’2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

CANDU 원자로의 입.출구 헤더 모의를 위한 RELAP5/MOD3 수평관 액체혼입/증기흡입 모델의 개선

Improvement of RELAP5/MOD3 horizontal liquid entrainment/ vapor pull-through model for modeling of CANDU reactor outlet and inlet headers

정법동
한국 원자력 연구소
대전시 유성구 덕진동 150

방영석
한국 원자력안전기술원
대전시 유성구 구성동 19

요 약

가압경수로의 USNRC 규제 검증용 RELAP5/MOD3 코드의 중수로의 안전해석을 위하여 수평관에서의 기존 액체혼입/증기흡입 모델을 개선하였다. RELAP5 의 기존 모델은 수평관에서 수평성층화가 발생할 때 그 관에 연결된 분기관에서의 열과 유속을 계산할 시 이상유동분리 현상을 고려할 수 있게 되어 있다. 이 모델은 off-take 모델이라고도 하며 소형배관 파단사고 시 수평관에서 성층화가 발생할 때 중요한 것으로 알려져 있다. CANDU 형 중수로 원자로 입/출구의 헤더부품에서도 수평성층화가 발생하면 그에 연결된 95 개의 자관에서의 각 원자로 채널로 흘러가는 유량 계산에 off-take 모델이 중대한 역할을 하게 된다. 그러나 RELAP5 의 기존 모델은 수직 상향 및 하향 분기관과 수평 분기관에서의 3 가지의 경우만 다루고 있으므로 수평헤드와 자관과의 연결 각의 모의를 위하여 기존 액체혼입/증기흡입 모델을 일반화하고 개선을 할 필요가 있다. 이에 따라 기존의 RELAP5/MOD3 의 모델을 분기관의 연결각도에 따른 기하학적 형상을 고려하여 수정하였으며 사용자가 연결각을 입력할 수 있도록 부 프로그램을 수정하고 일반화 시켰다. 개선된 모델의 검증을 위하여 수평관에 다양한 각도로 연결된 분기관에서의 이상유동의 배출에 대한 개념문제를 설정하고 각 분기관에서 기포율과 유속을 계산하여 그 타당성을 보였다. 또한 모델개선의 검증에 필요한 향후 실험 분야도 제시하였다.

Abstract

The liquid entrainment and vapor pull-through models of horizontal pipe of RELAP5/MOD3, current USNRC auditing code for LWR licensing, have been improved for the safety analysis of CANDU plant. The RELAP5/MOD3 model for horizontal volumes accounts for the phase separation phenomena and computes the flux of mass and energy through an off-take attached to a horizontal pipe when stratified conditions occur in the horizontal pipe. This model is sometimes referred to as the off-take model. The importance of predicting the fluid conditions through an off-take in a small-break LOCA has been well known. In CANDU reactor, off-take model becomes so important that it controls the coolant flow of 95 feeders connected to the reactor header component where the horizontal stratification occurs. The current RELAP5 model is able to treat the only 3 directions junctions; vertical upward, downward, and side oriented junctions, thus improvements for the off-take model is needed for modeling the exact angles. The RELAP5 off-take model has been modified and generalized by considering the geometric effect of branching angles. Verification calculations have been performed for a conceptual blowdown problem in a pipe with different connected angles of branch. The calculated void fraction and mass flow rate of different location of branches shows the validity of implemented model. Experimental works have been also suggested for the further verification and improvement of models.

1. 서론

RELAP5 와 같은 안전해석코드에서 이상 유동방정식을 수치적으로 풀기 위하여 가장 기초적 가정 중 하나는 주어진 수치 체적소 내에서는 이상유체를 균일 혼합물로 가정한다는 것이며, 한 수치 체적소에서 다른 체적소로 대류 물성치를 그 원천(Upstream) 체적소의 물성치를 사용하는 것으로 나타난다. 이러한 수치해법을 Donor 혹은 Upwind 수치해법 이라 하며 대부분의 코드에서 표준해법으로 채택하고 있다. 표준 해법의 결과로서 나타나는 부정적인 영향 중의 하나는 이상유동의 혼합체 내부의 공간적인 미분 항을 고려하지 못함으로서 나타나는 수치확산 문제이며 또 하나는 원천 혼합 체적소에서 심각한 유동성층화가 발생하면 열과 에너지 흐름의 계산에 부정확한 결과를 초래한다는 것이다. 유동 성층화는 원심분리기와 같이 특별히 고안된 장치를 제외하고는 중력에 의하여 이루어 지는 현상으로 유속이 느린 경우 상간의 마찰력보다 중력이 크게 작용하여 수직관의 하부나 대형 수평관의 하부에 물이 고이게 되고 상이 분리되는 경우가 발생한다.

