

2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

단순 지지격자를 가지는 핵연료봉다발 내에서의
난류 유동에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Turbulent Flow in a Fuel
Rod Bundle with Plain Spacer Grids

김세윤, 장석규, 천세영, 김복득

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

핵연료봉 다발과 이를 지지하는 단순 지지격자를 지나는 유동의 구조에 대한 연구를 실험적으로 규명하였다. 이 실험은 봉다발 부수로내 수력학적 특성과 난류구조에 끼치는 지지격자의 영향을 연구하고, 냉각재의 열전달 성능을 개선할 수 있는 효과적인 혼합 날개를 개발하는데 활용될 수 있을 것이다. 실험 조건은 레이놀즈수가 61200이고 작동유체가 물인 유동에 대해 LDV(Laser Doppler Velocimetry)를 이용하여 2차원 속도장과 난류강도를 측정하였다. 축방향의 유동 물리량의 경향은 질량유동이 부수로간에 재분포되며 발달해 가는 것을 보여주었다. 유동이 발달된 영역에서는, 기존의 지지격자가 없는 연료봉다발 실험 결과에서 보여지는 것과 유사한 속도분포가 얻어졌다. 횡방향속도도 하류방향으로 갈수록 급격하게 감소하며, 채널벽과 모서리에서 2차 유동이 관찰되었다. 양방향의 난류강도는 혼합날개를 가지는 지지격자에 비해 지지격자 바로 뒤에서의 크기가 작으나, 유동방향에 따라 급격히 감소하는 정도는 서로 유사한 것으로 관찰되었다.

Abstract

An experimental study has been carried out to investigate the structure of flow through rod bundle and plain spacer grid. The experimental data can be utilize to research the effects of the spacer grid on hydraulic characteristics and the turbulence structure in subchannels and develop more effective mixing vane to improve heat transfer efficiency. The experiments were performed in water with a Reynolds number of 61200. By using a LDV(Laser Doppler Velocimetry), the two-dimentional

velocity field and turbulent intensity were measured. Trend of streamwise physical data of the flow showed a redistribution of mass flow and development of the boundary layer in the subchannels. In the developed region, velocity profiles similar to several previous experimental data in bare rod bundle were observed. The lateral velocity decayed rapidly, and the secondary flow was observed in the wall and corner subchannels. Small magnitude for turbulent intensity of axial and lateral direction the downstream the spacer grid as compared with that of spacer grid with mixing vanes were observed and turbulence also decayed sharply.

Keyword: Spacer grid ; 지지격자 ; Rod bundle ; 연료봉 다발 ; LDV ; 레이저 유속계

1. 서 론

연료봉다발 내를 흐르는 냉각재의 유동구조와 열수력특성에 대한 이해는 원자로심 개발에 있어서 매우 중요한 부분이다. 연료봉 사이의 공간에 만들어진 부수로에서 생기는 난류는 매우 복잡한 3차원적 특성을 가지고 있으며, 이 부수로의 난류량 전달등의 거동이 냉각성능등의 설계인자에 많은 영향을 주게 된다. 근래에 열수력특성을 개선하기 위한 복잡한 형상의 지지격자에 대한 개발이 활발히 시도되고 있는데, 이 경우의 유동특성에 대한 연구는 일차원적 방법이나, 확실한 난류상관방정식의 개발이 어렵기 때문에 경험적으로 묘사되는 횡류혼합(cross flow mixing)을 사용하여 서로 연결된 평행한 부수로들의 묶음으로 가정되어 해석하는 ‘lumped-parameter’ 방법들로는 한계를 가지게 된다.

기존의 지지격자가 없는 경우의 실험적인 연구로는 Rowe등¹⁾이 3×3 연료봉다발에 대해 봉과 외벽으로 인한 난류구조를 설명해 주었고, Neti등²⁾도 LDV를 이용하여 벽부수로와 중심부수로에서의 난류강도 분포를 평가하였다. Rowe와 Chapman³⁾은 LDV를 활용하여 지지격자 상하류에서의 난류구조를 규명하였고, Shen등⁴⁾도 LDV를 이용하여 혼합날개가 있는 지지격자를 사용한 부수로에서의 횡류속도와 난류강도를 측정하여 혼합율이 혼합날개의 각도의 함수임을 관찰하였다. Yang등⁵⁾은 역시 LDV를 사용하여 혼합날개가 있는 경우의 부수로 난류거동을 실험하여 지지격자 하류의 난류 감쇠 현상을 연구하였고, Oh등⁶⁾은 열전대를 활용하여 3×3 혼합날개가 있는 지지격자 후류와 난류강도, 난류확산계수 그리고, 혼합날개에 의한 스월(swirl)수등에 대해 연구한 바 있다. Trupp과 Azad⁷⁾와 Rehme와 Trippe⁸⁾는 3각형태 배열의 지지격자로 인한 유동과 질량 재분포 현상에 대한 연구를 수행하였다.

