

파이로 Mock-up 시설 아르곤 설비 설계

■ 홍 동 희 / 한국원자력연구원, ndhhong@kaeri.re.kr

파이로 Mock-up 시설 아르곤 설비 개요

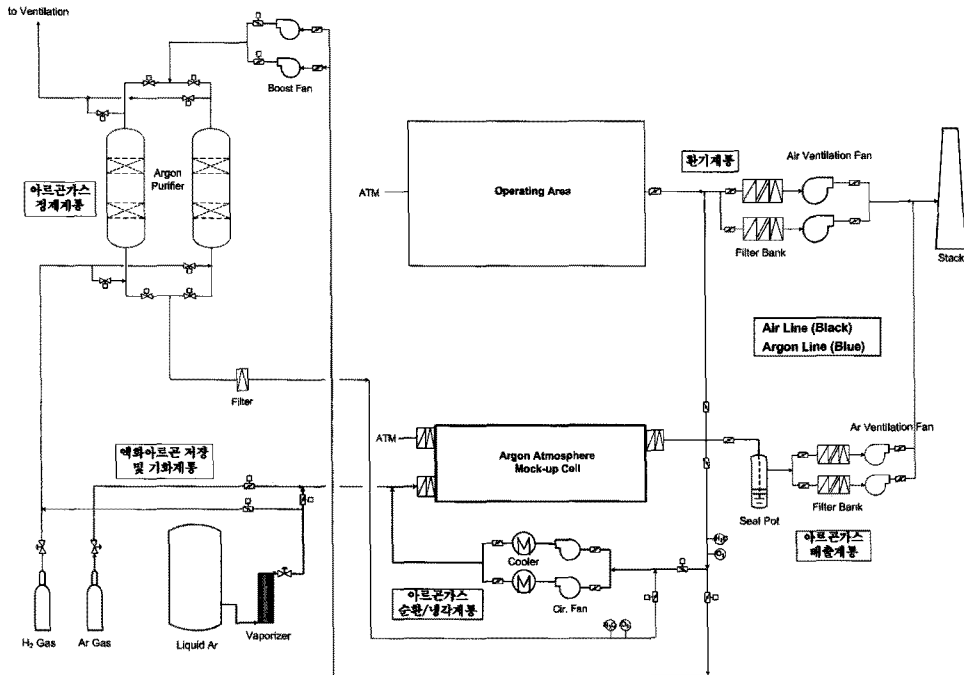
파이로 Mock-up 시설 내에 설치되는 셀은 파이로 공정에서 취급되는 물질특성으로 인해 셀 내부를 아르곤가스를 이용하여 불활성 분위기로 유지하여 셀 내 산소 및 수분 농도를 일정 수준(55 ppm) 이하로 제어하며, 파이로 공정 반응기 내부로도 반응을 위한 분위기를 제어하기 위하여 아르곤 가스가 공급된다.

일반적으로 불활성 분위기를 유지하기 위한 아르곤 설비는 소규모 Glove Box의 경우는 One-through 방식으로 적용하나 대형 Glove Box나 핫셀의 경우는 경제적이며, 효율적인 운영을 위하여

순환(Circulation)방식을 적용한다.

불활성 분위기를 효율적으로 유지하기 위해서는 셀 내부로 외부 공기 유입으로 인한 산소와 수분 농도의 증가를 억제하기 위하여 셀 내부 압력을 외부 기압보다 높게 유지하는 것이 일반적이나 방사성물질을 취급하는 시설의 경우는 외부로 방사성물질을 누출 및 확산을 방지하는 것이 우선적으로 고려되어야 하므로 셀 내부 압력을 항상 부압(-)으로 유지해야 하며, 이로 인해 보다 엄격한 기밀성 확보가 셀 제작에 중요한 요소이다.

