

지지격자 혼합날개에 의한 5×5 봉다발에서 유동 패턴

추연준[†] · 장석규* · 김복득* · 문상기* · 송철화*

A Study of Flow Pattern in 5×5 Rod Bundle by the Spacer Grid Mixing Vane

Yeon-Jun Choo, Seok-Kyu Chang, Bok-Deok Kim,
Sang-Ki Moon and Chul-Hwa Song

Key Words: Spacer Grid Mixing Vane(지지격자 혼합날개), Rod Bundle(봉다발), Subchannel(부수로), PIV(입자영상속도계)

Abstract

The mixing vanes attached to the spacer grid of rod bundles are used to improve the heat transfer in heat exchanger devices by controlling the characteristics of the flow structures and turbulence. In this study, velocity patterns induced by two types of mixing vane(split and swirl vane) are measured by the PIV technique to better understand how to effect on the cross and secondary vortex flow patterns in 5×5 rod bundle simulating the fuel assembly of the nuclear reactor. A successful measurement of the lateral velocity patterns was conducted using a specially designed beam sheet generator and experimental loop at KAERI. As the result, we found that for the cross flow between subchannels, the split vane is more effective than the swirl vane, while for the secondary vortex flow in each subchannel, the swirl vane's one is larger and longer than split vane's one.

1. 서 론

원자로 내의 핵연료 집합체에서 냉각수의 열수력학적 거동에 대한 이해는 효율적인 원자로의 설계에 필수적인 요소일 뿐만 아니라, 정상 혹은 비정상운전상태에서의 원자로의 안전성을 확보하기 위한 기본적인 요소이다. 최근 연료봉과 냉각수간의 열전달 증진과 냉각수의 국부적인 과열현상을 피하기 위해서 핵연료 집합체를 지지할 목적으로 이용되는 지지격자(Spacer Grid)에 최적설계된 혼합날개(Mixing Vane)를 부착하려는 노력

이 이루어지고 있다. 또한 혼합날개는 노심내의 핵연료 집합체의 부수로(Subchannel)간 냉각수 혼합을 촉진하여 노심내의 냉각수 온도분포를 균일하게 유지시킴으로써 노심의 최대 운전조건을 결정하는 임계열유속 관점에서도 긍정적인 측면으로 작용하고 있다. 이러한 노력의 일환으로 원자력 관련 분야의 연구 그룹들과 핵연료 회사들은 독자적으로 설계한 혼합날개를 갖는 지지격자를 설계하려는 노력을 하고 있다.

핵연료 집합체와 같은 봉 다발의 부수로 내에서 주요한 횡방향 유동은 부수로간 횡단류(Cross Flow)와 부수로 내의 2차 회전유동(Secondary Vortex Flow)으로 구별된다. 봉다발 내의 부수로 유동장 측정은 1970년대부터 단순지지 봉배열을 대상으로 여러 연구자에 의해 이루어졌다. 이후 부수로 내의 효율적인 열전달을 목적으로 지지격자에 혼합날개를 장착한 봉배열을 대상으로 하는

[†] 회원, 한국원자력연구원 열수력안전연구부

E-mail : chooyj@kaeri.re.kr

TEL : (042)868-8205 FAX : (042)868-2570

* 한국원자력연구원 열수력안전연구부

연구가 몇몇 연구자들에 의해서 이루어졌다^{(1)~(4)}.

Yang 등⁽¹⁾은 혼합날개 지지격자가 장착된 5×5 봉다발 부수로에서 LDV를 사용하여 축방향 유동에 대한 속도성분 및 난류특성을 측정하였고, 하류로 갈수록 난류강도가 급격히 감소함을 확인하였다. McClusky 등⁽²⁾은 처음으로 PIV기법을 이용하여 5×5 봉다발 부수로의 속도장을 측정된 결과, 혼합날개의 끝단에서 생성된 와류가 서로의 상호작용에 의해 하류로 갈수록 병합, 소멸되는 현상을 관찰하였다. Chang⁽³⁾은 본 연구에서 이용된 실험장치를 대상으로 LDV를 이용하여 축방향과 횡방향 속도분포에 대한 상세한 계측결과를 발표하였다. Ikeda 등⁽⁴⁾은 특별히 고안된 Rod LDV를 이용하여 혼합날개가 존재하지 않는 지지격자와 혼합날개를 장착한 지지격자가 축방향과 횡방향 유동에 미치는 영향을 평가하였다.