지지격자에 부착된 혼합날개로 인한 난류특성 변화와 냉각성능의 개선을 정밀하게 예측하고 혼합날개의 형상개선방향을 이해하기 위해서는 혼합날개가 없는 경우의 부수로 유동장에서의 수력학 특성과 난류 혼합에 주는 단순 지지격자만의 영향에 대해 좀 더 정밀한 선행 연구가 요구된다. 그래서, 본 논문에서 단순 지지격자를 가진 핵연료봉 다발의

난류유동에 대해 실험적으로 연구하였다.

2. 실험방법

2.1 실험장치 구성

실험장치는 그림 1에서 보는 바와 같이 냉각수조, 순환펌프, 시험대로 구성되는 순환 루프로 구성되어 있다. 실험 중 루프의 조건은 유량계, 온도 및 압력 센서로 감시되며, 냉각수조는 900 liter의 직립 원통형으로 냉각수의 온도조절을 위하여 코일형상의 냉각기와 가열기가 각각 장착되어 이들을 제어하는 제어기를 통하여 설정온도를 일정하게 유지하는 기능을 한다. 냉각수 순환펌프는 루프내에 유량을 형성하는데 펌프의 회전속도를 조절함으로써 유량을 조절할 수 있다. 루프의 배관 및 주요 요소에는 운전조건을 정확하게 유지하기 위하여 유량 및 시스템 온도, 압력 등을 감시, 제어하기 위한 계측기가 설치되어 있다.

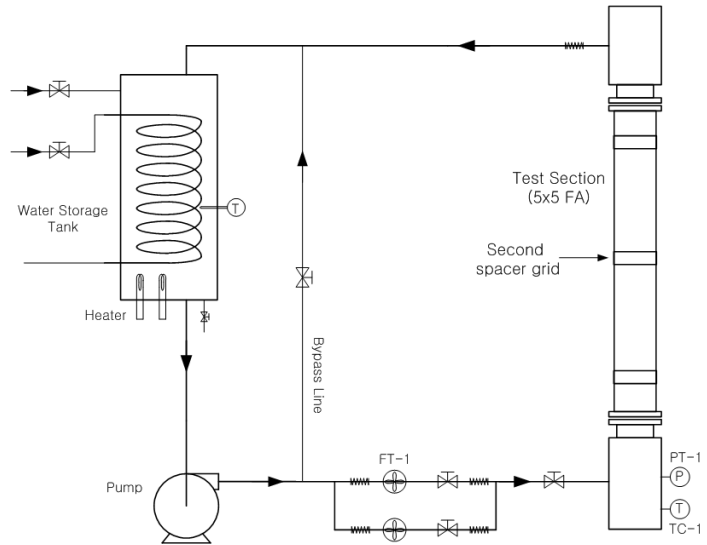


그림 1 실험장치 개략도

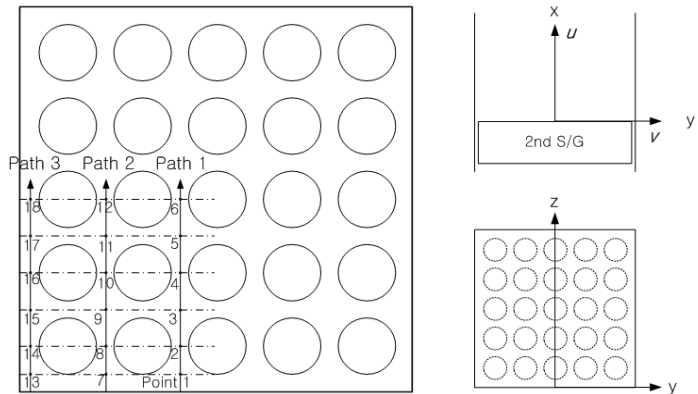


그림 2 측정위치와 단면과 좌표계

2.2 측정 위치

실험 채널은 5×5 핵연료봉 다발이 장착될 수 있도록 사각 형상(68×68 mm)이며 재질은 아크릴을 사용하였다. 채널의 길이는 하단에서의 입구 효과와 상단의 출구효과를 줄이기 위하여 하단과 상단 지지격자를 장착하고 중간에 지지격자를 두으로써 두 구간의 너비중 상류구간에서 유동을 안정화시킨 다음 하류구간에서 정확한 측정자료를 얻도록 제작하였다. 채널 내에 삽입되는 5×5 모의 핵연료 다발은 직경 9.5mm의 실제 핵연료봉 형상으로 구성되었으며 $P/d = 1.347$, $W/d = 0.884$ 이다. 실험에 사용된 지지격자(spacer grid)는 혼합날개가 없는 단순 지지격자이다. 측정위치는 그림 2에서 보여지는 바와 같이 두 번째 지지격자 하류방향으로 유동방향을 x, 레이저가 투과하는 면을 따라 y, 레이저가

축대칭 중심으로 움직이는 축을 z라고 놓고, z축을 따라 3개의 경로와 측정경로 위에 부수로 중심과 연료봉 틈새 위치에 18개의 측정점이 선택되었다.

