

비응축가스 이상유동 임계유량 실험결과를 이용한 MARS 임계유량모델의 평가

Assessment of the Critical Flow Model of the MARS Code using the Experimental Data of Two-Phase Critical Flow with Noncondensable Gas

박현식, 장석규, 정장환, 김희철

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

MARS 코드에서는 Henry-Fauske 임계유량모델이 사용자 선택사항으로 사용되어지고 있다. 한국원자력연구소에서 수행된 비응축가스 이상유동 임계유량 실험결과를 이용하여 MARS 코드에 사용된 Henry-Fauske 임계유량모델의 성능을 평가하였다. 정상상태 이상유동 임계유량실험에 대한 MARS/SMR의 모사결과는 Henry-Fauske 모델이 실험으로부터 예측된 임계유량을 6% 이내의 RMS 오차 범위에서 잘 예측하는 것을 보여주고 있다. 그러나 시험대 내부의 압력 및 온도에 대한 코드의 계산결과는 실험결과와 차이가 있었다. 천이상태 이상유동 임계유량실험에 대한 MARS 코드의 모사결과는 Henry-Fauske 모델이 사용되었을 때, 코드의 결과는 초기 임계유량 및 압력의 변화를 잘 예측하지 못하는 것으로 나타났다. 기포율에 대한 코드의 계산결과는 비응축가스가 주입되지 않을 경우에는 시험대를 완전히 통과한 후 기포가 발생하지만, 비응축가스가 주입될 경우에는 시험대 입구에서부터 기포가 발생하는 경향을 보여준다.

Abstract

The MARS code uses the Henry-Fauske critical flow model as a user option. The Henry-Fauske critical flow model of the MARS code is assessed using the data of two-phase critical flow experiments with noncondensable gas performed at KAERI. The simulation results of steady-state two-phase critical flow experiments show that they agree with the measured critical flow rates within 6% root-mean-square error. However, the calculation results of pressure and temperature distributions along the test section show a little differences with the experimental data. The simulation results of transient two-phase critical flow experiments show that the calculation results do not predict well the variation of the critical flow rate and the pressure at the initial stage. Also the calculation results show that the discharged water is vaporized after exiting the test section region without the noncondensable gas injected, but it is vaporized while passing the test section with the noncondensable gas injected.

1. 서론

비응축가스 이상유동 임계유량 실험은 한국원자력연구소에서 설계중인 일체형 원자로 SMART에 소형 냉각재 상실사고(SB-LOCA)가 발생하여 배관 파단부를 통하여 비응축가스가 포함된 냉각재가 방출될 경우의 임계유량에 대한 실험자료를 생산하기 위한 목적으로 수행되었다. 생산된 이상유동 임계유량 실험자료는 비응축가스가 포함된 이상유동 임계유량 모델의 검증 및 개발에 사용되며, 검증 및 개발된 임계유량 모델은 TASS나 MARS와 같은 안전해석 코드에 적용되어 배관 파단부를 통하여 방출되는 비응축가스가 포함된 증기와 물 혼합체의 임계유동을 보다 정확하게 예측할 수 있다.

어떤 계통으로부터의 질량방출이 출구(Downstream) 조건에 영향을 받지 않게 되었을 때의 유동이 임계유동이다. MARS 코드에 사용된 Default 임계유량모델은 단일유체, 이상유동의 비균질, 비평형 유동에 대한 Trapp and Ransom[1]의 모델에 기초로 하고 있다. 그러나, 기존의 Default 임계유량모델은 AP600과 같이 피동개념으로 설계된 신형원전에 적용되었을 때, 저압의 이상임계유동(Two-Phase Critical Flow at Low Pressure)과 포화온도 근처의 과냉 파단유동(Subcooled Break Flow)에 대하여 다른 모델에 의해 예측된 결과나 실험결과보다 상당히 낮은 값을 예측하고 있다. 또한 기존 Default 임계유량모델이 단상에서 이상으로의 천이상태에서 또는 비응축성기체가 존재하는 이상유동에서 사용되었을 때, 그 예측결과는 불연속성을 보일 뿐만 아니라 Henry-Hauske 임계유량모델보다 효과적인 계산을 못하는 것(Noiser)으로 밝혀졌다.

Henry-Fauske 임계유량모델은 비응축가스가 존재하는 경우의 이상유동 임계유량 모델로 널리 사용되고 있으며, MARS/SMR[2]과 MARS2.1[3]에서는 Henry-Fauske 임계유량모델[4]이 사용자 선택사항으로 사용되어진다.

고유의 Henry-Fauske 임계유량모델[4]은 “노즐, 오리피스, 단관에서의 단일 유체 이상 임계유동(Two-phase critical flow of one component mixtures in nozzles, orifices, and short tubes)”에 대한 예측모델로서 정체조건의 정보만으로 임계유량을 예측할 수 있을 뿐만 아니라 비평형 유동에도 적용이 가능하다. 단일유체, 이상유동의 정상상태 일차원 모멘텀 방정식으로부터 임계유속 기준(Choking Criterion)이 유도되었다. 이때 사용된 주요한 가정은 기계적인 비평형의 정도보다 Throat에서의 열적인 비평형이 임계유량을 결정하는데 중요하다는 것으로, 기상과 액상의 속도는 같은 것으로 가정된다.

Henry-Fauske 모델의 임계유량에 대한 최종적인 표현은 식 (1)과 같다.

$$G_c^2 = \left\{ \frac{x_o v_v}{\eta P} + (v_v - v_{l,0}) \left[\frac{(1-x_o)N}{(s_{v,eq} - s_{l,eq})} \frac{ds_{l,eq}}{dP} - \frac{x_o C_{p,v}(1/\eta - 1/\gamma)}{P_t(s_{v,0} - s_{l,0})} \right] \right\}_t^{-1} \quad (1)$$

여기서, G 는 임계질량유속, x 는 건도, v 는 비체적, P 는 압력, s 는 비엔트로피, C_p 는 비열, η 는 임계압력비율, P_t/P_0 이고, v 는 등엔트로피 상수이다. 아래첨자 0, eq, l, v, t는 각각 정체상태, 평형상태, 액상, 기상 및 throat에서의 상태를 나타내며, 열비평형상관계수(thermal non-equilibrium correlating coefficient) N 은 실험데이터를 바탕으로 개발되었으며, 식 (2)와 같이 계산되어진다.

$$N = x_{eq,t} / 0.14 \quad (2)$$

유도된 임계질량유량에 대한 식 (1)은 정체상태의 조건과 Throat에서의 압력에만 의존하는 상관식이며, MARS 코드에서 Throat에서의 압력, P_t 는 반복적인 계산방법에 의해서

계산된다. Henry-Fauske 모델은 시험대의 입구(Upstream) 조건이 이상인 경우뿐만 아니라 과냉 액체와 단상 기체인 경우에도 적용될 수 있도록 확장되었다.

