2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

유동혼합장치 후방 봉다발에서의 유동 구조 측정

Measurement of Flow Structures in Rod Bundle downstream of Flow Mixing Device

오동석, 인왕기, 장석규, 전태현

한국원자력연구소
대전광역시 유성우체국 사서함 105 호

요약

유동혼합장치 후방 봉다발에서 유동구조에 대해 열선풍속계 풍동 실험을 수행하고 실험결과를 기존 LDV 물 실험결과를 비교하였다. 비교에 사용된 혼합날개 형상은 복합유동발생 혼합장치와 분리형 혼합장치이다. 풍동 실험은 Reynolds 수 1.2 X 10^5 에서 국부 평균 속도와 난류 강도 성분을 복합유동 발생 날개와 분리형 날개에 대해 열선풍속계를 사용하여 측정하였다. 한편, 풍동 열선풍속계 실험결과와 기존 LDV 물 실험결과와도 비교하였는데 그 결과 두 시험 결과의 경향과 크기가 서로 유사하게 나타났다. 미소 차이의 원인에 대해 토의 하였으며 비교 결과는 향후 시험을 위한 입력으로 사용될 것이다.

Abstract

Wind tunnel experiments were conducted on two spacer grid air models of hybrid and split type using hotwire anemometry. Experiment results have been compared with the previous LDV water data. Hot wire anemometry with cross film probe was used to measure the flow field. Local averaged velocity distributions and turbulent intensities over a central subchannel are measured at the Reynolds number of 1.2 X 10^5. The results of hot wire anemometry show similar trend and magnitude with LDV data. We have discussed the reason of tiny discrepancy for method dependent measurement. The comparison results will be feedback to the next experiments.

1. 서론

봉다발 유동에서 지지격자 하류에 형성되는 난류 유동 구조는 지지격자의 열적 성능에 직접적인 영향을 미친다. 열적성능의 제고를 위해 지지격자 상부에는 유동혼합을 위한 장치를 일체형으로 설치하는 방안이 실제로 적용되고 있다. 이 유동혼합장치는 봉다발 내 냉각재 혼합을 증가시키고 부수로 내의 엔탈피 불균형을 완화시켜 봉 표면의 열전달을 촉진시키는 역할을 한다. 회전유동과 같은 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] 와 복합유동 날개[4] 등을 들 수 있다. 혼합 장치 기하형상이 유동에 미치는 영향에 대한 실험적 연구는 Shen[5]과 Yang[6] 등에 의해 수행되었다. Shen[5]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[6]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. Karouta[7]은 분리형 날개 후방에서 유동구조를 전산유체해석을 통해 계산하고 실험자료와 비교함으로써 전산유체해석을 통한 유동분석의 가능성을 보였다.

지금까지 수행된 연구는 주로 분리형 날개 지지격자 후방 봉다발에 대해 수행되었으며 새로운 유동혼합 개념 지지격자인 복합유동발생 지지격자에 대한 연구가 이루어진 바가 없다. 따라서 본 연구에서는 복합유동발생 날개와 아울러 분리형 날개 지지격자 부수로에서 속도성분과 난류성분을 열선풍속계로 측정하고 기존 LDV 물 실험 자료와 비교하였다.

2. 실험장치 및 측정

실험은 핵연료집합체 지지격자의 공기역학 모형이 설치된 풍동에서 수행되었다. 그림 1 은 시험에 사용된 복합유동발생 날개와 분리형 날개 지지격자의 공기역학 모형을 보여주고 있다. 복합유동발생 지지격자는 날개 후방 부수로에서 회전류와 교차류가 동시에 존재하도록 고안되었다. 부수로 중앙에 회전류를 발생시키는 한 쌍의 날개와 교차류를 발생시키는 한 쌍의 날개가 대각선 방향으로 서 마주보며 회전 대칭 형태로 존재하며 이웃 근접 수로의

