

비응축가스 이상유동 임계유량 실험장치 설계
**Design of the Test Facility of Two Phase Critical Flow
with Non-condensable Gas**

장석규, 김창희, 이성호, 박현식, 정장환

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

해수담수화 동력원 및 전력생산을 목적으로 개발되고 있는 SMART 일체형원자로의 안전성 검증을 위하여 비응축가스가 포함된 이상유동 임계유량 실험자료가 요구되었다. 임계유량 실험장치의 경제적 규모를 선정하기 위하여 보수적 임계유량 모델을 적용하여 설계 계산을 수행하였다. 실제 원자로 운전조건을 실험조건과 설계 계산을 근거로 비응축가스 이상유동 임계유량 실험장치를 설계/제작하였다. 실험장치는 방출압력용기를 중심으로 주순환계통, 질소가스 공급계통, 냉각재 방출계통 등으로 이루어지며 정상상태의 실험조건을 구현하기 위하여 일정압력 조건을 유지하는 압력제어밸브시스템이 설계/제작되었다. 또한 비응축가스 임계유량실험시 일정한 유량의 가스를 주입하기 위하여 유량제어밸브시스템을 설계/제작하였다. Test Section은 최대 직경 20 mm, 길이 1500 mm의 파이프까지 적용 가능하도록 하였으며 3000 mm 길이까지 확장 가능하도록 설계하였다. Test Section의 파단 형상은 파이프 외에 노즐, 오리피스, Slit 등 다양한 파단면에 대하여 실험이 가능하도록 설계하였다.

Abstract

The experimental data of two-phase critical flow with non-condensable gas was required for the safety verification of SMART reactor which is being developed for producing the fresh water from sea as well as electricity. The design calculation for the evaluation of the optimum size of the critical flow test loop was performed by applying the conservative critical flow models. Based on the actual reactor operating conditions and the results of the design calculation, the critical flow test facility was designed and constructed. This facility consists of main circulation line with pressure vessel containing coolant, N₂ gas supply line and coolant discharge line. The pressure control valve system which can be used to maintain the required pressure in steady state condition during the test was designed and installed. Also, the flow control valve system which can control the flow rate of the injecting non-condensable gas to the test section was designed and installed. In this test facility, the test section can be adopted up to the pipe of 20 mm inner diameter and 1500 mm length normally and also extended to the length of 3000 mm, if required. The critical flow tests for the various break

sections, i.e., nozzle, orifice and slit as well as the pipe configuration can be applied to this test facility.

1. 서론

SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor) 일체형원자로는 전력생산 외에 해수 담수화에 필요한 에너지 공급을 목적으로 연구소에서 개발하고 있는 피동안전개념을 도입한 새로운 개념의 중소형 원자로이다. SMART 일체형원자로는 개념적으로 안전성 확보를 위한 설계에 중점을 두으로써 대형냉각재상실사고(LB-LOCA)의 발생 가능성을 근원적으로 배제하였다. 따라서 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 방출되는 유체는 비응축 가스(N_2)를 다량 포함한 냉각수이며 파단부를 경계로 한 급격한 압력차로 인하여 임계류(critical flow)가 발생하게 된다. SMART원자로 배관 파단시 발생하는 비응축 가스가 포함된 이상유동 임계류 현상의 정확한 예측은 SMART원자로 안전해석에 중요한 입력 변수가 된다.

이상유동 임계류(two phase critical flow) 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 상(phase)에 대한 보존방정식(conservation equation)에 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 실험[4]들이 수행되었는데 주로 파이프, 노즐 그리고 오리피스에 대한 실험이 많으며 실제 파단 형태에 대한 실험이나 실제 원자로 크기에 대한 실험[5]은 드문 형편이다. 또한 이들 임계류 모델 및 관련 실험들은 순수 냉각수(degassed liquid)가 고온고압에서 방출될 때의 조건을 대상으로 한 것이다.

