

경수로용 핵연료 하단고정체 유로모형에 대한 압력강하 평가

Pressure Drop Analysis for the Bottom Nozzle Flow Model of PWR Fuel Assembly

김홍주, 엄경보, 김정하, 이진석, 김형구

한전원자력연료주식회사

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

경수로용 신형핵연료 하단고정체를 개발하기 위하여 10종의 하단고정체 유로판 후보모형에 대한 압력강하 평가를 수행하였다. 압력강하 평가는 전산유체해석 코드인 CFX4.2를 사용한 수치해석과 시험을 통해 이루어졌다. 하단고정체 후보모형은 5×5 배열의 유로 구멍을 가지는 기본형과 이물질 여과장치를 혼합한 모형 등이 있다. CFD 분석은 하단고정체 후보모형을 포함하는 단일 수로에 대해 수행되었으며 표준 κ - ϵ 난류 모델과 하이브리드 차분 도식이 사용되었다. 시험은 하단고정체 후보모형이 설치된 시험부에서 압력강하량을 측정하였으며 상온에서 수행되었다. 압력강하 평가결과 CFD 계산결과는 시험결과보다 약간 크게 나왔으나, 후보모형 DF9를 제외한 나머지 후보 모형들에 대한 압력강하 경향은 CFD 계산과 시험 결과가 모두 같음을 알 수 있다.

Abstract

A pressure drop analysis was performed for the ten kinds of the bottom nozzle flow plate candidate models to develop bottom nozzle of PWR fuel assembly. The pressure drop analysis was done through a numerical and experimental investigation. The numerical analysis used the computational fluid dynamics code, CFX4.2. The bottom nozzle candidate models consist of base model which has the flow hole of 5×5 array and the model including the debris filtering device, etc. CFD analysis was done for single flow channel including the bottom nozzle model. The standard κ - ϵ turbulent model is used with hybrid difference schemes. A bottom nozzle pressure drop was measured in test section at normal temperature. The pressure drop analysis showed that the pressure drop from CFD result is little higher than the pressure drop measurement and the CFD pressure drop analysis for the bottom nozzle model, show the same trend with the experiment except the model, DF9.

1. 서 론

핵연료의 하단고정체는 상단고정체, 안내관 및 지지격자와 더불어 핵연료의 골격을 이루고 있으

며, 원자로 내부구조물 위에 놓여져 핵연료를 지지하고 연료봉에 냉각재의 유동을 균일하게 분배하는 등의 중요한 기능을 수행하고 있다. 또한 하단고정체는 냉각수의 유동을 위한 유로 구멍과 안내관 및 계측관과의 체결을 위한 구멍 등이 있는 유로판과 핵연료의 위치를 유지시키는 다리 등으로 구성되어 있다. 핵연료의 개발추세는 고연소도를 추구하면서 손상을 극소화 하려는 등 경제성과 안전성을 높이기 위해, 핵연료 손상원인의 대부분을 차지하는 것으로 밝혀진 이물질의 여과 및 포획 성능을 향상 시키고 압력강하 특성도 요구조건에 맞추기 위한 새로운 개념의 하단고정체 모델들이 개발되고 있다.

본 연구는 압력강하 특성과 이물질 여과성능이 향상된 하단고정체 모델을 개발하기 위하여 기존의 하단고정체 모델과 외국의 모델을 참고로 하여 10종의 후보모형을 선정하였다. 이들 후보모형은 기존 원형 유로의 유로 면적을 늘리기 위해 원형유로를 사각형으로 바꾸고 여기에 여러 가지 유로판 모형을 겹쳐놓아 이물질 여과성능을 향상시키고자 하였으며, SIEMENS사의 모델과 같은 경사판형과 비닐하우스형이라 불리는 새로운 형태의 모델을 후보모형으로 하였다. 이들 모형으로부터 최종적인 하단고정체 후보 모형을 선정하기 위한 평가자료를 생산하고자 압력강하 평가를 수행하였다. 압력강하에 영향을 미치는 인자는 유로 면적과 수력반경 그리고 하단고정체의 형상이다. 여기서 유로 면적과 수력반경 그리고 형상 등에 따른 압력강하 성능 평가는 3차원의 기하학적 구조에 의한 복합인자를 고려하여야 하므로 수식계산으로는 해석이 불가능하기 때문에 시험 또는 CFD 코드에 의한 수치해석으로 평가하여야 한다. 따라서, 후보모형에 대한 압력강하 평가는 CFD 코드인 CFX4.2를 사용한 수치해석과 시험을 통해 이루어졌다.

