

소구경관 내부에서의 고압/상온 비응축가스 이상유동 임계유량에 대한
실험적 연구

An Experimental Study of Two-Phase Critical Flow with Non-Condensable
Gas in a Small-Diameter Pipe at High Pressure and Normal Temperature

박현식, 장석규, 정장환

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

소구경관 내부에서의 비응축가스 이상유동 임계유량에 대한 실험이 고압/상온 상태에서 이루어졌다. 기존의 한국원자력연구소 임계유량 실험장치에 기포율 측정을 위한 시험대 T2GDM이 기존의 시험대 T2와 함께 사용되었다. 기포율 측정용 감마선밀도계는 방사선원, 차폐설비, 방사선 검출기, 신호처리장치 및 이송장치로 구성되었다. 감마선 밀도계에 의한 기포율의 측정결과는 임계유량이 형성된 시험대 내부에서 상당량의 기포가 발생된다는 사실을 보여준다. 두 시험대 T2와 T2GDM을 이용하여 임계유량 실험데이터가 생산되었다. 실험 결과는 가스분율의 증가에 따라 임계유량이 급격히 감소하는 현상을 보여주고 있다. MARS2.1 코드를 이용하여 위의 임계유량 실험을 모의하였다. 모의결과는 MARS2.1의 임계유량모델로 사용된 수정된 Henry-Fauske 모델이 비응축성기체가 없는 경우에는 실험결과를 잘 예측하고 있는 반면, 비응축성기체가 주입되는 이상유동 임계유량 실험에 대해서는 상당히 과대예측하고 있다는 사실을 보여준다.

Abstract

An experimental study is performed on two-phase critical flow with non-condensable gas in a small diameter pipe at high pressure and normal temperature. T2GDM, which is a test section for measuring void fraction inside, is used on KAERI non-condensable gas two-phase critical flow test facility which has the existing test section T2. The gamma densitometer for void fraction measurement is composed of a sealed gamma ray source, a shielding equipment, a radiation detector, a signal processing unit and a traversing system. The measurement results show that a lot of void is generated while passing through the test section. Experimental data of critical flow rates are generated using two test sections of T2 and T2GDM. The results show that the critical flow rates decrease rapidly with the increase of the volumetric gas fraction. The experiments are simulated with the MARS2.1 code. The simulation results show that the modified

Henry-Fauske model in the MARS2.1 code predicts well the measured critical flow rates when the non-condensable gas is not injected, while it over-predicts the flow rates when the non-condensable gas is injected.

1. 서론

일련의 비응축가스 이상유동 임계유량 실험이 한국원자력연구소에서 수행[1]되었다. 실험 대상은 설계중인 일체형 원자로 SMART에 소형 냉각재 상실사고(SB-LOCA)가 발생하여 배관 파단부를 통하여 비응축가스가 포함된 냉각재가 방출될 경우의 임계유량에 관한 것이다. 생산된 이상유동 임계유량 실험자료[2]는 비응축가스가 포함된 이상유동 임계유량 모델의 검증 및 개발에 사용[3]되며, 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 있을 것으로 예측된다.

한국원자력연구소에서 행한 비응축가스 이상유동 임계유량 실험결과[2]를 이용하여 MARS 코드에 사용된 Henry-Fauske 임계유량모델을 평가[4]하였다. 코드의 계산결과는 비응축가스가 주입되지 않을 경우에는 시험대를 완전히 통과한 후 기포가 발생하지만, 비응축가스가 주입될 경우에는 시험대 입구에서 일정 정도의 기포가 발생하는 경향을 보여주었다. 그러나 기존의 임계유량 시험에서는 시험대 내부의 기포율이 측정되지 않았다. 임계유량모델의 검증을 위해 실험으로부터 기포율이 예측될 필요가 있다는 것을 확인하였고, 소구경관에 대하여 감마선 밀도계를 이용하여 평균기포율을 측정하는 방법이 고려되었다.

Chan[5]은 단일빔 감마선 밀도계의 설계 절차를 제시하고, refilling과 rewetting 실험 및 유동 비등(flow boiling) 실험과 같은 천이상태 실험에 대해 적용하였다. 비교적 빠른 천이상태에 대해 평균 기포율을 잘 측정하였다. 또한 Jiang[6]은 소구경관 내부 이상유동에서의 기포율 측정을 위해 감마선 밀도계의 적용성을 검토하였고, Chu[7]는 감마선 밀도계를 DVI(Direct Vessel Injection) 실험에 적용하여 강수관 annulus에서 흘러내리는 증기-물 혼합물의 기포율을 측정하였다. 본 실험에 사용된 감마선 밀도계는 Chan[5]과 Jiang[6]의 설계 절차 및 교정 과정을 따라 제작되었다.

본 실험에서는 두 종류의 시험대가 사용되었다. 시험대 내부의 기포율 측정을 위한 시험대(T2GDM)와 시험대 내부의 압력 및 온도 분포를 측정하기 위한 시험대(T2)가 사용되었다. 각각의 시험대를 이용하여 임계유량이 측정되었다. 임계유량의 실험결과는 MARS2.1 코드에 의해 모의되었으며, 서로의 결과와 비교되어졌다.

2. 임계유량 실험장치

2.1 실험장치의 구성

비응축가스 이상유동 임계유량 실험장치는 크게 주순환계통, 냉각재 방출계통, 질소가스 공급계통, 질소가스 충전계통으로 구성되어 있고, 임계유량 실험장치의 개략도는 그림 1에 보이는 바와 같다.

주순환계통은 압력용기 내의 냉각재를 순환시키면서 가열 및 가압하여 실험조건에 정제 온도 및 정제 압력을 맞추고 유지하는 기능을 하며, 냉각재 방출계통은 실험조건에 도달된 냉각재를 시험대(Test Section)를 거쳐 방출시키면서 실험자료를 생산하는 기능을 한다. 또한 질소가스 공급계통은 압력용기내의 냉각재를 실험압력으로 가압하고, 비응축가스가 포함

된 임계유량 실험시 시험대의 전단에 질소가스를 주입하는 역할을 담당하며, 질소가스 충전 계통은 임계유량 실험에 필요한 질소가스를 고압으로 충전하거나 저장하는 역할을 한다.

