

직각입구형상을 갖는 짧은 관에서의
비응축가스를 포함한 이상유동 임계유량 실험

Two-phase Critical Flow with Non-condensable Gas
on Sharp Edged Short Pipe Geometry

장석규, 박현식, 정장환, 최남현, 민경호, 김창희, 이성호, 김희철, 장문희

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

해수를 이용한 담수 및 전력을 생산하기 위하여 설계가 진행중인 일체형원자로(SMART)의 배관파단사고를 모의하기 위하여 실험장치를 설계, 제작하고 비응축가스가 포함된 이상유동 임계유량 실험을 수행하였다. 임계유량실험 요건으로 실제 설계조건에 근거하여 파단배관 직경 20 mm, 정체압력 7~12 MPa, 과냉도 0~60 °C, 비응축가스유량 0~0.5 kg/s의 성능을 구현하는 실험장치가 설계, 제작되었다. 장치의 주요 구성은 주순환배관을 갖는 압력용기와 하단부에 test section 및 방출수조, 압력유지를 위한 N₂가스 저장탱크 및 이의 가압충전을 위한 N₂가스 충전계통 등으로 이루어졌다. 실험에 사용된 test section은 내경 20mm, 길이 300mm의 직각입구형상의 파이프이다. 실험조건은 정체압력 4, 7, 10 MPa, 입구과냉도 0, 20, 50 °C로 하였으며 실험중 N₂가스 주입유량은 0.028~0.39 kg/s의 범위였다. 실험 시 60초 이상의 정상상태를 유지하면서 test section 및 장치의 주요변수들의 측정자료를 수집하였다. 실험자료로부터 파단배관의 임계특성을 분석하고 실험장치의 성능을 검증하였다. 또한 기존의 임계유량 예측모델을 검증하기 위하여 비응축가스가 포함되지 않은 실험자료를 이용하여 HEM, Moody, Henry-Fauske 모델 계산결과와 비교, 분석하였다.

Abstract

The critical flow test facility was designed and constructed for simulating the pipe break accident of SMART reactor which was designed for the purpose of producing

fresh water from the sea as well as electricity. And also, the experiments of two-phase critical flow under the influence of non-condensable gas were performed. The requirements of the critical flow test are 7~20mm pipe break dia., 7~12MPa stagnation pressure, 0~60°C subcooling degree and 0~0.5kg/s N₂ gas flow rate. The important components of the test facility are the pressure vessel which has main circulation line, the test section attached to the bottom of the pressure vessel, suppression tank, the N₂ gas supply tanks for maintaining the system pressure and N₂ gas flow rate at test section and the N₂ gas filling system. The test section is sharp edged pipe type which has the dimension of I.D.=20, L=300mm. The test conditions are 4, 7, 10 MPa at stagnation pressure, 0, 20, 50 °C of subcooling degree and 0.028~0.39 kg/s of N₂ injection gas flowrate. The measured data at test section and other components in terms of pressure, temperature and flowrate were collected in DAS computer with maintaining the steady state conditions at least 60 seconds. From the test results, the critical characteristics of the break pipe were analysed and verified the capacity of the test facility. The calculated results of typical critical flow models i.e., HEM, Moody and Henry-Fauske were compared and discussed with the experimental results of critical flow without non-condensable gas for the verification of traditional critical flow models.

1. 서 론

SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor) 일체형원자로는 전력생산 외에 해수담수화에 필요한 에너지 공급을 목적으로 연구소에서 개발하고 있는 피동안전 개념을 도입한 새로운 개념의 중소형 원자로이다. SMART 일체형원자로는 개념적으로 안전성 확보를 위한 설계에 중점을 두므로써 대형냉각재상실사고(LB-LOCA)의 발생 가능성을 근원적으로 배제하였으며 소형냉각재상실사고(SB-LOCA)에 대해서만 사고해석 검증이 필요하다. SMART 일체형원자로에서 일어날 수 있는 가장 보수적 소형냉각재상실사고의 경우는 유로 직경이 가장 큰 부분의 파단 사고인 가압기 안전밸브 파단과 충수계통 배관 파단 사고를 고려할 수 있다. 이들 사고의 경우, 파단부에서 발생하는 유체는 비응축가스(N₂)를 다량 포함한 냉각수이며 파단부를 경계로 한 급격한 압력차로 인하여 임계류(critical flow)가 발생하게 된다.

이상유동 임계류 현상에 대해서는 현재까지 많은 예측 모델이 제안되었는데 크게 고전적 형태의 모델과 진보적 형태의 모델로 나눌 수 있다. 고전적 형태의 모델은 유량이나 압력 등을 유로의 형태나 특성에 대한 단순화 및 가정을 도입하여 입구정체조건들로 표현하는 방식으로 Moody[1]나 Henry-Fauske[2] 모델 등이 이에 속한다. 진보적 형태의 모델은 각 상에 대한 보존방정식에 대하여 상간의 기계적, 열적 전달현상 모델을 이용,

입구정체조건을 경계조건으로 유동방향에 따라 수치적분하는 방식으로 Separated Flow 모델[3] 등이 이에 속한다. 한편, 이들 임계류 모델들을 개발 혹은 검증하기 위하여 수많은 실험들이 수행되었는데 주로 파이프, 노즐 그리고 오리피스에 대한 실험이 많으며 실제 파단형태에 대한 실험이나 실제 원자로 크기에 대한 실험은 드문 형편이다.

전술한 바와 같이 SMART 일체형원자로의 파단사고에서는 방출 냉각수가 다량의 N_2 가스를 포함하므로 정확한 임계유량을 예측하기 위해서는 비응축가스의 영향을 고려한 임계류 모델이 필요하며 모델 개발, 검증을 위한 실험자료의 확보가 매우 중요하다. 비응축가스 이상유동 임계유량실험은 현재 1.5 MPa 이하의 저압에서 Celeta 등[4]이 수행하였으나 그 이상의 고압에 대해서는 모델 및 실험자료가 없으며 RELAP5 코드의 수정된 Henry-Fauske 모델도 검증되지 않아 사용되지 않고 있다.

따라서 SMART 일체형원자로 사고조건을 모의할 수 있는 임계유량 실험장치를 설계, 제작하여 비응축가스 이상유동 임계유량 실험을 위한 정상상태 및 천이상상태의 실험을 수행하고 비응축가스 이상유동 임계유량 예측모델의 개발, 검증체제를 구축하였다.

