2001 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

복합유동 날개 지지격자를 가진 봉다발에서의 유동 구조 측정

Measurement of Flow Structure in Rod Bundle with Hybrid Spacer Grid

오동석, 인왕기, 전태현

한국원자력연구소
대전광역시 유성우체국 사서함 105 호

요약

복합유동 날개 지지격자가 설치된 봉다발 부수로 내의 유동 구조를 피톳 튜브와 열선풍속계를 이용하여 측정하고 평가하였다. 시험 봉다발은 3 X 3 배열이며 봉 직경은 75mm 이고 봉 직경과 봉 간 거리 비(P/D)는 1.33 이다. 시험조건은 Reynolds 수 1.2 X 10^5 이며 지지격자 하류의 중앙수로를 따라 국부 평균 속도 성분과 난류강도 성분을 축방향을 따라 측정하였다. 측정된 3 차원 국부 평균 속도분포로부터 복합유동 날개로 인한 강한 회전 유동과 교차류가 관찰되었다. 지지격자 하류의 $x/D_h = 2$ 지점에서는 주 회전 유동이 봉 벽면 근처로 이동되고 이 후에 주 회전 유동과 봉 벽면의 충돌이 관찰되었다. 난류강도는 중앙 수로에서 가장 크게 나타났으며 간극과 봉 표면 쪽으로 갈수록 그 크기는 감소하였다. 수로 중앙에서 축방향 난류 강도의 크기는 기존 분리형 날개의 실험 결과와 유사하게 나타났다.

Abstract

An experimental investigation of the flow structures in rod bundles with the air test model for the hybrid spacer grid has been performed. Three dimensional velocity distributions and turbulent intensities in central subchannel are measured at the Reynolds number of 1.2 X 10^5 by using pitot tube and hot wire anemometry. The rods were arranged in a square array with a pitch to diameter ration of 1.33. The flow downstream in the central subchannel with hybrid spacer grid appears to be swirl flow, but in the rod gap regions cross flow is encountered. The main swirl flow is to impact on the rod surface after $x/D_h = 2$. The highest axial turbulent intensity, which is similar magnitude with the previous results for split vaned grid, is observed at center of subchannel and decreases as near to gap and rod.

1. 서론

봉다발 유동에서 지지격자 하류에 형성되는 유동 구조는 열적 성능에 직접적인 영향을 미친다. 열적성능 제고를 위한 한 방법은 지지격자에 의해 강한 난류를 발생시키는 것이며 다른 한 방법은 특정 성분의 유동을 발생시키는 것이다. 지지격자에 의해 발생한 강한 난류는 봉다발 내 냉각재 혼합을 증가시키고 부수로 내의 엔탈피 불균형을 완화시켜 봉 표면에서 냉각재 쪽으로 열전달을 촉진시킨다. 특정 성분의 유동은 봉다발 표면에서 국부적으로 발생하는 기포들을 봉 표면으로부터 이탈시키고 봉 표면으로 온도가 낮은 냉각재의 원활한 유입을 도움으로써 봉 표면에서의 열전달을 촉진시킨다. 이러한 목적으로 유동 혼합 장치가 지지격자 상부에 일체형으로 고안되었다. 유동혼합 장치는 형상의 특징에 따라 지지격자 후방 봉다발에서의 유동형태가 결정되므로 유동혼합장치의 형상을 결정하기 위해 개념적 설계, 최적화 과정 및 검증시험이 뒤따른다. 지금까지 고안된 유동혼합장치로는 Westinghouse 사의 분리형 날개[1], SPC 사의 덕트형 혼합장치[2], KAERI 의 회전유동 날개[3] 등을 들 수 있다. 분리형 날개는 부수로 내 냉각재를 이웃 수로로 보내는 강한 교차류와 수로 내의 약한 회전류를 발생시킴으로써 봉 다발 사이 혹은 내부에서 혼합을 증가시킨다. 덕트형 혼합장치는 부수로 간극에서의 냉각재를 부수로 가운데로 덕트를 통해 이동시킴으로써 냉각재 혼합을 증가시킨다. 회전유동 발생장치는 부수로 내의 강한 회전류를 발생시킴으로써 냉각재 혼합 및 열적 성능을 향상시킨다.

