

비응축가스 이상유동 임계유량 실험장치의 압력용기 압력제어

Pressure Control of the Pressure Vessel in Test Facility for the Two-Phase Critical Flow with Non-Condensate Gas

김창희, 장석규, 박현식, 정장환

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

비응축가스 이상유동 임계유량 실험장치의 압력용기 압력제어밸브 설계를 위해 압력용기의 열수력적 거동을 모의 계산하고, 그 결과를 MARS/SMR 코드 결과와 비교하였다. 그리고 PCV 밸브의 규격을 선정하고, 속도형 PID 제어를 사용하여 압력제어 모의실험을 수행하였다. 모의실험 결과 선정된 PCV 밸브와 압력제어방법을 실험장치 제작 설계에 반영할 수 있음을 확인하였다.

Abstract

Thermal hydraulic dynamics of the pressure vessel to validate the design of the two-phase critical flow test facility is simulated using Matlab and compared with MARS/SMR code results. Simulations are performed using velocity PID controller with designed pressure control valve. From the above simulation results, the designed pressure control valve and control scheme is able to feedback to the design of the two-phase critical flow test facility.

1. 서 론

비응축가스 이상유동 임계유량 실험장치는 원자력연구소에서 설계가 진행되고 있는 일체형 원자로(SMART: System-integrated Modular Advanced Reactor)에서 소형 냉각재 상실사고(SBLOCA)시 발생하는 물리적 현상을 실험, 분석하기 위한 장치이다. 일체형 원자로는 소형 냉각재 상실사고 시 냉각재나 비응축가스 또는 냉각재와 비응축가스가 혼합된 상태로 방출될 수 있고, 파단부에서 임계유동이 발생할 수 있다. 그러나 불행하게도 비응축가스인 질소가스가 포함된 냉각재 방출의 경우는 실험자료나 예측 모델링이 국내뿐만 아니라 국외에서도 매우 부족하기 때문에 본 실험장치를 통해 비응축가스가 포함된 냉각재의 임계유량 실험자료를 생산한다. 본 실험 장치의 설계기준은 설계압력 17.2MPa, 설계온도 353℃를 적용하였다. 또한, 파관 배관 사이즈는 최대 20mm, 실험 가능 최대 정제압력은 12MPa, 실험가능 최대 과냉도 60℃, 최소 정상상태 지속시간 30초를 기

준으로 설계하였다. 이러한 설계기준에 따라 본 실험장치는 고온 고압의 냉각재가 들어 있는 압력용기, 압력용기를 가압하기 위한 질소가스 탱크, 냉각재를 가열하고 순환시키는 히터와 펌프, 파단 배관부를 모의한 시험대(test section), 비응축가스 임계유량을 형성하기 위해 시험대 입구로 질소가스를 공급하는 보조 질소가스탱크, 시험대로부터 방출된 유체를 응축 저장하는 방출수조 등으로 구성된다[1]. 그림 1은 본 장치의 개략도를 나타낸다.

본 실험장치의 운전 모드는 크게 기동 및 가열운전, 정상운전 운전, 실험운전, 냉각운전으로 나누어진다. 기동 및 가열운전 모드는 압력용기와 질소가스 탱크에 순수 및 질소가스를 주입한 후 상온, 대기압상태의 냉각재를 히터와 질소 가압을 통해 실험조건까지 가압, 가열하는 운전이다. 정상운전 모드는 가압, 가열된 압력용기의 냉각재를 일정하게 유지하여 안정화시켜 실험을 준비하는 운전이다. 실험운전은 배관 파단을 모의하기 위해 시험대의 끝단에 연결된 순간 개방밸브(quick opening valve)를 순간적으로 개방하여 임계유량을 형성하는 운전이다. 이때 비응축가스의 임계유량을 관찰하기 위해 시험대로 일정량의 질소가스를 주입하는 경우도 있다. 냉각운전은 실험이 끝난 후 실험장치를 냉각하여 상온 대기압으로 감소시키는 운전이다.

