

고압 조건에서 비응축가스를 포함한 이상유동 임계유량에 대한  
실험적 연구

An Experimental Study of Two-Phase Critical Flow with Non-Condensable  
Gas at High Pressure Conditions

최남현, 박현식, 정장환, 이성재, 정문기

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

고압 조건에서 비응축가스를 포함한 이상유동 임계유량에 대한 실험이 수행되었다. 기존의 한국원자력연구소 비응축가스 이상유동 임계유량 실험장치에 각각 시험대 내부의 기포율 및 압력과 온도 분포를 측정하기 위한 두 시험대 T2GDM과 T2가 부착되었다. T2GDM과 T2는 모두 내경이 10.9 mm인 소구경 파이프로서, 두 시험대를 이용하여 임계유량 실험 데이터가 생산되었다. 실험결과는 임계질량유속이 비응축가스 분율의 증가에 따라 급격히 감소한다는 것을 보여주고 있다. 또한 임계질량유속은 정체 압력의 증가와 정체 온도의 감소에 따라 증가한다. 임계유량 실험데이터로부터 비응축가스 분율의 지수함수로 표현되는 무차원 임계질량유속에 대한 실험상관식이 얻어졌다.

Abstract

An experimental study was performed on two-phase critical flow with non-condensable gas at high pressure conditions. Two test section pipes, T2 and T2GDM, are used on KAERI non-condensable gas two-phase critical flow test facility to measure pressure and temperature distributions and void fraction inside, respectively. Experimental data of critical flow rates are generated using the test sections of T2 and T2GDM, which are small-diameter pipes with an inner diameter of 10.9 mm. The experimental results show that the critical mass flux decreases rapidly with the increase of the volumetric non-condensable gas fraction. Also the critical mass flux increases with the increase of the stagnation pressure and the decrease of the stagnation temperature. An empirical correlation of non-dimensional critical mass flux, which is expressed as an exponential function of non-condensable gas fraction of the volumetric flow, is obtained from the experimental data.

1. 서론

일련의 비응축가스를 포함한 이상유동 임계유량 실험이 한국원자력연구소에서 수행되었다. 실험대상은 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 실험자료는 기존의 실험자료[1, 2]와 함께 비응축가스가 포함된 이상유동 임계유량 모델의 검증 및 개발에 사용된다. 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.

두 종류의 비응축가스를 포함한 이상유동 임계유량 실험이 수행되었다. 먼저 직각입구형상을 갖는 짧은 관(내경 20 mm, 길이 300 mm)에서 정체 압력이 4, 7, 10 MPa, 입구 과냉도가 0, 20, 50 °C인 조건에서 여러 질소가스 유량에 대해 실험이 수행되었다.[1] 또한 내경이 10.9 mm인 소구경관(길이 1000 mm)에서 정체압력이 4, 7 MPa인 상온 조건에서 여러 질소가스 유량에 대한 실험 데이터가 획득되었다.[2]

본 연구에서는 기존의 실험에서 부족했던 소구경관에서의 상온 조건, 과냉 조건, 및 포화 조건에서의 비응축가스 이상유동 임계유량 실험을 수행하였다. 실험은 두 종류의 시험대를 이용하여 이루어졌다. 시험대 내부의 기포율 측정이 가능한 시험대(T2GDM)와 시험대 내부의 압력 및 온도 분포 측정이 가능한 시험대(T2)가 사용되었다. 정체 압력 및 정체 온도 등의 실험 조건은 내경이 20 mm인 T1 시험대의 실험 조건과 일치시켰다.

## 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 정체 온도 및 정체 압력을 맞추고 유지하는 기능을 하며, 냉각재 방출계통은 실험조건에 도달된 냉각재를 시험대(T2GDM 또는 T2)를 거쳐 방출시키면서 실험데이터를 생산하는 기능을 한다. 또한 질소가스 공급계통은 압력용기내의 냉각재를 실험 조건의 압력으로 가압하고, 비응축가스가 포함된 임계유량 실험시 시험대의 전단에 질소가스를 주입하는 역할을 담당하며, 질소가스 충전계통은 임계유량 실험에 필요한 질소가스를 고압으로 충전하거나 저장하는 역할을 한다.

