2000 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

일체형 선박로의 자연순환 특성에 대한 해석 연구

Numerical Analysis on the Natural Circulation Characteristics of Integral Type Marine Reactor

김태완, 김재학, 박군철

서울대학교
서울특별시 관악구 신림동 산 56-1

요약

선박로는 지상원전에 비해 매우 다른 열수력 특성을 보여준다. 특히 자연대류 운전 시 선체의 경사 및 요동 등에 기인한 유동장의 변화는 원자로 냉각능력에 크게 영향을 주게 되므로 이에 대한 연구는 필수적이다. 본 연구에서는 기존의 실험자료를 바탕으로 경사 시 모듈형 증기발생기를 갖는 일체형 선박로의 자연대류 특성을 범용 전산유체코드인 CFX-4 를 사용하여 해석하였다. 해석 결과, 부력에 의한 영향으로 상단에 위치하는 증기발생기 카세트로의 유량이 증가하였다. 이로 인하여 증기발생기 출구에서 온도차가 발생하였는데 이 온도차는 열적혼합에 의해 강수부를 따라가면서 사라지게 되었다. 또한 상부압력헤더 주위에서는 증기발생기 카세트의 낮은 차압으로 인해 하부의 고온관을 통과한 유량이 상부의 증기발생기 방향으로 퍼져나가는 현상이 나타났다. 이를 통하여 상부 증기발생기 카세트로 유량이 증가하는 현상을 정성적으로 파악할 수 있었다.

Abstract

A marine reactor shows very different thermal-hydraulic characteristics compared to land-based reactor. Especially, the study on the variation of flow field due to ship motions such as inclination, heaving and rolling is essential since flow variation has great influence on the reactor cooling capability. In this study, the natural circulation characteristics of integral type marine reactor with modular steam generators were analyzed using computational fluid dynamics code, CFX-4 for inclined conditions. From the results, it was found that the flow rate in ascending steam generator cassette increases due to buoyancy effect. Due to this flow variance, the temperature difference occurs at the exit of steam generator. But this temperature difference is mitigated through downcomer by thermal mixing. Also, around the upper pressure header, the flow from descending hot leg is spread to the ascending steam generator cassettes due to low pressure drop in steam generator cassettes. From this result, the increase of flow rate in ascending steam generator cassette could be understood qualitatively

1. 서론

원자력 이용의 다변화에 따라 지역난방, 해수담수화 및 선박의 추진기관으로서의 중소형 일체형 원자로의 이용이 기대되고 있다. 선박의 추진기관으로 사용되는 중소형 일체형 원자로는 일차계통의 배관을 제거하여 대형냉각재 상실사고를 원천적으로 방지하고 무붕산 노심을 채택하여 사고대처능력을 더욱 향상시키는 등 기존의 지상원전에 비해 고도의 안전성을 갖추는 것을 목표로 설계 및 제작되어지고 있다. 이러한 안전성 재고의 목적으로 피동형 안전개념 또한 채택되고 있는데, 그 중 중요한 역할을 하는 것이 자연대류를 통한 잔열제거의 개념이다. 그러나 선박로의 경우 지상원전에 비해 매우 다른 열수력적인 특성을 보여준다. 특히 모듈형 증기발생기를 가지고 있는 일체형 선박로에서

자연대류을 통한 잔열제거를 하는 경우, 낮은 유속으로 인해 선체의 경사 및 요동에 따라 일차측 냉각수의 분포가 비균일해지게 된다. 이러한 현상은 일차측 냉각수의 비균일한 온도분포를 야기시키는데 이는 원자로 냉각능력에 부정적인 영향을 주게 된다.

본 연구에서는 일체형 원자로 자연대류 운전 시 선체의 경사가 유동장 및 온도장에 미치는 영향을 기존에 이루어진 일체형 원자로 자연대류 실험을 바탕으로 해석해보았다. 특히 경사에 의한 3차원 효과가 두드러지게 나타나는 상부압력헤더로부터 모듈형 증기발생기를 지나 강수부 하단에 이르는 부분을 모델링하여 경사가 자연대류운전 시 냉각수 유동분포와 혼합현상에 주는 영향을 파악하는 것을 목적으로 하였다. 해석 연구를 위해 범용 전산유체코드인 CFX-4[1]를 사용하였다.

2. 해석 대상 실험

2.1 일체형 원자로 자연대류 실험장치

일체형 선박로의 경사 시 자연대류 특성을 알아보기 위해 한국원자력연구소에서 개발중인 일체형 원자로 SMART[2]를 모델로 한 일체형 원자로 실험장치로 자연대류 실험을 수행하였다[3]. 실험장치는 Ishii[4,5]의 척도해석 방법론에 따라 길이비 1/2.5, 유로면적비 1/80로 축소, 제작되었다. 실험장치의 개략도는 그림 1과 같다. 실험장치는 총 72 kW의 출력을 갖는 12개의 전열봉, 4개의 고온관, 상부압력헤더, 8개의 모듈형 증기발생기 카세트 그리고 강수부 등으로 구성되어 있다. 또한 15° 간격으로 경사를 모사할 수 있는 경사지지대 위에 실험장치를 위치시켜서 경사실험이 가능하도록 하였다.

자연대류 실험 시 계측을 위한 계측기와 부착위치를 그림 2에 나타내었다. 실험 시 유량, 온도, 차압의 세가지 변수를 측정하였고 계측된 값을 data acquisition system인 HP-3852A를 사용하여 처리하였다. 자연대류 유량 측정을 위해 4개의 고온관 각각에 삽입식 터빈 유량계를 설치하여 유량을 측정하였다. 온도는 냉각수 냉각현상 및 열혼합현상을 파악하기 위하여 각각의 증기발생기 카세트 입,출구 온도와 출구 이하 150mm 지점 그리고 강수부 하단에서 측정되었다. 또한 노심의 온도를 측정하기 어려운 관계로 고온관 온도를 측정하였고, 증기발생기 카세트의 열제거량을 측정하기 위하여 이차측 급수의 입, 출구 온도를 측정하였다. 경사는 고온관 2번과 4번을 축으로 고온관 1번이 하단에 위치하는 방향으로 이루어졌고, 0°, 15°, 30°, 45° 경사에 대해 실험을 수행하였다.

2.2 실험 결과

경사에 의해 노심과 증기발생기 간 높이차가 감소하게 되어 전체유량은 감소하게 된다. 고온관 유량의 경우 경사에 영향을 받지 않고 거의 동일하게 흐르며 증기발생기 유량은 상부에 위치한 증기발생기 카세트로의 유량이 증가하는 모습을 보여주었다.