파이로 Mock-up 시설에 설치되는 셀은 불활성 분위기 유지를 위하여 아르곤가스 시스템을 갖추게 된다. 아르곤가스 시스템 설비의 계통은 그림 1



[그림 1] 아르곤 설비 계통 구성 개념도

과 같이 액화아르곤 저장 및 기화계통, 셀 내 온도 유지를 위한 아르곤가스의 냉각 및 순환 계통, 셀 내 산소 및 수분 제거를 위한 아르곤가스 정제계통, 셀의 압력조건을 안정적으로 유지하고, 과압조건 및 외부로부터 공기의 역류로 인한 유입을 방지하기 위한 아르곤가스 배출계통 등으로 구성되며, 그림 2에 표기된 개념도와 같이 설치된다. 그리고 아르곤가스 배출설비와 셀 내 장비의 유지보수를 위하여 셀 내부 출입이 불가피한 경우 작업이 가능한 공기분위기로 전환하는 경우 파이로 Mock-up 시설 환기계통을 통하여 배출되도록 연계하여 계통을 구성하였다.

셀의 불활성 분위기 유지를 위한 아르곤가스 시스템 설계를 위하여 설정한 설계기준으로 셀 내부 공간체적을 1,200 m³, 부압조건 -200 mmAq, 셀 내 산소와 수분농도 제어기준을 각각 15 ppm과 40 ppm으로 설정하고, 셀의 누설량(Leak Rate)은 셀 체적의 0.02 %/day, 셀 내 온도는 25 ~ 40℃를 기준하였다. 그리고 셀 초기 운전시 불활성 분위기도달시간을 최대 48시간을 기준으로 초기 아르곤가스 Purging을 시작하여 셀 내부가 200 ppm이 되면 Purge를 중단하고 정화기를 가동시켜 셀 분위기 기준조건에 도달할 수 있도록 설계되었다.

아르곤설비 계통별 설계 개요

액화아르곤 저장 및 기화계통

액화아르곤 저장 및 기화계통은 액화된 상태로 저장된 아르곤 가스를 셀 내로 공급하는 계통으로

옥외에 설치되며, 그림 3의 상세계통도와 같이 액화아르곤 저장조 및 실린더, 아르곤 기화기, 아르곤가스 공급압력 제어밸브 및 안전밸브, 그리고 배관 및 계측제어장비 등으로 구성하였다. 셀 전체적이 1,200 m³이므로 전체 1회 충전소요시간을 약 4시간으로 고려하여 설계되었으며, 액화아르곤 저장 및 기화계통 주요장비들의 재원은 다음과 같다.

(1) 액화아르곤 저장조

- 수량 : 1대
- 용량 : 3 m³
- 형식 : 수직 원통형, 진공 단열 이중 용기형

(2) 알곤 기화기(Vaporizer)

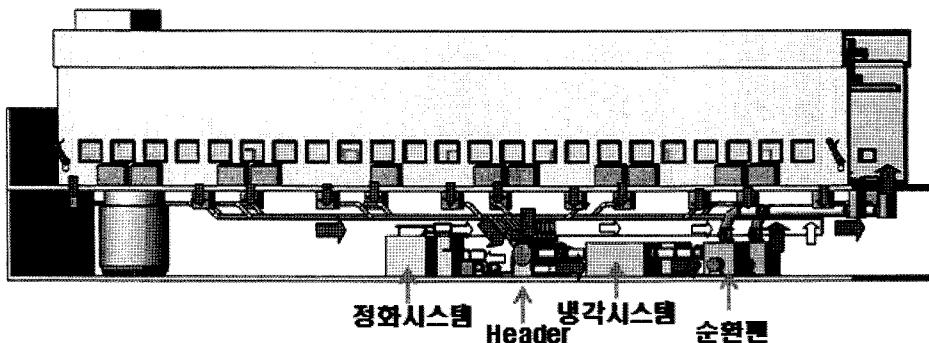
- 수량 : 1대 × 100%
- 용량 : 320 m³/hr(알곤가스)
- 형식 : Ambient Temp. Vaporizer

(3) 액체알곤 실린더(공정장치 공급용 및 Stand-by)

