

## 원자로 연료봉내 대형 와류동에 의한 원자로 냉각제 시스템의 난류 증진

전 건 호\*, 박 종 석\*\*, 최 영 돈†

\*고려대학교 기계공학과 대학원, \*\*원자력안전기술원, † 고려대학교 기계공학과

### Turbulent Enhancement of the Cooling System of Nuclear Reactor by Large Scale Vortex Generation in a Nuclear Fuel Bundles

Kun Ho Chun\*, Jong Seuk Park\*\*, Young Don Choi†

\*† Department of Mechanical Engineering, Korea University, Sungbukku, Seoul, 136-701, Korea

\*\*Korea Institute of Nuclear Safety Yusungku, Taejun, 305-338, Korea

(Received July 13, 2000 ; revision received September 29, 2000)

**ABSTRACT:** Experimental and computational studies were carried out to confirm the turbulent enhancement of the cooling system of nuclear reactor by large scale vortex generation in nuclear fuel bundle. The large scale vortex motions were generated by rearranging the inclination angles of mixing vanes to the coordinate directions. Axial development of mean and turbulent velocities in the subchannels were measured by the 2-color LDV system. Eddy diffusivity heat flux model and  $k-\epsilon$  model were employed to analyze the turbulent heat and fluid flows in the subchannel. The turbulence generated by split mixing vanes has small length scales so that they maintain only about  $10 D_H$  after the spacer grid. On the other hand, the turbulences generated by the large scale vortex continue more and remain up to  $25 D_H$  after the spacer grid.

**Key words:** Mixing vane(혼합날개), Spacer grid(지지격자), Rod bundle(연료봉 다발), Large scale secondary vortex flow(대형 와류동)

#### 기 호 설 명

$C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}$  :  $\epsilon$  방정식의 모형계수

$D$  : 연료봉의 지름 [m]

$\sqrt{g}$  : 자코비안

$\sqrt{g^{mm}}$  : 반변속도 메트릭스 텐서

$k$  : 난류운동에너지 [ $m^2/s^2$ ]

$P_k$  : 난류운동에너지 생성률 [ $m^2/s^3$ ]

$q$  : 열유량 [ $W/m^2$ ]

$T$  : 온도 [ $^{\circ}C$ ]

$U, V, W$  : 직교속도성분(x, y, z) [m/s]

$U^{\epsilon}$  : 물리적 반변속도성분 [m/s]

$x, y, z$  : 직교좌표계 [m]

$\frac{u_i u_j}{u_i \theta}$  : 레이놀즈응력 [(m/s) $^2$ ]

$\frac{u_i \theta}{u_i \theta}$  : 난류열유속 [(m/s) $^{\circ}C$ ]

† Corresponding author

Tel: 82-2-3290-3355; fax: +82-2-926-9290

E-mail address: ydchoi@kuccnx.korea.ac.kr

그리스 문자

$\alpha$  : 혼합날개의 각도

- $\sigma_k, \sigma_\epsilon$  :  $k, \epsilon$  방정식의 확산계수
- $\epsilon$  : 난류운동에너지 소멸률 [ $m^2/s^3$ ]
- $\xi^m$  : 일반곡률 좌표계

## 1. 서 론

핵연료 부수로 내에서 연료봉(rod bundle)과 냉각제 사이에 열전달을 효율적으로 증가시키는 기술은 원자로 설계에 있어서 중요한 과제 중의 하나이다. 기존의 부수로에서는 냉각제의 난류 열효율을 향상시킬 목적으로 연료봉의 지지격자(spacer grid)에 혼합날개(mixing vane)을 부착하여 부수로 간극을 중심으로 한 국부 와유동(local vortex flow)을 발생시켜 열전달 및 열혼합을 증진시키는 방법을 사용하고 있다.

