

2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

핵연료봉다발에서 지지격자에 부착된 분리형 혼합날개에 의한
난류 유동에 대한 실험적 연구

An Experimental Study on Turbulent Flow induced by Split Mixing
Vanes in Spacer Grid of Fuel Rod Bundle

김세윤, 장석규, 김복득, 천세영

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

5×5 핵연료봉다발에서 지지격자에 부착된 분리형 혼합날개를 지나는 난류유동의 구조에 대한 연구를 혼합날개가 없는 단순지지격자의 경우와 비교하여 실험적으로 수행하였다. 작동 유체는 상온의 물이고 Reynolds 수가 41500인 경우에서 LDV(Laser Doppler Velocimetry)를 이용하여 2차원 속도장과 난류강도를 측정하여 비교 고찰하였다. 지지격자 하류에서 축방향으로 10배의 수력직경 이내의 위치에서 유동이 빠르게 발달하고, 질량재분포가 이루어지는 것이 관찰되며, 50배의 수력직경 위치의 축방향 속도장은 지지격자 없는 유동의 속도 등고선과 유사한 것이 보여졌다. 지지격자 스트랩의 영향은 매우 빠르게 감쇠하여 사라지지만, 분리형 혼합날개는 유동을 크게 교란시켜 부수로간에, 부수로내에서 질량을 재분포시키고 운동량을 활발하게 교환하는 역할을 하는 것을 관찰하였다. 스월비(swirl ratio) 또한 축방향으로 대수적인(logarithmic) 감쇠를 보여주지만, 초기 최대값과 감쇠율이 혼합날개가 있는 경우의 유동에서 더 큰 것을 알 수 있다. 두 가지 지지격자에서 축방향 난류강도는 혼합날개가 있는 경우에 예상과 같이 더 큰 값을 가지며, 측정 평면상의 각 방향 난류강도를 면적에 대해 적분을 수행하여 평균값을 비교하면, 감쇠의 경향과 확립되는 축방향 위치는 관찰된 다른 물리량과 크게 다르지 않았다. 두 가지 지지격자에서 난류강도의 평균값의 차이를 분리형 혼합날개만의 효과라고 이해할 수 있는데, 이 효과 역시 대수적으로 감쇠하며, 축방향 8배의 수력직경 위치에서 소멸되는 것을 알 수 있다.

Abstract

An experimental study has been carried out to investigate the structure of the flow in the subchannels of 5×5 rod bundle and the spacer grid with split mixing vanes being compared with the flow through the plain spacer grid. Two-dimensional velocity fields and turbulence intensity were measured and compared using LDV in water of normal temperature in a Reynolds number of 41500. In the downstream of spacer grid, within 8 D_h of axial distance from the spacer grid the flow developed sharply and the mass redistributed. At 50 D_h the axial flow field shows similar tendency to that of the bare rods. The effect of the strap decays significantly, but the effect of the split vanes mixes the flow in the subchannel and between subchannels, redistributes the mass and transports the momentum. The swirl ratio shows logarithmic decrease in axial direction in both spacer grid, but the initial maximum value and decay ratio are larger in the case of split vane spacer grid. The Axial turbulence intensity is also larger in downstream of split vane as predicted, The average values of turbulence intensity in axial and lateral direction defined with integration in the measurement planes show similar trend. The difference between two average values of turbulence intensity can be understood as the effect of the split vane only, and this effect decreases logarithmically likewise and vanishes about 8 D_h of axial distance from the spacer grid.

Keyword: Spacer grid ; 지지격자 , Rod bundle ; 연료봉다발 , LDV ; 레이저 유속계 , Split mixing vane ; 분리형 혼합날개, Plain spacer grid ; 단순 지지격자

1. 서 론

연료봉다발 사이를 흐르는 냉각재의 유동구조와 이에 영향을 주는 인자들에 대한 고찰과 열수력 특성에 대한 이해는 원자로심 개발에 있어서 매우 중요한 부분이다. 연료봉 사이의 공간에 만들어진 부수로에서 생기는 난류는 매우 복잡한 3차원적 특성을 가지고 있으며, 이 부수로의 난류량 전달과 질량의 재분포 등의 현상은 냉각성능과 같은 설계인자에 큰 영향을 주게 된다. 근래에 원자로심의 열수력 성능을 개선하기 위한 복잡한 형상의 지지격자와 혼합날개에 대한 개발이 활발히 시도되고 있고, 많은 실험적 연구와 해석적 연구가 진행되어져 왔다.