2. 수치해석

2.1 하단고정체 후보모형

하단고정체의 압력강하는 이물질 여과 능력과 함께 하단고정체의 성능을 결정짓는 중요한 요소이다. 이를 위해 압력강하 성능을 손상시키지 않으면서 핵연료 파손의 중요한 원인중의 하나인 이물질의 여과성능을 개선시키고자 10종의 하단고정체 유로판 후보모형을 선정하였다. 후보모형의 크기는 단면이 78mmx78mm 이고 높이는 15.88mm 이다. DF1은 기존의 원형유로 형상을 가지고 있는 하단고정체 모형으로 다른 후보모형과의 비교를 위해 선택되었다. DF2 ~DF7은 기존의 하단고정체 유로 구멍에서 유로 구멍을 세분하여 통과할 수 있는 이물질의 크기를 줄이는 것이 기본적인 개념으로, 이러한 기능을 가지는 이물질 여과장치를 부가한 모델이다. DF4 ~DF7은 이물질 여과장치가 장착되어도 압력강하 성능을 유지하도록 유로 면적을 늘리기 위해 유로 구멍의 형상을 원형에서 사각형으로 변경하였다. DF2는 유로 구멍이 분할되도록 날개를 갖는 여과장치를 유로 구멍에 삽입하는 방법을 선택하였으나, DF3 ~DF7은 삼각형 및 사각형 등의 유로를 가지는 얇은 이물질 여과장치를 5x5 배열의 유로구멍을 갖는 기본형 위에 올려놓은 형태이다. DF8 ~ DF10은 하단고정체 자체에서 이물질 여과기능을 가지고 있는 후보모형이다. DF8의 전체 형상은 계관판과 같이 일정하게 돌출부가 있고 이 돌출부에 십자형 여과체를 만들어 이물질을 여과하는 기능을 갖춘 후보모형이다. DF9는 판을 절곡하여 길이방향으로 비닐하우스 형상을 만들고 여기에 미세한 유로 구멍을 만들어 이물질 여과 기능을 제공하는 모델이며, DF10은 SIEMENS사의 하단고정체 모형과 유사한 모형으로 여러 개의 판으로 하단고정체를 구성하며 판과 판사이가 유로 구멍의

역할을 수행하면서 이물질 여과기능도 동시에 제공한다.

2.2 수치해석 모델

수치해석은 CFD 해석코드인 CFX4.2^[1]를 사용하였다. 하단고정체 압력강하 CFD 해석은 5종의 후보모형에 대해 수행되었으며, 격자 및 형상은 그림 3과 같다. 유로판 후보모델에서 유로 구멍의 형상은 이물질 여과장치의 종류에 따라 복잡하게 구성되어 있다. CFD 분석을 위해 한 개의 하단 고정체 후보모형을 포함하는 단일 수로 형상을 수치해석 영역으로 설정하였다. 이러한 3차원 CFD 모델의 유동장 단면은 후보모형과 마찬가지로 78mm×78mm로 하였으며 하단고정체의 상류 150mm부터 시작하여 하류 450mm까지로 하단고정체의 높이를 제외한 전체 해석모델의 길이를 600mm로 하였다. 이때 상류와 하류의 유동장은 각각 하나의 블록으로 설정하였으며 하단고정체의 높이는 15.88mm로 25개의 유로 구멍을 갖는 기본 모델형과 SIEMENS사 형태의 경사판형 그리고 비닐하우스형이라 불리는 모델 등의 유로판 모델은 작은 블록을 조합하여 구성하였다. 전산 격자는 정렬격자(structured grid)로 모델링 하였으며, $3 \times 10^5 \sim 5 \times 10^5$ 개의 격자로 이루어져 있다. 유동 입구에서는 균일한 유속을 가정하였으며 출구경계에서는 일정 압력 조건을 설정하였다. 벽면에서는 No-Slip 경계 조건과 SIMPLE Algorithm^[2], 표준 κ - ϵ 모델, 하이브리드 차분법을 사용하여 질량보존방정식의 잉여 값이 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 이하가 될 때까지 수치계산을 반복하여 수행하였다. 수렴 해를 얻기 위해서 약 2000회의 반복계산이 이루어졌으며 계산은 HP9000 C200 워크스테이션에서 수행되었다. 각 후보모형의 압력강하 평가에 대한 해석 조건으로는 3차원 정상상태 난류유동이며, 상온의 순수한 물을 유체로 이용하여 해석하였다. 또한, 경계조건으로 입구유동속도는 2 m/s, 입구유동온도는 25 °C, 그리고 난류강도는 10%를 적용하였다.

