2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

차세대핵연료 유동혼합날개 개발을 위한 수치해석

CFD Analysis for the Development of Next Generation Fuel Mixing Vane

김홍주, 양승근, 김강훈, 박응준, 전경락
한전원자력연료주식회사
대전광역시 유성구 덕진동 493

요 약

경수로용 차세대핵연료 유동혼합날개의 개발을 위하여 부수로 내의 유동특성을 평가하고자 다양한 유동혼합날개 모델들을 선정하였다. 이들 모델들에 대한 유동특성 평가는 전산유체해석 코드인 FLUENT5.5 를 사용한 수치해석을 통하여 이루어졌다. 유동혼합날개 모델들은 기존 핵연료 혼합날개를 바탕으로 혼합날개의 크기를 일정하게 유지하도록 결정되었다. CFD 분석은 지지격자 및 유동혼합날개를 포함하는 2 개의 부수로에 대해 수행되었으며 RNG κ–ε 난류 모델이 사용되었다. 평가결과, 부수로 내에서의 선회유동과 부수로 사이의 횡류를 발생시키는 기존의 유동 혼합날개와 유사한 유동특성을 가지는 모델들은 압력강하 측면에서는 유리하나, 여전히 연료봉 표면이 국부적으로 고온 상태로 남아 있다. 효과적인 유동혼합성능을 보이면서 연료봉 주위의 표면온도 차이를 줄이는 모델들은 압력강하 측면에서 불리한 결과를 보여 준다.

Abstract

Some models of flow mixing vane were selected to evaluate the flow characteristics in subchannel for the development of mixing vane of PWR Next Generation fuel assembly. The analyses of those mixing vane models were done through a numerical investigation using the computational fluid dynamics code, FLUENT5.5. The mixing vane models were determined maintaining the magnitude of mixing vane constantly based on the current mixing vanes. CFD analysis was done for two subchannels including the space grid and mixing vane. The RNG κ–ε turbulent model is used. As a result of evaluation, the models that have the flow characteristic similar to the current mixing vane making swirl flow in subchannel and crossflow between subchannels, have advantage in pressure drop. But hot spots on surface of fuel rod still remain locally. The others show the effective flow mixing performance and the reduced the azimuthal temperature gradient of fuel rod, but disadvantage in pressure drop.

1. 서 론

유동혼합날개(Mixing Vane)는 핵연료의 연료봉을 고정시키는 지지격자의 교차점 주위에 위치하여 연료봉 다발내의 부수로를 따라 흐르는 냉각수의 유동에 큰 영향을 미친다. 기존의 핵연료에는 각 교차점 주위에서 2 개의 유동혼합날개가 지지격자 상부에서 유동방향과 일정한 각도를 가지고 있다. 노심 내에서 핵연료의 건전성과 관련하여 부수로의 유동특성이 임계열유속과 압력강하 등에 많은 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 따라서 유동혼합날개를 개량하여 유동혼합 성능을 향상시키고 임계열유속을 증진시키고자 하는 노력이 활발히 이루어지고 있다.

새로운 지지격자 유동혼합날개의 개발은 최종적으로 임계열유속 시험을 통하여 유동혼합날개의 성능을 확인할 수 있다. 그러나 임계열유속 시험은 많은 비용과 시간이 소요되므로, 개발된 유동혼합날개의 유동특성을 미리 평가하고 혼합날개의 형상과 각도 등의 최적화를 위해 최근에는 전산유체역학을 이용한 평가방법이 일반적이다. Karoutas 등[(1)]은 유동혼합날개가 부착된 핵연료다발내의 3 차원 난류유동을 실험 및 CFD 코드인 CFDS-FLOW3D 를 사용하여 수치적으로 분석하였으며, 인[(2)] 등은 CFD 코드인 CFX-4 를 사용한 핵연료다발의 유동분석을 통하여 한국원자력연구소에서 고안한 복합 유동혼합 날개의 형상 최적화에 이용하였다.

본 연구에서는 고연소도 및 출력증가 등의 산업계 추세에 대비하고 최근 문제가 되고 있는 AOA(Axial Offset Anomaly) 현상을 해결할 수 있는, 열수력 성능이 향상된 유동혼합날개를 개발하고자 여러 가지 후보모델을 도출하고 이러한 모델들의 유동특성을 기존 유동혼합날개의 유동특성과 비교하였다. 그리고 이 평가 결과들을 지지격자 유동혼합날개의 개발에 이용하고자 하였다. 따라서 기존 핵연료에 사용되는 혼합날개를 참고로 부수로 내에서 기대되는 여러 가지 유동특성을 얻고자 서로 다른 개념들을 적용하여 다양한 형태의 유동혼합날개 모델들을 선정하였으며, 이들에 대한 수치해석을 통하여 유동과 열전달 특성을 평가하였다. 지지격자와 유동혼합날개는 복잡한 구조로 인해 수식계산으로는 해석이 불가능하므로 CFD 코드에 의한 수치해석으로 평가하였다. 따라서 혼합날개 모델들에 대한 연료봉 표면에서의 열전달계수 및 혼합날개를 포함하는 지지격자 압력강하 평가는 CFD 코드인 FLUENT5.5[(3)]를 사용하여 수행하였다.

