가)(나)는 출구관점에서 출구건도에 따른 임계열유속의 변화를 보여주고 있다. 그림5 (가)는 압력 2.6 Mpa에서 질량유속이 낮은 750 kg/m^2s의 경우 출구건도는 7- 27 %의 범위에 있는데 출구건도가 증가할수록 임계열유속은 전체적으로 감소하는 경향이나, 출구건도가 12-15 % 영역에서는 모든 날개 각도에서 임계열유속이 급격히 떨어지는 결과를 보이고 있다. 이는 이 영역이 임계 건도 조건에 해당하기 때문인 것으로 보인다. 날개 각도 간에는 임계열유속 크기가 좀 복잡한 양상을 보이고 있는데, 즉 각도에 따른 임계열유속의 경향은 일정하지 않으나 동일한 건도에서는 회전유동날개가 없는 경우 보다는 있는 경우가 임계열유속이 높음을 알 수 있다. 그림 5(나)는 질량유속이 1,500 kg/m^2s일 때로 출구건도가 -0.17 - 17 % 사이로 미포화 및 낮은 건도조건에서의 임계열유속에 대한 것이다. 이 건도 구간에서는 임계건도 현상이 나타나지 않고 있으며 건도에 따라 거의 선형적으로 감소하고 있다. 낮은 건도 조건에서는 날개각도에 따라 임계열유속 차이가 커져 날개각도가 35。일 때 최대치를 나타냈다.

이상의 결과로부터 회전유동날개에 의한 임계열유속 증가량을 정량적으로 평가하기 위해 다음과 같은 인자 Φ를 도입하였다.

$$\Phi \equiv \frac{q''_{\substack{vane\\angle}} - q''_{no\,vane}}{q''_{no\,vane}} \qquad (1)$$

여기서 $q''_{\substack{vane\\angle}}$은 유동혼합장치가 있는 원형관에서의 임계열유속이며, $q''_{no\,vane}$은 유동혼합장치가 없는 단순 지지격자의 임계열유속이다. 그림6은 입구온도에 따른 임계열유속 증가량을 제시하였는데, 그림6(가)의 압력 1.2 Mpa, 질량유속 1500 kg/m^2s일 경우 유동혼합날개 각도에 따라 입구온도의 증가에도 불구하고 Φ가 12 - 17%범위로 거의 일정하게 유지되고 있다. 그림6(나)의 압력 2.6 Mpa, 질량유속 1500 kg/m^2s일 경우는 Φ가 입구온도가 42。C에서 날개각도에 따라 Φ는 15- 20 % 정도이며, 각도가 증가하면서 전반적으로 서서히 증가하다가 60。C이상에서는 급격히 증가하여 날개각도 35。에서는 최대 47%까지 증가하고 있다. 이것

으로부터 회전유동날개가 있을 때 질량유속이 크고 건도가 커질수록 그 영향력이 커지는 것으로 판단된다. 이로부터 회전유동에의한 원심력 효과는 건도가 어느 정도 있을 때 더욱 크게 나타나는 것으로 보인다.

4. 결 론

회전유동이 발생되는 지지격자를 원형관에 넣고 이로 인한 임계열유속 증가를 냉매 R-134a를 사용하여 시험하였다. 시험된 지지격자의 종류는 회전유동날개가 없는 것과 있는 것 3종인데, 시험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 임계열유속은 조사된 범위내에서 회전유동날개가 있는 경우 회전유동날개가 없는 경우보다 항상 높게 나와 이 장치를 핵연료 지지격자에 장착할 경우 핵연료의 임계열유속 성능을 높일 수 있다.

(2) 회전유동날개는 출구 건도가 미포화 조건보다 낮은 건도 조건에서 임계열유속을 더 증가시키는 것으로 확인되었다.

(3) 회전유동날개의 각도는 대부분의 시험결과에서 35。일때 최고치를 보였는데, PWR의 정상운전 부근에 해당하는 냉매의 조건인 압력 2.6 Mpa와 질량유속 1500 kg/m^2s에서 출력 증가가 최소 15 %이상 되었다.

후기

본 연구는 과학기술부 원자력 연구개발 중장기 사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] Yang S. K. and Chung M. K., “Spacer Grid Effects on Turbulent Flow in Rod Bundles,” *J. KNS*, Vol. 28, 56-71 (1996)

[2] Z. Karoutas, C.Y. Gu, B. Scholin, "3-D Flow Analysis for Design of Nuclear Fuel Spacer," *NURETH-7*, New York, 1995.

[3] W.K. In, " CFD Simulation of crossflow mixing in a rod bundle with mixing blades," Proc. KNS, Spring Meeting, 1999.

[4] J.B. Chung, W.P. Baek, S.H. Chang," Effects of the spacer and mixing vanes on Critical Heat Flux for low pressure and water at low velocities," *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol 23, No 6, pp. 757-765, 1996.