전체 유량이 감소하면서 노심의 온도는 증가하게 되고 경사 시 상부 증기발생기 카세트로의 유량 증가로 인해 상부 증기발생기 카세트의 출구온도가 상승하였다. 하지만 강수부를 통과하면서 충분한 열적혼합이 이루어져 강수부 하단에서는 거의 균일한 온도분포를 나타내었다.

증기발생기 카세트를 통과하며 일어나는 압력강하는 부력에 의한 압력강하와 마찰에 의한 압력강하의 두 가지로 구성되어 있다[6]. 실험 결과 분석 결과, 증기발생기 카세트 내에서는 부력에 의한 압력강하가 대부분을 차지하고 마찰에 의한 압력강하는 무시할 수 있을 정도로 작은 것으로 나타났다.

자세한 실험 내용은 참고문헌[3]으로 대신한다.

3. CFX 코드를 사용한 수치해석

3.1 해석대상모델

본 연구에서는 경사에 의한 3 차원 효과가 두드러지게 나타나는 상부압력헤더부터 증기발생기 카세트를 통과하여 강수부 하단에 이르는 영역을 해석 대상으로 설정하였다. 이 영역에서 일어나는 비대칭적인 유동과 그에 기인하여 나타날 수 있는 비균일한 온도분포는 노심내부에서 국부적인 온도상승이나 비등을 야기할 수 있으므로 이 영역의 유동 및 온도분포를 정확하게 파악하는 것은 매우 중요하다. 해석대상모델은 CFX-4 코드의 전처리기(pre-processor)인 CFX-Build[7]를 사용하여 다중블럭방식으로 생성되었다. 생성된 해석대상모델은 그림 3, 4 와 같다. 해석대상 모델에서 입구경계는 고온관 출구이고 출구경계는 강수관 하단부분이 된다. 또한 경사 시 증기발생기 카세트 1 번과 8 번이 하부에 위치하고, 4 번과 5 번이 상부에 위치하게 된다.

증기발생기 카세트의 경우, 내부에 위치하는 나선형 코일의 직접적인 모사가 불가능하고 이차측을 모사하지 않으므로 다공성 매질로 가정하고 적절한 경계조건을 부여하는 방법을 사용하였다. 여기에 사용되는 경계조건은 증기발생기 카세트에서 발생하는 마찰압력강하(frictional pressure drop)와 전체체적 중 실제 유로체적이 차지하는 비율인 체적다공도이다. 자세한 경계조건은 3.3 절에 설명되어 있다.

3.2 지배방정식 및 수치해석방법

본 연구에 사용된 CFX-4 코드는 경계밀착좌표계(body fitted grid), 비엇물림격자(non-staggered grid), 제어체적방법(control volume method) 및 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation) 알고리즘을 사용하여 지배방정식을 계산한다.

해석대상모델을 수치해석하기 위해 연속방정식, 표준 k-e 모델을 사용한 Navier-Stokes 방정식 및 에너지 방정식이 사용되었다. 사용된 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial r}{\partial t} + \nabla \cdot (rU) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial (rU)}{\partial t} + \nabla \cdot (rU \otimes U) - \nabla \cdot (m_{eff} \nabla U) = -\nabla P' + \nabla \cdot (m_{eff} (\nabla U)^T) + B \tag{2}$$

$$P' = P + \frac{2}{3} rk + (\frac{2}{3} m_{eff} - z)\nabla \cdot U \tag{3}$$

$$m_{eff} = m + m_T \qquad m_T = C_m \frac{k^2}{e} \tag{4}$$

$$\frac{\partial (rk)}{\partial t} + \nabla \cdot (rUk) - \nabla \cdot \left[(m + \frac{m_T}{s_k}) \nabla k \right] = P_s + G - re \tag{5}$$

$$\frac{\partial (re)}{\partial t} + \nabla \cdot (rUe) - \nabla \cdot \left[(m + \frac{m_T}{s_e}) \nabla e \right] = C_1 \frac{k}{e} [P + C_3 \max(G,0)] - C_2 r \frac{e^2}{k} \tag{6}$$

$$P_s = m_{eff} \nabla U \cdot \left[\nabla U + (\nabla U)^T \right] \tag{7}$$

$$G = -\frac{m_{eff}}{r s_r} g \cdot \nabla r \tag{8}$$

$$\frac{\partial (rH)}{\partial t} + \nabla \cdot (rUH) - \nabla \cdot (l \nabla T) = 0 . \tag{9}$$

증기발생기 카세트를 모사하기 위해 도입된 다공성 매질 가정을 위해 다음과 같은 수

정된 연속방정식, Navier-Stokes 방정식 및 에너지 방정식이 증기발생기 카세트 영역에 적용되었다.

$$\frac{\partial(gr)}{\partial t}+\nabla\cdot(rK\cdot U)=0 \tag{10}$$

$$\frac{\partial(grU)}{\partial t}+\nabla\cdot(r(K\cdot U)\otimes U)-\nabla\cdot(m_{eff}K\cdot(\nabla U+(\nabla U)^{T})=-gR\cdot U-g\nabla p \tag{11}$$

$$\frac{\partial(grH)}{\partial t}+\nabla\cdot(rK\cdot UH)-\nabla\cdot(\Gamma_{e}K\cdot\nabla H)=gQ \qquad Q=K\cdot U\ . \tag{12}$$

또한 복잡한 모델에서 수렴성을 증가시키기 위해 AMG(Algebraic Multi-Grid) solver 를 압력 계산 시 사용하였다. 그리고 k 와 e 이 양의 값을 가지는 것을 보장하기 위해 k 와 e 방정식에 대해서는 상류도식(upwind scheme)[8]을 사용하였다. 수렴성 향상을 위하여 하향이완인자(under relaxation factor)를 속도성분과 k, e 에 0.1 로 적용하였고 enthalpy 계산에는 0.95 를 적용하였다. 그리고 inner iteration 수를 증가시켜서 보다 수렴된 변수들로 계산을 수행하여 전체적인 수렴성을 증가시켰다.

3.3 경계조건

해석을 수행하기 위한 경계조건은 입구조건, 출구조건, 증기발생기 영역을 위한 다공성 매질 조건, 증기발생기 카세트에서의 열제거 조건 그리고 경사 조건의 총 다섯 가지로 나누어 볼 수 있다.

입구조건으로는 기존의 실험 시 각각의 고온관에서 측정된 유량으로부터 계산되어진 속도와 역시 고온관에서 측정된 온도를 사용하였다. 속도의 경우 유로의 폭이 작아 상대적으로 수직방향의 속도가 큰 영역이므로 횡방향 성분은 무시하고 축방향 성분만 가지는 것으로 조건을 부여하였다. 온도의 경우, 고온관 상부에서 측정되었지만 측정위치부터 고온관 출구까지는 열침원(heat sink)이 존재하지 않으므로 측정된 온도를 그대로 입구조건으로 사용하였다.