전술한 바와 같이 SMART 일체형원자로의 파단사고에서는 방출 냉각수가 다량의 N_2 가스를 포함하므로 정확한 임계유량을 예측하기 위해서는 비응축가스의 영향을 고려한 임계류 모델이 필요하다. 비응축가스 이상유동 임계류 모델은 현재 1.5 MPa 이하의 저압에서 Celata 등[6]이 제안한 실험 모델이 있으나 그 이상의 고압에 대해서는 모델 및 실험자료가 없으며 RELAP5 코드의 수정된 Henry-Fauske 모델도 검증이 되지 않아 사용되지 않고 있다. 따라서 SMART 일체형원자로의 소형냉각재상실사고를 정확히 해석하기 위해서는 원자로 운전조건에 적용할 수 있는 비응축가스를 포함한 임계류 모델 개발이 반드시 필요하다.

본 논문은 SMART 일체형원자로 운전조건에 적용할 수 있는 비응축가스 이상유동 임계류 모델을 개발하고 검증하기 위한 실험자료 생산을 위하여 현재 진행되고 있는 실험장치 설계에 대하여 언급하였다. 임계유량 실험장치는 일반적인 조건(degassed liquid)에서의 실험뿐만 아니라 비응축가스가 포함된 조건에서도 원자로 운전조건에서 방출 실험을 할 수 있도록 설계하였으며 정상상태의 실험조건을 구현하기 위하여 주입 비응축가스 유량제어 밸브시스템 및 압력제어 밸브 시스템을 설계/장착하였다.

2. 실험장치규모 선정

가. 실험요건

SMART 일체형원자로에서 발생할 수 있는 냉각재상실사고를 모의하고 이로부터 비응축가스가 포함된 임계유량 실험자료를 생산하기 위하여 다음과 같은 실험요건을 설정하였다.

- ▶ Break Size : 7 mm, 20 mm
- ▶ Stagnation Pressure : 7~20 MPa
- ▶ Inlet Subcooling : 0~60 °C
- ▶ N₂ Gas Flowrate : 0~0.5 kg/s

위 실험요건에 대하여 실험장치는 정상상태의 임계유량을 유지하도록 설계하였다.

나. 실험장치규모 선정

설정된 실험요건을 만족하는 실험장치의 적정 규모를 산정하기 위하여 여러 가지 실험조건에 대한 방출냉각재의 임계유량을 몇가지 임계유량 모델을 적용하여 계산한 결과 table 1에서 보는 바와 같이 Modified Henry-Fauske 모델이 가장 보수적으로 나타났다. 이를 근거로 파단 면적 및 실험지속시간의 몇가지 경우에 대하여 압력용기의 적정 체적을 table 2와 같이 산출하였다. 따라서 실험요건에 의한 최대유량 실험조건은 파단 직경 20 mm에 파단 입구 정체조건이 12 MPa, 과냉도 60 °C인 경우이며 이때의 정상상태 실험지속시간을 30초로 정하고 압력용기의 체적을 1.3 m³으로 결정하였다. 정해진 압력용기 체적으로부터 냉각수 가열 및 가압을 위한 히터, 순환펌프, 각종 고압용기 등 실험장치들의 사양이 결정되었다.

3. 실험장치 설계

가. 주순환 계통

주순환 계통은 냉각재가 채워지는 압력용기를 중심으로 냉각재를 순환시키면서 가열/냉각 및 가압하는 순환 배관이 포함되는 계통으로 기본적인 설계기준은 설계압력 17.2 MPa, 설계온도 353 °C를 적용하였다. 압력용기의 형태는 long-slim형 원통 구조로 수면의 표면적을 작게 하여 가스가 용해될 가능성을 줄이고 수위의 요동을 최소화하여 수위측정의 신뢰성을 높이도록 하였다. 냉각재 순환가열 시 혼합효과를 높이기 위하여 배관 출구를 수위변화에 맞게 최적화하고 역순환 되도록 설계하였다. 압력용기 내부 용적을 경제적으로 사용하기 위하여 test section을 용기 하단에 설치하도록 하였고 가열 히터를 외장형으로 하였다. 압력용기 상단에 냉각재 가압을 위하여 N₂ 가스 공급 배관을 설치하고 과도한 압력을 완화하기 위하여 감압 밸브를 장착하였다. 순환펌프는 고온 고압에서 운전 신뢰성이 높은 canned 모터 펌프를 선정하였으며 실험온도를 정확히 맞추기 위하여 cooler를 장착하였다. 임계유량 실험장치의 전체적인 개략도는 figure 1과 같다.