실험기간 동안 정체조건을 유지하는 압력용기(Pressure Vessel)와 방출되는 냉각재를 수용하는 방출탱크(Discharge Tank) 사이에는 시험대 배관이 설치된다. 시험대 배관은 유량계 장착 배관, 가스주입 배관 및 시험대의 세 부분으로 이루어져 있다. 유량계 장착 배관부에는 냉각재 유량을 측정하기 위한 유량계가 설치되었으며, 가스주입 배관부에는 방출 냉각재에 질소가스를 주입 및 혼합시키기 위한 배관 부분으로 시험대 전단의 배관 벽에 설치된 여러 개의 가스 주입구를 통해 가스 주입이 가능하도록 설계되었다.

2.2 시험대 및 계측기

시험대는 파단 배관을 모의하는 배관으로 교체가 용이하도록 양단이 플랜지로 제작되었다. 실험에 사용된 시험대는 Sharp-Edged 파이프 형태로 직경이 10.9 mm이고, 길이가 1000 mm이다. 시험대 내부의 기포율 측정을 위한 시험대(T2GDM)와 시험대 내부의 압력 및 온도 분포를 측정하기 위한 시험대(T2)가 사용되었다. 시험대 T2에 대한 자세한 사항은 참고 문헌[1]에 잘 설명되어 있고, 시험대 T2GDM은 시험대 T2와 입출구 형상, 배관의 내경 및 길이가 같도록 설계되었다.

감마선 밀도계를 사용하여 시험대 내부의 기포율을 측정하기 위해서는 별도의 시험대가 필요하다. 기포율 측정용 시험대인 T2GDM의 개략도는 그림 2와 같고, 설치 개략도는 그림 3을 참고할 수 있다. 시험대 내부의 압력 및 온도 분포를 측정하기 위한 시험대 T2와 입출구의 형상이 동일하도록 동일한 치수의 배관이 사용되었다. 시험대의 길이는 1000 mm이고, 내경이 10.9 mm이고, 두께가 3.2 mm인 3/8 인치 Sch. 80 SUS-304 파이프를 사용하였다. 감마선 밀도계용 시험대의 파이프 부분은 플랜지 하중에 의해 구부러지거나, 열팽창 등으로 인해 뒤틀릴 수 있다. 이를 방지하기 위하여 시험대에는 시험대를 지지하기 위한 spring hanger와 torsion bar가 설치되었다.

기포율 측정용 시험대 T2GDM은 임계유량 실험장치의 압력용기 하단에 장착되어 실험을 수행할 때 시험대에서 발생하는 열수력적 거동의 변수인 기포율을 신뢰할 수 있는 측정값으로 얻어질 수 있도록 요구조건에 맞게 제작되었다. 시험대의 설계조건은 임계유량실험장치의 압력용기 설계조건인 압력 17.2 MPa, 온도 353 °C로 하며 재질은 부식을 방지할 수 있는 스테인레스 스틸로 제작되었다. 시험대에는 실험중 방출유체의 기포율을 적정 위치에서 측정할 수 있고, 적절한 설치공간을 확보할 수 있도록 제작되었다. 시험대 장치의 구성은 시험대 방출배관 양단에 기존 실험장치 배관과 호환되는 플랜지를 용접부착하며 시험대 입구까지는 기존 실험장치 배관과 같은 4인치 Sch. 160 SUS 파이프를 사용하였다. 시험대가 너무 가늘어 고온고압에 따른 변형을 견디기 어려우므로 시험대 자체는 하중을 받지 않도록 양단 플랜지를 이용하여 지지대(Spring hanger, Tension bar 등)를 설치하였으며, 실험기간 동안 변형이 없도록 설계되었다. 또한 시험대의 설치 및 관련 지지대 설치에 있어 기포율 측정을 위한 기포율 측정장치의 설치 및 작동, 이동에 문제가 없도록 제작/설치되었다.

실험장치에서 사용된 계측기의 사양은 표 1과 같다. 압력용기의 온도와 압력이 측정되어졌으며, 시험대의 전단에서 압력용기에서 방출되는 임계유량이 측정되어진다. 또한 가스주입 배관부를 통해 주입되는 질소가스의 온도 및 유량이 측정되어졌다. 시험대 T2에서는 시험대 내부의 압력 및 온도 분포가 측정되어졌으며, 시험대 T2GDM을 통해서도 시험대 내부의 기포분율이 측정되었다.

2.3 감마선 밀도계

감마선밀도계[8]는 방사선원, 차폐설비, 방사선 검출기, 신호처리장치 및 이송장치로 구성되었다. 방사선원은 30 mCi의 방사능을 가지는 Co-60이고, 차폐 계산 결과를 반영하여 반경 15cm, 높이 30cm의 납으로 제작된 원통형 용기에 밀봉된다. 밀봉선원과 검출기의 사용 중에 감마선 밀도계를 사용하는 사람과 인근의 일반인이 관련 법령에서 정한 피폭량 이상을 받지 않도록 하기 위해 적절한 차폐계산이 이루어졌다. 선원은 적절한 두께의 납으로 밀봉되었으며, 방사선 검출기의 측면과 후방 역시 납으로 밀봉되었다.

방사선 검출기는 직경 3 인치, 길이가 3 인치인 원통형 NaI(Tl) 섬광체(Scintillator)와 광증배관(PMT, Photo-Multiplier Tube)의 일체형으로 차폐계산을 통해 적절한 차폐가 이루어졌다. 신호처리장치는 High Voltage Power Supply, Preamplifier, Amplifier/TSCA, Timer/Counter 및 Minibin으로 구성되었다. 이송장치는 방사선 검출기가 밀봉선원 용기로부터 발생하는 감마선을 적절히 측정할 수 있도록 설계/제작되었으며, 밀봉선원 용기와 방사선 검출기를 전후로 이동시킬 수 있고, 감마선 밀도계 전체를 상하로 이동시킬 수 있다.