회전 방향과 반대가 되도록 날개가 배열되었다. 분리형 날개는 Westinghouse 사와 Siemens 사에서 사용하고 있는 전형적인 유동 혼합장치로 날개 후방 부수로 간극에서 교차류를 발생시키도록 고안되었다. 분리형 날개는 부수로 중앙에 한 쌍의 날개가 대각선 방향으로 서로 마주보고있다. 날개의 방향은 이웃 근접 수로의 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. 측정점은 그림 3 에 나타내었다. 측정 위치로 중앙 부수로가 선정되었으며 측정은 수직 중앙선 방향과 수평 중앙선 방향을 따라 수행되었다. 본 연구에서 사용된 Reynolds 수는 아래와 같이 정의되며 난류인자는 Reynolds 수가 1.2×10^5 일 때에 시험부 출구에서 측정되었다:

$$\mathrm{Re} = \frac{U_{BULK} \cdot D_h}{\nu} \tag{1}$$

여기서 U_{BULK} 는 지지격자 없는 단면 전체의 축방향 평균 속도, D_h 는 수력직경 및 ν 는 동점성계수 이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 축 방향 평균 속도분포

3.1.1 복합유동 발생지지격자 - 수직 중앙선

복합유동 발생 지지격자 하류 중앙 부수로에서 측정한 축방향 국부 속도, U_{av} ,를 수로 평균 속도, U_{BULK} ,로 나누어 무차원화하였다. 그림 4 는 $x / D_h = 4$ 에서 수직 중앙선을 따라 측정된 열선풍속계 공기 실험결과와 LDV 물 실험결과를 나타내고있다. 공기 실험에서 측정

된 축방향속도를 보면 부수로 중앙에서 무차원 속도는 0.93 으로 낮은 속도를 보이고 간극과 수로 중앙 사이에서 무차원 속도는 1.1 으로 높게 나타났으며 간극에서 무차원 속도는 수로 중앙에서의 속도와 유사한 것으로 나타났다. 속도는 수로를 중심으로 좌우 대칭형태를 보이고있다. 물 LDV 실험에서 측정된 축방향 속도를 보면 최대 속도와 최소 속도는 공기실험 결과와 유사하고 수로 중심선을 따라 물결형태의 주기적으로 변화를 볼 수있다. 물결 형태의 주기는 공기실험결과가 물 실험결과에 비해 길게 나타났다. 주기가 차이나는 원인으로 봉 배열 갯수와 스프링과 딤플 및 너겟의 기하형상 영향을 생각되나 이에 대한 체계적 원인 규명이 요구된다.

3.1.2 복합유동 발생지지격자-수평 중앙선

그림 5 는 $x/D_h = 4$ 에서 수평 중앙선을 따라 측정된 열선풍속계 공기 실험결과와 LDV 물 실험결과를 나타내고있다. 공기 실험에서 측정된 축방향속도를 보면 부수로 중앙에서 무차원 속도는 0.9 로 낮은 속도를 보이고 좌우 간극으로 가며 속도가 증가하다가 중앙으로부터 반경 30% 지점을 지나며 속도가 감소하는 것을 볼 수있다. 속도의 감소는 반경 80%까지 지속되다가 간극 쪽으로 가며 다시 증가하는 것을 볼 수있다. 간극에서 속도가 증가하는 것은 교차류에 의해 이웃 수로로부터 유입된 유량에 의해 증가한 것으로 생각된다. 물 실험에서 측정된 축방향속도를 보면 속도의 최대치는 공기의 결과와 유사하나 최소치는 공기의 값에 비해 약간 높게 나타났다. 수로 중심선을 따라 속도분포는 물결형태의 주기적 변화를 보이고 있으며 변화의 주기는 공기 시험결과와 유사하게 나타났다. 그러나 두 결과는 상(phase)의 차이를 보이며 서로 반대 경향을 보이는 것처럼 보인다. 상(phase)의 차이는 봉다발이 시험부 정 중앙에 위치하지 못하고 지지격자와 시험부폭의 차이만큼 치우쳐짐에 따라 발생했을 가능성이 있는 것으로 보인다.

3.2.3 분리형 날개 지지격자-수직 중앙선

그림 6 은 분리형 날개 후방 $x/D_h = 4$ 에서 수직 중앙선을 따라 측정된 열선풍속계 공기 실험결과와 LDV 물 실험결과를 나타내고있다. 그림에서 Yang 과 Jang 은 동일한 FOCUS 분리형 날개 후방에서 동일한 방법으로 측정하였으며 Karoutas 는 분리형 날개 지지격자 후방 봉다발에서 속도를 LDV 로 측정하였으나 날개 형상에 대한 구체적 설명은 하고있지 않다.

