

CFD 코드를 이용한 튜브형 핵연료집합체 내에서의 유동해석

Flow Analysis of Tubular Fuel Assembly using CFD Code

박종학, 박철, 채희택

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

향후 예상되는 국내의 연구로 수요에 대비하여 하나로 설계 및 운영경험을 바탕으로 새로운 연구로를 구상하고 있다. 연구용 원자로의 핵연료로 가장 많이 사용되고 있는 판형, 튜브형 및 봉형 핵연료에 대해 제작성 및 핵적, 열수력적 특성, 기계구조적 건전성, 하나로 기술의 적용성 등을 종합 검토하여 새 연구로의 핵연료로 튜브형 핵연료를 고려하고 있다.

튜브형 핵연료 집합체는 판형 핵연료가 동심원처럼 각 핵연료 사이마다 냉각수 유로를 형성하면서 여러 겹 적층되어 있는 형태로, 마치 여러 겹의 유동관을 갖는 annulus와 같다. 냉각 유로가 핵연료끼리 서로 연결되어 있어서 냉각수가 핵연료집합체를 흐르면서 유동혼합이 일어나는 봉형과는 달리, 튜브형은 각 냉각유로가 서로 연결되지 않고 독립적이기 때문에 어느 한쪽 유로로 유량이 편중될 경우 핵연료의 열수력적 측면에서 매우 부정적인 결과를 초래할 수 있다. 따라서 튜브형 핵연료에서는 각 유로마다 고른 유속을 갖도록 하는 것이 매우 중요하다.

이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 CFD 코드를 사용하여 초기 개념설계 된 튜브형 핵연료에서의 유동해석을 수행하여 각 유로마다의 평균유속 분포를 알아보고, 그 결과를 분석하여 각 유로마다 고른 유속이 나타나도록 설계변경을 제안하였다. 또한 제안에 따라 설계 변경된 튜브형 핵연료에 대해 유동해석을 수행하여, 각 유로에서의 유속 및 유량배분이 원하는 방향으로 개선되었음을 확인하였다. 또한 최외곽 유로 두께를 변화시켜가면서 유동해석을 수행하고 그 영향을 평가한 결과, 최외곽유로의 두께가 증가할수록 유속도 증가함을 알 수 있었다.

Abstract

Based on the experiences of HANARO, a new research reactor is under conceptual design preparing for future needs of research reactor. Considering various aspects such as nuclear physics, thermal-hydraulics, mechanical

structure and the applicability of HANARO technology, a tubular type fuel has been considered as that of a new research reactor.

Tubular type fuel has several circular fuel layers, and each layer consists of 3 curved fuel plates arranged with constant small gap to build up cooling channels. In the thermal-hydraulic point, it is very important to maintain each channel flow velocity be equal as much as possible, because the small gaps between curved thin fuel plates independently forms separate coolant channels, which may cause a thermal-hydraulic problem in certain conditions.

In this study, commercial CFD(Computational Fluid Dynamics) code, Fluent, has been used to investigate flow characteristics of tubular type fuel assembly. According to the computation results for the preliminary conceptual design, there is a serious lack of uniformity of average velocity on the each coolant channel. Some changes for initial conceptual design were done to improve the balance of velocity distribution, and analysis was done again, too. The results for the revised design showed that the uniformity of each channel velocity was improved significantly. The influence of outermost channel gap width on the velocity distribution was also examined

1. 서론

향후 예상되는 국내의 연구로 수요에 대비하여 하나로 설계 및 운영경험을 바탕으로 새로운 연구로를 구상하고 있다. 연구용 원자로의 핵연료로 가장 많이 사용되고 있는 관형, 튜브형 및 봉형 핵연료에 대해 제작성 및 핵적, 열수력적 특성, 기계 구조적 건전성, 하나로 기술의 적용성 등을 종합 검토하여 새 연구로의 핵연료로 튜브형 핵연료를 고려하고 있다[1].

튜브형 핵연료 집합체는 관형 핵연료가 동심원처럼 각 핵연료 사이마다 냉각수 유로를 형성하면서 여러 겹 적층되어 있는 형태로, 마치 여러 겹의 유동관을 갖는 annulus와 같다. 냉각 유로가 핵연료끼리 서로 연결되어 있어서 냉각수가 핵연료집합체를 흐르면서 유동혼합이 활발한 봉형과는 달리, 튜브형은 각 냉각유로가 서로 연결되지 않고 독립적이기 때문에 어느 한쪽 유로로 유량이 편중될 경우 핵연료의 열수력적 측면에서 매우 부정적인 결과를 초래할 수 있다. 따라서 튜브형 핵연료에서는 각 유로마다의 고른 유속을 보이면서 흐르도록 하는 것이 매우 중요하다.

이러한 문제를 해결 위해 본 연구에서는 CFD 코드를 사용하여 초기 개념설계된 튜브형 핵연료에서의 유동해석을 수행하여 각 유로마다의 유속이 고른 분포를 보이는지 알아보고, 또한 제안에 따라 설계 변경된 튜브형 핵연료에 대해 유동해석을 수행하여, 각 유로에서의 유속 및 유량배분이 원하는 방향으로 개선되었음을 확인하였다. 그 결과를 분석하여 각 유로마다 고른 유속이 나타나도록 설계변경을 제

안하였다. 또한 노심 출력분포 해석결과로부터 안쪽에 바깥쪽으로 갈수록 핵연료 열출력이 급격히 증가하는 것으로 알려졌다[2]. 이러한 문제를 해결하기 위하여 최외곽 유로의 두께를 줄여서 핵반응을 낮춤으로 열출력을 감소시키는 방안이 고려되어, 최외곽 유로두께의 변화가 각 유로마다의 평균유속에 미치는 영향을 알아볼 필요가 있었다. 따라서 최외곽 유로의 두께를 1.8mm, 2.38mm, 2.5mm, 3mm, 3.5mm로 변화시켜 가면서 유동해석을 수행하면서 최외곽 유로두께 변화가 다른 유로 평균유속에 미치는 영향을 평가하였다[3].

2. 해석모델 및 방법

새로 구상되는 연구로에 사용 고려 중인 튜브형 핵연료의 기본적인 개념설계를 바탕으로 CFD 코드를 이용하여 3차원 계산 모델을 만들고, 유동해석과 압력강하 평가를 수행하였다. 해석은 튜브형 핵연료의 기본적인 개념만을 고려한 기본모델과 핵연료 하부 지지 구조물을 포함한 상세모델 2가지에 대해 수행되었다.

