

핵연료집합체 지지격자의 혼합날개 형상이 임계열유속에 미치는 영향

신창환[†]·추연준·문상기·천세영·전태현

Effect of Mixing Vane Shapes of Spacer Grids in Nuclear Fuel Assembly on Critical Heat Flux

ChangHwan Shin, YeonJun Choo, SangKi Moon, SeYoung Chun, TaeHyun Chun

Key Words: Critical Heat Flux(임계열유속), Spacer Grid(지지격자), Mixing Vane(유동혼합날개), Fuel Assembly(핵연료집합체), PWR(가압경수로)

Abstract

Freon CHF experiments are carried out to investigate the CHF enhancements by mixing vane shapes of spacer grids in nuclear fuel assembly. The experiments were performed for a wide range mass flux, 50~3000 kg/m²s. Three kinds of spacer grids in 5x5 rod bundles are tested: no mixing vane grids, hybrid mixing vane grids, and split mixing vane grids. The CHF performances are compared along with the data belong to the PWR operating conditions based on a water equivalence through a fluid-to-fluid modeling method. The average of the data in this range is 16.4% for 37 data of hybrid vane grid and 12.5% for 24 data of split vane. In the lower mass flux, however, the split vane grid shows slightly higher performance than the hybrid vane grid.

1. 서론

가압경수로용 핵연료집합체는 일반적으로 핵연료봉, 상단 및 하단 고정체, 그리고 지지격자로 구성되어 있다. 지지격자는 원자로내에서 연료봉 간의 간격을 일정하게 유지하고, 외부 충격을 견디며, 유동에 의한 진동을 억제하는 기본적인 역할 외에 임계열유속(CHF, Critical Heat Flux)을 향상시키는 기능을 하고 있다. 임계열유속이란 연료봉 표면의 열유속이 증가할 때 특정조건에 도달하면 연료봉 표면의 열전달이 급격히 감소하여 연료봉 온도가 빠르게 올라가는 현상을 의미한다. 임계열유속 발생조건은 일반적으로 가열면

표면에서 기포가 발생할 때, 기포와 가열면 사이의 유체가 모두 기화하여 기포 밑의 가열면이 증기로 덮이게 되면 액체에 의한 열전달이 기체로 전환되면서 가열면 온도는 급격히 상승하는 것으로 알려져 있다.

원자로내에서 임계열유속의 발생은 핵연료봉 재료의 용융점까지 표면온도의 상승을 가져와 연료봉 파손으로 발전될 수 있다. 이러한 상황은 연료봉 내의 방사능 물질이 누출되는 사고를 의미한다. 따라서 임계열유속의 발생을 막기 위해 원자로 정상 운전조건에서 임계열유속까지의 열적여유도를 충분히 갖도록 하여야 한다. 이를 위해 지지격자에 유동혼합날개(Mixing Vane)을 장착하게 되며, 유동혼합날개는 하류 유동에 난류 강도를 높이고 회전유동이나 횡류를 발생시킨다. 이러한 기능은 노심내 불균일한 중성자 분포에 의해 생기는 국부적으로 높은 출력봉의 주변 유체 온도를 낮추므로 고온 붕에서 임계열유속 발

[†] 회원, 한국원자력연구원

E-mail : shinch@kaeri.re.kr

TEL : (042)868-2666 FAX : (042)863-0565

생을 억제한다.^(1,2)

유동혼합날개 설계는 핵연료의 열적 성능인 임계열유속을 좌우하는 중요한 요소이며, 혼합날개가 임계열유속 증진에 미치는 연구에 대해서는 지금까지 Rosal 외⁽³⁾, Nissely & Knott⁽⁴⁾ 등이 있지만 상당히 제한적으로 이루어졌다. 또한 동일한 형태의 혼합날개라 할지라도 날개의 크기 및 각도 등 형상에 따라 고유의 유동 특성을 가지므로 실제 임계열유속의 정량적인 평가는 시험을 통해서만 확인할 수 있다.