본 연구에서는 특별히 고안된 평면광 재생기를 포함하는 PIV 기법을 이용하여 5×5 봉다발 내의 냉각수의 유동 패턴을 상세하게 계측하였다. 실험에 이용된 혼합날개는 분리형(Split vane)과 와류형(Swirl vane)의 두 가지 형태로 봉다발의 4개의 부수로에 대하여 부수로 내의 유동형태뿐만 아니라 부수로 내의 2차유동과 부수로 간의 횡단 유동에 대한 측정을 수행하였다.

2. 실험장치 및 측정기법

2.1 냉각수 순환장치와 실험대

5×5 봉다발 부수로 유동장 측정을 위해 KAERI에 설치되어 있는 상온상압에서 작동하는 냉각수 순환장치를 이용하였다. 순환장치는 크게 예열기를 포함하는 냉각수저장탱크, 냉각수순환펌프 그리고 실험대로 이루어져 있다. 실험조건은 냉각

수 온도가 35℃, 시스템 압력은 1.5 kPa, 질량유량은 23.4 kg/sec으로 Re수는 49000이며, 축방향 평균 속도(W_{bulk})는 1.45 m/s이다. Fig. 1(a)은 봉다발을 포함하는 실험대의 개략도이다. 균일유동을 위한 honey comb straightener를 통해 봉다발에 유입되는 냉각수는 혼합날개가 없는 지지격자를 통과하고 혼합날개가 장착된 지지격자를 지나 출구 유도장치를 통하여 냉각수저장탱크로 다시 유입된다. 봉다발 끝단의 지지를 위해 상류와 하류쪽에 봉단지지대(End Support)를 설치하였다. 측정단면 A-A에서의 봉배열을 Fig. 1(b)에 나타내었다. 본 연구에서 이용된 봉배열과 지지격자의 치수는 측정해상도를 높이기 위해 가압경수로 원자로의 봉배열의 치수에 2.6배로 확대되었다. 봉의 직경은 25.4 mm이며, 봉간 거리는 33.12 mm로써 직경 대 피치 비($P/D_R=1.304$)이고, 수력반경 D_h 는 24.27 mm이다.

2.2 혼합날개와 부수로

본 실험에서 이용된 혼합날개는 분리형과 와류형 두 종류가 이용되었다(Fig. 2). 분리형 혼합날개는 축방향 주유동에 양쪽 횡방향 성분을 유발하여 인접 부수로로 유입되도록 하여 부수로간 유동 혼합을 목적으로 고안된 형태로 한국원자력연료(주)와 미국의 Westinghouse사가 공동 개발한 Plus-7을 모델로 하였다. 한국원자력(연)에서 개발한 Hybride 지지격자를 모델로한 와류형 혼합날개는 부수로 내에서 강력한 와류를 발생시켜 봉표면의 기포를 효과적으로 이탈시키고 열전달 성능을 향상시키기 위하여 고안된 제품으로 날개의 굽힘선 각도 인한 날개의 유효 면적 감소를 보상하기 위해 주날개 외에 보조날개를 추가하되 유동의 추가적 압력강하를 줄이기 위하여 보조날개는