지금까지 혼합 장치 기하형상이 유동에 미치는 영향에 대한 실험적 연구는 Shen[4], Yang[5], Hejna[6], 및 Oh[7] 등에 의해 수행되었다. Shen[4]은 W/D=1.27 이며 P/D=1.375 인 사격형 봉 배열을 갖는 봉다발 내에 혼합날개 지지격자가 설치되어 있을 때 지지격자 후방에서의 유동 구조를 LDV(Laser Doppler Anemometry)를 사용하여 측정하고 부수로 간의 유체 혼합율은 날개의 각도에 의존하며 날개의 각도가 증가함에 따라 혼합율과 혼합율 감쇄가 동시에 커짐에 따라 혼합율과 축방향 혼합률 감쇄율 간의 최적화를 위한 날개 각도 조정이 요구된다고 보고하였다. Yang[5]은 W/D=1.35 이며 P/D=1.49 인 사격형 봉 배열을 갖는 봉다발 내에 혼합날개 지지격자가 설치되어 있을 때 지지격자 후방에서의 유동 구조를 LDV 를 사용하여 측정하고 유동 혼합율은 축 방향을 따라서 급격히 감소하고 10~15 D_h 에서 최소가 되는 것을 보였다. Hejna[6]는 3 종류 혼합날개가 부착된 지지격자 후방 부수로 내에 공기가 흘러갈 때 유동구조를 열선풍속계를 사용하여 측정하고 난류인자, 열적 혼합 인자와 혼합율 등을 평가하였다. Oh[7]등은 회전 날개가 부착된 지지격자 후방에서의 유동 구조를 열선풍속계를 이용하여 측정하고 기존 상용 코드의 결과와 비교하였다.

본 연구에서는 최근 KAERI 에서 개발 중인 복합유동 날개 지지격자 하류 부수로 내에서의 유동 특성을 알아보기 위해 지지격자 근처 하류를 따라 3 차원 속도 성분과 난류 강도 성분을 측정하고 기존 자료와 비교함으로써 봉다발 부수로 내 유동 특성을 평가하였다.

2. 실험장치

실험은 핵연료집합체 지지격자의 공기역학 모형이 설치된 풍동에서 수행되었다. 그림 1 은 시험에 사용된 복합유동 날개 지지격자의 공기역학 모형을 보여주고 있다. 복합유동 날개 지지격자는 날개 후방 부수로에서 회전류와 교차류를 동시에 발생시키도록 고안된 것이다[8]. 이 유동혼합 장치의 특징은 부수로 중앙에 회전류를 발생시키는 한 쌍의 날개와 교차류를 발생시키는 한 쌍의 날개가 대각선 방향으로 서로 마주보고있으며 격자판의 교차점을 중심으로 회전 대칭 형태로 존재한다. 날개의 방향은 이웃 근접 수로의 회전 방향과 반대 방향이 되도록 배열되었다. 지지격자는 3 X 3 배열이며 지지격자 격자판 피치 및 격자판의 높이는 각각 100 mm 와 275 mm 이다.

핵연료 시험 봉다발을 모사한 시험부는 그림 2 와 같다. 수로의 단면은 300 mm X 300 mm 이며 수로 내 설치된 봉은 직경이 75 mm 이고 길이가 2400 mm 인 아크릴 관에 의해 제작되었다. 봉의 직경 대 피치의 비는 1.33 이며 봉 배열은 사각형 형상이다. 시험부 입구에는 봉다발로 유입되는 유동분포를 균일화 시키는 격자 형태의 Straightener 가 존재하며 시험부 후방에는 봉다발 시험부의 축방향을 따라 이동 가능한 지지격자가 존재한다. 측정을 위해 3 차원 이송기구가 사용되었다. 이송기구는 Velmax 8300 으로 900 mm X 900 mm X 900 mm 까지 이송가능하며 이송 장치의 정밀도는 ±0.01 mm 이다. 이송 장치는 3 차원 유동을 측정을 위해 열선풍속계 탐침을 원격 이동시킨다. 난류분포를 측정하기 위해 사용된 열선풍속계는 TSI 사 시스템으로 TSI 100 열선풍속계, TSI 200 Digitizer 및 측정자료 처리를 위한 프로그램 DAP 로 구성되어있다. 열선풍속계를 통해서 나온 신호는 HP 54602B 오실로스코프를 통하여 주기적으로 관찰되었다. 축방향 속도분포를 측정하기 위해 사용된 피톳 튜브는 2.4 mm 외경의 스테인레스 튜브로 제작되었으며 정압 측정공은 방사형으로 4 개 위치하고있다. 측정을 위한 좌표계는 그림 3 과 같다. 측정 위치로 중앙 부수로가 선정되었다. 축방향 속도분포를 측정하기 위해 그림 3 (a) 좌표계가 사용되었다. 측정점은 부수로를 균일하게 나눈 244 개의 지점이다. 축방향 속도분포는 지지격자 후방 $x/D_h = 1, 2, 3, 4$ 및 5 지점에서 측정함으로써 지지격자 가까이서 유동이 발달됨에 따른 유동형태의 변화를 관찰하였다. 횡방향 속도 및 난류강도는 그림 3 (b) 좌표계의 위치에서 측정되었다. 좌표계는 4 개의 간극 방향, 2 개의 대각선 방향 및 2 개의 중앙선 방향을 포함한다. 횡방향 속도 및 난류 분포는 지지격자 후방 $x/D_h = 3$ 과 5 지점에서 측정하였다. 시험에서 Reynolds 수는 아래와 같이 정의되며 난류인자는 Reynolds 수가 120,000 일 때에 시험부 출구에서 측정되었다:

$$\mathrm{Re} = \frac{\overline{U} \cdot D_h}{n} \tag{1}$$

여기서 $\overline{U}$ 는 지지격자 없는 단면 전체의 평균 속도, D_h 는 수력직경 및 n 는 동점성계수이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 축 방향 평균 속도분포