원자로 조건에 대한 임계열유속 성능을 평가하기 위해서는 경수로와 동일하게 물을 사용하여 고온, 고압 조건에서 수행되어야 한다. 그러나 이러한 임계열유속 시험시설은 원자력발전소 생산 전력의 1~2%를 차지하는 20MW 정도의 전력과 고온, 고압에 견딜 수 있는 대규모 실험장비가 필요하다. 따라서 지지격자 개발과정에서의 다양한 후보모형에 대한 성능 평가 시험으로는 적합하지 않다. 반면, 냉매는 기화열과 임계압력이 물보다 월등히 낮아 소규모의 시설로도 임계열유속 시험이 가능하며 실험도 용이하고 비용도 물에 비해 약 1/10 정도로 적게 드는 장점이 있다.

본 실험에서는 혼합날개의 형상에 의한 임계열유속 성능 평가를 위해 냉매를 사용하였다. 시험시설은 원자력연구소에 있는 프레온 열수력실험장치(FTHEL)를 이용하였으며 냉매로는 프레온 R-134a를 사용하였다. 임계열유속 성능의 상대적 비교를 위해 혼합날개를 갖지 않는 단순지지

Table 1. Parameters of test section

Parameter	5x5 Bundle
Total number of heated rods	25
Rod pitch (mm)	12.85
Rod diameter (mm)	9.5
Heated length (mm)	2000
Rod to wall gap (mm)	3.25
Corner radius (mm)	3.0
Flow area (mm ²)	2762.98
Axial power distribution	Uniform
Radial power distribution	
Peaking factor of center 9 rods	1.123
Peaking factor of side 16 rods	0.931

격자와 복합유동 혼합날개 지지격자, 분리날개 지지격자에 대해 평가하였다.

2. 실험장치 및 절차

2.1 실험장치

프레온 열수력 실험장치(FTHEL)은 그림 1에 나타난 바와 같이 주순환펌프, 가압기, 예열기, 유량계, 시험대, 응축기 및 열교환기로 구성되어 있다. 유량조절은 펌프의 회전속도 조절용 인버터와 우회밸브 및 입구 Throttling 밸브를 통해 조절한다. 가압기로는 질소가스를 이용한 축압기(Accumulator)를 사용하며, 질소가스와 프레온 유체는 Bladder로 차단되어 있다. 입구온도의 조절을 위해서는 열교환기와 예열기를 사용하며, 시험대에서 생성된 증기는 응축기를 통해 액화된

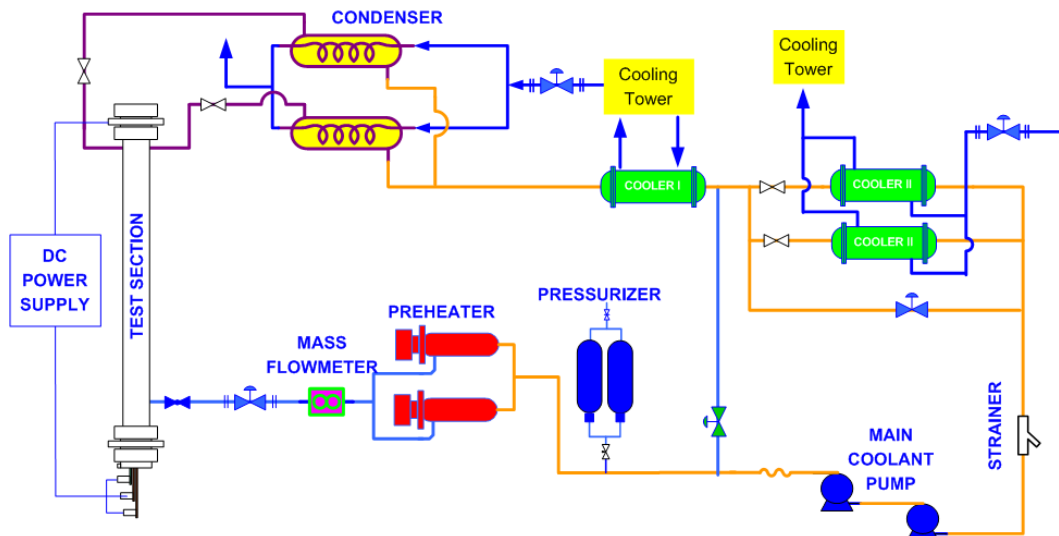


Fig. 1 A schematic diagram of Freon Thermal Hydraulic Experimental Loop

다. 시험대에 연료봉을 모사한 가열봉은 직류전원(60 Volts, 12000 Amp.)을 인가하는 직접 가열 방식을 채택하였다. 시험대 입,출구 온도를 포함한 루프내의 온도는 T-type 열전대로 측정되며, 압력은 로즈마운트사의 압력트랜스미터에 의해 측정된다. 유량의 측정은 질량유량계를 사용하였다.

