

혼합날개가 부착된 지지격자를 가지는 핵연료봉다발 내에서의
난류 유동에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Turbulent Flow in a Fuel
Rod Bundle with Mixing Vane Spacer Grid

김세윤, 장석규, 천세영, 김복득

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

핵연료봉다발과 혼합날개가 부착된 지지격자를 지나는 난류유동의 구조에 대한 연구를 실험적으로 수행하였다. 몇 가지 레이놀즈수에 대해 작동 유체가 상온의 물인 경우에 대해 LDV(Laser Doppler Velocimetry)를 이용하여 2차원 속도장과 난류강도를 측정하여 비교 고찰하였다. 혼합날개에 의해 나타난 속도 분포는 축방향속도와 횡방향속도에서도 피크점의 위치와 개수등에서 레이놀즈수에 관계없이 같은 특성을 보여주고 있지만, 낮은 유량에서 부수로 중심과 봉다발 간극간에 큰 속도차를 보이는 반면, 높은 유량에서는 난류혼합에 의해 위치별 속도 차이가 비교적 작은 것으로 확인되었다. 난류강도 역시 낮은 유량에서 유동 횡방향 측정경로를 따라 비교적 큰 구배를 보여주고 있다. 난류강도의 축방향 감쇠현상은 레이놀즈수와 관계없이 유사한 기구를 가지고 Sreenivasan의 함수와 일치한다. 혼합날개에 의해 부수로에서 생성된 와류는 횡방향 유속 분포에서 관찰할 수 있는데, 스윙수의 측면에서는 레이놀즈수가 높은 경우 더 큰 스윙수를 가지고 이 효과가 더 먼 하류까지 전파된다. 이로부터 난류혼합 및 이와 유사한 기구로 이해되는 열혼합의 횡방향과 하류방향 전달 효과는 높은 유량조건일수록 증가하는 것으로 유추되었다.

Abstract

An experimental study has been carried out to investigate the structure of the flow through subchannels of rod bundle and spacer grid with mixing vanes. Two-dimensional velocity fields and turbulence intensity were measured using LDV in water of normal temperature and pressure in several Reynolds number. In axial

and lateral velocity profile, basic flow structures were maintained with respect to the numbers and spatial position of peak points. In small flow rate the axial velocities in the center of subchannel and the gap between the rods showed large differences, but in higher flow rate, the velocity differences between gap and center were relatively small that could be understood by strong turbulent mixing. The distribution of axial turbulence intensity showed relatively large gradient along the lateral direction in the case of low flow rate. The mechanism of the decay of turbulence intensity in streamwise direction was similar in several flow rate with Sreenivasan's fuction. The swirl caused by the mixing vanes in subchannel could be observed in lateral velocity profiles. In the viewpoint of swirl ratio, swirling effect propagated well downstream in the flow of high Reynolds number. The thermal mixing in subchannels was analogized with similar mechanism.

Keyword: Spacer grid ; 지지격자 , Rod bundle ; 연료봉다발 , LDV ; 레이저 유속계 ,
Mixing vane ; 혼합날개

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 냉각성능과 같은 설계인자에 큰 영향을 주게 된다. 근래에 열수력 특성을 개선하기 위한 복잡한 형상의 지지격자와 혼합날개에 대한 개발이 활발히 시도되고 있고, 많은 실험적 연구와 해석적 연구가 진행되어져 왔다. 최근에는 속도장뿐 아니라 난류특성들을 이해할 수 있는 다양한 실험방법들이 진행되고 있다. 또, 수치계산 방법의 발달과 함께 컴퓨터의 계산성능 향상으로 수치해석적인 접근 또한 활발하다.

실험적으로 혼합날개의 효과를 연구한 경우로는 Shen 등¹⁾이 LDV를 이용하여 혼합날개가 있는 지지격자를 사용한 부수로에서의 횡류속도와 난류강도를 측정하여 혼합율이 혼합날개의 각도의 함수임을 관찰한 예가 있고, Karoutas 등²⁾은 혼합날개가 있는 형상과 Squeezed 튜브가 있는 지지격자 형상에서 2차원 속도장과 스월비(Swirl ratio)를 LDV를 사용한 실험과 계산을 비교하여 비교적 의미있는 결과를 얻었다. Yang 등³⁾도 역시 LDV를 사용하여 혼합날개가 있는 경우의 부수로 난류거동을 실험하여 지지격자 하류의 난류감쇠 현상과 국부 열혼합 계수 변화를 연구하였고, Oh 등⁴⁾은 열전대를 활용하여 3×3 혼합날개가 있는 지지격자 후류와 난류강도, 난류확산계수 그리고, 혼합날개에 의한 스월수 등에 대해 연구한 바 있다. Langford 등⁵⁾은 PIV(Particle Image Velocimetry)를 이용해 유동에 수직한 단면상의 스월과 와도(Vorticity) 분포를 연구한 바 있고, Smith 등⁶⁾은 수

치해석 도구를 이용한 계산결과를 Langford 등의 실험 결과와 비교하여 계산도구로서의 수치해석 방법을 검증하였다.