이에 대한 연구들을 살펴보면 Rehme<sup>(1)</sup>은 여러 가지 형태의 지지격자에 대한 압력강하를 측정하여 지지격자에 관련된 압력강하 특성 관계식을 제시하였다. 또한 Rehme and Trippe<sup>(2)</sup>는 지지격자가 있을 때 피토폴(Pitot tube)을 이용하여 속도분포를 측정하여 지지격자로 인한 질량유량 계분포 현상에 대한 연구를 수행하였다. Rowe and Chapman<sup>(3)</sup>은 지지격자의 상·하류에서 난류구조를 LDV로 측정하여 지지격자가 난류에 미치는 영향을 연구하였다. Shen et al.<sup>(4)</sup>은 LDV를 사용하여 혼합날개가 있는 지지격자를 포함한 봉다발 부수로에서 횡류속도 및 난류강도를 측정하여 난류 혼합률이 혼합날개의 각도에 크게 좌우됨을 관찰하였다. Gu et al.<sup>(5)</sup>은 다양한 혼합날개를 적용한 경우 FLOW3D 코드를 이용하여 선회 유동 특성을 조사하였다. 그리고 최근 Yang and Chung<sup>(6)</sup>은 지지격자가 있는 5×5, 6×6 핵연료 봉다발 부수로에서 LDV로 측정항 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.

따라서 본 연구는 우선 기존의 실험자료들을 근간으로 지지격자와 혼합날개의 형상 변화를 통하여 유동 특성을 조사하였다. 기존 혼합날개의 단점을 보완할 수 있는 새로운 혼합날개를 설계하여 해석적 연구와 실험적 연구를 통하여 split

혼합날개와 본 연구 과정에서 설계한 LSS 혼합날개를 적용한 경우의 주유동 속도, 2차유동 속도, 난류강도 등을 비교 분석함으로써 혼합날개의 새로운 형상을 설계하는 데 있다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

실험장치는 Fig. 1에서와 같이 저장탱크, 펌프, 냉각기, 유량제어밸브, 유량계, 그리고 연료봉이 있는 측정부로 구성되며 순환 시스템으로 작동한다. 측정부는 36개의 연료봉, 외각틀, 혼합날개가 부착된 3개의 지지격자가 일정한 간격으로 연료봉을 지지하고 있으며 지지격자의 유동 방향으로의 높이는 20 mm이며 단면은 80×80 mm로 되어 있다.

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

### 2.2 실험방법

본 연구에서는 LSS 혼합날개에 대하여 실험하

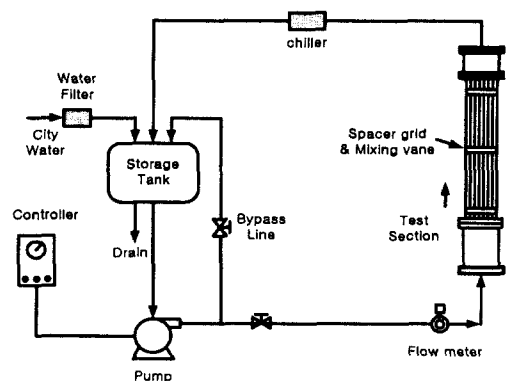
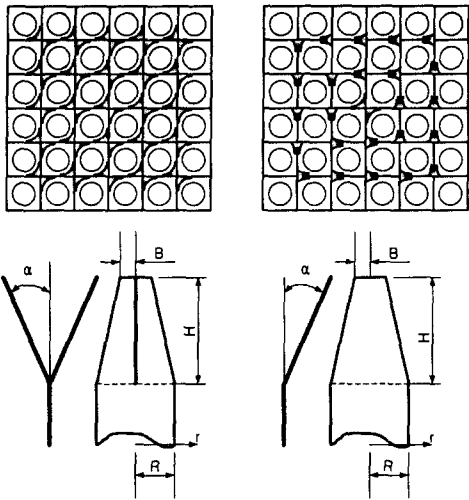


Fig. 1 Test loop and section for the cooling system of nuclear reactor.



(a) Split mixing vane (b) LSS mixing vane

B(mm)	H(mm)	R(mm)	$\alpha$ ( $^{\circ}$ )
1.5	10.0	3.0	25

Fig. 2 Shape and direction of 6x6 rod bundles, spacer grid and mixing vanes.