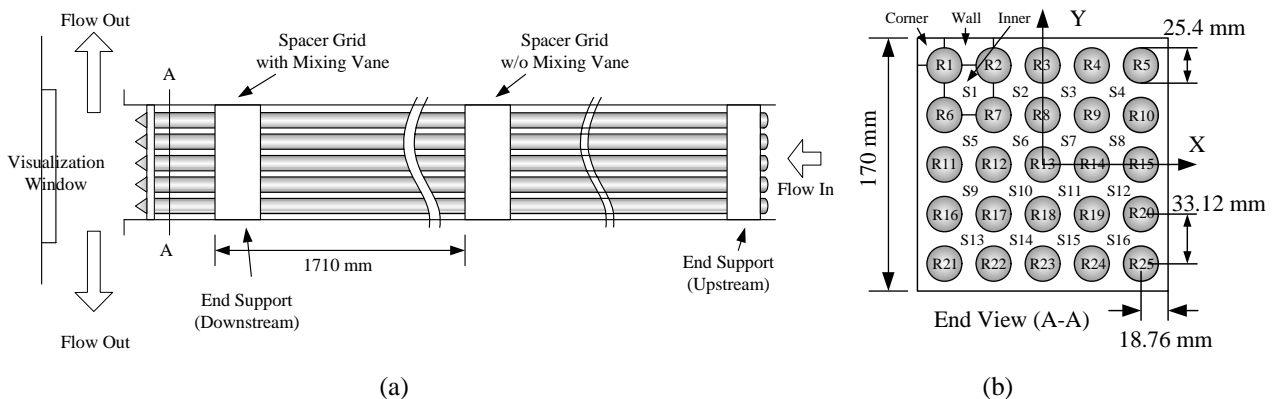


Fig. 1 Schematic diagram of 5×5 rod bundle assembly

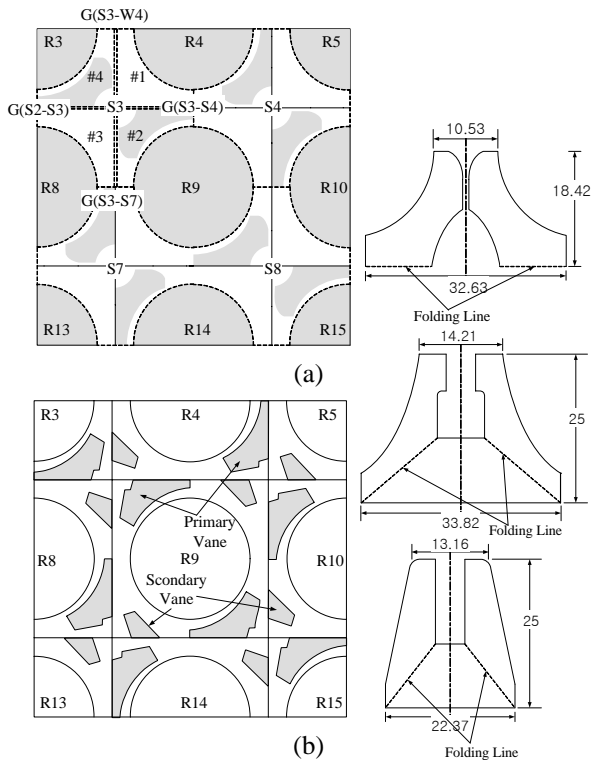


Fig. 2 Spacer grid with mixing vane; (a) Split type vane, (b) Swirl type

작게 설계되었다.

냉각수의 유로의 역할을 하며, 연료봉의 표면과 열전달이 이루어지는 영역인 부수로는 Corner(C#), Wall(W#), Inner Subchannel(S#)로 구분된다. 본 연구에서 Fig. 2에서와 같이 봉 R9를 둘러싸고 있는 네 개의 부수를 측정 대상으로 하였으며, PIV 측정을 위해 R9는 Optic Rod로써의 역할을 수행한다. 부수로는 S3, S4, S7, S8이 측정 대상이 되었으며, 다시 한 부수로는 #1~#4까지 4분할된다. 그리고 본 연구의 측정영역에서는 총 12개의 부수로 간의 갭(G(#-#))을 가지고 있다.