[5] T.H. Chun et al., "Fuel assembly spacer grid with swirl deflectors and hydraulic

pressure springs," 09/121,930, 1998 (미국특허출원중).
[6] Katto, Y., 1978, "A Generalized Correlation of Critical Heat Flux of Forced Convection Boiling in Vertical Uniformly Heated Tubes," *Int. J Heat Mass Transfer*, Vol. 21, pp. 783 794.

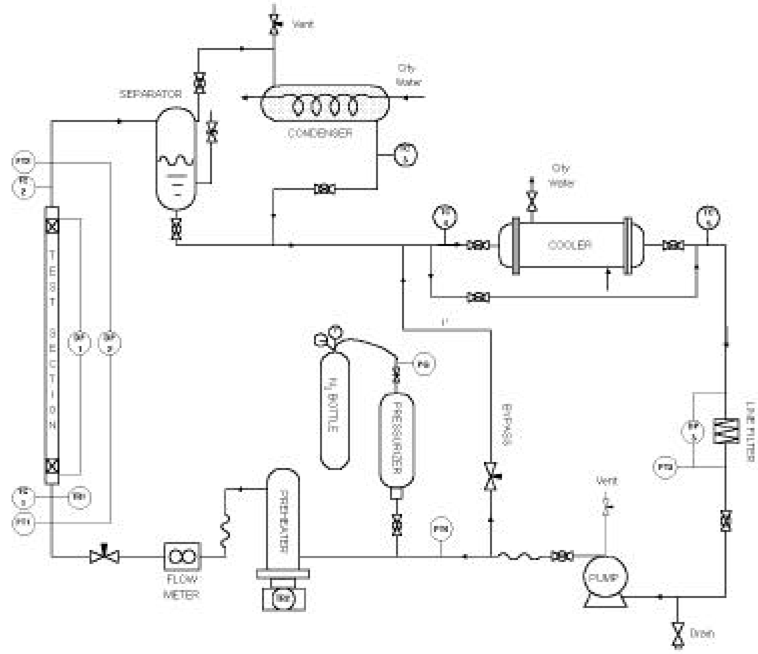
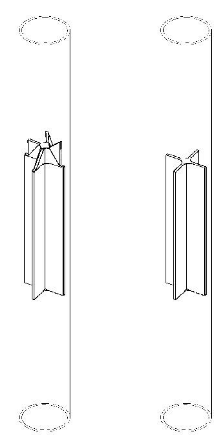
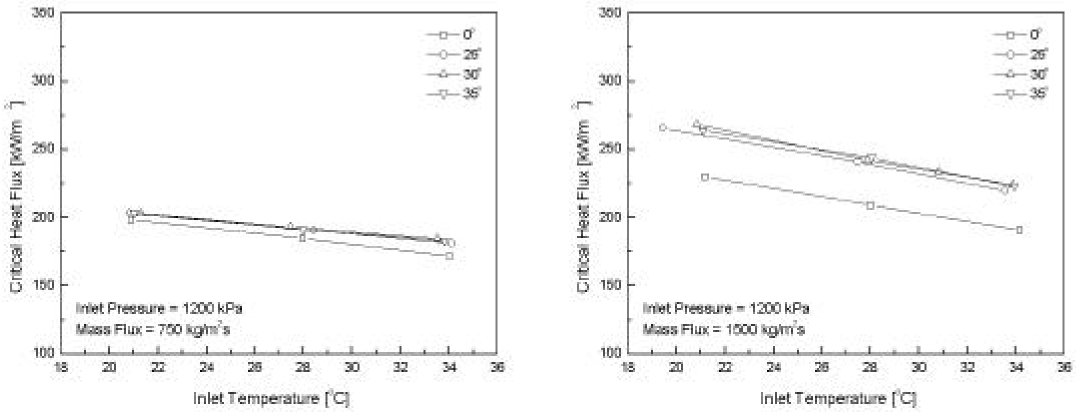