였으며 Yang and Chung<sup>(6)</sup>이 split 혼합날개에 대하여 조사한 자료와 비교하기로 하였다. Fig. 3은 LDV로 측정할 측정점을 나타낸 것이다. P1~P7의 점선은 단면에 대한 주유동 속도를 측정하기 위한 선으로 외각틀의 벽면으로부터  $\Delta z = 0.045 D_H$  등간격으로 증가시켜 중앙선까지 측정하였다. B1~B7의 국부점은 주유동 방향으로 혼합날개 이후  $\Delta x = 0.5 D_H$  증가시켜  $32 D_H$ 까지 각 점에

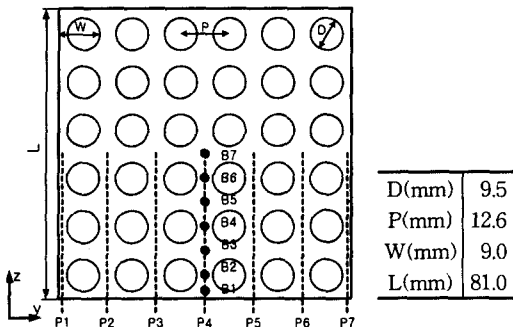


Fig. 3 Cross-section of 6x6 rod bundle and measurement points and dimension.

대하여 측정하였다. 유동 방향을 따라 주유동 속도, 2차유동, 난류강도 등을 측정하였다.

속도 측정장치로서 Dantec의 LDV를 사용하였으며 초점거리가 400 mm인 렌즈를 사용하였다. 유체가 물인 경우 일반적으로 산란입자를 별도로 추가하지 않아도 산란광을 얻을 수 있으나 본 실험에서는 직경이  $1.5 \mu m$ , 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.

### 3. 해석적 연구

#### 3.1 지배방정식

일반곡률 좌표계로 표시된 핵연료 봉다발 부수로 내 비압축성 난류유동에 대한 연속방정식, 운동량방정식 그리고 에너지방정식은 다음과 같다.

#### 연속방정식

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial \xi^m} (\rho \sqrt{g} \sqrt{g^{mm}} U^{\xi^m}) = 0 \quad (1)$$

$$U^{\xi^m} = \frac{1}{\sqrt{g^{mm}}} \left( \frac{\partial \xi^m}{\partial x} U + \frac{\partial \xi^m}{\partial y} V + \frac{\partial \xi^m}{\partial z} W \right)$$

여기서,  $\sqrt{g}$ 는 자코비안,  $g^{mm}$ 은 반변 메트릭 텐서 그리고  $U^{\xi^m}$ 는 물리적 반변속도이다.

#### 운동량방정식

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial \xi^m} (\sqrt{g} \sqrt{g^{mm}} \rho U^{\xi^m} U^i) = - \frac{\partial \xi^m}{\partial x^i} \frac{\partial P}{\partial \xi^m} + \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial \xi^m} (\mu \sqrt{g} g^{mm} \frac{\partial U^i}{\partial \xi^m}) \quad (2)$$

#### 에너지 방정식

$$\frac{\partial}{\partial \xi^m} (\sqrt{g} \sqrt{g^{mm}} \rho U^{\xi^m} T) = - \frac{\partial}{\partial \xi^m} \left\{ \sqrt{g} g^{mm} \left( \frac{\mu}{\sigma} + \frac{\mu_i}{\sigma_i} \right) \frac{\partial T}{\partial \xi^m} \right\} \quad (3)$$

Table 1 Turbulent model coefficients

$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	$\sigma_k$	$\sigma_\epsilon$	$C_\mu$
1.44	1.92	1.0	1.3	0.09

난류유동의 평균속도와 평균온도를 구하기 위하여 난류 요동속도 상관관계인 레이놀즈응력 모형과 난류 열유속 모형은 Boussinesq의 와점성계수 모형과 와확산계수 모형을 사용하였다.