지지격자 하류 중앙 부수로에서 Pitot Tube 로 측정한 축방향 국부 속도 U_{av}를 평균 속도 $\overline{U}$로 나누어 무차원화하고 이를 등속선형태로 그림 4에 나타내었다.

날개 바로 뒤인 $x/D_h = 0$ 지점에서 측정된 속도분포에서 고속 영역은 7 번과 8 번 중앙선 방향을 따라 존재하며 저속 영역은 5 번과 6 번 대각선 방향을 따라서 존재하는 것을 볼 수 있다. 분리형 날개가 존재하는 1, 3 사분면에서 저속 영역이 비교적 넓게 분포하며 회전 날개가 존재하는 2, 4 사분면에서는 1, 3 사분면에 비해 상대적으로 좁은 저속영역이 분포하고있어 속도분포가 유동혼합장치의 유로 폐쇄 위치 및 면적의 크기에 종속된다는 것을 보여주고 있다. 유동 형태는 수로 중앙에 대해 180 도 회전 대칭이다.

$x/D_h = 1$ 지점에서 측정된 유속분포에서 고속 영역은 7 번 중앙선 방향을 따라 존재하며 저속영역은 수로 중앙에서 5 번 대각선 방향을 따라 띠 형태로 길게 존재한다. 고속 및 저속 영역은 $x/D_h = 0$ 지점에서의 각각의 위치에서 약 45 도 반 시계 방향으로 회전한 것으로 유동 혼합장치에 의해 강한 회전 유동이 발생된 것을 확인할 수 있다.

$x/D_h = 2$ 지점에서 측정된 유속분포에서 고속 영역은 1 번과 3 번 간극과 봉 벽면을 따라 존재하며 저속영역은 5 번 대각선 방향에 존재한다. 저속 영역은 $x/D_h = 1$ 지점에서 저속영역 위치와 유사하나 저속영역의 형태는 띠 형태에서 반듯한 타원형으로 바뀌었다. 봉 벽면에서 고속 영역 존재하는 것은 $x/D_h = 1$ 지점에서 중앙 수로 방향을 따라 존재하던 고속 영역이 회전하며 봉 벽면쪽으로 이동한 것으로 이 이후에서 회전류와 봉과의 충돌이 예상된다.

$x/D_h = 3$ 지점에서 측정된 유속분포에서 저속영역은 8 번 중앙축 방향을 따라 타원형태의 존재하며 고속 영역은 5 번 대각선 방향과 7 번 중앙 수로 방향 사이에서 존재하는 것을 볼 수 있다. 저속 영역은 $x/D_h = 2$ 의 위치에서 45 도 반 시계 방향으로 회전하였으며 고속 영역은 주 유동이 봉 벽면과 충돌 후 복잡한 유동 형태로 재분포된 유동 분포를 보여주고있다. 간극에서는 저속 영역과 고속영역이 뚜렷이 구분되기 시작하며 간극에서 수로 중앙을 향해 간극의 왼쪽에 저속영역이 간극의 오른 쪽에 고속 영역이 존재하는 것을 볼 수 있다.

$x/D_h = 4$ 지점에서 측정된 속도분포에서 타원형 형태의 저속 영역이 사라지고 수로 중앙에 원형의 저속 영역이 발생하였으며 1 번 간극방향에서 2 번 간극 방향으로 3 번 간극에서 4 번 간극 방향으로 좁고 긴 고속 영역이 존재하는 것을 볼 수 있다. 간극에서의 고속 영역과 저속 영역은 $x/D_h = 3$에서 같이 뚜렷이 구분된다.

$x/D_h = 5$에서 측정된 속도분포에서 수로 중앙에 원형의 저속영역이 존재하며 간극에서 의 저속과 고속 영역이 지속적으로 뚜렷이 구분되어 나타나는 것을 볼 수 있다. 고속영역은 1번과 3번 간극에서 수로 중앙을 반시계 방향으로 감싸는 좁고 긴 띠 형태로 존재한

다.