RELAP5/MOD3 모델 중 특수 열수력 모델 중 하나인 수평관에서의 액체 혼입과 증기 흡입모델[1,2]은 수평관에서 상 분리가 발생하였을 때 이에 연결된 분기관에서의 유속을 결정하는 모델이며 흔히 한 상(phase)이 다른 연속상 (continuous phase)의 흐름에 떨어져 나가기

때문에 Off-take 모델이라고도 한다. 이 모델은 대형 수평관에서 소형관 파단사고가 발생하였을 때 중요성이 Zuber 등[3]에 의하여 인지되어 개발되기 시작하여 많은 실험자료에 근거를 두고 그 상관식이 개발되어 있다. 그러나 이 모델은 소형관 파단사고시 파단유량의 계산 뿐만 아니라 Mid Loop 운전 시 잔열제거 계통에로의 공기의 유입 등 이상유동에서 광범위하게 사용할 수 있는 모델이다.

CANDU 형 중수로의 원자로는 총 190 개의 채널로 구성되어 있으며 각 95 개의 채널이 원자로 수평관인 입구헤더과 출구헤더에 자관으로 연결되어 있다. 자관의 배관 파단사고나 소형냉각재 상실사고시에 수평헤더에서 상 분리가 발생할 가능성이 많으며 이에 연결된 자관으로 유입되는 냉각수의 계산이 원자로 채널의 안전성 평가에 중대한 역할을 한다. 각 헤드에 연결된 95 개의 자관은 횡으로 21 행으로 되어 있는데 각 행에 서로 연결 각도가 틀린 5 열의 자관들이 있다. 수평선을 기준으로 하향방향으로 0, 36, 72, 108, 144 도 의 5 개 그룹으로 수평 모관에 연결되어 각 원자로 채널에 유량을 공급하고 있다. 헤더 수평관에서의 성층화 현상은 RELAP5 의 수평 유동형태도에 의하여 결정할 수 있으나 자관에서의 증기와 물의 유속을 결정하는 혼입/흡입의 기존 모델은 그림 1 과 같은 수직 상향 및 하향 분기관과 수평 분기관의 3 가지 경우만 다루고 있으므로 헤드내의 수평 성층화가 심한 경우에 이들 자관의 연결 각도에 따른 열수력 모의를 위하여 기존의 액체혼입/증기흡입 모델을 일반화하고 개선을 할 필요가 있다

2. RELAP5/MOD3의 수평관 액체혼입/증기흡입 모델 및 개선

수평관에서의 분기관에 대한 RELAP5 의 junction 모델은 upwind 수치법을 적용하는 보통의 junction 과는 달리 upwind 볼륨의 수평 성층화에 따라 특별하게 취급할 수 있는 모델이 있다. 즉 대형 수평관에서 유동성층화가 발생할 경우 분기관의 연결형태에 따라 상향 off-take, 하향 off-take 및 측면 off-take 모델이 있어서 수위 높이와 분기관에서의 유량에 따라 분기관에서의 건도를 상관식 형태로 구할 수 있게 하였다. 이들 상관식은 그 동안의 실험적 연구를 바탕으로 구성되어 있으며 각 실험에서 액체혼입이나 증기 흡입이 시작되는 시점으로서 임계깊이를 정의하고 측정하여 다음 상관식을 도출하였다.

2.1 임계깊이 (Inception height)

액체혼입이나 증기흡입이 일어나기 시작하는 임계깊이는 무한소의 단일 분기관을 가정한 potential 유동의 이론적인 연구로 다음과 같은 동일한 형태의 상관식으로 나타낼 수 있다.

$$h_b = CW_k^{0.4}/[g\rho_k(\rho_f - \rho_g)]^{0.2} \quad (1)$$

여기서 k 는 액체혼입이나 증기유입이 일어나기 직전에 분기관을 흐르는 연속상의 성질을 뜻한다. 즉 하향 off-take 에서는 k 는 액체를 의미한다. W 는 연속체의 유량으로 속도가 빠를수록 임계깊이도 깊어지게 된다. 본 상관식은 Smoglie [4] 의 액체혼입에 대한 연구에 근거를 두고 있으며 증기흡입의 경우에도 다른 연구자에 의하여 유사한 형태의 상괸식이 표면 불안정성 이론에 기초를 두고 제안되었다. C 는 실험적 계수로 분기관의 기하학적인 형태와 혼합유체의 압력과 물성에 따라 여러가지 값이 제안되어 있으며 다음과 같은 값이 비교적 적당한 값으로 제안되어 있다.