난류운동에너지 방정식

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial \xi^i} (\rho \sqrt{g} \widehat{U}^i k) = \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial \xi^i} \left\{ \sqrt{g} g^{ij} \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial \xi^j} \right\} + P_k - \rho \epsilon \quad (4)$$

난류운동에너지 소멸률 방정식

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial \xi^i} (\rho \sqrt{g} \widehat{U}^i \epsilon) = \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial \xi^i} \left\{ \sqrt{g} g^{ij} \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial \xi^j} \right\} + C_{\epsilon 1} \rho P_k \frac{\epsilon}{k} - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

여기서 난류모형은 표준  $k-\epsilon$  모형을 사용하였으며 난류모형 계수는 Table 1과 같다.

3.2 수치해석

원자로 냉각제 내 연료봉으로 인하여 곡률이 심한 형상의 경계를 갖는 문제에 있어서 좌표계를 경계에 접합시켜 수치해의 정확성을 개선할 수 있도록 경계적응좌표계(body fitted coordinate system)를 사용하였다. 격자계는 스칼라 변수가 미소점사체적의 중앙에 위치하고 속도성분들은 검사체적면 상에 위치하는 엇갈림격자계를 사용하였다. 또한 곡률이 심한 비직교좌표계에서 운동량방정식의 종속변수로서 직교속도 성분을 사용하는 경우에 대류항 계산시 포함되는 보간 오차를 줄이고 곡률에 대한 유연성을 향상시키기 위하여 운동량방정식의 종속변수로 반변속도 성

분을 사용하였다. 제어체계에 대하여 유한체적법으로 이산화하였고, 압력은 SIMPLE 알고리즘으로 계산하였으며, 하이브리드 도식을 사용하였다.

3.3 격자 생성과 경계 조건

시험부는 지지격자, 혼합날개, 외각틀(housing) 그리고 36개의 봉다발로 구성된다. 지지격자는 간단한 평판격자를 사용하고 혼합날개에 의한 와류동은 해석이 어려워 혼합날개를 입구로부터 하류  $2D_H$  지점에 식(6)과 같이 모형화하여 적용하였으며, 36개의 봉다발은 대칭 경계조건을 적용하여 9개의 봉다발을 계산영역으로 하였다. 그리고 지지격자 간의 간격이  $50.2D_H$ 이나 난류유동이  $35D_H$  근방에서 완전 발달됨으로 지지격자로부터  $40D_H$ 까지 계산 영역으로 하였다. 격자수는 단면에 대하여  $72 \times 72$ 개의 격자를 적용하였으며 주유동 방향으로 25개의 비균일 격자를 생성하였다. 원자로 핵연료 봉다발의 제원과 유동조건은 Table 2와 같다. 혼합날개에 의해서 발생하는 와류동을 다음과 같이 모형화하였다.

$$V(W) = \frac{U \tan \alpha \cdot v(z)}{B}, \quad r < B \quad (6)$$

$$V(W) = \frac{U \tan \alpha \cdot v(z) B}{r^2}, \quad r \geq B$$

여기서  $r = \sqrt{(y-a)^2 + (z-b)^2}$ 이며 U는 주유동 속도이며 V, W는 각각 y, z 방향으로의 2차유동이다. 그리고  $\alpha$ 는 주유동 방향에 대한 혼합날개 각도이며  $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ 에 대하여 조사하였다. R, B는 각각 혼합날개의 아래 부분과 윗 부분의 길이이며 H는 혼합날개의 높이를 나타낸다. a, b는 지지격자가 만나는 곳 즉, 혼합날개의 중심점이다.

Table 2 Dimension of nuclear reactor coolant

Geometric Parameter	Dimension
Rod Diameter (mm)	9.5
Rod Pitch (mm)	12.6
S/G Pitch (mm)	600
Hydraulic diameter (mm)	11.468
Reynolds Number (Re)	10,000
Area of housing (mm)	$81 \times 81$
Heat Flux ( $\text{kW/m}^2$ )	30