- 수량 : 3대
- 용량 : 170 L/대
- 기화기 내장 형태

아르곤가스 정제계통

높은 부압조건으로 유지되는 셀에서 누설 등의 원인으로 외부의 공기가 유입되는 경우 셀 내부 아르곤 분위기가 공기 혼입으로 기준조건 이하로 떨어지게 된다. 이 경우 아르곤가스 공급시스템을 통하여 지속적으로 아르곤가스를 공급하고 배출구를 통하여 배출하면서 셀의 아르곤 분위기 기준조건을 제어할 수는 있으나 아르곤가스 소모에 따른 비용이 과다 할 뿐 만 아니라 방사성 물질의 외부



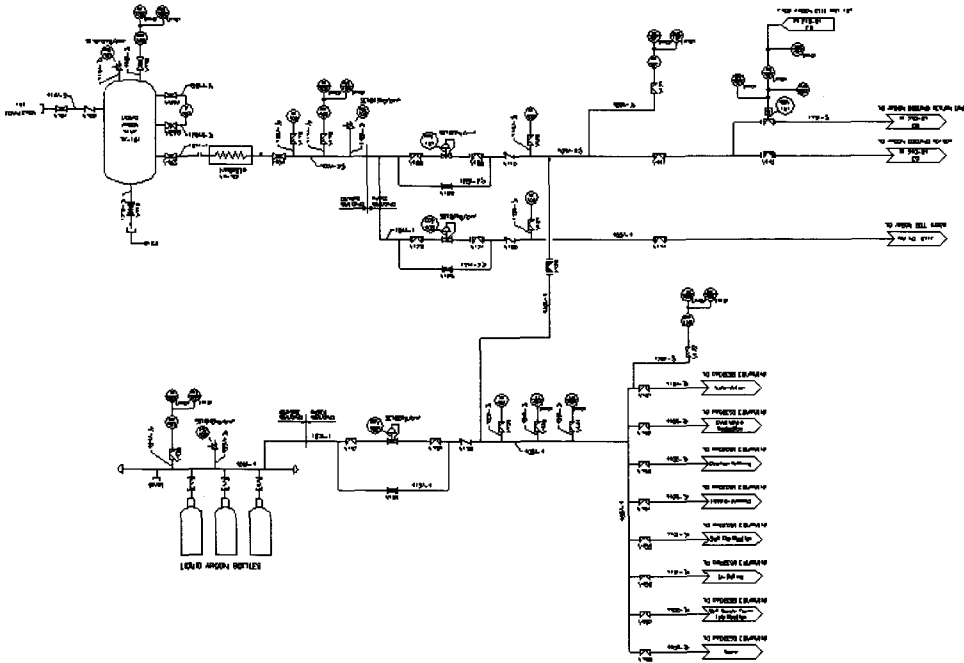
[그림 2] 아르곤 설비 파이로 Mock-up 시설 설치 개념도



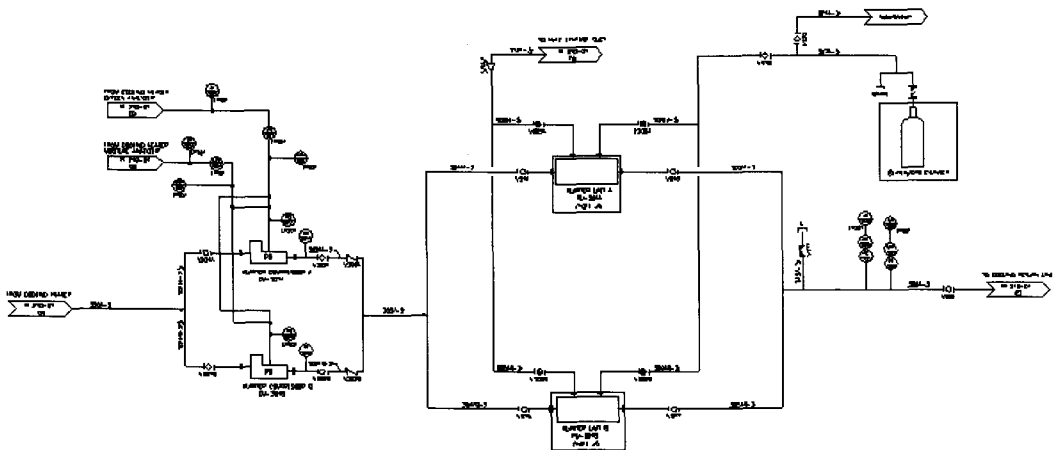
누출 등의 문제점이 발생 할 수 있다. 따라서 아르곤가스의 순도가 기준조건 이하로 아르곤가스 정제시스템 통하여 정제한 후 다시 셀 내부로 순환되도록 그림 4와 같이 아르곤가스 순환 Compressor, 정제장치, 산소 및 수분 계측장비와 배관 및 계측