실험기간 동안 정체 조건을 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 배관부는 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

비응축가스 이상유동 임계유량 실험의 실험 조건은 압력용기 및 시험대 내부의 온도, 압력 및 기하학적 구조에 의하여 결정된다. 사용된 압력용기는 내경이 0.57 m, 길이가 5.092

m, 부피가 1.3 m<sup>3</sup>인 직립하향 용기이다. 압력용기 하단과 이어지는 연결 배관은 내경이 87.32 mm, 길이가 2.36 m인 배관이며, Probar type 유량계 및 비응축가스를 주입하기 위한 기/액 혼합 배관부가 장착되었다. 시험대는 기/액 혼합 배관부 하단에 연결되며, 시험대의 하단에는 방출밸브와 방출탱크가 연결된다. 시험대는 파단 배관을 모의하는 배관으로 교체가 용이하도록 양단이 플렌지로 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 T2는 내경이 10.9 mm, 길이가 1000 mm인 시험대 부분과 시험대 부분의 상단 및 하단에 붙어있는 내경이 87.32 mm이고, 길이가 각각 281.15 mm, 280.85 mm인 연결 부분으로 구성되어 있다. 시험대 내부의 압력 및 온도 분포 측정을 위한 압력계, 차압계, 및 열전대의 설치 위치는 표 1과 같다. 시험대 T2GDM은 시험대 T2와 입출구 형상, 배관의 내경 및 길이가 같도록 설계되었고, 감마선밀도계의 수직방향 이동이 용이하도록 압력 및 온도 측정을 위한 계측 포트가 설치되지 않았다.

실험장치에 사용된 계측기의 사양은 표 2와 같다. 압력용기 내부의 온도와 압력이 측정되어졌으며, 시험대 전단에서 압력용기에서 방출되는 임계유량이 측정되어진다. 또한 가스주입 배관부를 통해 주입되는 질소가스의 온도 및 유량이 측정되어진다. 시험대 T2에서는 시험대 내부 압력 및 온도 분포가 측정되어졌으며, 시험대 T2GDM을 통해서도 시험대 내부의 기포 분율이 감마선밀도계를 이용하여 측정되어진다.

### 2.3 실험 절차

실험준비의 첫 번째 단계로 질소가스를 질소가스 충전계통을 통하여 질소가스 저장용기에 고압의 상태로 저장한다. 이와 함께 냉각재 압력용기에 물을 채우고 주순환계통을 가동하여 냉각재를 순환시키면서 가열 및 가압을 하여 실험 test matrix의 정체 압력 및 정체 온도를 맞춘다. 실험조건에 도달한 압력용기 내부의 냉각재는 개방 시간이 1초 이내인 방출밸브(QOV)의 개방과 동시에 시험대를 통하여 방출된다. 압력용기는 정상상태 실험에서 압력용기와 질소공급탱크의 연결 배관에 설치된 압력조절밸브(PCV, Pressure Control Valve)를 통해 질소를 공급받으면서 시험기간 동안 일정한 압력을 유지할 수 있도록 설계되었다. 비응축가스의 유량을 모사하기 위하여 제어된 일정 유량의 질소가스가 시험대 전단에 주입된다. 질소가스는 유량조절밸브(FCV, Flow Control Valve)의 작동에 의하여 시험대 전단에 설치된 질소주입배관으로 주입되어 압력용기로부터 방출되는 물과 혼합되어 시험대를 통하여 방출된다. 압력용기가 정체 조건에 도달한 이후부터 DAS를 통해 실험자료가 저장되며, 압력용기 내부의 냉각재의 수위가 정해진 저수위에 도달하면 실험종료와 함께 DAS의 작동도 정지된다.

### 3. 임계유량 실험 Test Matrix

시험대 T2GDM과 T2를 이용한 실험이 수행되었으며, 임계유량, 압력과 온도 분포 및 기포 분율에 대한 실험데이터가 획득되었다. 본 논문에는 감마선밀도계를 이용하여 측정된 기포 분율 실험데이터는 포함되지 않았다.

압력용기 내부의 정체 온도가 상온이고, 정체 압력이 40, 70, 및 100 bar인 경우에 대하여 실험이 수행되었다. 또한 압력용기 내부가 포화 상태 및 약간 과냉각된 조건에서 정체 압력이 40, 70, 및 100 bar인 경우에 대하여 실험이 수행되었고, 압력용기 내부의 과냉각도는 0,

20, 50 °C로 변화시켰다. 각각의 경우에서 초기에는 질소가스의 주입이 없이 압력용기 내부의 냉각재가 방출되는 단상 임계유량 실험이 수행되었으며, 차후에 질소가스가 일정량만큼 주입되는 실험이 수행되었다.

획득된 시험데이터는 모두 98개로 수행된 실험의 test matrix는 표 3과 같다. 압력용기 내부 정체 온도가 상온인 조건의 실험데이터는 비응축가스가 주입되지 않을 때와 주입될 때의 각각에 대해 14개와 27개이며, 초기 정체온도가 포화 상태 및 과냉인 조건에서의 실험 데이터는 비응축가스가 주입되지 않을 때와 주입될 때의 각각에 대해 21개와 36개이다.