2.3 PIV(입자 영상 속도계)

부수로의 속도장을 얻기 위한 기존의 연구에서는 LDV(Laser Doppler Velocimetry), Hot-Wire, Pitot tube를 이용한 측정기법이 주로 이용되었다. Hot-Wire나 Pitot tube와는 달리, 측정 시 유동에 영향을 미치지 않는 LDV 측정기법은 Rowe⁽⁵⁾에 의해 부수로 내 난류유동을 해석하려는 연구에 처음 시도되었고, 최근에는 Chang⁽³⁾과 Fiber LDV를 이용한 Ikeda⁽⁴⁾의 연구결과가 발표되었다.

본 연구에서는 부수로 유동 측정을 위해 PIV

(Particle Image Velocimetry)를 이용하였다. PIV를 이용한 봉다발 부수로의 유동장 측정은 McClusky⁽²⁾에 의해 처음 시도되었다. 분리형 혼합 날개를 장착한 5×5 봉다발 끝단에 Borescope를 삽입하여 13장의 순간영상을 획득하고 시간 평균하여 한 부수로에 대해서 측정하였다.

본 연구에서 이용된 PIV 기법의 주요 구성품과 간략한 측정 절차를 살펴보면, 광원은 Double Cavity Nd:YAG 레이저(Continuum PIV-lite)로써 직경이 6 mm이며 532 nm의 파장의 빔을 발생한다. 레이저에서 발생한 두 빔이 중공인 R9를 통해 입사되고, 측정 영역을 비추기 위해 주 유동 방향에 수직한 평면광(beam sheet)을 발생하는 장치를 고안하였다. 또한, R9는 주변의 네 부수를 비추기 위해서 회전이 가능하도록 설계되었다.

측정영역을 지나는 산란입자(Dantec, Silver Coated Hollow Glass Spheres, dia.: 10 μ m)들의 신호는 카메라(Kodak Megaplus ES 1.0)를 통해서 프로세서(Dantec, FlowMap PIV 2000 Processor)로 전송된다. 또한, 프로세서는 빔의 발생시기와 두 빔의 간격, 그리고 카메라의 shutter가 작동하는 시기를 동기시키기 위한 동기화 장치를 포함하고 있다.

Fig. 3은 부수로 #7에서 속도 벡터를 구하기 위해 얻어진 전형적인 입자 영상이다. 일반적인 레이저 빔은 Gaussian 형태의 세기 분포를 가짐으로 평면광의 가장자리 부분이 상대적으로 낮은 세기를 가지게 된다. 이를 고려한 평면광 발생장치를 설계하였음에도 불구하고 Fig. 3에서와 같이 부수로의 중앙보다는 상하 공간에 상대적으로 낮은 밝기를 보이고 있다. 이러한 문제점을 해결하고

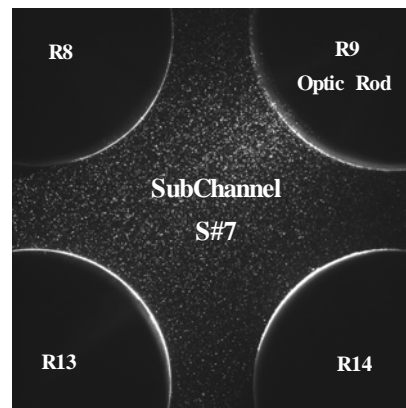


Fig. 3 Typical particle image(no.1 subchannel at 6D_h apart from spacer grid)

좀 더 상세한 계측을 위해 회전이 가능한 Optic Rod를 45°씩 회전하여 측정영역을 8등분할(4개의 부수로와 4개의 봉간)하여 측정하였다.

카메라의 해상도는 1008 × 1016 pixels로써 한 pixel의 크기는 9 μ m이다. 실제 측정영역과 CCD 센서의 길이 축적비는 4.13으로 한 pixel에 해당하는 물리적 길이는 37.17 μ m이다. 횡유동의 경우, 지지격자로 부터의 거리가 멀어질수록 속도가 작아지므로 계산상의 오차를 최소화 하기위해서 최대 입자의 이동거리가 조사영역의 1/4이 되도록 두 빔의 시간간격을 100 μ s에서 400 μ s까지 조절하였다.