앞서 언급한 수치적, 이론적 해석을 위해서는 여러 가지 유량에 대한 부수로에서의 속도장과 난류강도에 대한 더욱 자세한 정보가 필요하다. 특히, 저유량의 경우에는 실험자료가 부족한 실정인데, 재관수와 같은 낮은 유량과 유속 조건에서 혼합날개의 효과로 인한 난류혼합과 냉각성능의 증감에 대해서 연구하는 것이 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 지지격자에 부착된 혼합날개로 인한 난류특성 변화와 냉각성능에 영향을 주는 횡방향 속도와 난류량 변화와 스웰비등의 인자가 레이놀즈수에 따라 어떤 추이를 갖는 지에 대해 실험적으로 연구하였다.

2. 실험방법

2.1 실험장치 구성

실험장치는 그림 1에서 보는 바와 같이 수조, 순환펌프, 시험대로 구성되는 순환 루프로 구성되어 있다. 실험 중 루프의 조건은 유량계, 온도 및 압력 센서로 감시되며, 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 사용된 지지격자의 사양은 표 1에 나타나 있고, 혼합날개는 그림 3에 보여진 바와 같은 분리형 날개이다.

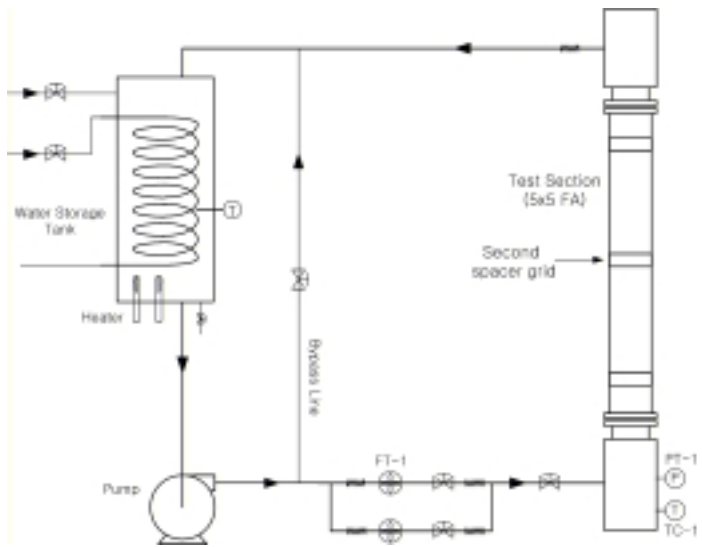


그림 1 실험장치 개략도

2.2 측정 위치와 실험 조건

실험 채널은 5×5 핵연료봉 다발이 장착될 수 있도록 사각형상($H \times H = 68 \times 68$ mm)이며 재질은 아크릴을 사용하였다. 채널의 길이는 하단에서의 입구 효과와 상단의 출구효과를 줄이기 위하여 하단과 상단 지

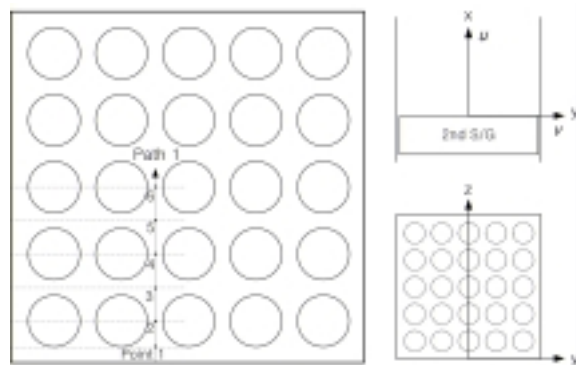


그림 2 측정위치와 단면과 좌표계

지지격을 장착하고 중간에 지지격을 뚫으로써 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 혼합날개를 가지는 지지격자이다. 측정위치는 그림 2에서 보여지는 바와 같이 두 번째 지지격자 하류방향으로 유동방향을 x, 레이저가 투과하는 면을 따라 y, 레이저가 측대칭 중심으로 움직이는 축을 z라고 놓고, z축을 따라 1개의 경로와 측정경로 위에 부수로 중심과 연료봉 틈새 위치에 6개의 측정점이 선택되었다. 실험 루프의 온도는 27. C로 조절되어, 레이놀즈수가 9370, 17300, 38700, 65900, 79600의 5가지 조건에 대해서 실험되었다.

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 도플러(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. 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. 유동장에서 얻어지는 신호는 Dantec사의 BSA 소프트웨어⁷⁾를 이용하여 처리되었다.