## 4. 실험 결과

### 4.1 정상상태 도달 과정

Test matrix의 각 경우에 대해 시험은 실험절차에 따라 수행되었고, 정상상태 실험데이터가 획득되어진다. 정상상태는 압력용기 내부 정체 압력, 비응축가스의 주입 유량 및 임계 방출유량이 시간에 따라 변하지 않고 일정하게 되었을 때 도달된 것으로 보았다. 그림 2부터 4는 전형적인 실험 결과로써 정체 압력이 100 bar이고, 상온인 조건에서 각각 정체 압력, 비응축가스의 주입 유량, 및 임계 방출유량의 시간에 따른 변화를 보여준다. 위의 실험에서는 비응축가스가 주입되지 않았을 때와 주입되었을 때의 각각에 대해 2개와 3개의 정상상태 실험데이터가 얻어졌다. 실험데이터의 취득 시간은 SS-1, SS-2, SS-3, SS-4, 및 SS-5에서 각각 29.0, 40.4, 24.5, 25.0, 및 19.0 초이다.

### 4.2 압력 및 온도 분포

그림 5는 시험대 T2 내부의 전형적인 압력 분포를 보여주고, 그림 6은 시험대 T2 내부의 전형적인 온도 분포를 보여준다. 그림 5와 같이 시험대 내부의 압력강하는 대부분이 출구에서 이루어지고 있으며, 비응축가스의 주입 유량이 다른 경우에도 비슷한 경향을 보인다. 비응축가스의 주입 유량이 증가하는 경우 시험대 내부의 압력강하가 증가하였다. 그림 6과 같이 시험대 내부의 온도분포는 시험대 입구에서 급격히 감소하고, 시험대 중간에서의 온도 변화는 크지 않다. 또한 비응축가스의 주입 유량이 증가하는 경우 입구에서의 온도 변화가 작아지는 경향을 보인다.

### 4.3 임계유량 실험결과

시험대 T2GDM을 이용하여 75개의 실험 데이터가 획득되어졌고, 시험대 T2를 이용하여 23개의 실험 데이터가 획득되어졌다. 동일한 압력 및 온도 조건에서 얻어진 임계유량 데이터는 T2GDM과 T2의 두 시험대에서 동일한 결과를 보이는 것을 확인하였다. 실험은 정체 압력이 4, 7, 및 10 MPa, 입구 과냉도가 0, 20, 50 °C, 및 상온, 비응축가스의 주입 유량이 0.0 ~ 0.22 kg/s인 범위에서 이루어졌다.

각각의 경우에서 초기에는 질소가스의 주입이 없이 압력용기 내부의 냉각재만이 방출되는 단상 임계유량 실험이 수행되었으며, 차후에 질소가스가 일정량만큼 주입되는 실험이 수행되었다. 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.

모든 임계유량 실험결과에서 얻어진 가스분율의 변화에 따른 임계질량유속의 변화는 그림 7에 나타나 있다. 그림 7은 가스분율의 변화에 따라 임계유량이 급격히 감소하는 현상을 잘

보여주고 있다. 위의 결과는 가스분율이 임계유량의 예측에 주요한 변수임을 보여준다.

Celata et al.[3]은 정체 압력이 0.5, 1.0, 및 1.5 MPa이고, 입구 과냉도가 0, 20, 40, 및 60 °C인 조건에서 무차원 임계질량유속  $R(=G_c/G_{c0})$ 을 무차원 비응축가스 체적유량( $Q_a/Q_{c0}$ )의 함수로 나타내었고, 입구 과냉도와 함께 무차원 비응축가스 체적유량이 무차원 임계질량유속을 표현하는 가장 중요한 변수임을 밝혔다. 여기서  $G_c$ 는 실험에서 얻어진 질량유속,  $G_{c0}$ 는 비응축가스가 존재하지 않는 경우의 기준 질량유속,  $Q_a$ 는 비응축가스의 체적유량,  $Q_{c0}$ 는 비응축가스가 존재하지 않는 경우의 냉각수의 기준 체적유량이다.

그림 8은 정체 온도가 상온인 경우의 비응축가스 분율에 따른 임계질량유속의 변화를 보여준다. 실험결과는 비응축가스 분율이 증가함에 따라 임계질량유속이 급격히 감소함을 보여주고 있다. 또한 정체 압력이 증가함에 따라 임계질량유속은 증가한다. 그림 9는 정체 온도가 50 °C만큼 과냉각 상태인 경우의 비응축가스 분율에 따른 임계질량유속의 변화이고, 그림 10은 정체 조건이 포화상태인 경우의 실험결과이다. 모든 경우에 대하여 임계질량유속에 대한 비응축가스 분율의 영향과 정체 압력의 영향이 비슷한 결과를 보인다. 그림 11은 정체 압력이 70 bar인 경우의 비응축가스 분율에 따른 임계질량유속의 변화를 보여준다.