본 논문에서는 실험장치의 압력용기 압력제어밸브(PCV) 설계를 위해 압력용기 압력의 열수력적 거동을 모델링하고, 임의 선정된 PCV 밸브를 사용하여 압력제어 모의실험을 수행하였다. 열수력적 거동 모델링은 기체방적식을 사용하였으며, 그 결과를 MARS/SMR 코드 결과[2]와 비교하였다. 본 실험장치의 실험 matrix 중 가장 심각한 경우에 대해 PCV 밸브를 통한 최대 유속을 계산하고, 이 결과를 반영하여 밸브 사이즈를 결정하였다. 이때, 계산된 질소가스의 유속은 대략 5.8kg/sec 정도이고, 빠른 유속을 제어하기 위해 속응성을 갖는 속도형 PID 제어기와 제어게인을 선정한 후 모의실험을 수행하였다. 모의실험 결과 선정된 밸브 사이즈와 제어방법이 만족할만한 결과를 보였으며, 그 결과를 실험장치에 반영할 수 있음을 확인할 수 있었다.

2. 압력용기 압력거동 열수력적 모델 및 검증

그림 2는 압력용기의 열수력적 거동을 모델링하기 위해 실험장치 중 관련된 부분만 개략적으로 표현한 것이다. 압력용기(T_1) 하단부의 시험대에 설치된 순간개방밸브(QOV)를 순간적으로 개방하면 고압으로 가압된 압력용기내의 냉각재는 시험대를 통해 급속히 방출하게된다. 압력용기 압력제어란 QOV가 순간적으로 개방되었을 때 질소가스탱크(T_2)로부터 압력용기로 유입되는 질소유량을 압력제어밸브(PCV)로 조절하여 압력용기의 압력을 QOV 개방전 압력으로 일정하게 유지하는 것이다. 따라서, 압력조절을 위한 압력조절밸브를 설계하기 위해서는 압력용기 내부의 열수력적 거동을 모델링해야 한다.

2.1 압력용기 압력거동 열수력적 모델

임의시간 t 에서 시험대의 QOV를 통해 빠져나가는 냉각재의 유량($m_o(t)$)과 압력용기로 유입되는 질소가스의 유량($m_i(t)$)이 동일하다면 압력용기내 압력은 일정하게 유지된다. 이 원리를 이용하여 압력용기내 가스충전공간은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$PV = MRT \tag{1}$$

여기서,

P : 압력용기 내 가스충전공간의 압력 $P_0(t)$ (kPa)

V : 압력용기 내 가스충전공간의 체적 $V_{0g}(t)$ (m^3)

M : 압력용기 내 가스충전공간의 질소 질량 (kg)

T : 압력용기 내 가스충전공간의 온도 (K)

R : 질소의 기체상수 (0.2968 kJ/kgK)

미소시간 dt 에 대하여 기체상수 R 과 온도 T 는 가스충전공간 내에서 일정하다고 가정하고, 시간에 대하여 편미분하면

$$P \frac{dV}{dt} + V \frac{dP}{dt} = RT \frac{dM}{dt} \quad (2)$$

이고, 시간 t 일 때의 가스충전공간의 볼륨을 V 로 설정하고 dt 동안의 증분을 고려하면 다음 식과 같이 표현된다.

$$\frac{dV(t)}{dt} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{dM(t)}{dt} = m_{ig}(t) - m_{eg}(t) \quad (4)$$

여기서,

m_{ig} : 가스충전공간 내 질소가스 유입량

m_{eg} : 가스충전공간 내 질소가스 유출량

이다. 그런데 압력용기 내 방출수를 비압축성으로 가정하면 유출질소가스의 질량 m_{eg} 는 유출임계 유량 m_o 와 체적이 같으므로

$$m_{eg}(t) = \left(\frac{\rho_g}{\rho_{2\varphi}} \right) m_o(t) \quad (5)$$

와 같다. 여기서,

m_o : 압력용기 내 방출 임계유량 (kg/s)

ρ_g : 질소가스의 밀도 (kg/m^3)