MARS 코드에 사용된 Henry-Fauske 임계유량모델은 이상 및 과냉 임계유동에 적용된 고유의 Henry-Fauske 임계유량모델[4]을 상전이(Phase Transition)에서 예측의 연속성을 확보할 수 있고, 노즐과 오리피스를 통한 임계유동의 특성을 보다 잘 반영할 수 있는 수단을 제공하고, 비응축성기체가 존재할 경우 임계유량을 적절히 예측하기 위하여 개정된 모델이다.

본 논문에서는 한국원자력연구소에서 행한 비응축가스 이상유동 임계유량 실험결과를 이용하여 Henry-Fauske 임계유량모델과 MARS 코드의 성능을 평가하고자 한다. 정상상태 임계유량 실험결과를 이용하여 MARS 코드의 임계유량 모델을 평가하고, 천이상태 임계유량 실험결과를 이용하여 MARS 코드의 성능을 평가하고자 한다.

2. 비응축가스 이상유동 임계유량 실험장치

정체압력 및 정체온도를 유지시키는 기능을 하는 냉각재 압력용기(Pressure Vessel)와 배관의 파단부위를 모의하는 시험대(Test Section)가 실험장치의 핵심이다. 고온고압 상태의 냉각재 방출을 구현하기 위하여 압력용기와 시험대 이외에 여러 주변장치가 설치되었다. 실험장치[5]는 주순환계통, 질소가스 공급계통, 냉각재 방출계통 및 질소가스 충전계통으로 구성되었다. 주순환계통은 펌프와 히터로 구성되어 압력용기의 초기 정체온도를 만드는 역할을 하며, 질소가스 공급계통은 비응축가스를 압력조절밸브를 통해 압력용기에 주입하거나 유량조절밸브를 통해 질소주입배관에 공급하는 역할을 한다. 또한 질소가스 충전계통은 질소가스 공급계통에 제공될 질소를 질소탱크에 공급하며, 냉각재 방출계통은 압력용기, 연결배관, 질소가스 주입부, 시험대, 방출밸브(QOV, Quick Opening Valve) 및 방출탱크를 포함한다.

2.1 실험장치와 계측계통

비응축가스 이상유동 임계유량 실험의 실험조건은 압력용기 및 시험대 내부의 온도, 압력 및 기하학적 구조에 의하여 결정된다. 사용된 압력용기는 내경이 0.57m, 길이가 5.092m, 부피가 1.3m³인 직립하향 용기이다. 압력용기 하단과 이어지는 연결배관은 내경이 87.32mm, 길이가 2.36m인 배관이며, Probar type 유량계 및 비응축가스 주입을 위한 기/액 혼합배관부가 장착되었다. 시험대는 기/액 혼합배관부 하단에 연결되며, 시험대의 하단에는 방출밸브와 방출탱크가 연결된다. 시험대는 sharp edged 입구형상의 파이프로 두 종류(시험대 T1, T2)가 사용되었다. 시험대 T1은 내경이 20mm, 길이가 300mm인 시험대 부분과 시험대 부분의 상단 및 하단에 붙어있는 내경이 87.32mm이고, 길이가 각각 290mm, 972mm인 연결부분으로 구성되어 있다. 시험대 T2는 내경이 10.9mm, 길이가 1000mm인 시험대 부분과 시험대 부분의 상단 및 하단에 붙어있는 내경이 87.32mm이고, 길이가 각각 281.15mm, 280.85mm인 연결부분으로 구성되어 있다. 시험대 부분의 압력 및 온도 측정의 위치는 표 1과 같다.

비응축가스 이상유동 임계유량 실험의 측정변수는 냉각재 유량, 비응축가스 주입유량, 압력용기의 정체압력 및 정체온도, 그리고 시험대 내부의 압력 및 온도 분포이다. 계측기의 세

부사양 및 허용오차는 표 2와 같다.

2.2 실험요건 및 실험절차

실험은 기본적으로 실험요건서[6]에 따라 수행되었다. 파단모의 배관은 내경이 각각 20mm와 10.9mm인 배관이 사용되었으며, 정체압력은 4, 7, 10MPa, 입구과냉도는 0, 20, 50°C로 변화시켰으며, 비응축가스의 주입유량은 유량제어밸브의 개도에 의하여 결정되는 유량의 범위내에서 결정되었다.

질소가스를 질소가스 충전계통을 통하여 고압의 상태로 질소가스 저장용기에 저장한 다음, 냉각재 압력용기에 물을 채우고 주순환계통을 가동하여 냉각재를 순환시키면서 가열 및 가압을 하여 실험 Test matrix의 정체압력 및 정체온도를 맞춘다. 실험조건에 도달한 압력용기 내부의 냉각재는 개방시간이 1초 이내인 방출밸브(QOV)의 개방과 동시에 시험대를 통하여 방출된다. 정상상태 실험에서는 압력용기는 압력용기와 질소공급탱크의 연결배관에 설치된 압력조절밸브(PCV, Pressure Control Valve)[7, 8]를 통해 질소를 공급받으면서 시험기간 동안 일정압력을 유지할 수 있도록 하였고, 천이상태 실험에서는 압력용기는 질소공급장치와 격리된다. 제어된 일정유량의 질소가스는 유량조절밸브(FCV, Flow Control Valve)의 작동에 의하여 시험대 전단에 설치된 질소주입배관으로 주입된다.

3. MARS 코드의 임계유량 모델 평가

3.1 정상상태 이상유동 임계유량 실험

시험대 T1을 이용하여 47개의 실험 데이터가 획득되어졌고, 시험대 T2를 이용하여 13개의 실험 데이터가 획득되어졌다. 정체압력이 4, 7, 10MPa, 입구 과냉도가 0, 20, 50°C, 비응축가스의 주입유량이 0.0 ~ 0.39kg/s인 범위에서 실험이 이루어졌다.

초기에 압력용기 내부의 압력, 온도 및 수위를 결정한 후 개방속도가 빠른 방출밸브를 열어 압력용기의 물을 방출시킨다. 이때 압력용기 상단에 부착된 압력제어밸브를 통해 질소공급탱크로부터 공급되는 질소를 지속적으로 주입함으로써 압력용기의 내부압력을 일정하게 유지시킨다. 먼저 단상의 임계유량이 측정되어지며, 비응축가스(질소)의 주입량을 변화시키면서 임계유량의 변화 및 시험대 내부의 압력과 온도의 분포가 측정되어진다.

시험대 T1을 사용한 47개의 정상상태 실험결과가 MARS 코드에 의해 모사되었고, 정상적으로 데이터가 획득된 시험대 T2를 사용한 1개의 실험결과가 모사되었다. 표 3은 MARS 코드에 의해 모사된 정상상태 이상유동 임계유량 실험의 Test Matrix를 보여주고 있다.

3.2 정상상태 이상유동 임계유량 실험장치에 대한 MARS 모델

그림 0은 정상상태 이상유동 임계유량 실험장치의 모사를 위한 MARS 모델을 보여준다. 압력용기의 온도와 압력, 비응축가스의 주입량, 온도와 압력 및 출구의 온도와 압력은 경계조건으로 주어졌다. 압력용기와의 연결배관, 비응축가스가 주입되는 혼합영역, 시험대 및 방출밸브와의 연결배관은 각각 4, 5, 15 및 5개의 노드를 가지는 파이프 모사되었다. 각각의 파이프는 순서대로 Single Junction을 통해 연결되었으며, 임계유량은 시험대 출구에서 발생하는 것으로 모사되었다.