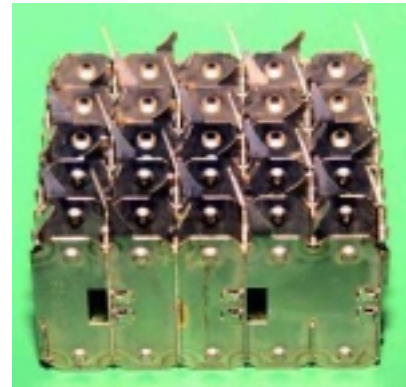


그림 3 혼합날개 지지격자 형상

3. 실험결과

3.1 속도 분포

측정된 결과 중 고유량과 저유량의 특성을 잘 나타내어주는 2 가지 결과($Re = 9370$, 65900)에 대해 속도장과 난류강도를 그림 그려 비교 고찰하였다. 핵연료 다발 중심에 가까운 경로 위의 부수로 중심과 연료봉 틈새의 6점을 따라 지지격자 유동하류 방향으로 측정된 축방향 속도가 그림 4 a), b)에 나타나 있다. 레이놀즈수 $Re = 9370$ 인 유동에서는 지지격자와 혼합날개를 지나면서 생겨난 후류와 큰 와동의 영향으로 수력직경 D_h 의 10배 거리의 지지격자 하류위치, 즉 $x/D_h = 10$ 근처까지 부수로 중심과 연료봉 틈새의 유속 분

포의 기울기가 급격하게 변화하며, $x/D_h=20$ 인 축방향 위치에서 유동이 안정되기 시작하는 것이 관찰된다. 이와 비교하여 $Re=65900$ 인 높은 유량에서는 혼합날개를 지난 축방향 유동이 빠르게 안정되는 것으로 보이는데, 이는 높은 유량 조건에서 혼합날개가 유동을 더 잘 교반시켜 속도구배를 완만하게 만들어 주기 때문으로 이해된다. 이러한 현상은 축방향속도의 z 방향 분포를 보여준 그림 5 a), b)에서 확인할 수 있다. 또, 같은 그림에서 지지격자에서 가까운 하류 위치에서 보여지는 축방향속도의 최고점 위치와 국부 최고점 개수 등에 있어서 레이놀즈수에 관계없이 일치하는 것은 혼합날개의 특성으로 이해할 수 있다. 레이놀즈수가 작을수록 최고점과 최저점 사이의 속도가 크게 차이 나는데, 이를 더 잘 이해하기 위해 부수로 중심에 해당하는 점 5와 연료봉 틈새에 해당하는 점 4 사이의 축방향속도의 비율을 계산하여 도식화하여 레이놀즈수에 대해 나타내면 그림 6 a), b)와 같다. a)는 지지격자 하류 $x/D_h=2$ 인 위치에서의 두점간 축방향속도 사이의 비율과 축방향 난류강도의 비율이고, b)는 같은 변수의 $x/D_h=50$ 위치에서의 값을 나타내었다. 대략적으로 유속이 증가할수록 전체적인 속도불균형은 줄어들는데 이는 활발한 난류 교란에 의한 것임을 유추할 수 있다. 또, 유속이 증가할수록 바깥쪽 유로보다는 안쪽 유로로 상대적으로 많은 유량이 지나가는 것이 관찰되고 이것은 김세윤 등⁸⁾이 실험한 혼합날개가 없는 지지격자의 경우에서도 확인된 것과 유사하다.

횡방향속도에서도 앞에서 보여졌던 것과 같이 지지격자 하류방향으로 높은 레이놀즈수에서 더 빠른 감쇠가 보여지나 그 정도는 축방향 유동의 경우에 비해 미미하며, 이는 그림 7 a), b)에 나타나 있다. 두 가지의 레이놀즈수에서 z 방향으로 측정된 y 방향(횡방향) 속도는 그 최고점 위치나 개수, 크기 등의 특성에서 그 분포가 크게 다르지 않은데, 이 역시 그림 8 a), b)에서 보는 바와 같이 높은 유량에서 약간 빠르게 감쇠하며 혼합날개의 특성을 보여준다. 부수로의 중심에 해당하는 z/H 가 0.22, 0.41인 위치에서는 이 위치를 중심으로 횡방향 속도가 축을 중심으로 하여 양에서 음으로 교차하는데 이 것은 혼합날개에 의한 부수로 중심과 그 중심이 일치하며 하류로 진행되는 스윙 효과인 것을 알 수 있다.