$\rho_{2\varphi}$: 방출 임계류의 밀도 (kg/m^3)

이다. 식(2)~(5)는 다음과 같은 미분방정식으로 표현된다.

$$\frac{V_o(t)}{RT} \frac{dP_o(t)}{dt} = m_{ig}(t) - \left(\frac{\rho_g}{\rho_{2\varphi}} \right) m_o(t) \quad (6)$$

2.2 모델 검증

식 (6)과 같이 주어진 기체 방정식을 사용하여 개발한 압력용기 압력거동 모델을 검증하기 위해 두 가지 제한조건(Limiting Case)에 대해 Matlab을 사용한 계산 결과와 MARS/SMR 코드를 통한 계산결과[2]를 비교하였다. 단, 계산에 사용된 가정 및 조건은 다음과 같다.

- PCV를 통한 온도강하(Joule-Tomson's Effect)는 없다.
- 압력용기내 초기 압력은 12MPa 이다.
- 압력용기내 온도는 325°C 이고, 과냉도는 60°C 이다.
- 압력용기의 체적은 1.3m³ 이다. 그러나 냉각제는 압력용기 체적의 90%가 채워진다.
- 질소가스탱크의 초기압력은 20MPa 이고, 질소가스의 온도는 25°C 이다.
- 질소가스탱크의 체적은 3.6m³ 이다.
- 시험대 배관 직경은 20mm 이다.
- $\rho_g(t) = \rho_g(0) \left(\frac{P_0(t)}{P_0(0)} \right)^{1/1.65}$ 를 사용하여 계산한다.
- $\rho_{2\phi}$ 는 MARS/SMR 코드에서 계산된 압력에 따른 임계유량 밀도값을 이용한다.
(Curve Fitting을 사용하여 식 (6)을 계산)
- $m_0(t)$ 는 MARS/SMR 코드에서 계산된 압력에 따른 임계유량값을 이용한다.
(Curve Fitting을 사용하여 식 (6)을 계산)

모델 검증을 위해 사용된 제한조건은 다음과 같다.

- Case I : PCV 차단상태에서 QOV 순간적으로 개방
- Case II : QOV 차단상태에서 PCV 순간적으로 개방

그림 3은 Case I 에 대한 Matlab 및 MARS/SMR의 결과를 나타내고, 그림 4는 Case II에 대한 결과들을 나타낸다. 실험결과에서 보듯이 두 가지 제한조건에 대해 유사한 결과가 나타났다. 이 결과를 토대로 식 (6)의 압력용기의 압력용기 압력거동 모델식을 사용하여 압력제어밸브 압력제어 방안을 연구한다.

3. PID 제어를 이용한 압력제어 모의실험

본 실험장치에서 압력제어 모의실험연구는 여러 가지 실험 matrix를 모두 만족하는 PCV 밸브 사이즈의 결정하는 것이다. 실험 matrix에서 질소가스탱크의 압력은 20MPa, 압력용기의 온도 및 압력은 각각 325°C, 12MPa, 그리고 과냉도 60°C일 때가 가장 심각한 운전 조건이기 때문에 이 경우에 대해서만 모의실험을 수행하고, 그 결과를 분석한다.

3.1 압력 제어기 및 PCV 밸브 모델링

그림 5는 압력용기 압력제어를 위한 블록 다이어그램을 나타낸다. 그림에서 압력거동모델에서는 식 (6)을 사용하여 압력변화를 계산하고, 식 (6) 계산에 필요한 임계유량값은 Curve Fitting으로 구한다. 압력센서는 전송기의 지연시간을 고려하여 응답시간을 0.8초로 설정하였다.

압력제어를 위해 사용된 제어기는 질소가스의 빠른 유속을 제어할 수 있도록 속도형 제어기를 사용한다. 사용된 제어기의 모델식은 다음과 같다.

$$U_d(k) = U_d(k-1) + K_p[e(k) - e(k-1)] + K_I e(k) + K_d[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (7)$$

여기서,

$e(k)$: 설정 압력과 압력용기 압력과의 차

$u_d(k)$: 제어기 출력, 여기서는 밸브 레도 요구신호

K_p, K_I, K_d : 비례, 적분, 미분계인

이다. 그리고 제한기는 계산된 제어기 출력값이 밸브의 동작 제한치를 초과하는 것을 방지하기 위한 것이다.