출구조건으로는 출구로 향하는 전체 질량이 입구에서 해석대상 영역으로 들어오는 질량과 같도록 경계조건을 부여하였다. 이 때, 출구의 압력은 출구 이전 셀들로부터 외삽된 압력을 사용하였다.

증기발생기 카세트 내부의 나선형 코일은 정확한 모사가 불가능하고 이차측을 고려하지 않으므로 계산의 효율을 높이기 위해 다공성 매질로 가정하였다. 이 가정을 위한 경계조건으로는 전체체적 중 실제 유로체적이 차지하는 비율인 체적다공도와 다공성 매질 내에서 일어나는 마찰압력강하가 있다. 체적다공도는 실험장치 설계자료를 바탕으로 0.8197 로 계산되었다. 해석대상 실험의 결과 증기발생기 카세트 내부에서는 부력에 의한 압력강하가 대부분을 차지하고 마찰에 의한 압력강하는 무시할 수 있기 때문에 해석에서는 마찰에 의한 압력강하는 무시하였다.

증기발생기 카세트의 이차측을 모사하지 않기 때문에 증기발생기 카세트 내에서 일어나는 열제거 현상을 모사하기 위해 증기발생기 내부에서 열제거가 균일하게 일어난다는 가정을 도입하였다. 실제 실험장치의 증기발생기 카세트는 관류형 방식을 채택하고 있어 일차측 냉각수와 이차측 냉각수는 반류(counter-current)의 형태로 흐르게 되어있어 전체적으로 균일한 열제거가 일어나도록 설계되어 있다. 이를 바탕으로 증기발생기 카세트의 내부에서 제거되는 전체의 열량을 에너지 방정식에서 음의 값을 가지는 열원으로 간주하였고 증기발생기 카세트 내부에서 균일한 열제거가 일어나도록 하였다. 증기발생기 카세트별 열제거량은 이차측 냉각수 유량과 이차측 냉각수의 입,출구 온도차로부터 구해지게 된다.

경사 해석의 경우 경사각도에 따라 중력가속도의 성분이 달라지게 된다. 경사는 그림 3의 증기발생기 카세트 4번과 5번이 상부에 위치하고 1번과 8번이 하부에 위치하는 방향으로 이루어지게 된다. 즉 2번과 4번 고온관을 축으로 1번 고온관이 아래로 내려가는 방향으로 경사가 진행되게 되는데 1번 고온관이 x축에서 +22.5° 위치에 있으므로 경사각을 θ라 하면 경사각에 따른 중력가속도 벡터는 다음과 같다.

$$\vec{g} = \left(9.8\cos 22.5^\circ \sin\theta,\quad 9.8\sin 22.5^\circ \sin\theta,\quad -9.8\cos\theta\right). \tag{13}$$

해석은 경사에 의한 영향이 두드러지게 나타나는 경사각 30°와 45°에 대해 수행되었다

4. 해석 결과

4.1 유동 해석 결과

실험의 경우 증기발생기 카세트의 마찰압력강하가 극히 작고, 노심과의 높이차에 의한 부력이 상부에 위치하는 증기발생기에 하부에 위치하는 증기발생기보다 크게 작용하기 때문에 상부에 위치하는 증기발생기로의 유량이 증가하게 된다. 경사각이 증가함에 따라 상부에 위치하는 증기발생기와 노심과의 높이차가 증가하게 되므로 증기발생기 간 유량의 차이는 더욱 증가하게 된다. 또한 상부 증기발생기 카세트는 일차측 유량 증가로 인해 열제거량이 증가하게 된다. 실험장치에서 상부와 하부 증기발생기 카세트간의 높이차는 30°의 경우 3.5cm, 45°의 경우 8.5cm이다.

해석결과, 그림 5과 같이 상부에 위치하는 증기발생기 카세트로의 유량이 경사각이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보여주었다. 이러한 현상은 실험결과와 일치하는 것으로 경사각에 의한 영향이 최대가 되는 45°의 경우를 대상으로 한 그림 6에서 그 원인을 보다 정확하게 확인할 수 있다. 그림 6은 45° 경사 시 증기발생기 위의 상부압력헤더 부분의 속도벡터를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 하부에 위치하는 고온관을 통해 내려온 유량이 상부에 위치하는 증기발생기 카세트로 퍼져나가고 있다. 상부에 위치한 증기발생기 카세트로의 유량이 증가함에 따라 상부압력헤더에서 유동이 상승하는 것으로 이러한 현상은 증기발생기 카세트 내부에서의 마찰압력강하가 거의 무시될 수 있는 사실에 기인한다. 본 해석대상 실험에서는 마찰압력강하가 극히 작고 해석 시 마찰압력강하를 무시하였기 때문에 부력에 의한 효과만이 나타나게 되어 상부 증기발생기의 유량이 증가하게 되고 그 결과로 상부압력헤더의 유량이 상부에 위치하는 증기발생기 카세트로 퍼져나가는 현상이 발생하게 되는 것이다.

증기발생기 카세트 내부에서도 경사각이 증가함에 따라 유동의 분포가 생겨나게 된다. 그림 7에 45°의 경우 증기발생기 카세트 내부의 축방향 속도분포를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 상부 증기발생기 카세트 내부에서도 윗부분에 위치하는 부분의 속도가 증가하게 된다. 이러한 현상 역시 증기발생기 카세트의 마찰압력강하가 없고 증기발생기 내부에서 완전히 균일한 열제거를 가정하였기 때문에 발생하는 것이다. 실험이 경우 균일한 열제거가 이루어지지 않았을 것이므로 실제 현상은 이와 다를 것이라 판단된다.

45° 경사 시 강수부 상단의 속도벡터를 그림 8에 나타내었다. 증기발생기 카세트를 통과한 유량은 증기발생기 출구 이후에서부터 합쳐지게 되는데 이 때 경사의 영향으로 그림 8과 같이 상부에 위치한 증기발생기 카세트를 통과한 유량이 하부의 증기발생기 방향으로 퍼져나가면서 혼합이 이루어지게 된다. 이러한 현상은 강수부를 따라 내려가면서 연속적으로 이루어지게 되고 결과적으로 강수부 하단에 이르러서는 그림 9에서 볼 수 있듯이 거의 균일한 유동분포를 나타내게 된다. 이러한 혼합현상은 증기발생기 카세트 출구 간의 온도차를 줄어들게 하는 역할도 하게 되는데 이에 대한 내용은 4.2절에 설명되어 있다.