상향 off-take 액체혼입인 경우 : C=1.67
하향 off-take 증기유입인 경우 : C=1.50
측면 off-take 증기유입인 경우 : C=0.75
측면 off-take 액체혼입인 경우 : C=0.69

2.2 Off-take 유동 건도 상관식

유동성층화가 발생하였을 때 일단 주어진 구조의 임계깊이에 비교하여 수위가 초과되면 증기흡입이나 액체혼입이 시작되는데, 분기관에서의 유동건도는 무차원 깊이와 각 분기관의 방향에 따라 다음 상관식으로 표현된다.

상향 분기관 : $X = R^{3.25(1-R)}$ (2)

하향 분기관 : $X = X_o^{2.5R}[1-0.5R(1+R)X_o^{(1-R)}]^{0.5}$ (3)

측면 분기관 : $X = X_o^{(1+CR)}[1-0.5R(1+R)X_o^{(1-R)}]^{0.5}$ (4)

여기서 R은 무차원 깊이로 정의하고 다음 식과 같이 표현한다.

$R=h/h_b$: 분기관에서부터 성층화 액체높이까지의 깊이/임계깊이

또한 X_o는 상수항으로 압력효과를 고려하기 위하여 물성치의 비가 다음식의 분모항에 있다.

$X_o=1.15/[1+(\rho_f/\rho_g)^{0.5}]$

측면 분기관에서의 상괸식은 증기흡입과 액체혼입의 경우 약간의 다른 계수를 사용하여 상관식을 구성한다.

C=1.09 증기흡입인 경우

C=1.00 액체혼입인 경우

여기에서 사용되고 있는 모델은 제어된 실험실 환경 하의 상관식을 근거로 하고 있기 때문에 실제적인 천이상태에서 수치해법 상 고려하여야 할 점이 많다. 즉 이상역류유동과 주 관에서의 극한적인 기포율, 그리고 그 외 면적의 급격한 변화에 대응하기 위한 완화 등이 RELAP5 의 실제적인 모델에 고려되어 있다.

2.3 모델의 개선

RELAP5/MOD3 의 기존 모델 중 중수로 헤더에 연결된 자관 각도를 일반적으로 모의할 수 있게 개선할 수 있는 모델로는 측면 Off-take 모델이 가장 적합하다. 이 모델에는 그림 2 에서 보듯이 액체혼입과 증기흡입모델이 공존할 뿐 아니라 성층화 된 수위와 분기관의 높이의 차이에 따라 그 적용 상관식이 결정되기 때문에 중수로 헤더에 적용시키기 적합한 모델이다. 그림 3 에서 보는 바와 같이 수평선에 ϑ 의 각도를 갖고 헤더에 연결된 일반적인 한 개의 자관을 기존의 측면 분기관의 Off-take 모델을 적용하기 위하여 필요한 모델을 살펴보면 다음과 같다.

1) 성층화 된 수위와 자관 입구의 높이에 대한 기하학적인 고려가 있어야 한다.
2) 각도를 가지는 자관의 형상에 맞는 임계깊이의 상관식이 있어야 한다.
3) 자관의 형상에 맞는 Off-take 유동건도의 무차원 상관식이 있어야 한다.

측면 분기관에서는 액체혼입상관식을 사용할지 증기흡입 상관식을 사용할지를 정하는 수평관의 기포율 조건은 수위가 관 내부의 중앙에 도달하는 0.5 다. 그러나 일반적 각도 ϑ를 갖는 자관에서의 조건은 자관의 높이와 기하학적인 형상을 고려하여 구한 기포율을 사용하여야 한다. 즉 수위가 분기관 높이에 이르는 기포율 α_g^* 는 수평 원형관에서 완전한 수평 성층화가 이루어졌다고 가정하고 단순 기하학적인 고려에 의하여 다음식과 같이 일반적으로 나타낼 수 있다.