입·출구 경계조건으로 주기조건을 적용하였다. 주기적으로 거동하지 않는 압력과 온도에 대하여 Patankar et al.<sup>(9)</sup>이 제시한  $P = -\beta x + P_R$  와  $T = \gamma x + T_R$ 을 적용하였다. 여기서  $\beta$ 와  $\gamma$ 는 평균압력구배와 평균온도구배이며  $P_R$ 와  $T_R$ 은 주기적 압력과 온도를 나타낸다. 외각들의 벽면에서는 점착(no-slip)조건을 온도에 대하여 단열 조건을 적용하였다. 연료봉에 대하여 속도는 점착 조건을 벽면에는 일정 열유량 조건을 가정하였다. Fig. 3에서와 같이 6×6 봉다발은 3×3 봉다발 단위 대칭 구조로 되어 있으므로 대칭면에 대해서 대칭조건을 적용하였다. 그러나 2차유동에 대하여 혼합날개의 형상으로 인하여 수정된 대칭 경계조건을 적용하였다. 즉 Fig. 3에서 좌측-하단의 3×3 연료봉을 전산해석 영역으로 하였으므로 상단 경계조건은  $W(z) = -V(y)$ 와  $V(y) = W(z)$ 으로 처리하였으며 우측 경계조건은  $W(z) = V(y)$ 와  $V(y) = -W(z)$ 로 처리하였다.

4. 결과 및 고찰

연료봉과 냉각제 사이에 열전달을 향상시키는 방법으로 지지격자 또는 혼합날개의 형상 변화가 일반적으로 사용되었다. 기본적으로 지지격자의 설치 목적은 연료봉 다발을 일정한 간격으로 지

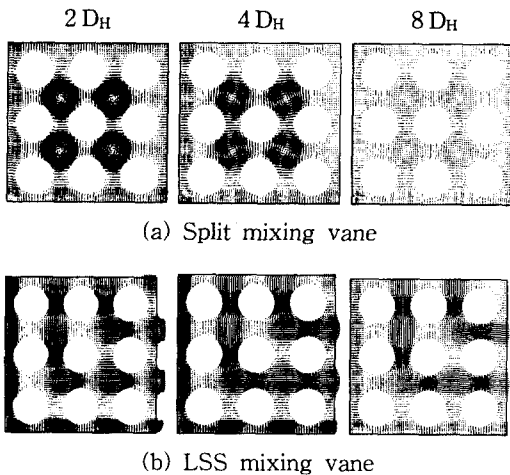


Fig. 5 Development of secondary velocity along the streamwise direction for two different mixing vanes.

지하여 연료봉 다발에 지지격자를 설치하므로 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 연속적인 생성, 부수로 간 횡류혼합을 증가시켜 전체 부수로 내 열전달계수의 증가가 기대된다.

Fig. 5는 split 혼합날개와 LSS 혼합날개에 대한 전산해석 결과로서 지지격자를 지나 2차유동이 소멸되는 과정을 단면속도 벡터로 나타낸 것이다. Split 혼합날개의 경우 부수로 내에서 연료봉 크기의 차원을 갖는 와를 생성하고 있으며,

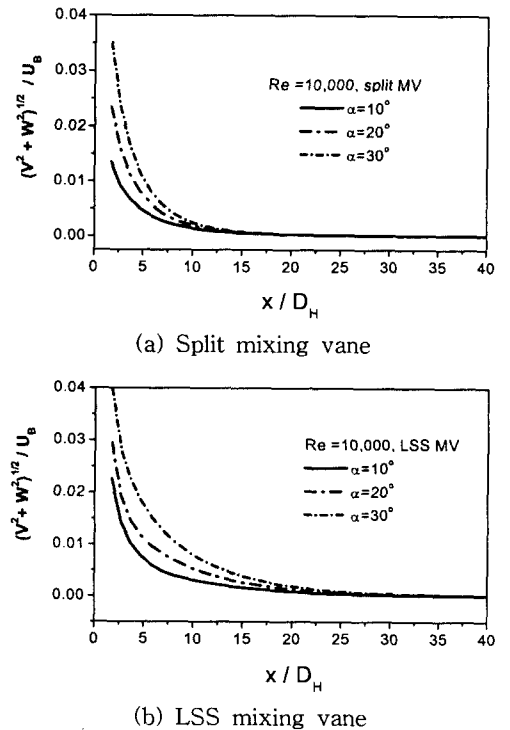


Fig. 6 Variation of cross-sectional averaged secondary flow intensity for the inclination angle of mixing vane.