4.2 온도 해석 결과

그림 10 과 같이 경사가 진행됨에 따라 증기발생기 카세트 별 출구온도차는 더욱 증가하였다. 이 결과는 실험결과와 일치하는 것으로 다음과 같은 이유로 설명되어질 수 있다. 실험 시 상부 증기발생기 카세트로 많은 유량이 유입되어 열제거량이 증가하게 되지만, 이차측 냉각수 유량이 일정하게 유지되어 증기발생기 카세트의 최대 열제거량이 제한되므로 하부 증기발생기 카세트의 출구온도보다 높은 출구온도를 나타내게 된다. 이러한 현상은 해석에도 나타난다. 해석 시 실험으로부터 구한 열제거량을 경계조건으로 부여하였고, 상부 증기발생기 카세트로의 유량이 실험과 비슷한 크기로 증가하였기 때문에 충분한 열제거가 이루어지지 못한 것이다. 30° 경사 시 상부 증기발생기 카세트와 하부 증기발생기 카세트 간의 온도차는 5.6°C 이고 45° 경사의 경우는 8.4°C 이다.

그림 11 에서 볼 수 있듯이 증기발생기 카세트 내부에서도 온도차가 나타나게 된다. 이는 4.1 절에서 설명한 바와 같이 증기발생기 내부에서 발생한 비균일한 유동에 기인한 것이다. 즉 증기발생기 열제거 조건은 증기발생기 전 영역에 걸쳐서 균일한 열제거를 가정하였지만, 증기발생기 내부에서 비균일한 유동이 발생하여 상대적으로 유량이 많은 부분의 온도가 높게 나타나게 된 것이다.

3.1 절에서 설명한 바와 같이 증기발생기를 통과한 일차측 냉각수는 강수부를 따라가며 혼합되게 된다. 이 혼합과정 중 냉각수간의 열적인 혼합 또한 발생하게 되어 강수부를 따라가면서 증기발생기 출구에서의 온도차는 점점 사라지게 된다. 이러한 과정을 거쳐 해석대상 영역의 출구에 해당하는 강수부 하단에 이르러서는 일차측 냉각수의 온도는 거의 균일하게 된다. 온도차가 가장 크게 발생하는 45° 경사의 경우를 그림 12 에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 경사에 의해 발생한 증기발생기 출구온도차는 강수부를 거치면서 사라지게 된다.

5. 결론

일체형 선박로의 자연대류 특성을 3 차원적으로 파악하기 위해 기존의 경사 시 일체형 원자로 자연대류 실험을 바탕으로 범용 전산유체코드인 CFX-4 를 사용하여 해석연구를 수행하였다. 해석 결과, 부력과 증기발생기 카세트내의 낮은 압력강하의 영향으로 경사 시 상부에 위치하는 증기발생기 카세트로 유입되는 유량이 증가하는 모습을 볼 수 있었다. 또한 유량 증가 메카니즘을 상부압력헤더 부분의 유동장 분석을 통해 보다 현상학적으로 설명해낼 수 있었다. 그리고 실험에서 볼 수 없었던 증기발생기 카세트 내의 비균일한 유동 및 온도분포를 확인할 수 있었지만 향후 이차측 모사를 통한 현실적인 모사가 필요함을 알 수 있었다. 강수부 내의 유동장 분석으로 열혼합이 이루어지는 현상을 보다 정확하게 이해할 수 있었고, 강수부 하단의 균일한 온도분포로부터 경사가 노심 입구 온도분포에 영향을 주지 않음을 확인하였다.

참고문헌

1. CFX-4.2 Manual, AEA, 1997
2. 이두정 외, "중소형 일체형 원자로 계통설계 개발", KAERI/RR-1772/96, 1996
3. J. H. Kim, "A study on the natural circulation characteristics of an integral type marine reactor", Ph. D thesis, Seoul National University, 2000
4. M. Ishii and I. Kadaoka, "Scaling laws for thermal-hydraulic system under single phase and two phase natural circulation", Nuclear Engineering and Design, 81, 411-425, 1984

5. G. Kocamustafaogullari and M. Ishii, “Scaling criteria for two-phase flow loops and their application to conceptual 2*4 simulation loop design”, Nuclear Technology, 65, 146-160, 1984
6. N. E. Todreas and M. S. Kazimi, “Nuclear System II: Elements of Thermal Hydraulic Design”, Hemisphere Publishing Co., 1990
7. Using CFX-4 with CFX-Build, AEA, 1996
8. S. V. Patankar, “Numerical heat transfer and fluid flow”, Hemisphere Publishing Co., 1980