2.3 수치해석 결과 및 평가

5종의 하단고정체 유로판 후보모형에 대한 CFD 분석결과는 그림 4 및 5와 같다. 이들 그림은 하단고정체 유로구멍과 상류 및 하류에서의 속도분포를 보여주고 있으며 유동해석 영역에서의 유동특성을 잘 나타내고 있다. 후보모형 DF7과 DF9는 이물질 여과장치로 인해 유로면적이 줄어들었으며 따라서 그림에서 보는 바와 같이 유로구멍에서 유속이 다른 후보모형에 비해 크다. 이로 인해 압력강하는 증가하며 그림 6은 그 결과를 보여준다. 그림 6은 하단고정체 전후에서의 유로판 후보모형에 따른 압력강하 변화의 추이를 나타낸다. 후보모형 DF7과 DF9의 압력강하량이 크고 나머지 3종의 후보모형은 비교적 낮은 값을 가지고 있다.

3 시험

3.1 시험장치 및 방법

핵연료 하단고정체 유로모형 후보들에 대한 압력강하 시험은 그림 2의 시험장치에서 수행되었다. 그림 2는 시험장치의 개략도로, 순환펌프에서 배출된 순환용수는 유량 측정용 오리피스를 거쳐 모의 핵연료 다발 및 하단고정체 유로판 모형이 장착된 수직 시험부를 지나 펌프로 되돌아온

다. 이 장치의 운전범위는 상온에서 유량이 최대 30m/hr 이다. 이 조건은 시험부에 장착된 6x6 배열의 모의 핵연료 다발에서의 Reynolds 수가 약 35,000 에 해당한다. 하단고정체 유로관 모형이 장착되는 시험부는 그림 2 와 같다. 시험부의 단면은 78mm x78mm, 길이는 약 1200mm 이었다. 그리고 하단고정체 모델 위의 시험부 상단에는 집합체가 장전된 노심내의 유동을 모의하기 위하여 직경 9.7mm 의 스테인레스 봉으로 구성된 6x6 배열의 축소된 모의 핵연료 다발을 설치하였다.

시험은 10 종의 하단고정체 유로관 후보모형들에 대해서 각각 수행되었다. 압력측정 위치는 하단고정체에 의한 압력손실이 측정될 수 있도록 그림 2 와 같이 선정하였으며 시험조건은 10~30m/hr 의 유량범위 내에서 5~8 가지의 기준유량을 선정하고, 그 기준유량을 일정하게 유지시키면서 압력강하량을 측정하였다.

3.2 시험결과 및 평가

시험장치의 유량은 항상 일정하게 유지되지 않고 측정기간 동안 약간의 변동이 발생하므로 각 유로관 후보모형의 기준유량에서 유량, 온도 및 압력을 동시에 측정하고 60 회 내외의 측정값을 평균하여 사용하였다. 그림 7 은 하단고정체 유로관 후보 모형들에 대한 압력강하 시험결과를 나타내었다. 여기서 Reynolds 수는 시험부내의 모의 핵연료 다발에서의 값이다. Reynolds 수가 증가할수록 후보모형 DF7의 압력강하량은 다른 후보모형에 비해 크게 증가함을 볼 수 있다. 이는 이물질 여과장치에 의해 유로 면적이 감소하였기 때문으로 압력강하량 측면에서 가장 불리한 것으로 평가되었다. 후보모형 DF9 에 대한 시험결과는 그림 6 의 CFD 분석결과와 다르게 낮은 수준을 유지하고 있으며, 다른 후보 모형들에 대한 시험결과는 CFD 분석결과와 마찬가지로 DF7 을 제외하면 낮은 압력강하량을 보여준다. 그림 8 은 압력강하 시험결과로부터 구한 압력손실계수 K 의 값들을 보여주고 있다. 압력손실계수 K 는 Reynolds 수의 증가에 따라 완만하게 감소함을 알 수 있으며 Reynolds 수가 약 30000 에서 후보모형 DF7 은 K 값이 약 9, 그리고 나머지는 4 에서 7 내외의 값을 가지고 있다.