LSS 혼합날개의 경우는 연료봉과 연료봉 사이를 냉각제가 대형 와유동을 형성하고 있다는 것을 알 수 있다. Split 혼합날개의 경우 부수로 내에 서만 강한 와가 발생하여 부수로 간 유동혼합이 거의 발생하지 못하고 있다. 그러나 LSS 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 10,000인 경우 2차유동 강도를 유동 방향에 대하여 단면 평균한 값과 혼합날개의 각도 변화에 따른 2차유동의 소멸 정도를 나타낸 것이 Fig. 6이다. Split 혼합날개인 경우 혼합날개의 각도에 상관없이 12  $D_H$  부근에서 변화가 없는 것을 알 수 있으며 선 회 유동이 큰 경우 2차유동 소멸이 크다. LSS

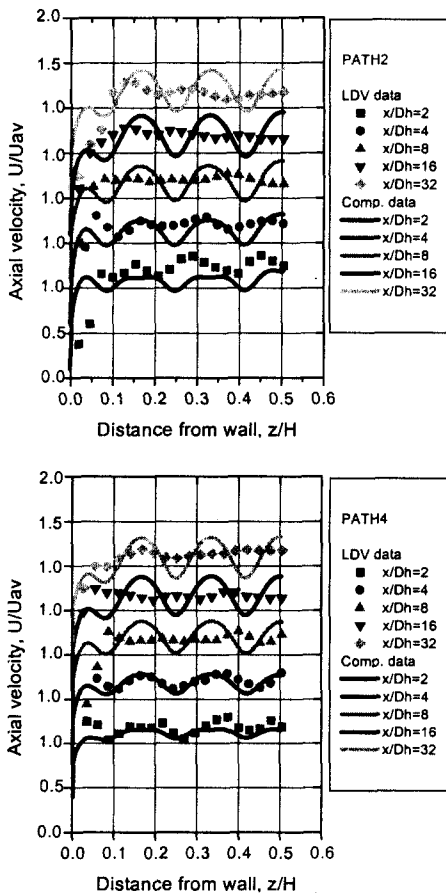
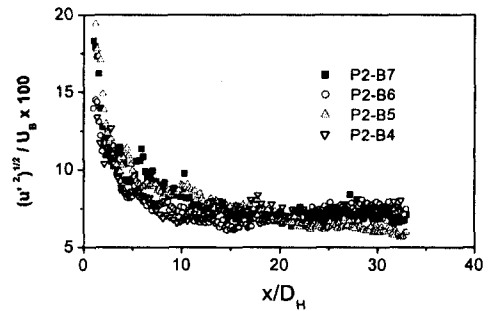


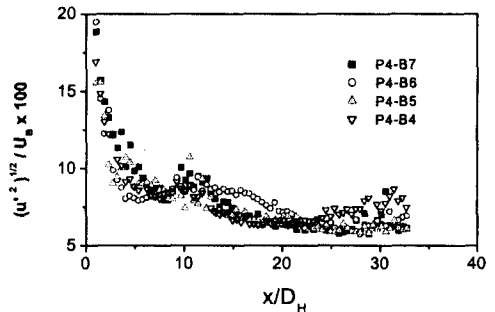
Fig. 7 Developed streamwise velocity.

혼합날개인 경우 20  $D_H$  이상까지 2차유동이 지속되며 혼합날개의 각도의 변화가 클수록 2차유동 강도 역시 완만하게 소멸되고 있다.