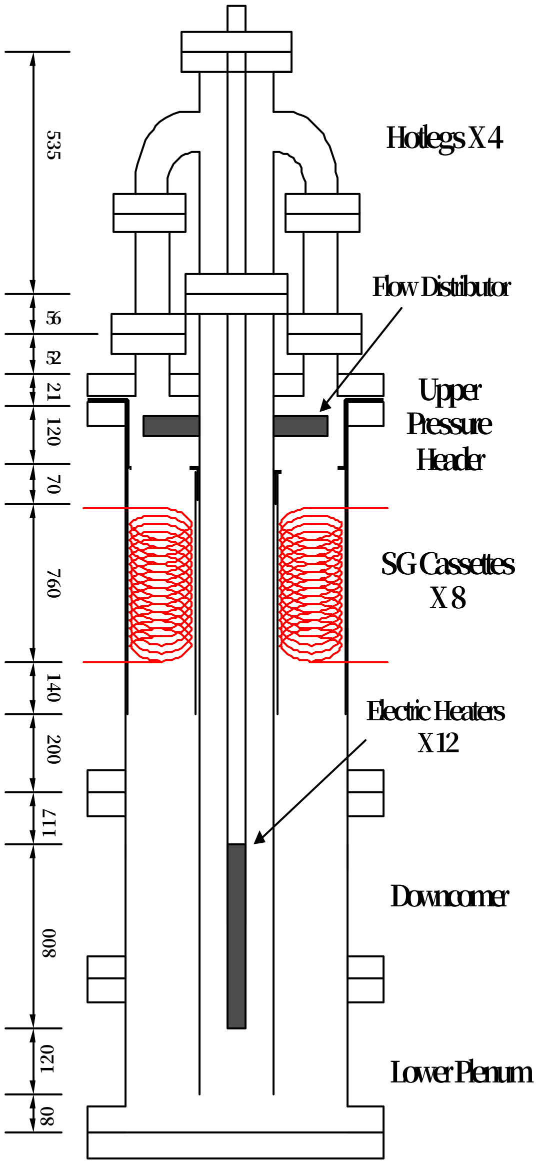

그림 1. 실험장치 개략도

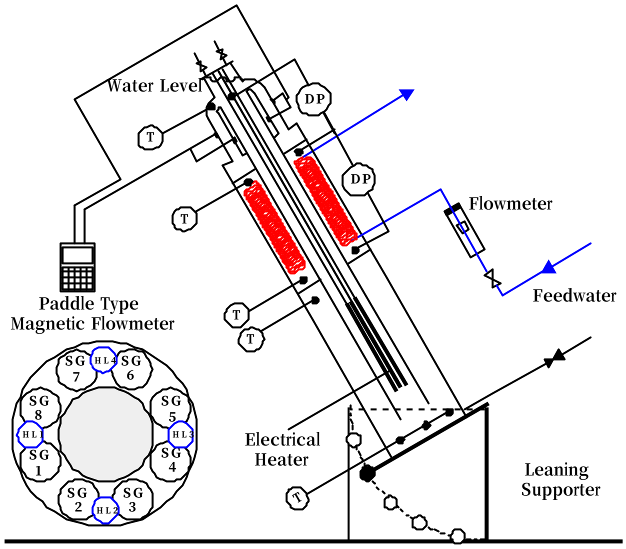

그림 2. 계측장치 및 경사지지대

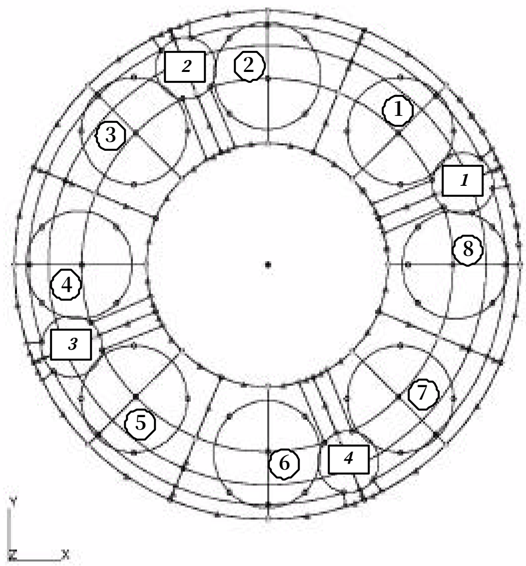

그림 3. 해석대상모델 평면도

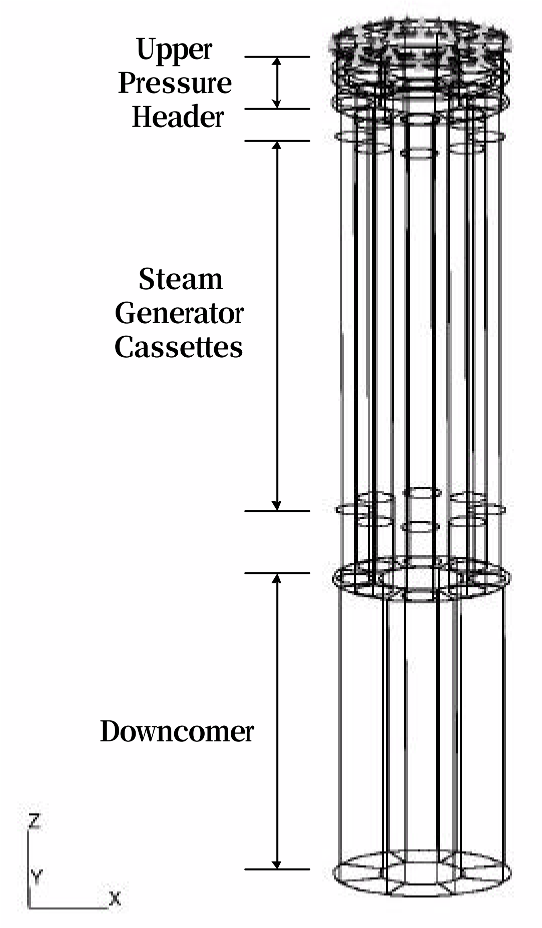

그림 4. 해석대상모델 정면도