2. 수치해석

2.1 유동혼합날개 모델

지지격자 유동혼합날개의 압력강하는 부수로 내의 유동혼합성능과 함께 혼합날개의 특성을 결정짓는 중요한 요소이다. 이를 위해 압력강하 성능을 가능한 유지하면서 유동혼합성능

과 연료봉 표면에서의 열전달 성능을 향상시키고자 하였으며, 8 종의 혼합날개 모델들을 기본 분석대상으로 선정하였다. 그림 1 은 본 평가에 사용된 지지격자 유동혼합날개 모델들이다. 모델들의 크기는 실제 지지격자의 크기와 같으며 수치해석 영역인 2 개의 부수로에 포함되는 두 쌍의 유동혼합날개를 가지고 있다. 본 평가에서 다른 혼합날개와의 비교를 위한 기준으로 사용된 모델 A 는, 현재 사용중인 핵연료의 유동 혼합날개에서 혼합날개와 연료봉과의 간격을 일정하게 유지하면서 혼합날개의 크기를 크게 하여 열적성능의 향상을 기하였다. 이때 압력강하량은 증가된다. 모델 B ~ F 는 지지격자 교차점에서의 혼합날개의 수를 기존의 2 개에서 4 개로 늘리는 대신 각각의 날개의 크기를 줄여, 부수로 내에서 혼합날개의 유동방향 단면적의 크기를 일정하게 유지하였고, 부수로 내에서 다양한 형태의 선회유동을 발생시키고자 유동혼합날개의 형상을 바꾸어 평가를 수행함으로써 이러한 모델들이 열적성능의 향상을 가져오는가의 여부를 평가하고 효율적인 유동혼합날개를 개발하고자 하였다. 모델 G 는 유동혼합날개가 일정한 각도를 가지고 지지격자의 상부에 달려있는 기존의 유동혼합날개 형상과 달리 사각형의 판이 지지격자 격자점 위에 얹혀있는 모습으로 혼합날개의 역할을 하는 사각형의 판이 유동방향과 90°를 이루어 부수로 내에서 강한 Cone Flow 를 기대하였다. 모델 H 는 모델 G 와 달리 지지격자를 고정하기 위한 용접과정에서 너겟의 크기를 크게 하여, 그 자체로 혼합날개의 역할을 수행하는 것으로 가정하였다. 모델 중에서 모델 C 와 G 는 각각 혼합날개의 크기를 줄임으로서 압력강하와 연료봉 표면에서의 열전달계수의 변동여부를 평가하고자 하였다. 표 1 은 모델 A 를 기준으로 할 때의 나머지 모델들의 단면적 크기의 비를 보여준다. 각각의 모델 높이는 표 1 과 같다.

2.2 수치해석 모델

지지격자 유동혼합날개가 포함된 수치해석영역은 복잡한 기하구조를 가지며, 복잡한 형상의 CFD 해석에 사용되는 비정렬 격자를 이용하기 위해 FLUENT[3] 코드를 사용하였다. CFD 해석은 표 1 과 같이 11 종의 후보모형에 대해 수행되었으며, 격자 및 형상 그리고 수치해석 영역은 그림 2 와 같다. 수치해석영역은 유동혼합날개의 배치로 인한 유동의 대칭을 고려하여 두 쌍의 유동혼합날개가 포함된 두개의 부수로를 고려하였으며, 지지격자 밑면으로부터 상류 3”에서 지지격자 중심으로부터 하류 10.5”까지를 모델 하였다. 3”는 부수로의 수력직경으로부터 고려하여 결정하였으며 10.5”는 IFM(Intermediate Flow Mixer)이 있는 기존의 핵연료에서 지지격자 사이의 간격을 고려하여 결정하였다. 본 평가의 목적은 유동혼합날개의 형상에 따른 유동혼합성능의 차이를 확인하는 것이므로 연료봉의 지지를 위한 스프링과 딤플은 무시하였으나 지지격자와 유동혼합날개의 두께는 현재 설계에 사용되는 0.018”를 고려하였다. 전산 격자는 비정렬격자(Non-structured Grid)로 모델링 하였으며, 1×10^{6} 내외의 격자로 이루어져 있다. 유동 입구에서는 균일한 유속을 가정하였으며 출구경계에서는 일정 압력 조건을 설정하였다. 벽면에서의 No-Slip 경계조건과 SIMPLE Algorithm, RNG κ-ε 모델을 사용하여 질량보존방정식의 잉여 값이 10^{-4} 이하가 될 때까지 수치계산을 반복하여 수행하였다. 수렴해를 얻기 위해서 약 2000 회의 반복계산이 이루어졌다. 각 후보모형의 압력강하 평가에 대

한 해석 조건으로는 3 차원 정상상태 난류유동이며, 고온상태의 순수한 물을 유체로 이용하여 해석하였다. 또한, 경계조건으로 입구유동속도는 5.18 m/s(17 ft/sec), 입구유동온도는 594.26 K(610 °F), 그리고 난류강도는 4%를 적용하였다. 연료봉 표면에서의 열유속은 약 945000 W/m^2(300000 Btu/hr-ft^2)으로 가정하였다.