SMART 일체형원자로 사고조건을 근거로 한 test matrix를 선정하여 임계유량실험을 수행하고 관련 실험자료를 확보하였으며 실험장치의 성능을 검증하였다. 또한 기존의 임계류 모델 검증을 위하여 HEM, Moody, Henry-Fauske 모델의 임계유량 예측결과와 비응축가스가 포함되지 않은 임계유량 실험자료와 비교, 분석하였다.

2. 실험장치

2.1 실험장치 구성

비응축가스 이상유동 임계유량 실험장치에 있어 가장 중요한 부분은 고온고압 냉각재를 실험조건으로 가두어 두는 압력용기와 파단배관을 모의하는 test section을 포함한 냉각재 방출배관이다. 이들 핵심 component가 실험조건에 온도, 압력에 도달하여 정확한 실험을 수행하기 위해서는 가열/가압 및 실험시 성능 보장을 위한 주변 기계계통 및 장치가 필요하다. 이를 위한 본 실험장치는 크게 주순환계통, 질소가스 공급계통, 냉각재 방출계통, 질소가스 충전계통 등으로 이루어졌다. 실험장치의 개략도는 그림 1에서 보는바와 같다. 주순환계통은 압력용기 내의 냉각재를 실험조건에 온도, 압력으로 맞추기 위하여 냉각재를 순환시키면서 가압, 가열하며 질소가스 공급계통은 압력용기 내의 냉각재를 실험압력으로 가압하고 비응축가스가 포함된 임계유량 실험시 방출배관 test section 전단에 N_2 가스를 주입한다. 또한, 냉각재 방출계통은 실험조건에 도달한 냉각재를 test section을 거쳐 대기 방출하면서 실험자료를 생산하며 질소가스 충전계통은 임계유량 실험에 필요한 고압의 질소가스를 고압 충전 및 저장한다.

실험의 수행은 질소가스를 충전계통을 통하여 고압의 상태로 질소가스 저장용기에 저장한 다음, 냉각재 압력용기에 물을 채우고 펌프와 heater를 가동하여 냉각재를 순환시키면

서 가열 및 가압 함으로써 실험조건에 맞춘다. 실험조건(온도, 압력)에 도달한 압력용기 내 냉각재는 실험시작(방출밸브 개방)과 동시에 압력조절밸브 작동으로 일정압력을 유지하도록 N₂ 가스를 공급받으면서 test section을 통하여 방출된다. 비응축가스의 주입은 test section 전단에 설치된 주입배관으로부터 유량조절밸브 작동에 의하여 제어된 일정 유량의 N₂ 가스 유입으로 이루어진다. 실험시 주요 장치의 변수 및 test section의 유량, 압력, 온도 변수는 DAS system에 의하여 수집, 처리된다.

2.2 Test Section 배관

Test section 배관은 압력용기(그림 2 참조) 하단에 장착되어 실험 시 임계유량을 형성하는 test section이 장착된 배관으로 그림 3에서 보는바와 같이 유량계 장착 배관부, 가스주입 배관부 그리고 test section으로 이루어져 있다. 유량계 장착 배관부는 파단배관을 모의하는 test section을 통하여 방출되는 냉각재 유량을 측정하기 위한 유량계를 설치한 배관부로 유체의 압력손실은 최소화하면서 유량계의 측정 신뢰성을 보장하도록 설치하였다. 가스주입 배관부는 비응축가스가 포함된 임계유량을 구현하기 위하여 방출 냉각재에 질소가스를 주입, 혼합하기 위한 배관부로 test section 전단의 배관 벽에 가스주입구를 가공하고 가스주입 tube를 연결하였다

Test section은 파단배관을 모의한 배관으로 방출되는 냉각재가 임계유량을 형성하며 급격한 압력구배를 발생한다. 따라서 test section의 축방향 구간에 대하여 test section 내, 외벽에 압력(18개), 온도(5개) 측정구를 가공하였다. 실험에 사용된 test section은 sharp edged pipe 형태로 직경 20mm에 길이 300mm를 제작하여 실험에 사용하였다. 상세한 온도, 압력 측정 위치는 그림 4와 같다.

2.3 계측기 설치

Test section의 압력 분포를 측정하기 위하여 test section 전, 후단을 포함하여 내벽에 직경 0.3mm의 18개 압력측정구를 가공하였다.(그림 4 참조) 이곳에서 발생하는 압력 신호를 수집하기 위하여 각 pressure tap에 압력측정용 배관(1/4" tube)을 pressure transmitter에 연결하였다. 압력은 전기신호(1~5 V)로 바뀐 후 DAS로 보내어져 수집, 처리된다. Test section 내 방출 냉각재의 온도를 알기 위하여 test section 내벽 온도가 냉각재 온도와 같다는 가정하에 열전대 삽입구를 가공하고 열전대 tip을 최대한 내벽 쪽으로 삽입하였다.(그림 4 참조) 열전대 tip의 접촉 신뢰성을 확보하기 위하여 spring으로 압착, 체결하도록 제작하였으며 측정 중 잡음을 제거하기 위하여 보상도선을 사용하여 DAS까지 연결하였다. 임계유량 측정을 위하여 실험조건에 적합한 유량계로 Pitot tube의 원리를 이용한 Probar type을 사용하였다. Probar type 유량계는 대구경 고유량에 적합하며 압력손실이 매우 적어 실험장치의 용도에 적합하였다. 사용된 계측기의 기술사양은 표

1과 같다.

3. Test Matrix

3.1 실험 제한조건

압력용기의 정체압력은 12 MPa까지 실험 가능하도록 설계되었으나 실험 중 초기압력 요동에 의한 safety valve의 작동으로 인하여 압력제어의 불안정이 우려되어 실험시 정체압력을 10 MPa까지로 제한하였다. 실험 중 test section 전단의 N₂ 가스 주입은 유량제어밸브(FCV)에 의하여 설정값으로 시간지연 없이 일정하게 이루어져야 한다. 실제 설치된 유량제어밸브는 한 개의 밸브로 저유량에서 고유량까지 제어를 하며 오리피스 유량계에 의한 유량측정과 제어밸브 간의 교정이 불완전하여 설정 유량값을 정교하게 구현하기에 미흡하였다. 따라서 실제 비응축가스 임계유량실험 시에는 가스주입 유량제어밸브의 개도(valve opening)에 의하여 결정되는 유량을 실험조건으로 취하였다.

3.2 정상상태 임계유량실험

정상상태 임계유량실험으로 test section, T1(Sharpe Edged, $\Phi 20 \times 300$ L mm)에 대하여 실험을 수행하였으며 한 종류의 실험(test run) 중 초기에 순수 임계유량실험(reference case)을 수행하고 이어 질소가스를 주입하면서 비응축가스가 포함된 임계유량실험(injection case)을 수행하였다. 실험조건에 따라 실험지속시간이 달라지며 이에 따라 injection case의 실험은 필요한 만큼 반복 수행하였다. 수행된 실험의 test matrix를 정리하면 표 2와 같다.

