

대형 2차 와류에 의한 봉다발 부수로에서의 난류 열전달 향상에 관한 실험적 연구

서귀현[†]·최영돈^{*}

Experiment of Turbulent Heat Transfer Performance Enhancement in Rod Bundle Subchannel by the Large Scale Vortex Flow

Kwi Hyun Seo, Young Don Choi

Key Words: Mixing Vane(혼합날개), Spacer Grid(지지격자), Rod Bundle(연료봉다발), Large Scale Vortex Flow(대형 와류동)

Abstract

Experimental studies were carried out to confirm the turbulent enhancement of the cooling system of nuclear reactor by large scale vortex generation in nuclear fuel rod bundle. The large scale vortex motions were generated by rearranging the inclination angles of mixing vanes to the coordinate directions. Experimental studies were carried out at Reynolds Number 60,000 with hydraulic condition. Normal variations of mean velocity and turbulent intensity in the rod bundle subchannel were measured by the 2-color LDV measurement system. The turbulence generated by split mixing vanes has small length scales so that they maintain only about $10D_H$ after the spacer grid. On the other hand, the turbulences generated by the large scale vortex continue more and remain up to $25D_H$ after the spacer grid.

기호설명

$C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}$: ϵ 방정식의 모형계수	$U^{\xi m}$: 물리적 반변속도성분 [m/s]
D	: [m]	x, y, z	: 직교좌표계 [m]
\sqrt{g}	: 자코비안	$\overline{u_i u_j}$: 레이놀즈응력 [(m/s) ²]
$\sqrt{g^{mm}}$: 반변속도 메트릭스 텐서	$\overline{u_i \theta}$: 난류열유속 [(m/s) °C]
k	: [m ² /s ²]		
P_k	: [m ² /s ³]		
q	: [W/m ²]		
T	: [°C]		
U, V, W	: (x, y, z) [m/s]		

그리스 문자

α	: 혼합날개의 각도
$\sigma_k, \sigma_\epsilon$: k, ϵ 방정식의 확산계수
ϵ	: 난류운동에너지 소멸율 [m ² /s ³]
ξ^m	: 일반곡률 좌표계

[†] 고려대학교 대학원

E-mail : khseo@korea.ac.kr

TEL : (02)926-5908

^{*} 고려대학교 기계공학과

E-mail : ydchoi@korea.ac.kr

TEL : (02)3290-3355 FAX : (02)928-1067

1. 서 론

핵연료 부수로 내에서 연료봉(rod bundle)과 냉

각제 사이에 열전달을 효율적으로 증가시키는 기술은 원자로 설계에 있어서 중요한 과제 중의 하나이다. 기존의 부수로에서는 냉각제의 난류 열 효율을 향상시킬 목적으로 연료봉의 지지격자(spacer grid)에 혼합날개(mixing vane)를 부착하여 부수로 간극을 중심으로 한 국부 와류동(local vortex flow)을 발생시켜 열전달 및 열혼합을 증진시키는 방법을 사용하고 있다.

이에 대한 연구들을 살펴보면 Rehme⁽¹⁾은 여러 가지 형태의 지지격자에 대한 압력강하를 측정하여 지지격자에 관련된 압력강하 특성 관계식을 제시하였다. 또한 Rehme과 Trippe⁽²⁾는 지지격자가 있을 때 피토크관(Pitot tube)을 이용하여 속도분포를 측정하여 지지격자로 인한 질량유량 재분포 현상에 대한 연구를 수행하였다. Rowe 와 Chapman⁽³⁾은 지지격자의 상하류에서 난류구조를 LDV로 측정하여 지지격자가 난류에 미치는 영향을 연구하였다. Shen 등⁽⁴⁾은 LDV를 사용하여 혼합날개가 있는 지지격자를 포함한 봉다발 부수로에서 횡류속도 및 난류강도를 측정하여 난류 혼합율이 혼합날개의 각도에 크게 좌우됨을 관찰하였다. Gu 등⁽⁵⁾은 다양한 혼합날개를 적용한 경우 FLOW3D 코드를 이용하여 선회 유동 특성을 조사하였다. 그리고 최근 Yang 과 Chung⁽⁶⁾은 지지격자가 있는 5×5, 6×6 핵연료 봉다발 부수로에서 LDV로 측방향 속도, 난류강도, 편이도, 편평도, 스펙트럼 에너지 등을 측정하였다. 특히 지지격자 근방에서 지지격자가 난류유동 구조에 미치는 영향을 규명하였다. 그러나 위 연구들은 Split 혼합날개의 유동특성을 관찰하는 연구로 지지격자와 혼합날개의 설계상의 문제점들을 제시하지는 못하고 있다. 최근 수행된 연구인 Park 과 Choi⁽⁷⁾는 LSVF혼합날개를 이용하여 FLUENT v5.5를 이용하여 전산해석을 하였고 Re수 10,000에서 실험을 하였다. 측방향으로의 속도성분 (u^2)만을 측정하였으며 실제 원자로에서의 Re수에 미치지 못한 수력조건에서의 실험이었다.