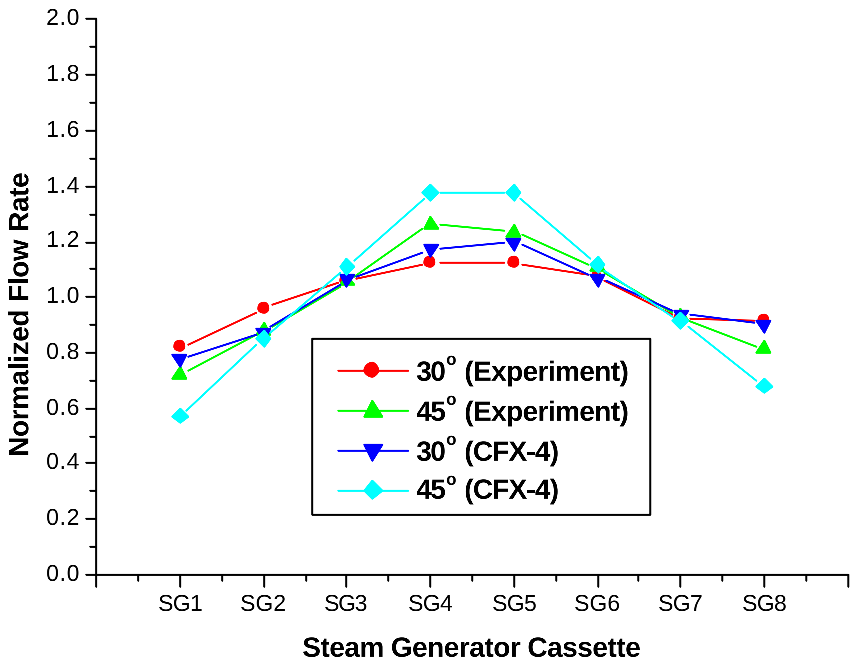

그림 5. 경사 시 증기발생기 카세트 별 유량

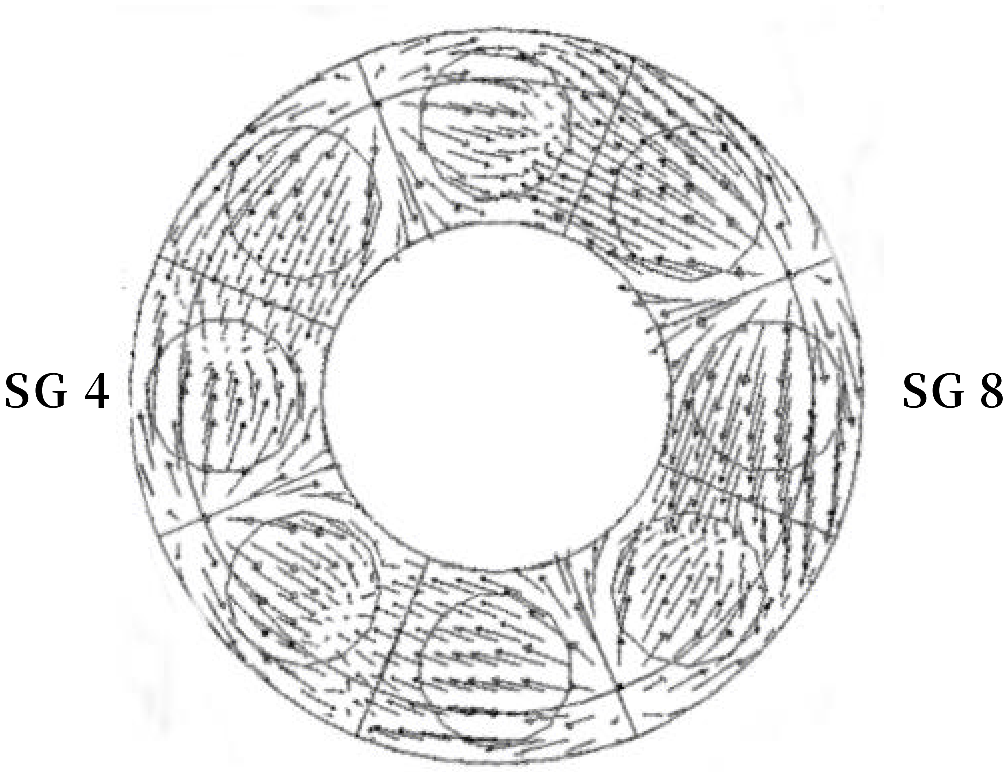

그림 6. 45° 경사 시 상부압력헤더에서의 속도 벡터

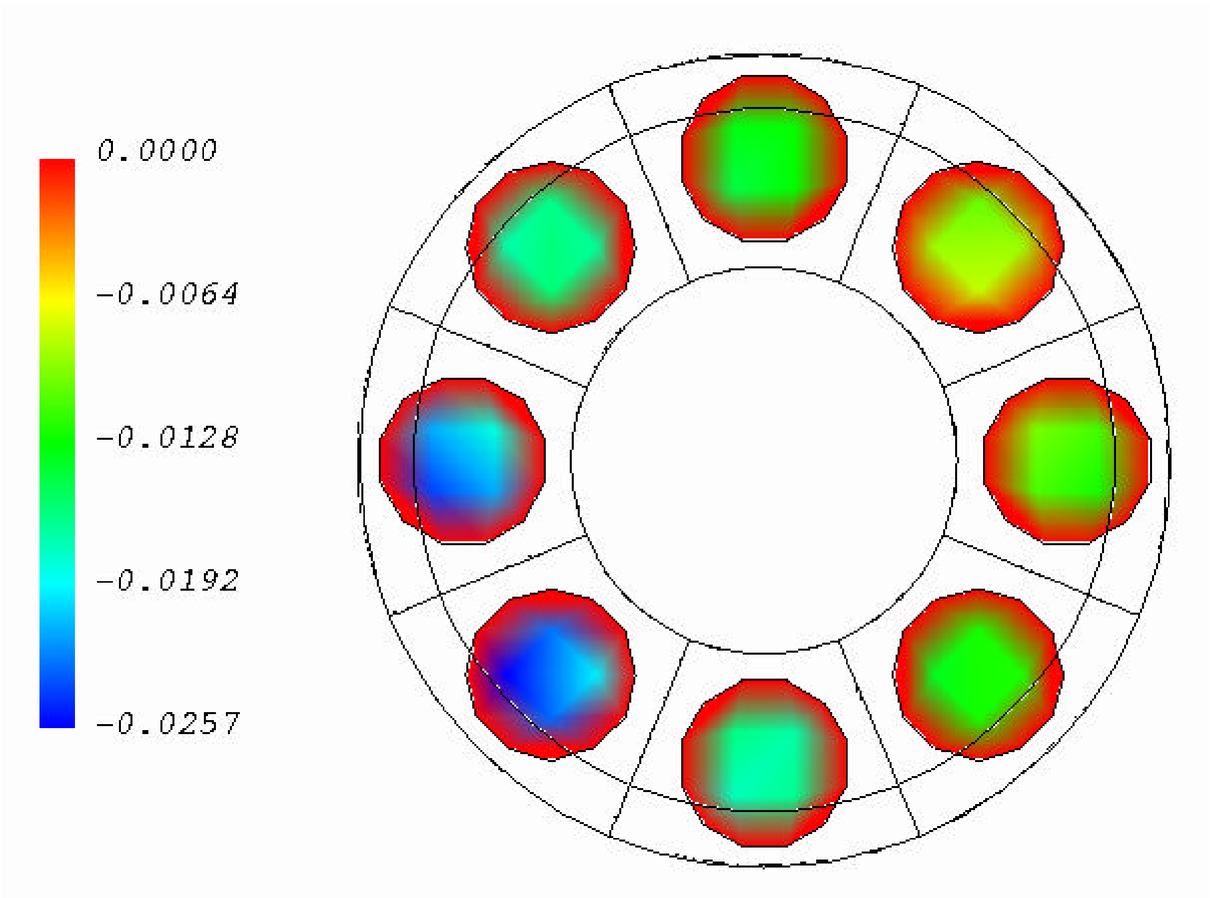

그림 7. 45° 경사 시 증기발생기 카세트 내에서의 속도분포 (m/sec)