제어장비 등으로 구성하였다.

아르곤가스 정제장치 설계를 위하여 아르곤가스 초기 충전 시 아르곤가스의 산소 및 수분농도를 200 ppm상태에서 12시간 이내에 55 ppm으로 저감시킬 수 있도록 기준을 설정하여 제염계수



[그림 3] 액화아르곤 저장 및 기화계통 계통도



[그림 4] 아르곤 정화계통 계통도

(Decontamination Factor)가 99인 정화기를 기준으로 아래의 식에 의해 정화유량을 계산하였으며, 설계 여유를 감안하여 정화장치 용량을 200 m³/h로 산정하였다.

$$Q = -\frac{1200m^3}{0.99 \times 12h} \times \ln \frac{55 ppm}{200 ppm} = 130m^3/h$$

여기서, Q = 정화유량

V_R = 셀 체적 (1200 m³)

c = 정화후의 셀 오염도(55 ppm)

C₀ = 초기 충전시 셀 오염도(200 ppm)

t = 시간 (12시간)

그리고 아르곤 정화계통 주요장비들의 재원은 아래와 같이 결정되었다.

(1) 정화 Compressor

- 수 량 : 2대 × 100%

- 용 량 : 200 m³/hr

- 형 식 : 원심형

- 정압 : 10 kg/cm²

(2) 정화기

- 수 량 : 2유닛 × 100%

- 유닛 당 Column 수량 : 2대 × 100%

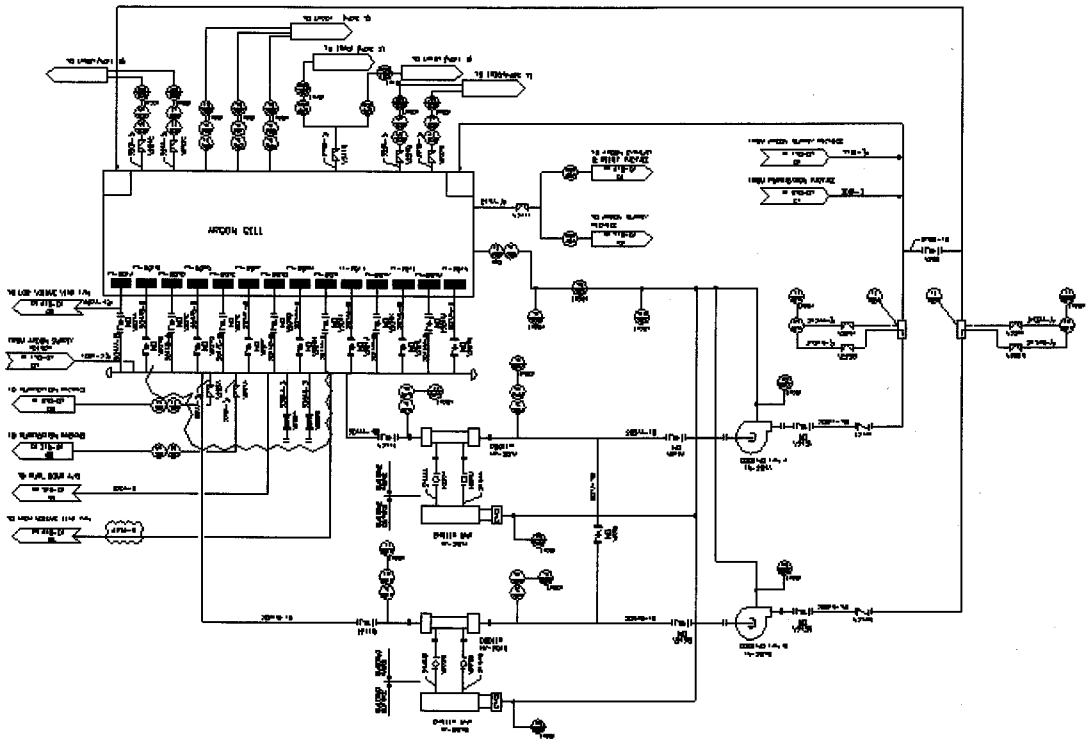
- Column 당 용량 : 200 m³/hr

- 형 식 : 축매/ 흡착방식

- 정제능력 : H₂O < 0.5 ppm, O₂ < 0.5 ppm

아르곤가스 냉각 및 순환계통

셀 내에 설치되는 공정장치들은 반응온도조건인 500 ~ 1300℃의 고온으로 유지하기 위하여 가열기가 사용되며, 조명을 위하여 백열등을 지속적으로 사용함으로써 셀 내부의 온도가 상승한다. 셀 내부 온도의 급격한 상승은 셀 압력을 상승 시킬 뿐만 아니라 셀에 설치된 설비물의 손상을 초래할 수 있다.