실험적으로 혼합날개의 효과를 연구한 경우로는, Shen 등¹⁾이 LDV를 이용하여 혼합날개가 부착된 지지격자를 사용한 유동장에서 부수로간의 비대칭적인 횡류속도와 난류강도를 측정하여 혼합율이 혼합날개의 각도의 함수임을 관찰하여 적합한 날개각도를 제시하

였고, Karoutas 등²⁾은 PWR 코어의 연료 설계 개선을 위해 분리형 혼합날개가 있는 형상과 squeezed 튜브가 있는 지지격자 형상에서 2차원 속도장과 스윙비를 LDV를 사용한 실험과 전산 유체역학을 이용한 계산을 비교하여 속도장내에서 예측값과 측정값이 비교적 잘 일치하는 것을 보였다. Yang 등³⁾도 역시 LDV를 사용하여 혼합날개가 있는 경우의 부수로 난류거동을 실험하여 지지격자 하류의 난류감쇠 현상이 격자에 의한 난류감쇠 기구와 연관되어 있는 것을 확인하였다. Oh 등⁴⁾은 열전대를 활용하여 3×3 hybrid 혼합날개가 있는 지지격자 후류와 난류강도, 난류확산계수 그리고, 혼합날개에 의한 스윙수 등을 비교하여 새로운 형태의 혼합날개의 열수력 성능을 비교였다. Langford 등⁵⁾은 PIV(Particle Image Velocimetry)를 이용해 두 가지 형태의 분리형 혼합날개를 가지는 지지격자에서 유동에 수직한 단면상의 스윙과 와도(Vorticity) 분포를 연구하여 횡방향 유속이 대수적으로 감쇠하는 현상을 관찰한 바 있고, Smith 등⁶⁾은 수치해석 도구를 이용한 계산결과를 Langford 등의 실험 결과와 비교하여 계산도구로서의 수치해석 방법을 검증하였다. 김세윤 등⁷⁾은 분리형 혼합날개에 의한 난류 효과를 비교하기 위해 여러 가지 Reynolds 수의 유동조건에서 LDV를 이용한 실험을 수행하여, 국부적인 속도장은 Reynolds 수에 의존하지만, 스윙비와 횡류혼합은 Reynolds 수와 같은 유동조건보다는 지지격자 형상에 더욱 크게 의존하는 것을 확인하였다.

앞서 언급한 대로 열수력 성능이 개선된 효율적인 혼합날개와 원자로심 개발을 위해서는 연료봉다발 부수로에서 혼합날개에 의한 난류 혼합과 난류량의 전파 현상을 더욱 자세하게 연구할 필요가 있다. 봉다발 부수로에 의한 효과를 배제하고 혼합날개만의 특성을 연구하기 위해서는 기존의 단순한 지지격자의 실험과 비교하여 연구하는 것이 또한 요긴하다. 그리고, 그간의 실험은 주로 부수로 중심의 속도와 난류량에 크게 집중되어 있었는데, 혼합날개에 의한 3차원적인 효과를 관찰하기 위해서는 유동에 수직한 평면내의 부수로에서 유동을 관찰하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 지지격자에 부착된 분리형 혼합날개로 인한 난류특성 변화와 냉각성능에 영향을 주는 횡방향 속도와 난류량 변화와 스윙비등의 인자를 혼합날개가 없는 단순지지격자의 경우와 비교하여 실험적으로 연구하였다.