3.3 난류 강도와 스윙비(Swirl ratio)

축방향과 횡방향 난류강도는 그림 9에서 그림 12에 나타나 있는데, 그림 9 a)와 그림 10 a)에서 보여지는 것과 같이 지지격자 가까운 하류위치에서 속도구배와 상관관계를 가지는 난류강도는 축방향 속도구배가 상대적으로 큰 낮은 유량에서 더 큰 난류강도를 가지고, 지지격자에서 먼 하류에서도 부수로 위치에 따라 난류강도의 정도가 다른 것이 관찰된다. 이는 난류강도가 국부 축방향속도로 무차원화 되었는데, 앞서 고찰한 대로 부수로 위치에 따른 축방향 속도가 z 방향으로 뚜렷하게 분포를 보이기 때문인 것으로 사료된다. 이에 비해 횡방향 난류강도(그림 11, 12)는 유량에 크게 영향을 받지 않는 것처럼 보이는데, 이는 앞에서 보여진 횡방향 속도구배가 유량에 따라 크게 다르지 않은 사실과 연관성을 가진다. 지지격자를 지난 유동의 난류강도의 감쇠를 이해하기 위해 mesh나

screen을 지난 난류의 감쇠 현상을 이용하여 설명하면, Sreenivasan 등⁹⁾의 난류강도의 감쇠함수는

$$\frac{\overline{u'^2}}{U^2} = a \left(\frac{x}{M} - \frac{x_0}{M} \right)^{-n} \quad \dots\dots(1)$$

의 형태이고, 여기서 a 와 M 값은 격자의 형상에 따른 값인데, 이 경우의 M 은 Yang과 Chung³⁾과 같이 피치 P 로 쓸 수 있다. 혼합날개와 지지격자에 의한 축방향의 난류감쇠를 Yang과 Chung이 사용한 다음의 식과 함께 그림 13 a), b)에 나타내 보면 유량이 다른 경우에도 같은 추이를 가지는 것을 확인할 수 있고, 이 감쇠 기구는 유량에 대해 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

$$\frac{\overline{u'^2}}{U^2} = 0.04 \left(\frac{x}{P} \right)^{-1.2} \quad \dots\dots(2)$$

Karoutas 등이 사용한 횡방향 속도와 축방향 속도 비율의 경로상의 길이 L 에 대한 적분인 스윙비 F 는 다음과 같이 계산된다.

$$F = \frac{1}{L} \int \frac{|V|}{U} dz \quad \dots\dots(3)$$

그림 14에서 보는 바와 같이 실험되었던 여러 가지의 다른 유량에 대해 비교하면 Karoutas 등의 결과와 크게 다르지 않은 결과를 얻을 수 있는데, 유량이 증가할수록 스윙비가 증가하고 이 증가된 스윙의 영향이 지지격자로부터 더 먼 유동하류까지 전파되는 것으로 확인되었다.

4. 결 론

혼합날개가 부착된 지지격자를 가지는 연료봉다발 부수로내에서의 유동과 난류구조를 LDV를 이용하여 몇 가지 유량에 대해 규명하였다. 축방향과 횡방향 속도분포에서 보여주는 피크점의 위치와 개수 등의 특징은 레이놀즈수에 관계없이 같은 것으로 보여졌다. 얻어진 축방향속도 분포로부터 레이놀즈수가 감소할수록 혼합날개에 의한 유동 교란이 줄어들어 부수로 중심과 연료봉 틈새간 질량 분포의 불균형이 심하고 이 것은 횡방향 운동량혼합이 활발하지 않기 때문으로 이해되고, 또 이는 열혼합의 감소로 귀결된다고 유추할 수 있다. 횡방향속도 분포로부터 부수로에 배치된 한 쌍의 혼합날개가 하류방향으로 진행되는 스윙을 만들어내는 것이 관찰되었고, 계산된 스윙비의 비교에서 레이놀즈수가 증가함에 따라 혼합날개에 의한 스윙의 영향이 혼합날개 가까운 하류에서 증가하며, 지지격자의 유동하류 방향으로 스윙 효과가 지속되는 것을 관찰할 수 있었다. 이것으로부터 낮은 유량에서는 물리적인 직관으로 이해할 수 있는 바와 같이 혼합날개에 의한 난류혼

합이 상대적으로 감소되고 더 작은 열전달 효과만을 기대할 수 있다고 사료된다. 본 실험을 통해 저유량에서의 혼합날개의 열수력적 성능 변화에 대한 자료와 대략적인 이해를 얻을 수 있었고, 앞으로 혼합날개의 효과와 레이놀즈수등의 유동조건 사이의 더욱 정밀한 상관 매개변수 연구와 기구를 개발하고, 열수력적 성능이 뛰어난 효과적인 혼합날개와 지지격자를 개발하는 데 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

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

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] Dantec Measurement Technology, "FiberFlow : Installation and User's guide," 1995
- [8] 김세윤, 장석규, 천세영, 김복득, "단순지지격자를 가지는 핵연료봉다발 내에서의 난류 유동에 관한 실험적 연구," 한국원자력학회 추계학술발표회, 2002
- [9] 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