4. 결론

경수로용 신형핵연료 하단고정체 유로관 후보모형에 대한 압력강하 평가를 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 하단고정체 유로관 후보모형에 대한 압력강하는 후보모형 DF9 를 제외하면, 각각의 후보모형에 대한 CFD 해석결과는 시험결과에 비해 더 많은 압력강하량을 보여주고 있으며, 후보 모형들에 따른 압력강하 경향은 같음을 알 수 있다. 즉 후보모형 DF7 은 높은 압력강하량을 보이며, 나머지 후보 모형들은 낮은 수준을 유지하고 있었다. 즉 이물질 여과장치의 부가에 따른 이물질 여과성능의 향상에도 불구하고 대부분의 하단고정체 후보 모형들은 압력강하 특성을 크게 손상시키지 않을 것으로 판단된다. 따라서 DF7 을 제외한 후보 모형들은 최적의 하단고정체 후보 모형으로 압력강하 특성이외의 이물질여과 성능이나 응력해석 등의 평가자료를 고려하여 최적의 설계가 이루어져야 할 것이다.

5. 참고문헌

1. AEA Technology, CFX-4.2 Solver, Harwell Laboratory, Oxfordshire, UK 1997.
2. S.V.Patankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", University of Minnesota, 1980.

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 중장기계획사업인 신형핵연료 상하단고정체 개발과제의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

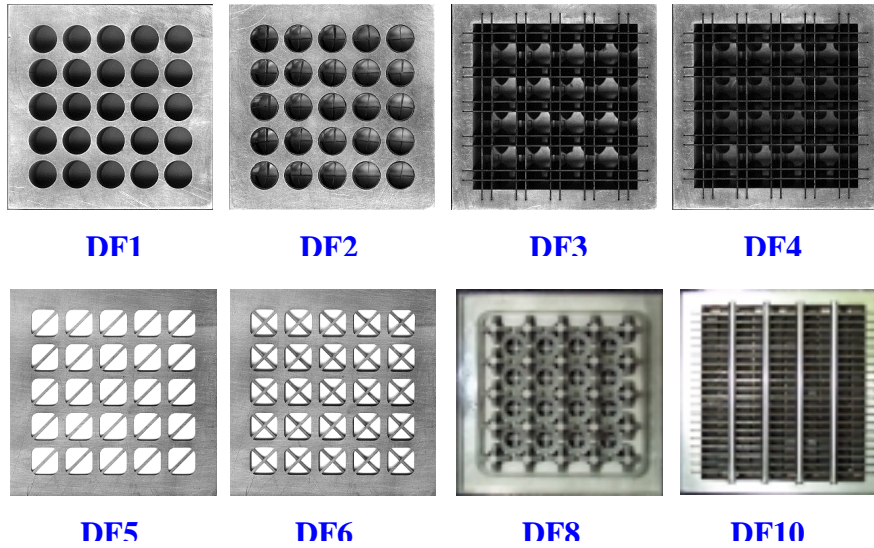


그림 1. 하단고정체 유로관 후보모형

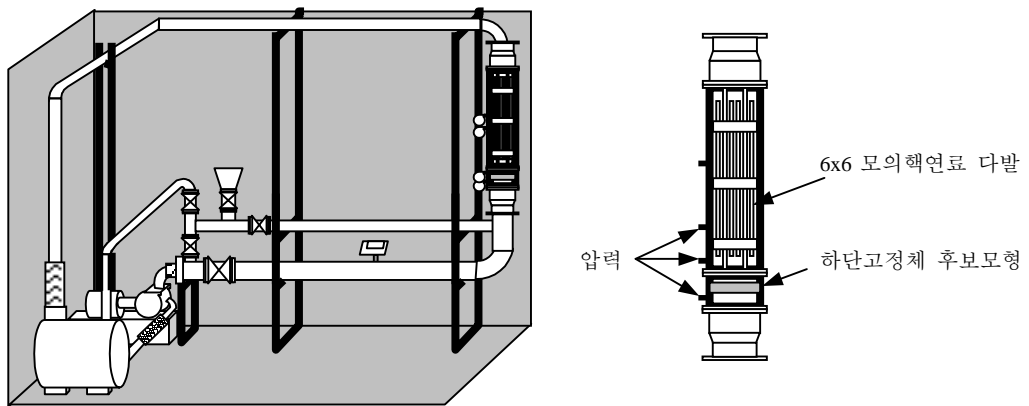
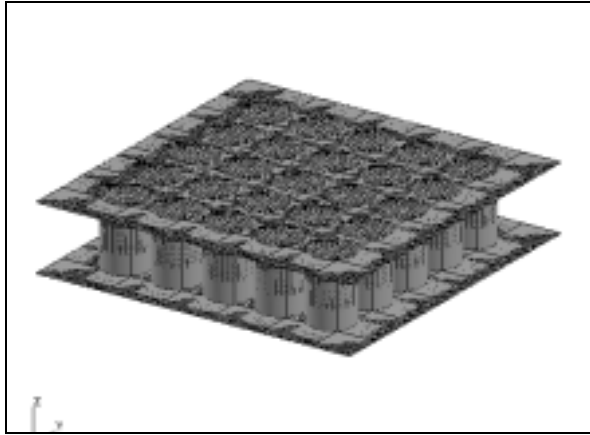
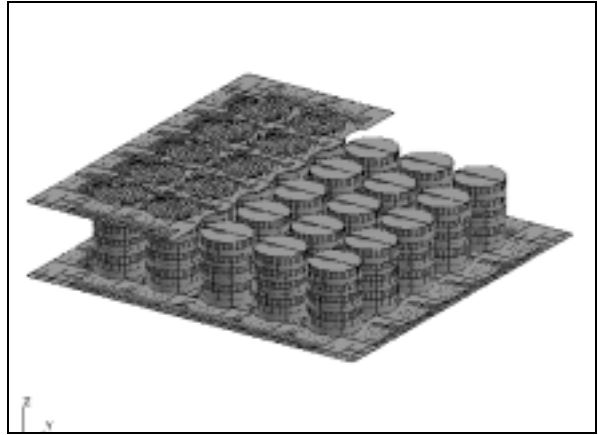