공기 실험에서 측정된 축방향속도를 보면 부수로 중앙에서 무차원 속도는 1.05 로 높은 속도를 보이고 좌우 간극으로 가며 속도가 낮아wl 다 다시 상승하는 경향을 보이나 그 변화량은 크지 않았다. Karoutas 의 결과는 공기실험 결과와 유사한 변화를 보이고 있은 그 값은 조금 크게 나타났다. Jang 의 결과에서는 속도의 변화가 크지 않으며 거의 평균속도로 나타났다.

3.2.4 분리형 날개 지지격자-수평 중앙선

그림 7 은 분리형 날개 후방 $x/D_h = 4$ 에서 수평 중앙선을 따라 측정된 열선풍속계 공

기 실험결과와 LDV 물 실험결과를 나타내고있다.

공기 실험에서 측정된 축방향속도를 보면 부수로 중앙에서 무차원 속도는 1.05 로 높은 속도를 보이고 좌우 간극으로 가며 속도가 낮아지다가 반경방향으로 40% 지점에서 변곡이 발생하여 간극쪽으로 가며 다시 상승하는 경향을 보인다. 간극에서 최대 속도는 중앙에서의 속도에 비해 큰 1.1 이다. 간극에서 높은 값을 나타내는 것은 간극에서 교차류 발생에 의해 이웃 수로로부터 유입된 유체에 의해 속도가 증가한 것으로 생각된다. Jang 과 Karoutas 는 수로 중앙에서 최대값을 보이고 간극으로 갈수록 낮아지는 경향을 보이고 있며 Yang 의 결과는 수로 중앙에 비해 수로 간극이 높은 속도경향을 보여주고있어 Yang 과 Jang 의 경향은 서로 상반되는 것을 볼 수있다.

3.2 횡방향 속도분포

3.2.1 복합유동 발생지지격자 - 수직 중앙선

복합유동 발생 지지격자 하류 중앙 부수로에서 측정한 수직한 x 방향 국부 속도, V_{av},를 수로 평균 속도, U_{BULK},로 나누어 무차원화하였다. 그림 8 은 $x/D_h = 4$ 에서 수직 중앙선을 따라 측정된 열선풍속계 공기 실험결과와 LDV 물 실험결과를 나타내고있다. 공기시험 횡방향 속도는 수로 중앙과 간극에서 0 에 가까운 낮은 속도를 보이고 수로 중앙과 간극 사이에서 높은 횡방향 속도를 보이고 있다. 상부에서의 속도가 하부에서의 속도에 비해 크게나타났다. LDV 물 실험결과를 보면 속도의 크기와 경향이 공기 실험결과와 유사하다. 전체적인 속도분포가 윗쪽으로 0.1 피치(1.28㎜)정도 취우쳐있는 것으로 나타났다. 이는 축방향 속도분포와 같이 시험부내 시험봉다발의 횡방향 치우침에 의해 나타난 현상으로 생각된다.

3.2.2 복합유동 발생지지격자 - 수평 중앙선

그림 9 는 $x/D_h = 4$ 에서 수평 중앙선을 따라 측정된 열선풍속계 공기 실험결과와 LDV 물 실험결과를 나타내고있다. 공기시험 횡방향 속도는 수로 중앙에서 0 에 가까운 낮은 속도를 보이고 수로 중앙에서 좌우 간극으로 가며 속도가 증가하다가 중앙으로부터 반경 30% 지점을 지나며 속도가 감소하는 것을 볼 수있다. 속도의 감소는 반경 80%까지 지속되다가 간극 쪽으로 가며 다시 증가하는 것을 볼 수있다. 간극에서 속도가 증가하는 것은 축방향 속도에서도 동일하게 나타났던 현상으로 교차류에 의해 이웃 수로로부터 유입된 유량에 의해 증가한 것으로 생각된다. LDV 물 실험결과를 보면 속도의 크기와 경향이 공기 실험결과와 유사하다.

3.2.3 분리형 날개 지지격자 - 수직 중앙선

그림 10 은 $x/D_h = 4$ 에서 수직 중앙선을 따라 측정된 열선풍속계 공기 실험결과와 LDV 물 실험결과를 나타내고있다.