감마선 밀도계의 주요 설계 변수는 시험대의 내경과 두께, 작동유체의 물성치 및 최대 허용 오차이다. 주어진 시험대 내부의 기포율이 0.1 ~ 0.8의 범위에서 변할 때, 5 % 이내의 허용오차를 가지도록 감마선 밀도계가 설계되었다. 설치된 감마선 밀도계의 사진은 그림 3과 같고, 감마선밀도계의 개략도는 그림 4와 같다.

3. 임계유량 실험결과

3.1 시험대 T2GDM을 이용한 고압 상온 실험

시험대 T2GDM을 이용한 실험이 수행되었으며, 임계유량과 기포분율에 대한 실험데이터를 획득하였다. 압력용기 내부의 정체온도가 상온인 조건에서 정체압력이 40 bar인 경우와 70 bar인 경우에 대하여 실험이 수행되었다. 각각의 경우에서 초기에는 질소가스의 주입이 없이 압력용기 내부의 냉각재가 방출되는 단상 임계유량 실험이 수행되었으며, 차후에 질소가스가 일정량만큼 주입되는 실험이 수행되었다. 시험대 T2GDM를 이용한 실험은 총 10회 수행되었으며, 임계유량 실험결과는 표 2와 같이 정리되었다.

감마선 밀도계를 이용하여 시험대의 중간 위치에서 가스분율이 측정되었다. 표 3은 감마선밀도계를 이용하여 측정된 각 실험조건에서의 계수 및 계수율을 보여준다. 가스분율이 변함에 따라 계수율이 변화하는 것을 보여주고, 계수율의 변화를 이용하여 계산된 기포율의 결과는 표 4에 나타나 있다.

표 4에서 감마선밀도계를 이용한 기포율 측정결과와 통계 오차, ϵ_a 는 식 (1)을 이용하여 계산되어진다.

$$\epsilon_a = \frac{1}{S\sqrt{N_a}} \quad (1)$$

여기서 N_a 는 해당 기포율에서의 전체 계수(Count)이고, S는 민감도(Sensitivity)로써 식 (2)와 같이 정의된다.

$$S = \frac{N_1 - N_0}{(N_1 + N_0)/2} \quad (2)$$

여기서 N_1 은 기공율이 1.0인 경우의 계수이고, N_0 은 기공율이 0.0인 경우의 계수이다.

본 연구에서 사용된 감마선 밀도계의 민감도는 약 0.05이다. 통계 오차는 민감도가 클수록 줄어들고, 또한 전체 계수의 증가에 따라 제공근에 비례하여 줄어든다. 감마선 밀도계를 이용한 가스분율은 10 % 이내의 통계 오차를 가지며 측정되었으며, 입구로부터 0.5 m인 지점에서 측정되었다. 식 (1)에 나타난 바와 같이 측정시간을 길게 하여 전체 계수를 늘림으로써 통계오차를 줄일 수 있다.

압력용기 상단 기체의 압력에 의해 압력용기로부터 물이 임계유속으로 방출된다. 압력용기로부터 방출된 물은 시험대 전단 0.8 m 지점에서 주입된 질소가스와 혼합되어 시험대 입구로 유입된다. 길이가 1.0 m인 시험대를 통과한 혼합유체는 방출탱크로 방출된다. 그림 5는 T2GDM-70-C 시험에 대하여 임계유량 실험장치 내부 기포율의 분포를 보여준다. 실험을 통해 시험대 전단에서의 기포율과 시험대 중간에서의 기포율이 측정되었다. 시험대 전단에서의 기포율은 기체와 액체에 대해 각각 측정된 유량을 이용해 예측되었으며, 시험대 내부의 기포율은 감마선 밀도계를 이용하여 측정되었다. 시험대 내부에서의 기포율은 시험대 전단에서의 기포율에 비해 훨씬 큰 값을 보이고 있는데, 이 사실로부터 시험대를 통과하면서 상당량의 기포가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 경향을 확인하기 위하여 코드에 의한 계산이 이루어졌다. MARS 코드에 의한 계산 결과는 시험대 출구에서 기포율이 급격히 증가하는 현상을 보인다. 감마선 밀도계에 의해 측정된 기포율은 코드의 마지막 노드에서의 기포율과 유사한 결과를 보인다. 시험대 출구에서 발생한 기포가 실제로는 시험대 중반까지 분포되어 있는 것으로 예측된다. 그림 6은 감마선 밀도계에 의해 측정된 기포율과 MARS 코드에 의해 예측된 시험대 출구에서의 기포율의 비교 결과를 보여주고 있다. 비교 결과는 정체압력이 40 bar와 70 bar인 경우에 각각 9.2 %와 9.4 %의 표준편차를 가지면서 비교적 잘 일치되고 있는 것을 보여준다.

3.2 시험대 T2를 이용한 고압 상온 실험

시험대 T2를 이용한 실험이 수행되었으며, 임계유량과 시험대 내부의 압력 및 온도 분포에 대한 실험데이터를 획득하였다. 압력용기 내부의 정체온도가 상온인 조건에서 정체압력이 40 bar인 경우와 70 bar인 경우에 대하여 실험이 수행되었다. 각각의 경우에서 초기에는 질소가스의 주입이 없이 압력용기 내부의 냉각재가 방출되는 단상 임계유량 실험이 수행되었으며, 차후에 질소가스가 일정량만큼 주입되는 실험이 수행되었다. 시험대 T2를 이용한 실험은 총 10회 수행되었으며, 임계유량 실험결과는 표 5와 같다.

시험대 T2를 이용하여 수행된 실험 T2-40-C는 시험대 T2GDM을 이용한 실험 T2GDM-40-B 및 T2GDM-40-D와 유사한 조건에서 수행되었으며, 시험대 T2를 이용하여 수행된 실험 T2-70-B는 시험대 T2GDM을 이용한 실험 T2GDM-70-B와 유사한 조건에서 수행되었다. T2 시험대 내부의 압력 및 온도 분포는 그림 7과 8에 나타난 바와 같으며, T2GDM 시험대 내부의 압력 및 온도 분포와 유사할 것으로 예측된다. 그림 7에서 보이듯이 시험대 내부의 압력강하는 대부분이 시험대의 출구에서 이루어지고 있으며, 정체압력이 40 bar인 경우와 70 bar인 경우 모두 경향은 비슷하다. 그림 8에서 보이듯이 시험대 내부의 온도변화는 미약하여 상온을 유지한다.