2.3 수치해석 결과 및 평가

그림 3 과 4 는 지지격자 하류의 부수로 단면에서의 횡방향 속도 벡터이다. 그림 3 은 첫번째로 평가한 4 종의 유동혼합날개 후보모형의 계산결과로서 유동장에서의 유동분포와 함께 지지격자 간격의 1/3 (6.67 ")과 1/2 (10") 하류위치에서의 횡방향 속도벡터를 보여준다. 그림 4 는 나머지 모델 중에서 대표적인 4 종의 모델에 대한 지지격자 하류의 횡방향 속도 벡터이다. 모델 A 와 C 는 유동혼합날개에 의해 발생하는 일반적인 부수로 유동과 마찬가지로, 하류 1/3 위치에서 부수로 내부에 타원형의 선회유동을 발생시키고 부수로 사이에도 횡류가 존재함을 보여준다. 그러나 모델 A 는 하류 1/2 위치에서 각 부수로 내부의 타원형의 선회유동은 사라지고 부수로 사이에 작은 횡류가 남아 있으나, 모델 C 는 하류 1/2 위치에서도 부수로 내부의 선회유동은 조금 남아 있음을 알 수 있다. 모델 B, D 와 F 는 혼합날개 바로 뒤의 부수로 내부에 강한 선회유동을 발생시키지만 부수로 사이의 횡류는 거의 발생시키지 않는다. 모델 B 는 하류 1/3 위치에서는 아주 강한 선회유동을 일으키지만 하류 1/2 위치에서는 선회유동과 횡방향의 속도성분이 거의 소멸하고 없다. 모델 D 와 F 는 모델 B 에 비해 하류 1/3 위치에서의 선회유동의 크기는 작으나 하류 1/2 위치에서도 선회유동을 유지하고 있음을 알 수 있다. 모델 E 는 부수로 내부에 선회유동은 발생시키지는 않으나 연료봉을 따라 부수로 사이에 강한 횡류를 발생시킨다. 모델 G 에서는 부수로 내부에 선회유동이나 부수로 사이의 횡류를 발생시키지 않는다. 한편 모델 H 는 하류 1/3 위치에서 비균일한 선회유동을 발생시키지만 횡류성분은 거의 없다. 그림 5 는 연료봉 표면에서의 온도 분포이다. 모델 G 와 H 를 제외하면 다른 형태의 유동혼합 날개에서 연료봉 표면을 따라 길게 고온상태의 표면이 남아 있음을 볼 수 있다. 이처럼 유동혼합날개의 사용에도 불구하고 연료봉 표면은 국부적으로 고온상태로 남아있을 때 크러드의 침적 등이 가속화되고 AOA 등의 현상을 일으키는 것으로 알려져 있다. 따라서 유동혼합날개 개발 목적의 하나가 유동혼합성능을 향샹시켜 연료봉 표면에서 이러한 고온상태의 표면을 미연에 방지할 수 있도록 하는 것이다. 그림 6 은 지지격자로부터 하류 1/2 위치까지의 연료봉 표면의 평균 열전달 계수와, 이 위치에서의 연료봉 주위의 표면온도 차이이다. 그림 5 에서 볼 수 있듯이 모델 G 와 H 를 제외하면 연료봉 주위를 따라 표면온도의 차이가 큼을 알 수 있다.

그림 7 은 모델 A 의 유동혼합 날개 단면적과 압력강하량을 기준으로 다른 모델들의 값들을 비교한 결과이다. 압력강하는 그림 2 에서 볼 수 있듯이 지지격자 전후에서의 압력강하량이다. 모델 G 는 뛰어난 유동혼합성능에도 불구하고 압력강하량은 모델 A 의 거의 두배가 됨을 볼 수 있다.

3. 결 론

경수로용 차세대핵연료 유동혼합날개 모델들에 대한 수치해석 평가를 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 부수로 내에서의 선회유동과 부수로 사이의 횡류를 발생시키는 기존의 유동 혼합날개와 유사한 유동특성을 가지는 모델들은 압력강하 측면에서는 유리하나, 여전히 연료봉 표면이 국부적으로 고온 상태로 남아 있다. 효과적인 유동혼합성능을 보이면서 연료봉 주위의 표면온도 차이를 줄이는 모델들은 압력강하 측면에서 불리한 결과를 보여 준다.

4. 참고문헌

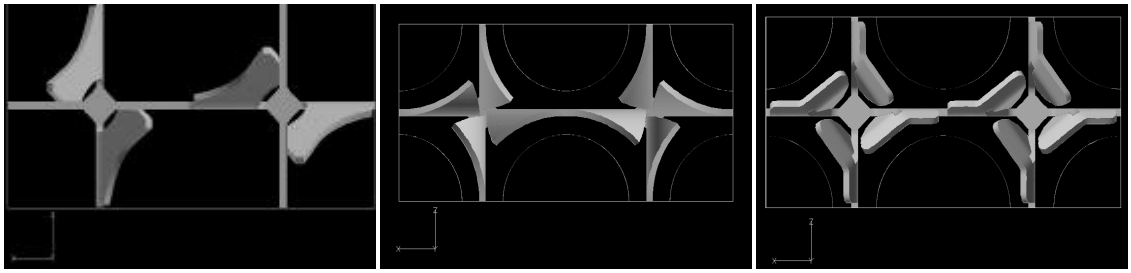
1. Karoutas Z., Gu C.Y. and Scholin B., 1995, "3-D flow analyses for design of nuclear fuel spacer," Proc. Of the 7th Int. Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, New York, United State, September 10-15.
2. 인왕기 외 2 인, "핵연료다발의 유동분석을 통한 복합 유동혼합 날개의 형상 최적화,"2001 추계학술발표회, 한국원자력학회
3. FLUENT User's Manual, Fluent Inc., 2001

감사의 글

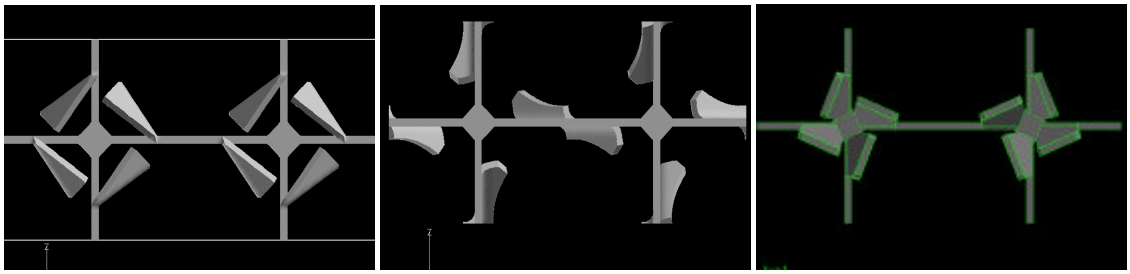
본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 중장기계획사업인 웨스팅하우스형핵연료 개량핵연료 개발과제의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