튜브형 핵연료 집합체는 관형 핵연료가 동심으로 각 핵연료마다 냉각수 유로를 사이에 두고 여러 겹 적층되어 있는 형태로, 마치 여러 겹의 유동관을 갖는 annulus와 같다.

기본모델은 피복재를 포함하여 두께 1.4 mm 인 6개의 핵연료 사이마다 냉각유로를 형성하도록 2.5 mm 간격을 두고 동심으로 배치되어 있고, 중심에는 반경 10mm인 중심봉이 있다. 핵연료 심재의 총 길이는 700 mm 이다. 이 모델에는 핵연료 하부의 receptacle부분이 고려되지 않았다. 직경 50 mm의 하부관을 통해 냉각수가 유입되어 핵연료 집합체로 흐르는 것으로 가정하였다. 핵연료는 120도 마다 stiffener에 의해 고정되므로 원주방향으로 3부분의 독립적인 냉각유로가 형성된다. 따라서 해석모델은 stiffener를 경계로 1/3만을 해석 대상으로 고려하였다. 실제 계산모델은 그림 1에서 보는바와 같이 이를 다시 1/2로 나누어 한쪽 면은 stiffener에 의한 벽면으로 설정하고, 다른 면은 symmetry로 설정하였다.

튜브형 핵연료 상세모델의 해석에는 중심봉의 반경이 10mm에서 14.5mm로 변경됨에 따라, 계산모델에도 이를 반영하였다. 냉각 유로 두께(2.5mm), 피복재를 포함한 핵연료 두께(1.4mm) 및 길이(700mm)는 동일하다. 하지만 앞서 기본모델 해석에서 예측된 핵연료 하부 receptacle의 diffuser부분에서 발생하는 유동박리의 영향으로 인한 각 유로의 냉각수 평균 유속의 편차를 줄이기 위해, 핵연료를 60mm 가량 유동 방향으로 이동하였으며, stiffener를 중심으로 1/3부분만을 계산모델로 고려하여 그 양쪽 경계면은 symmetry로 처리하였다.

그림 5는 튜브형 핵연료 상세모델의 유동장 및 압력강하 해석을 위한 계산격자를 보여주고 있다. 핵연료 지지 구조인 spider 및 fin과 grapple head가 유동에 미치는 영향을 알아보기 위해 이들의 형상을 완전히 고려하여 계산 모델에 포함시킨 것을 볼 수 있다. 입구에서 조건은 각 유로마다의 평균 유속이 9m/s 정도로 유지되었

을 때의 유량을 산정(24.13 kg/s)하여 주어졌다.

최외곽 유로두께 변화의 영향을 알아보기 위한 유동해석에 계산모델들은 기본적으로 튜브형 핵연료 세부모델과 동일하고, 최외곽 유로의 두께만 1.8mm, 2.38mm, 2.5mm, 3mm, 3.5mm로 변화하였다. 유로두께의 변화에 따라 전체적인 유로단면적이 약간씩 변화하지만 입구에서의 유량은 유로두께의 변화와 관계없이 24.13kg/s을 유지하였다.

대류항의 이산화는 1차 상류차분법을 이용하였으며, 압력항 및 속도항의 처리를 위해 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다[4]. 유동해석 시 적용된 난류모델은 standard k- ϵ 모델을 적용하였으며, 벽면근처에서 격자처리를 위해 벽함수를 적용하였다. 입구유동의 난류강도는 5%, 특성길이는 5mm로 하였다. 튜브형 핵연료에서 발생하는 대부분의 압력강하는 냉각수가 핵연료 사이의 좁은 냉각유로를 통과하면서 일어나므로, 이러한 현상을 가능한 한 실제에 가깝게 예측하기 위해서 핵연료 사이 냉각유로 부분에 많은 격자가 집중되었다. 유로의 반경방향 격자수는 10개이지만 실제 거리가 2.5mm 에 불과하므로 격자간격은 0.25mm이기 때문에 매우 조밀한 격자를 구성한다.

3. 해석결과 및 논의

3.1 기본모델

냉각수가 $\varnothing 50$ mm의 관을 통해 유입되어 diffuser를 거쳐 각 유로로 배분된다. 그림 2는 핵연료 냉각유로 입구 근처에서의 유속분포를 보여주고 있다. 가장 안쪽 유로(1st)와 가장 바깥쪽 유로(7th)는 벽면에 인접해 있으므로 벽면효과에 의해 벽면 근처 유속이 감소하기 때문에 이들 유로로 유입되는 유속이 상대적으로 작은 것을 볼 수 있다. 특히 최외곽 유로(7th)의 경우에는 유로 입구 바로 앞쪽에서 diffuser에 의한 separation이 발생하여 가장 안쪽 유로보다도 더 작은 유속을 보인다. 각 유로마다 출구에서의 평균 유속을 그림 3에서 비교하였다. 입구에서의 유속 차이에 의해 출구에서도 최외곽 유로(7th)의 유속이 가장 낮은 값을 보이며 다음으로 가장 안쪽 유로가 낮은 유속을 보인다. 최고 평균 유속을 보이는 유로는 3번이며, 2번과 4번 유로도 3번과 아주 근소한 차이를 보이며 높은 유속을 나타냈다. 이후부터는 급격한 속도 감소를 보인다. 각 유로마다의 속도차이에 대한 정량적인 비교를 위해 각 유로 출구에서의 유로 평균유속과 전체 평균유속을 비교하여 표 1에 정리하였다. 전체 평균유속에 비하여 1번과 6번 유로는 약 6%정도, 7번 유로는 약 15%정도 작은 값을 보인다.

Stiffener가 없을 경우 튜브형 핵연료사이 각 유로의 수력직경을 계산해보면, 모든 유로에서 유로 폭의 2배인 동일한 값을 보인다. 하지만 stiffener가 있는 경우에는 안쪽 유로에서 가장 작고 바깥으로 갈수록 약간씩 증가한다. 따라서 각 유로마다 발생하는 압력강하가 동일하다면 각 유로에서의 평균 유속은 수력직경의 변화와

동일하게 변화할 것으로 판단하였으나, 벽면효과와 diffuser에 의한 separation으로 인해 각 유로마다의 평균유속이 차이를 보이고 있다. 수력직경의 크기는 유동저항과 관련 있으므로 유로 평균유속에 영향을 주지만, 벽면효과와 diffuser에 의한 separation이 더 지배적인 영향을 주는 것으로 보인다.