공기 실험에서 측정된 축방향속도를 보면 부수로 중앙에서 최소값을 보이는 것으로 나

타났으며 간극으로 갈수록 속도가 증가하다가 반경 60% 지점에서는 속도가 감소하는 것을 볼 수있다. 수로 중앙에 대해 대칭이며 상부가 하부에 비해 속도가 조금 낮게 나타났다. Karoutas 의 실험결과는 공기 실험결과와 유사한 분포를 보이고 있으나 그 크기는 공기시험에 비해 조금 크게 나타났다. Jang 의 실험결과는 공기실험이나 Karoutas 결과의 1/2 이하로 작게 나타났다.

3.2.4 분리형 날개 지지격자 - 수평 중앙선

그림 11 은 $x/D_h = 4$ 에서 수평 중앙선을 따라 측정된 열선풍속계 공기 실험결과와 LDV 물 실험결과를 나타내고있다.

공기 실험에서 측정된 축방향속도를 보면 부수로 중앙에서 최소값을 보이는 것으로 나타났으며 간극으로 갈수록 속도가 증가하다가 반경 40% 지점에서는 속도가 감소하는 것을 볼 수있다. 속도는 수로 중앙에 대해 대칭이나 전체적으로 0.1 정도 낮게 나타났다. Karouta 의 실험결과는 공기시험 결과와 유사한 경향을 보이고있있으며 Jang 의 실험 결과는 낮은 횡류를 보이고 있다.

3.3 난류강도

X-Film 탐침을 사용하여 유동의 난동을 측정하고 축 방향 속도의 평균으로 무차원화 하였다. 축방향 난류강도는 식 (2)와 같이 나타내었다.

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

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

3.3.1 수직 중앙선을 따른 측정치

그림 12 는 $x/D_h = 4$ 에서 수직 중앙선을 따라 측정된 열선풍속계 공기 실험결과와 LDV 물 실험결과를 나타내고있다. 공기실험에서 분리형 날개 후방 에서 난류강도는 수로 중앙에서 낮게 나타났으며 중앙에서 가장자리로 갈수록 증가하다가 반경 30% 지점부터 감소하는 것을 볼 수있다. 복합유동발생 지지격자 후방에서의 난류강도는 수로 중앙에서 높게 나타났으며 간극쪽으롤 갈수록 감소하나 간극에서는 높게 뛰었다. 공기실험 결과를 비교해 보면 수로중앙에서는 복합유동발생 지지격자에 의한 난류강도가 분리형의 것에 비해 높게나타났으며 간극과 수로 중앙 사아에서는 분리형 날개 지지격자에 의한 난류강도가 복합유동발생 지지격자에 의한 것에 비해 높게 나타났고 간극에서는 서로 유사하게 나타나 국부적으로 정도의 차이가 있음을 알 수있었습니다.

LDV 물 시험에서 측정된 난류강도는 수로 중앙에서 높고 간극쪽으로 갈수록 감소하는

것을 볼 수있으며 그 크기는 공기실험 결과에 비해 조금 높게 나타났다. 이는 공기시험에 사용된 지지격자는 딤플, 스프링, 및 용접 너겟이 존재하지 않는 반면 물시험에서 사용된 지지격자는 지지부가 존재한다. 따라서 지지부에 의한 난류강도 상승에 따라 공기시험에 비해 비교적 높게 나타난 것으로 사료된다.

3.3.2 수평 중앙선을 따른 측정치

그림 13 은 $x/D_h = 4$ 에서 수직 중앙선을 따라 측정된 열선풍속계 공기 실험결과와 LDV 물 실험결과를 나타내고있다. 공기실험에서 복합유동발생 날개 지지격자 후방에서의 난류강도는 수직 중앙선에서 측정한 값에 비해 간극으로 가며 전체적으로 높게 나타낫으며 분리형 날개 지지격자 후방에서의 난류강도는 수직 중앙선에서 측정한 값에 비해 간극으로 가며 전체적으로 낮게 나타났다. 따라서 수평 중앙선을 따라서는 전반적으로 복합유동혼합 발생 지지격자가 분리형 날개 지지격자보다 강한 난류강도를 발생시켰다.