Oh[9]의 결과 중 $x/D_h=5$ 지점의 축방향 속도분포에서 분리형 날개 후방 부수로의 경우 수로 중앙 좌우에 최대 속도 영역이 존재하고 7 번 중앙선 방향을 따라 저속영역이 존재하며 회전 날개 후방 부수로의 경우에서는 수로 중심에 최소 속도가 존재하며 중앙을 중심으로 동심원을 그리며 축방향 속도분포가 증가하고 있다. 따라서 하이브리드 지지격자 후방 축방향 속도분포는 회전유동 발생장치가 후방 부수로에서의 속도분포에 가까운 것으로 판단되나 $x/D_h=5$ 단면에서의 속도분포가 유사하다고 해서 혼합장치 후방 전 영역에서 속도분포가 회전유동 발생장치 후방에서의 속도분포와 유사하다는 의미는 아니다.

3.2 횡방향 속도분포

중앙 부수로 내에서 횡 방향 속도분포를 X-Film 탐침을 사용하여 측정하고 그림 5 에 나타내었다. 그림 5 (a)는 $x/D_h=3$ 지점에서의 횡방향 속도분포이며 그림 5 (b)는 $x/D_h=5$에서의 횡방향 속도분포이다. 그림에 나타난 기준 속도 크기는 5 m/s 이다. 두 그림에서 횡방향 속도의 경향 및 크기는 유사하였다. 전반적인 유동형태로는 수로 중심에 회전유동이 있고 간극에는 교차류가 발생하고 있음을 알 수 있다. 교차류의 경우 간극 1 번과 3 번에서는 인접수로로부터 유체가 유입되며 간극 2 번과 4 번에서는 유체가 빠져나가고 있다. 대각선 방향을 따라 측정한 속도는 회전 유동의 중심인 수로 중앙이 가장 작았으며 봉 벽면쪽으로 갈수로 커져 봉 벽면에서는 수로에서 가장 큰 대각선 방향에 대해 수직한 성분의 속도가 존재하는 것을 볼 수 있었다. 봉 벽면에서의 대각선 방향의 속도가 크다는 것은 수로 중앙에서 최대 속도를 보이고 수로 중앙에서 멀어질수록 속도가 증가하다 벽쪽으로 갈수록 벽면의 마찰에 의해 속도가 감소하는 회전 유동의 형태와 비교해 볼 때 다른 형태의 유동으로 대각선 방향의 벽면 근처 유동이 강한 교차류의 영향을 받는다는 것을 의미한다. 중앙선 방향을 따라서는 측정된 속도 성분은 간극 가까운 곳에서는 간극의 영향으로 중앙선 방향의 속도 성분이 크며 수로 가운데로 갈수록 회전류의 영향으로 중앙선에 수직한 성분의 속도가 증가하는 것을 볼 수 있으며 그 크기는 대각선 방향의 속도에 비해 작게 나타났다.

3.3 난류 강도

그림 3(b)에서 보여주는 8 개 방향을 따라 X-Film 탐침을 사용하여 유동의 난동을 측정하고 축 방향 속도의 평균으로 무차원화하였다. 축방향 난류강도는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_x=\frac{u'}{U_{av}}\times 100 \qquad (2)$$

여기서 u'은 축방향 난동 성분이며 U_{av}는 국부 평균 속도를 나타낸다.

$x/D_h = 3$에서 측정된 난류강도는 그림 6 에서 나타내었다. 그림 6 (a)에서 (d)는 간극에서의 난류강도이며 (e)에서 (f)는 대각선 방향을 따라 측정한 난류강도를 나타내며 (g)에서 (h)는 중앙선 방향을 따라 측정한 난류강도를 나타낸다. 간극에서 측정된 난류강도 분포에서 3 방향 성분의 난류 강도의 크기는 서로 유사하게 나타났으며 난류강도는 간극을 따라 단순 변화하는 것을 보이고 있으나 그 변화의 정도는 크기 않았다.

대각선 방향을 따라 측정한 난류강도는 서로 유사한 경향을 보이고 있으며 수로 중앙에서 높은 난류강도를 보이고 봉 벽면쪽으로 갈수로 그 크기가 감소하였다. Y방향 난류강도는 X 방향 난류강도와 유사하게 나타났으며 Z 방향 난류강도는 X 나 Y 방향의 난류강도에 비해 작게 나타났다.

중앙선 방향을 따라 측정한 난류강도는 수로 중앙에서 가장 높게 나타났으며 수로 가장자리고 갈수록 감소하는 것으로 나타나 대각선 방향에서 측정된 난류강도 분포와 유사한 경향을 보이고있다. 분리형 날개 후방에서 측정한 축방향 난류강도를 나타낸 Yang [5]의 $x/D_h = 2$ 와 $x/D_h = 4$ 지점에서 측정한 축방향 난류강도와 본 실험의 결과를 비교해 볼 때 수로 중앙에서 난류강도는 참고문헌에서 제시된 값과 유사한 것을 볼 수 있다. 수로 중앙에서 간극으로 갈수록 참고문헌의 난류 강도는 변화하지 않는 반면 본 실험에서 측정된 난류강도는 감소하는 것으로 나타났다.