유로에서 발생하는 유동방향으로의 압력강하를 그림 4에서 보여주고 있다. 출구에서의 각 유로압력은 동일하지만, 입구에서의 압력이 차이를 보이고 있다. 이는 유로입구에서의 국부적인 유동조건 변화에 따라 각 유로로 흐르는 유량이 영향을 받는다는 것을 의미한다. 각 유로에서의 압력강하는 최대 약 144kPa에서 최소 약 100kPa로 큰 차이를 보인다. 하부 지지구조물 및 receptacle이 포함되지 않은 튜브형 핵연료 집합체에서의 전체 압력강하는 약 128kPa 정도로 예측되었다(표 2).

3.2 상세모델

그림 6은 핵연료 집합체 주요부에서의 유동장을 보여주기 위한 속도벡터들이다. 핵연료가 장전된 유동관으로 유입된 유동은 receptacle부분에서 유로가 좁아지면서 유속이 증가하는 것을 볼 수 있다. 핵연료 잠금장치 및 receptacle 벽면을 연결하는 spider와 회전저항을 주면서 핵연료를 receptacle 상부에 지지하는 fin 사이에 생성된 공간에 재순환(recirculation) 유동이 발생하는 것을 볼 수 있다. Fin이 시작되는 부분에서는 두꺼운 fin에 의한 유로의 갑작스런 형상 변화 때문에 유동박리가 발생된다. 여기서 발생된 박리는 fin의 측면을 타고 diffuser에서 핵연료 유로가 시작되는 영역까지 강한 재순환 유동을 형성한다. 그림 7은 이러한 유동 현상을 보다 가시적으로 볼 수 있도록 유동궤적을 보여주고 있다. 특히 그림 7(a)에서 보면 fin에서 발생된 유동박리와 재순환유동에 의해 핵연료유로의 앞부분에서 재순환유동에 의해 유로가 좁아지는 vena contracta 효과가 나타나는 것을 볼 수 있다. 이러한 유동현상은 그림 8에서 보는 바와 같이 유로의 입구속도가 중앙부에서는 빠르고 stiffener에 인접한 부분에서 상대적으로 느려지는 원주방향으로의 속도 불균형을 일으키며, 더 나아가 핵연료 유로 입구영역에서 원주방향으로의 불균일한 열전달율로 인한 핵연료의 원주방향 온도구배를 일으킬 것으로 예상된다. 또한 vena contracta 발생으로 인한 부가적인 압력손실을 초래한다.

그림 9는 receptacle과 핵연료 냉각유로입구 사이 유동영역 중에서 fin에 의한 유동박리의 영향을 받지 않는 유로의 중간영역(symmetry plane)에서의 속도분포이다. Receptacle과 유동관이 만나는 부분의 불연속적인 급격한 형상변화로 인해 그림에서 보는 바와 같이 유동관이 시작되는 부분인 그림 9(a) 좌측 상단부에서 유동박리와 재순환 및 재부착유동이 발생함을 볼 수 있다. 핵연료 냉각유로 통과 후 냉각수가 다시 합쳐지는 영역에서의 유속분포를 보여 주고 있는 그림 9(b)를 보면, 냉각유로부분과 핵연료부분의 유속차이로 인해 핵연료 후미에서 활발한 유동혼합이 일어나지만 곧 안정되는 것으로 보인다.

그림 10은 각 유로별 평균유속을 보여주고 있다. 가장 안쪽 및 바깥쪽 유로는 인접한 유로에 비해 상대적으로 낮은 유속을 보이지만, 나머지 유로에서는 안쪽 유로에서 바깥쪽 유로로 갈수록 유속이 증가하는 경향을 보인다. 이러한 경향은 핵연료의 출력이 안쪽에서 바깥쪽으로 갈수록 증가하는 경향을 보이는 점을 고려할 때 바람직하다고 볼 수 있다. 핵연료 냉각유로 입구가 receptacle로부터 거리를 두고 있어 유동박리와 재순환유동에 영향을 받지 않는데도 불구하고 가장 안쪽과 바깥쪽 유로에서의 상대적인 속도감소를 보이는 것은 이들 유로가 벽면에 인접하여 있으므로 유입되는 유동의 속도결손에 의한 영향으로 볼 수 있다. 속도결손이 없다면 각 유로별 평균유속은 수력직경에 비례하여 증가하지만, 벽면에서의 마찰에 의한 속도결손으로 인해 그림 11에서 보는 바와 같이 벽면에 인접한 가장 안쪽유로와 가장 바깥쪽 유로에서 수력직경의 변화경향을 따르지 않는다.

각 유로 평균유속 불균일이 어느 정도 개선되었는지 알아보기 위해 기본모델의 유속계산결과와 비교해 보았다(그림 12). 여기서 나타낸 값은 각 유로의 평균유속을 전체평균유속으로 나누어줌으로서 상대적인 값으로 표시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 기본모델에서는 receptacle에서 발생한 유동박리와 재순환유동에 의해 6번과 7번 유로에서 상대적으로 낮은 값을 보이고 있지만, 이러한 유동현상을 고려하여 핵연료를 receptacle과 거리를 두도록 설계를 개선한 상세모델의 경우에는 바깥쪽 유로로 갈수록 유속이 증가하는 경향이 나타나는 것을 볼 수 있다. 표 3은 각 유로별 평균유속과 수력직경 및 각각의 평균값에 대한 상대적인 크기를 보여준다. 이상과 같은 결과들을 볼 때, 핵연료를 receptacle로부터 어느 정도 거리를 둠으로써 냉각유로 별 평균유속 편차가 상당히 개선되었음을 볼 수 있다.