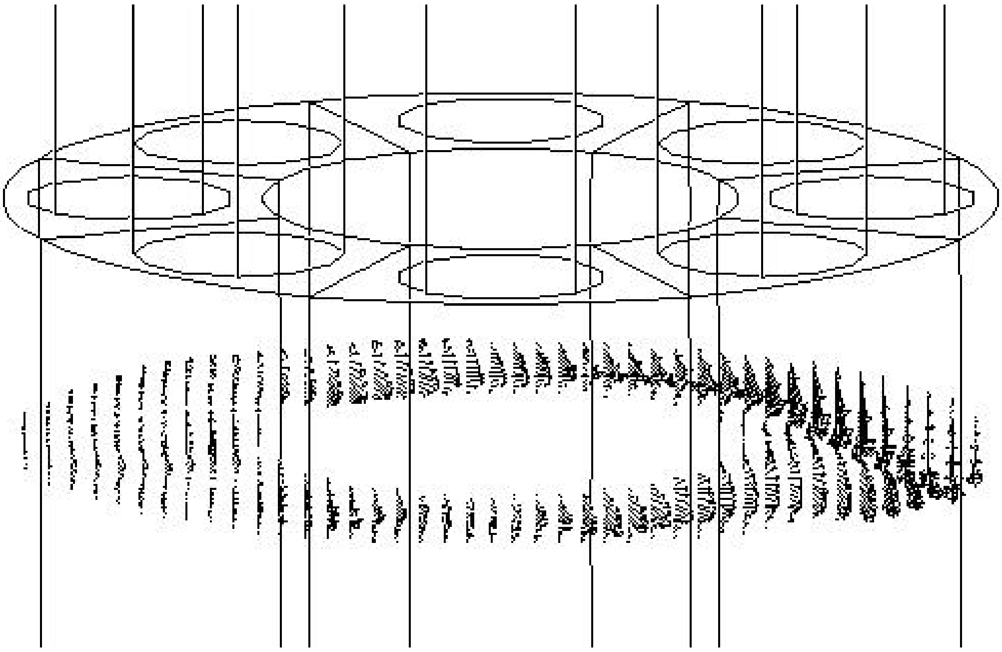

그림 8. 45° 경사 시 강수부 상단의 속도벡터

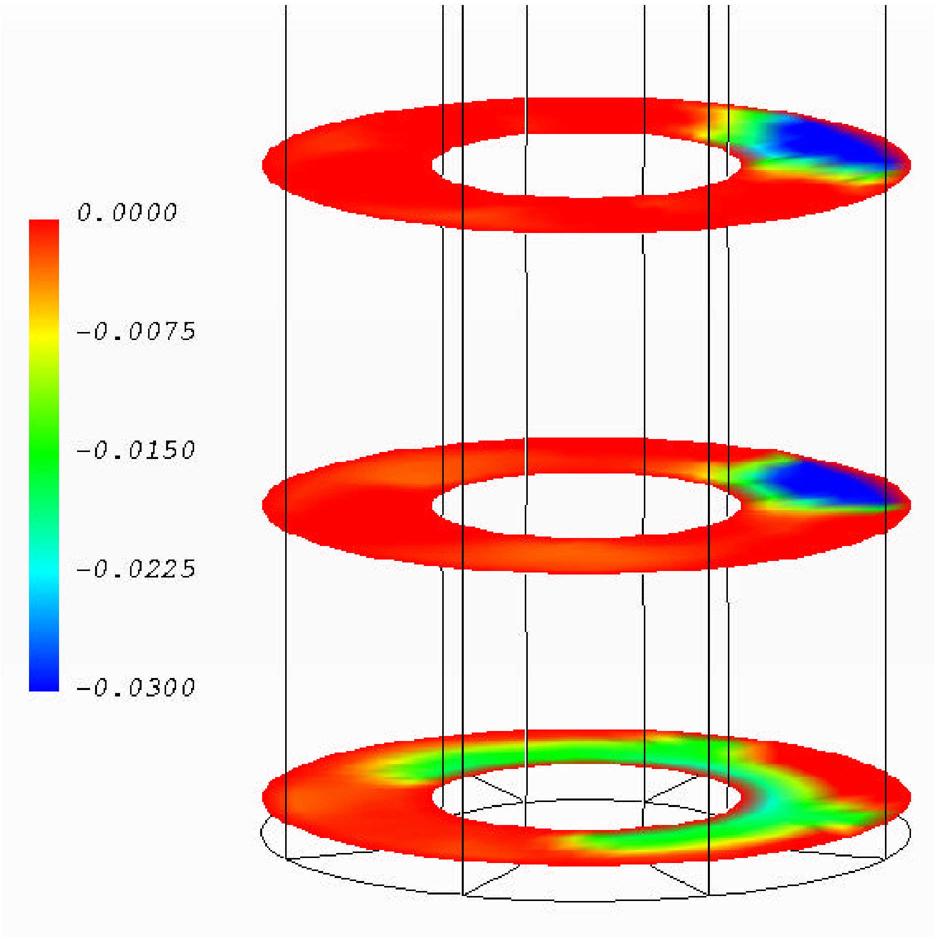

그림 9. 45° 강수부 하단의 속도분포 (m/sec)