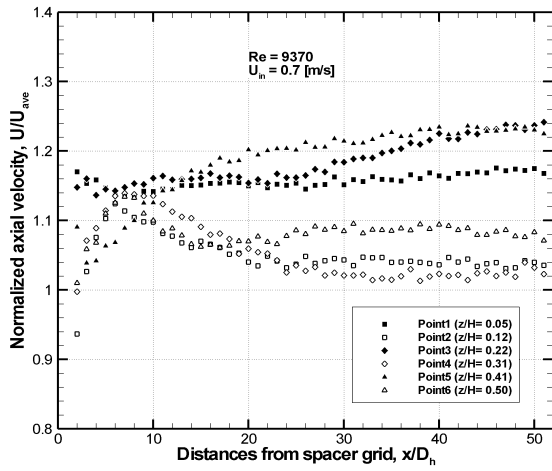


그림 4a) 축방향 속도의 축방향 분포

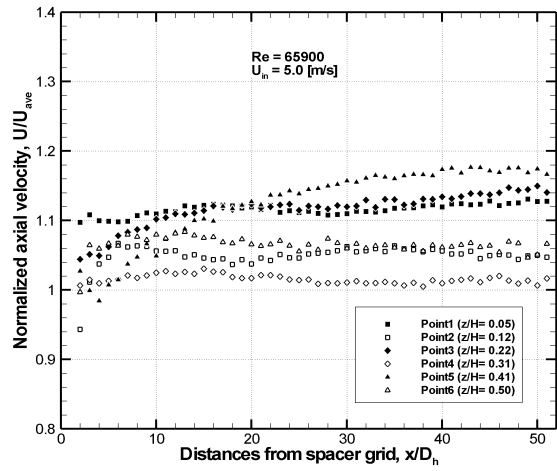


그림 4b) 축방향 속도의 축방향 분포

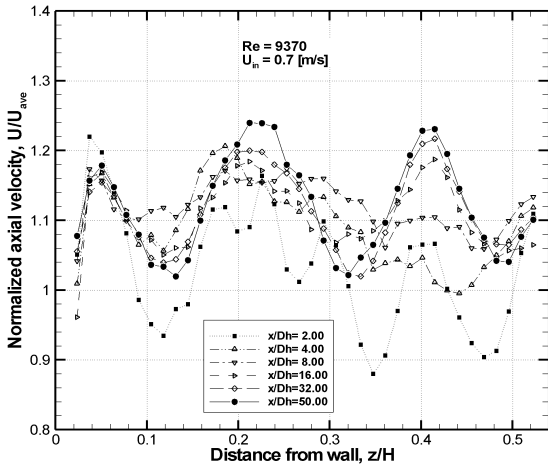


그림 5a) 축방향속도의 z방향 분포

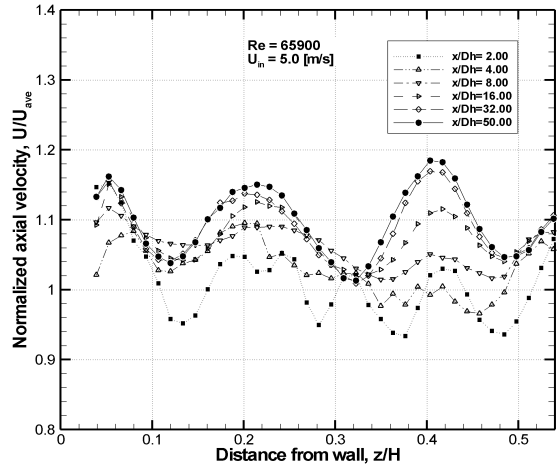


그림 5b) 축방향속도의 z방향 분포

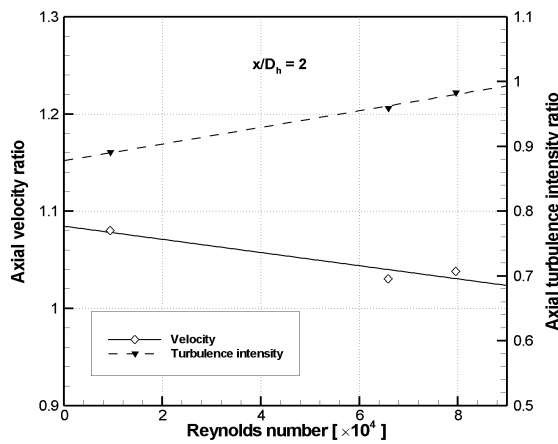


그림 6a) 축방향 속도비와 난류강도비

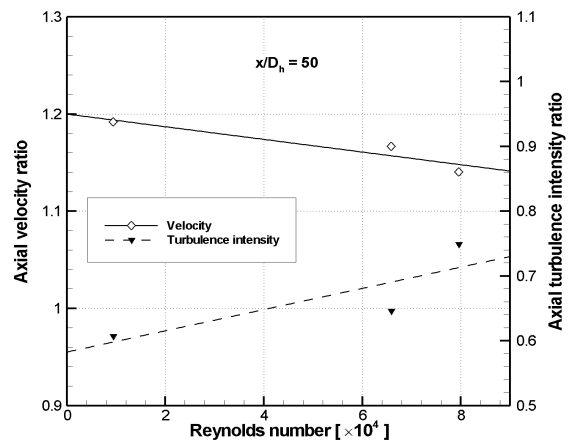