3.3 MARS/SMR의 계산결과

비용축성기체가 존재할 경우의 MARS 코드의 임계유량 모사능력을 평가하기 위하여 각 시험대 T1과 T2에 대하여 실험결과와 코드의 계산결과가 비교되었다. 그림 2는 시험대 T1을 이용한 임계유량 실험에 대하여 실험결과와 MARS/SMR의 계산결과를 비교한다. MARS/SMR 코드의 임계유량 모델은 비용축성기체가 없는 경우뿐만 아니라 비용축성기체가 주입되는 이상유동 임계유량 실험에 대해서도 실험결과를 잘 예측하고 있다. 실험결과와 계산결과는 RMS 오차가 5.98%이며, 코드는 거의 전 실험영역에 대하여 실험오차 이내의 값을 예측하고 있다. 그림 3은 시험대 T2를 이용한 임계유량 실험에 대하여 실험결과와 MARS/SMR의 계산결과를 비교한다. MARS/SMR에 의해 모의된 시험대 T2를 이용한 실험결과와 1개였으며, 실험결과와 계산결과의 오차는 5.35%이었다.

압력용기의 정체압력, 정체온도 및 질소주입유량이 서로 다른 여러 실험에 대하여 MARS/SMR을 이용한 모사가 이루어졌고, 시험대 내부의 압력, 온도, 기공율, 및 질소질량분율이 비교되었다. 다음은 정상상태 실험결과 중 각 측정변수의 측정영역이 최대이거나 최소인 경우에 대한 MARS 코드의 계산결과이다.

그림 4는 시험 SS-05A에 대한 시험대 내부의 압력분포의 변화를 보여준다. 시험 SS-05A는 높은 정체압력, 높은 과냉도를 가지면서 비용축성기체가 주입되지 않는 시험으로 임계유량이 모든 시험 중에서 최대이다. 실험에서는 대부분의 압력강하가 출구에서 일어나는 반면, MARS 코드의 계산은 입구에서의 압력강하가 더 큰 결과를 보여준다. MARS 코드의 계산결과는 전체적으로 시험대 내부의 압력을 상당히 낮게 예측하고 있다. 그림 5는 시험 SS-05A에 대한 시험대 내부의 기공율과 질소질량분율의 모사결과를 보여준다. 시험대의 입구로부터 출구까지 기포는 발생하지 않았으며, 시험대를 빠져나와 급격히 기포가 발생하는 것을 모사하고 있다.

그림 6은 SS-13B에 대한 시험대 내부의 압력분포의 비교결과를 보여준다. 시험 SS-13B는 높은 정체압력, 낮은 과냉도 및 높은 비용축성기체 주입유량을 가지는 시험으로 정체압력이 10MPa인 실험중에서 최소의 임계유량을 가진다. 압력강하는 출구에서 급격하게 일어나고 있으며, 전체적인 압력의 과소예측은 과냉도가 50°C인 경우보다 훨씬 작아졌다. 그림 7은 SS-13B에 대한 시험대 내부의 온도분포의 비교결과를 보여준다. 온도는 코드의 계산결과가 약간 낮게 유지되고 있으며, 경향을 잘 따라가고 있는 것을 알 수 있다. 그림 8은 SS-13B에 대한 시험대 내부의 기공율과 질소질량분율의 모사결과를 보여준다. 모사결과는 비용축성기체가 주입되지 않을 때와는 달리 시험대 입구영역에서 물의 기화가 발생하는 것을 보여주고 있다.

그림 9와 10은 SS-08B에 대한 시험대 내부의 압력 및 온도분포의 비교결과를 보여준다. 시험 SS-08B는 낮은 정체압력, 높은 과냉도 및 낮은 비용축성기체 주입유량을 가지는 시험으로 비용축성기체가 주입되는 낮은 정체압력 조건에서는 최대의 임계유량을 가진다. MARS 코드의 모사결과는 SS-05A의 모사결과와 비슷하게 전체적인 시험대의 압력을 과소 예측하고 있으나, 온도는 비교적 잘 예측하고 있다.

그림 11은 SS-09D에 대한 시험대 내부의 압력분포의 비교결과를 보여준다. 시험 SS-09D는 낮은 정체압력, 낮은 과냉도 및 높은 비용축성기체 주입유량을 가지는 시험으로 임계유량이 모든 시험 중에서 최소이다. 모사결과는 과냉도가 작은 SS-13B와 비슷한 경향으로 실험으로부터 얻은 압력분포를 약간 낮게 예측하였다.

그림 12와 13은 SS-16A에 대한 시험대 내부의 압력 및 온도분포의 비교결과를 보여준다.

시험 SS-16A는 내경이 10.9mm인 시험대 T2를 이용한 시험으로 높은 정체압력, 높은 과냉도를 가지면서 비응축성기체가 주입되지 않는 시험이다. 시험 SS-16A는 시험대 T1을 사용하는 SS-05A와 거의 같은 조건에서 수행된 실험이다. MARS 코드의 계산결과는 전체적으로 시험대 내부의 압력을 상당히 낮게 예측하고 있고, 온도를 높게 예측하고 있다.

MARS/SMR의 계산결과는 실험결과와 비교하여 전 시험대 영역에서 압력을 낮게 예측하고 있으며, 정체상태의 과냉도가 커지면 그 경향은 증가하였다. MARS/SMR의 계산결과는 온도를 잘 예측하고 있으며, 과냉도가 커지면 약간 과대평가하는 경향이 있다. 비응축가스가 주입되지 않을 경우에는 시험대를 통과한 후 기포가 발생하지만, 비응축가스가 주입될 때는 시험대 입구에서 일정정도의 기포가 발생하는 경향을 보여준다.

4. MARS 코드의 임계유량 예측성능 평가

4.1 천이상태 이상유동 임계유량 실험

천이상태 임계유량 실험에 시험대 T1을 이용하여 5개의 실험 데이터가 획득되어졌고, 시험대 T2를 이용하여 3개의 실험 데이터가 획득되어졌다. 정체압력이 4, 8, 12MPa, 입구 과냉도가 0, 50°C, 비응축가스의 주입유량이 0.0 ~ 0.267kg/s인 범위에서 실험이 이루어졌다.

미리 결정되어진 압력용기 내부의 압력, 온도 및 수위를 초기에 맞춘 후 압력용기는 격리된다. 방출밸브(QOV)를 열어 격리된 압력용기의 물을 방출시키고, 몇 초 후에 비응축가스를 주입하였다. 압력용기의 압력, 온도와 수위가 계측되어졌고, 시험대 내부의 압력과 온도의 분포 및 임계유량이 측정되어졌다.

MARS 코드의 모사 대상은 시험대 T1을 사용한 4개의 천이상태 임계유량 실험이다. 표 4는 MARS 코드에 의해 모사된 천이상태 이상유동 임계유량 실험의 Test Matrix를 보여주고 있다.