공기시험에서 측정된 난류강도는 여전히 LDV 물 시험에서 측정된 난류강도에 비해 조금 낮은 값을 보인다.

4. 결론

분리형 날개와 복합유동 발생 날개 지지격자 하류 봉다발에서 열선풍속계를 사용하여 수로 중앙선을 따라 측정한 유동인자와 LDV 시험결과를 비교하였다. 두 실험 결과로부터 축방향 속도, 횡방향 속도 및 난류강도를 비교하고 아래의 결론을 얻었다.

1) 두 실험 결과에서 축방향 최대 및 최소 속도는 서로 유사하게 나타났으며 수로 중앙선을 따라 주기적으로 변한다.
2) 횡방향 속도는 복합유동발생 날개의 경우 서로 유사한 크기와 경향을 나타내고있으나 상(Phase)의 차이를 보이고있다.
3) 분리형 날개의 경우 횡방향 속도의 경우 Jang FOCUS LDV 시험 결과가 Karouta 분리형 날개와 본 실험 결과에 비해 낮게 나타났다.
4) 난류강도는 FOCUS LDV 실험이 분리형 날개와 복합유동발생 지지격자 열선풍속계 시험치에 비해 전반적으로 높게나타났다. 이는 LDV 시험에서 사용된 지지격자에 부착된 봉지지 장치와 용점덩어리에 의해 발생된 난류가 영향을 미쳤기 때문인 것으로 생각된다.

Nomenclature

D_h	hydraulic diameter	[m]
P	rod pitch	[m]
Z	distance from rod surface to adjacent rod surface	[m]
Re	Reynolds number ($= \frac{U_{BULK} \cdot D_h}{\nu}$)	
U, V, W	time averaged local velocity	[m/s]
x, y, z	coordinate	[m]
u'	turbulent fluctuations	[m/s]

Greek Symbols

ν	kinematic viscosity
ξ	friction factor

Subscripts

av	arithmetic bundle averaged
BULK	bulk average
h	hydraulic

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. 전태현, “복합유동 혼합장치를 가진 핵연료집합체 지지격자,” 출원번호 10-2001-48173 (2001)
5. 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)
6. Yang S. K. and Chung M. K., “Spacer Grid Effects on Turbulent Flow in Rod Bundles,” J. KNS, Vol. 28, 56-71 (1996)
7. Karuota Z,, GU, C. Y and Scholin B., “3-D Flow Analyses for Design of Nuclear Fuel Spacer”, Proceedings of the NURETH-7 (1995)
8. Jang S. K., Private communication.