[그림 5] 아르곤가스 냉각 및 순환 시스템 계통도



셀 내 압력 변화를 일으키는 주요 인자는 셀 내부 온도 상승, 외기 기온과 기압 상승에 의한 변화 등이 있게 되는데, 이 중 외기 조건 변화에 의한 압력 변화 요인은 크지 않다. 따라서 셀 내의 일정한 부압 유지를 위하여 우선적으로 고려하여야 할 사항은 셀 내부에서 발생하는 열량을 냉각하여 순환함으로써 셀 내부 온도 및 압력을 일정하게 유지하는 것이다.

이를 위한 파이로 Mock-up 시설의 아르곤가스 냉각 및 순환계통은 그림 5와 같이 구성되었다. 아르곤가스 냉각 및 순환계통은 셀에서 HEPA Filter를 거쳐 나오는 분기관들을 연결하는 Header와 냉각기, 순환팬과 냉각된 아르곤가스를 셀로 공급하는 닥트배관 및 이를 제어하기 위한 계측제어장비 등으로 구성된다.

불활성분위기 셀 내 열원에서 발생하는 열량은 약 80 kW로 설정하였으며, 냉각장치 2대를 운전하는 것을 기준으로 아래 식에 의해 각 냉각장치 냉각유량은 6,000 m³/h로 설계하였다.

$$\dot{m} = \frac{H}{C\Delta T} = \frac{80 \times 1000 \text{ j/s}}{521.6 \text{ j/kg}^\circ\text{C} \times 30^\circ\text{C}} = 5.11 \text{ kg/s}$$

여기서, H: Cell 내부 발생 열량 (80 kW)

\dot{m} : 질량유량(kg/s)

c: Argon 가스 27°C에서의 정압 비열(521.6 j/kg°C)

Δt : 냉각기를 통한 온도 차(40°C - 10°C = 30°C)

\dot{m} 는 질량 유량으로 이를 체적유량으로 환산하면 냉각에 필요한 유량은 12,000 m³/h로 계산된다.