그림 6b) 축방향 속도비와 난류강도비

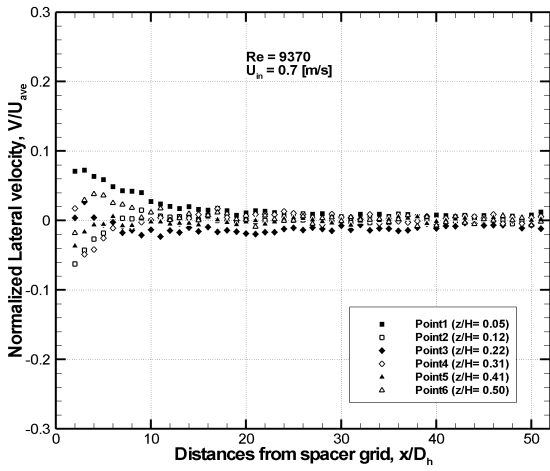


그림 7a) 횡방향 속도의 축방향 분포

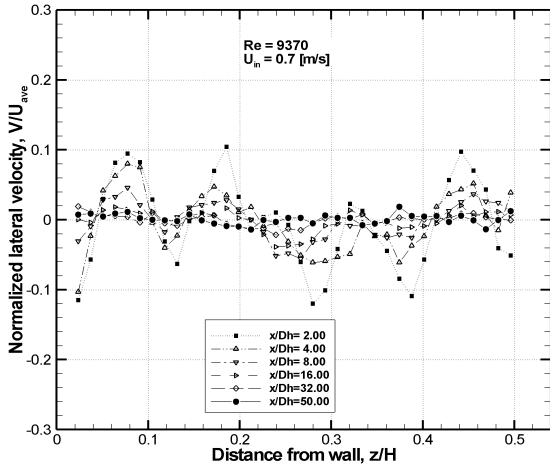


그림 8a) 횡방향 속도의 z방향 분포

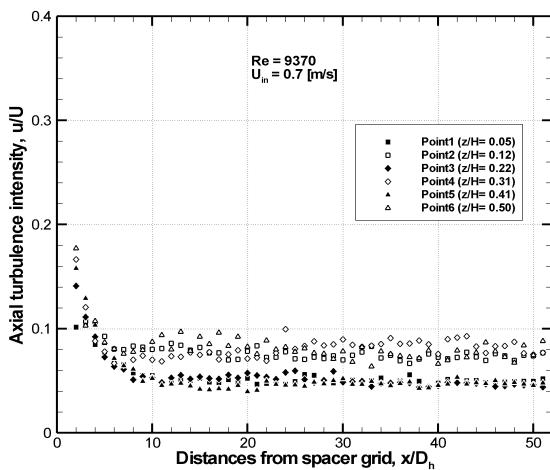


그림 9a) 축방향 난류강도의 축방향 분포

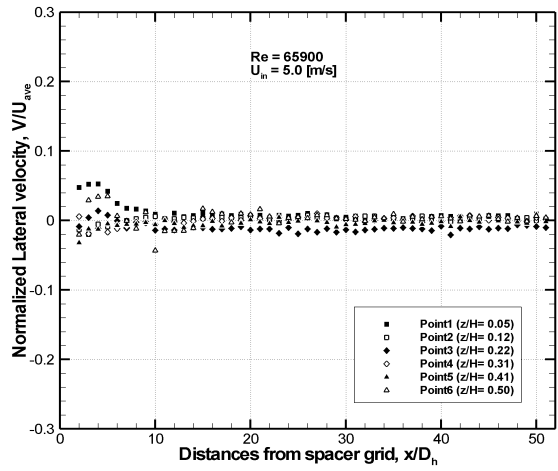


그림 7b) 횡방향 속도의 축방향 분포

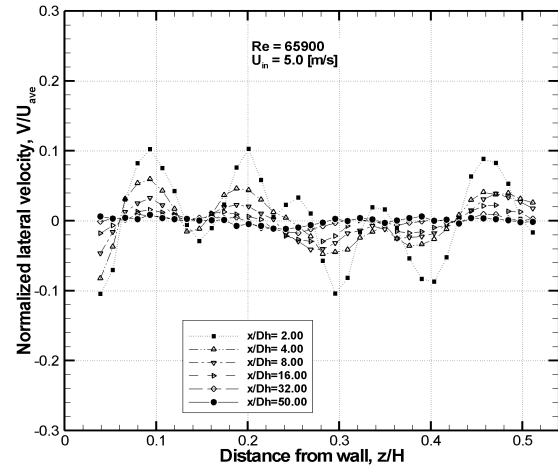