따라서 본 연구는 기존의 실험자료를 근간으로 지지격자와 혼합날개의 형상 변화를 통하여 유동 특성을 조사하였다. 기존 혼합날개의 단점을 보완할 수 있는 새로운 혼합날개를 설계하여 실험적 연구를 통하여 split 혼합날개와 본 연구 과정에서 설계한 LSVF 혼합날개를 적용한 경우의 주유동 속도, 횡단면에서의 2차유동, 난류강도 등을

비교 분석함으로써 혼합날개의 새로운 형상을 설계하는데 있다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험장치는 Fig. 1 에서와 같이 저장탱크, 펌프, 유량제어밸브, 유량계, 그리고 연료봉이 있는 측정부로 구성되며 순환 시스템으로 작동한다. 측정부는 36개의 연료봉, 외각틀, 입·출구 측의 2개의 자유단, 차압계, 혼합날개가 부착된 2개의 지지격자가 일정한 간격으로 연료봉을 지지하고 있으며 지지격자의 유동 방향으로의 높이는 30(mm)이며 단면은 140×140(mm)으로 되어있다. 펌프로부터 운동량을 얻은 냉각제는 두 개의 정류상자를 거쳐 완전 발달된 유동을 형성하여 시험부에 유입하게 된다. 이 시험부는 지지격자 하류에서의 횡단면의 2차유동(u^2, v^2) 및 레이놀즈응력(\overline{uv}) 측정 및 실험실의 증고를 고려하여 높게 됐다. 혼합날개 각도는 예측된 전산해석결과를 바탕으로 30°를 채택하였다.

Split 혼합날개는 Fig. 2(a)와 같이 설계되며 기존 원자로에 많이 사용하는 것으로 부수로 내에서 강한 와류동을 유발시켜 난류에너지를 증가시키는 일종의 바람개비의 형태이다. LSVF 혼합날개는 유로 내에서 혼합날개를 Fig. 2(b)와 같이 일정 방향(날개가 분리되지 않음)으로 배열하여(지지격자의 중앙에 1개의 split 혼합날개를 부착함) 대형 와류동을 지속적으로 발생시켜 난류에너지를 증가시키는 원리이다.

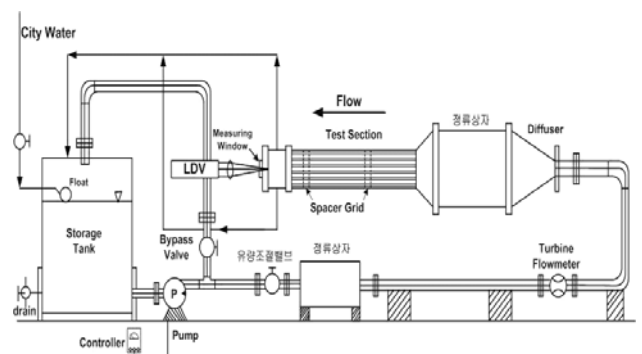


Fig. 1 Test loop and section for the cooling system of nuclear reactor.