$x/D_h = 5$ 지저에서 측정된 난류강도는 그림 7 에 나타내었다. 그림 7 에서 간극의 난류강도는 $x/D_h = 3$ 지점에서와 유사한 2~8% 범위 내에 존재하는 것으로 나타났으며 대각선 및 중앙선 방향의 난류강도의 변화는 $x/D_h = 3$에서 측정된 것과 유사한 경향을 보이고 있으나 그 크기는 $x/D_h = 3$의 값에 비해 조금 감소한 것으로 나타났다.

4. 결론

복합유동 날개 지지격자 하류 봉다발 부수로에서 속도분포 및 난류강도를 측정하고 얻은 결론은 아래와 같다.

1) 축방향 속도분포로부터 날개사이에 국부적 최대속도 지점들이 형성됨을 알 수 있었는데, 이들은 수로 중심을 축으로 선회하면서 멀어지다가 $x/D_h = 2$ 지점 부근에서 연료봉에 도달여 충돌한 후 사라진다.
2) 횡방향 속도분포에서 간극에서는 교차류가 발생하며 수로 중앙에서는 강한 회전류가 발생하였다. 회전류는 중앙선 방향에 비해 대각선 방향에서 크게 나타났으며 대각선 방향 속도분포는 교차류 영향으로 벽면근처에서 크게 나타났다.
3) 난류강도는 중앙 수로에서 가장 크게 나타났으며 간극과 봉 표면 쪽으로 갈수록 감소하였다. 수로 중앙에서의 축 방향 난류 강도의 크기는 기존 실험 결과와 유사하였다.

기호설명

				그리스 문자	
D	직경	[m]			
D_h	수력직경	[m]	ν	동점성 계수	[m^2/s]
I	난류강도	[%]			
P	봉간 거리	[m]		첨자	
Re	레이놀즈 수				
$\overline{U}$	축방향 속도	[m/s]	av	평균	
U	축방향 국부 속도	[m/s]	'	난동	
x	축방향거리	[m]			
Y, Z	거리	[m]			

후기

본 연구는 과학기술부 원자력 연구 개발 중장기 사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

REFERENCES

1. Edmond E. DeMario and Et al., "Coolant Flow Mixer Grid for a Nuclear Reactor Fuel Assembly," US PAT, 4692302 (1987)
2. John F. Patterson and Et al., "Mixing Grid," US PAT, 4726926 (1988)
3. Chun Tae Hyun and Et al, "Fuel Assembly spacer Grid with Swirl Deflectors and Hydraulic Pressure Springs," US PAT, 6236702 (2001)
4. Shen Y. F., Cao Z. D. and Lu Q G, "An Investigation of Crossflow Mixing Effect Caused by Grid Spacer with Mixing Blades in a Rod Bundle," Nuclear Engineering and Design, Vol. 125, 111-119 (1991)
5. Yang S. K. and Chung M. K., "Spacer Grid Effects on Turbulent Flow in Rod Bundles," J. KNS, Vol. 28, 56-71 (1996)
6. Hejna J. et al., "Measurement Program for the Structure of Turbulent Flows in a Square Rod Lattice Part 2. Experimental Investigations of Flow in a Model of PWR- Type Fuel Assembly Spaced by Systematical Vaned Grids," Nuclear Research Institute Rez plc, 1994
7. Oh D. S., In W. K, and Chun T. H., "Structure of Turbulent Flow in Subchannel of Rod Bundle Downstream of Spacer Grid with Flow Mixing Device," the 4th JSME-KSME Thermal Engineering Conference, October 1-6 2000, Kobe, Japan
8. 전태현, "복합유동 혼합장치를 가진 핵연료집합체 지지격자," 출원번호 10-2001-48173 (2001)
9. Oh D. S., In W. K, and Chun T. H., "Measurement of Flow Structure in Rod Bundle with Spacer Grid" Proc. 2001 KNS Spring Mtg., Cheju, Korea, May. 25-27, 2001