표 1. 지지격자 유동혼합날개 모델의 크기 및 지지격자 높이

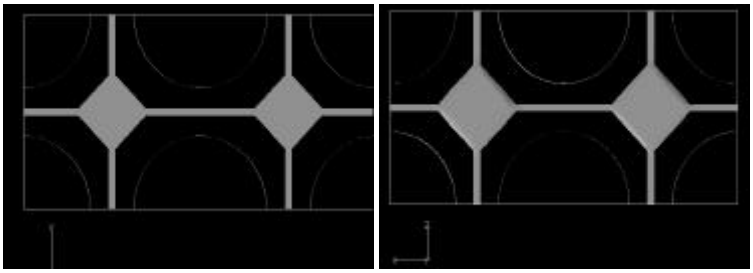
	A	B	C	C-1	C-2	D	E	F	G	G-1	H
유동혼합날개 크기 비	1	0.96	1.34	1.07	0.93	1	1.02	0.74	1	0.5	1
지지격자 높이 (in)	1.79	2.09	1.89	1.89	1.89	2.09	2.09	1.79	1.79	1.79	1.79



모델 A　　모델 B　　모델 C



모델 D　　모델 E　　모델 F



모델 G　　모델 H

그림 1.　지지격자 유동혼합날개 모델

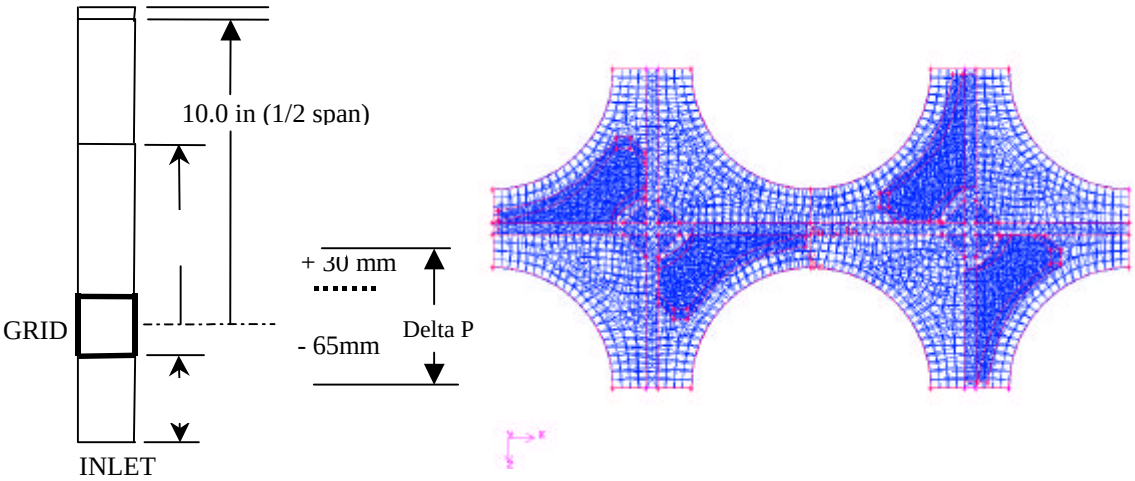
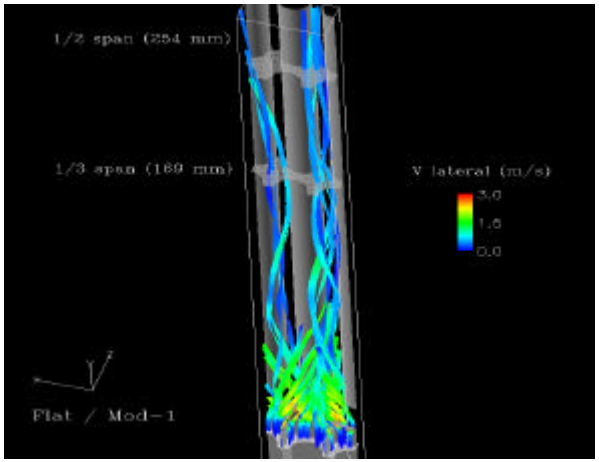
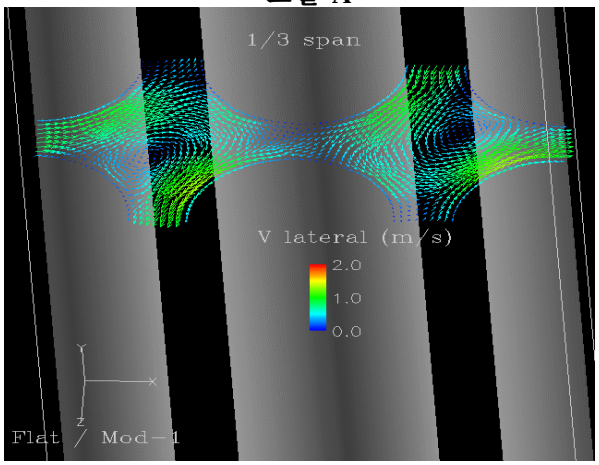
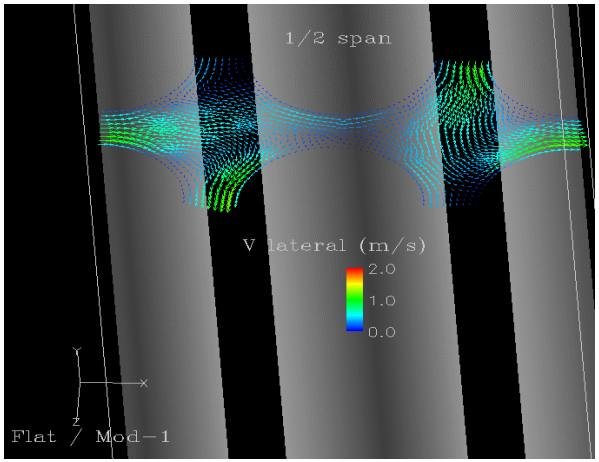