4.2 천이상태 이상유동 임계유량 실험장치에 대한 MARS 모델

그림 14는 천이상태 이상유동 임계유량 실험장치의 모사를 위한 MARS 모델을 보여주고 있다. 압력용기는 9개의 노드를 가지는 파이프모사되었다. 비응축가스의 주입량, 온도와 압력 및 출구의 온도와 압력은 경계조건으로 주어졌다. 압력용기와의 연결배관, 비응축가스가 주입되는 혼합영역, 시험대 및 방출밸브와의 연결배관은 각각 4, 5, 15 및 5개의 노드를 가지는 파이프모사되었다. 각각의 파이프는 순서대로 Single Junction을 통해 연결되었으며, 임계유량은 시험대 출구에서 발생하는 것으로 모사되었다.

초기상태로는 압력용기의 압력 및 온도가 주어졌으며, 초기 수위는 기체의 건도를 이용하여 입력되었다. 또한 시험대 상단 파이프를 통해 주입되는 비응축가스의 시간에 따른 유량 변화가 입력되었다.

4.3 MARS 코드의 계산결과

압력용기의 정체압력, 정체온도 및 수위가 결정된 상태에서 방출밸브가 개방되고, 단일유체(물)의 이상유동이 발생된다. 몇 초의 간격을 두고, 질소가 주입되기 시작하며, 질소주입유량은 시간에 따라 변한다.

TR-3은 정체압력이 12MPa이고, 과냉도가 50°C이면서 질소가 주입되지 않은 경우의 시험

이다. 그림 15부터 18은 시험 TR-3에 대한 MARS 코드의 계산결과이다. 시험 TR-3은 높은 정체압력, 높은 과냉도를 가지면서 비응축성기체가 주입되지 않는 시험이다. 민감도 분석으로 Heat Structure의 유무에 의한 영향과 MARS/SMR과 MARS 2.1의 계산결과를 비교하였다. 민감도 분석결과는 4가지 경우의 계산 모두가 거의 일치하는 경향을 보인다는 것이다. MARS 2.1의 계산이 MARS/SMR의 계산보다 매끄러운 결과를 보여주고 있고, Heat Structure가 부착된 모델이 Heat Structure가 없는 모델보다 약간 현실적인 결과를 보여준다. 그림 15부터 18은 시간에 따른 임계유량, 압력용기 내부의 압력변화, 온도변화 및 수위변화를 보여준다. 계산된 임계유량은 방출밸브의 개방과 동시에 실험결과를 훨씬 상회하며, 압력용기의 압력 및 수위는 급감한다. 이후 임계유량은 실험결과보다 줄어들어 거의 일정한 방출유량이 유지되고, 따라서 압력용기의 압력 및 수위는 서서히 감소한다. 코드의 모의 결과는 압력용기 내부의 온도의 변화가 압력의 경향을 따라 변화하는 것을 보여주며, 실험결과보다 민감하게 온도변화를 예측하는 것을 보여준다. 측정시간이 약 160초일 때 압력용기의 물이 모두 방출되고, 단상유동으로 바뀌게 된다.

TR-1은 정체압력이 4MPa이고, 과냉도가 7°C이면서 질소가 주입되는 경우의 시험이다. 그림 19부터 20은 시험 TR-1에 대한 MARS 코드의 계산결과이다. 시험 TR-1은 낮은 정체압력, 낮은 과냉도를 가지면서 비응축성기체가 주입되는 시험에 대한 대표적인 경우이다. 시간에 따른 질소의 주입유량이 그림 19와 같이 변할 때, 임계유량은 시간에 따라 그림 20과 같이 변한다. MARS 코드의 계산결과는 초기에 임계유량이 과대예측되고, 이후에는 과소예측되는 경향을 보이며, 주입되는 질소가스의 유량변화에도 크게 변화하지 않았다.

TR-2은 정체압력이 8MPa이고, 과냉도가 7°C이면서 질소가 주입되는 경우의 시험이다. 그림 21부터 22는 시험 TR-2에 대한 MARS 코드의 계산결과이다. 시간에 따른 질소의 주입유량이 그림 21과 같이 변할 때, 임계유량은 시간에 따라 그림 22와 같이 변한다. MARS 코드의 계산결과는 초기 상태를 제외하고는 실험결과를 전체적으로 과소평가하고 있다.

TR-5는 정체압력이 12MPa이고, 과냉도가 7°C이면서 질소가 주입되는 경우의 시험이다. 그림 23부터 24는 시험 TR-5에 대한 MARS 코드의 계산결과이다. 시험 TR-5는 높은 정체압력, 낮은 과냉도를 가지면서 비응축성기체가 주입되는 시험에 대한 대표적인 경우이다. 시간에 따른 질소의 주입유량이 그림 23과 같이 변할 때, 임계유량은 시간에 따라 그림 24와 같이 변한다. MARS 코드의 계산결과는 초기 상태를 제외하고는 실험결과를 전체적으로 과소평가하고 있다.

5. 결론

한국원자력연구소에서 행한 비응축가스 이상유동 임계유량 실험결과를 이용하여 MARS 코드에 사용된 Henry-Fauske 임계유량모델을 평가하였다. MARS 코드의 계산결과는 다음과 같다.

- 비응축성기체가 주입되는 경우의 정상상태 임계유량실험에 대한 MARS/SMR의 모사결과는 MARS/SMR의 임계유량모델로 사용된 Henry-Fauske 모델이 실험으로부터 예측된 임계유량을 6% 이내의 RMS 오차 범위에서 잘 예측하고 있는 것을 보여준다.
- 정상상태 임계유량실험에 대한 MARS/SMR의 계산결과는 실험결과와 비교하여 전 시험대 영역에서 압력을 낮게 예측하고 있으며, 정체상태의 과냉도가 커지면 그 경향은

증가하였다. MARS/SMR의 계산결과는 온도를 대체로 잘 예측하고 있으나, 과냉도가 커지면 약간 과대평가하는 경향이 있다.

- 천이상태 이상유동 임계유량실험에 대한 MARS 코드의 민감도 분석을 수행한 결과는 MARS 2.1의 계산이 MARS/SMR의 계산보다 매끄러운 결과를 보여주고 있고, Heat Structure가 부착된 모델이 Heat Structure가 없는 모델보다 약간 현실적이라는 것이다.

- MARS/SMR과 MARS2.1의 모사결과는 수정된 Henry-Fauske 모델이 사용되었을 때, 두 코드의 결과는 거의 일치하였다. 실험결과와 비교하였을 때, 코드의 계산결과는 초기 임계유량 및 압력변화를 잘 예측하지 못하는 것으로 나타났다.