그림 13은 튜브형 핵연료에서의 압력분포를 보여주고 있는데, 핵연료 전체를 보여주는 그림 13(a)를 보면 receptacle에서 상당히 큰 압력강하가 일어나는 것을 볼 수 있다. 이처럼 receptacle에서 압력강하가 큰 이유는 이 부분에서 유로단면적이 감소할 뿐만 아니라 핵연료 지지 및 잠금장치가 위치하여 유동을 차단하기 때문이다. 따라서 압력강하를 줄이기 위해서는 이 부분에서의 유동단면적이 증가하도록 spider의 두께를 줄이는 것 같은 고려가 있어야 할 것으로 보인다.

각 유로별로 발생하는 압력강하가 표 4에 나타나 있는데, 최대차압과 최소차압간에 차이가 10kPa을 넘지 않는다. 압력강하 평균값으로 볼 때, 핵연료 냉각유로에서 발생하는 압력강하는 약 129.5kPa정도 일 것으로 예상되며, 이는 기본모델에서 예측된 128kPa과 매우 근사한 값이다. 또한 핵연료 지지구조물 및 grapple head를 포함한 유동관 전체에서의 압력강하는 약 195kPa 정도이다.

3.3최외곽유로두께변화의 영향

그림 14는 최외곽 유로두께의 변화에 따른 핵연료 냉각유로 입구에서의 속도분포를 보여주고 있다. 두께가 가장 작은 1.8mm에서는 최외곽유로의 유속이 다른 유

로들에 비해 낮지만 두께가 점점 증가하면서 유속도 증가함을 볼 수 있으며, 유로 두께가 3.5mm로 증가하면 최외곽 유로의 유속이 다른 유로에 비해 더 빨라지는 것으로 나타나고 있다. 이는 최외곽 유로두께의 증가로 이 부분에서의 유동저항이 감소하여 유량이 집중되면서 다른 유로의 유량이 감소하여 나타나는 것으로 보인다.

최외곽 유로두께의 변화가 유속에 미치는 영향을 직접적으로 확인하기 위해 유로별 평균유속을 그림 15에서 보여주고 있다. 최외곽 유로의 두께가 2.5mm이하인 경우, 가장 안쪽 유로와 가장 바깥쪽 유로에서 인접유로에 비해 상대적인 속도감소를 보이고 나머지 유로에서는 안쪽에서 바깥쪽으로 갈수록 유속이 빨라지는 경향을 보인다. 하지만 다른 유로에 비해 최외곽 유로의 두께가 작은 1.8mm인 경우에는 최외곽 유로에서의 유속감소가 심화되는 것을 볼 수 있다. 이는 유로두께의 감소로 입구 유동저항이 증가(수력직경 감소)했기 때문이다. 최외곽 유로의 두께가 다른 유로에 비해 큰 경우(3mm, 3.5mm)에는 안쪽유로에서 상대적인 유속감소와 안쪽에서 바깥쪽으로 갈수록 유속이 증가하는 현상은 이전과 동일하지만, 최외곽 유로에서의 유속은 오히려 다른 유로들에 비해 높은 것을 볼 수 있다. 이러한 유속편차는 다른 유로와 최외곽 유로간의 두께차이가 클수록 심화된다.

유로별 평균유속을 전체 평균유속으로 나누어 무차원화 한 값을 그림 16 및 표 5에서 보여주고 있다. 1.8mm인 경우 최외곽 유로의 유속이 평균유속에 비해 85%정도에 지나지 않는다. 2.5mm와 2.38mm인 경우에는 인접한 유로에 비해 유속이 상대적으로 작지만, 평균유속에 매우 근접한 값을 보인다. 3mm와 3.5mm인 경우에는 평균유속에 비해 각각 6%와 11% 높은 값을 보인다. 한 가지 주목할 점은 1.8mm는 2.5mm에 비해 약 28% 감소했고 3.5mm는 2.5mm에 비해 40% 증가하여 3.5mm가 1.8mm에 비해 변동 폭이 큰데도 불구하고, 평균유속의 변화는 1.8mm는 15% 감소하고 3.5mm는 11% 증가하는데 그쳤다. 이러한 이유는 벽면에서의 속도결손에 의한 영향이라고 판단된다.

4. 결론

초기 개념설계 된 튜브형 핵연료에 대한 유동해석을 통하여, 튜브형 핵연료 설계 시 필수적인 요구되는 유로마다 동일한 평균유속을 보이는가를 확인하였다. 유동해석 결과 유로마다의 평균 유속이 최대 15%까지 편차를 보이는 것으로 확인하였다. 유동해석 결과를 고찰한 결과, 이러한 평균유속의 불균일은 핵연료 하부 지지구조물 및 벽면효과에 의한 속도결손등의 영향인 것으로 판단되어, 튜브형 핵연료 유로로 유입되는 유동이 이러한 영향에서 어느 정도 벗어나는 위치까지 핵연료를 이동하도록 설계변경하였다. 설계변경 된 핵연료의 유로 평균유속 불균일 개선을 확인하기 위해 유동해석을 수행한 결과, 평균유속에 대한 각 유로에서의 편차가 최대 5%를 넘지 않았으며, 가장 안쪽과 바깥유로를 제외하고는 안쪽유로에서 바깥유로로 갈수록 유속이 점점 증가하는 분포를 보였다. 이러한 분포경향은 핵연료의 출력이

안쪽에서 바깥쪽으로 갈수록 증가하는 점을 고려할 때 오히려 바람직한 결과라고 판단된다. 하지만 벽면에 인접한 유로에서의 평균유속이 상대적으로 낮게 나타나는 경향은 벽면 근처에서의 속도결손에 의해 개선되지 않았다.

최외곽유로의 두께가 증가할수록 유동저항의 감소로 유속이 증가하였지만, 인접한 벽면의 영향으로 인해 유로두께가 감소할 때 일어나는 유속감소에 비해 변동폭이 작은 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 박철 외 9인, “수출전략형 연구로 설계 : 핵연료 선정 타당성 검토”, 기술보고서, KAERI/TR-2554-2003, 2003.
2. 조동건 외 5인, “SRAC/MCNP 코드를 이용한 고성능연구로 노심 예비개념설계”, 한국원자력학회 2003년도 추계학술대회 발표자료, 2003.
3. 박종학 외 3인, “CFD 코드의 수출 전략형 연구로 열수력 개념설계 적용”, KAERI/TR-2663/2004, 2004.
4. Fluent User’s Guide.