단 위	mm
봉 배열	5 × 5
봉 직경(d)	9.5
봉 피치(Pitch)(P)	12.8
스트랩 두께	0.48
스트랩 폭(W)	66.6

표 1 지지격자 사양

2.3 LDV 측정

LDV를 이용한 유속측정기술은 움직이는 물체에 조사된 레이저광이 Doppler 효과에 의해 레이저광의 운동 속도에 비례하는 도플러 주파수 편이(Doppler frequency shift)를 일으키며 산란되는데, 이 편이된 주파수를 측정하여 운동하는 물체의 속도를 계산하는 원리이다. 이 때, 운동하는 물체의 속도 v 와 산란주파수 f_D 사이의 상관식은 조사되는 레이저광과 운동하는 물체사이에 이루는 각도의 함수인데,

$$v = C \cdot f_D \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{여기에서 } C = \frac{\lambda}{2 \cdot \sin \frac{\theta}{2}} = \frac{\lambda}{2} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{2L_f}{ED} \right)^2} \quad \dots\dots\dots(2)$$

λ = Laser wave length
 θ = Beam crossing angle
 L_f = Focal length
 D = Diameter of front lens
 E = Expansion ratio

2 차원 각 방향의 레이저 파장은 514.5 nm와 488.0 nm이고, 초점거리 500 mm, 렌즈직경 38 mm, 확장비는 1.98이다. Argon-ion 레이저를 이용하여 속도를 측정하여 계산하는 시스템은 후방산란방법을 사용한 Dantec사의 제품이다. 측정되는 유효한 데이터의 비율을 높이기 위해 유체내에 부유하여 유체와 같은 속도로 움직이는 직경 10 μm 인 공동 유리구를 첨가하였다. 유동장에서 얻어지는 신호는 Dantec사의 BSA 소프트웨어⁹⁾를 이용하여 처리되었다.

3. 실험결과

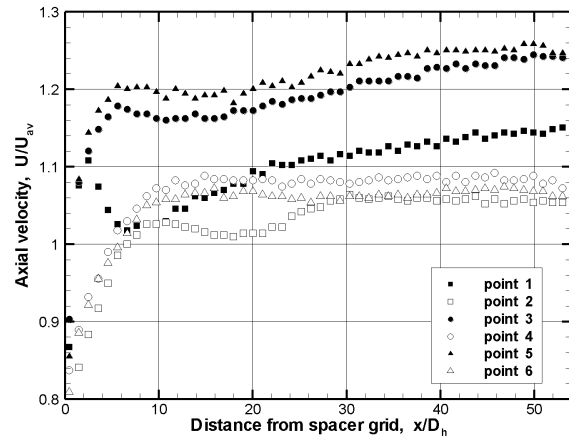
3.1 축방향속도

부수로내 18개의 위치에서 유동진행방향인 x축을 따라 지지격자 하류방향으로 각기 52점의 축방향속도를 그림 3에서 나타내었다. 채널내의 중심에 가까운 부수로인 1에서 6까지의 위치에서 보여지는 축방향속도는 지지격자 뒤에서 생겨난 후류의 영향으로 크게 줄어든 축방향속도가 11.2mm의 값을 가지는 수력직경 D_h 의 6배인 $6D_h$ 정도에서 평균속도까

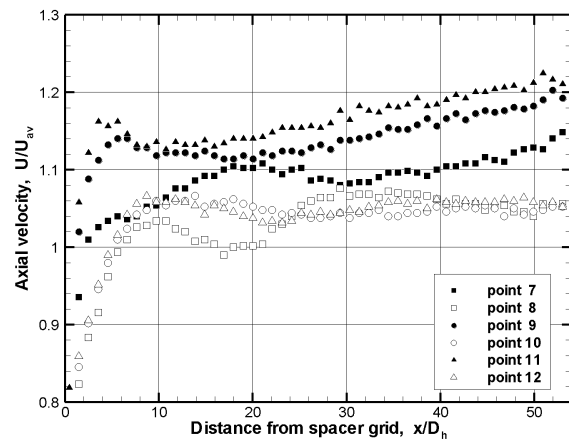
지 회복되고, 큰 점까지 진행되는 것을 볼 수 있는데, 두 번째 격자에서 대략 $53D_h$ 거리 하류의 세 번째 지지격자부근인 대략 $x/D_h=40$ 인 위치에서 발달된 유동이 확립되는 것을 볼 수 있다. 홀수번호로 위치가 나타나는 부수로 중심과 짝수번호인 연료봉 틈새를 비교할 때, 유동방향 대부분의 위치에서 틈새로는 비교적 작은 유량만이 흐르고, 부수로 중심으로 많은 유량이 지나가는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 지지격자가 가까운 위치의 벽과 붙은 부수로에서(그림 3a)의 1, 2 점) 벽을 따라 지나가는 질량이 중심쪽 부수로로 재분포되면서 길이가 $10D_h$ 정도되는 유동의 변화가 일어나는 것이 관측되었다. 이는 벽부수로가 벽 효과와 더불어 지지격자에 의한 난류혼합에 기인하는 것으로 보인다. 또한, 일반적인 채널유동과 같이 채널 중심으로 갈수록 많은 질량이 지나가는 경향 또한 볼 수 있다. 그림 3b)는 두 번째 경로인 7-12 위치의 축방향속도를 보여주는데, 축대칭점으로부터 멀기 때문에 유동의 확립이 조금 더 늦게 일어나는 것을 알 수 있고, 부수로 중심 11의 절대값과 경향이 그림 3a)의 위치 3과 유사한 것이 나타나는데, 이는 위치 11과 위치 3이 채널중심을 기준으로 물리적으로 유사성이 성립하는 같은 위치의 값이기 때문이다. 벽 부수로위에 놓인 위치 13-18까지의 축방향속도는 그 절대값의 변화가 전체적으로는 일어나지 않지만, 지지격자와 벽효과의 영향으로 그림 3a)의 위치 1과 2의 경향과 같이 비교적 작은 절대값을 가지면서 부수로간 질량 재분포가 활발히 일어난다.