2. 실험방법

2.1 실험장치 구성

실험장치는 그림 1에서 보는 바와 같이 수조, 순환펌프, 시험대로

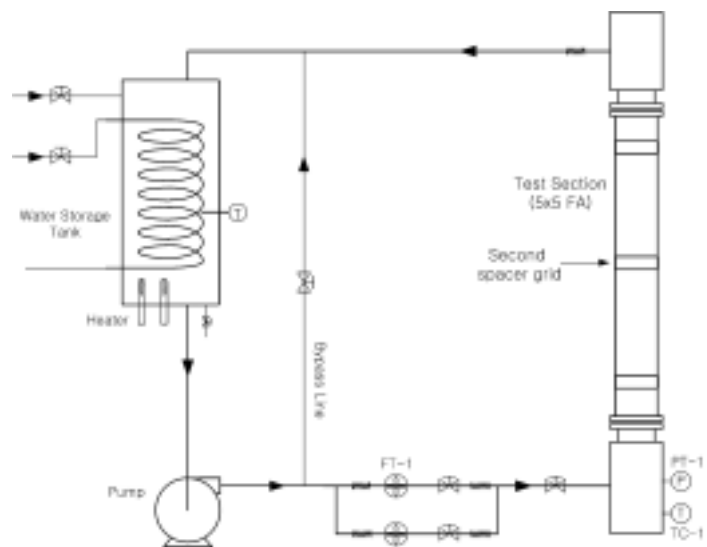


그림 1 실험장치 개략도

구성되는 순환 루프로 구성되어 있다. 실험 중 루프의 조건은 유량계, 온도 및 압력 센서로 감지되며, 수조는 900 liter의 직립원통형으로 순환용수의 온도조절을 위하여 코일형상의 냉각기와 가열기가 각각 장착되어 이들을 제어하는 제어기를 통하여 작동유체를 설정온도로 일정하게 유지하는 기능을 한다. 작동유체 순환펌프로 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. 실험에 1에 나타나 있다.

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

사용된 지지격자의 사양은 표

2.2 측정 위치와 실험 조건

실험 채널은 5×5 핵연료 봉 다발이 장착될 수 있도록 사각 형상($H \times H = 68 \times 68$ mm)이며 재질은 아크릴을 사용하였다. 채널의 길이는 하단에서의 입구 효과와 상단의 출구효과를 줄이기 위하여 하단과 상단 지지격자를 장착하고 중간에 지지



그림 2 혼합날개 지지격자



그림 3 단순 지지격자

격자를 두므로써 두 구간에서 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 지지격자는 그림 2에 보여진 것과 같은 분리형 혼합날개를 가지는 지지격자와 그림 3에 보여진 단순 지지격자이다. 측정위치는 그림 3에서 보여지는 바와 같이 두 번째 지지격자 하류방향으로 측정 방향을 x , 레이저가 투과하는 면을 따라 y , 레이저가 투과하는 축을 중심으로 z 라고 놓고, z 축을 따라 9개의 경로를 측정하여 평면상의 속도장과 난류강도 2차원 분포를 7개의 하류방향 위치에서 얻었다. 실험 루프의 온도

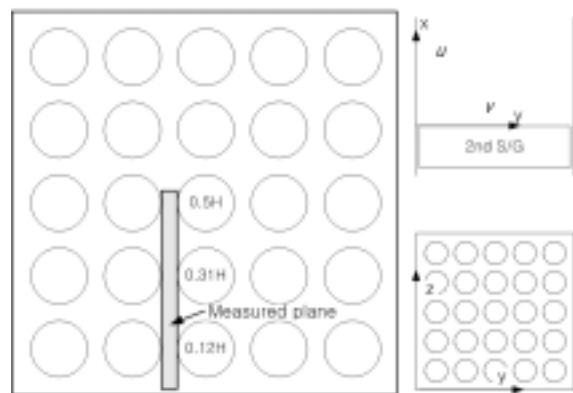


그림 4 측정위치와 단면과 좌표계

는 30. C로 조절되어, 레이놀즈수가 41500의 조건에 대해서 실험되었다.

2.3 LDV 측정

LDV를 이용한 유속측정기술은 움직이는 물체에 조사된 레이저광이 도플러(Doppler) 효과에 의해 물체의 운동 속도에 비례하는 도플러 주파수 편이(Doppler frequency shift)를 일으키며 산란되는데, 이 편이된 주파수를 측정하여 운동하는 물체의 속도를 계산하는 원리이다. 2 차원 각 방향의 레이저 파장은 514.5 nm와 488.0 nm이고, 초점거리 500 mm, 렌즈직경 38 mm, 확장비는 1.98이다. Spectra-Physics사의 Argon-ion 레이저 광원을 이용하여 속도를 측정하여 표시하는 시스템은 후방산란방법을 사용한 Dantec사의 제품이다. 유동장으로부터 측정된 신호는 Dantec사의 BSA 소프트웨어⁸⁾를 이용하여 처리되었다.