2.2 시험대

시험대의 압력용기 내부에는 유동 채널을 이루기 위하여 4인치의 배럴을 설치하고, 내부에 전기절연과 시험대의 유로를 형성하기 위하여 세라믹으로 하우징을 제작하였다.

시험봉다발은 핵연료를 모사한 25개의 가열봉을 5x5로 구성한다. 봉다발에 대한 설계는 표 1에 제시하였다. 가열봉의 평균출력은 그림 2에서와 같이 중심부 9개에 대해 1.123, 외부의 16개에 대해 0.931를 갖도록 하였다. 가열봉의 축방향 출력분포는 균일하도록 하여, 임계열유속이 가열봉 최상부에서 발생하도록 하고, 가열봉의 벽면온도는 가열구간 최상부에서 10 mm 하단지점에 K-type 열전대를 설치하여 측정하였다. 가열봉의 열전대는 높은 출력의 봉에는 4개, 낮은 출력의 봉에는 2개를 설치하였으며, 전체 68개의 가열벽면 온도를 측정하도록 하였다.

지지격자는 축방향으로 564 mm가 되도록 하였으며, 가열부의 마지막 지지격자와 열전대까지의 거리는 500 mm이다. 지지격자의 성능을 유동혼합날개의 영향이 약해지는 위치에서 상대적으로 비교/평가하기 위해 상용 핵연료 지지격자의 간격에 비해 좀 더 넓게 설치하였다.

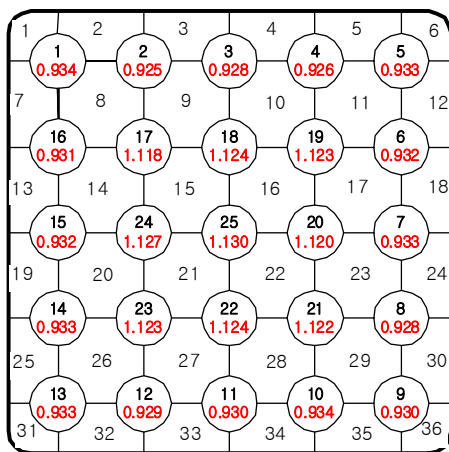


Fig. 2 Radial power distribution of 5x5 bundle

2.3 지지격자

시험은 단순지지격자와 한국원자력연구소에서 개발한 복합 유동혼합 날개(Hybrid Mixing Vane, 이하 복합날개)를 가진 지지격자⁵, 상용의 분리날개(Split Vane) 지지격자를 사용하였다.

실험에 사용한 유동혼합날개의 형상은 그림 3에 표시하였다. 복합날개는 마주치는 두 격자판의 교차지점 주변에 사다리꼴로 뺀 지지대의 양 측면에 붙은 4개의 날개로 이루어진다. 여기서 서로 수직하게 놓인 날개 각 쌍은 2 종류로 주 날개 쌍과 보조 날개 쌍으로 형성되어 있다. 주 날개 쌍은 부수로 간의 횡류 혼합을 주로 발생케 하며, 보조 날개쌍은 회전유동을 발생시키는 역할을 주로 한다. 단순 지지격자는 지지격자에서 단지 복합 유동혼합 날개를 제외하고 동일하다. 분리날개를 가진 지지격자의 날개는 격자판의 교차 지점에 두 개의 동일한 크기와 각도로 이루어져 있고 서로 반대 방향으로 굽혀져 있으며 복합날개와 달리 격자판 상부의 수평선에서 바로 꺾여 있다.