그림 4a)에서 4c)까지는 그림 2에서 보여진 경로 1, 2, 3을 따라 벽으로부터 채널중심방향으로 측정된 축방향속도의 분포인데, 지지격자에서 $2D_h$ 의 위치에서는 지지격자의 형상을 따라 z/H 가 0.22와 0.41인 부수로 중심점에서 최고값을 가져야 하는 축방향속도가 그 자리에 위치하는 지지격자 스트랩(strap)을 따라 후류에 의해 결손(defect)된 양상을 확인할 수 있다. 이 결손된 질량은 하류방향 $8D_h$ 를 지나면서 회복되고, $32D_h$ 에서는 거의 발달하여 지지격자보다는 부수로 형상에 의존하는 유동형태가 관찰되었다. 이는 지지격자가

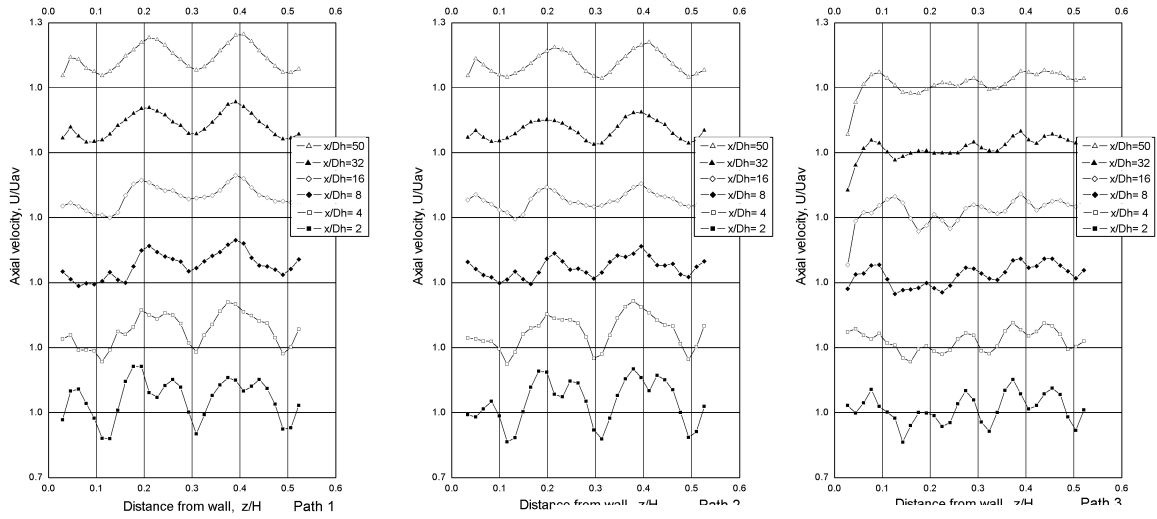
와류의 영향은 $x/D_h=30$



a) 측정점 1. 2. 3. 4. 5. 6



b) 측정점 7. 8. 9. 10. 11. 12

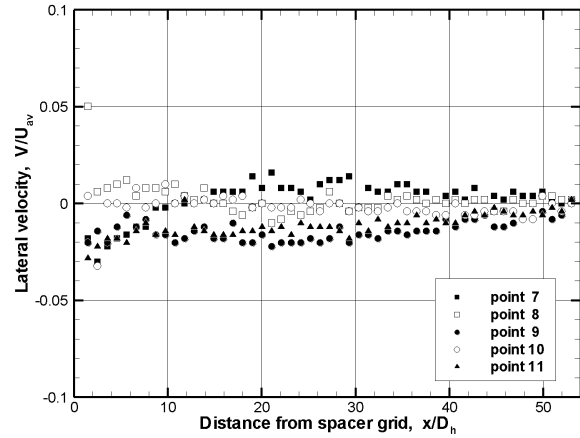


a) 측정경로 1

b) 측정경로 2

그림 4 축

없는 3×3 연료봉다발에 대해 실험한 Neti 등²⁾과 Rowe 등¹⁾의 결과에서도 확인된 것이다. 또, 이와 같은 경향은 두 번째 경로에서도 역시 발견되지만, 세 번째 경로에서는 외부벽의 영향으로 앞의 경향이 관찰