그림 8b) 횡방향 속도의 z방향 분포

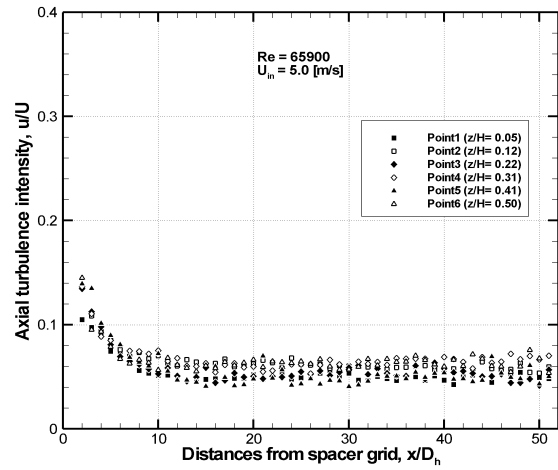


그림 9b) 축방향 난류강도의 축방향 분포

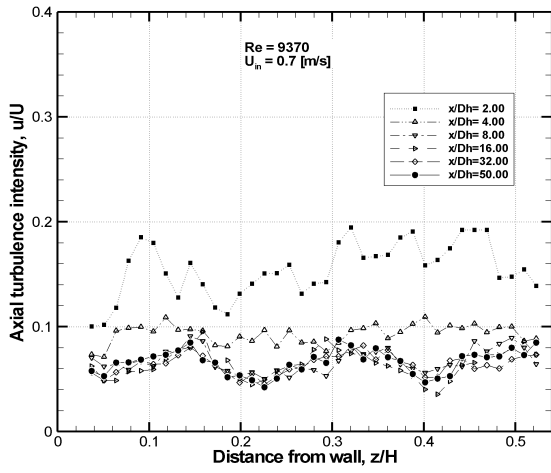


그림 10a) 축방향 난류강도의 z방향 분포

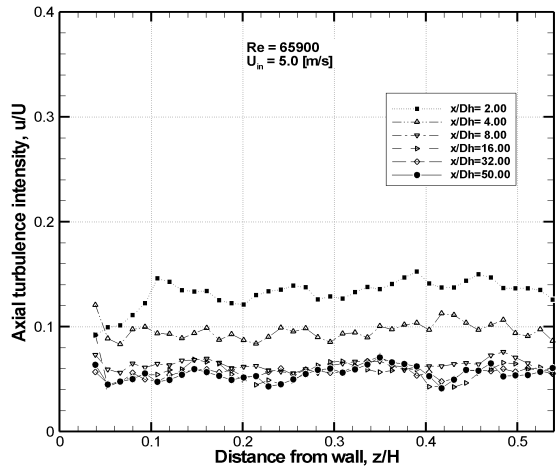


그림 10b) 축방향 난류강도의 z방향 분포

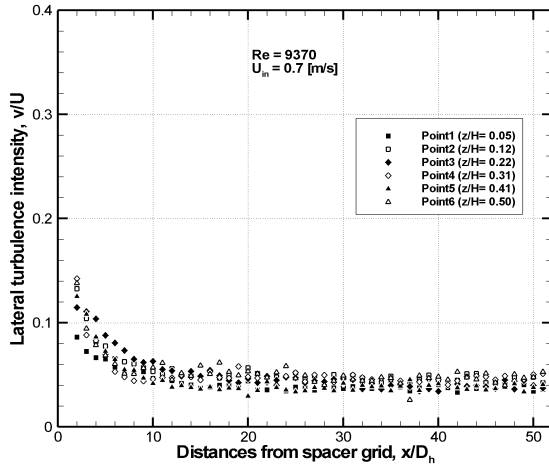


그림 11a) 횡방향 난류강도의 축방향 분포

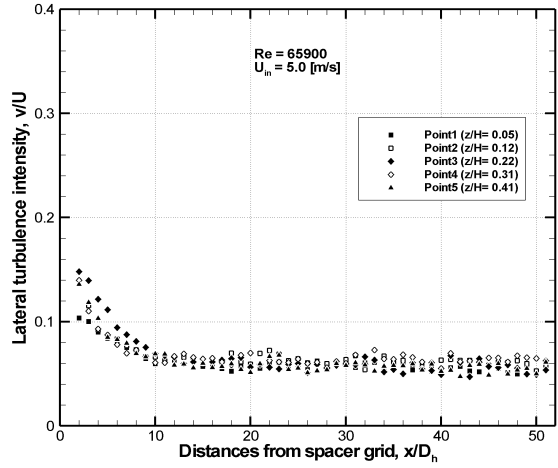