그림 12는 본 실험의 모든 임계유량 실험데이터를 무차원 비응축가스 체적유량과 무차원 임계질량유속으로 나타낸 결과이다. 실험 결과는 정체 조건이 포화상태인 경우를 제외하고는 모두 유사한 경향을 보인다. 비응축가스가 주입되면 임계질량유속은 급격히 감소되고, 무차원 임계질량유속은 비응축가스 체적유량의 함수로 표현될 수 있다. Celata et al.[3]의 결과와는 다르게 입구 과냉도의 영향은 크게 나타나지 않았다. 정체 조건이 포화상태인 경우는 무차원 임계질량유속이 상당히 넓은 범위에서 변화되었고, 과냉각된 정체 조건과 비교하여 비응축가스의 영향이 적게 나타나는 것을 보여준다. 그림 13은 포화상태 실험자료를 제외한 비응축가스가 존재하는 모든 임계유량 실험데이터를 이용하여 실험상관식을 개발한 결과이다. 실험 영역에서 무차원 임계질량유속  $R(=G_c/G_{c0})$ 은 무차원 비응축가스 체적유량( $Q_a/Q_{c0}$ )의 함수로 다음과 같이 표현된다.

$$R_{TH} = 0.37794 + 0.60045 \cdot e^{-(Q_a/Q_{c0})/0.19547} \quad (1)$$

식 (1)은 정체 압력이 3.7 ~ 10.5 MPa, 입구 과냉도가 19.8 °C ~ 상온, 비응축가스의 주입 유량이 0.008 ~ 0.218 kg/s인 범위에서 적용 가능하다. 식 (1)에서  $Q_a/Q_{c0}$ 의 값은 0.045 ~ 0.524의 범위에 존재하며, 무차원 임계질량유속  $R$ 의 범위는 0.419 ~ 0.854이다.

## 5. 결론

Sharp-edged 입구 형상을 가지는 소구경관(내경 10.9mm)에서의 고압 비응축가스 이상유동 임계유량에 대한 실험적 연구가 수행되었다. 본 연구에서는 고압의 정체 압력(40, 70, 및 100 bar)과 상온에서 포화온도에 이르는 정체 온도(상온, 50 °C 과냉도, 20 °C 과냉도, 및 포화온도)에서 비응축가스 분율을 변화시키면서 정상상태 실험데이터가 얻어졌다. 도출된 결론은 다음과 같이 요약된다.

- 임계유량 실험 결과는 비응축가스 분율의 증가에 따라 임계질량유속이 급격히 감소하는 현상을 보여주고 있다. 비응축가스를 포함한 이상유동 임계유량에서 비응축가스 분율은 임계질량유속의 예측을 위한 가장 주요한 변수이다.
- 임계질량유속은 정체 압력의 증가에 따라 증가하고, 정체 온도의 감소, 즉 입구 과

냉도의 증가에 따라 증가한다.

- 임계유량 실험데이터로부터 무차원 비응축가스 체적유량( $Q_a/Q_{c0}$ )의 지수함수로 표현되는 무차원 임계질량유속( $G_c/G_{c0}$ )에 대한 실험상관식이 얻어졌다.

### 참고 문헌

[1] 장석규, 박현식, 정장환 외, “직각입구형상을 갖는 짧은 관에서의 비응축가스를 포함한 이상유동 임계유량 실험,” 한국원자력학회 춘계학술발표회, 2002.

[2] 박현식, 장석규, 정장환, “소구경관 내부에서의 고압/상온 비응축가스 이상유동 임계유량에 대한 실험적 연구,” 한국원자력학회 추계학술발표회, 2002.

[3] Celata, G. P., et al., “The Influence of Non-Condensable Gas on Two-Phase Critical Flow,” Int. J. of Multiphase Flow, Vol. 14, No. 2, pp. 175-187, 1988.