시험대 T2GDM과 T2를 이용한 임계유량 실험결과는 비응축성기체가 주입될 때 임계유량이 급격히 감소하는 경향을 보여준다. 두 시험대를 이용하여 수행된 모든 임계유량 실험결과에서 얻어진 가스분율의 변화에 따른 임계유량의 변화는 그림 9와 그림 10에 나타나 있다. 그림 9는 정체압력이 40 bar에서의 비교결과로써 가스분율의 변화에 따라 임계유량이

급격히 감소하는 현상을 잘 보여주고 있다. 실험결과는 임계유량이 시험대 T2와 T2GDM에 대해 같은 결과를 보여주는 것을 보여준다. 그림 10은 정체압력이 70 bar에서의 비교결과로써 40 bar에서와 같은 결과를 보여준다. 위의 결과는 가스분율이 임계유량의 예측에 주요한 변수임을 보여준다.

4. MARS2.1을 이용한 실험 모의

4.1 상온 고압 이상유동 임계유량 실험

시험대 T2와 T2GDM을 이용하여 각각 10개의 실험 데이터가 획득되어졌다. 상온에서 정체 압력이 4, 7 MPa이고, 비응축가스의 주입유량이 0.0 ~ 0.1051 kg/s인 범위에서 실험이 이루어졌다.

초기에 압력용기 내부의 압력, 온도 및 수위를 결정 한 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 T2GDM을 사용한 10개의 정상상태 실험결과가 MARS2.1 코드[9]에 의해 모사되었다.

4.2 T2GDM을 이용한 임계유량 실험에 대한 MARS 모델

압력용기의 온도와 압력, 비응축가스의 주입량, 온도와 압력 및 출구의 온도와 압력은 경계조건으로 주어졌다. 압력용기와 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. 정상상태 이상유동 임계유량 실험장치의 모사를 위한 MARS 모델은 참고문헌[4]에 나타나 있다.

4.3 MARS2.1의 계산결과

비응축성기체가 존재할 경우의 MARS 코드의 임계유량 모사능력을 평가하기 위하여 시험대 T2GDM에 대하여 실험결과와 코드의 계산결과가 비교되었다. 그림 11은 시험대 T2GDM을 이용한 임계유량 실험에 대하여 실험결과와 MARS2.1의 계산결과를 비교한다. MARS2.1 코드의 임계유량 모델은 비응축성기체가 없는 경우에는 실험결과를 4.0 % 오차 이내에서 잘 예측하고 있는 반면, 비응축성기체가 주입되는 이상유동 임계유량 실험에 대해서는 평균적으로 23.9 % 만큼 과대예측하고 있다.

위의 예측결과로부터 MARS2.1에 사용된 수정된 Henry-Fauske 모델이 소구경관 내부에서 비응축성기체가 주입되는 이상유동 임계유량 실험결과를 과대예측하고 있는 것을 알 수 있다. 위의 결과는 내경이 20 mm인 경우의 임계유량 실험에 대한 모사결과[4]와 차이를 보이고 있으며, 이는 소구경인 10.9 mm에 대하여 수정된 Henry-Fauske 모델의 예측 능력이 부족하다는 것을 보여준다.

5. Conclusion

소구경관 내부에서의 고압 상온 비응축가스 이상유동 임계유량에 대한 실험적 연구가 수행되었다. 위의 연구로부터 도출된 결론은 다음과 같이 요약된다.

- 기존의 비응축가스 이상유동 임계유량 실험장치에 시험대 내부의 기포율을 측정하기 위한 용도의 시험대(T2GDM)가 별도로 설치되었다. 시험대는 길이가 1000 mm이고, 내경이 10.9 mm이고, 두께가 3.2 mm인 스테인리스 스틸 파이프이다.
- 방사선원, 차폐설비, 방사선 검출기, 신호처리장치 및 이송장치로 구성된 감마선밀도계가 설치되었다. 이 감마선밀도계는 시험대 T2GDM 내부의 기포율이 0.1 ~ 0.8의 범위에서 변할 때, 5 % 이내의 허용오차를 가지도록 설계되었다.
- 감마선 밀도계에 의한 기포율의 측정결과는 시험대를 통과하면서 상당량의 기포가 발생된다는 사실을 보여준다. 또한 코드에 의한 계산결과는 시험대 출구에서 기포가 급격히 발생하는 것으로 계산하고 있으나, 실제로는 출구에서 생성된 기포가 시험대 중반까지 분포되어 있는 것으로 예측된다.
- 두 시험대 T2와 T2GDM을 이용하여 수행된 임계유량 실험결과로부터 가스분율의 증가에 따라 임계유량이 급격히 감소하는 현상을 보여주고 있다. 이는 가스분율이 임계유량의 예측에 주요한 변수임을 보여준다.
- 임계유량실험에 대한 MARS2.1의 모사결과는 MARS2.1의 임계유량모델로 사용된 수정된 Henry-Fauske 모델이 비응축성기체가 없는 경우에는 실험결과를 잘 예측하고 있는 반면, 비응축성기체가 주입되는 이상유동 임계유량 실험에 대해서는 상당히 과대예측하고 있다.