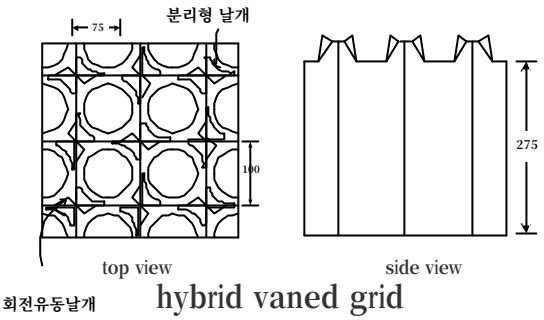


Figure 1. Test Spacer Grid

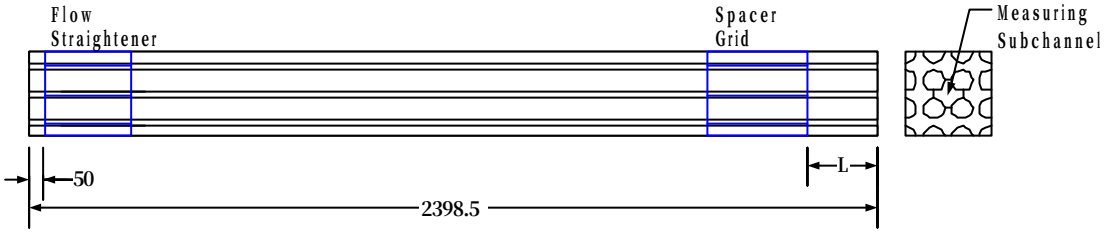
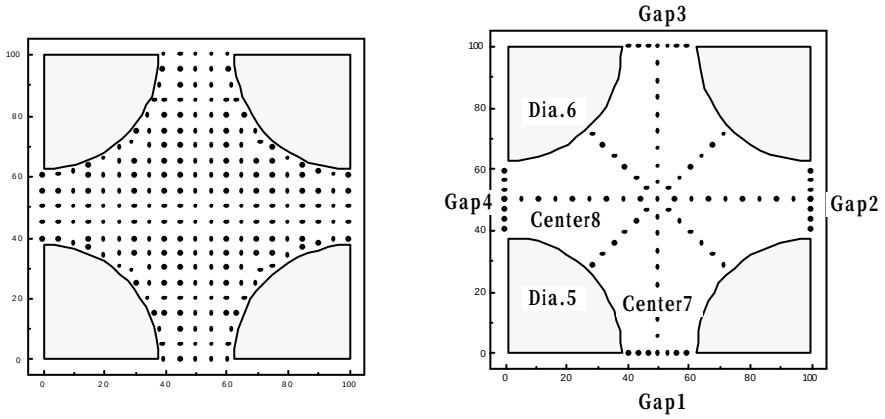
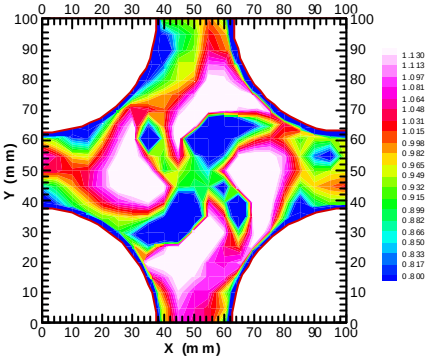