3. 실험결과

3.1 속도장과 스월비(Swirl ratio)

지지격자 하류 방향으로 2번째 지지격자에서부터 1, 4, 8, 16, 32, 50배의 수력직경, D_h , 의 거리에 해당되는 6 가지의 위치의 축방향 속도를 그림 5, 6과 같이 등고선을 이용하여 나타내었다. 각 평면마다 414개의 점에서 측정이 수행되었고, 이 결과를 이용하여 속도와 난류요동속도를 등고선으로 나타내었다. 축방향 속도 u 는 봉의 위치와 관계없이 측정되지만, 연료봉 가까운 위치에서는 조사된 레이저가 연료봉에 의해 차단되어 측정값의 y방향 성분은 얻어질 수 없다. 그림 5에서는 단순지지격자를 사용한 경우, 유동의 축방향 속도 등고선을 음영으로 보였다. x/D_h 가 1인 평면에서는 지지격자 스트랩의 형상에 의해 부수로 중심에 국부적인 4개의 최고점이 생기는 것을 볼 수 있는데, 이는 스트랩의 후류가 다른 교란없이 하류방향으로 전파되기 때문이다. 그러나, 이 구조는 곧 혼합되어 하나의 최고점으로 발달되는데, 이것을 x/D_h 가 4인 위치에서 확인할 수 있다. 이것은 Rehme와 Trippe⁹⁾가 6각 배열의 봉다발에서 실험하여 관찰한 것과 같이 축방향 수력직경의 10 배 이내에서 빠른 확립과 질량 재분포가 이루어진다. 축방향 1배의 수력직경 위치에서 확인되는 속도분포가 보여주는 미세한 비대칭성은 지지격자와 봉사이의 지지구조물의 비대칭성에 기인한다. 50배의 수력직경 위치에서는 지지격자가 없는 경우의 발달된 부수로 중심에서 생겨나는 유동구조와 동일하다. 그림 6에 분리형 혼합날개를 지나는 축방향 속도의 등고선이 보여졌는데, 50배의 수력직경 위치에서는 그림 5에서와 마찬가지로 확립된 유동양상을 확인할 수 있다. 분리형 혼합날개에 의한 유동구조는 x/D_h 가 1인 평면에서 볼 수 있는데, 축방향 속도의 국부적인 최대영역이 $0h$ 등⁴⁾의 실험에서 확인된 바와 같은 형상인 것을 알 수 있다. 이 유동구조 또한, 축방향 8배의 수력직경 위치에서는 6개의 봉에 의한 형상에 의존하는 형태의 유동으로 발달해 가는 것이 관찰된다. 두 가지의 지지격

자에 의한 유동 구조를 비교하면, 지지격자 스트랩에 의한 후류의 영향은 매우 빠르게 감소하여 사라지지만, 혼합날개에 의한 효과는 유동을 크게 교란하여 질량이 고루 재분포되게 하는 역할을 한다.

Karoutas 등²⁾이 사용한 횡방향 속도와 축방향 속도 비율의 경로상의 길이 L 에 대한 적분인 스월비 F 는 다음과 같이 계산된다. 여기서 경로는 부수로 중심을 지나가는 z 방향의 측정경로이다.

$$F = \frac{1}{L} \int \frac{|V|}{U} dz \quad \dots\dots\dots(1)$$

기존의 Hejna 등¹⁰⁾과 Yang 등³⁾이 분리형 혼합날개를 사용하여 실험으로 얻은 스월비와 함께 단순지지격자에서 계산된 값과 분리형 혼합날개에서 얻어진 값을 같이 그림 7이면 그림 7을 얻을 수 있다. 스월비가 유동방향으로 지지격자로부터 거리가 멀어지면서 대수적으로 감소하는 대체적인 경향은 서로 비슷하다. 그러나, 분리형 혼합날개가 부착된 지지격자를 지난 유동의 스월비는 단순 지지격자를 지난 유동의 스월비와 비교하여 x/D_h 가 1인 위치에서는 10배 정도 크고 그 감소율도 매우 커서 x/D_h 가 20인 위치에서는 비슷한 크기로 줄어든다. x/D_h 가 50인 위치에서 보여지는 스월비의 미세한 증가는 이 측정위치가 Rehme와 Trippe⁹⁾가 언급한 $5 D_h$ 이내의 ‘상류 효과(upstream effect)’의 범위 안에 들어가기 때문으로 이해된다.