참고 문헌

- [1] 장석규, 박현식, 정장환 외, “직각입구형상을 갖는 짧은 관에서의 비응축가스를 포함한 이상유동 임계유량 실험,” 한국원자력학회 춘계학술발표회, 2002.
- [2] 장석규, 박현식, 정장환 외, “비응축가스 이상유동 임계유량 실험결과 분석,” KAERI/TR-2242/2002, 한국원자력연구소, 2002.
- [3] 김수형, 임홍식, 김희철, “비응축가스 이상 임계유동 모델 개발 및 평가,” 한국원자력학회 춘계학술발표회, 2002.
- [4] 박현식, 장석규, 정장환, “비응축가스 이상유동 임계유량 실험결과를 이용한 MARS 임계유량모델의 평가,” 한국원자력학회 춘계학술발표회, 2002.
- [5] A. M. C. Chan and S. Banerjee, “Design Aspects of Gamma Densitometers for Void Fraction Measurements in Small Scale Two-Phase Flows,” Nuclear Instruments and Methods, Vol. 190, pp. 135-148, 1981.
- [6] Y. Jiang and K. S. Rezakallah, “An Experimental Study of the Suitability of Using a Gamma Densitometer for Void Fraction Measurements in Gas-Liquid Flow in a Small Diameter Tube,” Meas. Sci. Technol., Vol. 4, pp. 496-505, 1993.
- [7] 주인철 외, “DVI 실험장치 강수관내 기포율 측정을 위한 감마선 밀도계의 적용,” KAERI/TR-1671/2000, 한국원자력연구소, 2000.
- [8] H. S. Park, et al., “Void Fraction Measurements in a Small Diameter Stainless Steel Pipe in Critical Flow Conditions using a Single-Beam Gamma Densitometer,” PBNC 2002, Shenzhen, China, 2002.
- [9] 이원재 외, “MARS 2.1 코드 Description,” to be published.

표 1. 임계유량 실험장치의 계측기 사양

Location	Tag Name	Variable	Model	Calibration Range	Error	Remarks
Pressure Vessel	PT102	Press.	Rosemount 3051PG5	0~120 bar	±0.05%	
	TE113	Temp.	Watlow, K-type, Unground, Special	0~400 °C	±0.4%	
Connecting Line	FT301	Flow	Probar, PBR+26S	0~42 kg/s	±0.5%	Calibrated at 120bar, 320°C
Gas Injection Line	FT202	Flow	Hoffer, HO1X1-30-B-1(RPR51S)-F25CS-CE HIT-2-5-C-4-CE-F	0.012~0.67 kg/s	±2%	Calibrated at 175bar, 87.5°C
	TG1	Temp.	Watlow, K-type, Unground, Special	0~400 °C	±0.4%	
Test Section	P0	Press.	Rosemount 3051CG5	0~138 bar	±0.05%	installed at T2
	P1-P16	Press.	Rosemount 3051CD4	0~20.7 bar	±0.05%	
	PL	Press.	Rosemount 3051CG4	0~20.7 bar	±0.05%	
	T0-T4	Temp.	Watlow, K-type, Unground, Special	0~400 °C	±0.4%	
	GDM	Void fraction	Single-Beam Gamma-Densitometer	0.0 - 1.0	NA	installed at T2GDM

표 2. 시험대 T2GDM을 이용한 임계유량 실험결과

Test ID	Duration (sec)	# of data	Var. Val.	PT_102 (MPa)	TE_113 (℃)	TG1 (℃)	FT_301 (kg/s)	FT_202 (kg/s)	FT_crit (kg/s)	Void Fraction
T2GDM -40-A	54.3	544	Avg.	3.796	20.42	20.92	4.987	0.0000	4.987	0.0000
			Std.	0.034	0.07	0.16	0.096	0.0000	0.096	0.0000
T2GDM -40-B	19.2	193	Avg.	3.769	20.41	21.39	2.993	0.0469	3.040	0.2469
			Std.	0.023	0.11	0.10	0.075	0.0012	0.075	0.0073
T2GDM -40-C	36.1	362	Avg.	3.803	20.42	20.61	2.167	0.1001	2.267	0.4111
			Std.	0.020	0.11	0.16	0.054	0.0004	0.054	0.0060
T2GDM -40-D	10.1	102	Avg.	3.842	20.27	20.78	3.117	0.0469	3.164	0.2366
			Std.	0.019	0.14	0.09	0.044	0.0002	0.044	0.0026
T2GDM -40-E	12.6	127	Avg.	3.860	20.37	20.55	2.268	0.0951	2.363	0.3949
			Std.	0.017	0.14	0.13	0.047	0.0020	0.047	0.0088
T2GDM -70-A	63.1	632	Avg.	6.805	21.05	21.51	6.578	0.0000	6.578	0.0000
			Std.	0.080	0.15	0.13	0.170	0.0000	0.170	0.0000
T2GDM -70-B	17.1	172	Avg.	6.841	21.02	21.98	4.991	0.0540	5.045	0.1174
			Std.	0.047	0.14	0.15	0.125	0.0002	0.125	0.0026
T2GDM -70-C	35.1	352	Avg.	6.867	21.06	21.58	4.023	0.1051	4.128	0.2179
			Std.	0.036	0.15	0.11	0.083	0.0034	0.083	0.0066
T2GDM -70-D	21.1	212	Avg.	6.882	21.15	21.22	6.527	0.0000	6.527	0.0000
			Std.	0.015	0.14	0.15	0.195	0.0000	0.195	0.0000
T2GDM -70-E	20.1	201	Avg.	7.161	21.20	21.43	6.830	0.0000	6.830	0.0000
			Std.	0.100	0.13	0.16	0.128	0.0000	0.128	0.0000

표 3. 감마선밀도계를 이용한 계수율 측정결과

정체 압력 (bar)	Test ID	계수 (전체)	계수 (헛수)	계수율 (#/0.4 sec)	계수율 (표준편차)
40	T2GDM-40-A ($\alpha = 0.0$)	166112	112	1483.1	55.45
	T2GDM-40-B	56229	37	1519.7	49.71
	T2GDM-40-C	113757	74	1537.3	55.51
	T2GDM-40-D	39561	26	1521.6	56.59
	T2GDM-40-E	39894	26	1534.4	67.52
	T2GDM-40-F ($\alpha = 1.0$)	266770	171	1560.1	49.42
70	T2GDM-70-A ($\alpha = 0.0$)	198756	134	1483.3	61.79
	T2GDM-70-B	51167	34	1504.9	68.82
	T2GDM-70-C	103401	68	1520.6	57.31
	T2GDM-70-F ($\alpha = 1.0$)	752163	482	1560.5	57.46