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho_{Ar}} = \frac{5.11 \text{ kg/s}}{1.623 \text{ kg/m}^3} = 3.15 \text{ m}^3/\text{s} = 11.300 \text{ m}^3/\text{h} \approx 12000 \text{ m}^3/\text{h}$$

아르곤가스 배출계통

아르곤가스 배출계통은 셀 내부에 과압이 형성되거나 과도한 부압이 형성되는 경우 셀 구조물의 안전성 확보를 위하여 설치되며, 그림 6의 계통도와 같이 대용량 배기팬, 소용량 배기팬, 배기용 Seal

pot, R/V Seal pot, 릴리프 밸브, 배관 및 관련 계측기 등으로 구성되어 있다.

대용량 배기팬은 초기에 아르곤 셀을 건설 한 후에 셀에 아르곤을 충전 할 경우와 시스템 운전 중에 고장이 나거나 유지보수를 위하여 아르곤 분위기를 깨고 유지보수 작업을 완료 한 후에, 셀 내부에 아르곤 가스를 재 충전 할 때에 사용하며, 소용량 배기팬은 정상운전 중 아르곤 셀 내의 압력이 -12 mmAq에 도달하면 아르곤셀의 압력을 낮추기 위해 아르곤 가스를 강제 배출하기 위하여 사용한다.

Hot cell 내부 배기구에는 HEPA filter를 설치하고, 소용량 배기팬을 통하여 아르곤가스가 배출된 후에 외부공기의 셀 내 유입을 방지하기 위하여 seal pot가 설치되며, 셀 외부에도 HEPA filter가 설치되어 오염물질이 외부로 유출 되지 않도록 하였다.

아르곤 셀은 항상 부압을 유지하기 위하여 압력 조절장치로 압력이 조절되며 셀 내부에 과도하게 압력이 상승하면 Relief Valve가 열리면서 압력 상승을 방지하고, 냉각시스템의 오작동에 의하여 압력이 과도하게 떨어지면 Relief Valve가 열리면서 외부공기가 유입되어 셀을 보호한다.

이에 따른 아르곤가스 배출계통 주요장비들의 재원은 다음과 같다.

(1) 대용량 배기팬(High Volume Vent Fan)

- 수 량: 1대 × 100%

- 용 량: 350 m³/hr

- 형 식: 원심형

- 정압: 180 mmAq

(2) 소용량 배기팬(Low Volume Vent Fan)