$$\alpha_g^* = 1/\pi \left[(\pi/2-\vartheta)- \sin(\pi/2-\vartheta)\cos(\pi/2-\vartheta)\right] \qquad (5)$$

여기서 측면 분기관인 경우 $\vartheta= 0$ 이 되며 $\alpha_g^*=0.5$ 이 된다. 또한 상향 분기관인 경우는 $\vartheta= \pi/2$ 이므로 $\alpha_g^*=0.0$ 이 되며 하향 분기관인 경우 $\vartheta=-\pi/2$ 이므로 $\alpha_g^*=1.0$ 이 되어 모든 각도에 적용할 수 있다. 또한 분기관으로부터의 수위 h_C 도 기하학적인 관계식에 의하여 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$h_C = (D/2)\bullet(\sin\phi - \sin\vartheta) \quad (6)$$

여기서 ϕ 는 수위의 수평선이 중심으로부터 이루는 각으로 기포율 α_g 를 알면 식 (5)를 이용하여 유도할 수 있는 값이다. 식 (5)로 부터 ϕ 의 명시적인 해를 구하기는 곤란하지만 다차 항의 근사적인 해나 수치적 해를 구할 수 있다. 임계깊이의 상관식으로는 아직 실험적 자료가 없는 상황에서 (1)식과 동일한 형태로 나타낼 수 있으며 측면 분기관의 실험적 계수를 사용한다.

따라서 무차원 깊이 R 은 (6)과 (1)식으로부터 h_C/h_b 로 나타낼 수 있으며 측면 분기관의 Off-take 유동건도 상관식인 (4) 식을 이용하면 기하학적 구조에 의한 단순 효과는 감안할 수 있다.

위의 모델개선을 RELAP5/MOD3 에 적용하기 위하여 수평 성층화시 액체혼입과 증기흡입을 구하는 부프로그램인 HZFLOW 에서 모든 조건식과 상관식에 사용되는 변수에 이와 같은 기하학적인 형상을 고려하여 수정하였다. 그러나 임계깊이 상관식과 유동건도 상관식 자체는 일반적인 각도에 대한 실험적 자료 값이 없으므로 측면 off-take 의 상관식을 사용하였다. 따라서 이들 수정.확장된 모델을 사용할 때 수평과의 각도가 수평에서 차이가 많이 나는 경우 사용에 제한이 따르게 된다. 또한 분기관이 헤더와 이루는 각을 사용자가 입력하여 모델 할 수 있도록 입력 부 프로그램인 RBRNCH, RSNGLJ, RVALVE 를 수정하여 확장된 증기흡입 및 액체 혼입모델을 각각 Single Junction, Branch 및 Valve 의 component 에 사용할 수 있게 하였다.

3. 모델 검증

개선된 모델의 설치를 검증하기 위하여 그림 4 와 같이 CANDU 헤더를 3 개의 노드로 구성된 간단한 수평관으로 모델한 뒤 7 개의 자관을 다양한 각도(-90 ~ 90 도) 로 중앙의 노드로 연결하고 대기압으로 방출하는 개념문제를 설정하였다. 헤더의 초기조건은 100 기압의 포화 중수로 채워져 있는 상태이며 배출이 진행됨에 따라 압력이 감소하고 플래싱이 일어나서 차츰 수위가 낮아져 순차적으로 자관에서의 방출이 액체상태에서 증기상태로 천이 되는 문제이다. 이 개념 문제에서는 가운데 노드에서 대칭이 일어나므로 볼륨내의 유체속도가 방출동안 정체상태로 유지하게 되어 항상 유동 성층화 현상이 발생하므로 본 모델의 검증에 쉽게 적용할 수 있다.

그림 5 에서 보듯이 100 기압의 중수가 7 개의 자관을 통하여 대기로 일제히 배출되므로 약 200 초 이후에 완전히 감압이 된다. 그림 6 에서는 수평관에서의 기포율과 그와 연결된 자관에서의 유동기포율의 비교를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 상부에 연결된 자관부터