표 4. 감마선밀도계를 이용한 기포율 측정결과

Test ID	유량계를 이용한 기포율 계산결과 (시험대 입구)	감마선밀도계를 이용한 기포율 측정결과 ($x = 0.5 \text{ m}$)	
		평균	통계 오차 (%)
T2GDM-40-A ($\alpha = 0.0$)	0.0000	0.0000	4.85
T2GDM-40-B	0.2469	0.4753	8.34
T2GDM-40-C	0.4111	0.7035	5.87
T2GDM-40-D	0.2366	0.4997	9.95
T2GDM-40-E	0.3949	0.6662	9.90
T2GDM-40-F ($\alpha = 1.0$)	1.0000	1.0000	3.83
T2GDM-70-A ($\alpha = 0.0$)	0.0000	0.0000	4.42
T2GDM-70-B	0.1174	0.2804	8.71
T2GDM-70-C	0.2179	0.4835	6.13
T2GDM-70-F ($\alpha = 1.0$)	1.0000	1.0000	2.27

표 5. 시험대 T2를 이용한 임계유량 실험결과

Test ID	Duration (sec)	# of data	Var. Val.	PT_102 (MPa)	TE_113 (°C)	TG1 (°C)	FT_301 (kg/s)	FT_202 (kg/s)	FT_crit (kg/s)	Void Fraction
T2-40 -A	22.5	226	Avg.	3.747	19.90	28.55	4.991	0.0000	4.991	0.0000
			Std.	0.048	0.10	0.15	0.034	0.0000	0.034	0.0000
T2-40 -B	20.5	206	Avg.	4.188	20.45	22.84	5.253	0.0000	5.253	0.0000
			Std.	0.100	0.08	0.52	0.189	0.0000	0.189	0.0000
T2-40 -C	7.7	78	Avg.	4.109	20.45	25.51	3.171	0.0508	3.222	0.2337
			Std.	0.026	0.07	0.22	0.024	0.0004	0.024	0.0013
T2-40 -D	18.7	188	Avg.	4.111	20.46	25.95	4.004	0.0163	4.021	0.0788
			Std.	0.023	0.09	0.16	0.121	0.0029	0.121	0.0139
T2-40 -E	25.8	259	Avg.	4.132	20.69	26.08	2.351	0.0930	2.444	0.3818
			Std.	0.022	0.26	0.15	0.038	0.0006	0.038	0.0038
T2-70 -A	44.3	444	Avg.	6.981	18.88	21.22	6.665	0.0000	6.665	0.0000
			Std.	0.073	0.09	0.36	0.176	0.0000	0.176	0.0000
T2-70 -B	17.1	172	Avg.	7.009	18.98	26.11	4.934	0.0572	4.991	0.1231
			Std.	0.043	0.15	0.31	0.111	0.0024	0.111	0.0061
T2-70 -C	35.7	358	Avg.	7.020	19.18	27.32	4.326	0.0839	4.410	0.1805
			Std.	0.036	0.09	0.18	0.097	0.0068	0.097	0.0124
T2-70 -D	35.5	356	Avg.	7.010	19.88	27.19	6.725	0.0000	6.725	0.0000
			Std.	0.007	0.15	0.15	0.095	0.0000	0.095	0.0000
T2-70 -E	13.2	133	Avg.	6.677	20.31	27.39	3.855	0.0732	3.928	0.1862
			Std.	0.089	0.31	0.11	0.049	0.0020	0.049	0.0047