획득된 입자영상에 상호상관알고리즘 (Cross-Correlation)을 적용하여 속도장을 얻으며, 50%의 중첩 영역을 갖는 32 by 32 pixels 크기의 조사영역이 전 영역에 걸쳐 계산되고, 한 측정영상에서 62 × 62의 속도 벡터가 추출된다. 이와 같은 과정으로 얻어진 속도장은 입자영역에서 발생하는 오류벡터 뿐만 아니라 봉의 음영부분과 봉의 표면에서의 산란으로 인한 오류벡터를 같이 포함하고 있어 후처리를 통해 오류벡터 제거 과정을 거친다. 또한 한 영역에서 대략 100여장의 입자 영상을 획득하여 평균하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 부수로 속도분포와 와도

분리형과 와류형의 부수로 속도분포에 대한 결과를 살펴보면, Fig. 4는 지지격자 선단에서부터 하류 축방향 거리가 1, 4D_h인 경우의 속도 분포를 보여주고 있다. 먼저, 분리형 혼합날개에 대한 일관된 경향을 살펴보면, 유동이 부러진 날개의 면을(S3, S8: 상·하, S4, S7: 좌·우) 따라서 흐름을 알 수 있다. 즉, 부수로 S3과 S8에서는 좌에서 상으로, 우에서 하로의 횡방향 유동이, S4과 S7에서는 상에서 좌로, 하에서 우로의 횡방향 유동이 지배적이다. 이는 부수로 간에 활발한 횡단유동을 발생시키기 위해 설계된 분리형 혼합날개의 특징을 보여주고 있다. 또한, 각 부수로 내에서 날개의 영향을 받지 않는 분면(S3, S8: #1, #3상한, S4, S7: #2, #4상한)에 강한 회전유동이 발생하고 있음을 알 수 있다. 이는 날개에 의한 주 횡방향 유동이 서로 교차하면서 날개의 영향을 받지 않는 분면의 일부 유동을 끌어가면서 봉의

표면과의 상호 작용으로 발생하는 회전유동이다. 하지만, 수력반경이 4D_h인 경우와 같이 지지격자에서 멀어질수록 회전유동의 발달이 감소면서 회전유동의 중심이 봉의 표면으로 밀려나고, 봉 표면에서 전단력의 영향으로 인하여 이러한 회전유동은 빨리 소멸하는 것으로 나타났다.

와류형 혼합날개에 대한 1D_h와 4D_h에서의 유동 패턴이 Fig. 5에 나타났다. 분리형의 경우와는 달리 부수로 내에 타원형태의 회전유동이 발달하고 있음을 확인할 수 있다. 주유동의 방향이 와류형의 주날개가 구부러진 방향을 따라 흐르는 경향은 분리형의 경향과 일치하나 회전유동을 유발하기 위한 주날개와 보조날개의 굽힘선의 영향과, 분리형과는 달리 보조날개가 주유동을 끌어당김으로써 두 보조날개 방향으로 길게 늘어진 하나의 큰 회전유동을 유발함을 확인할 수 있다. 또