4. 실험결과

4.1 정상상태 임계유량 실험예 (T1-100-291_20-S2)

가. 실험수행결과 고찰

실험명 “T1-100-291_20-S2”에서 T1은 test section 1 (Sharp Edged, $\Phi 20 \times 300$ L)을 의미하는 것이며 100-291_20-S은 압력용기 정체조건 100 bar, 291 °C (과냉도 20°C)의 정상상태 실험조건을 뜻한다. 정해진 실험조건에 대하여 실험장치의 실험조건을 맞추고 실제 실험을 수행한 결과는 그림 5 (a)~(f)에 나타난 바와 같다. 그림 5 (a)에서 보는 바와 같이 압력용기의 초기 정체조건은 103.3 bar, 291.5 °C이며 최종 정체조건은 102 bar, 287 °C, 실험지속시간은 68 sec로 수행되었다. 압력제어밸브(PCV)의 압력용기 내 압력제어 성능은 안정된 압력을 101.3 bar(bias 1.3 bar)로 보았을 때 최대 진동폭은 117.5

~ 95.8 bar(+16, -5.4 %), 압력오차 $\pm 3\%$ 이내 도달 경과시간은 15 sec로 나타났다. 압력용기 내 온도강하는 그림 5.1 (b)에서 보는 바와 같이 4 °C/min 정도로 나타났다. 비응축가스 임계유량 실험을 위한 주입가스 유량제어밸브(FCV)의 작동은 그림 5.1 (c)에서 보는 바와 같이 실험개시 후 30 sec 동안 닫힌 상태를 유지하고 이후 20 sec 동안 밸브 개도 30 %로 주입유량 0.065 kg/s 정도, 이어서 50 % 밸브 개도로 유량 0.155 kg/s 정도를 유지함으로써 만족할 만한 정상상태 조건을 실현하였다. 그림 5 (d)는 냉각재 방출유량을 나타낸 것으로 압력용기의 압력요동에 의하여 유량이 민감하게 요동함을 알 수 있으며 test section으로의 질소가스 주입량이 0, 0.064, 0.149 kg/s로 증가함에 따라 방출유량이 17, 15, 12.9 kg/s 정도로 감소함을 알 수 있다. 그림 5 (e)는 test section의 축방향 압력분포를 실험경과시간(7, 27, 47, 57, 67 sec)에 따라 나타낸 것이다. 사용된 test section의 sharp edged 입구형상에서의 압력강하는 3.7 bar(3.7 %) 정도로 나타났다. 실험 수행 중 test section의 압력분포 변화는 압력변동이 민감한 임계지점(출구) 부위(270~300 mm)를 제외한 구간에서 5 bar 이내의 변동폭을 보였다. 그림 5 (f)는 test section 축방향에 따라 설치된 열전대로부터 측정된 냉각재 온도분포를 나타낸 것이다. T0 센서는 입구 전 30mm에서 물과 직접 접촉하며 T1~T4 센서는 test section 외벽에 심어진 간접 접촉식이다. 실험 전 test section의 온도조건은 실험조건 291 °C에 못 미쳤으며 실험개시 후 방출유량이 통과함으로써 온도가 상승하며 그 구배는 T1~T4 센서에서 간접 접촉에 의한 열전달 지연으로 다소 완만하게 나타났다. 압력용기의 냉각재 정체온도는 방출 냉각재가 test section 입구까지 오는 동안 배관의 보온 및 heater 가열 상태에 따라 1.6 °C의 온도 강하가 발생하였다. 비응축가스 임계유량(with N2 injection) 구간에 대해서는 주입유량 0.064 kg/s인 경우 2.9 °C, 주입유량 0.149 kg/s인 경우 6.8 °C의 온도 강하가 발생하였는데 이는 방출배관에서의 열손실과 함께 주입 질소가스(40~60 °C)에 의한 영향이 부가적으로 작용한 것으로 분석된다.

나. Data Reduction

위 실험 예에 대하여 정상상태의 실험자료를 생산하기 위하여 실험 수행 구간에서 질소가스 주입밸브 작동구간 및 압력제어 불안정 구간을 제외하고 안정된 실험영역을 실험 경우 별로 선정하였다. 실험경우는 실험시작 후 15초 정도 질소가스가 포함되지 않은 임계유량 실험에서 기본 임계유량 구간을 선정하였으며 이 후 질소가스를 주입한 비응축가스 임계유량 실험 두 경우를 각각 15초와 9초 정도 선정하여 주요 실험자료에 대하여 정상상태 자료로 통계 처리하였다. 실험의 각 경우에 대하여 정체 압력은 목표압력 100 bar에 비하여 약 1.2~1.7 bar (1.7 %) 정도 높게 유지되었으며 표준편차는 1.9 bar (1.9 %) 이내로 정상상태를 잘 유지하였다. 정체 온도는 목표온도 291 °C에 비하여 실험 진행에 따라 압력용기 및 배관의 열손실로 인하여 4 °C (1.3 %)정도까지 떨어졌으며 각 경우의 온도 표준편차는 0.7 °C (0.2 %) 이내로 매우 작았다. 비응축가스 임계유량 실험

을 위한 N_2 가스 주입은 두가지 유량에 대하여 수행되었는데 일정유량 주입의 표준편차는 3.1 % 이내로 정상상태가 잘 유지되었다. 그러나 주입가스의 온도는 경우에 따라 40~70 °C로 큰 변화를 나타냈으며 편차도 2~6 °C 정도로 커 신뢰할 만한 측정값으로 미흡하였다. 냉각재 임계유량은 비응축가스의 주입이 없을 때 가장 크며 주입가스가 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다. 유량의 정밀도는 기본적으로 정체압력의 요동과 주입가스의 혼합 거동에 영향을 받는데 실험예의 경우 3.1 % 이내의 편차를 보여 만족할만한 정상상태 실험 결과를 보였다. 그림 6 (a)는 실험경우에 따른 test section의 축방향 압력분포를 비교한 것으로 비응축가스의 주입량에 별 관계없이 압력분포가 거의 일정함을 보여주고 있다. 그림 6 (b)는 실험경우에 따른 test section의 축방향 온도분포를 비교한 것으로 test section 입구 전 30mm 지점(T0)은 냉각재 직접 접촉에 의한 측정값이고 나머지 (T1~T4) 지점은 간접 접촉에 의한 측정값이다. 따라서 T0만 냉각재 온도를 제대로 측정하였고 나머지는 test section 외벽의 열손실 및 측정시간 지연 등으로 인하여 정확한 냉각재 온도를 나타내지 못하였다.