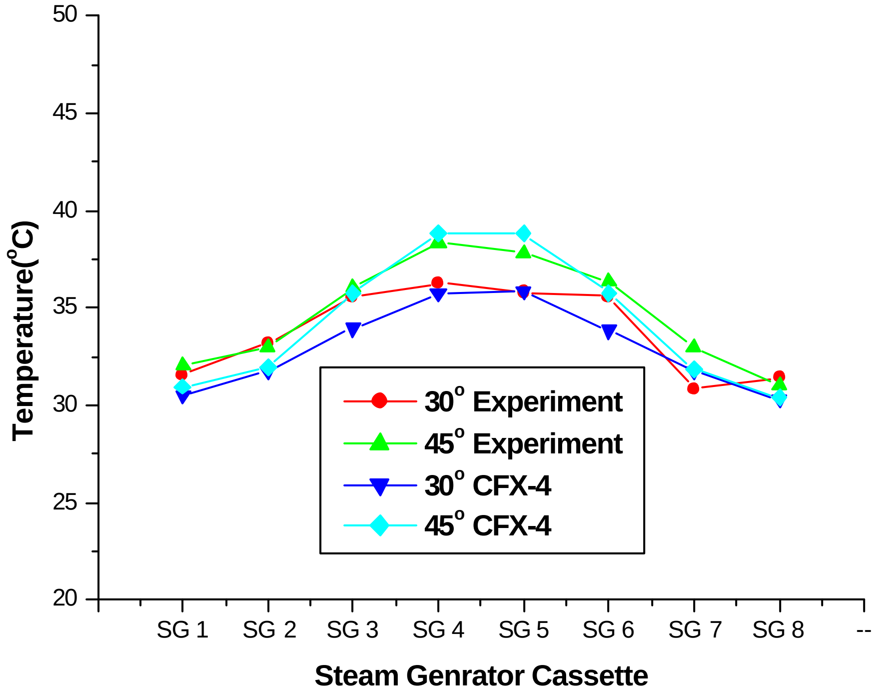

그림 10. **경사 시 증기발생기 카세트 별 출구온도**

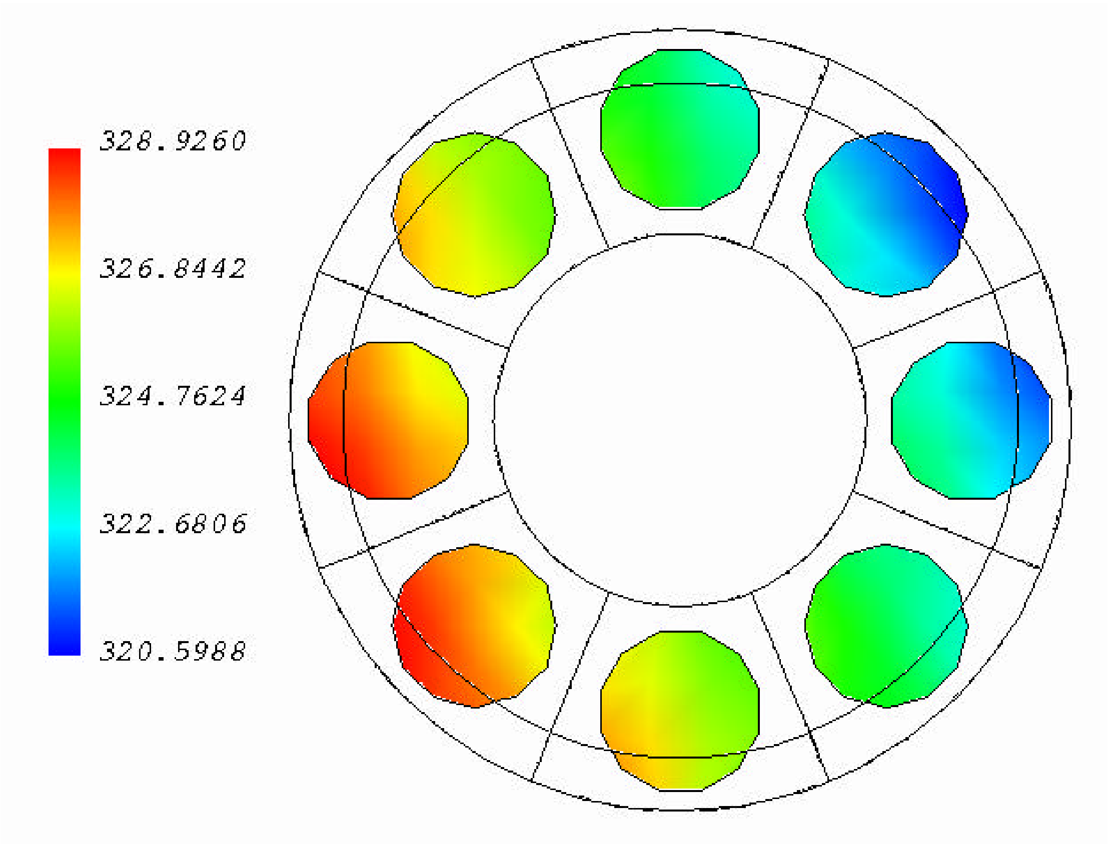

그림 11. 45° **경사 시 증기발생기 카세트 내부의 온도분포** (K)

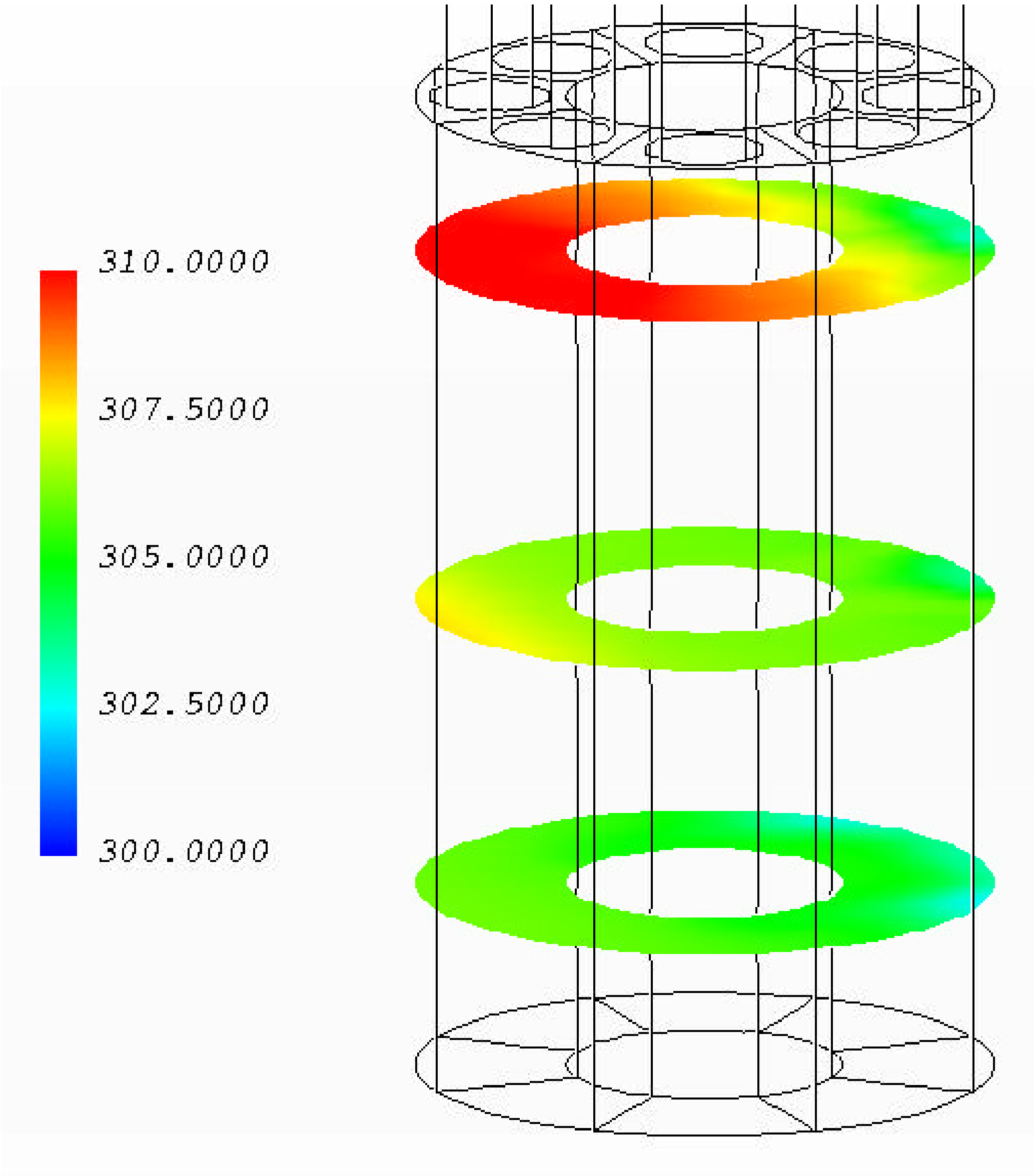

그림 12. 45° **경사 시 강수부 영역의 온도분포** (K)