유동 천이가 일찍 나타나서 90 도와 60 도 자관에서는 10 초 이내에 완전히 증기흐름으로 바뀐 것을 알 수 있다. 측면에 연결된 0 도 자관의 기포율 변화를 보면 연결부위에 수위가 도달하는 모관 기포율 0.5 가 도달하기 전인 기포율 0.45 부터 증기흡입이 시작되어 자관기포율이 상승하기 시작하여 모관의 기포율이 0.6 에 도달하여야 완전히 증기흐름으로 바뀐 것을 알 수 있다. 다른 각도의 자관의 경우도 유사하여 아래 부분에 연결된 –60 도 자관의 경우는 모관의 기포율이 0.9 에 도달하여야 증기흡입이 시작됨을 알 수 있다. 그림 7 에서 7 개의 자관에서의 유량의 변화를 보여주는데 모관의 압력이 낮아 질수록 배출량이 감소하는 것을 보여주며 각 연결 위치에 따라 높은 위치의 자관부터 순차적으로 액체방출에서 증기방출로 천이하고 있음을 보여 준다. 이는 모델 개선을 통하여 (5)식에서의 천이 기포율이 자관의 연결각의 기하학적인 관계를 갖고 있을 뿐 아니라 (6) 식의 자관 연결 부위부터 수위까지의 길이도 이러한 기학학적인 관계를 갖고 있게 모델 함으로써 얻어지는 결과이다.

4. 결론 및 향후 연구 방향

원자로 입구 및 출구헤더에서 유동 성층화 시 자관을 통해 흐르는 원자로 채널의 유량의 정확한 계산을 위하여 수평관의 증기흡입 및 액체 혼입모델을 개선하였다. 개선된 모델은 헤더와 자관의 연결각도를 사용자 입력으로 정확히 모의함으로써 원자로 헤더의 실제적인 거동 분석을 가능하게 하였다. 특히 중수로에서는 원자로 각 채널로 들어가는 유량의 정확한 계산이 채널의 안전성을 평가하는 중요한 요인이 되므로 원자로 입구헤더에서의 당 모델의 적용은 그 동안 개발이 되어온 RELAP5/MOD3/CANDU[5]버전과 더불어 전체적인 CANDU 발전소 계산결과의 신뢰성을 높힐 것으로 기대된다. 또한 개선 모델은 일반적인 증기흡입 및 액체혼입 모델의 확장이므로 중수로의 헤드 뿐 아니라 경수로의 수평관에서의 분기관의 거동과 45 도 등의 각도를 이루고 연결된 여러 지관에 대하여 응용할 수 있을 것이다.

개선 모델에 사용되고 있는 임계깊이에 대한 상관식과 무차원 상관식으로 나타내는 유량 건도 상관식은 수평 측면 분기관의 것을 사용하고 있으므로 이에 대한 개선을 위하여는 각도를 갖고 연결된 자관에 대한 실험적인 자료의 확보와 상관식의 개발이 필요하다. 각도를 갖는 자관의 흐름이 유발하는 vortex 등은 수직이나 수평방향의 자관에서의 현상과는 틀릴 것으로 기대되기 때문이다. 또한 이러한 상관식은 단일관의 영향만을 다루고 있으므로 실질적인 원자로 헤드에서의 밀집된 많은 자관들 사이에서는 유동의 간섭효과가 있을 것으로 기대된다. 따라서 이를 감안할 수 있는 모델과 실험도 향후 더 수행하여야 할 연구 과제이다.

5. 참고문헌

[1] Thermal Hydraulics Group “RELAP5/MOD3 Code Manual Volume 4 : Models and Correlations”, page 3-9, Scientech, Inc. , NUREG/CR-5535 (1998)

[2] W. Bryce, Numerics and Implementation of the UK Horizontal Stratification Entrainment Off-Take Model into RELAP5/MOD3, AEA-TRS-1050, AEEW-R 2501, Atomic Energy Establishment Winfrith, March 1991.

[3] N. Zuber, Problems in Modeling of Small Break LOCA, NUREG-0724, October 1980.

[4] C. Smoglie, Two-Phase Flow Through Small Branches in a Horizontal Pipe with Stratified Flow, KfK 3861, Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH (KfK), Karlsruhe, FRG, December 1984.

[5] B.D.Chung, W.J.Lee, H.S.Lim, “Development of Best Estimate Auditing Code for CANDU Thermal Hydraulic Safety Analysis”, KINS/HR-248, KAERI/CR-67/99 (1999)

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었다.