3.3 난류 강도

축방향 난류강도를 그림 8과 그림 9에 나타내었는데, 단순지지격자를 지난 유동의 축방향 난류강도는 부수로 중심에 해당하는 z/H 가 0.215, 0.405인 위치에서 큰 값을 가지지만, x/D_h 가 4의 위치에 도달하기 전에 급속히 감소하는 것이 그림 8에 나타나 있다. 지지격자 하류로 멀어질수록 부수로 중심의 축방향 난류강도는 감소하는데, x/D_h 가 50인 위치에서의 등고선 형태는 Rowe 등¹¹⁾의 실험과 Neti 등¹²⁾의 실험에서 얻어진 분포와 같은 것을 알 수 있고, 그 크기는 더 작운데, 이는 현 실험이 벽효과가 덜 지배적이기 때문으로 이해된다. 그림 9에는 분리형 혼합날개를 지난 유동의 축방향 난류강도가 표시되었다. x/D_h 가 1인 위치에서는 혼합날개의 영향으로 만들어진 스월이 부수로 중심보다는 붕쪽으로 치우쳐서 국부 최대점을 만들어낸 것이 보이고, 이 난류 효과는 $x/D_h = 8$ 의 위치에서 부수로 형상에 의존하는 형태로 바뀌는 것을 볼 수 있다. 오히려 이 활발한 혼합 효과는 x/D_h 가 16인 위치에서 그림 6에서 관찰한 대로 공간상의 속도 구배를 줄여 난류강도의 최저영역이 하류보다 커지는 현상을 만들어 낸다. 이 경우에도 유동의 발달과 함께 난류강도도 확립되지만, 확립된 유동의 난류강도의 최저값이 단순지지격자를 지난 유동의 경우보다 대략 20%정도 더 큰 것을 알 수 있다.

하류방향으로 유동이 가진 각 방향 난류강도의 유동방향에 수직한 단면상의 총량 내지는 평균값을 평가하기 위해서 주어진 평면에 대해 다음과 같은 적분을 취하여 이를 비교

하였다.

$$\frac{1}{A} \int \frac{u'}{U} dA, \frac{1}{A} \int \frac{v'}{U} dA \quad \dots\dots\dots(2)$$

그림 10과 11에는 위의 두 값이 지지격자로부터 축방향 거리에 따라 나타나 있다. 이미 앞에서 관찰된 것처럼 축방향 난류강도 평균값은 지지격자 바로 하류에서 2배 정도의 차이가 나지만, 난류강도 평균값의 감쇠는 분리형 혼합날개를 지난 유동에서 더 빨리 진행되어 축방향으로 8배의 수력직경 위치에서는 거의 같은 수준으로 감쇠된다. 이런 현상은 그림 11의 횡방향 난류강도 평균값의 감쇠에서도 유사하게 발견된다. 그리고, 각 방향에 대해서 두 종류 지지격자의 난류강도 평균값의 차이가 곧 분리형 혼합날개가 만들어 내는 난류 효과의 상대적인 크기라고 생각할 수 있다.

4. 결 론

지지격자에 부착된 분리형 혼합날개의 효과를 규명하기 위해 같은 유동조건에서 단순지지격자와 분리형 지지격자를 지나는 유동의 2차원 속도장과 난류강도를 LDV를 이용하여 측정하여 비교, 고찰하였다. 축방향 속도장을 관찰함으로써 지지격자 스트랩과 지지기구에 의한 후류의 영향은 매우 빠르게 감쇠하여 사라지지만, 혼합날개에 의한 효과는 유동을 크게 교란시켜 부수로간에, 부수로내에서 질량을 재분포시키는 역할을 한다는 결론을 얻었다. 스윙비 또한 축방향에 대해 모두 대수적인 감쇠를 보여주지만, 초기 최대값뿐 아니라 감쇠율에 있어서도 혼합날개가 있는 경우의 유동에서 더 큰 값을 나타내었다. 두 가지 지지격자에서 축방향 난류강도는 혼합날개가 있는 경우에 예상과 같이 더 큰 값을 가지며, 하류방향으로 8배의 수력직경 위치에서 부수로 형상에 의존하는 형태로 발달되는 것을 확인할 수 있었다. 측정된 평면상의 난류강도를 면적에 대해 적분을 수행하여 그 평균값을 각 방향에 대해 비교하여 보면, 그 감쇠의 정도와 확립되는 위치는 관찰된 다른 물리량과 크게 다르지 않았으며, 두 가지 지지격자의 난류강도의 평균값의 차이를 분리형 혼합날개만의 효과라고 이해할 수 있다. 이 혼합날개가 유동에 주는 효과 역시 대수적으로 감쇠하며, 8배의 수력직경 위치에서 소멸된다는 결론을 얻었다.