- 수 량: 2대 × 100%

- 용 량: 60 m³/hr

- 형 식: 원심형

- 정압: 270 mmAq

(3) Vent Seal Pot

- 수 량: 1대 × 100%

- 재 질: 스테인레스강

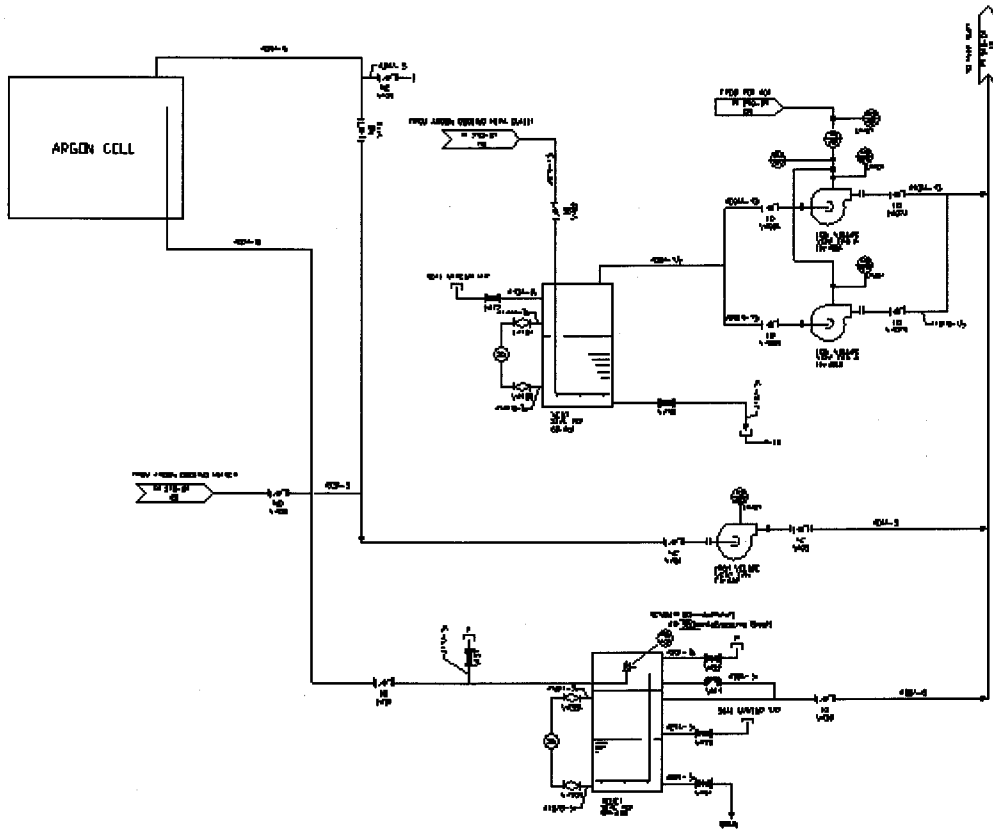
- 설계압력: 1 kg/cm²

(4) Relief Seal Pot

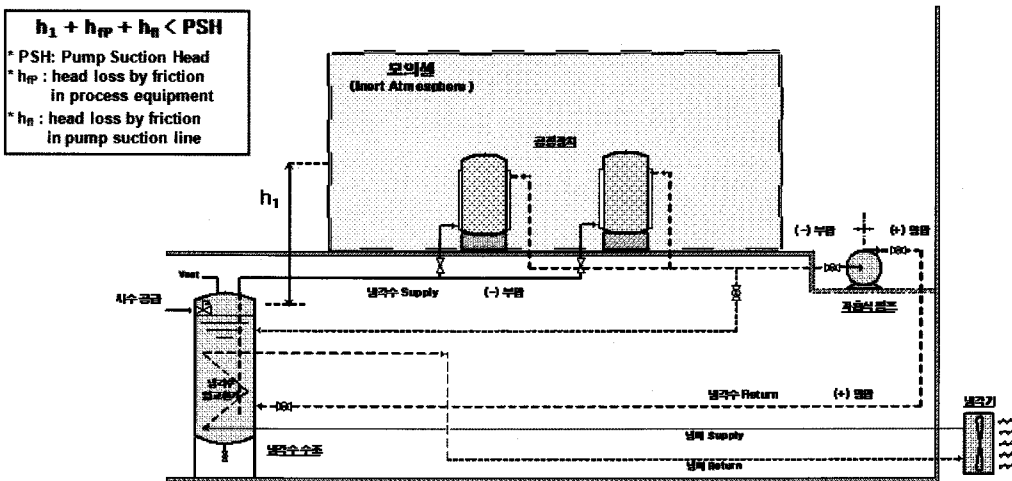
- 수 량: 1대 × 100%

- 재 질: 스테인레스강

- 설계압력: 1 kg/cm²



[그림 6] 아르곤 가스 배출시스템 계통도



[그림 7] 셀 내부 공정장치용 냉각수 공급 계통도



(5) Pressure Relief Valve

- 수 량 : 1대 × 100%
- 형 식 : 직동식(Direct Acting Type)
- 작동압력
- ※ 셀 고압시 : 차압 90 mmAq
- ※ 셀 저압시 : 차압 280 mmAq

셀 공정장치 냉각수 공급계통

셀 내에 설치되는 공정장치로 공급되는 냉각수는

만일의 경우 배관 누설이 발생하면 냉각수가 방출되어 아르곤 분위기의 제어조건을 저해하게 된다. 따라서 셀 내로 공급되는 냉각수 계통은 별도로 분리하여 냉각 루프 배관 내 압력이 부압(-)이 유지되도록 자흡식 펌프를 사용하여 그림 7에 표기된 기준요건을 만족하도록 설계하였다. 그러나 냉각수 저장조와 열교환기 및 냉각기는 셀 외부 냉각수 계통과 공유하도록 구성하였다. ④