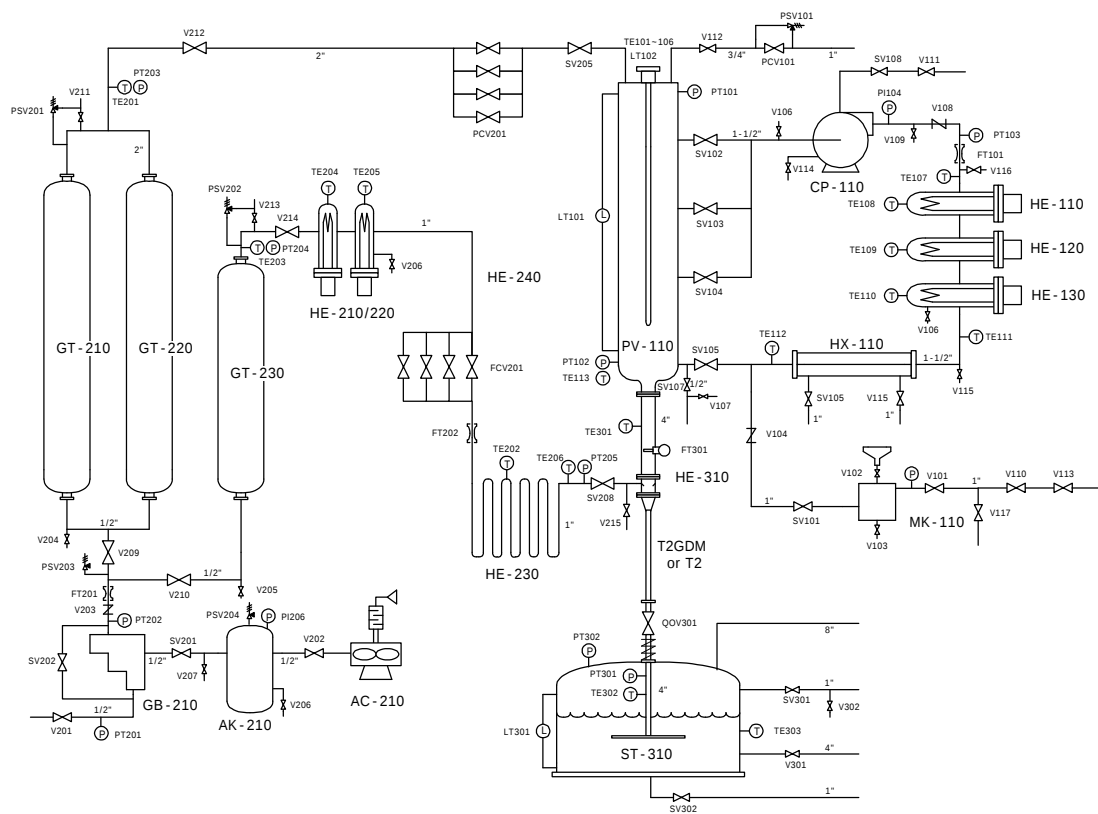


그림 1. 비응축가스 이상유동 임계유량 실험장치의 개략도

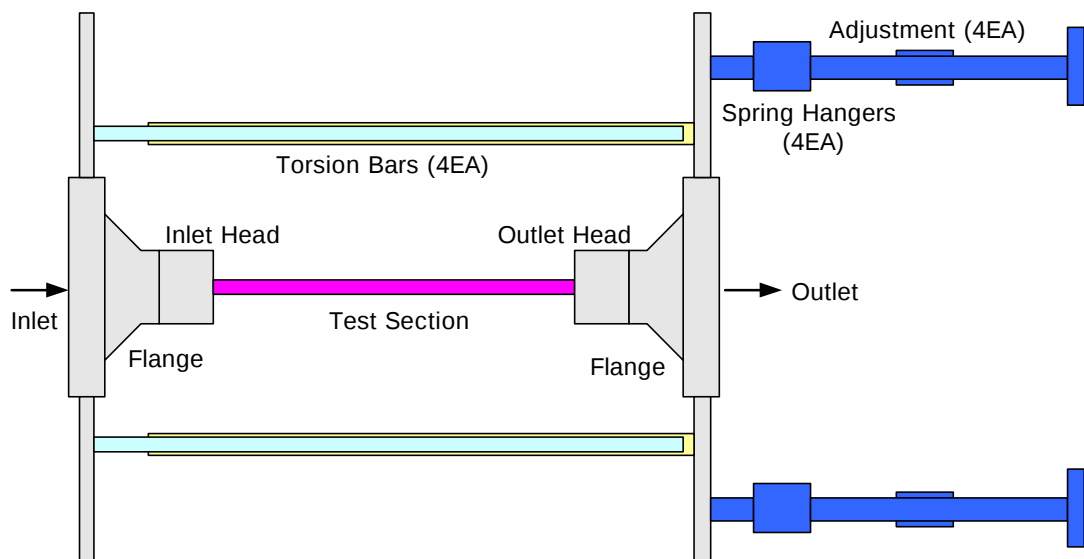


그림 2. 기포율 측정용 시험대의 개략도



그림 3. 임계유량실험장치에 사용된 기포율 측정용 감마선 밀도계

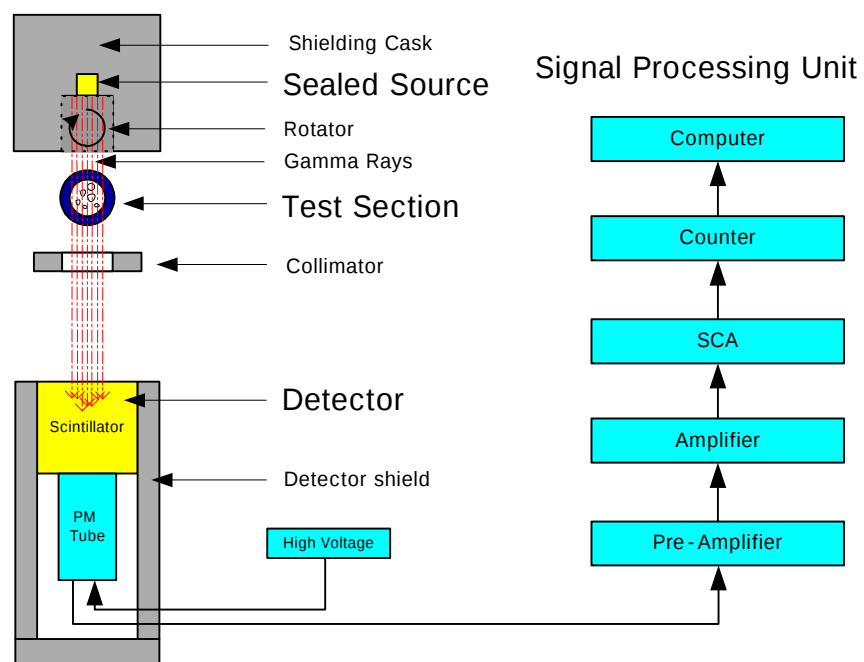


그림 4. 감마선 밀도계의 개략도

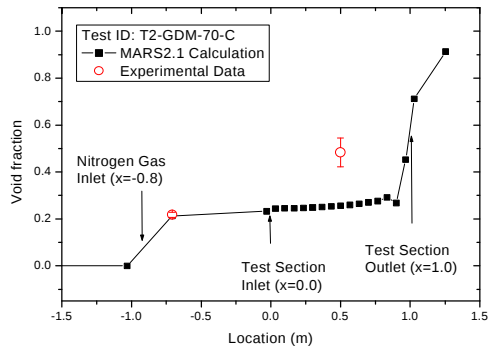


그림 5. 임계유량 실험장치 내부에서의 기포율의 분포 (T2GDM-70-C)