표 1 시험대 내부의 온도 및 압력 분포 측정을 위한 계측기의 위치

계측기 ID	시험대 T1 (m)	시험대 T2 (m)	계측기 ID	시험대 T1 (m)	시험대 T2 (m)
압력계			P12	0.296	0.860
P0	-0.03	-0.03	P13	0.297	0.910
P1	0.001	0.003	P14	0.298	0.950
P2	0.004	0.023	P15	0.299	0.990
P3	0.010	0.093	P16	0.2995	0.9995
P4	0.020	0.168	PL	0.330	1.03
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. 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, Ungrounded, 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-C EHIT-2-5-C-4-CE-F	0.012~0.67 kg/s	±2	Calibrated at 175bar, 87.5°C
	TG1	Temp.	Watlow, K-type, Ungrounded, 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, Ungrounded, Special	0~400 °C	±0.4	
	GDM	Void fraction	Single-Beam Gamma-Densitometer	0.0 - 1.0	NA	installed at T2GDM

표 3. 비응축가스 이상유동 임계유량 실험의 Test Matrix

실험 조건		Number of Test Case	
정체 압력 (MPa)	정체 온도 (°C)	Without NCG Injection	With NCG Injection
4.0	Saturated	2	1
	20 °C Sub-cooled	1	1
	50 °C Sub-cooled	3	6
	Normal Temperature	5	12
7.0	Saturated	2	2
	20 °C Sub-cooled	1	4
	50 °C Sub-cooled	1	5
	Normal Temperature	7	12
10.0	Saturated	2	2
	20 °C Sub-cooled	6	9
	50 °C Sub-cooled	3	6
	Normal Temperature	2	3