Figure 2. Test Section

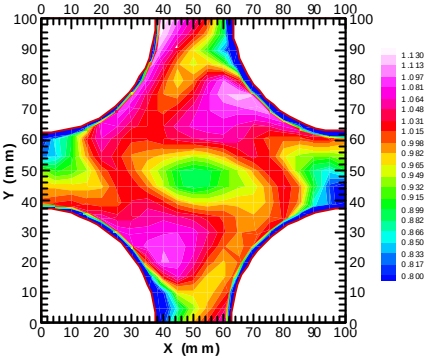


(a) Pitot Tube **(b) Hot Wire Anemometry**

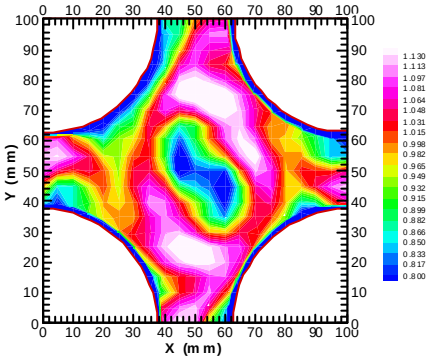
Figure 3. Measuring Points



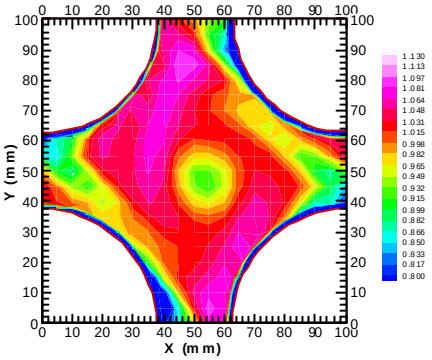
(a) $x / D_h = 0$



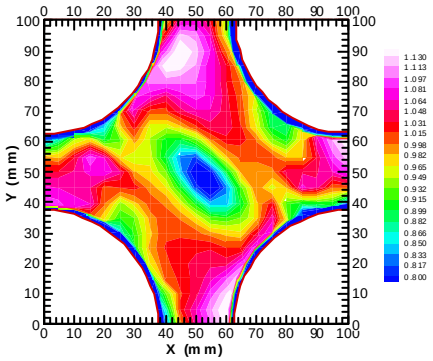
(d) $x / D_h = 3$



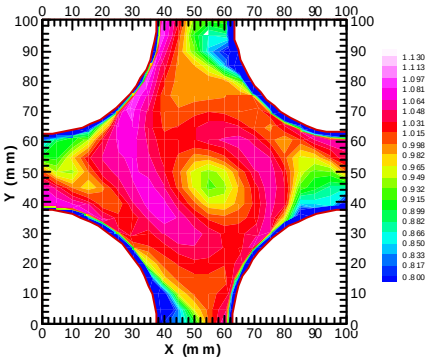
(b) $x / D_h = 1$



(e) $x / D_h = 4$

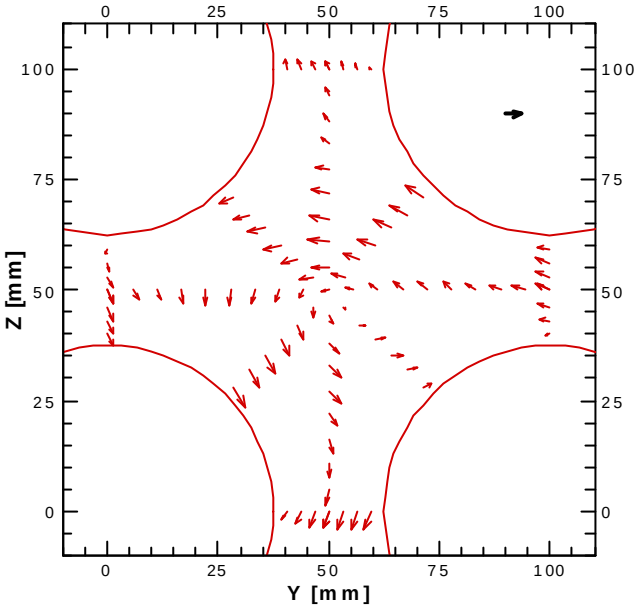


(c) $x / D_h = 2$

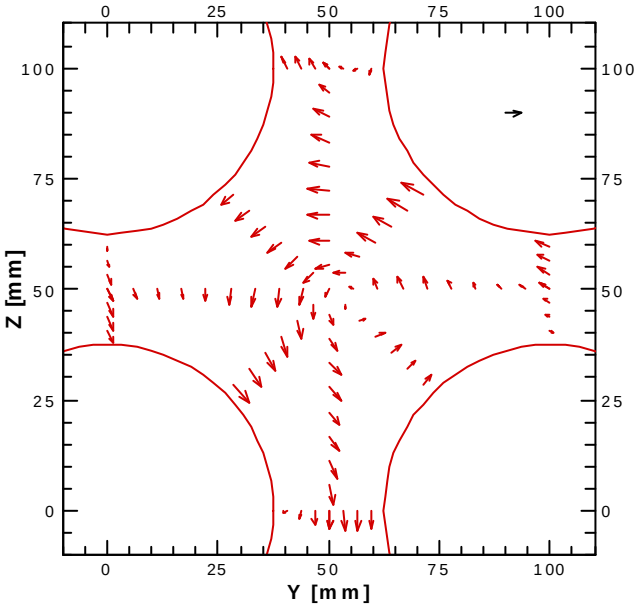


(f) $x / D_h = 5$

Figure 4. Axial Velocity Distribution

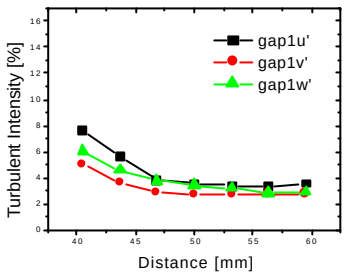


(a) $x / D_h = 3$

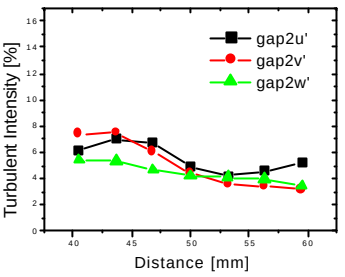


(b) $x / D_h = 5$

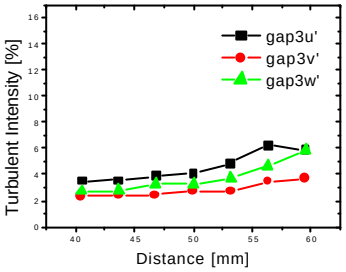
Figure 5. Lateral Velocity Distribution



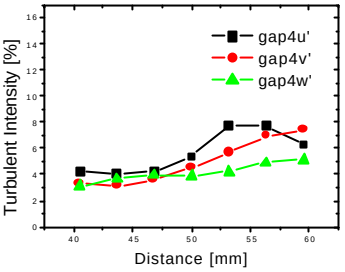
(a) Gap 1