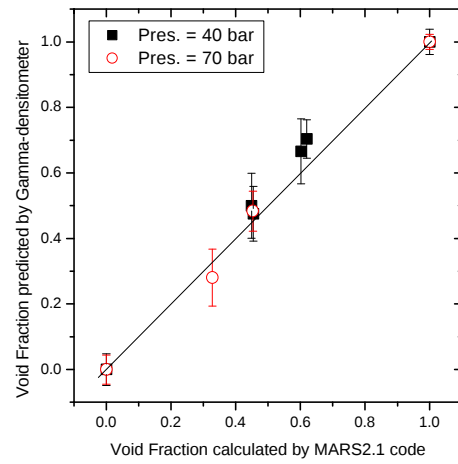


그림 6. 감마선 밀도계에 의해 측정된 기포율과 MARS 코드에 의해 예측된 시험대 출구에서의 기포율의 비교결과

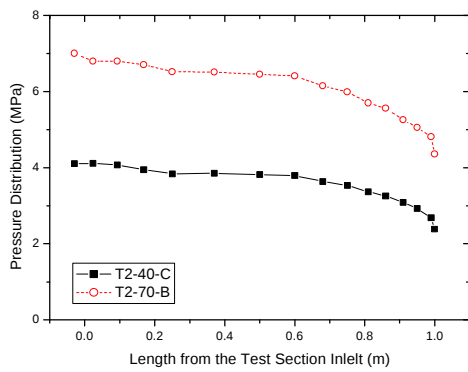


그림 7. 시험대 T2 내부의 전형적인 압력분포

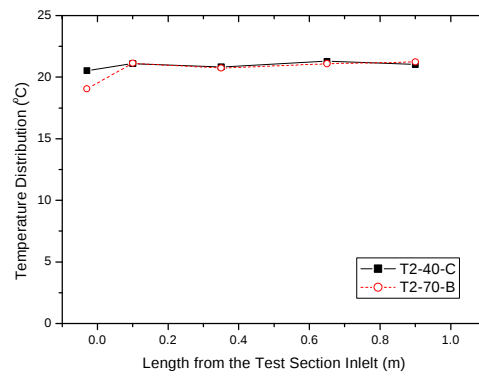


그림 8. 시험대 T2 내부의 전형적인 온도분포

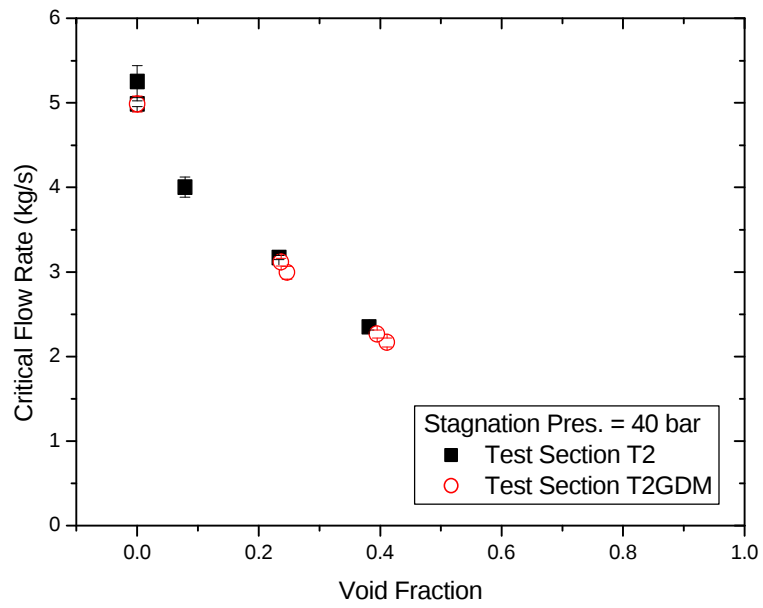


그림 9. 정체압력 40 bar에서 기포분율의 변화에 따른 임계유량의 변화

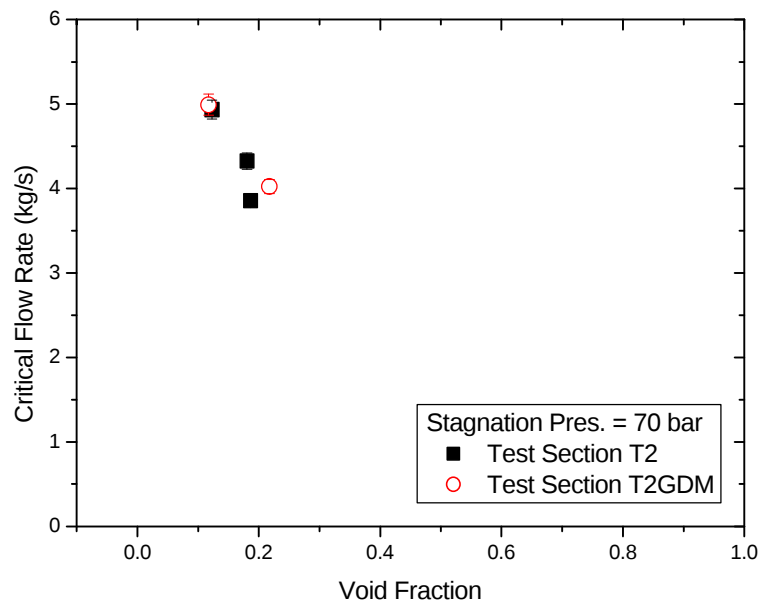


그림 10. 정체압력 70 bar에서 기포분율의 변화에 따른 임계유량의 변화

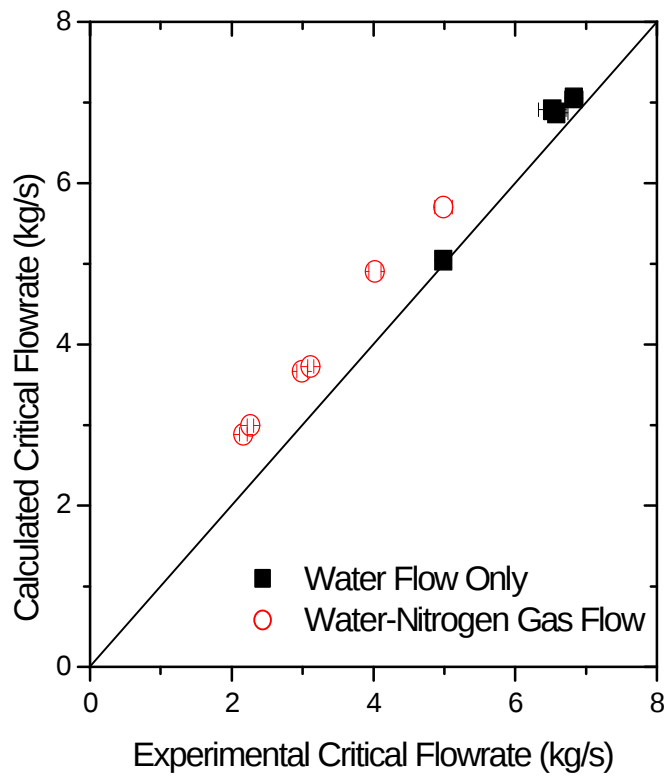


그림 11. 시험대 T2GDM을 이용한 임계유량 실험결과와 MARS2.1 계산결과의 비교