b) 측정점 7, 8, 9, 10, 11, 12

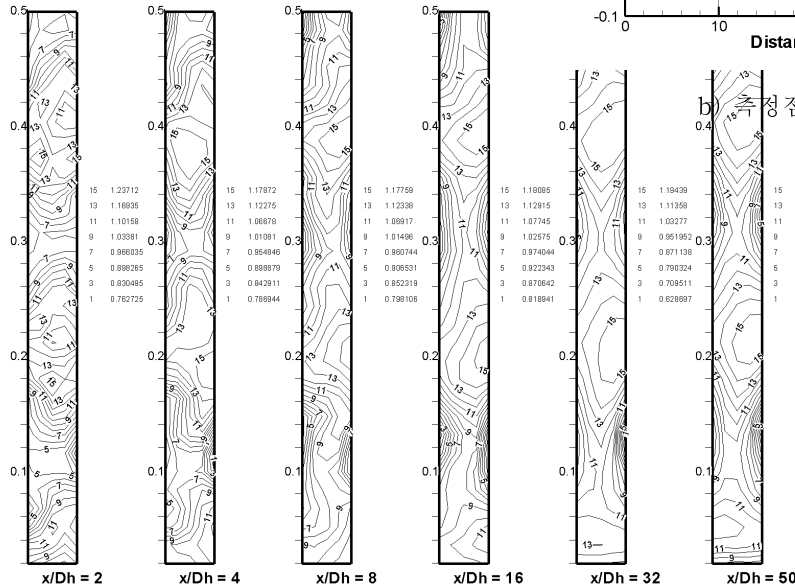


그림 5 축방향속도의 z-y평면상의 분포

되지 않았다. 축대칭 중심에서 가까운 첫 번째 경로에서 유동의 특성을 보다 자세하게 이해하기 위해 경로 1 방향의 부수로 5개의 경로로 나누어 측정하여 지지격자에서 같은 하류방향거리를 가지는 부수로 평면상의 등속도선을 그림 5에 나타내었다. 지지격자

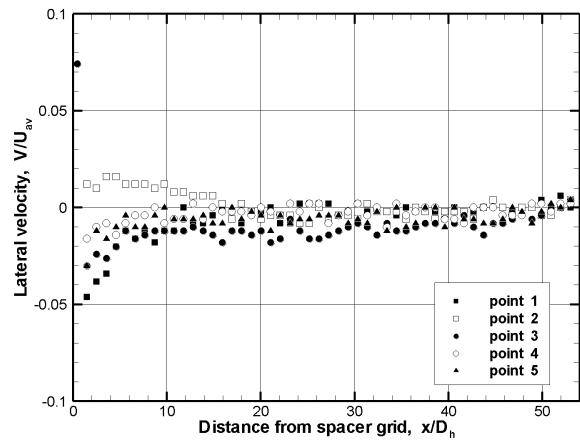
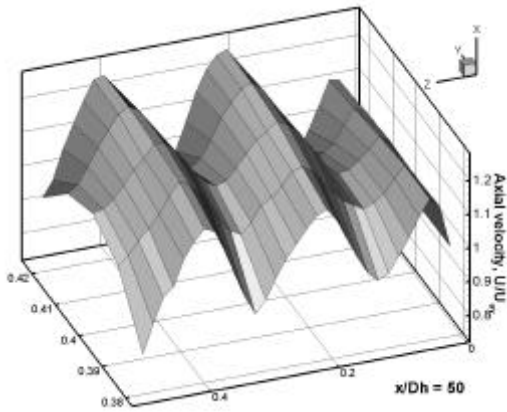


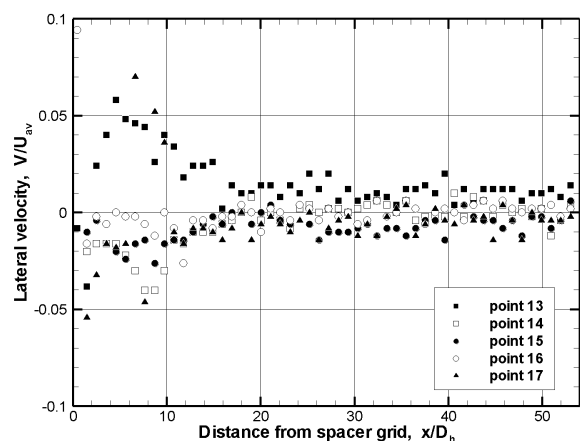
그림 6 $x/D_h=50$ 의 부수로에서 축방향속도

a) 측정점 1, 2, 3, 4, 5, 6

하류방향 $2D_h$ 의 위치에서는 부수로 중심에서 연료봉 배열에 대해 45도 정도 돌아간 방향을 따라 생겨난 4개의 최대값이 십자형태로 교차하는 지지격자 띠에 의한 속도 결손을 보다 자세하게 보여준다. $x=50D_h$ 에서의 등속도선을 3차원적으로 나타낸 그림 6에서는 Neti등²⁾의 실험과 같은 형태로 최고값을 가지는 부수로 중심에서는 y방향으로의 구배는 매우 완만하고 연료봉 틈새에서의 y방향구배는 비교적 커서 틈새에서 더 큰 난류강도를 보여주는 Rowe등³⁾의 실험과도 같은 경향임을 알 수 있다.