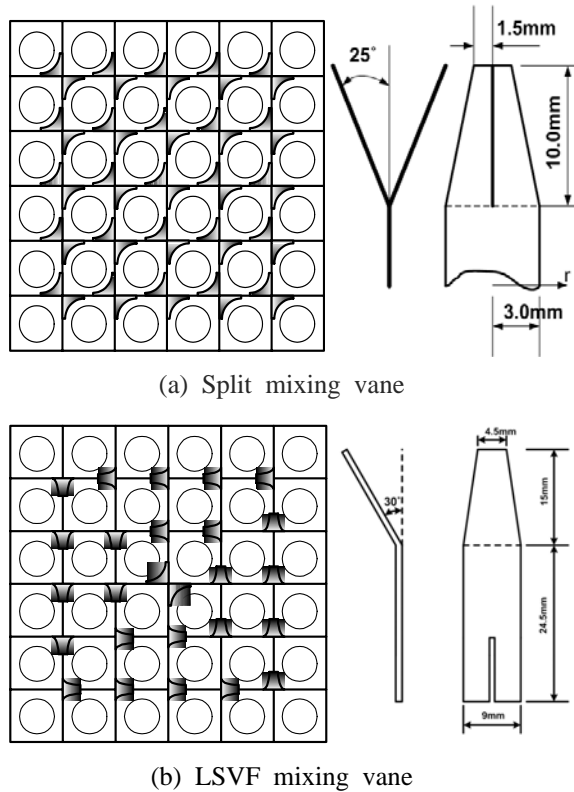


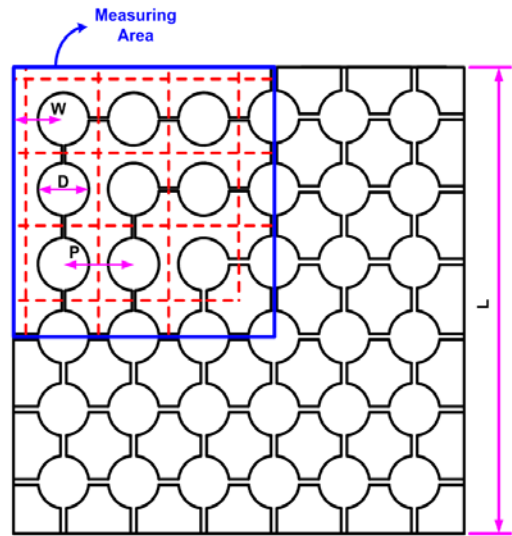
Fig. 2 Configuration and dimension of LSVF mixing vane.

2.2 실험방법

본 연구에서는 LSVF 혼합날개에 대하여 실험 하였으며 Yang and Chung⁽⁶⁾이 split 혼합날개에 대하여 조사한 자료와 Park and Choi⁽⁷⁾의 LSVF 혼합날개에 대한 정보를 비교하기로 하였다. Fig. 3은 LDV로 측정할 측정영역을 나타낸 것이다. P1~P7의 점선은 단면에 대한 주유동 속도를 측정 하기 위한 선으로 외각들의 벽면으로부터 $\Delta x = 0.045 D_H$ 등간격으로 증가시켜 중앙선까지 측정 하였다. B1~B7의 국부점은 주유동 방향으로 혼합 날개 이후 $\Delta x = 0.5 D_H$ 증가시켜 $32 D_H$ 까지 각 점에 대하여 측정하였다. 유동 방향을 따라 주유동속도, 2차유동, 난류강도 등을 측정하였다. Fig. 4는 두 개의 지지격자를 고정된 D_H 를 유지하면서 직접 1, 3, 5, 10, 20, $30D_H$ 의 지지격자를 이동시켜 측정단면을 형성하여 각 횡단면에서의 2차유동 속도성분 및 레이놀즈응력을 측정한다.

속도측정 장치로서 Correlation방식의 2D Dantec의 LDV를 사용하였으며 초점거리가 400(mm)인 Probe기본렌즈에 Beam Expander와 600mm front

lens를 장착하여 시간적·공간적 분해능을 높여 기존 Park 등⁽⁷⁾이 구현한 관심영역에서 보다 우수한 데이터를 획득할 수 있다. 작동유체가 물인 경우 일반적으로 산란입자를 별도로 추가하지 않아도 산란광을 얻을 수 있으나 본 실험에서는 직경이 1.5 (μm), 밀도가 3.2 (g/cm^3)인 silicon carbide 산란입자를 첨가하였다. 실험간 측정된 값은 각 측정점에 대하여 30,000개를 20~30 (sec) 동안 수집하여 평균값을 취하였다.