4.2 정상상태 임계유량 실험결과 및 실험성능 분석

이상에서 언급한 바와 같이 모든 실험에 대하여 실험경우에 따라 적정 구간을 선정하여 통계적으로 처리함으로써 임계유량실험의 정상상태 실험자료를 얻을 수 있었다. 표 3은 test matrix에 의하여 수행된 실험경우에 대한 실험결과의 주요 내용을 정리한 것이다. 각 test run에 대하여 실험수행시간은 62~150 초 정도 지속되었다. 각 test run은 실험수행시간에 따라 비응축가스를 포함하지 않은 기본 임계유량실험과 비응축가스가 포함된 임계유량실험을 주입 N_2 가스의 유량을 변화시켜 가며 수행하였다. 실험수행 지속시간은 test section의 직경이 작을수록 정체압력이 낮을수록 과냉도가 작을수록 길어진다. 정상상태실험을 위한 정체압력 설정은 목표압력에 대하여 대부분 3 % 이내의 정확도를 유지하였으며 40 bar 실험에서 5~11 %의 다소 큰 bias를 보였다. 또한 정체압력의 유지는 최대 3 % 이내이며 대부분 1 % 내외의 우수한 정밀도를 보였다. 정체온도의 유지는 실험이 진행되면서 압력용기 외부로 손실되는 열에 의하여 떨어지는데 정체온도에 따라 차이는 있으나 대체로 온도감소율이 4 °C/min 정도인 것으로 나타났다. 또한 선정된 정상상태 구간에서의 온도편차는 0.2 % 내외로 무시할 만하였다. 비응축가스가 포함된 임계유량 실험을 위하여 test section 전단의 N_2 가스 주입배관을 통하여 일정유량을 주입하였는데 밸브 작동 후 안정된 일정유량의 도달시간은 대체적으로 3초 정도였으며 일정유량의 유지는 경우에 따라 10 % 정도의 오차도 보였으나 대부분 5 % 이내의 편차로 만족할 만하였다. N_2 가스의 주입은 고압상온의 N_2 저장탱크에서 test section 전단의 방출배관으로 주입되면서 급팽창하는 과정으로 두 배관의 연결 부위에서의 N_2 가스온도는 22~120 °C 범위에서 다양한 측정값을 보이며 온도 편차도 최대 10 °C까지 크게 나타나

측정자료로 사용하기에는 미흡한 상황이다. 이는 측정 부위가 N_2 가스와 고온 냉각재의 경계이며 실험시 불안정한 거동이 일어나는 지점으로 안정된 측정값을 얻기에 부적합한 것으로 판단된다. 방출 냉각재 유량은 최대 25 kg/s 정도까지 측정되었으며 측정 정밀도는 정체압력 특성 및 주입 가스의 안정성에 영향을 받는데 편차는 5 % 내외로 매우 양호하였다.

정확한 임계유량실험을 위해서는 압력용기 정체조건의 냉각재가 test section으로 직접 방출되어야 하지만 냉각재 유량측정과 비응축가스의 주입을 위하여 부가적인 배관이 불가피하다. 이러한 배관은 압력손실 등 실험결과에 오차를 발생시키는데 가능한 한 이러한 영향을 최소화하여야 한다. 유량측정 및 N_2 가스 주입을 위하여 설치된 배관이 유발하는 오차를 알아보기 위하여 압력용기 정체조건과 test section 입구의 온도, 압력조건을 비교한 결과, 유량계 배관 및 기/액 혼합 배관에 의하여 유발되는 압력손실이 대체적으로 2 bar 내외(최대 2.7 bar)로 정체압력에 대하여 0.6 % 이내로 오차의 크기는 미미하였다. 온도의 경우에는 유량계 배관 및 기/액 혼합 배관을 거치는 동안 열손실로 인하여 대체로 1 °C 내외의 온도감소를 보이나 경우에 따라서는 5 °C 이상의 온도감소도 일어나며 비응축가스 임계유량실험의 경우에는 N_2 가스와의 혼합으로 인한 냉각재 온도감소 영향이 더해져서 온도감소 폭이 더 커진다. 측정된 test section 입구의 온도, 압력을 기준으로 냉각재와 N_2 가스가 열적 평형을 이루었다고 가정하고 냉각재와 가스의 측정된 유량으로부터 기포율을 산출한 결과, 0.05~0.46 정도의 분포를 나타내었다.

실험경우에 대한 비응축가스 주입유량과 냉각재유량 실험자료들로부터 N_2 가스 주입에 따른 냉각재 유량의 영향을 그림 7에 나타내었다. 냉각재 유량은 N_2 가스 주입 유량이 증가함에 따라 감소하는데 과냉도가 커질수록 감소량이 커지는 것으로 보여진다. 또한 그림으로부터 동일한 정체압력에서 과냉도가 클수록 방출유량이 증가하며 정체압력이 클수록 방출유량도 증가함을 알 수 있다.

4.3 임계유량 모델 검증

이상유동의 임계유량을 예측하기 위하여 여러 가지 모델이 제안되어 있는데 기본적으로 많이 사용되고 있는 전통적인 모델로써 HEM, Moody, Henry-Fauske 모델 등을 들 수 있다. 수행된 실험경우에 대하여 임계유량의 측정값과 세가지 모델의 임계유량 계산값을 그림 8에서 비교하였다. 대개의 경우 세가지 모델은 실험자료보다 over predict하는 경향이 있는데 HEM과 Moody 모델의 경우 15~20 %, Henry-Fauske 모델의 경우 30~50 % 정도이다. 그러나 실험경우에 있어 포화상태 실험에서는 HEM과 Moody 모델에서 30 % 정도 under predict하는 경향을 보이고 있으며 정체압력이 높을수록 그 경향이 두드러지는 것으로 나타났다. 그림 9는 실험경우의 임계압력 측정값과 세가지 모델의 임계압력 계산값을 비교한 것이다. 포화온도 영역의 자료에서는 측정 임계압력값과 계산 임계

압력값이 매우 잘 일치함을 알 수 있으나 과냉도가 커질수록 계산 임계압력값은 측정 임계압력값에 비해 작게 예측되며 HEM, Moody 모델보다 Henry-Fauske 모델이 더욱 under predict 함을 알 수 있다. 수행된 실험자료에 의하면 일정한 정체압력조건에서 test section의 임계압력은 과냉도의 변화에 크게 영향을 받지 않는데 이것은 test section이 L/D=15의 짧은 관에 해당되어 임계지점이 모든 경우에 test section의 출구에서 생기기 때문인 것으로 판단된다.