2.4 실험절차

실험은 시험대 입구의 유량, 온도 및 시험대 입구의 압력을 설정된 조건에 먼저 맞추고, 시험대 가열봉에 전원을 공급하고 서서히 전력을 증가시킨다. 예상되는 임계열유속 근방에서 출력은 조금씩 Step 상태로 증가시키고, 수분동안 유지하여 정상상태를 확인한 후, 다음 step으로 조금씩 증가 시킨다. 임계열유속이 발생하면 전력의 공급을 설정된 수준으로 낮추도록 되어 있어 가열봉의 파손을 방지한다.

가열봉의 최대 표면온도가 출구압력에서의 포화온도보다 약 35 °C이상 상승하면 임계열유속이 발생한 것으로 판단한다.

실험 자료의 획득전에 열평형실험을 수행하였으며, 실험을 통해 평가된 열손실은 2% 내외였

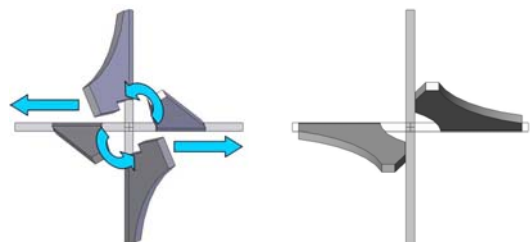


Fig. 3 Hybrid mixing vane and Split mixing vane

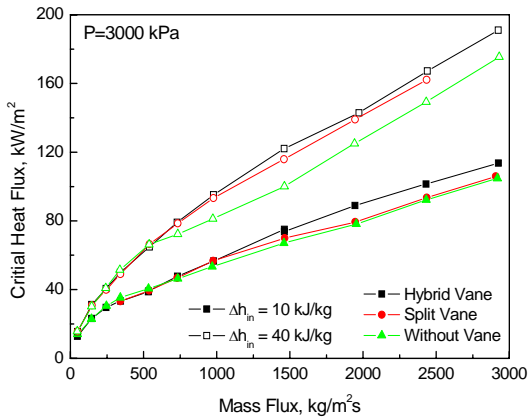


Fig. 4 Comparisons of the CHF (P=3000 kPa)

다. 오차해석을 통해 얻은 실험의 주요변수인 온도에 대한 오차는 1.2%, 압력은 3%, 질량유속은 0.3%로 평가되었다.

3. 결과 및 토의

3.1 혼합날개에 의한 임계열유속

본 실험에서는 봉다발의 출력분포, 지지격자 간격뿐만 아니라 시험 조건 등 지지격자를 제외하고는 모두 동일하게 하였다. 그림 4는 압력 3000 kPa일 때 주어진 입구 과포화조건에서 질량유속 증가에 따른 임계열유속 변화를 보여주고 있다. 유속이 낮은 경우 복합날개 지지격자와 분리날개 지지격자 모두 유동혼합 기능이 약해 임계열유속에 미치는 영향이 거의 없고, 단순지지격자의 임계열유속과 유사하다. 그러나 유량이

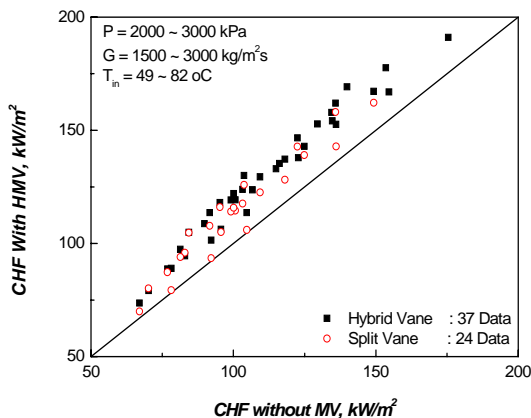


Fig. 5 Performance of mixing vane on CHF

1500 kg/m²s보다 큰 경우에서 유동혼합날개의 영향이 나타나는 것을 볼 수 있는데, 복합날개 지지격자가 분리날개 지지격자에 비해 임계열유속이 크다는 것을 알 수 있다. 또한 입구과냉도가 클수록 유동혼합날개에 의한 임계열유속 증진이 보다 낮은 유량에서 나타나고 있다.

입구과냉도가 낮은 경우 분리날개 지지격자는 복합날개 지지격자에 비해 임계열유속의 증진은 영향이 미미하게 나타나고 있다.