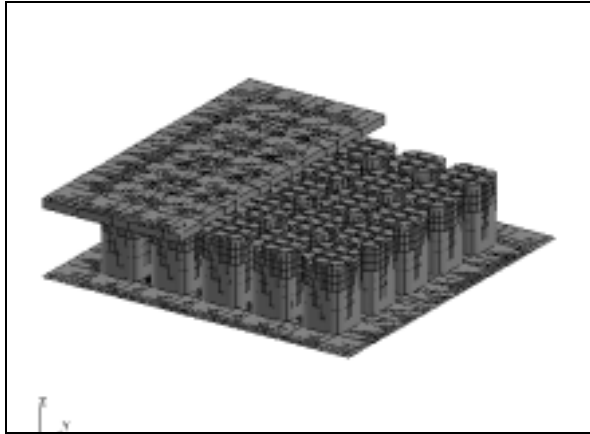
그림 2. 압력강하 시험장치 및 시험부 개략도



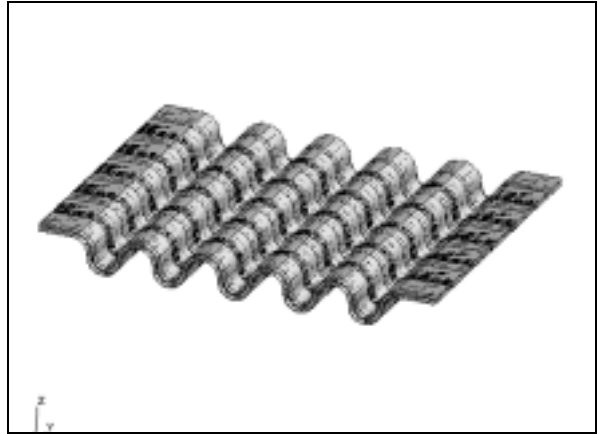
DF1



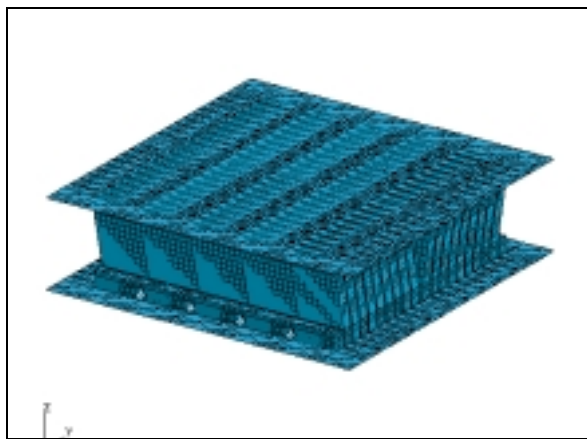
DF2



DF7