5. 결론

SMART 일체형원자로의 사고조건을 모의할 수 있는 이상유동 임계유량 실험장치 (Critical Flow Test Loop)를 설계, 제작하였다. 이를 이용하여 실제 크기의 파단배관에 대하여 순수 임계유량실험뿐 아니라 비응축가스가 포함된 임계유량실험을 수행하였으며 그 외 다양한 종류의 임계유량실험도 수행 가능하도록 하였다. 실험의 지속성능은 60초 이상이었으며 압력제어시스템(PCV)을 채택하여 정상상태 유지 성능도 우수하였다. 비응축가스 임계유량실험을 위한 N₂ 가스 주입성능의 정밀도는 만족할 만하였으나 정확도를 개선할 필요가 있었다. 실험장치의 test section 전 방출시 배관압력손실은 매우 적었으며 실험온도 유지를 위한 heater의 보장이 필요하였다.

직경 20mm, 길이 300mm의 파이프형상 test section에 대하여 정체조건 10MPa, 311°C 이하에서 비응축가스(N₂) 영향을 고려한 임계유량실험을 수행하였다. L/D=15의 짧은 파이프에서 압력분포에 대한 비응축가스 영향은 기포율 0.3 이하 영역에서 두드러지지 않았다. 임계유량은 비응축가스 주입유량이 증가함에 따라 감소하는데 정체온도의 과냉도가 클수록 그 감소량이 커지는 것으로 나타났다.

비응축가스가 포함되지 않은 임계유량실험자료를 이용하여 기존 임계유량 모델(HEM, Moody, Henry-Fauske)의 예측성능을 검증하였다. 대체로 실험자료보다 over predict 하는 경향이 있는데 HEM과 Moody 모델의 경우 15~20 %, Henry-Fauske 모델의 경우 30~50 % 정도이다. 임계압력 계산은 포화온도 영역에서 측정 임계압력값과 계산 임계압력값이 잘 일치함을 알 수 있으나 과냉도가 커질수록 계산 임계압력값은 측정값에 비해 작게 예측하는데 HEM, Moody 모델보다 Henry-Fauske 모델이 더욱 under predict 함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 중장기 연구개발과제의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

6. 참고문헌

- [1] Moody, F. J., "maximum flow rate of a single component, two-phase mixture", Journal of Heat Transfer, Trans ASME 87, Feb. 1965
- [2] Henry, R. E., Fauske, H. K., "The two-phase critical flow of one-component mixtures in nozzles, orifices, and short tubes", Journal of Heat Transfer, Trans ASME 93, March. 1971
- [3] Boure, J. A., "The critical flow phenomena with reference to two-phase flow and nuclear reactor systems", ASME Symp. on the thermal and hydraulic aspects of nuclear reactor safety, Vol. 1, pp. 195-216, 1977
- [4] Celeta, 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. 계측기 사양

Location	Tag Name	Variable	Model	Calibration Range	Error	Remarks
Pressure Vessel (PV-110)	PT102	P	Rosemount 3051PG5	0~120 bar	±0.05%	
	TE113	T	Watlow, K-type, Unground, Special	0~400 ℃	±0.4%	
Gas Injection Line	FT202	m	Hoffer, HO1X1-30-B-1(RPR51S)-F25CS-CE HIT-2-5-C-4-CE-F	0.012~0.67 kg/s	±2%	based on 171 bar, 87.5 ℃
	TG1	T	Watlow, K-type, Unground, Special	0~400 ℃	±0.4%	
Test Section	FT301	m	Probar, PBR+26S	0~42 kg/s	±0.5%	based on 120 bar, 320 ℃
	P0	P	Rosemount 3051CG5	0~138 bar	±0.05%	
	P1	P	Rosemount 3051CD4	0~20.7 bar	±0.05%	
	P2	P	Rosemount 3051CD4	0~20.7 bar	±0.05%	
	P3	P	Rosemount 3051CD4	0~20.7 bar	±0.05%	
	P4	P	Rosemount 3051CD4	0~20.7 bar	±0.05%	
	P5	P	Rosemount 3051CD4	0~20.7 bar	±0.05%	
	P6	P	Rosemount 3051CD4	0~20.7 bar	±0.05%	
	P7	P	Rosemount 3051CD4	0~20.7 bar	±0.05%	
	P8	P	Rosemount 3051CD4	0~20.7 bar	±0.05%	
	P9	P	Rosemount 3051CD4	0~20.7 bar	±0.05%	
	P10	P	Rosemount 3051CD4	0~20.7 bar	±0.05%	
	P11	P	Rosemount 3051CD4	0~20.7 bar	±0.05%	
	P12	P	Rosemount 3051CD4	0~20.7 bar	±0.05%	
	P13	P	Rosemount 3051CD4	0~20.7 bar	±0.05%	
	P14	P	Rosemount 3051CD4	0~20.7 bar	±0.05%	
	P15	P	Rosemount 3051CD4	0~20.7 bar	±0.05%	
	P16	P	Rosemount 3051CD4	0~20.7 bar	±0.05%	
	PL	P	Rosemount 3051CG4	0~20.7 bar	±0.05%	
	T0	T	Watlow, K-type, Unground, Special	0~400 ℃	±0.4%	
T1	T	Watlow, K-type, Unground, Special	0~400 ℃	±0.4%		
T2	T	Watlow, K-type, Unground, Special	0~400 ℃	±0.4%		
T3	T	Watlow, K-type, Unground, Special	0~400 ℃	±0.4%		
T4	T	Watlow, K-type, Unground, Special	0~400 ℃	±0.4%		

P = Pressure, T = Temperature, m = Mass Flow Rate

표 2. Test Matrix (T1)

Test Run	Test Case
100 bar, Saturated	2 Reference, 3 Injection
100 bar, 20 °C Subcooled	2 Reference, 4 Injection
100 bar, 50 °C Subcooled	2 Reference, 2 Injection
70 bar, Saturated	2 Reference, 3 Injection
70 bar, 20 °C Subcooled	2 Reference, 3 Injection
70 bar, 50 °C Subcooled	2 Reference, 4 Injection
40 bar, Saturated	1 Reference, 3 Injection
40 bar, 20 °C Subcooled	1 Reference, 6 Injection
40 bar, 50 °C Subcooled	1 Reference, 4 Injection