표 1 Average velocities and hydraulic diameters at each channel for basic model

channel	velocity(m/s)	remark	D _h (mm)	remark
1st	8.40	0.941	4.377	0.937
2nd	9.25	1.037	4.557	0.976
3rd	9.33	1.046	4.656	0.997
4th	9.21	1.032	4.719	1.011
5th	8.95	1.003	4.763	1.020
6th	8.45	0.947	4.795	1.027
7th	7.61	0.853	4.819	1.032
Avg.	8.923	1	4.669	1

표 2 Pressure drop on each channel for basic model

channel	Pressure drop(kPa)
1st	127
2nd	142
3rd	144
4th	139
5th	131
6th	118
7th	100
net	128

ㄎ 3 Average velocities and hydraulic diameters at each channel for detail model

channel	velocity(m/s)	remark	D _h (mm)	remark
1st	8.27	0.934	4.563	0.963
2nd	8.69	0.982	4.659	0.984
3rd	8.82	0.997	4.723	0.997
4th	8.90	1.006	4.764	1.006
5th	9.00	1.017	4.792	1.012
6th	9.10	1.028	4.819	1.018
7th	8.79	0.993	4.835	1.021
Avg.	8.85	1	4.736	1

ㄎ 4 Static pressure difference between inlet and outlet of coolant channel for detail model (unit : kPa)

channel	P _{in}	P _{out}	ΔP
1st	-82.2	-206.5	124.3
2nd	-78.3	-211.5	133.2
3rd	-80.8	-212.4	131.6
4th	-83.3	-213.0	129.7
5th	-83.4	-213.5	130.1
6th	-81.5	-213.5	132.0
7th	-85.1	-210.8	125.7
avg			129.5

ㄎ 5 Average and non-dimensional velocity at each channel

	1.8mm		2.38mm		2.5mm		3.0mm		3.5mm	
	V(m/s)	V/V _{avg}								
1	9.2	0.980	8.5	0.944	8.3	0.934	7.7	0.912	7.3	0.903
2	9.5	1.015	8.9	0.983	8.7	0.982	8.2	0.962	7.7	0.943
3	9.6	1.025	9.0	0.998	8.8	0.997	8.3	0.978	7.8	0.954
4	9.6	1.031	9.1	1.007	8.9	1.006	8.4	0.986	7.8	0.961
5	9.7	1.039	9.2	1.019	9.0	1.017	8.4	0.994	7.9	0.967
6	9.8	1.044	9.3	1.030	9.1	1.028	8.5	1.006	7.9	0.977
7	8.0	0.856	8.9	0.980	8.8	0.993	9.0	1.060	9.0	1.111

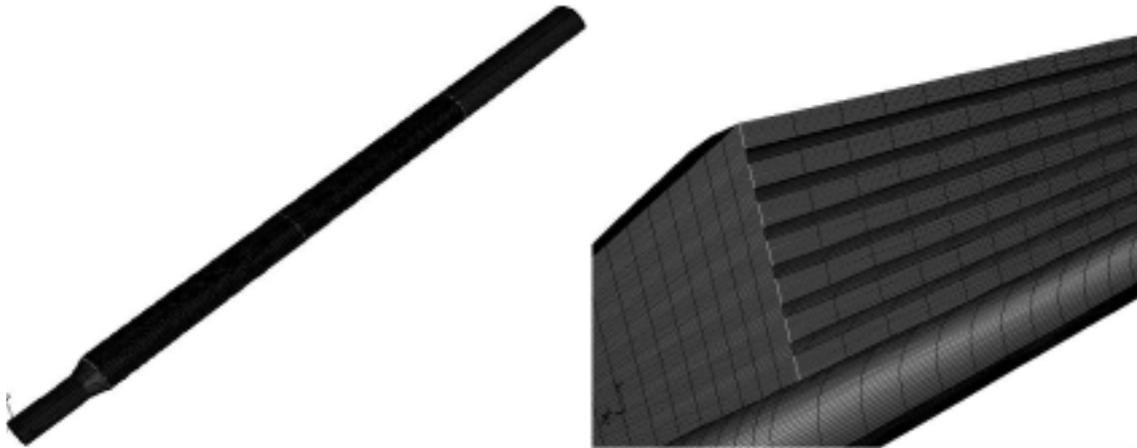
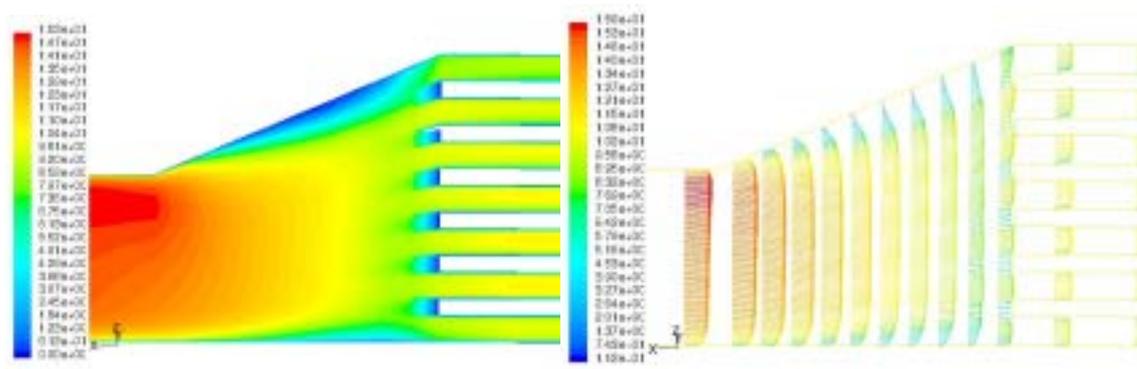