본 실험을 통해 분리형 혼합날개가 유동에 주는 영향과 유동구조에 대한 자료와 이해를 얻었고, 앞으로 혼합날개의 효과에 대한 이해를 기초로 열수력적 성능이 뛰어난 효과적인 혼합날개와 지지격자를 개발하는 데 본 연구가 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

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

5. 참고문헌

- [1] 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
- [2] Karoutas, Z., Gu, C. Y. and Scholin, B., "3-D flow analysis for design of nuclear fuel spacer," Proceedings of NURETH-7, pp. 3153-3174, 1995
- [3] 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
- [4] 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
- [5] Langford, H. M., Armfield, M. V., Beasley, D. E. and Conner, M. E., "Particle image velocimetry of swirling flow in a subchannel of a rod bundle," Proceedings of ASME FEDSM '01, 2001
- [6] Smith, L. D. III, Conner, M. E., Liu, B., Dzodzo, M. B., Paramonov, D. V., Beasley, D. E., Langford, H. M. and Holloway, M. V., "Bechmarking computational fluid dynamics for application to PWR fuel," Proceedings of ICONE 10, 2002
- [7] 김세윤, 장석규, 천세영, 김복득, "혼합날개가 부착된 지지격자를 가지는 핵연료봉다발 내에서의 난류유동에 관한 실험적 연구," 한국원자력학회 춘계학술발표회, 2003
- [8] Dantec Measurement Technology, "FiberFlow : Installation and User's guide," 1995
- [9] Rehme, K. and Trippe, G., "Pressure drop and velocity distribution in rod bundles with spacer grids," Nuclear Eng. Design Vol. 62, pp. 349-359, 1980
- [10] 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.
- [11] 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. Heat Mass Transfer, Vol. 17, pp. 407-419, 1974
- [12] Neti, S., Eichhorn, R. and Hahn, O. J., "laser Doppler measurements of flow in a rod bundle," Nuclear Eng. and Design, Vol. 74, pp. 105-116, 1982