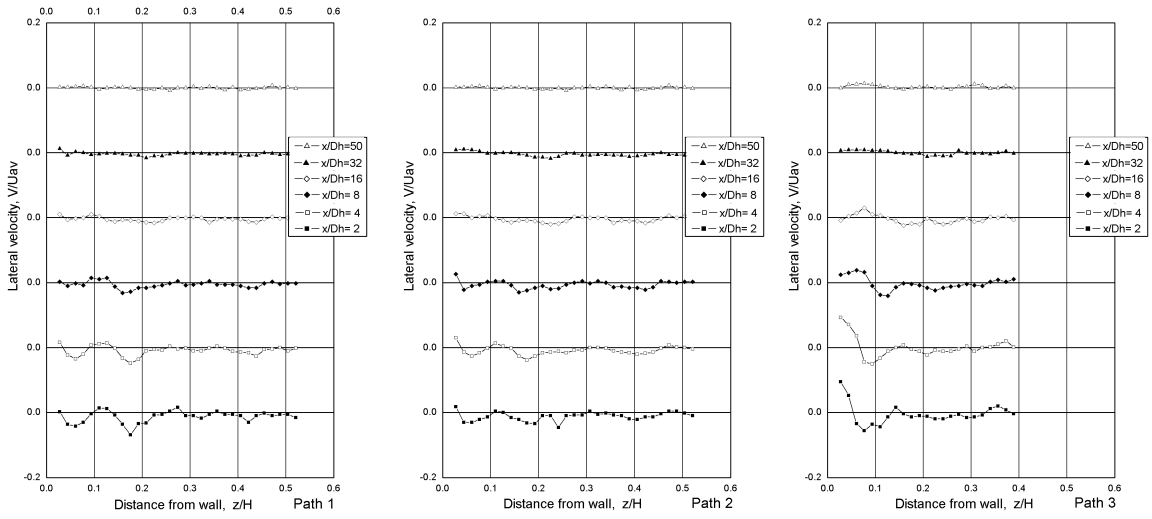
3.2 횡방향속도

유동방향에 따른 횡방향속도의 경향을 보여주는 그림 7에서는 지지격자 가까운 하류에서는 축방향속도의 2-5%정도의 값을 가졌으나 느리게 감쇠하여 0에 가까워지는 양상을 보여주고 있으며, 부수로 중심의 속도 절대값이 연료봉 틈새의 값보다 전체적으로 더 큰 것이 관측되는데, 이는 틈새의 좁은 형상이 유동을 압박하여 일어나는 현상으로 이해될 수 있다. 그림 7c)의 위치 13에서 보여지는 큰 횡방향속도는 4각 채널 모서리에서 생겨나는 모서리방향의 활발한 2차 유동의 영향으로 사료된다. 이 영향으로 인해 모서리의 난류강도가 커지는데, 이는 Rowe등³⁾이 실험에 대해 논의했던 바와 같다. z방향의 횡방향속도 분포가 그림 8에 보여지는데, 지지격자 가까운 위치에서는 벽으로부터 폭의 대략 1/4 점까



c) 측정점 13, 14, 15, 16, 17, 18

그림 7 횡방향 속도의 축방향 분포



a) 측정경로 1

b) 측정경로 2

c) 측정경로 3

그림 8 횡방향속도의 z방향 분포

지 횡방향속도가 존재하고 축대칭중심에 가까운 위치에서는 거의 0에 가까운 값이다. 이는 횡방향유동이 내부 부수로부터는 벽에 가까운 부수로부터 혼합효과가 더 크고, 주로 벽쪽에서 지지격자에 의한 난류영향이 하류로 더 많이 영향을 준다고 생각할 수 있는데, 그림 8a)와 8c)를 비교함으로써 이 것을 예상할 수 있다.

3.3 난류 강도

축방향 난류강도는 그림 9a)-c)에서 볼 수 있는 것처럼 매우 급격하게 감쇠하여 거의 일정한 값을 가지는데, 이는 횡방향 난류강도를 보여주는 그림 10과 비교할 때, 그 크기 변화가 상대적으로 작다고 할 수 있다. 횡방향난류강도 역시 지지격자 하류 2D_h지점까지 급격히 감쇠한다. 이는 혼합날개를 가지는 지지격자에 비해 지지격자의 형상이 단순하기 때문인 것으로 사료된다. 지지격자를 지난 유동의 난류강도의 감쇠를 이해하기 위해 mesh나 screen을 지난 난류의 감쇠이론을 이용하여 설명하면, Sreenivasan등¹⁰⁾의 난류강도의 감쇠함수는

$$\frac{\overline{u'^2}}{U^2} = a \left(\frac{x}{M} - \frac{x_0}{M} \right)^{-n} \quad \dots\dots\dots(3)$$

의 형태이고, 여기서 a와 M 값은 격자의 형상에 따른 값인데, 이 경우의 M은 Yang과 Chung⁵⁾과 같이 피치 P로 쓸 수 있다. 지지격자에 의한 두 방향의 난류감쇠를 곡선적합하여 위와 유사한 형태로 얻어보면 다음과 같고, 이는 그림 11a)와 b)에 나타나 있다.