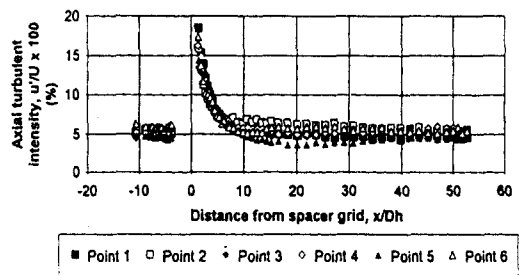
Fig. 7은 유동 방향에 대하여 Fig. 4와 같은 위치에서 path 2와 path 4에 대하여 LSS 혼합날개에 대하여 전산해석 결과와 실험 결과를 비교한 것이다. LSS 혼합날개가 대형 와유동을 일으키는 path 2에서 유동 경향을 살펴보면 2  $D_H$ , 4  $D_H$ 에서는 LDV 측정값과 전산해석 결과와는 달리 완전 발달된 유동 형상을 가지지 못하고 있다.



(a) LSS mixing vane ( $Re=10,000$ ); path 2



(b) LSS mixing vane ( $Re=10,000$ ); path 4



(c) Split mixing vane ( $Re=50,000$ )<sup>(6)</sup>

Fig. 8 Distribution of axial turbulent intensity.

측정에 의한 이와 같은 결과는 벽면에서의 난류 성분과 대형 와유동에 의한 강한 혼합작용으로 보여진다. 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 실험측정 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 비하여 좋지 못한 결과를 준다고 알려져 있다.

Fig. 8(a)(b)는 LSS 혼합날개에 대하여 LDV에 의해 측정된 난류강도의 변화를 각 측정점에서 유동 방향으로 나타낸 것이며, Fig. 8(c)는 Yang and Chung이 split 혼합날개에 대하여 LDV로 측정한 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  $10 D_H$  근방에서 난류강도가 일시적으로 증가하여 감소하는데 이것은 냉각제가 연료봉과 연료봉 사이를 지나면서 압력 변화로 부수로 내 작은 와의 생성으로부터 기인하는 것으로 보여진다. 기존의 많은 연구<sup>(4,5,6)</sup>에서 split 혼합날개를 사용한 경우 지지격자 이후 급격한 난류 감쇄현상으로 열전달 향상이 단거리에서 제한된다고 하였다. 그러나 LSS 혼합날개를 사용한 경우 난류의 강도가  $20 D_H$ 까지 지속적으로 서서히 감소하고 있으며 path 4에서는 모든 점에서 난류 감쇄현상이 없어져 2차유동의 지속성과 같은 거리에서 소멸되었다.

## 5. 결 론

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

(1) LSS 혼합날개와 split 혼합날개에 대하여

전산해석을 수행한 결과 2차유동이 LSS 혼합날개인 경우는  $20 \sim 25 D_H$ , split 혼합날개의 경우는  $10 \sim 13 D_H$ 까지 지속되어 기존의 실험 결과와 일치하였다.

(2) 혼합날개의 각도에 대한 전산해석 결과에서 난류증진 효과는 split 혼합날개 대하여 LSS 혼합날개가 날개 각도에 더 민감하였으며, LSS 혼합날개의 경우  $\alpha = 20^\circ, 30^\circ$ 에서 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

(3) LDV 측정에서 난류강도는 split에 대하여 LSS 혼합날개가 지속성은 증가하였으며 감쇄현상은 감소하였다.

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

## 후 기

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초 전력공동연구소 주관으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다(관리번호 : 98-013).

## 참고문헌

1. Rehme, K., 1973, Nucl. Technol, Vol. 17, pp. 15-23.
2. Rehme, K. and Trippe, G., 1980, 1973, Nucl. Engrg. and Des., Vol. 62, pp. 349-359.
3. Rowe, D. S., Johnson, B. M. and Knudsen, J. G., 1974, Int. J. Heat Transfer, Vol. 17, pp. 407-419.
4. Gu, C. Y., Ji, Wei, Karoutas, Z. and Scholin, B., 3D flow Analyses for Design of Nuclear Fuel Spacer.
5. Shen, Y. F., Cao, Z. D. and Lu, Q. G., 1991, Nucl. Engrg. and Des., Vol. 125, pp. 111-119.
6. Yang, S. K. and Chung, M. K., 1995, 6th Int. Conf. on Laser Anemometry Advances and Applications, South Carolina, USA.
7. Launder, B. E. and Spalding, D. B., 1974 Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 3, p. 269.