W(width)	17.9mm
D(Diameter)	15.8mm
P(Pitch)	21.9mm
L(Length)	140mm

Fig. 3 Cross-section of 6x6 rod bundles and measurement points and dimension

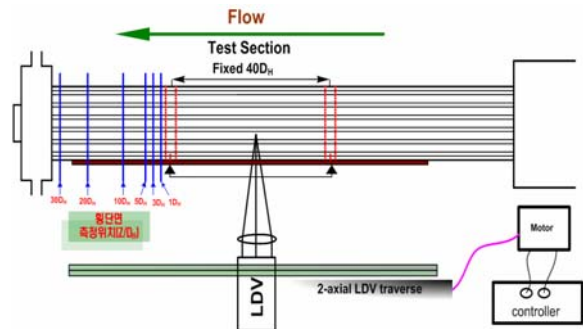


Fig. 4 Arrangement of cross-section Measurement plane.

3. 결과 및 고찰

연료봉과 냉각제 사이에 열전달을 향상시키는 방법으로 지지격자 또는 혼합날개의 형상 변화가 일반적으로 사용되었다. 기본적으로 지지격자의 설치 목적은 연료봉 다발을 일정한 간격으로 지지하여 연료봉 다발에 지지격자를 설치함으로써 지지격자 근방에서 난류강도 및 2차유동 강도의 증가에 의해서 열전달계수를 크게 증가시킬 것이다. 더욱이 지지격자에 혼합날개를 부착하여 발생하는 와유동에 의해 강한 난류를 생성시켜 열전달을 향상시키는 기술로 발전하게 되었다. 부수로 내 열전달계수를 향상시키는 요소는 난류의 지속적인 생성, 부수로 간의 횡류혼합 증가, 2차유동의 발달 등이다. 즉, 혼합날개의 설계는 부수로 내의 열전달 향상에 중요한 설계 변수이다. 따라서 지지격자에 부착된 혼합날개를 이용하여 대형 와유동을 생성시킴으로써 난류의 지속적인 생성, 부수로 간 횡류혼합을 증가시켜 전체 부수로 내 열전달계수의 증가가 기대된다.

Split 혼합날개의 경우 부수로 내에서 연료봉 크기의 차원을 갖는 와를 생성하고 있으며, LSVF 혼합날개의 경우는 연료봉과 연료봉 사이를 냉각제가 대형 와유동을 형성하고 있다는 것을 알 수 있다. Split 혼합날개의 경우 부수로 내에서만 강한 와가 발생하여 부수로 간 유동혼합이 거의 발생하지 못하고 있다. 그러나 LSVF 혼합날개의 경우 부수로 간 와류가 크게 회전하고 있으며 연료봉과 연료봉 사이에서 발생한 2차유동이 연료봉 주위에서 작은 와류를 생성시켜 난류의 생성과 소멸을 반복하는 것을 부수로 내 유동을 통하여 확인할 수 있다. 레이놀즈수가 60,000인 경우 2차유동 강도를 유동 방향에 대하여 단면 평균한 값과 혼합날개의 각도 변화에 따른 2차유동의 소멸 정도를 나타낸 것이 Fig. 6 이다. Split 혼합날개인 경우 혼합날개의 각도에 상관없이 12 D_H 부근에서 변화가 없는 것을 알 수 있으며 선회 유동이 큰 경우 2차유동 소멸이 크다. LSVF 혼합날개인 경우 20 D_H 이상까지 2차유동이 지속되며 혼합날개의 각도의 변화가 클수록 2차유동 강도 역시 완만하게 소멸되고 있다.