그림 2. 수치해석 모델(계산영역 및 격자)

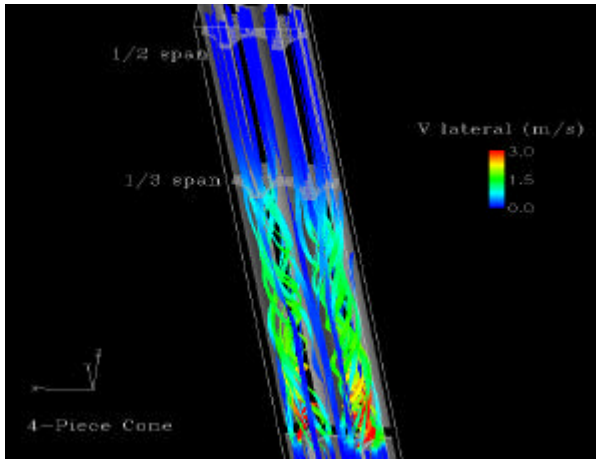
모델 A

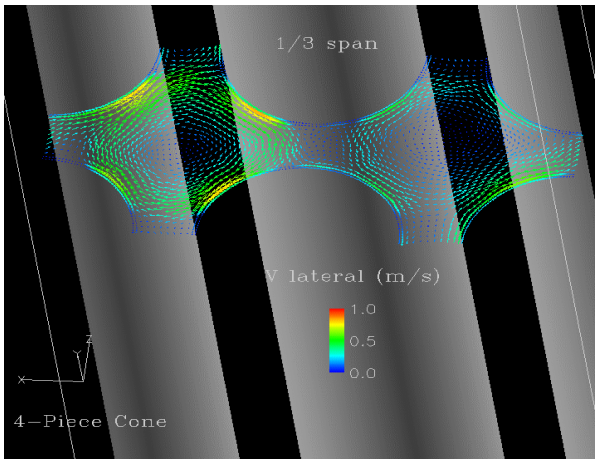


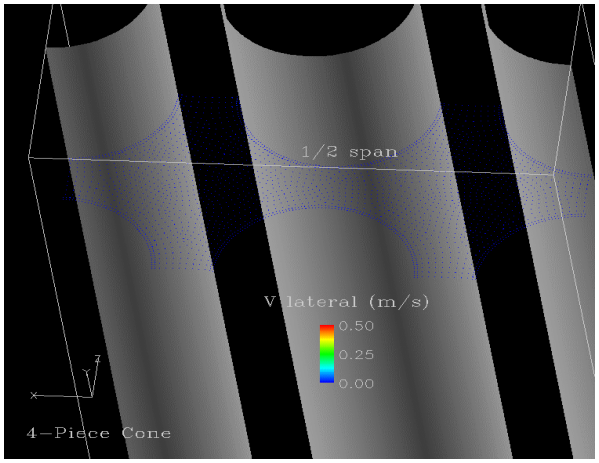




모델 B



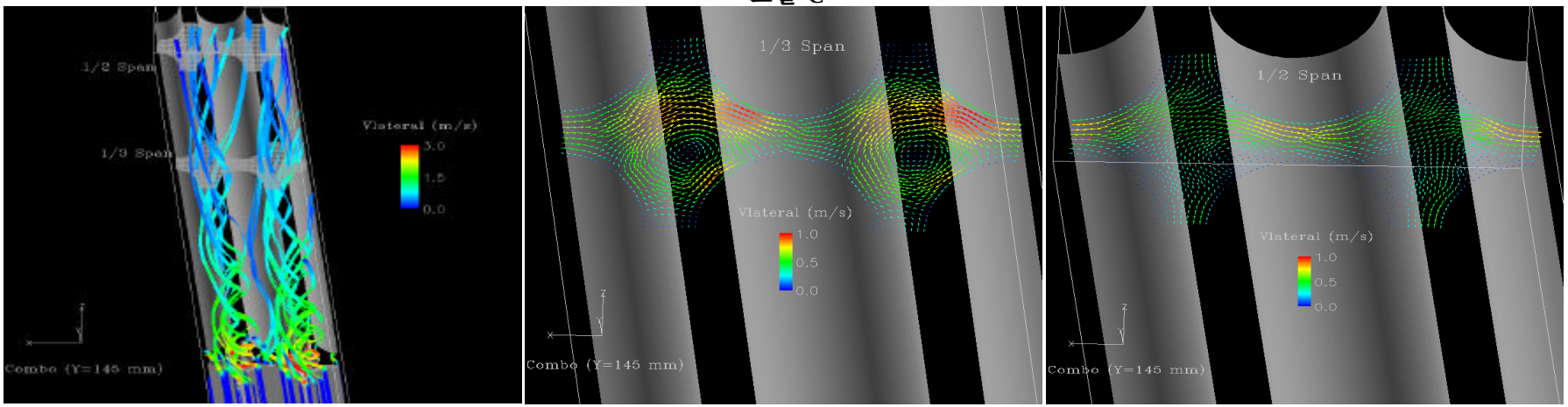




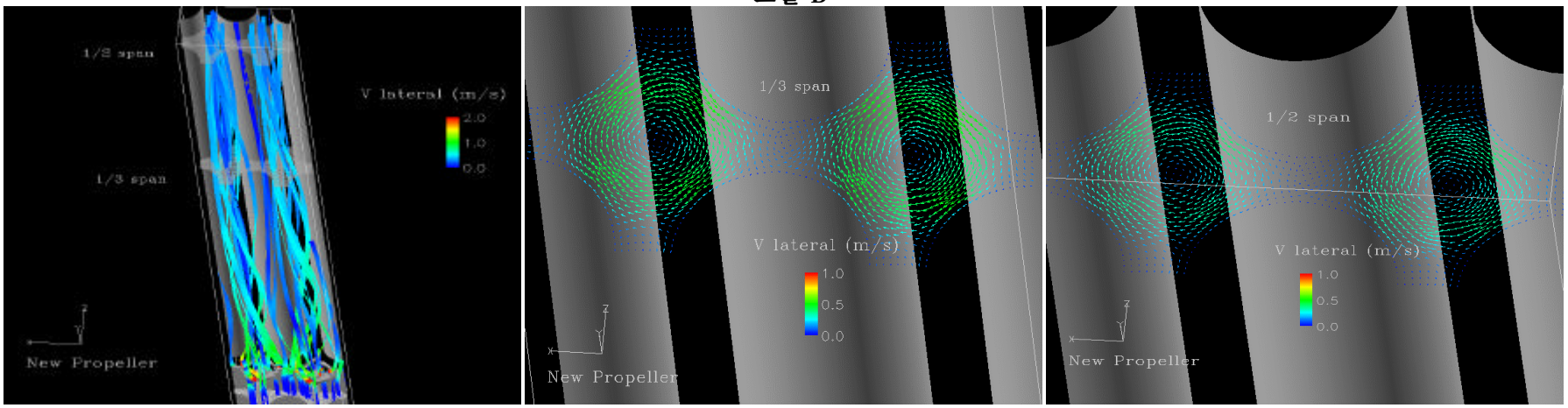