나. N₂가스공급 계통

본 실험장치에서 N₂가스는 냉각재를 실험조건에 압력으로 가압하는 수단으로 사용됨과 동시에 비응축가스 임계유량 실험을 위한 비응축가스 주입 매질로도 이용된다. N₂가스를 저장 및 공급

하는 N₂가스 공급계통은 주순환 계통보다 고압을 유지하여야 하므로 기본적인 설계기준으로 설계 압력 25 MPa, 설계온도 150 °C를 적용하였다. N₂가스 저장용기는 압력유지용으로 1.8 m³ 용적 2개를 설치하였으며 비응축가스 주입용으로 1.4 m³ 용적 1개를 설치하였다. 이들 N₂가스 저장용기는 가장 N₂가스 소모가 많은 경우의 실험조건을 기준으로 정상상태의 임계유량 실험이 충분히 가능하도록 설계하였다. N₂가스 저장용기 내의 압력을 높이기 위하여 공압을 이용하여 작동하는 가스 booster를 설치하였으며 공압을 생성하기 위하여 공기 저장용기 및 공기압축기를 설치하였다. 저장용기 내 N₂가스의 공급은 N₂가스 생산업체로부터 공급받아 12 MPa까지 일차 충전하고 가스 booster와 compressor를 이용하여 20 MPa까지 가압하여 저장용기에 고압 충전한다. 압력유지용 저장용기에서 냉각제 압력용기까지 연결되는 압력공급 배관에는 압력용기의 시스템 압력과 연동하여 공급압력을 제어하는 4-train 압력제어밸브시스템이 설치되었다. 주입가스 저장용기로부터 test section 전단까지 설치되는 주입가스 공급배관에는 주입가스의 온도를 실험온도로 가열하기 위하여 rod 히터 및 trace 히터가 장착되었다. 또한 주입가스의 유량을 제어하기 위하여 질량유량계와 연동하는 4-train 유량조절밸브시스템을 설치하였다.

다. 냉각제 방출 계통

냉각제 방출계통은 냉각제 압력용기 하단 연결배관에서부터 test section을 거쳐 냉각제 방출 수조로 이어지는 계통이다. Test section 전단에는 방출유량을 측정하기 위한 유량계 배관이 설치되며 이어서 비응축가스 주입구가 설치된 기/액 혼합배관부가 연결되어 있다. 비응축가스 주입배관과 연결된 기/액 혼합배관부는 가스와 냉각제가 균등하게 혼합되도록 주입각 60°, 혼합거리 8.6(L/D)으로[7] 설계/제작하였다. 따라서 실험 목적에 따라 비응축가스 주입 유량을 조절하여 주입함으로써 다양한 조건의 임계유량 실험을 수행할 수 있도록 하였다. Test section 설치는 직경 20 mm, 길이 1500 mm까지 설치할 수 있는 공간을 확보하였으며 파이프 외에 노즐, 오리피스, Slit 등 다양한 형상의 과단면에 대한 실험이 가능하도록 설계하였다. Test section 후단에는 확대관을 연결하고 quick opening 밸브를 설치하여 실험전 닫힌 상태로 유지하다가 실험시작 시점에서 개방하여 임계유량 실험을 수행한다. 방출된 고온 냉각제 및 가스는 방출수 저장용기에서 냉각수와 혼합되어 60 °C 이하의 온수로 냉각되고 발생 증기는 외부 방출된다. 방출수 저장용기는 고온 냉각제를 충분히 냉각시키기 위하여 17 m³의 원통 수조로 설계하였으며 증기 방출을 위하여 수조 상단에 방출 배관을 설치하였다.