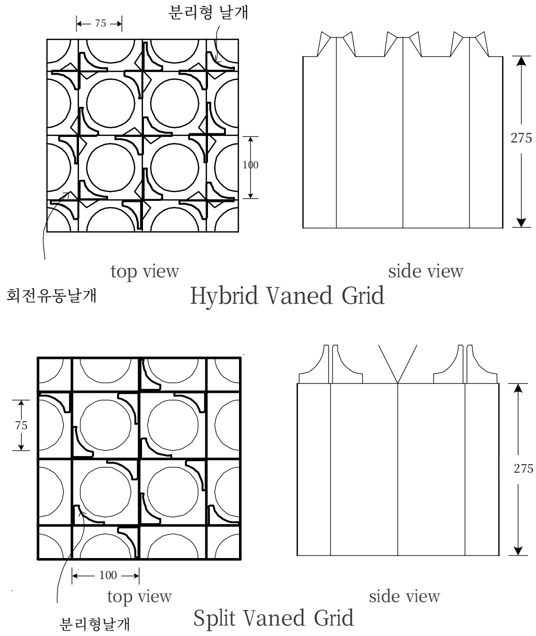

Figure 1.   Test Spacer Grid

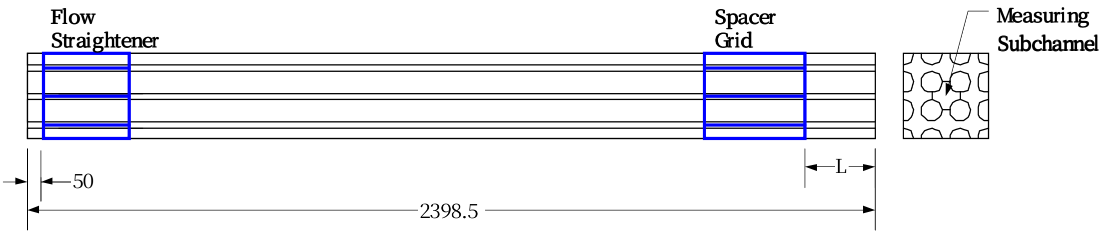

Figure 2.   Test Section

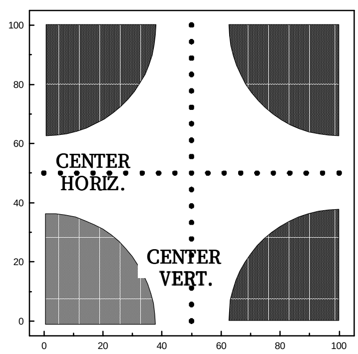

Figure 3.   Measuring Points

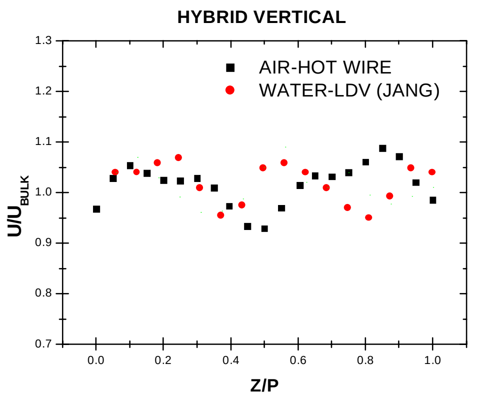

Figure 4. **Axial Velocity Distribution along Vertical Center Line at x/Dh=4**

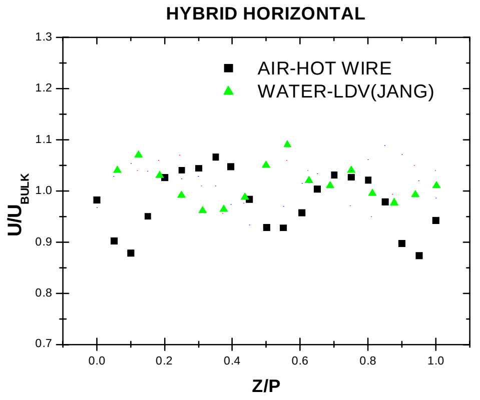

Figure 5. Axial Velocity Distribution along Horizontal Center Line at x/Dh=4

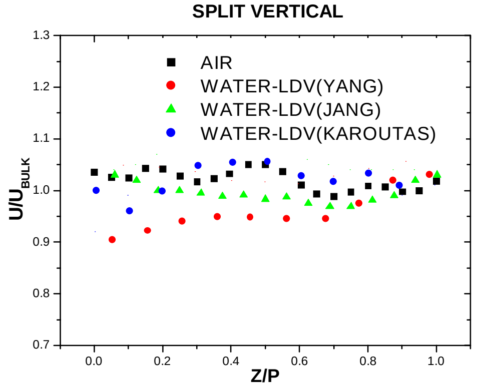

Figure 6. Axial Velocity Distribution along Vertical Center Line at x/Dh=4

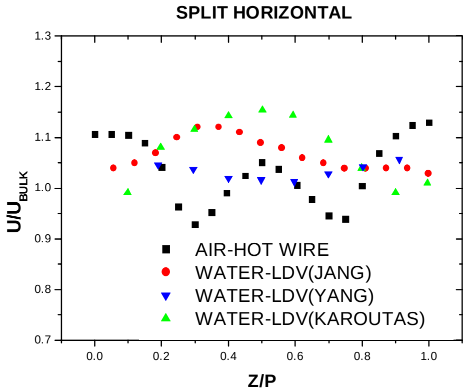

Figure 7. Axial Velocity Distribution along Horizontal Center Line at x/Dh=4

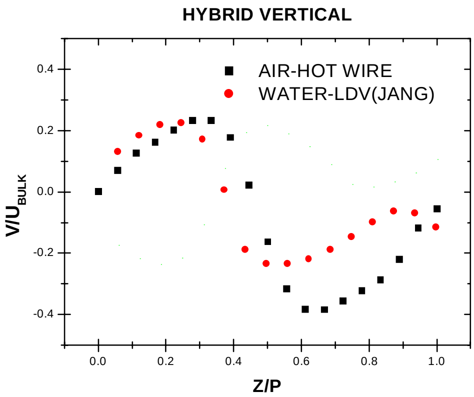