- 시험대 내부의 기포율은 현재 측정되지 않았다. 코드의 계산결과는 비응축가스가 주입되지 않을 경우에는 시험대를 완전히 통과한 후 기포가 발생하지만, 비응축가스가 주입될 경우에는 시험대 입구에서 일정 정도의 기포가 발생하는 경향을 보여준다. 임계유량모델의 검증에 대해 실험으로부터 기포율이 예측될 필요가 있다는 것을 확인하였다. 작은 구경의 원관에 대하여는 감마선밀도계를 이용하여 평균기공율을 측정하는 방법이 고려되고 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 개발계획의 일환으로 수행되었다. MARS/SMR을 이용한 코드해석과 관련하여 도움을 주신 원자력연구소 동력로기술개발팀의 배규환씨와 임홍식씨께 감사드립니다.

참고문헌

[1] J. A. Trapp and V. H. Ransom, "A Choked-Flow Calculation Criterion for Nonhomogeneous, Nonequilibrium, Two-Phase Flows," International Journal of Multiphase Flow, 8, 6, 1982, pp. 669-681.

[2] 이원재 외, "MARS 1.4 코드의 모델 개선 및 검증," KAERI/TR-1386-99, 1999.

[3] 이원재 외, "MARS 2.1 코드 Description," to be published.

[4] R. E. Henry and H. K. Fauske, "The Two-Phase Critical Flow of One-Component Mixtures in Nozzles, Orifices, and Short Tubes," Transactions of ASME, Journal of Heat Transfer, 93, 1971, pp. 179-187.

[5] 장석규, 정장환, 박현식, "Summary of Test Results for Two-phase Critical Flow," KAERI/TR-2062/2002, 2002.

[6] 배규환, "비응축가스 이상유동 임계유량 실험요건서," SMART-SA-TR550-00, 1999.

[7] 김창희 외, "비응축가스 이상유동 임계유량 실험장치의 압력용기 압력제어", 원자력학회 춘계학술발표회, 2001.

[8] 박현식 외, "MARS/SMR을 이용한 비응축가스 이상유동 임계유량 실험장치 압력조절 밸브의 설계검증", 원자력학회 춘계학술발표회, 2001.

표 1 시험대 내부의 온도 및 압력 측정의 위치

계측기 이름	시험대 T1 (m)	시험대 T2 (m)	계측기 이름	시험대 T1 (m)	시험대 T2 (m)
압력계			P13	0.297	0.91
P0	-0.03	-0.03	P14	0.298	0.95
P1	0.001	0.003	P15	0.299	0.99
P2	0.004	0.023	P16	0.2995	0.9995
P3	0.010	0.093	PL	0.330	1.03
P4	0.020	0.168	P16	0.2995	0.9995
P5	0.050	0.250	온도계		
P6	0.140	0.370	T0	-0.03	-0.03
P7	0.230	0.500	T1	0.01	0.10
P8	0.270	0.600	T2	0.10	0.35
P9	0.285	0.680	T3	0.20	0.65
P10	0.291	0.750	T4	0.29	0.90
P11	0.294	0.810			

표 2 계측기 사양

계측기 이름	설명	모델명	교정 영역	오차
PT102	압력용기의 압력	Rosemount 3051PG5	0 - 120 bar	±0.05%
TE113	압력용기의 온도	Watlow, K-type, Ungrounded	0 - 400 °C	±0.4%
FT202	질소의 주입유량	Hoffer	0.012 - 0.67 kg/s	±2%
TG1	질소의 주입온도	Watlow, K-type, Ungrounded	0 - 400 °C	±0.4%
FT301	방출액체의 유량	Probar, PBR+26S	0 - 42.0 kg/s	±0.5%
P0	시험대의 압력	Rosemount 3051CD5	0 - 138 bar	±0.05%
P1~P16, PL	시험대의 압력	Rosemount 3051CD4	0 - 20.7 bar	±0.05%
T0~T4	시험대의 온도	Watlow, K-type, Ungrounded	0 - 400 °C	±0.4%

표 4. 천이상태 이상유동 임계유량 실험의 Test Matrix

ID	정체압력 (MPa)	정제온도 (°C)	초기수위 (m)	가스온도 (°C)	배관의 온도 (°C)	밸브개방 (sec)	가스주입 (sec)
TR-1	4.246	243.662	4.79687	28.886	164.0	55.790	57.990
TR-2	7.967	286.898	4.64935	17.047	183.0	20.298	23.898
TR-3	12.284	276.916	4.62805	21.698	164.0	57.297	-
TR-5	12.411	318.044	4.65624	32.680	155.0	10.097	13.597

표 3. 정상상태 이상유동 임계유량 실험의 Test Matrix

ID	Test ID	No.	시험대 Type	정체압력 (MPa)	정제온도 (℃)	주입유량 (kg/s)	가스온도 (℃)	액체임계유량 (kg/s)
SS01A	T1-70-266_20-S	A	20	7.236	264.55	0	-	15.435
SS02A	T1-70-286_00-S	A	20	7.142	282.99	0	-	10.322
SS02B	T1-70-286_00-S	B	20	7.170	282.65	0.054	99.32	9.011
SS03A	T1-70-286_00-S2	A	20	7.120	283.18	0	-	10.092
SS03B	T1-70-286_00-S2	B	20	7.139	282.27	0.048	41	9.065
SS03C	T1-70-286_00-S2	C	20	7.114	279.99	0.209	26.39	7.671
SS04A	T1-70-266_20-S2	A	20	7.188	265.67	0	-	15.021
SS04B	T1-70-266_20-S2	B	20	7.210	263.46	0.066	66.86	11.392
SS04C	T1-70-266_20-S2	C	20	7.244	263.64	0.112	53.54	10.413
SS04D	T1-70-266_20-S2	D	20	7.257	263.10	0.181	41.16	9.605
SS05A	T1-100-261_50-S2	A	20	10.045	264.00	0	-	23.357
SS05B	T1-100-261_50-S2	B	20	10.078	262.32	0.064	58.32	20.148
SS06A	T1-100-291_20-S2	A	20	10.119	290.92	0	-	16.976
SS06B	T1-100-291_20-S2	B	20	10.143	289.41	0.064	63.96	15.053
SS06C	T1-100-291_20-S2	C	20	10.174	287.49	0.149	42.45	12.893
SS07A	T1-70-236_50-S2	A	20	7.264	237.60	0	-	20.997
SS07B	T1-70-236_50-S2	B	20	7.312	236.52	0.062	78.65	17.488
SS07C	T1-70-236_50-S2	C	20	7.309	234.98	0.136	73.54	13.884
SS08A	T1-40-200_50-S	A	20	4.196	202.92	0	-	16.060
SS08B	T1-40-200_50-S	B	20	4.202	202.09	0.054	71.77	12.562
SS08C	T1-40-200_50-S	C	20	4.231	201.53	0.109	52.66	10.689
SS08D	T1-40-200_50-S	D	20	4.266	201.38	0.168	36.83	8.949
SS08E	T1-40-200_50-S	E	20	4.285	200.77	0.079	30.98	11.824
SS09A	T1-40-250_00-S	A	20	4.441	248.42	0	-	9.887
SS09B	T1-40-250_00-S	B	20	4.437	248.15	0.058	55.86	6.935
SS09C	T1-40-250_00-S	C	20	4.444	247.09	0.142	46.50	5.863
SS09D	T1-40-250_00-S	D	20	4.446	246.62	0.154	40.39	5.644
SS10A	T1-40-230_20-S2	A	20	3.763	231.12	0	-	10.675
SS10B	T1-40-230_20-S2	B	20	3.786	230.87	0.053	78.32	7.223
SS10C	T1-40-230_20-S2	C	20	3.793	230.12	0.119	46.55	5.919
SS10D	T1-40-230_20-S2	D	20	3.801	229.85	0.077	36.63	6.624
SS10E	T1-40-230_20-S2	E	20	3.827	229.65	0.130	29.42	5.810
SS10F	T1-40-230_20-S2	F	20	3.831	229.08	0.146	24.95	5.475
SS10G	T1-40-230_20-S2	G	20	3.841	228.51	0.028	24.91	9.500
SS11A	T1-100-311_00-S2	A	20	10.131	309.58	0	-	12.272
SS11B	T1-100-311_00-S2	B	20	10.145	308.93	0.066	51.96	10.980
SS11C	T1-100-311_00-S2	C	20	10.149	307.46	0.095	41.59	10.848
SS12A	T1-70-236_50-S4	A	20	7.253	236.49	0	-	21.217
SS12B	T1-70-236_50-S4	B	20	7.256	235.70	0.084	76.34	15.867
SS12C	T1-70-236_50-S4	C	20	7.276	234.97	0.029	64.58	18.914
SS13A	T1-100-311_00-S3	A	20	10.290	309.84	0	-	12.471
SS13B	T1-100-311_00-S3	B	20	10.293	309.17	0.187	33.73	10.079
SS14A	T1-100-261_50-S3	A	20	10.434	262.56	0	-	24.856
SS14B	T1-100-261_50-S3	B	20	10.432	260.41	0.103	59.18	20.351
SS15A	T1-100-291_20-S4	A	20	10.142	289.92	0	-	17.377
SS15B	T1-100-291_20-S4	B	20	10.130	288.50	0.095	30.10	14.077
SS15C	T1-100-291_20-S4	C	20	10.132	283.33	0.051	28.95	15.826
SS16A	T2-100-261_50-S	A	10.9	10.294	260.03	0	-	5.765