라. 계측 및 제어계통

(1) 계측

실험장치 중 냉각제 압력용기에서의 수위, 유량, 온도 및 압력 계측은 실험조건 설정과 관련하여 중요하다. Long-slim형 압력용기에서의 축방향 온도구배는 최대 1 °C 이내로 제한되는데 이를 감시하기 위하여 6개 지점에 대한 온도편차 측정을 위하여 압력용기 상단플랜지로 삽입, 설치할 수 있는 일체형 열전대 spool을 제작하였다. 압력용기의 수위 측정은 차압식과 전자파식을 보완적으로 사용하며 필요시 유량 측정용으로 대체할 수 있다. 압력용기 하단에 장착하는 유량계 장착 배관은 임계유량 측정용으로 냉각수 정체조건의 왜곡을 최소화하기 위하여 압력손실이 적은 Probar type 유량계를 사용하며 안정된 정상상태 실험조건하에서는 유동 왜곡을 없애기 위하여

유량계배관을 생략하고 수위측정계로 유량측정을 대신할 수 있다. Test section에서의 압력 측정 은 길이방향에 따라 측정위치에 직경 0.3 mm의 압력탭을 가공하여 단자대의 압력측정기에 튜브 로 연결하였다. 또한 온도측정은 test section 내벽온도 측정을 위한 측정구를 내고 열전대를 삽입 하였다. 온도, 압력 측정신호는 control room의 Data Acquisition System에 수집/처리된다.

(2) 실험장치 제어

실험 장치의 제어에는 크게 실험전 가열/가압 운전과 실험시 압력 및 N₂가스 주입 유량제어 로 나눌 수 있다. 실험전 가열 및 가압 운전은 과냉각상태를 유지하면서 실험 조건에 도달할 때 까지 온도와 압력을 자동으로 제어하는 것을 말한다. 이때, 온도 상승율은 실험장치에 열충격을 주지 않는 범위(50 °C/hr) 내에서 이루어지도록 하며, 비등을 방지하기 위해 포화압력에 여유압력 을 고려한 압력을 유지하면서 실험 조건 온도까지 상승시키도록 하였다. 이 온도 상승 과정에서 비등과정을 한번 거쳐 유체의 응축 가스를 제거한다. 실험온도 및 압력에 도달하면 압력용기내 온 도 구배가 없도록 유체를 순환시키고, 필요에 따라 실험 조건을 유지하기 위해 온도를 제어하고, 압력의 가압 또는 방출을 통해 일정 압력을 유지시키도록 하였다. 이 운전에서는 figure 2와 3과 같은 루프제어 개념을 따라 온도와 압력을 제어한다.

실험시 압력용기내의 압력은 설정 실험조건으로 유지되어야하므로 이를 위하여 넓은 압력범위 에서 실시간 압력 조절 성능을 갖는 압력조절밸브시스템(Pressure Control Valve System)을 구성 하였다. 다양한 압력범위에 따라 설계된 밸브유량계수(Cv=0.09~19.35)를 고려하여 4-train(1-1/2", 1", 3/4", 1/2") Modified Equal % Globe Type 밸브를 사용하였으며 제어기는 압력감지 공압구동 controller를 사용하였다. 또한, 비응축가스 임계유량 실험의 경우, Test Section에 설정된 일정유 량의 N₂ 가스를 주입하기 위하여 유량계와 연동하여 유량을 제어하는 유량조절밸브시스템(Flow Control Valve System)을 구성하였다. 유량범위에 따라 밸브유량계수(Cv)는 0.004~6.0의 범위를 가지며 이에 따라 4-train(1", 3/4", 1/2", 3/8") Modified Equal % Globe Type 밸브 시스템을 구 성하였다. 제어방식은 유량계의 유량감지 전류에 의한 모터구동 controller를 채택하였다.

실험후 실험장치의 냉각은 압력용기 내의 냉각재가 모두 방류된 상태이므로 대기중에서 자연냉 각에 의해 이루어지도록 설계하였다.