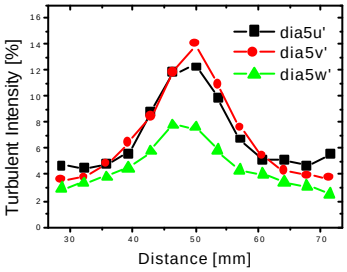
(b) Gap 2



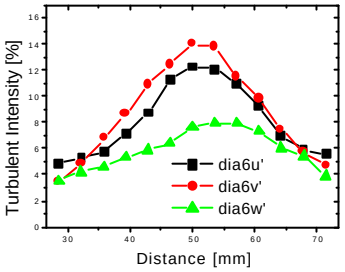
(c) Gap 3



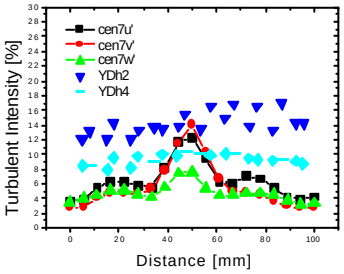
(d) Gap 4



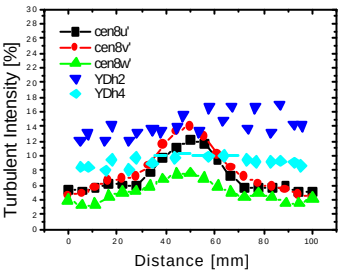
(e) Diagonal 5



(f) Diagonal 6

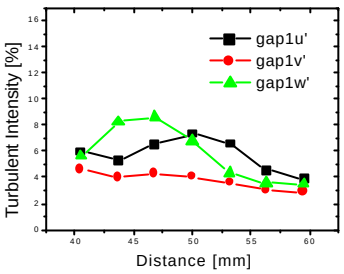


(g) Center Line 7

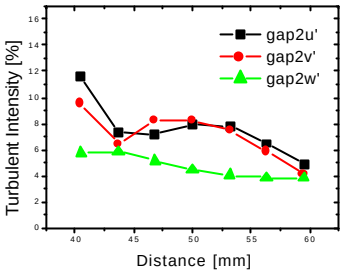


(h) Center Line 8

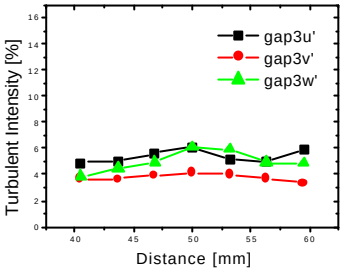
Figure 6. Turbulent Intensity at x/D_h=3



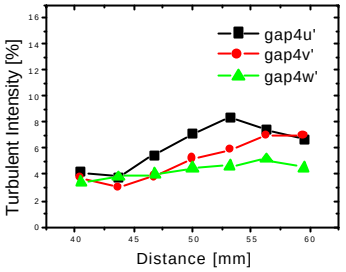
(a) Gap 1



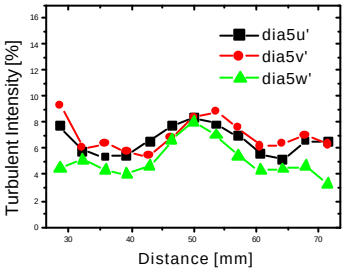
(b) Gap 2



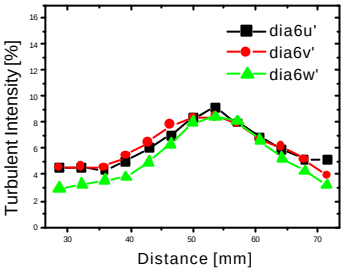
(c) Gap 3



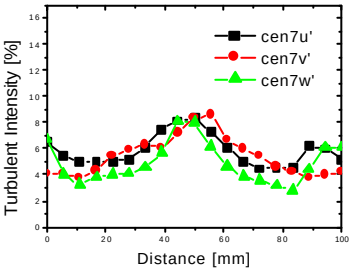
(d) Gap 4



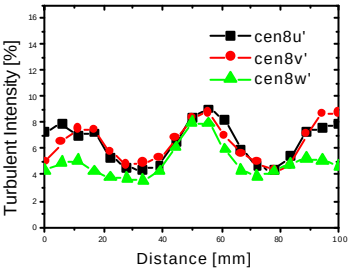
(e) Diagonal 5



(f) Diagonal 6



(g) Center Line 7



(h) Center Line 8

Figure 7. Turbulent Intensity at x/D_h=5