그림 1 Computational grid for basic model



(a) velocity contour

(b) velocity vector

그림 2 Velocity distribution around the channel inlet

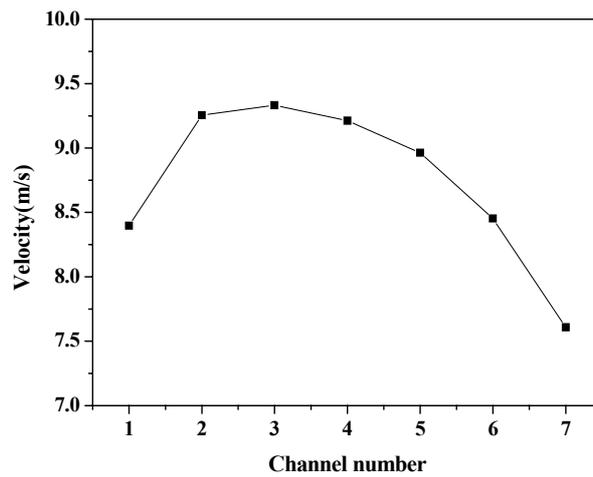


그림 3 Average velocity distribution at the channel outlet of basic model

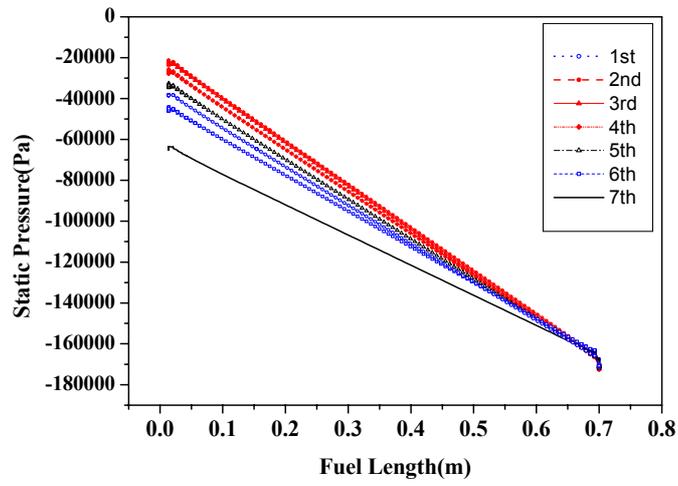
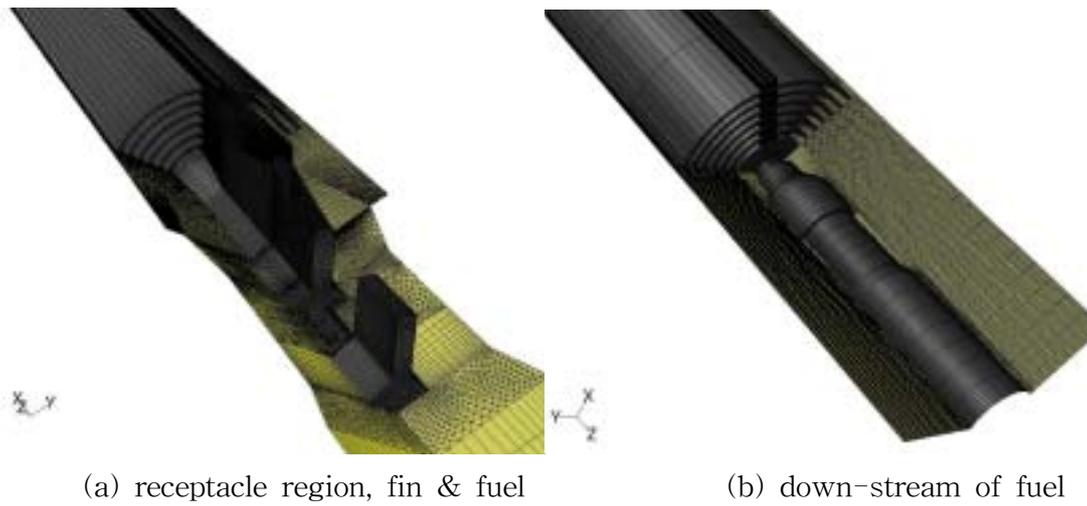


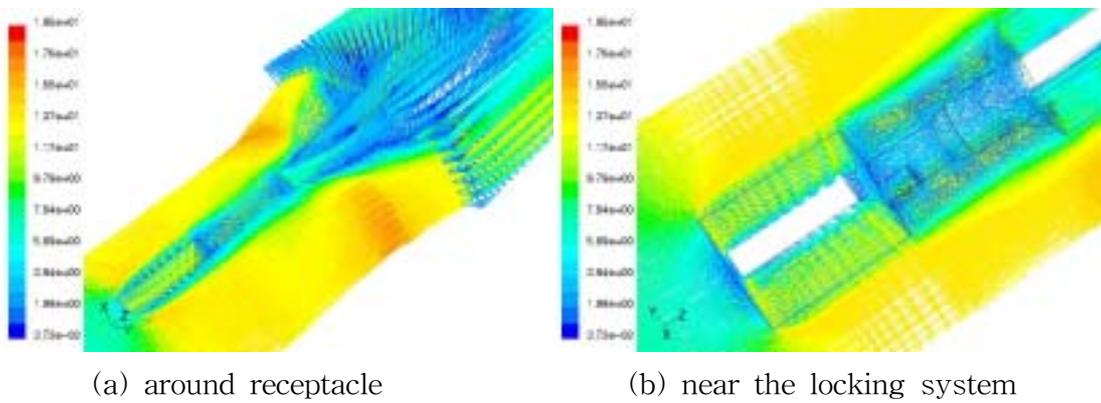
그림 4 Stream-wise Pressure drop for the flow direction



(a) receptacle region, fin & fuel

(b) down-stream of fuel

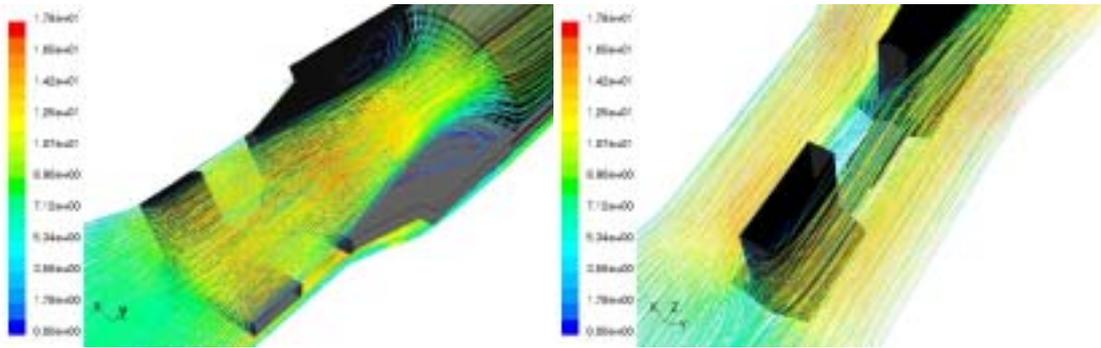
그림 5 Computational grid for detail model