Fig. 7은 유동 방향에 대하여 Fig. 4 와 같은 위치에서 path 2 와 path 4 에 대하여 LSVF 혼합날개에 대하여 전산해석 결과와 실험 결과를 비교

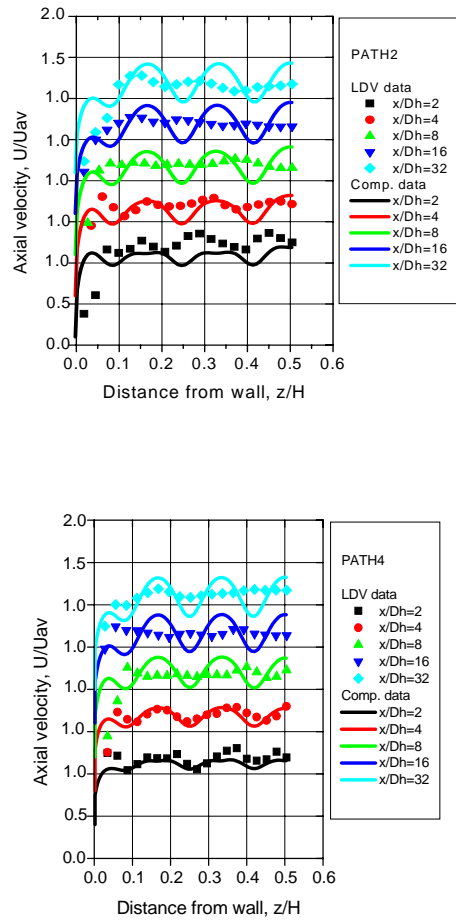
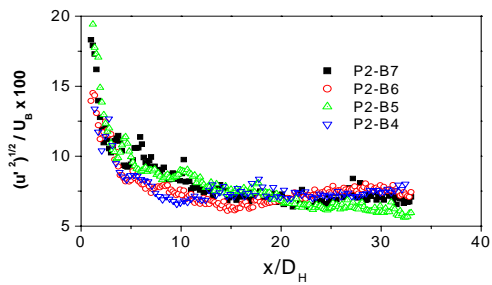
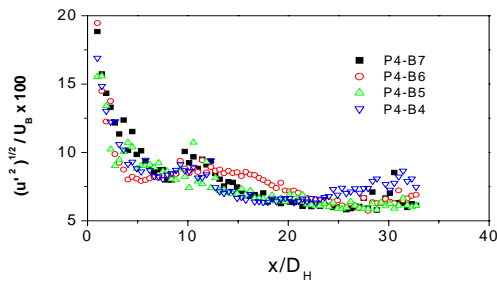


Fig. 5 Developed streamwise velocity.

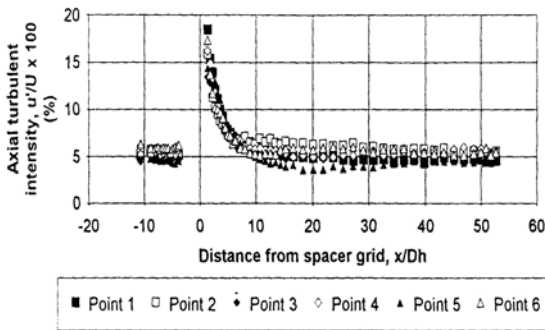
한 것이다. LSVF 혼합날개가 대형 와유동을 일으키는 path 2에서 유동 경향을 살펴보면 2 D_H , 4 D_H 에서는 LDV 측정값과 전산해석 결과와는 달리 완전 발달된 유동 형상을 가지지 못하고 있다. 측정에 의한 이와 같은 결과는 벽면에서의 난류 성분과 대형 와유동에 의한 강한 혼합작용으로 보인다. 유동이 전산 해석적으로 완전 발달되었다는 것은 혼합날개에 의하여 발생한 와가 소멸되었다는 것을 의미한다. 이와 같은 경향은 벽면 근방을 제외한 모든 영역에서 나타나고 있다. 이렇게 전산해석 결과와 실험 측정 결과가 차이를 보이는 것은 전산해석에서 사용한 $k-\epsilon$ 모형이 등방성 난류모형으로써 난류의 비등방성 효과를 충분히 고려하지 못하였고 성긴 격자 때문으로 판단된다. 와점성 난류모형을 사용할 경우 일반적으로 강한 선회유동이 나타나는 유동장에서는 그 정확도가 2차모멘트 난류모형에 비하



(a) LSS mixing vane (Re=10,000); path2



(b) LSS mixing vane (Re=10,000); path4



(c) Split mixing vane(Re=50,000)⁽⁶⁾

Fig. 6 Distribution of axial turbulent intensity.