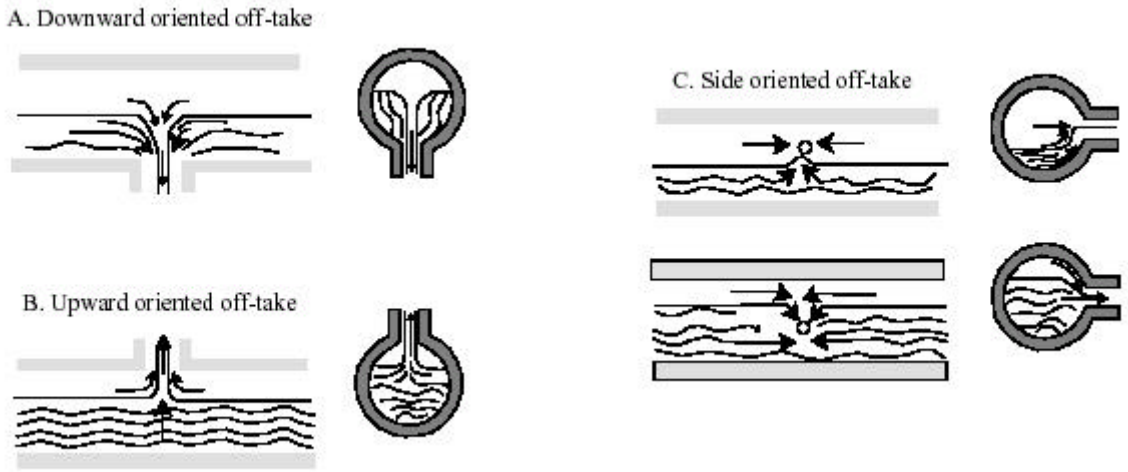

그림 1. 수평관에 이루는 분기관의 방향에 따른 Off-take 현상

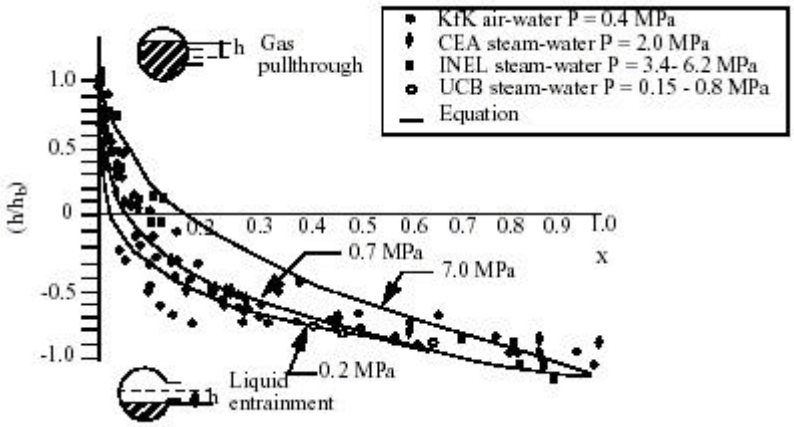

그림 2. 측면 Off-take 의 기존상관식과 실험자료와의 비교

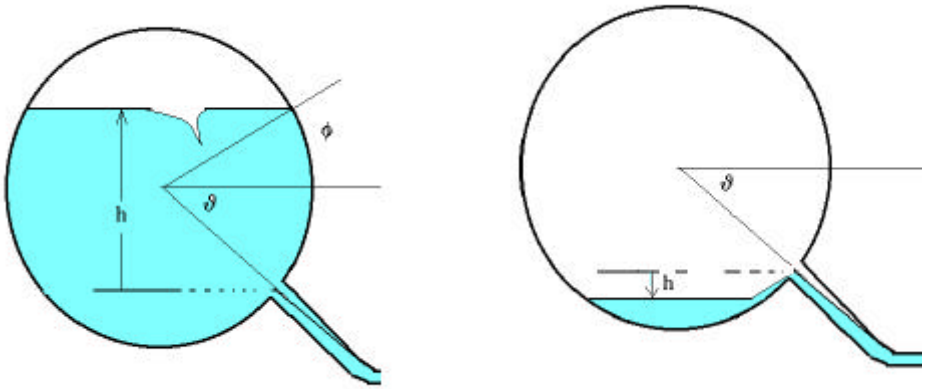