4. Test Section

Test section은 원자로 냉각재상실사고시 파단면을 모의하는 부분으로 본 실험장치에서는 파이 프 직경 20 mm, 길이 1500 mm까지의 실험대를 기본적으로 구성할 수 있으며 유량계배관을 생략 할 경우 3000 mm까지 test section 구간을 확대할 수 있다. 따라서 확보된 설치 공간내에서 파이 프 외에 노즐, 오리피스, slit 등 다양한 형상의 파단면에 대한 실험이 가능하도록 설계하였다. 임 계유량 실험시 측정되는 측정변수는 임계유량 외에 test section 구간을 따라 온도 및 압력 분포를 측정한다. 본 실험장치에서는 위 측정변수 외에 γ -densitometer를 이용한 기포율 측정을 시도하 였다. 기포율 측정을 위하여 직경 10 mm, 두께 3 mm의 파이프 형상 test section을 대상으로 γ - densitometer를 설계/제작하였다. γ 선원은 CO₆₀으로 30 mCi급이며 검출기는 NaI scintillation detector를 사용하였다. Figure 4는 제작된 γ -densitometer의 측정 개념을 나타낸 그림이다.

5. 결 론

SMART 일체형원자로의 소형냉각재상실사고시 임계유량 실험을 수행하기 위하여 실제 원자로 운전조건에서 비응축가스의 영향을 모의할 수 있는 이상유동 임계유량 실험장치를 설계/제작하였다.

정상상태의 실험조건을 구현하기 위하여 방출 압력을 실시간 보충하여 일정한 실험압력을 유지하기 위한 압력조절밸브시스템을 설계/제작하였다. 또한 비응축가스 임계유량실험을 위하여 test section 전단에 비응축가스를 일정하게 주입할 수 있도록 유량조절밸브시스템을 설계/제작하였다. 실험장치의 구성은 주순환계통, 질소가스 공급계통, 냉각재 방출계통으로 구성된다.

Test section은 최대 직경 20 mm, 길이 1500 mm의 파이프까지 적용 가능하도록 설계하였으며 3000 mm 길이까지 확장 가능하도록 하였다. Test section의 파단 형상은 파이프 외에 노즐, 오리피스, slit 등 다양한 형상이 가능하도록 설계하였다.

본 실험장치로 구현할 수 있는 임계유량 실험 유형은 다음과 같다.

- ▶ 실험가능 최대 정체압력 : 12 MPa
- ▶ 실험가능 최대 과냉도 : 60 °C
- ▶ 최소 정상상태 지속시간 : 30 sec.
- ▶ 수행가능 실험유형
 - 순수유체 이상유동 임계유량실험
 - 비응축가스 이상유동 임계유량실험
 - 정상상태 임계유량실험
 - 비정상상태 임계유량실험
 - 포화상태 임계유량실험
 - 과냉상태 임계유량실험

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 phenomenon 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] "Critical flow modelling in nuclear safety", A State-of-the-Art Report by a group of experts of the NEA Committee on the safety of nuclear installations, June 1982
- [5] Ericson, S. et al., "The Marviken full-scale critical flow tests interim report: results from test 4, A, B" Atomenergi Sweden Report MXC-204, 1979
- [6] 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, pp175-187, 1988
- [7] Mullinger, P. J., Chigier, N. A., "The design and performance of internal mixing multijet twin fluid atomizers", J. of Institute of Fuel, Vol. 47, pp. 251-261, 1974

Table 1. Critical Flow Rates according to the Inlet Stagnation Conditions

Stagnation Pressure(MPa)	Inlet Subcooling(°C)	Quality	Mass Flow Rate(kg/m's)			
			HEM	Moody	Henry-Fauske	Modified Henry-Fauske
12	o	0.2	28258	36720	37382	37274
	10	0	46923	46966	67402	88917
	60	0	104516	104909	106918	112660
9	0	0.2	21867	30352	25631	28118
	10	0	42536	42594	60360	79504
	60	0	93839	94378	96097	100207
3	0	0.2	7990	13393	9310	9584
	10	0	29068	29170	37822	48230
	60	0	59858	61306	62261	63070