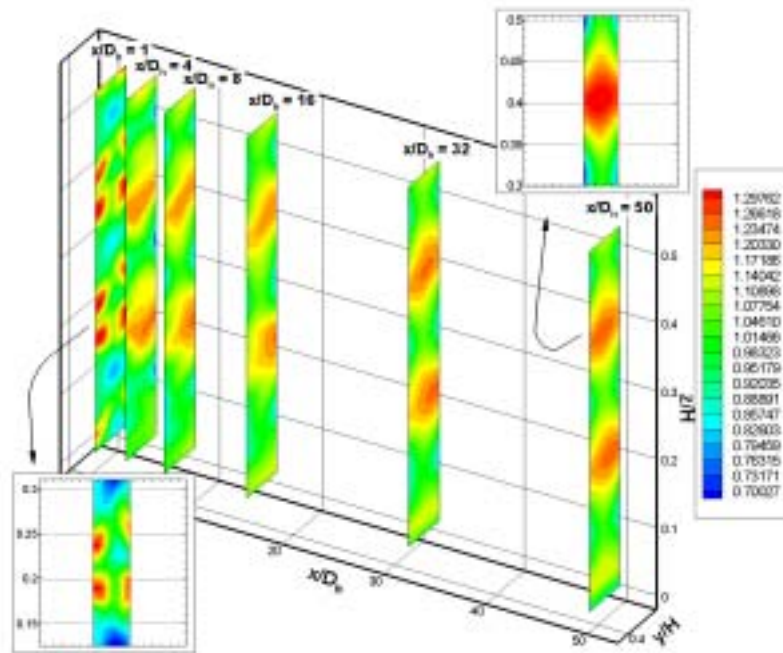


그림 5 단순지지격자에서 축방향 속도의 축방향에 수직한 평면상의 분포

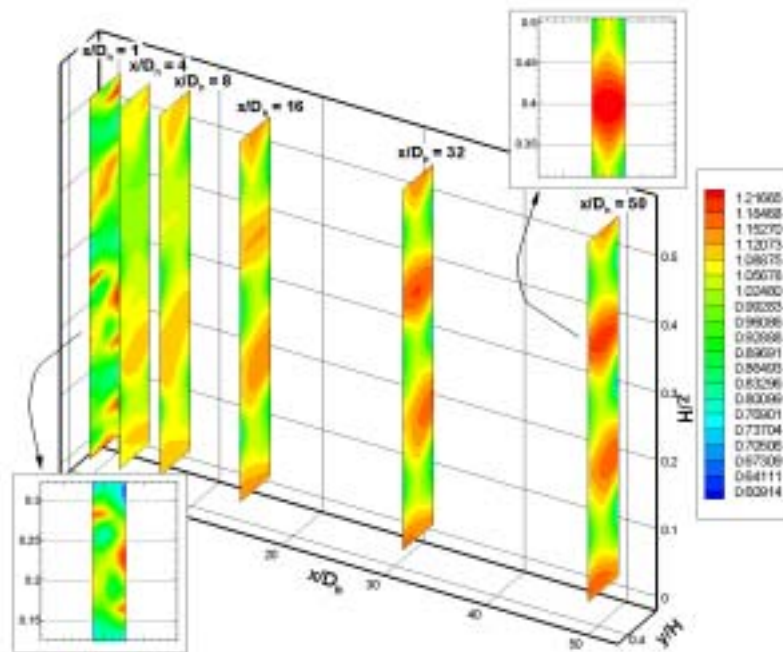


그림 6 분리형 혼합날개가 달린 지지격자에서 축방향 속도의 축방향에 수직한 평면상의 분포

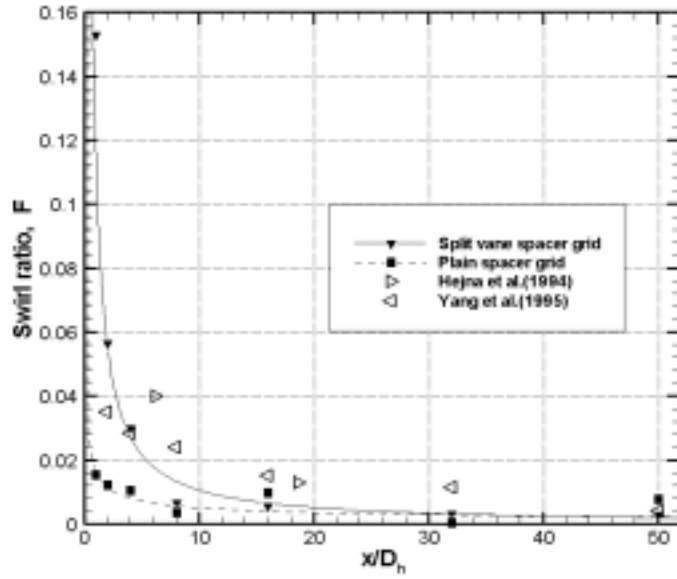


그림 8 축방향 위치에 대한 스윙비

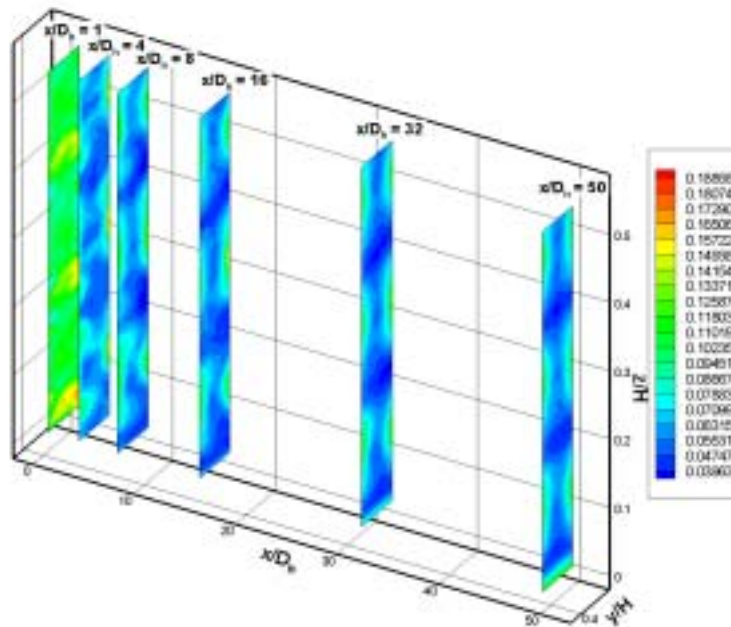