여 좋지 못한 결과를 준다고 알려져 있다. Fig. 8(a)(b)는 LSVF 혼합날개에 대하여 LDV에 의해 측정된 난류강도의 변화를 각 측정점에서 유동 방향으로 나타낸 것이며, Fig. 8(c)는 Yang and Chung이 Split 혼합날개에 대하여 LDV로 측정하는 것이다. Path 2(P2) 와 path 4(P4)의 모든 측정점에서 알 수 있듯이 Split 혼합날개가 10 D_H 근방에서 급격히 감쇄현상을 보이며 평균 난류강도가 5%로 지속되는 반면 LSS 혼합날개의 경우 20 D_H 까지 7%로 지속되고 있다. 여기서 특이한 것은 10D_H 근방에서 난류강도가 일시적으로 증

가하여 감소하는데 이것은 냉각제가 연료봉과 연료봉 사이를 지나면서 압력 변화로 부수로 내 작은 와의 생성으로부터 기인하는 것으로 보인다. 기존의 많은 연구(4,5,6)에서 split 혼합날개를 사용한 경우 지지격자 이후 급격한 난류 감쇄현상으로 열전달 향상이 단거리에 제한된다고 하였다. 그러나 LSVF 혼합날개를 사용한 경우 난류의 강도가 20 D_H 까지 지속적으로 서서히 감소하고 있으며 path 4 에서는 모든 점에서 난류 감쇄현상이 없어져 2차유동의 지속성과 같은 거리에서 소멸되었다.

4. 결론

원자로 냉각제 열효율 증진 기법의 하나로 혼합날개의 형상을 변화시켜 대형 와유동을 발생시키는 LSVF 혼합날개와 split 혼합날개를 적용한 부수로 내 유동을 전산해석과 LDV 측정을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) LSVF 혼합날개와 split 혼합날개에 대하여 전산해석을 수행한 결과 2차유동이 LSVF 혼합날개인 경우는 20~25 D_H, split 혼합날개의 경우는 10~13 D_H 까지 지속되어 기존의 실험 결과와 일치하였다.

(2) 혼합날개의 각도에 대한 전산해석 결과에서 난류증진 효과는 split 혼합날개 대하여 LSVF 혼합날개가 날개 각도에 더 민감하였으며, LSVF 혼합날개의 경우 α=20°, 30°에서 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

(3) LDV측정에서 난류강도는 Split 에 대하여 LSVF 혼합날개가 지속성은 증가하였으며 감쇄현상은 감소하였다.

(4) LSVF 혼합날개를 사용하였을 경우 2차유동의 지속성, 난류강도의 증가로 지지격자 이후 난류의 감쇄현상이 현저히 감소하여 원자로 냉각제의 열전달 향상이 기대되어 진다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행하는 전력산업 연구개발사업의 기술개발의 일환으로 한전전력연구원의 지원에 의해 수행되었습니다.(과제번호 : R-2002-0-234).

참고문헌

- (1) K. Rehme, 1973, Nucl. Technol. Vol. 17, pp. 15-23.
- (2) K. Rehme and G. Trippe, 1980, 1973, Nucl. Engrg. and Des. Vol. 62, pp. 349-359.
- (3) D. S. Rowe, B. M. Johnson and J. G. Knudsen, 1974, Int.J.Heat Transfer Vol. 17, pp. 407-419.
- (4) C. Y. Gu, Wei Ji, Z. Karoutas and B. Scholin 3D flow Analyses for Design of Nuclear Fuel Spacer.
- (5) Y. F. Shen, Z. D. Cao and Q. G. Lu, 1991, Nucl. Engrg. and Des. Vol. 125, pp. 111-119.
- (6) S. K. Yang and M. K. Chung, 1995, 6th Int. Conf. on Laser Anemometry Advances and Applications, South Carolina, USA.
- (7) B. E. Launder and D. B. Spalding, 1974 Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 3, pp. 269.
- (8) C. L. V. Jayatilleke, 1969, SAE paper No.900254.
- (9) S. V. Patankar, C. Liu and E. M. Sparow, 1977, Trans.ASME J. Heat Transfer, Vol. 99, pp. 180-186.