그림 1 냉매를 이용한 임계열유속 시험장치의 개략도



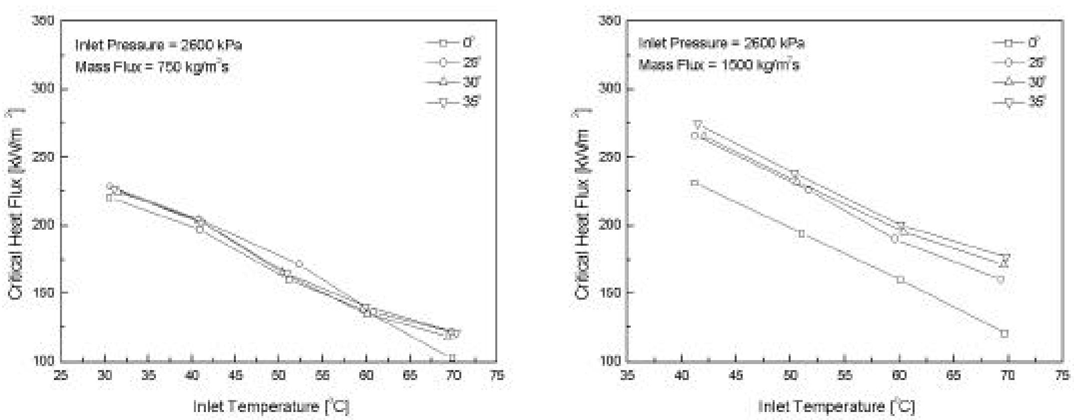
(가) 단순 지지격자 (나) 회전유동날개

그림 2 시험단면 및 회전유동날개 형상



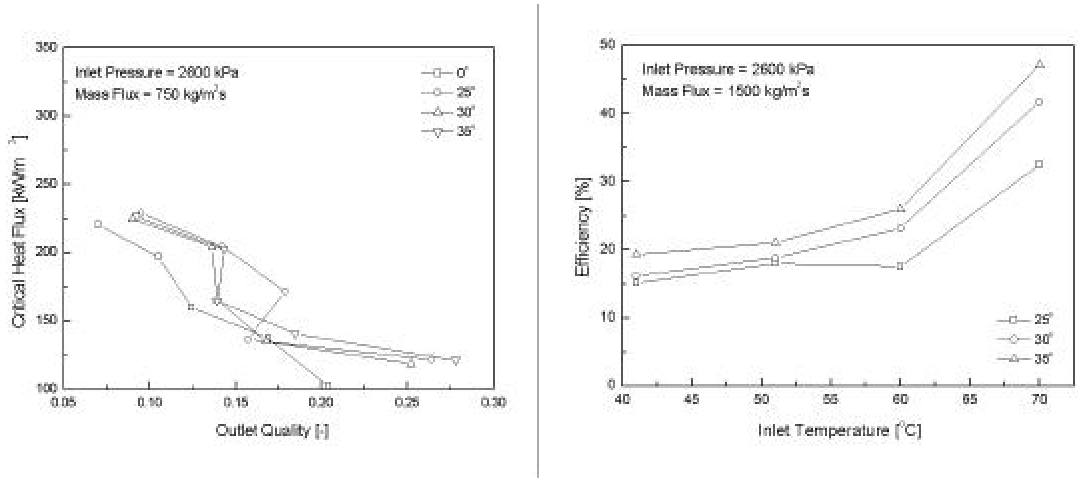
(가) G=750 kg/m2s (나) G=1500 kg/m2s

그림 3 **압력** 1.2 Mpa**에서 입구온도에 따른 임계열유속 시험결과**



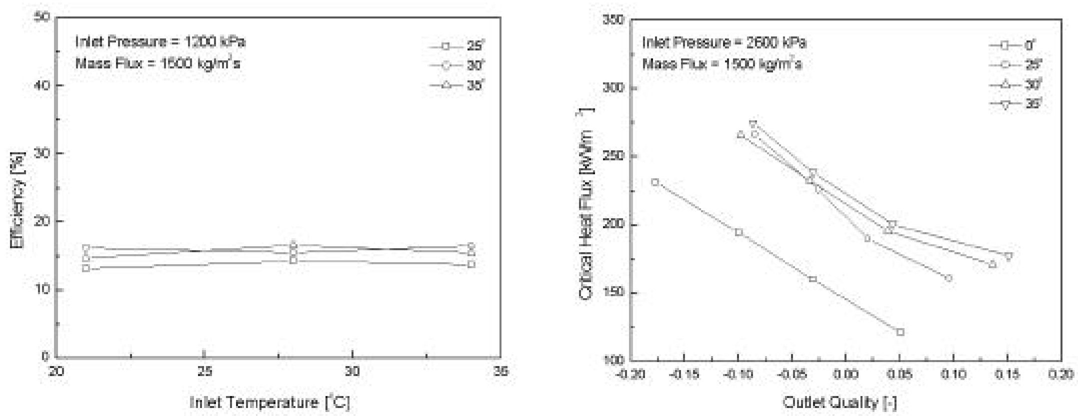
(가) G=750 kg/m2s (나) G=1500 kg/m2s

그림 4 **압력** 2.6 Mpa**에서 입구온도에 따른 임계열유속 시험결과**



(가) G=750 kg/m2s (나) G=1500 kg/m2s

그림 5 압력 2.6 Mpa에서 출구건도에 따른 임계열유속 시험결과



(가) P= 1.2 Mpa, G=1500 kg/m2s (나) P= 1.2 Mpa, G=1500 kg/m2s

그림 6 각 회전유동날개 각도별 입구온도에 따른 임계열유속 증가량 비교