유량계산 블록은 PCV 밸브의 C_v 치를 사용하여 질소가스의 유량을 계산한다. 밸브 C_v 치 계산은 식 (8)을 사용하여 계산한다. 그 이유는 유체가 질소가스이고, 밸브 양단의 차압($P_1 - P_0$)이 $P_0/2$ 보다 작기 때문이다.

$$C_v = \frac{Q_n}{287} \sqrt{\frac{G(273 + t_f)}{(P_1 - P_0)(P_1 + P_0)}} \quad (8)$$

여기서,

t_f : 질소가스 온도

G : 질소가스 비중 ($G = \text{질소분자질량}/28.9 = 0.96932$)

Q_n : 최대유속(Nm³/h) = $w \frac{22.414}{M}$

w : 질소가스 최대유속(kg/h)

이다. 단, 질소가스 최대유속 w 는 압력용기의 압력을 12MPa로 유지하기 위해 흐르는 최대유속으로 본 장치에서는 5.8kg/sec 이다.

식 (8)을 통해 계산된 PCV C_v 치는 6.063 이므로 이것을 만족하는 PCV 밸브 사이즈를 1인치 ($C_v=15$)로 선정한다. 본 실험을 위해 속응성 및 선형성이 좋은 modified parabolic type 글로브 밸브를 선정하였다. 이 밸브의 응답성은 1.6초로 가정하였고, 유량계산을 위해 C_v 에 따른 밸브 리프트(lift)를 밸브 데이터 시트를 사용하여 계산하였다.

3.2 모의실험 결과 및 분석

모의실험에서는 제어기의 계인을 K_p, K_I, K_d 를 각각 10, 0.5, 20으로 선정하여 속응성을 갖도록 하였다. 이것은 빠른 유속특성을 갖는 질소가스 유량을 보다 빠르게 제어하기 위함이다.

그림 6은 제어기를 통해 제어된 압력용기의 압력변화를 나타내고, 그림 7은 PCV 밸브를 통한 질소가스 유량을 나타낸다. 그림 8은 PCV 밸브를 통해 빠져나가는 질소가스로 인한 질소가스탱크의 압력변화를 나타낸다. 그림 6에서 QOV 밸브가 순간적으로 개방되었을 때 압력 충격으로 인해 초기 압력은 설정치보다 약 0.2MPa 정도 오차가 발생하였지만 약 50초 이후에는 정상상태에 도달하였다. 또한, 약 30 초 후에는 설정치보다 낮아지는데 그 이유는 그림 8에서 나타난 것과 같이 질소가스탱크의 압력이 낮아져 PCV 밸브 양단의 차압이 낮아졌기 때문이다. 이것은 설계 기준에 따른 질소가스탱크의 설계 용량 때문에 나타나는 현상이다.

본 모의실험을 통해 가장 냉혹한 실험 matrix에서 압력이 제대로 제어된다는 것을 확인할 수 있었고, 모의실험에 사용된 PCV 밸브의 규격(1인치, 응답속도 1.6초)을 설계에 반영할 수 있었고, 압력 전송기의 응답속도도 0.8초로 설정할 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 비응축가스 이상유동 임계유량 실험장치의 압력용기 압력제어를 위한 열수력적 압력거동 모델링과 제안된 제어기의 성능을 평가하였다. 압력용기 압력제어를 위한 열수력적 거동의 모델은 기체방정식을 사용하여 개발하였고, 개발된 모델의 타당성을 확인하기 위해 MARS/SMR 코드의 결과와 비교하였을 때 유사한 동특성을 갖는다는 것을 알 수 있었다.

압력제어 모의실험에서는 선정된 PCV 밸브를 통해 가장 심각한 실험 matrix에서 압력이 제대로 제어된다는 것을 확인할 수 있었다. 이 실험 결과는 실험장치 제작 설계에 반영할 예정이다.