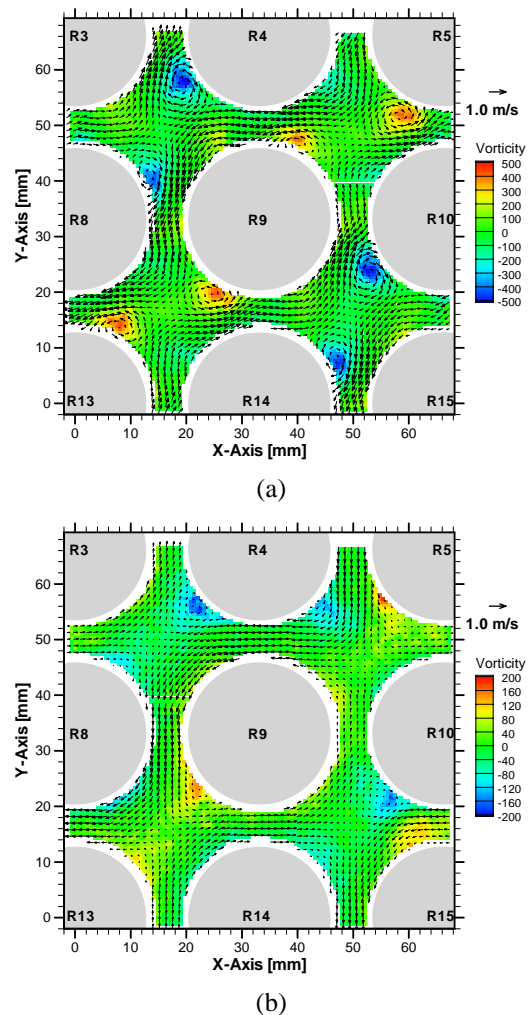


Fig. 4 Velocity profile and vorticity of the split vane; (a) 1D_h and (b) 4D_h

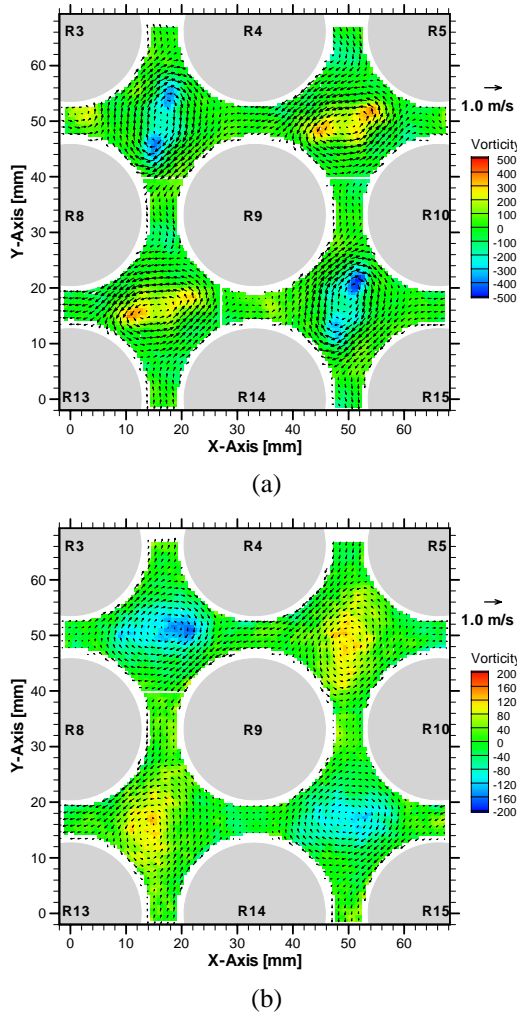


Fig. 5 Velocity profile and vorticity of the swirl vane; (a) $1D_h$ and (b) $4D_h$

한, Fig. 2에서와 같이 한 부수로 내의 주날개 굽힘각이 이웃하는 부수로의 보조날개와 반대방향의 굽힘각을 가지고 있음으로 분리형의 경우와는 달리, 부수로 간의 횡단유동을 상쇄시키는 역할을 하는 것으로 판단된다.

또한, 각 부수로 내의 보조날개 영역에 존재하던 상대적으로 큰 와도가 지지격자로부터 멀어지면서 서로 가까워지는 것을 확인 할 수 있었다. 이와 같은 형상은 지지격자에서 멀어질수록 혼합날개의 영향이 줄어들어, 상대적으로 한 부수로를 둘러싸고 있는 봉들의 전단력과 미약한 부수로 간의 횡단류동이 상대적으로 약하기 때문인 것으로 판단된다.