(a) around receptacle

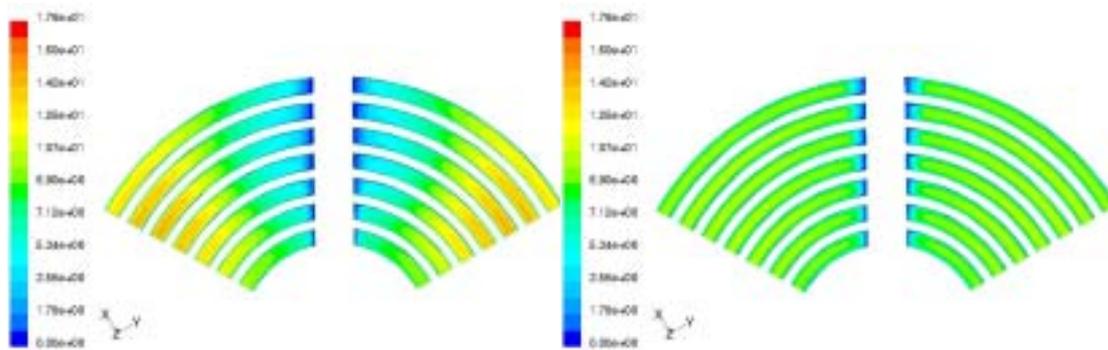
(b) near the locking system

그림 6 Velocity vector distribution around the receptacle



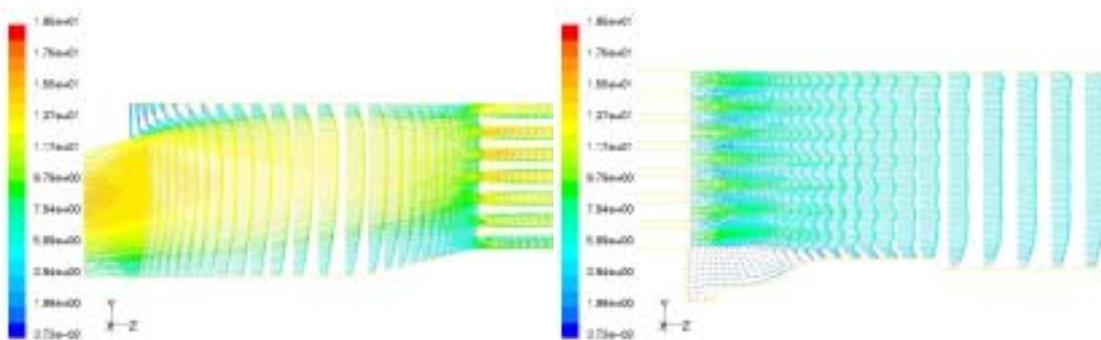
(a) up-stream of fuel channel (b) near the locking system

그림 7 Flow path-line



(a) inlet of coolant channel (b) outlet of coolant channel

그림 8 Velocity contour at inlet and outlet coolant channel



(a) up-stream of fuel channel (b) down-stream of fuel channel

그림 9 Velocity vectors on the symmetry plane

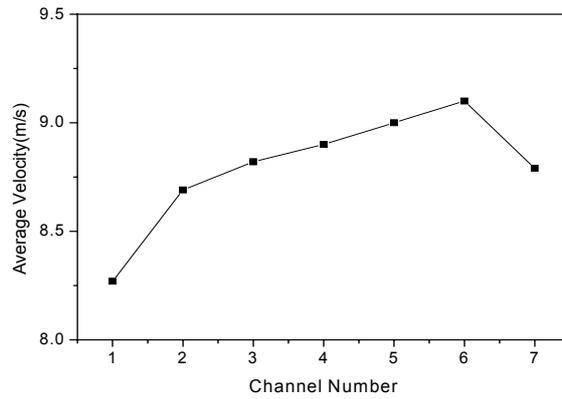


그림 10 Average velocity distribution at the channel outlet of detail model

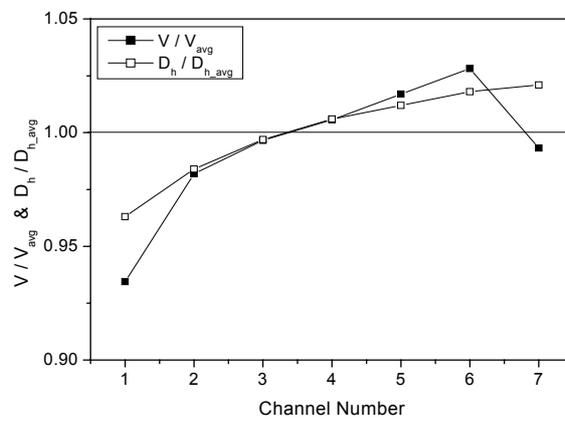


그림 11 Variation of average velocity and hydraulic diameter at each channel of detail model

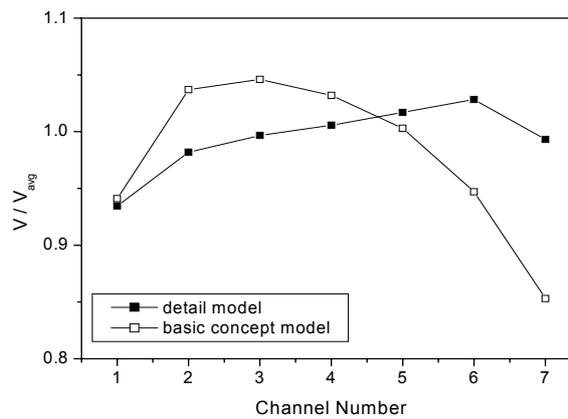
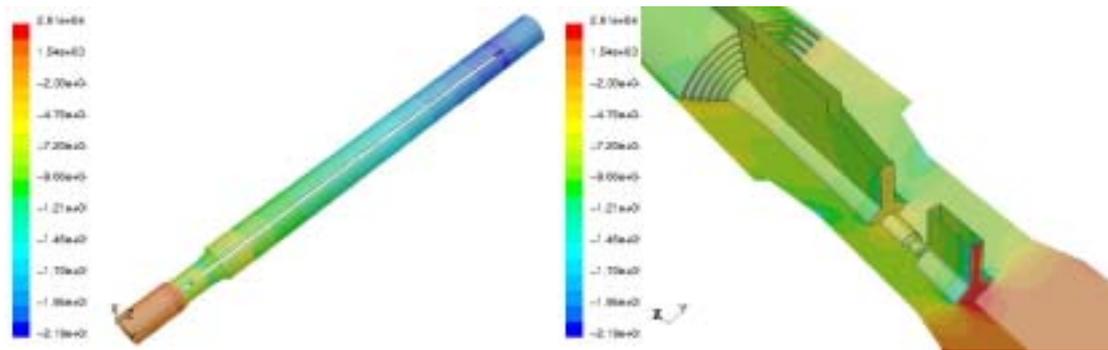