DF9



DF10

그림 3. CFD 분석에 사용된 하단고정체 유로판 형상 및 격자

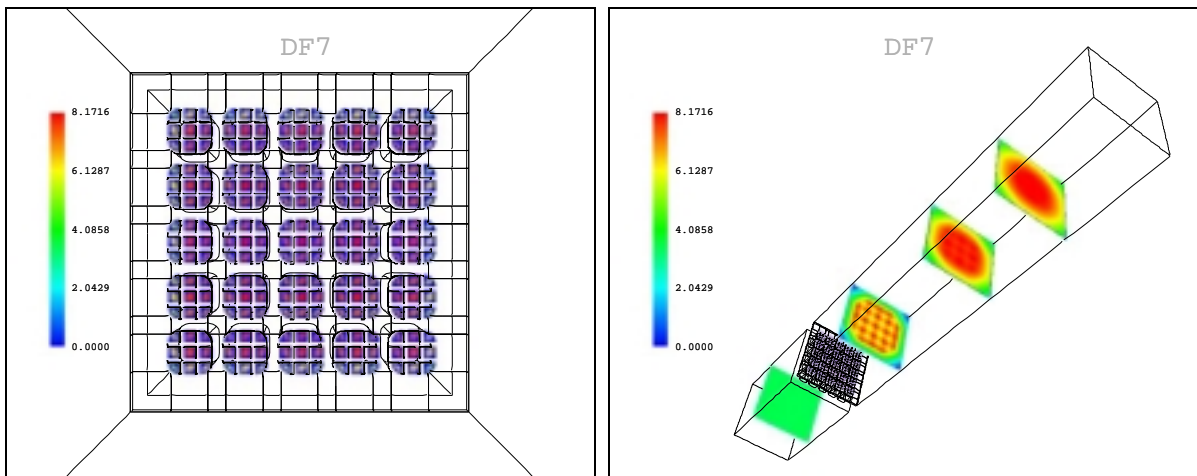
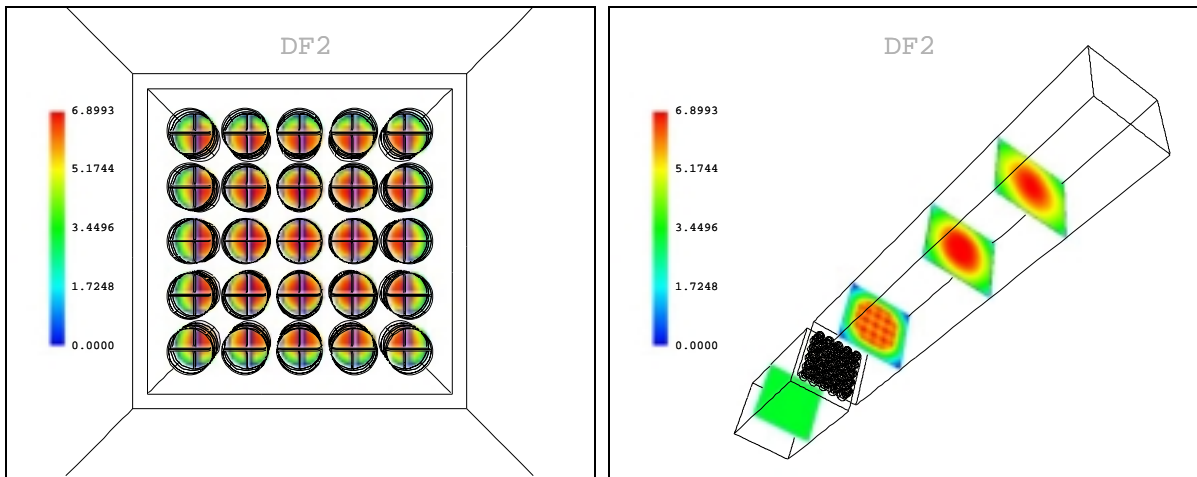
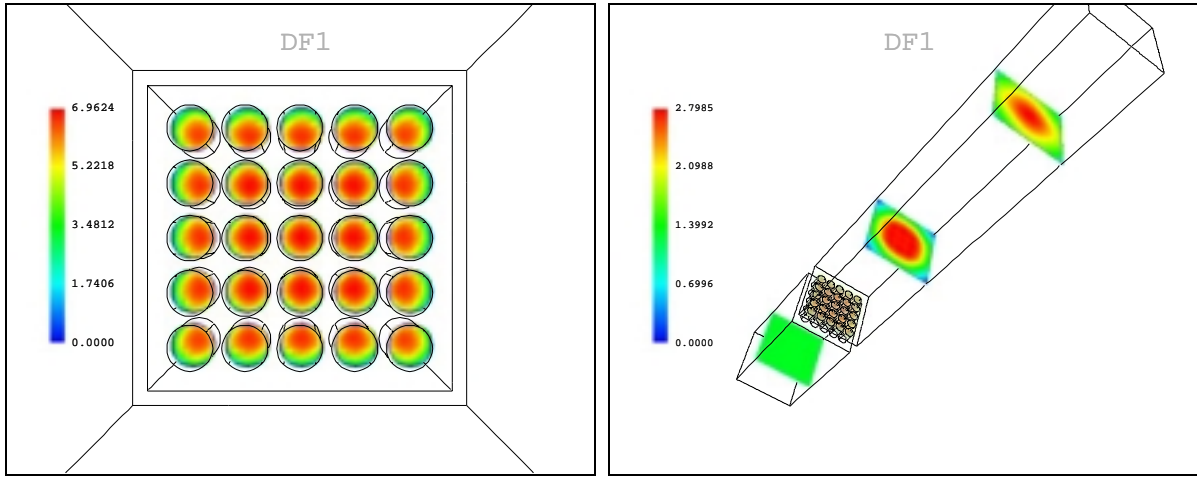