$$\frac{\overline{u'^2}}{U^2} = 0.03 \left(\frac{x}{P} \right)^{-0.82} \quad \dots\dots\dots(4)$$

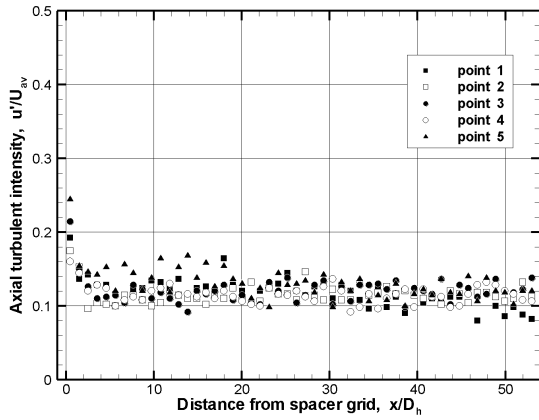


그림 9a) 축방향 난류강도(측정점 1-6)

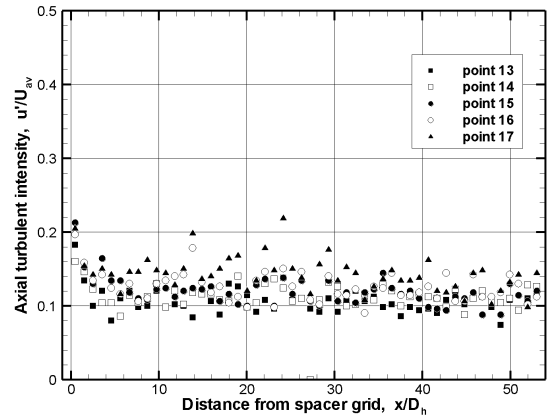


그림 9b) 축방향 난류강도(측정점 12-18)

$$\frac{\overline{v'^2}}{U^2} = 0.028 \left(\frac{x}{P} \right)^{-1.78} \quad \dots\dots\dots(5)$$

앞의 그림 11에서 보여지는 바와 같이, 축방향의 난류감쇠가 횡방향에 비해 완만한 경향

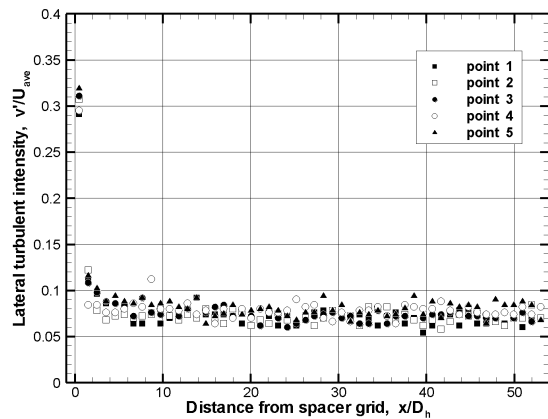


그림 10a) 횡방향 난류강도(측정점 1-5)

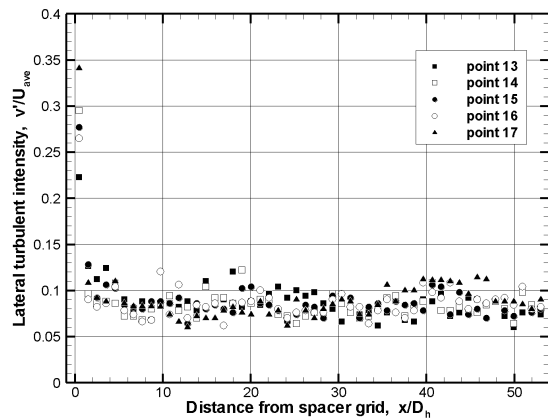


그림 10b) 횡방향 난류강도(측정점 12-17)

을 함수의 지수 크기로부터 비교가능하며, 이 값은 Yang과 Chung⁵⁾의 -1.2와 유사한 정도의 크기를 가지며 이는 유동의 레이놀즈수가 유사하기 때문으로 이해될 수 있다. 이는 Hinze¹¹⁾에 따르면 빠르게 감쇠하며 상사성이 성립하는 높은 파동수(wave number)를 가지는 난류 특성이다. 초기값에 해당하는 상수 값은 양방향에 비슷하지만, 혼합날개를 가지는 경우의 값보다 33%이상 작는데 이것은 파동수가 낮으며 초기조건에 의존하는 난류인 혼합날개에 의한 지지격자 하류의 난류강도가 단순지지격자의 경우보다 더 크기 때문이다. 또, 지지격자 하류의 난류감쇠도 연료봉 다발의 영향이 크기는 하지만, 전체적으로는 격자를 지나는 난류감쇠와 유사한 물리적인 특성을 가진다고 이해할 수 있다.