여기서,

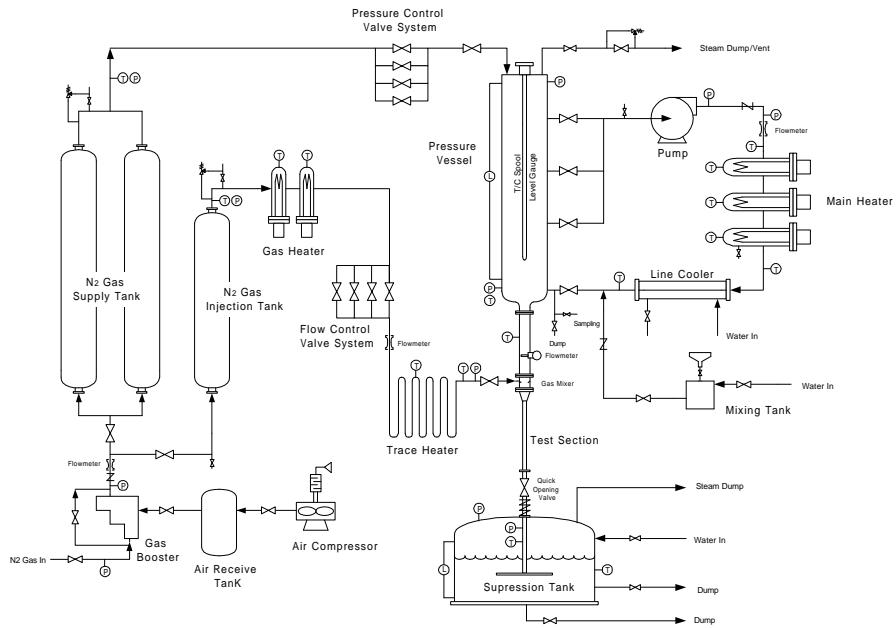
T1 = Test Section 1 : Sharp Edged, $\Phi 20 \times 300L$

Reference = Critical Flow without Non-condensable Gas

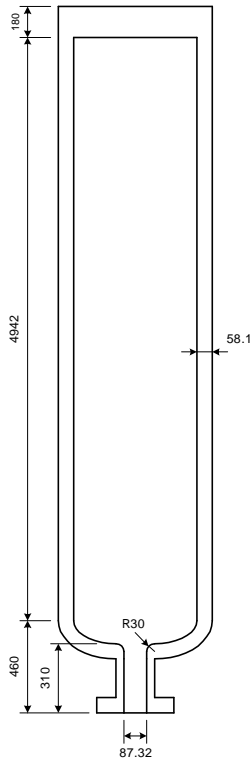
Injection = Critical Flow with Non-condensable Gas

표 3. 정상상태 임계유량 실험결과 정리

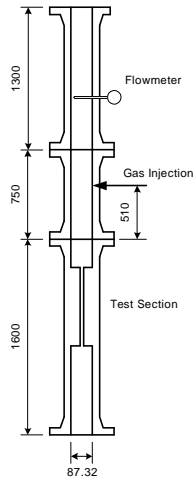
Test Run ID	Duration (sec)	Case	Sampling (sec)	Stagnation Conditions				N2 Gas Injection Conditions				Coolant Flow Rate			
				P_0 (MPa)	STD	T_0 (°C)	STD	m_g (kg/s)	STD	Temp. (°C)	STD	m_c (kg/s)	STD		
T1-70-266_20-S	72	A	20	7.236	0.107	264.95	0.614	0	0	0	0	0	0	15.435	0.188
		A	10	7.142	0.09	262.99	0.148	0	0	0	0	0	0	10.323	0.188
T1-70-266_00-S	72	B	20	7.17	0.069	262.65	0.223	0.054	0.009	99.32	5.115	9.011	2.218	10.922	0.118
		A	20	7.12	0.073	263.18	0.158	0	0	0	0	0	0	10.922	0.118
T1-70-266_00-S2	105	B	18	7.136	0.073	262.27	0.224	0.048	0.009	41	1.547	9.055	0.343	15.021	0.308
		C	15	7.114	0.041	279.99	0.436	0.209	0.002	26.39	0.73	7.671	0.107	15.021	0.308
		A	18	7.188	0.147	265.67	0.172	0	0	0	0	0	0	15.021	0.308
T1-70-266_20-S2	88	B	6	7.21	0.066	263.46	0.152	0.066	0.002	66.86	1.193	11.982	0.274	15.021	0.308
		C	11	7.244	0.055	263.64	0.146	0.112	0.009	53.539	2.295	10.413	0.261	15.021	0.308
		D	18	7.297	0.05	263.1	0.318	0.181	0.009	41.16	2.226	9.605	0.198	15.021	0.308
		A	13	10.045	0.047	264	0.163	0	0	0	0	0	0	23.367	0.163
T1-100-261_50-S2	55	B	7	10.078	0.045	262.32	0.261	0.064	0	58.32	1.581	20.148	0.344	15.021	0.308
		A	15	10.119	0.19	260.92	0.272	0	0	0	0	0	0	16.976	0.23
T1-100-291_20-S2	68	B	15	10.143	0.105	269.41	0.663	0.064	0.002	63.96	5.491	15.053	0.587	15.021	0.308
		C	9	10.174	0.028	267.49	0.604	0.149	0.004	42.45	1.964	12.893	0.08	15.021	0.308
		A	15	7.264	0.172	237.6	0.092	0	0	0	0	0	0	20.997	0.234
T1-70-236_50-S2	63	B	10	7.312	0.064	236.52	0.289	0.062	0.001	78.65	17.488	17.488	0.618	15.021	0.308
		C	7	7.309	0.008	234.98	0.251	0.136	0.009	73.54	1.469	13.884	0.054	15.021	0.308
		A	13	4.198	0.108	202.92	0.188	0	0	0	0	0	0	16.08	0.238
T1-40-200_00-S	107	B	11	4.202	0.045	202.09	0.223	0.054	0.001	71.77	2.578	12.562	0.4	15.021	0.308
		C	10	4.231	0.041	201.53	0.228	0.103	0.001	62.855	3.003	10.889	0.22	15.021	0.308
		D	10	4.288	0.02	201.38	0.121	0.188	0.001	36.83	1.349	8.949	0.164	15.021	0.308
		E	10	4.285	0.021	200.77	0.14	0.079	0.001	30.978	0.445	11.824	0.199	15.021	0.308
		A	17	4.441	0.062	245.42	0.092	0	0	0	0	0	0	9.867	0.124
T1-40-250_00-S	130	B	8	4.437	0.025	246.15	0.142	0.058	0	55.86	1.396	6.925	0.247	15.021	0.308
		C	10	4.444	0.023	247.09	0.244	0.142	0.001	46.503	1.635	5.863	0.217	15.021	0.308
		D	10	4.448	0.029	246.62	0.138	0.154	0.001	40.39	0.895	5.444	0.146	15.021	0.308
		A	15	3.763	0.061	231.12	0.182	0	0	0	0	0	0	10.675	0.154
T1-40-230_20-S2	150	B	6	3.788	0.027	230.87	0.192	0.063	0	78.32	2.598	7.223	0.405	15.021	0.308
		C	14	3.793	0.021	230.12	0.18	0.110	0.002	45.55	3.59	5.919	0.163	15.021	0.308
		D	5	3.801	0.028	229.65	0.193	0.077	0.001	36.63	1.43	6.624	0.339	15.021	0.308
		E	11	3.827	0.022	229.65	0.117	0.13	0.001	29.42	0.673	5.41	0.203	15.021	0.308
		F	17	3.831	0.022	229.08	0.172	0.146	0	24.95	0.802	5.475	0.201	15.021	0.308
		G	8	3.841	0.023	228.51	0.163	0.028	0	24.91	0.198	9.5	0.256	15.021	0.308
		A	20	10.131	0.015	300.54	0.17	0	0	0	0	0	0	12.272	0.127
T1-100-311_00-S2	74	B	9	10.145	0.022	306.93	0.252	0.066	0	51.96	2.394	10.98	0.16	15.021	0.308
		C	10	10.149	0.009	307.46	0.207	0.065	0	41.59	0.961	10.848	0.136	15.021	0.308
		A	14	7.253	0.227	236.49	0.121	0	0	0	0	0	0	21.217	0.388
T1-70-236_50-S4	62	B	10	7.256	0.096	236.7	0.354	0.064	0.004	76.34	3.204	15.867	0.719	15.021	0.308
		C	10	7.276	0.041	234.97	0.183	0.029	0.003	64.58	1.58	18.914	0.453	15.021	0.308
		A	20	10.25	0.012	360.84	0.508	0	0	0	0	0	0	12.471	0.11
T1-100-311_00-S3	78	B	15	10.253	0.02	360.17	0.229	0.187	0.004	33.73	2.319	10.079	0.048	15.021	0.308
		A	12	10.434	0.138	262.55	0.218	0	0	0	0	0	0	24.656	0.259
T1-100-261_50-S3	58	B	10	10.452	0.044	260.41	0.434	0.103	0.004	59.18	1.503	20.351	0.276	15.021	0.308
		A	10	10.142	0.158	289.52	0.391	0	0	0	0	0	0	17.377	0.322
T1-100-291_20-S4	72	B	10	10.13	0.119	268.5	0.25	0.095	0.001	30.1	0.815	14.077	0.435	15.021	0.308
		C	15	10.132	0.021	263.33	7.03	0.051	0	28.95	1.016	15.828	0.199	15.021	0.308