Figure 8. Lateral Velocity Distribution along Vertical Center Line at x/Dh=4

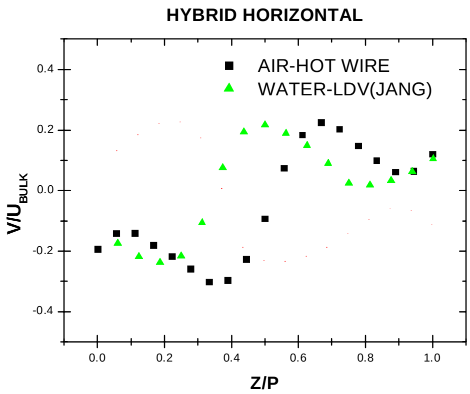

Figure 9. Lateral Velocity Distribution along Horizontal Center Line at x/Dh=4

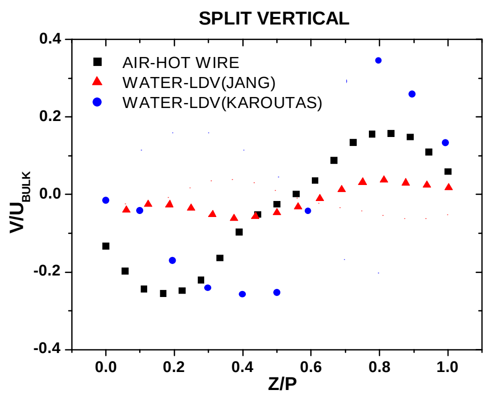

Figure 10. Lateral Velocity Distribution along Vertical Center Line at x/Dh=4

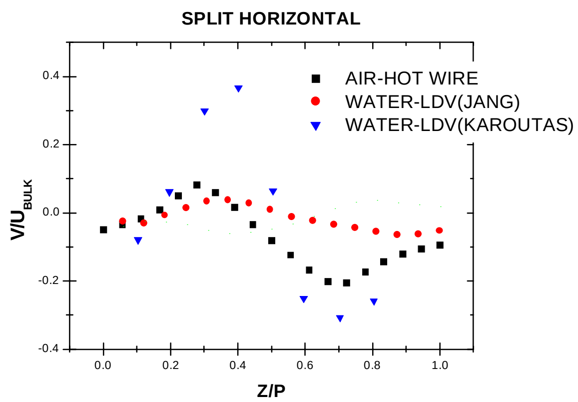

Figure1e 11. Lateral Velocity Distribution along Horizontal Center Line at x/Dh=4

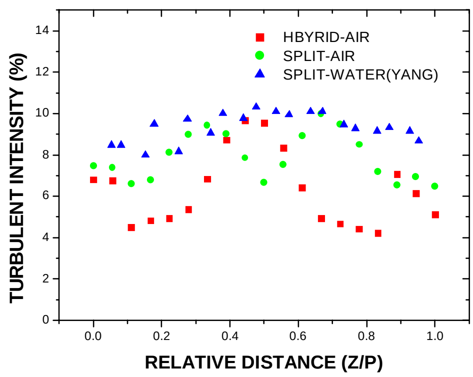

Figure 12. Axial Turbulent Intensity Distribution along Vertical Center Line at x/Dh=4

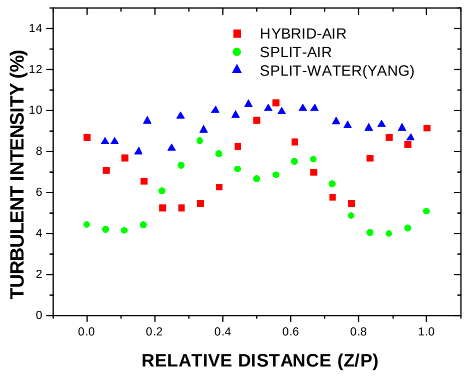

Figure 13. Axial Turbulent Intensity Distribution along Horizontal Center Line at x/Dh=4