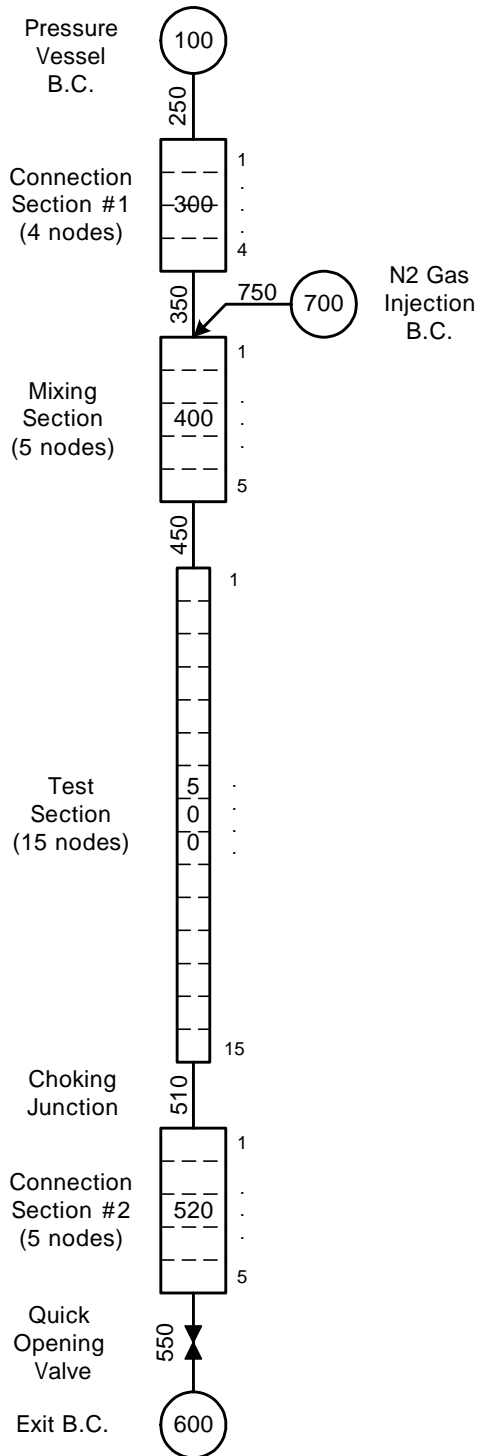


그림 1. 정상상태 이상유동 임계유량 실험장치의 모사를 위한 MARS 모델

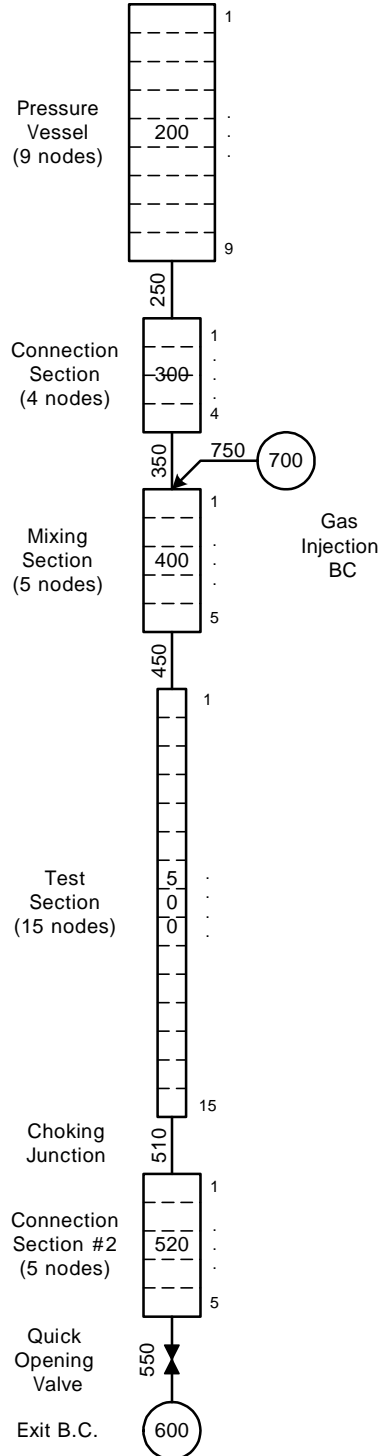


그림 14. 천이상태 이상유동 임계유량 실험장치의 모사를 위한 MARS 모델

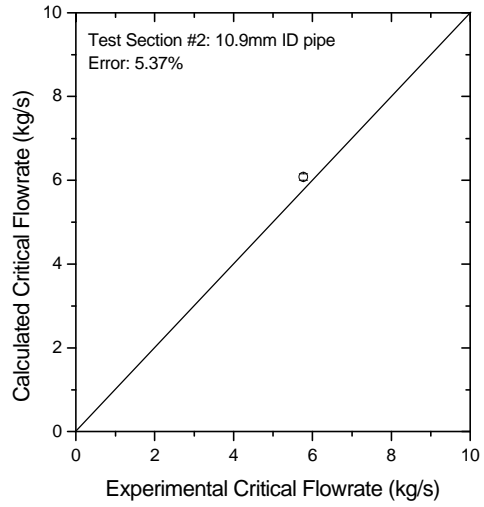
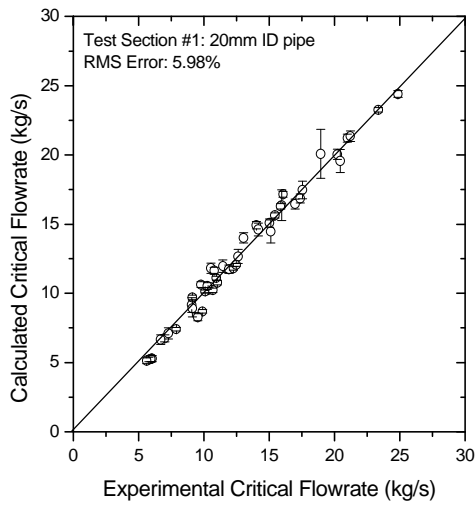


그림 2. 시험대 T1을 이용한 임계유량 실험결과와 MARS/SMR 계산결과와의 비교

그림 3. 시험대 T2를 이용한 임계유량 실험결과와 MARS/SMR 계산결과와의 비교

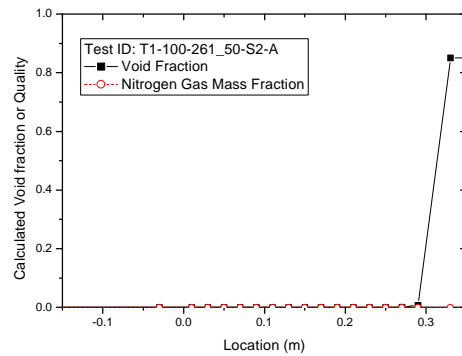
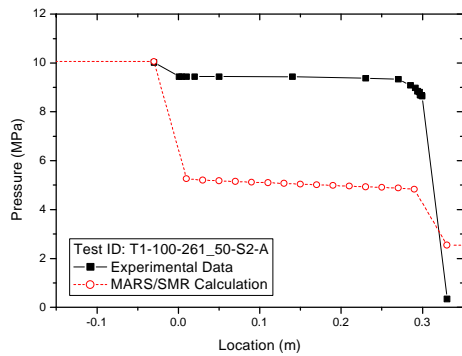


그림 4. SS-05A에 대한 시험대 내부의 압력분포의 비교

그림 5. SS-05A에 대한 시험대 내부의 기공율과 질소질량분율의 모사결과

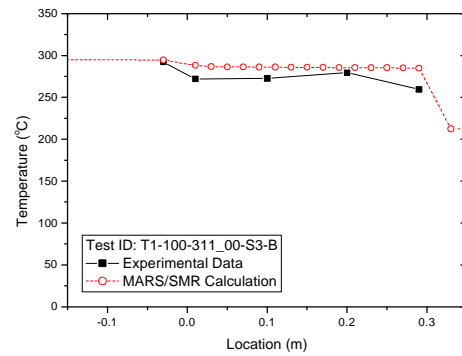
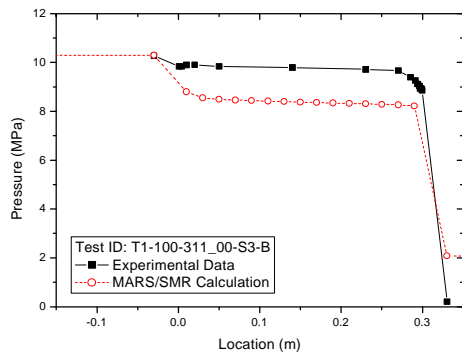