벽면과 동일한 거리에 위치한 부수로 S7에서 분리형과 와류형의 속도벡터의 크기를 Fig. 6에 나타내었다. 두 경우 모두, 부수로 중심에서 상대

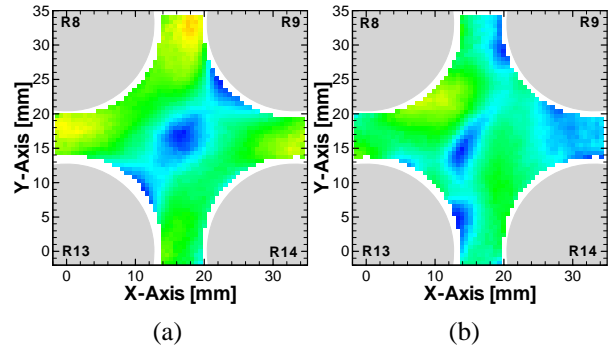


Fig. 6 Contour map of velocity magnitude at $3D_h$; (a) Split vane and (b) Swirl vane

적으로 낮은 횡류속도를 보이던 주 날개가 존재하는 #2와 #4에서에서 큰 속도를 보임을 확인 할 수 있으며, 봉간 영역에서는 와류형 날개의 경우가 분리형에 비해서 낮은 속도 크기를 보였다. 이러한 패턴은 축방향의 모든 결과에서 유지되는 것으로 측정되었다.

3.2 봉간 횡단유동

Fig. 7과 Fig. 8은 측정영역에 존재하는 12개의 부수로간 횡단류에서 봉간을 연결하는 선분에 수직한 속도 성분(u_{cf}, v_{cf})의 평균

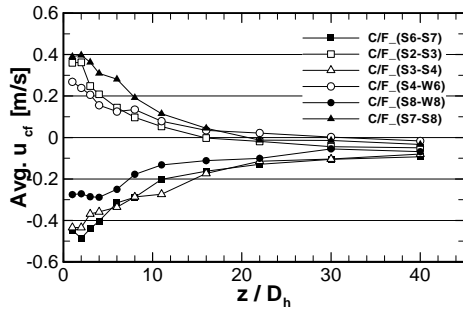
$$(Avg. u_{cf} = \int_0^L u \, dx / L) \text{을 보여주고 있다. 분리형}$$

의 경우가 와류형에 비해 상대적으로 큰 횡단류를 보이고 있으며, 지지격자 직후($2\sim 3D_h$)에서 최대를 보이다가 멀어질수록 $40D_h$ 까지 계속 감소하는 것을 확인할 수 있다. 부수로간 횡단류의 크기는 최대를 보이는 $2\sim 3D_h$ 에서 분리형과 와류형 각각에 대하여 축방향 속도($W_{bulk}=1.45\text{m/s}$)의 30, 15%정도인 것으로 측정되었다.

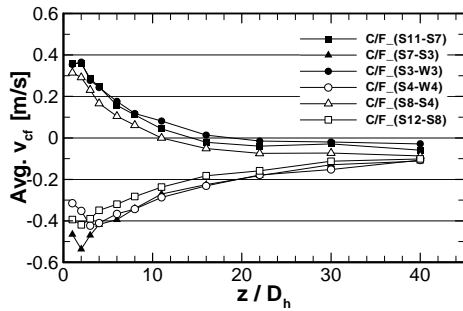
상대적으로 큰 횡단류의 크기를 갖는 분리형의 경우 $40D_h$ 까지 진행하면서 크기의 감소가 계속되는 반면, 와류형의 경우 대략 $10D_h$ 에서 $20D_h$ 사이에서 감소가 완료되는 것을 확인할 수 있다. 결과적으로, 와류형의 경우 보다 분리형의 경우가 부수로간 횡단류에 미치는 영향이 멀리까지 유지된다고 할 수 있다.