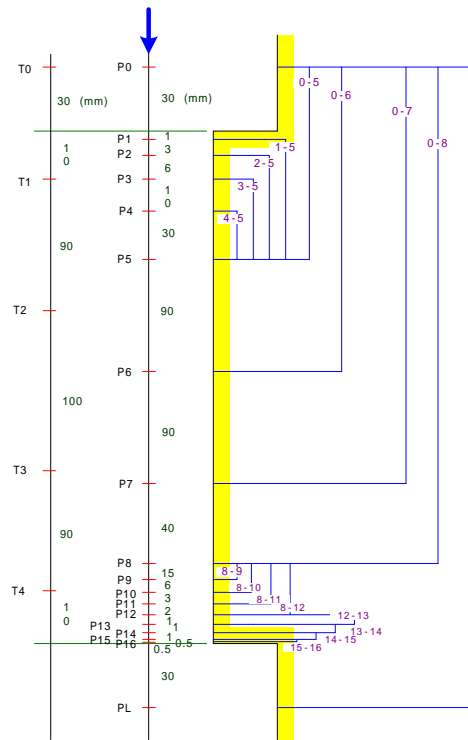
1. 가



2. (PV-110)

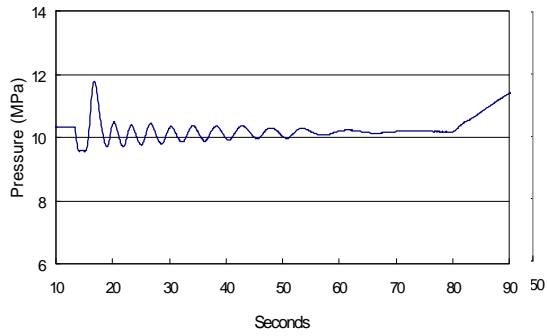


3. Test Section

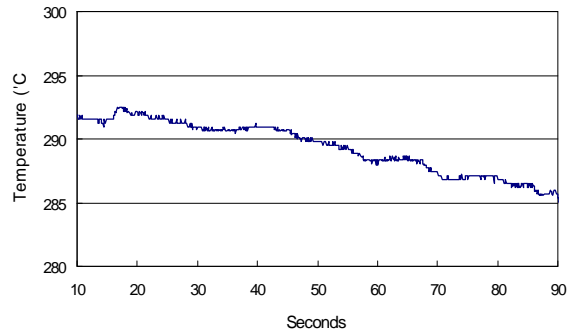


4. Thermocouple and Pressure Tap Locations at Test Section (ID=20, L=300 mm)

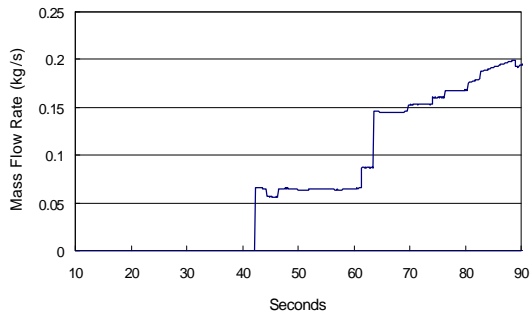
(a) Pressure Control at Pressure Vessel



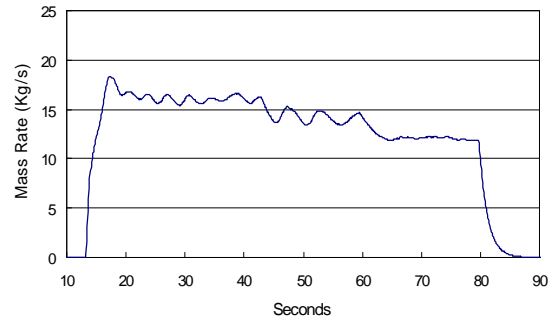
(b) Temperature Variation at Pressure Vessel