그림 8 단순지지격자에서 축방향 난류강도의 분포

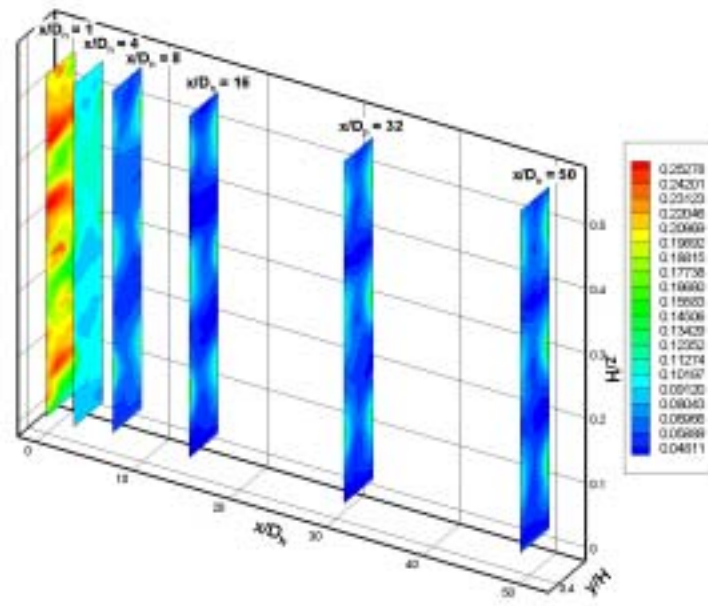


그림 11 분리형 혼합날개가 달린 지지격자에서 축방향 난류강도의 분포

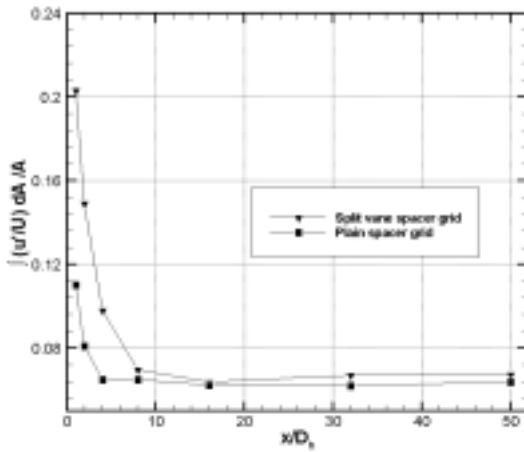


그림 10 축방향 난류강도의 평균값 분포

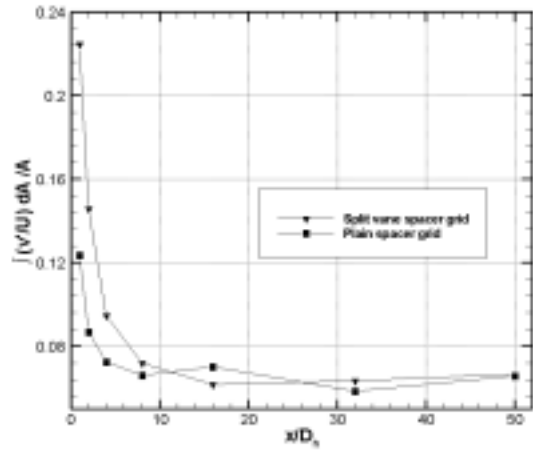


그림 11 횡방향 난류강도의 평균값 분포