그림 11b) 횡방향 난류강도의 축방향 분포

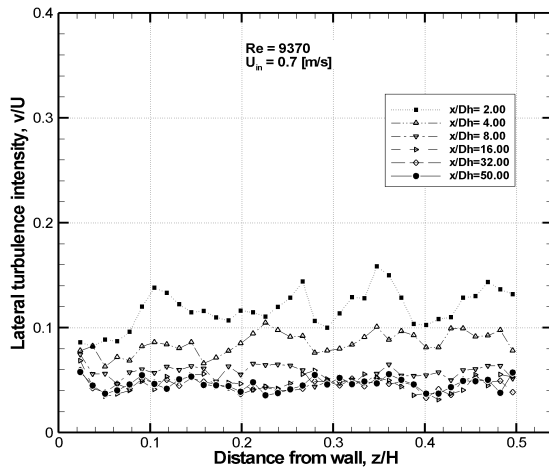


그림 12a) 횡방향 난류강도의 z방향 분포

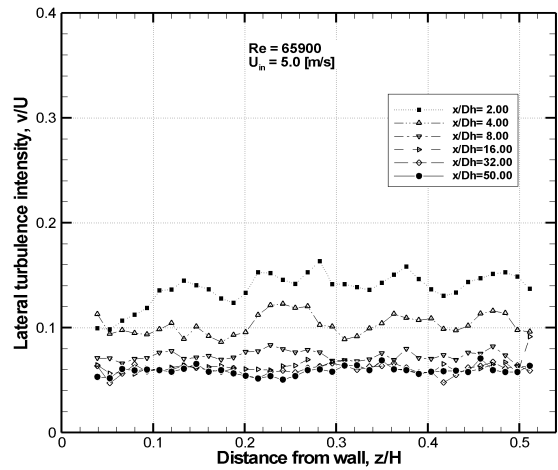


그림 12b) 횡방향 난류강도의 z방향 분포

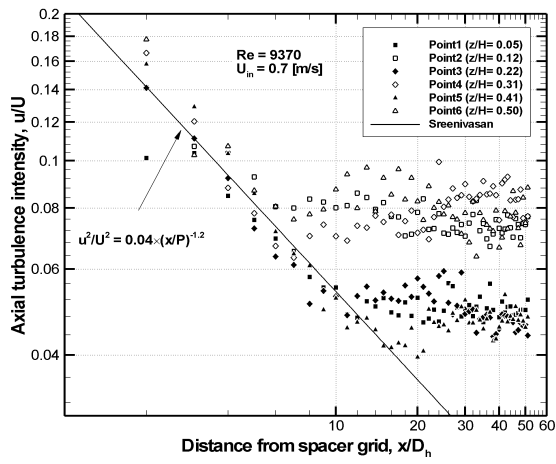


그림 13a) 축방향 난류강도와 감쇠 모델

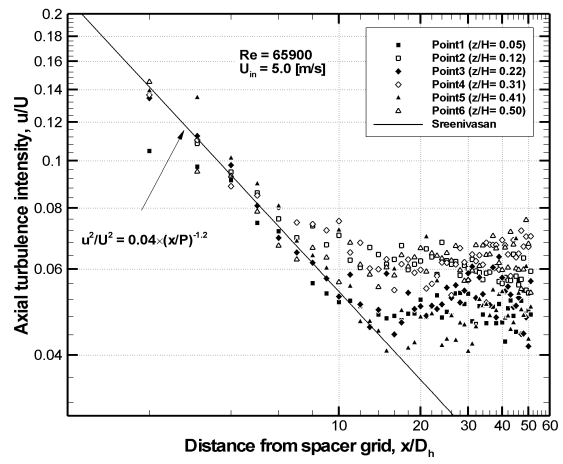


그림 13b) 축방향 난류강도와 감쇠 모델

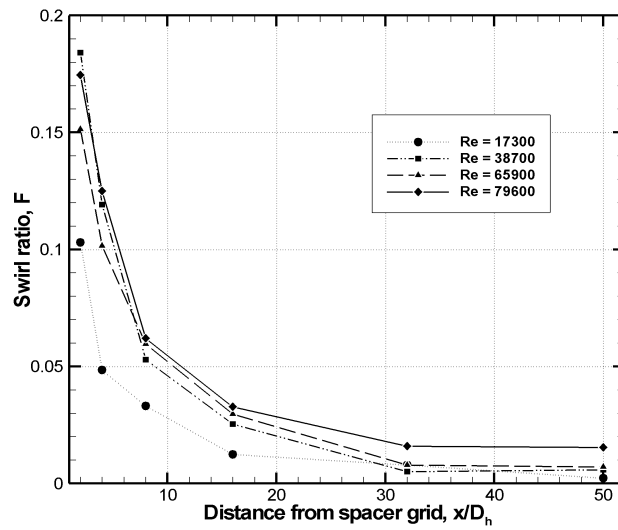


그림 14 부수로내 경로에서의 스월비