부수로내의 유동분포 6.67" **하류의 횡방향속도 벡터** 10" **하류의 횡방향속도 벡터**

그림 3. CFD **유동해석영역에서의 유동분포 및 횡방향 속도벡터** (1/2)

모델 C



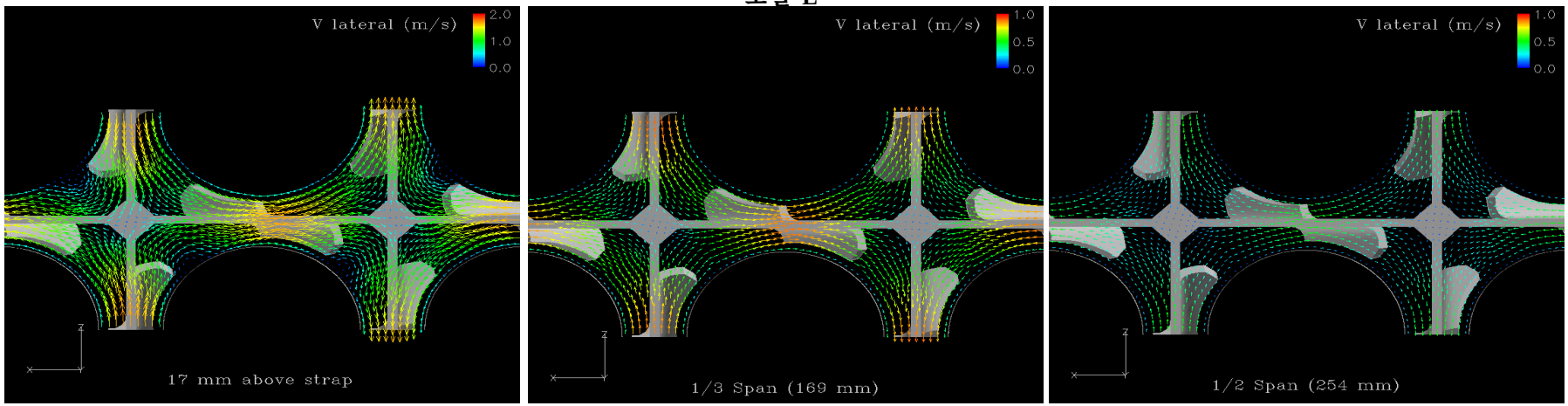
모델 D



부수로내의 유동분포 **6.67” 하류의 횡방향속도 벡터** **10” 하류의 횡방향속도 벡터**

그림 3. CFD **유동해석영역에서의 유동분포 및 횡방향 속도벡터** (2/2)