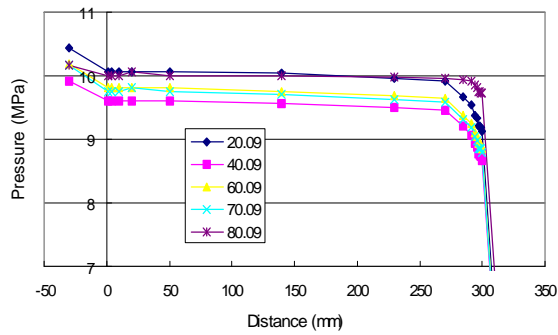
(c) N2 Gas Injection



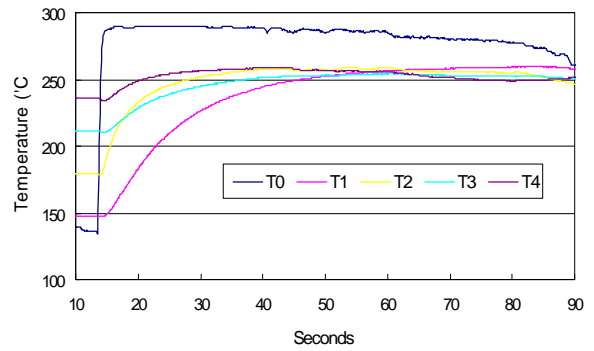
(d) Coolant Mass Flow Rate



(e) Pressure Distributions at Test Section



(f) Temperature Distributions at Test Section



5. 정상상태 임계유량 실험결과 (T1-100-291_20-S2)

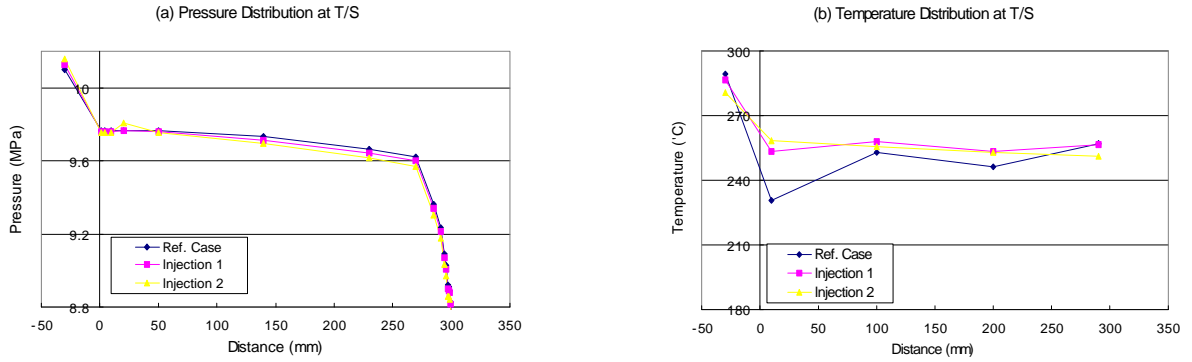


그림 6. Test Section 압력, 온도 분포 (T1-100-291_20-S2)

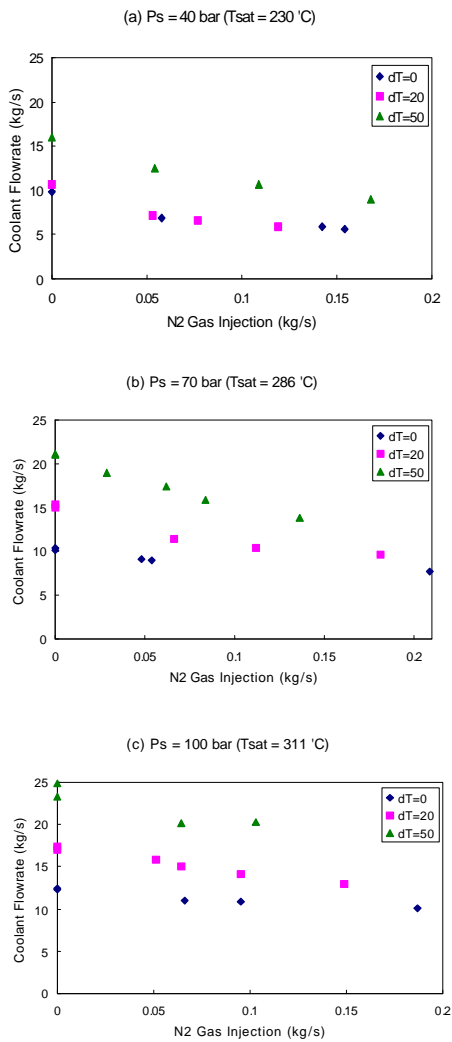


그림 7. 비응축가스 주입유량에 따른 냉각재 유량변화

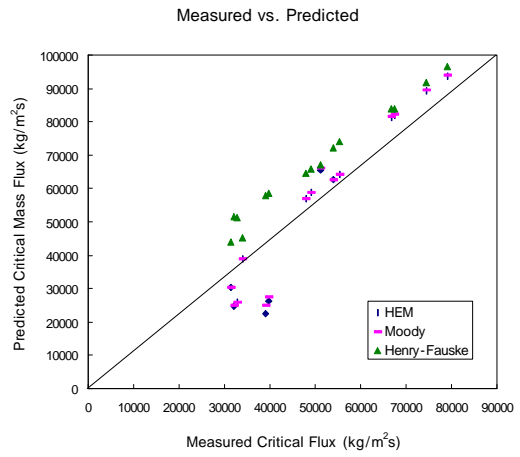


그림 8. 임계류 모델의 순수 임계유량 예측 결과

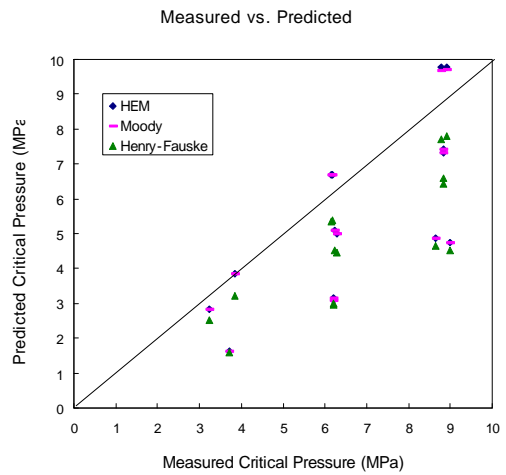


그림 9. 임계류 모델의 순수 임계압력 예측 결과