그림 5는 복합날개 지지격자와 분리날개 지지격자의 성능을 단순 지지격자에 대비 종합적으로 비교 평가한 결과이다. 비교 영역은 원자로 노심 조건을 고려하여 압력이 2000-3000 kPa, 질량유속이 1500-3000 kg/m²s, 입구온도는 49~82 °C 경우에 대해 이루어졌다. 이 결과로부터 복합날개 지지격자의 경우는 16.4 %이고 분리날개 지지격자의 경우는 12.5%로 나타났다. 이들 중 두 실험에서 동일한 조건에 대하여 수행된 실험결과 20개의 데이터에 대해서는 복합날개와 분리날개 지지격자 각각에 대해 18.4%와 14.5%로 나타났으며, 이로부터 복합날개 지지격자가 분리날개 지지격자에 비해 임계열유속이 약 4% 정도 크게 나타나는 것으로 평가된다.

하지만 저유량영역에서의 임계열유속 성능은 다음 절에서 비교되듯이 분리날개가 복합날개에 비해 보다 나은 성능을 분명히 보여주고 있다.

3.2 혼합날개에 의한 임계열유속 성능 비교

혼합날개가 임계열유속에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해 다음과 같은 식으로 복합날개 지지격자의 임계열유속 성능 P 을 표시하였다. 지지격자간 비교에서 각각의 실험조건들은 1% 범위내에서 유지되도록 하였다.

$$P = \frac{q''_{MV} - q''_{NMV}}{q''_{NMV}} \times 100 (\%)$$

여기서 q''_{MV} 는 혼합날개가 있는 경우의 임계열유속을 의미하며, q''_{NMV} 는 단순 지지격자 경우의 임계열유속을 의미한다.

혼합날개에 의한 임계열유속 성능은 그림 6과 7에 압력 3000kPa에서의 혼합날개 지지격자, 분리날개 지지격자에 대하여 각각 나타내었다. 두 지지격자는 유량 750kg/m²s를 기준으로 저유량영역과 고유량영역에서 서로 다른 특성을 보여주고

있다. 고유량영역에서 혼합날개에 의한 임계열유속의 증가는 일정유량까지는 유량의 증가에 비례하여 증가하지만 그 이후에는 반비례하여 감소함을 알 수 있다. 복합날개 지지격자의 경우 과냉도가 증가할수록 최대 임계열유속 증가지점은 낮은 유량에서 나타나며, 최대 임계열유속 증가는 분리날개 지지격자에 비하여 큰 값을 갖는다. 하지만 혼합날개에 비해 보다 낮은 최대치를 보이는 분리날개 지지격자에서는 큰 유량조건에서는 단순지지격자에 비해 2%전후의 임계열유속 증가만을 보이고 있다. 특히 과냉도가 낮은 입구과냉도 10kJ/kg의 조건에서는 유량 2000kg/m²s 이후의 높은 유량영역에서 임계열유속의 증가는 1.5%정도의 낮고, 거의 일정한 증가량을 보여주고 있다.

저유량영역에서는 고유량영역과는 상반된 특성을 보여주고 있다. 분리날개 지지격자의 경우 단순지지격자에 비해 최대 7.5%까지의 증가를 가져

오며, 최소 단순지지격자와 유사한 임계열유속을 보인다. 반면에 복합날개 지지격자의 결과에서는 저유량 영역에서는 임계열유속이 혼합날개에 의해 오히려 감소하고 있다.

이는 고유량의 임계열유속이 가열면 근처에서 활발하게 발달된 기포에 의해 가열면이 덮이면서 발생하는 DNB(Departure of Nucleate Boiling)로 설명되는 반면에, 저유량의 경우 유동양식은 일반적으로 환상류로 발전되며, 환상류 액체막이 모두 기화되거나 액적 형태로 떨어져나가 액체막 유량이 상실되면서 임계열유속이 발생하게 되고, 이러한 경우를 액체막 건조(Liquid Film Dryout)라 한다.