Table 2. Required Volume according to the Inlet Stagnation Conditions
(based on the Modified Henry-Fauske Model)

Stagnation Pressure(MPa)	Inlet Subcooling(°C)	Quality	Pressure Vessel Volume (m ³)			
			ID = 7 mm $\Delta t = 60$ sec	ID = 10 mm $\Delta t = 60$ sec	ID = 15 mm $\Delta t = 60$ sec	ID = 20 mm $\Delta t = 30$ sec
12	o	0.2	0.131	0.268	0.603	0.536
	10	0	0.300	0.612	1.377	1.224
	60	0	0.331	0.675	1.520	1.351
9	0	0.2	0.092	0.188	0.422	0.376
	10	0	0.252	0.514	1.157	1.029
	60	0	0.284	0.579	1.303	1.159
3	0	0.2	0.027	0.055	0.124	0.110
	10	0	0.133	0.272	0.611	0.544
	60	0	0.163	0.332	0.747	0.664

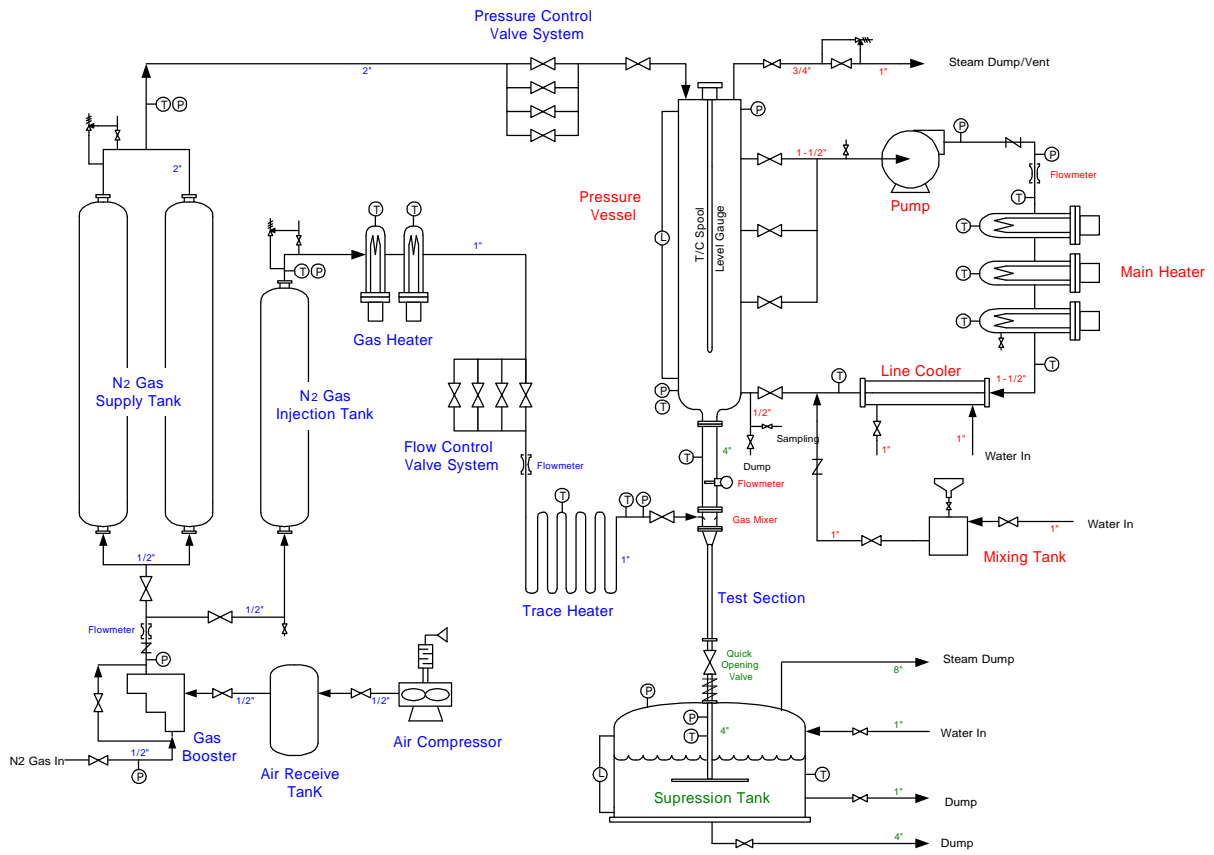


Figure 1. Schematic Diagram of the Critical Flow Test Loop

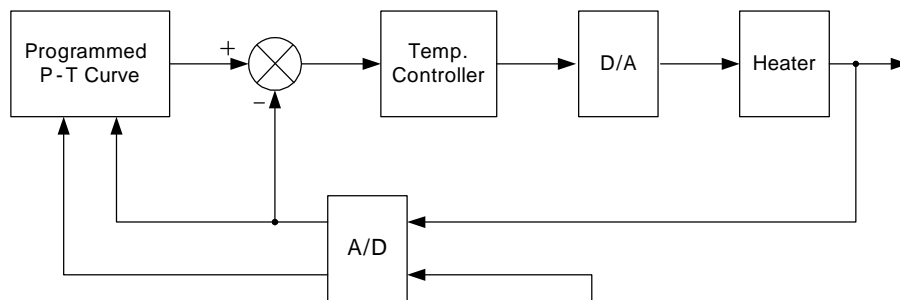


Figure 2. Conceptual Logic Diagram of the Temperature Controller in the Pressure Vessel

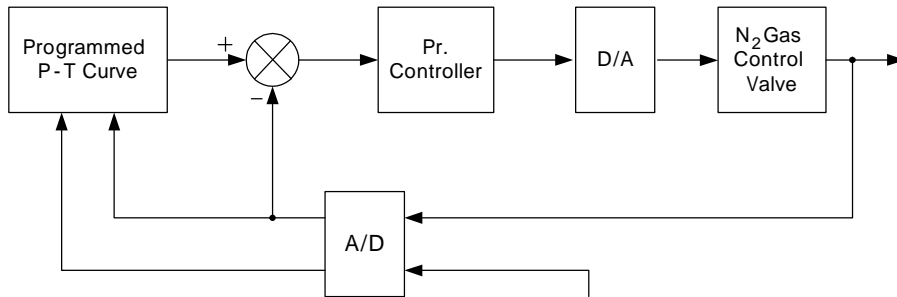


Figure 3. Conceptual Logic Diagram of the Pressure Controller in the Pressure Vessel

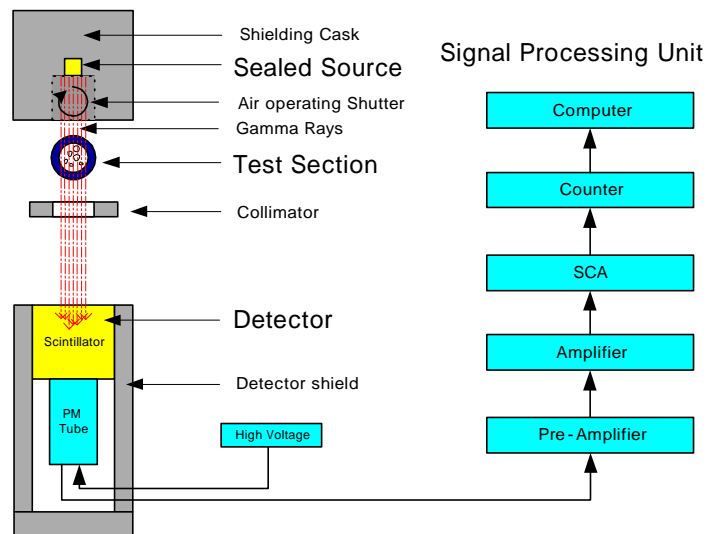


Figure 4. Schematic Diagram of γ - Densitometer