그림 6. SS-13B에 대한 시험대 내부의 압력분포의 비교

그림 7. SS-13B에 대한 시험대 내부의 온도분포의 비교

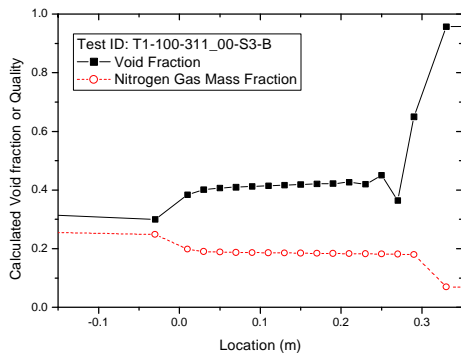


그림 8. SS-13B에 대한 시험대 내부의 기공율과 질소질량분율의 조사결과

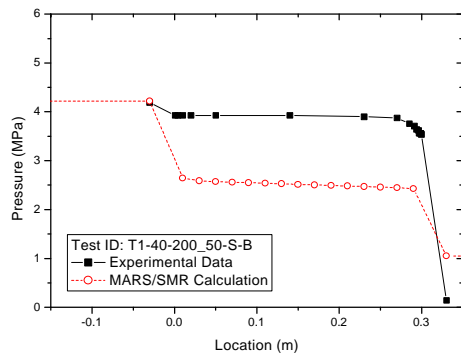


그림 9. SS-08B에 대한 시험대 내부의 압력분포의 비교

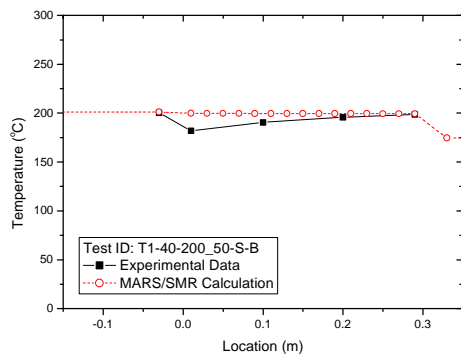


그림 10. SS-08B에 대한 시험대 내부의 온도분포의 비교

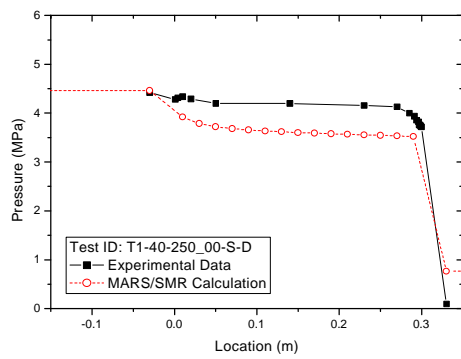


그림 11. SS-09D에 대한 시험대 내부의 압력분포의 비교

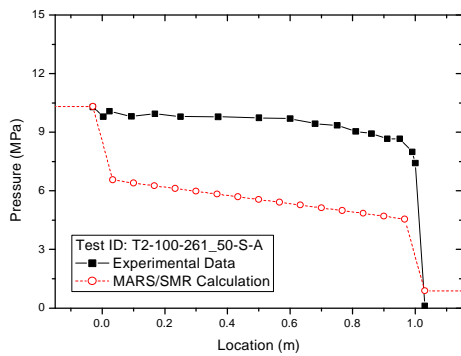


그림 12. SS-16A에 대한 시험대 내부의 압력분포의 비교

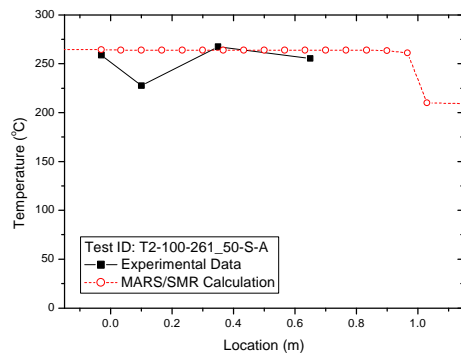


그림 13. SS-16A에 대한 시험대 내부의 온도분포의 비교

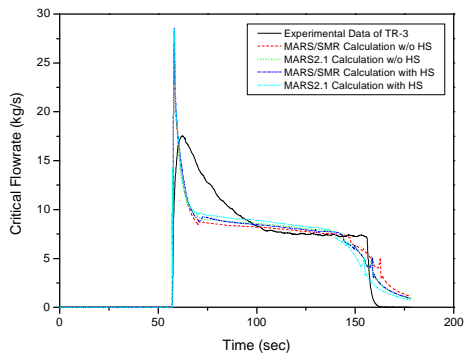


그림 15. TR-3에 대한 임계유량의 변화