4. 결론

원자로 내의 노심 핵연료 집합와 냉각수의 열 전달을 증진시키기 위하여 지지격자에 장착되는 혼합날개가 부수로 내에서 혹은 부수로 간의 유

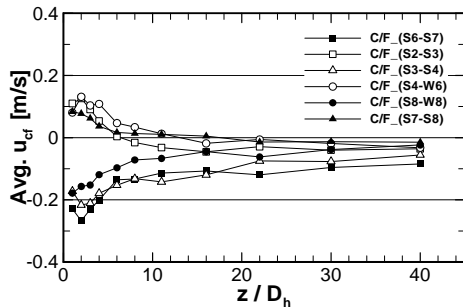


(a)

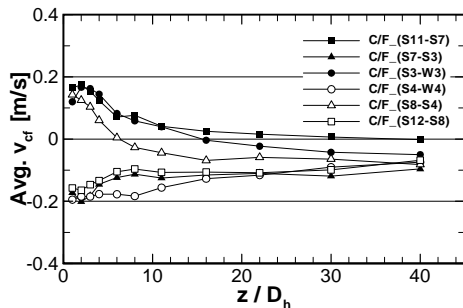


(b)

Fig. 7 Velocity magnitudes of cross flow between subchannels for the Split vane; (a) $Avg. u_{cf}$ and (b) $Avg. v_{cf}$



(a)



(b)

Fig. 8 Velocity magnitudes of cross flow between subchannels for the Swirl vane; (a) $Avg. u_{cf}$ and (b) $Avg. v_{cf}$

동에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 이해는 중요한 의미를 갖는다. 이를 위해서, 핵연료 집합체를 모의한 5×5 봉다발에서 분리형과 와류형의 두 가지 혼합날개를 장착한 지지격자를 대상으로 봉다발내의 4개의 부수로를 포함하는 영역에 대해 PIV 기법을 이용한 유동장 측정이 이루어졌다.

측정 결과, 분리형과 와류형 모두 주 혼합날개를 따르는 주 유동을 유발하는 전형적인 유동 패턴을 보였다. 하지만, 분리형의 경우 와류형에 비해서 큰 부수로 간의 횡단류를 유도하며, 빠른 2차 유동의 소멸을 보였다. 와류형의 분리형에 비해 상대적으로 낮은 횡단류를 보이지만 하류방향 먼 곳까지 부수로 내의 큰 2차 회전유동을 유지하는 것으로 나타났다. 횡단류의 크기는 분리형의 경우 측방향 평균속도의 30%, 와류형은 15% 정도로 와류형이 분리형의 절반정도의 부수로간 횡단류의 크기를 보였다.

후 기

본 연구는 과학기술부 원자력 중장기 연구개발 사업의 일환으로 이루어졌으며 이에 대하여 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Yang, S. K., Chung, M. K., 1998, "Turbulent Flow Through Spacer Grids in Rod Bundles," *ASME J. Fluids Eng.*, Vol. 120, pp. 786~791.
- (2) McClusky, H. L., Holloway, M. V., Conover, T. A., Beasley, D. E., Conner, M. E. and Smith III, L. D., 2003, "Mapping of the Lateral Flow Field in Typical Subchannels of a Support Grid With Vanes," *ASME J. Fluids Eng.*, Vol. 125, pp. 987~996.
- (3) Chang, S. K., 2006, "Experimental Study on the Turbulent Mixing in a Rod Bundle Array with Vaned Spacer Grid," Ph.D. Thesis, Korea Univ.
- (4) Ikeda, K. and Hoshi, M., 2007, "Flow Characteristics in Spacer Grids Measured by Rod-embedded Fiber Laser Doppler Velocimetry," *J. Nucl. Sci. Tech.*, Vol. 44, No. 2, pp. 194~200.
- (5) Rowe, D. S., 1973, "Measurement of Turbulent Velocity, Intensity and Scale in Rod Bundle Flow Channels," Ph.D. Thesis, Oregon State Univ.