그림 4. 후보모형의 CFD 유동해석 영역에서의 속도분포 (m/sec)

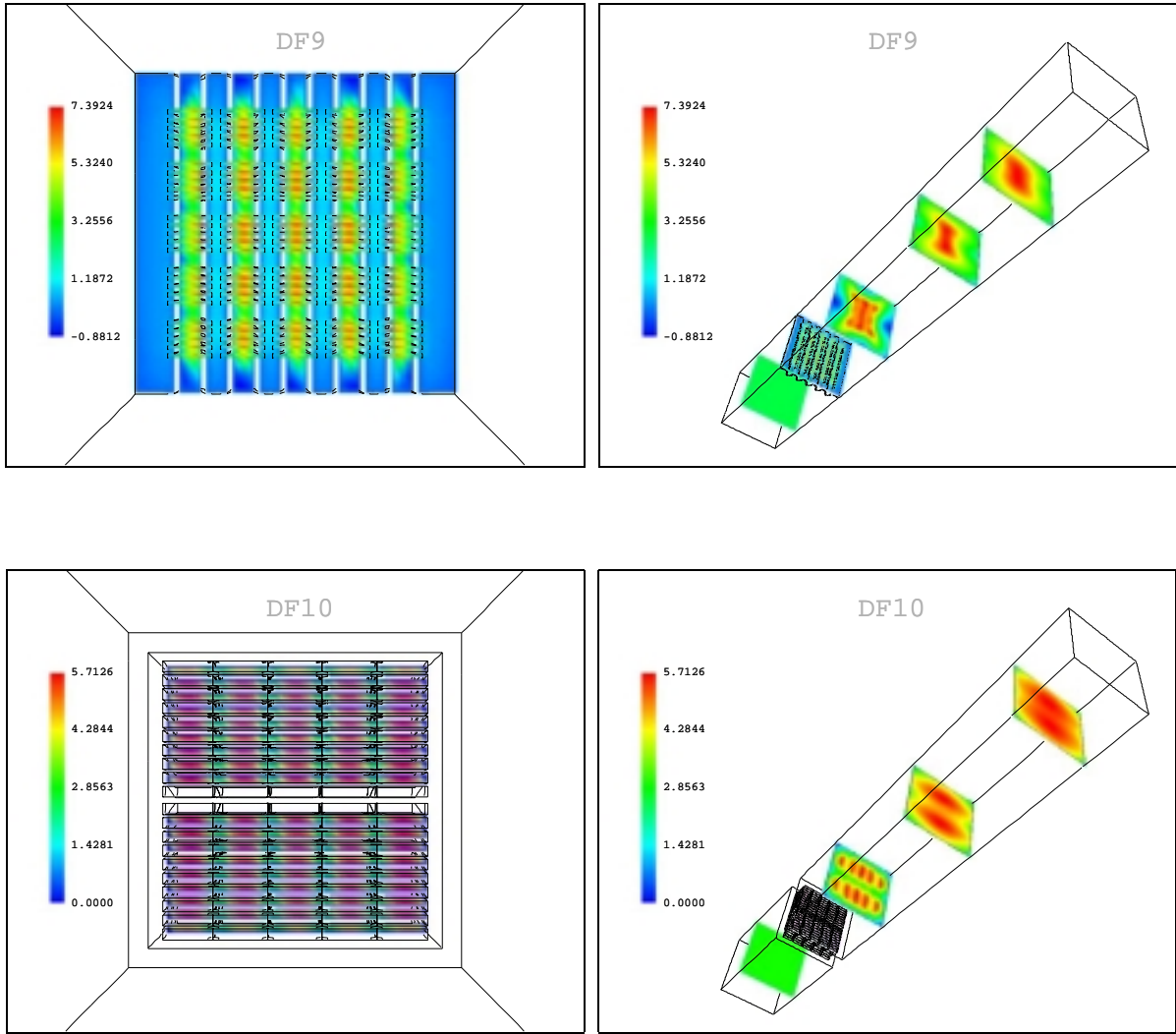


그림 5. 후보모형의 CFD 유동해석 영역에서의 속도분포 (m/sec)