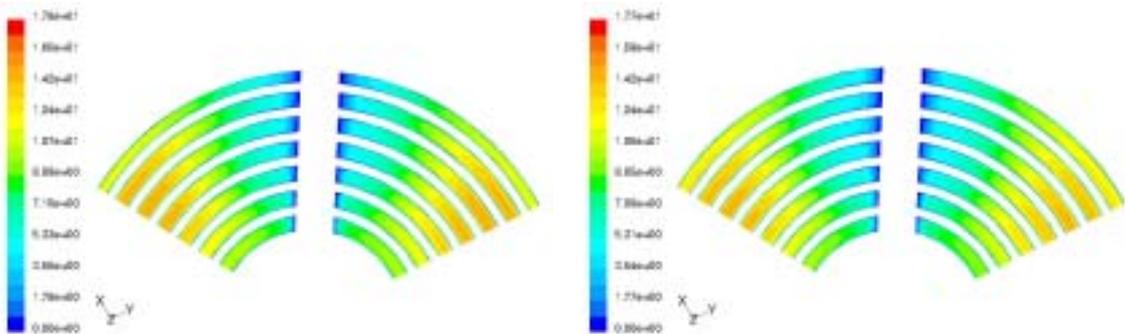
그림 12 Improvement of average velocity distribution of outlet region



(a) all over the fuel assembly

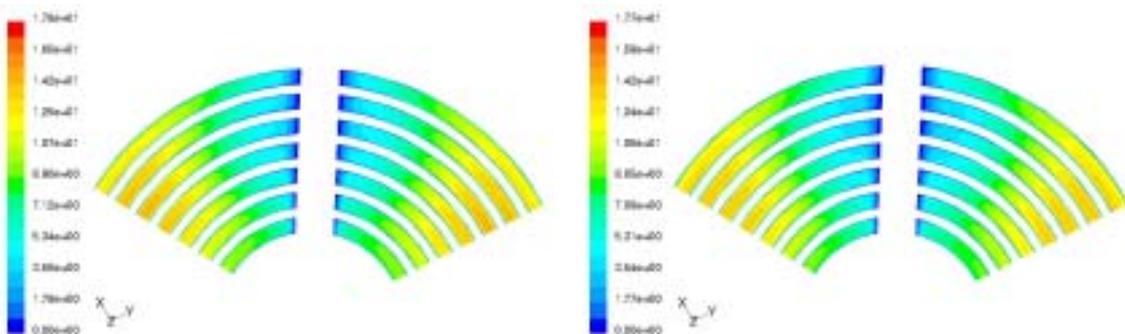
(b) receptacle region

그림 13 Pressure contours



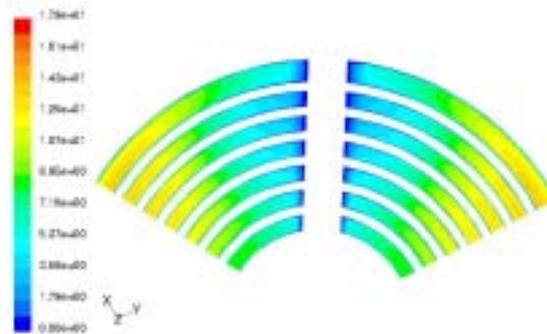
(a) 1.8mm

(b) 2.38mm



(c) 2.5mm

(d) 3.0mm



(e) 3.5mm

그림 14 Velocity contour at the inlet of coolant channels

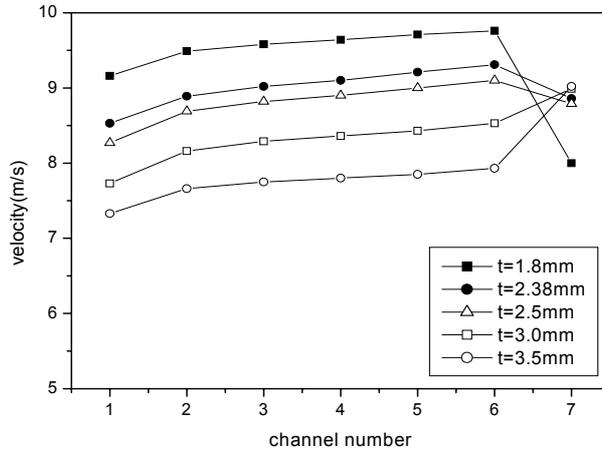


그림 15 Variation of average channel velocity with outermost channel thickness

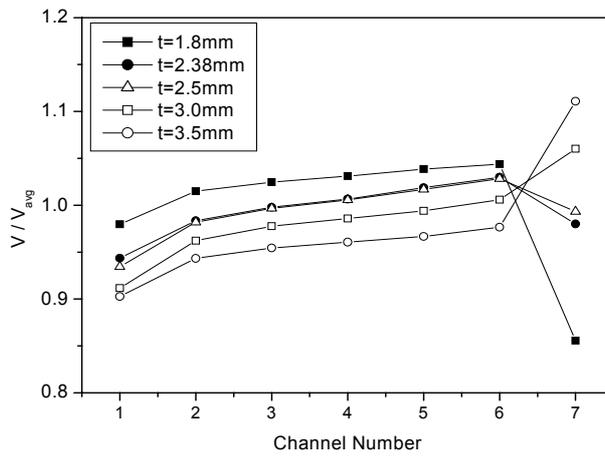


그림 16 Variation of non-dimensional channel velocity with outermost channel thickness