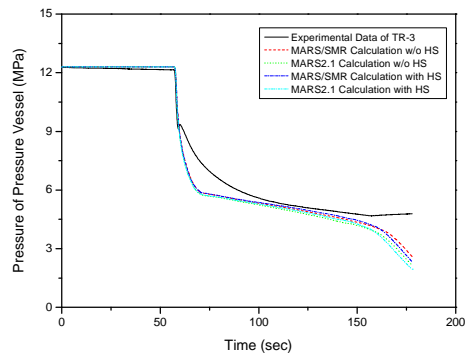


그림 16. TR-3에 대한 압력용기 내부의 압력 변화

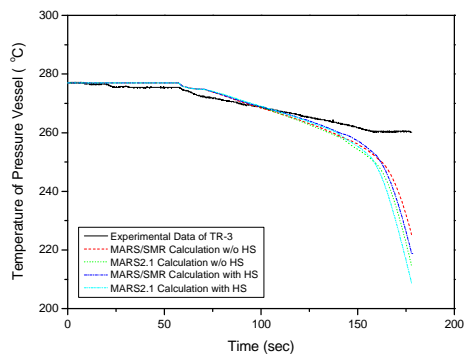


그림 17. TR-3에 대한 압력용기 내부의 온도 변화

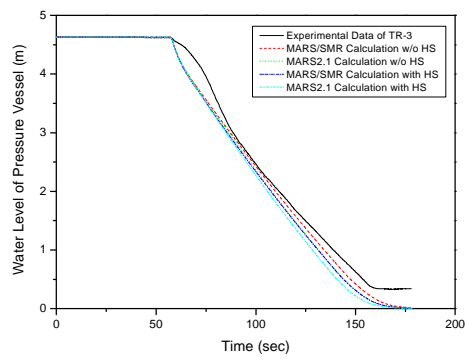


그림 18. TR-3에 대한 압력용기 내부의 수위 변화

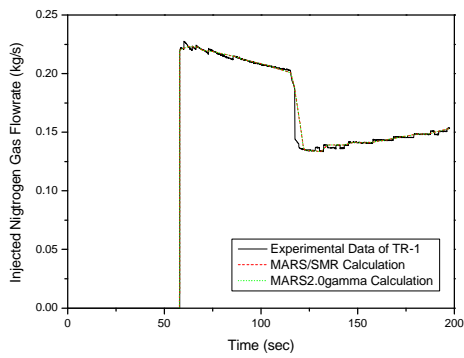


그림 19. TR-1에 대한 주입되는 질소질량유량의 변화

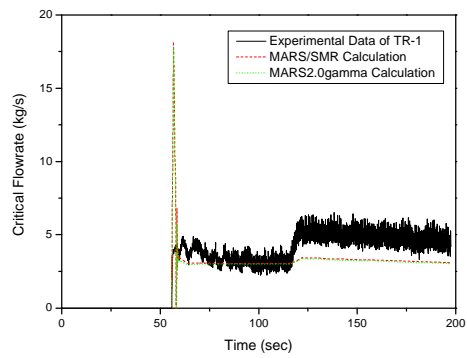


그림 20. TR-1에 대한 임계유량의 변화

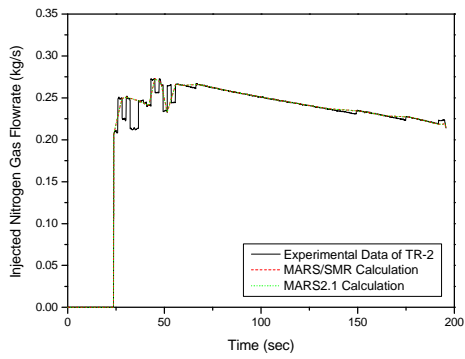


그림 21. TR-2에 대한 주입되는 질소질량유량의 변화

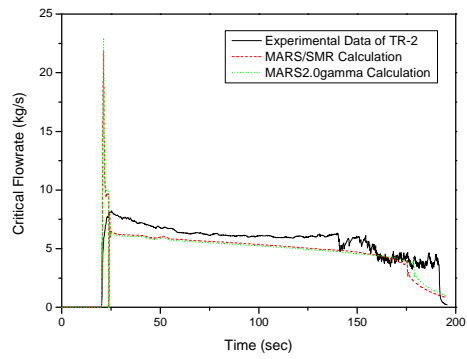


그림 22. TR-2에 대한 임계유량의 변화

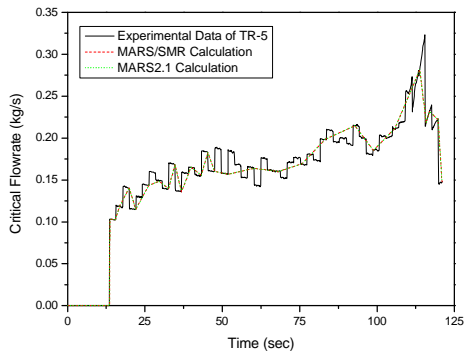


그림 23. TR-5에 대한 주입되는 질소질량유량의 변화

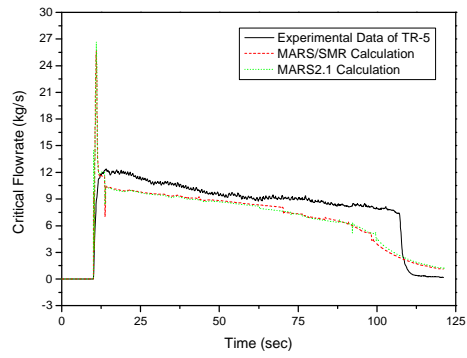


그림 24. TR-5에 대한 임계유량의 변화