모델 E



모델 F

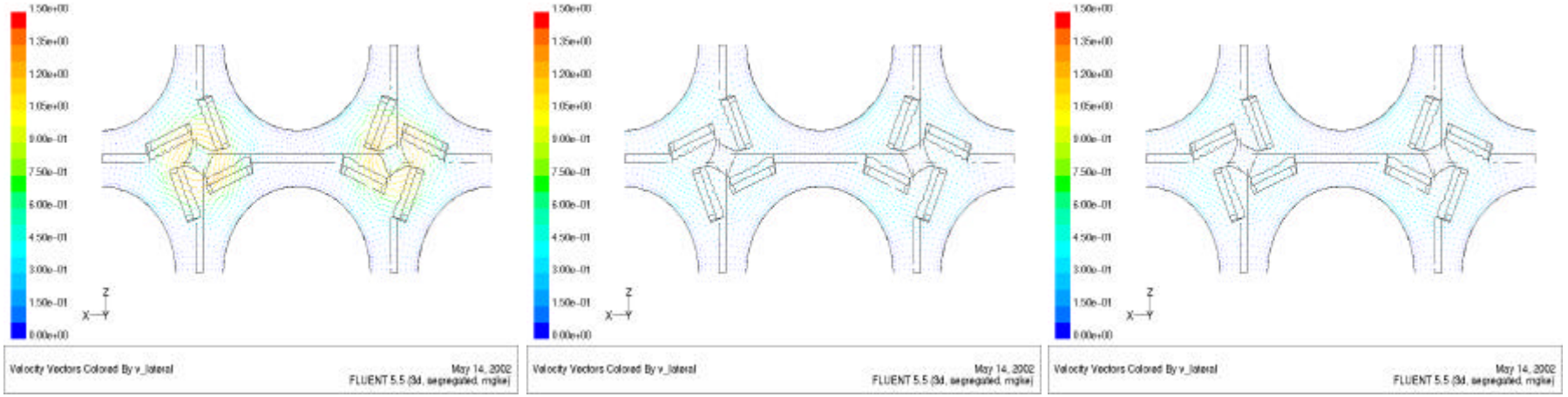
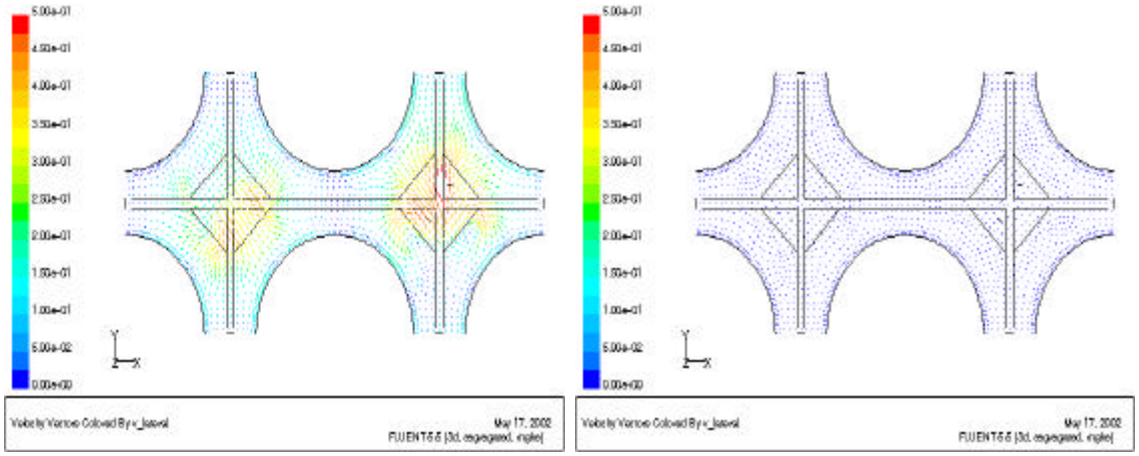


그림 4. 지지격자 하류에서의 횡방향 속도벡터 (1/2)

모델 G



모델 H

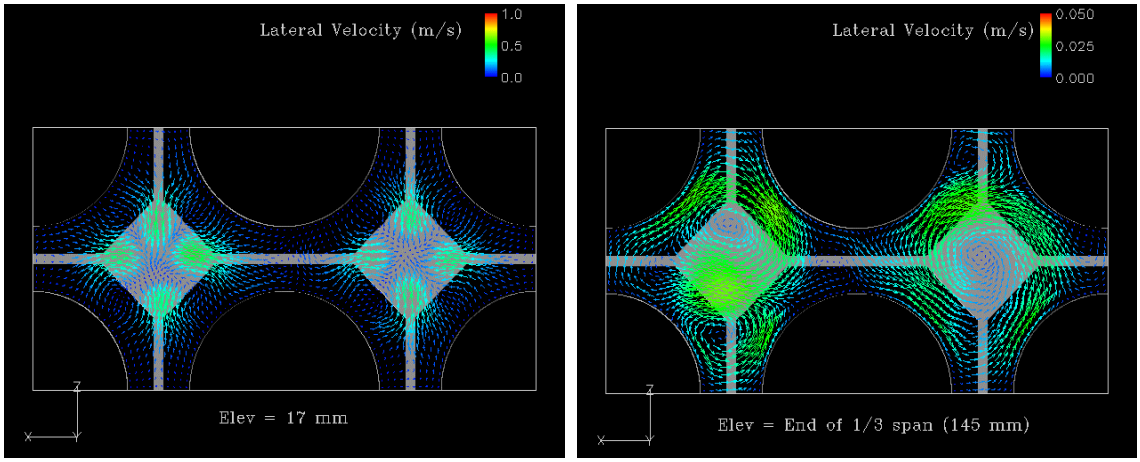
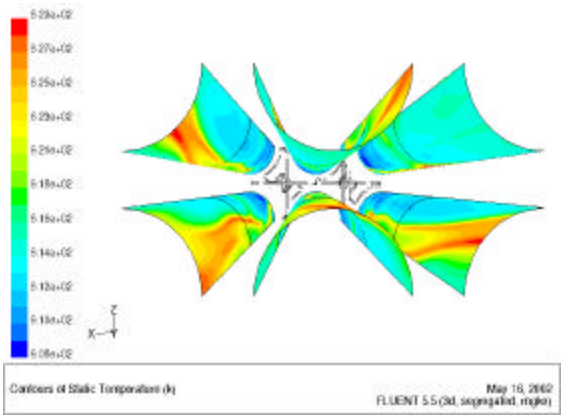
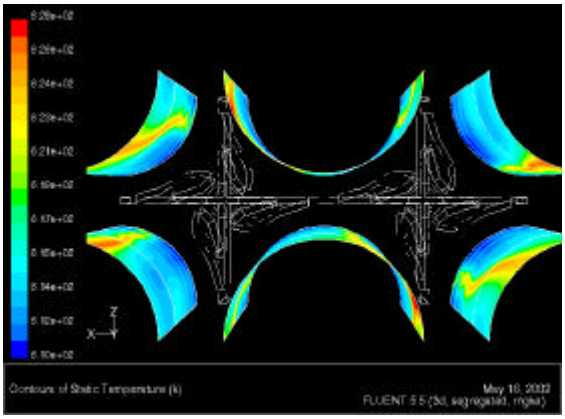