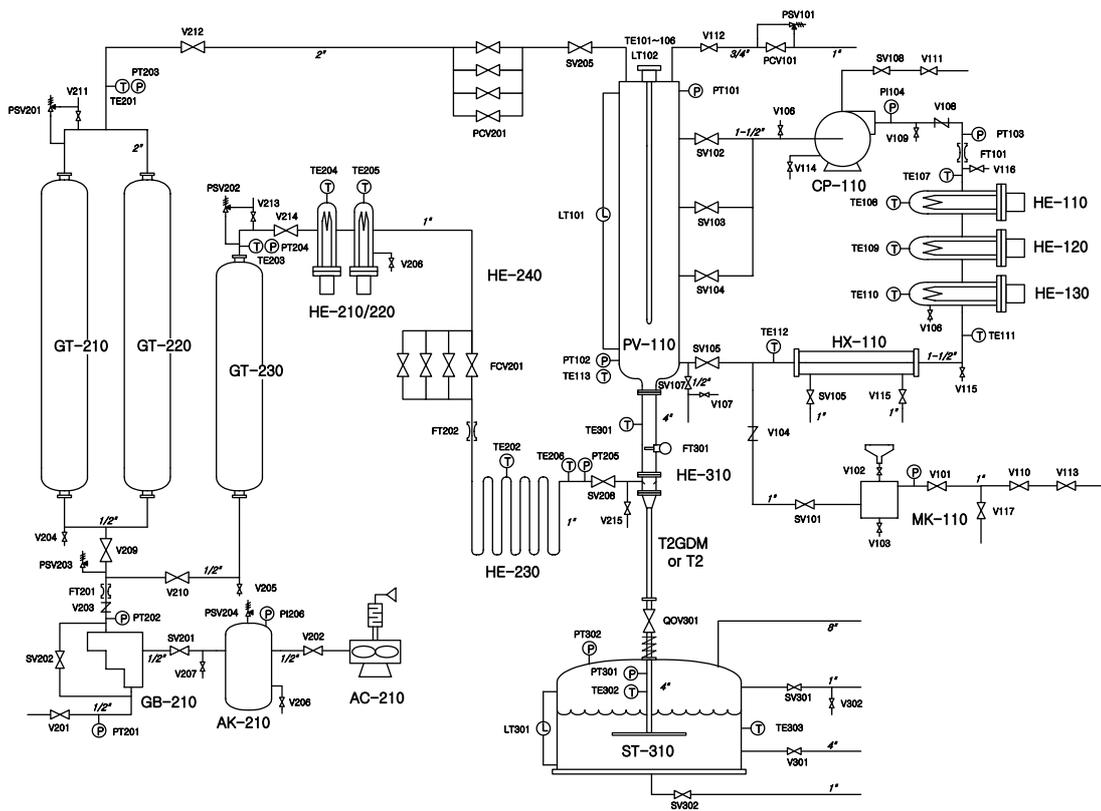


그림 1. 비응축가스 이상유동 임계유량 실험장치의 개략도

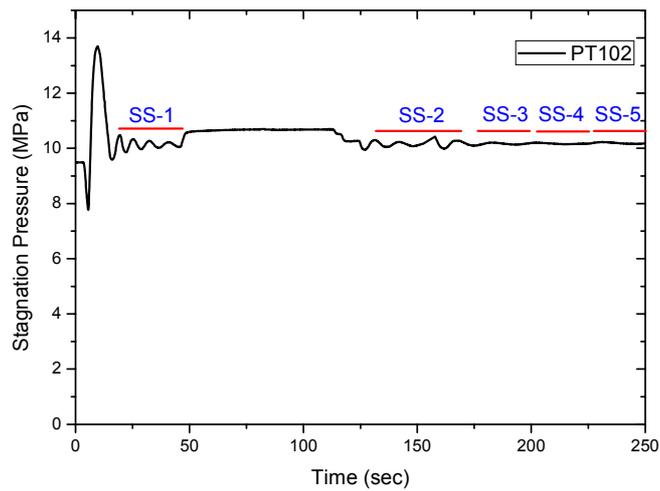


그림 2. 정상상태에서의 압력용기 내부 정체 압력의 거동

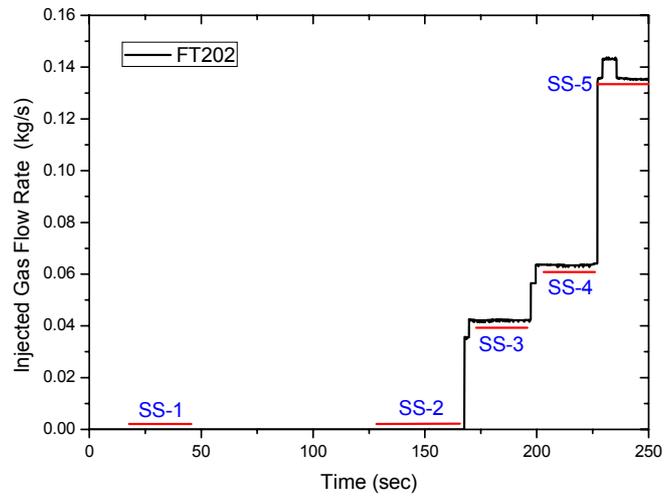


그림 3. 정상상태에서의 주입된 비응축가스 주입 유량의 거동

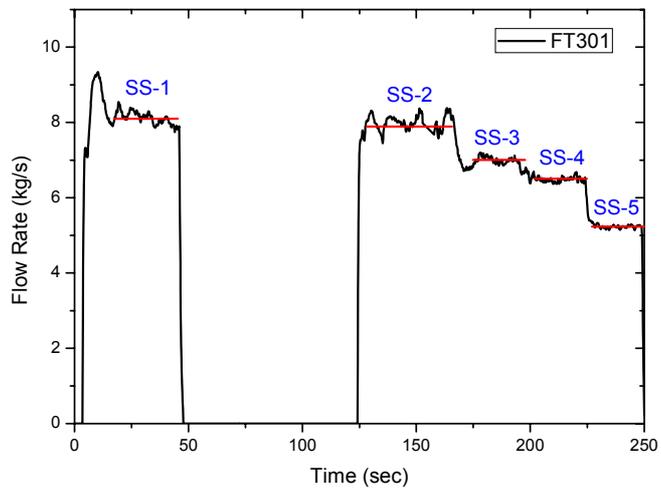


그림 4. 정상상태에서의 임계유량의 거동

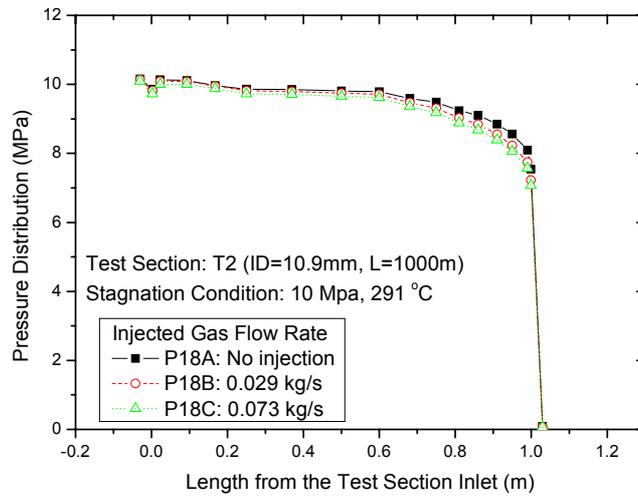


그림 5. 시험대 T2 내부의 전형적인 압력분포