그림 3. 수평헤드에 ϑ 각도로 연결된 자관의 수평관 수위에 따른 증기유입 및 액체혼입

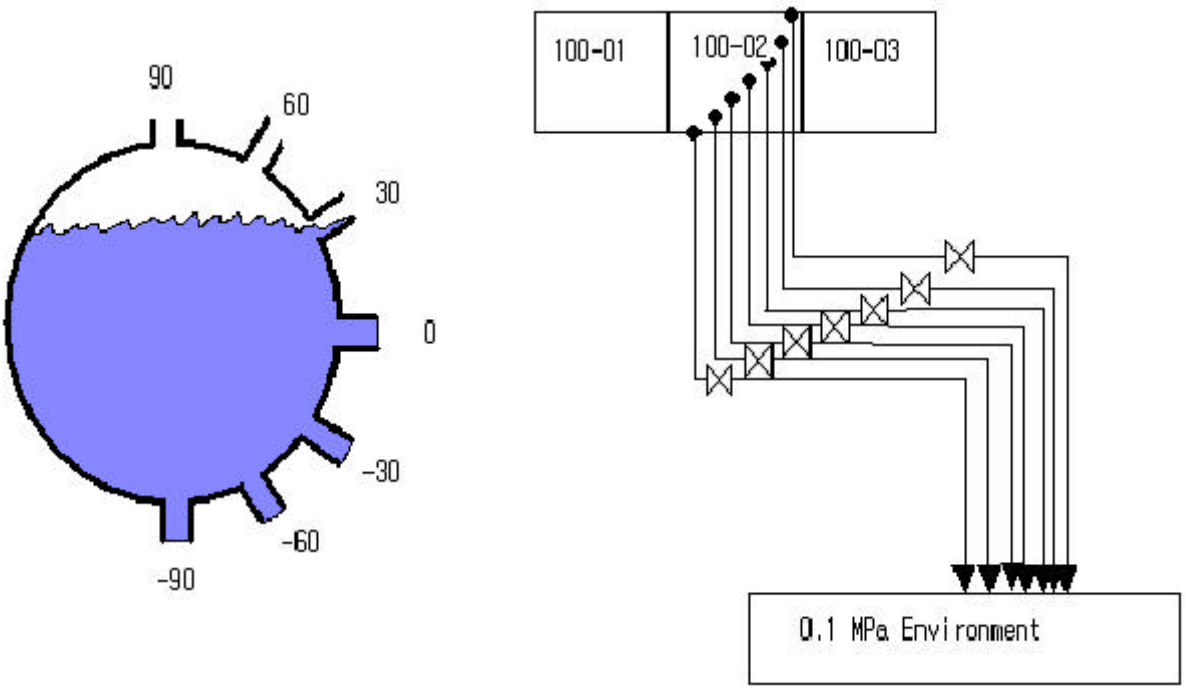

그림 4. 수평헤드에 7 개의 서로 다른 각도로 연결된 자관으로 구성된 모델 검증 개념문제

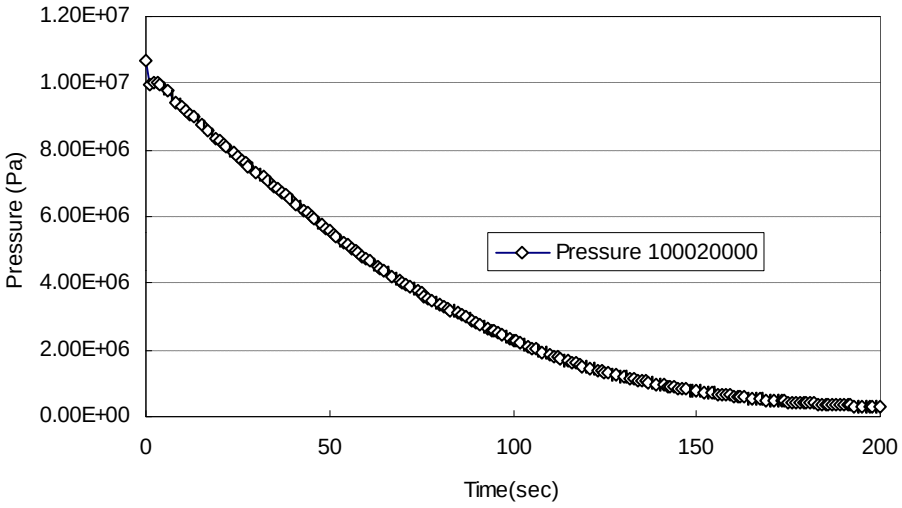

그림 5. 방출 시의 헤더의 압력변화