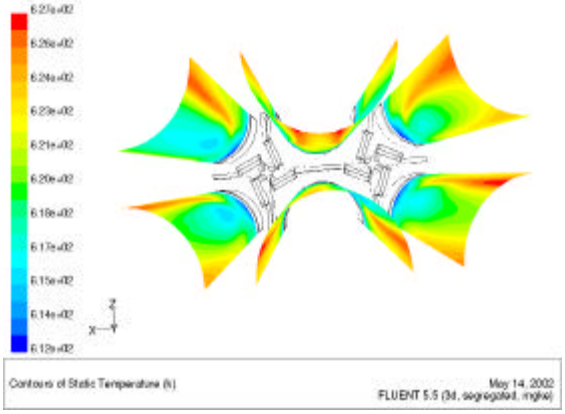
그림 4. 지지격자 하류에서의 횡방향 속도벡터 (2/2)



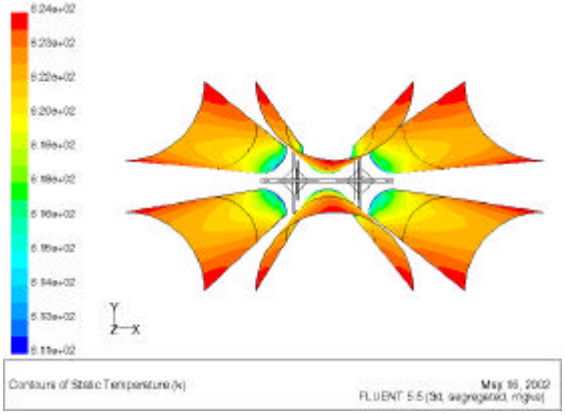
모델 A



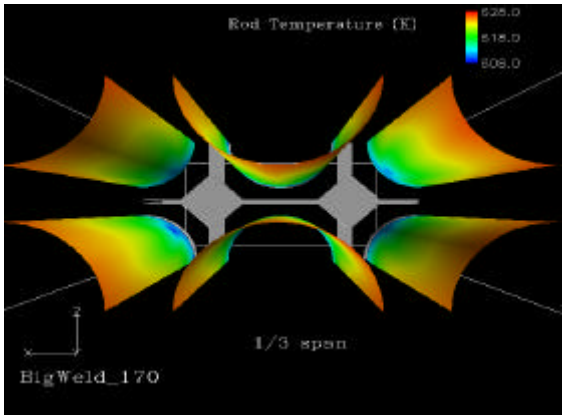
모델 C-1



모델 F



모델 G-1



모델 H

그림 5. 연료봉 표면에서의 온도분포

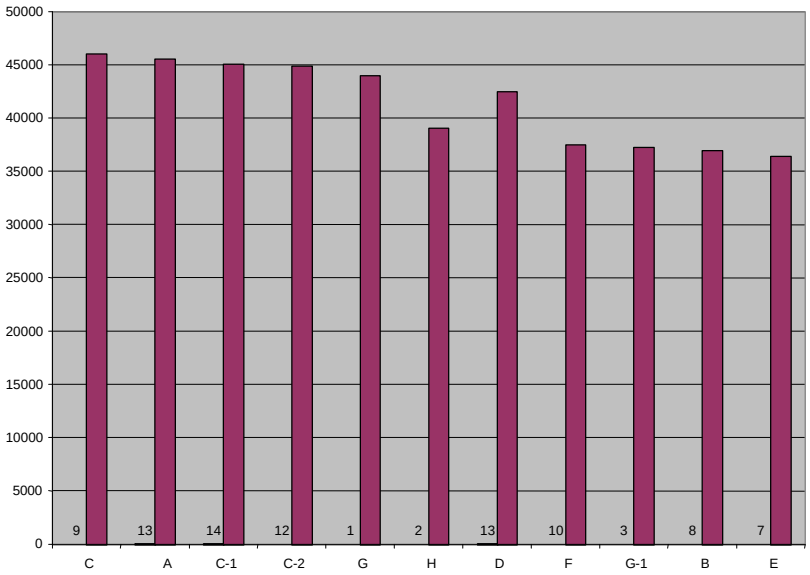


그림 6. 지지격자 하류 10” 까지의 연료봉 표면 평균 열전달계수 및 연료봉 주위의 표면 온도차이

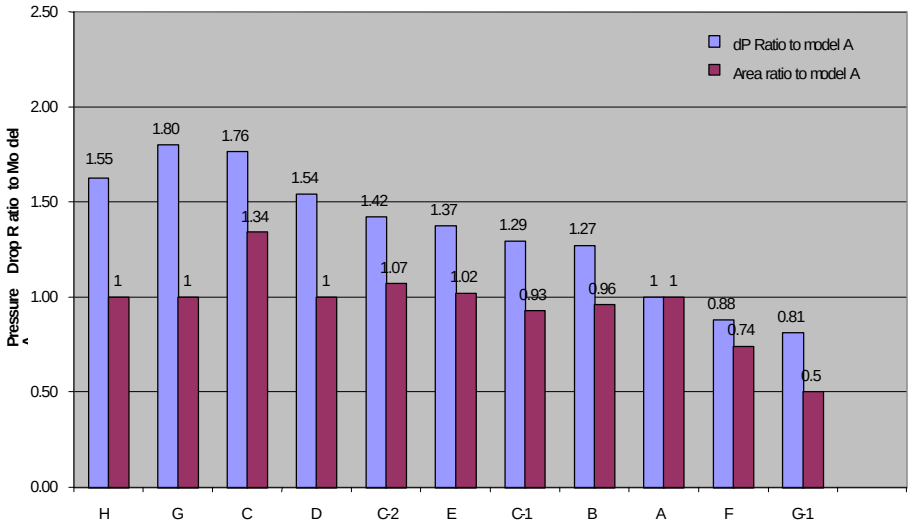


그림 7. 모델 A 에 대한 유동혼합날개 크기 및 지지격자 전후의 압력강하 비