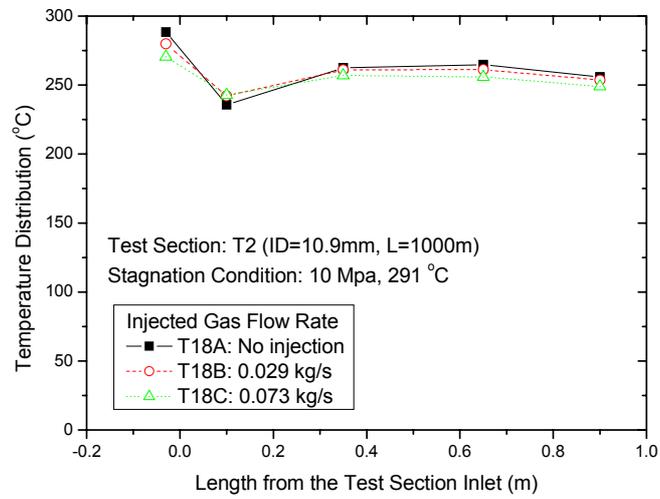


그림 6. 시험대 T2 내부의 전형적인 온도분포

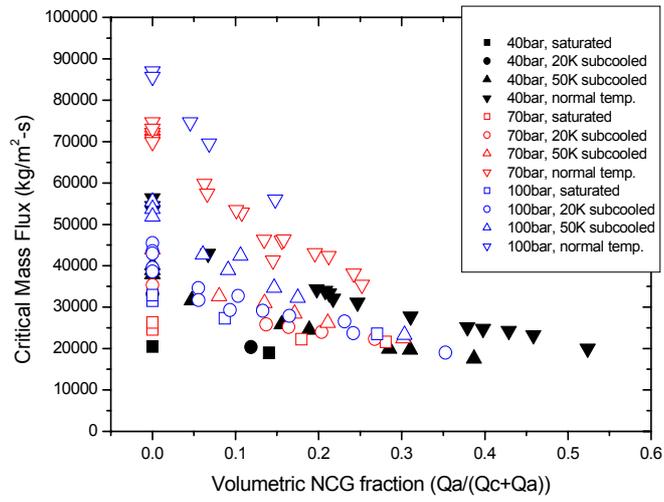


그림 7. 비응축가스 분율의 변화에 따른 임계질량유속의 변화

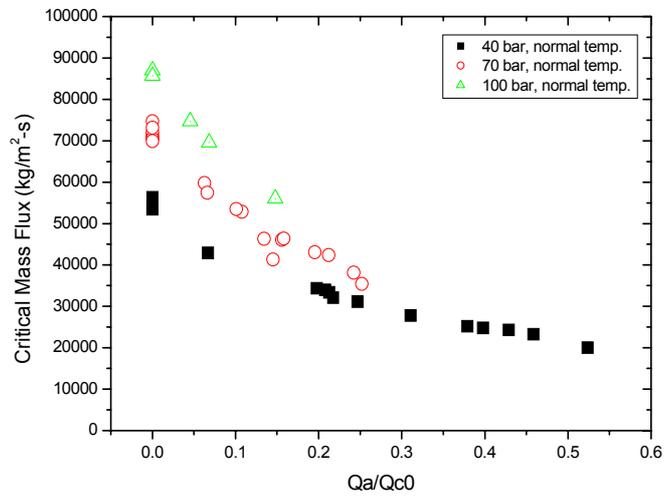


그림 8. 정체 온도가 상온인 경우의 비응축가스 분율의 변화에 따른 임계질량유속의 변화

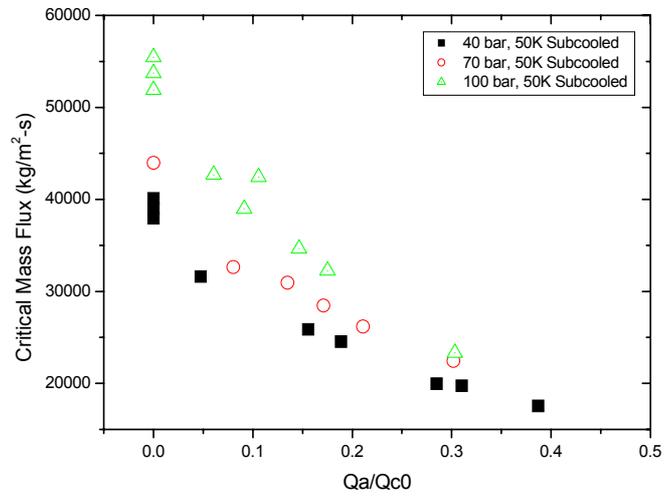


그림 9. 정체 조건이 50 °C만큼 과냉각된 경우의 비응축가스 분율의 변화에 따른 임계질량유속의 변화