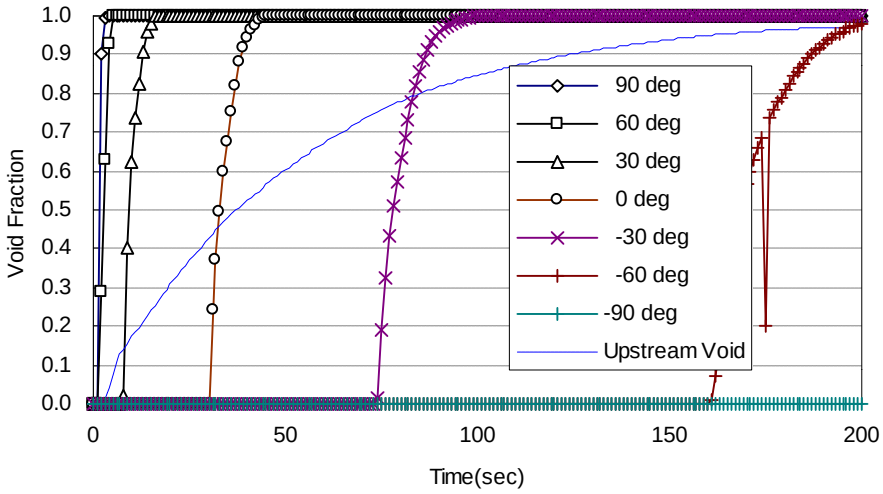

그림 6. 헤더 및 각 자관에서의 기포율의 변화

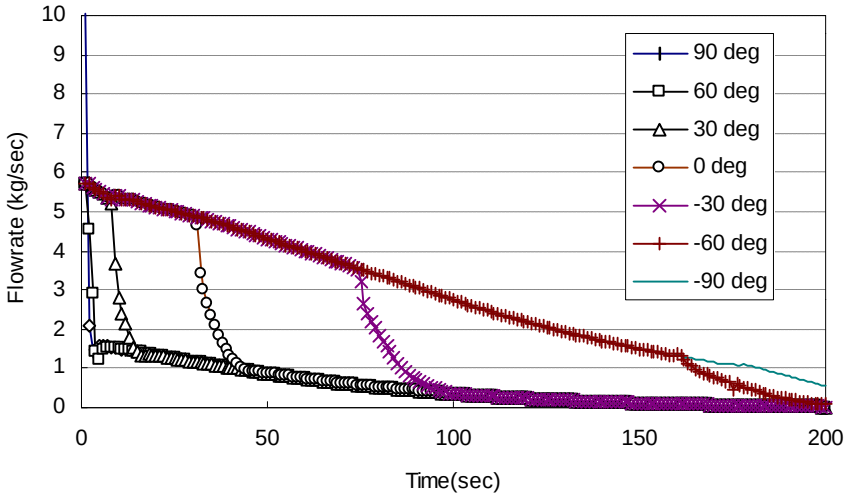

그림 7. 자관에서의 방출 유량의 변화

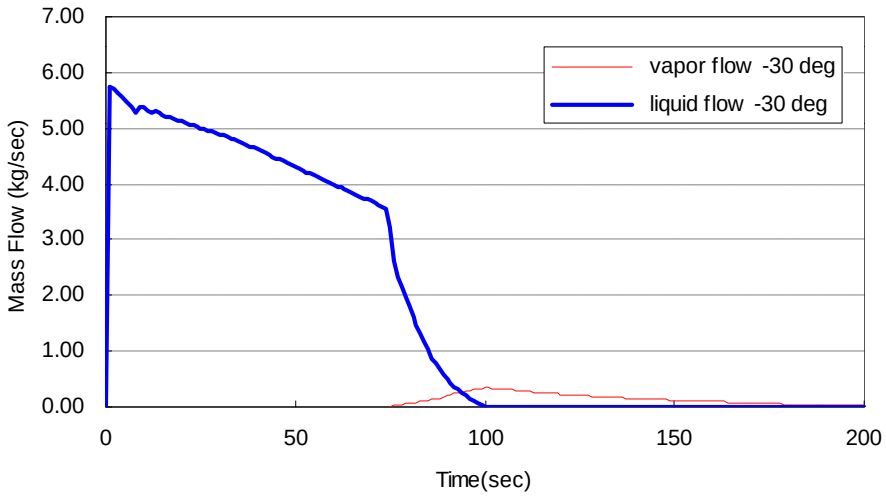

그림 8. –30 도 자관에서의 증기와 액체의 유량 변화