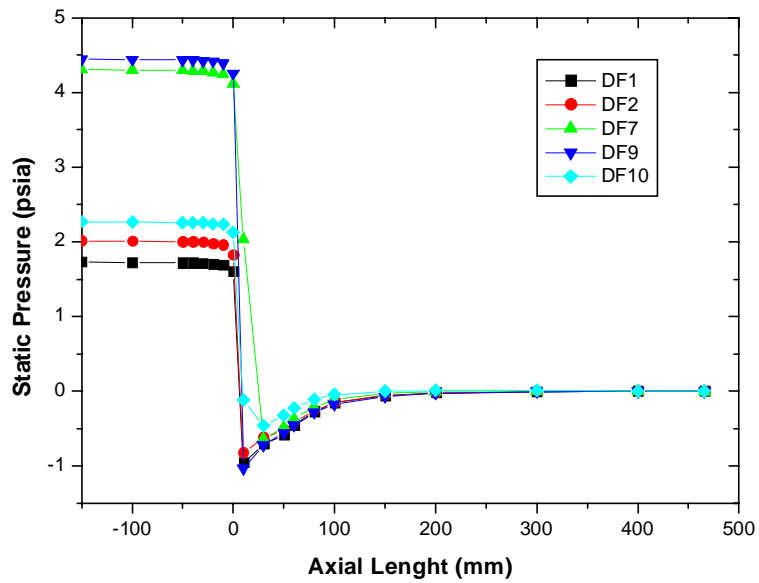


그림 6. 각 후보모형에 대한 CFD 압력강하 해석결과

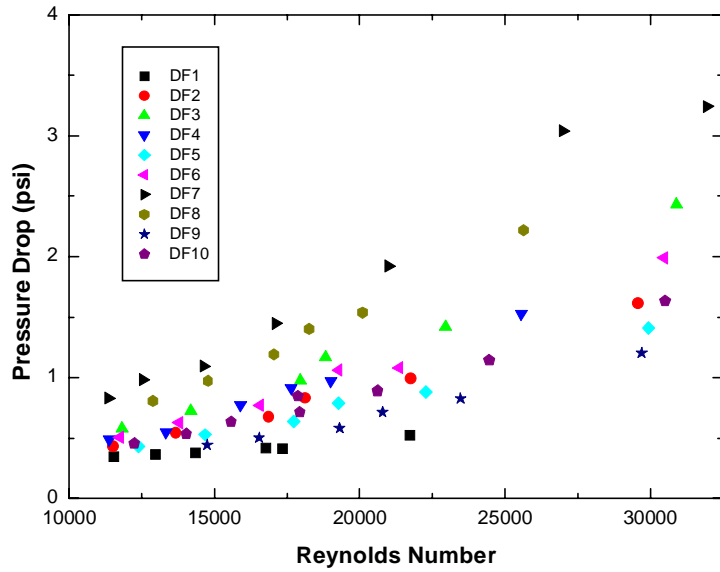


그림 7. 하단고정체 후보모형에 대한 압력강하 시험결과

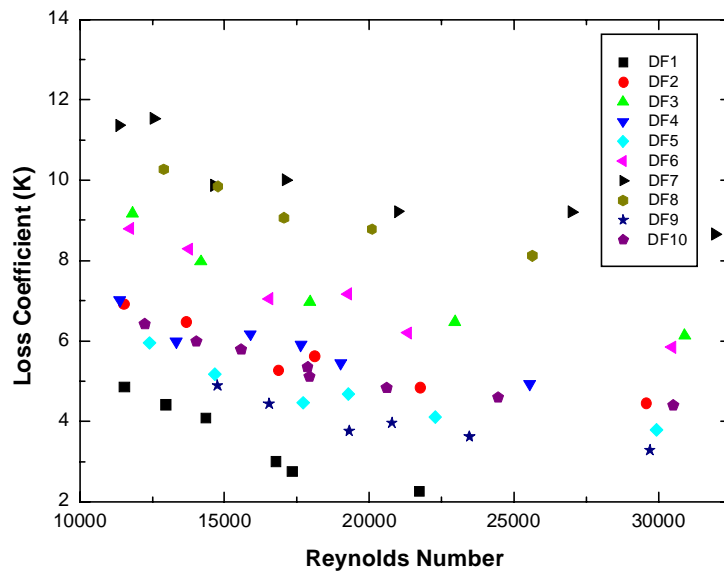


그림 8. 하단고정체 후보모형에 대한 압력손실계수(K)