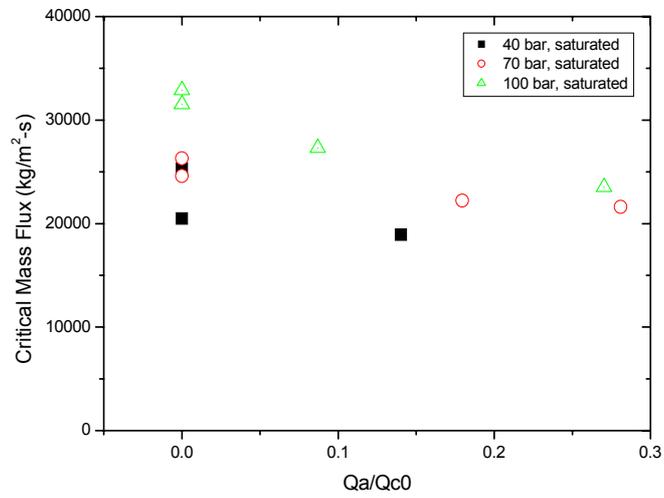


그림 10. 정체 조건이 포화상태인 경우의 비응축가스 분율에 따른 임계질량유속의 변화

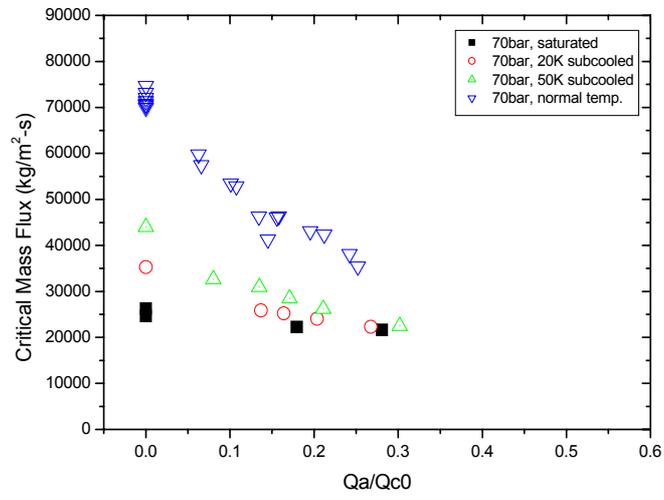


그림 11. 정체 압력이 70 bar인 경우의 비응축가스 분율에 따른 임계질량유속의 변화

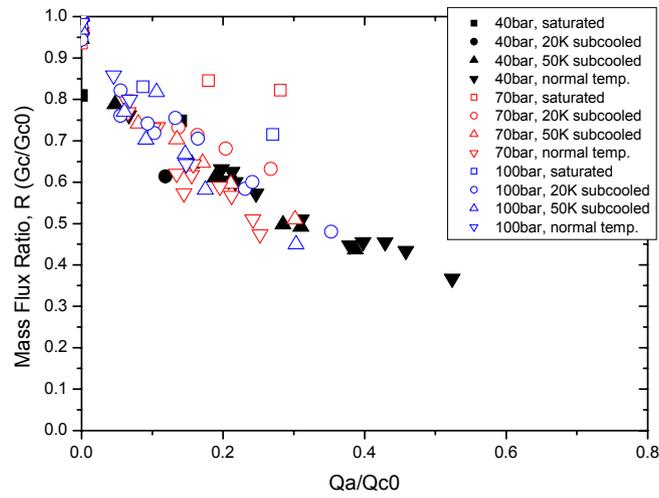


그림 12. 비응축가스 체적유량의 함수로 나타나는 임계질량유속 실험데이터

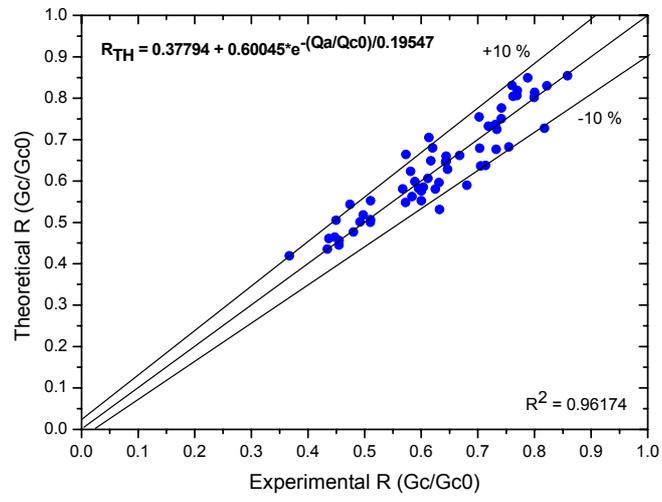


그림 13. 실험상관식을 이용한 임계질량유속 실험데이터의  
예측 결과