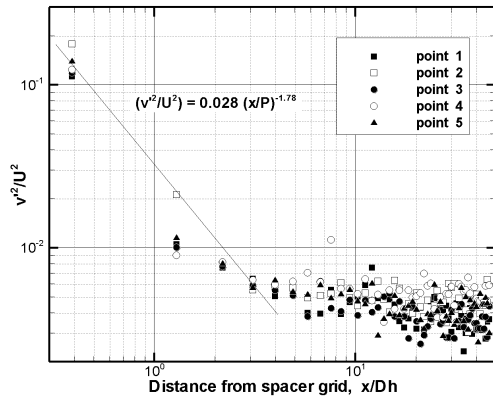


그림 11a) 축방향 난류강도

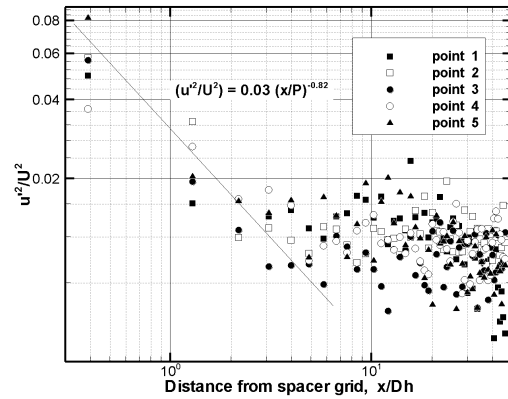


그림 11b) 횡방향 난류강도

4. 결 론

혼합날개가 없는 단순 지지격자를 이용하여 연료봉다발 부수로내에서의 유동 구조와 난류구조를 LDV를 이용하여 규명하였으며, 기존의 지지격자가 없는 경우의 실험과도 정성적으로 비교하였다. 축대칭 중심에서 가까운 부수로에 대해서는 더욱 정밀하게 실험하여 지지격자 형상으로 인한 하류의 유동특성을 보여주었는데, 지지격자 가까운 유동하류에서는 봉다발 보다는 지지격자에 의한 영향이 뚜렷하고, 하류방향 $16D_h$ 정도에서 유동이 봉에 의한 유동특성들을 보여주는 것이 관찰되었다. 유동이 확립된 하류에서의 축방향속도는 지지격자가 없는 경우의 기존 실험들과 속도 분포의 경향이 같았다. 난류강도는 하류방향으로 급속히 감소하는데, 이는 기존의 격자에 대한 실험들에서 보여지는 지수함수적인 감소와 같은 형태임이 곡선적합을 통해 확인되었다. 열수력적인 측면에서 볼 때 유동의 횡방향 난류강도가 물리량의 횡방향 확산에 기여하는 바가 크고 이는 난류확산계수 (Turbulent diffusion coefficient)¹²⁾를 계산하여 비교할 수 있는데, 향후 과제로 횡방향 난류량을 보다 정밀하게 측정함으로 지지격자에 의한 축방향과 횡방향 난류확산 예측에 필요한 실험자료를 구축하는 것이 요구된다. 또, 이는 연료봉다발 부수로내 열수력구조를 이해하고, 활발히 시도되고 있는 지지격자의 혼합날개를 효과적으로 개발하는데 활용될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 중장기 연구개발과제의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

5. 참고문헌

- [1] Rowe, D. S., Johnson, B. M. and Knudsen, J. G., "Implications concerning rod bundle crossflow mixing based on measurements of turbulent flow structure," Int. J. of Heat Mass Transfer, Vol. 17, pp407-419, 1974
- [2] Neti, S., Eichhorn, R. and Hahn, O. J., "Laser measurements of flow in a rod bundle," Nuclear Eng. and Design, 74, pp. 105-116, 1982
- [3] Rowe, D. S. and Chapman, C. C., "Measurement of turbulent velocity, intensity and scale in rod bundle flow channels containing a grid spacer," BNWL-1757, 1973
- [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 rod bundle," Nuclear Eng. and Design., Vol. 125, pp. 111-119, 1991
- [5] Yang, S. K. and Chung, M. K., "Turbulent flow through spacer grids in rod bundle," J. of Fluids Eng. Trans. ASME, Vol. 120, pp. 786-791, 1998
- [6] Oh, D. S., In, W. G. and Chun, T. H., "Structure of turbulent flow in subchannel of rod bundle downstream of spacer grid with hybrid flow mixing device," Proceedings of ICONE 10, ICONE10-22264, pp. 1-13, 2002
- [7] Trupp, A. C. and Azad, R. S., "The structure of turbulent flow in triangular array rod bundles," Nuclear Eng. and Design, 32, pp. 47-84, 1975
- [8] Rehme, K. and Trippe, G., "Pressure drop and velocity distribution in rod bundles with spacer grids," Nuclear Eng. Design, 62, pp. 349-359, 1980
- [9] "FiberFlow : Installation and User's guide," Dantec Measurement Technology, 1995
- [10] Sreenivasan, K. R., Tavoularis, S., Henry, R. and Corrsin, S., "Temperature fluctuations and scales in grid-generated turbulence," J. of Fluid Mech., Vol. 100 Part 3, pp. 597-621, 1980
- [11] Hinze, J. O., "Turbulence," McGraw-Hill Inc., 1975
- [12] Hejna, J., Vavrin, J., Stursa, M., Pilat, M., Novotny, M. and Janda K., "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