따라서 부수로내의 회전유동이 강력한 복합날개의 경우 가열벽면 근처에 군집하게 되는 기포를 부수로 중심의 과냉영역으로 이동시켜 고유량의 DNB영역의 임계열유속을 증가시키는데 유리하며, 반면 부수로간 횡류혼합이 강력한 분리날개의 경우 가열벽면에 형성된 액체막을 유지하여 LFD영역의 임계열유속을 증가시키는데 유리한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 실험에서는 핵연료집합체의 지지격자에 장착된 유동혼합날개의 형상에 따른 임계열유속의 특성을 비교하고자 하였다. 이를 위해 혼합날개를 갖지 않는 단순지지격자와 복합날개, 분리날개 지지격자에 대해 실험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

혼합날개에 의한 임계열유속의 증진은 저유량에서는 미미하지만, 고유량에서는 분명하게 나타나며, 복합날개 지지격자가 분리날개 지지격자에 비해 우수한 성능을 보이고 있다. 유체모델링에 의한 경수로 조건하의 결과비교에서 복합날개는 분리날개에 비해 4%이상 임계열유속 증진을 보이고 있다.

고유량영역에서 혼합날개에 의한 임계열유속의 증가는 일정유량까지는 유량의 증가에 비례하지만 그 이후에는 반비례하여 감소하고 있다.

저유량영역에서 분리날개 지지격자는 단순지지격자에 비해 유사하거나 최대 7.5%의 임계열유속 증진을 보이는 반면, 복합날개 지지격자에서 혼합날개에 의해 임계열유속의 감소하는 경향을 보

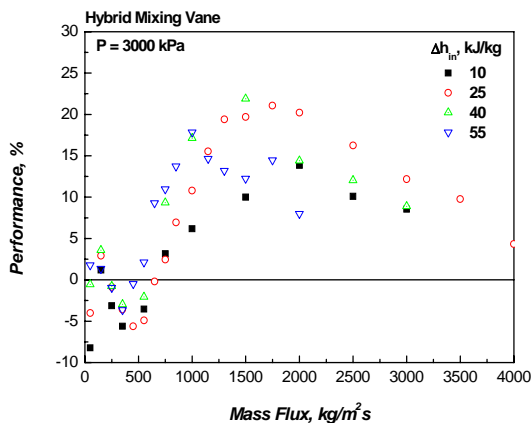


Fig. 6 CHF performance of hybrid mixing vane

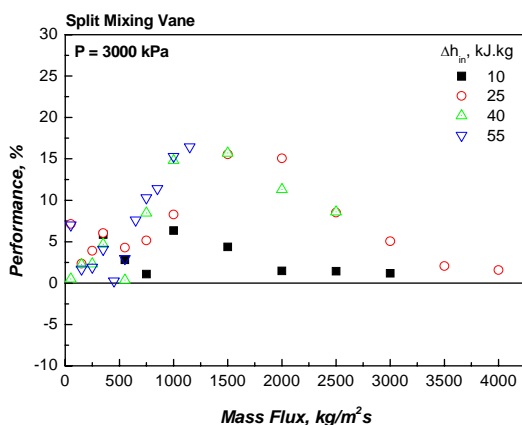


Fig. 7 CHF performance of split mixing vane

인다.

따라서 분리날개의 경우 고건도 영역에서, 혼합날개의 경우 저건도 영역에서 보다 나은 임계 열유속 증진 효과를 보여주고 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Groeneveld, D. C., Kiameh, B. P., and Cheng, S. C., 1986, "Prediction of critical heat flux (CHF) for non-aqueous fluids in forced convective boiling," Proc. of the 8th Int. Heat Transfer Conf., San Francisco
- (2) Groeneveld, D. C., Leung, L. K. H., Aksan, N., Badulescu, A., Cleveland, J., Baek, W. P., Chung, M. K., Dauria, F., Cheng, X., Kirillov, P., and Macek, J., 1999, "A General Method of Predicting Critical Heat Flux in Advanced Water Cooled Reactors," Proc. of NURETH-9, San Francisco
- (3) 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 Engineerings and Design, Vol. 31, pp. 1-20
- (4) Nissley, M. E., and Knott, R. P., 1984, "The effect of mixing vanes on critical heat flux," Proc. Int. NPP T/H and Operations Top. Mtg., Taipei, Taiwan, Paper No. B1
- (5) Chun, T. H. et al., 2005, "Spacer grid with hybrid flow-mixing devices for nuclear fuel assembly," U.S. Patent No. 6845138 B2