감사의 글

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

참고문헌

- [1] 장석규, 김창희, “비응축가스 이상유동 임계유량 실험장치 기본설계,” KAERI/TR-1697/2000, 2000
- [2] 박현식 외, “MARS/SMR을 이용한 비응축가스 이상유동 임계유량 실험장치 압력조절밸브의 설계검증”, 원자력학회 춘계학술발표회, 2001
- [3] 장석규 외, “비응축가스이상유동 임계유량 실험장치 설계”, 원자력학회 춘계학술발표회, 2001
- [4] L. Ericson et al., “The Marviken Full-Scale Critical Flow Tests Interim Report: Results from Test 4, A. B.,” Atomenergi Sweden Report MXC-204, 1979
- [5] G. P. Celata, M. Cumo, F. D’Annibale and G. E. Farello, “The Influence of Non-Condensable Gas on Two-Phase Critical Flow,” Int. J. Multiphase Flow, “ 14 No.2, 175-187, 1988

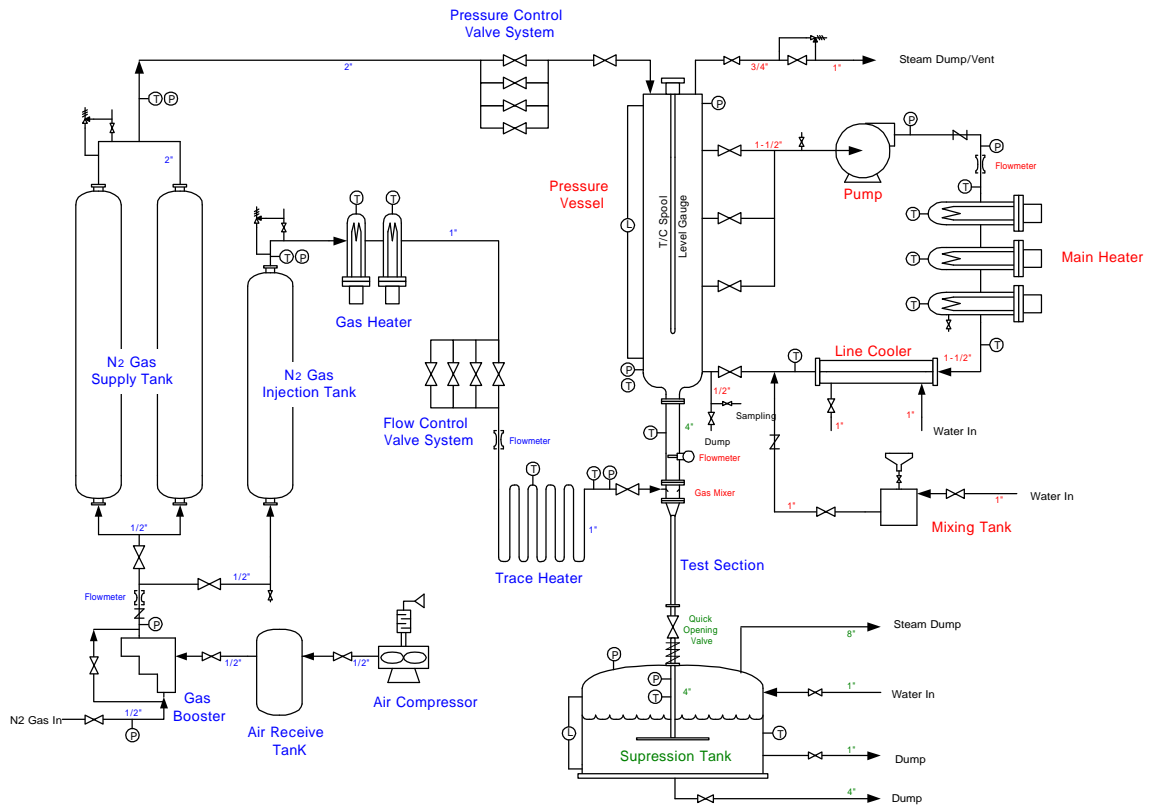


그림 1. 실험장치 개념도

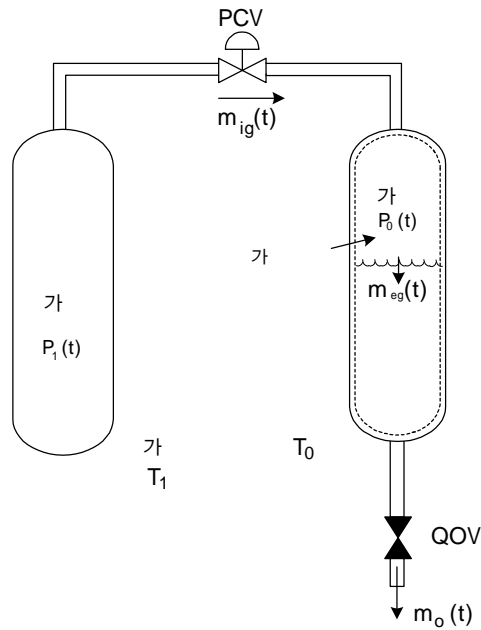


그림 2. 질소가스 가압시스템 및 압력제어 개념도

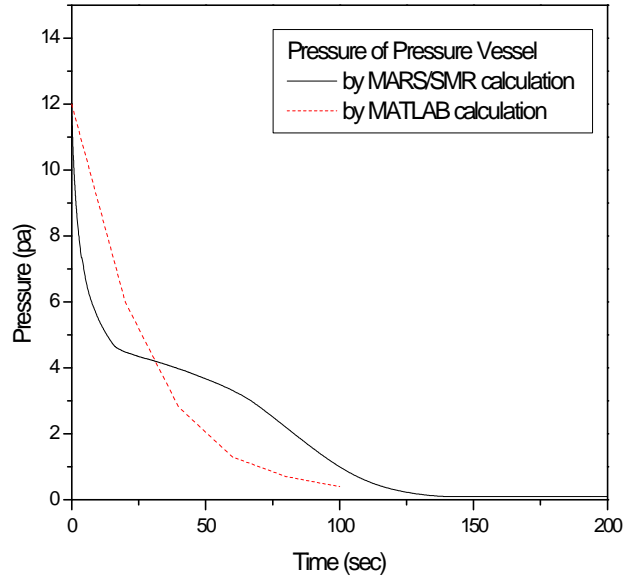


그림 3. PCV 차단상태에서 QOV를 순간적으로 개방했을 때 계산결과

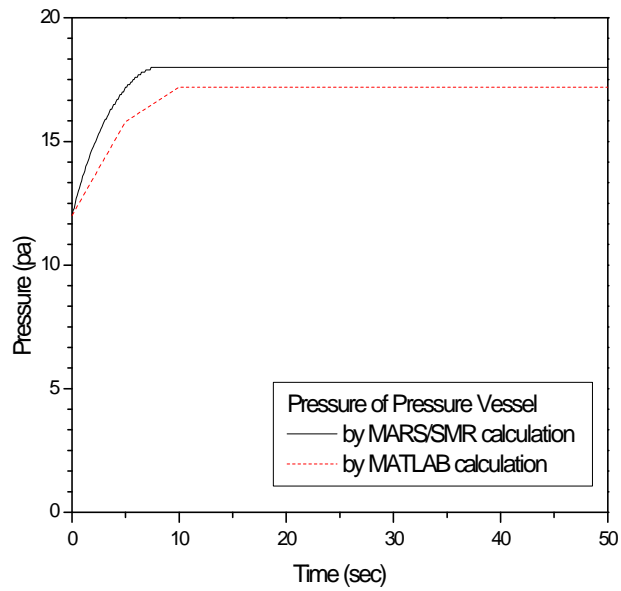


그림 4. QOV 차단상태에서 PCV를 순간적으로 개방했을 때 계산결과

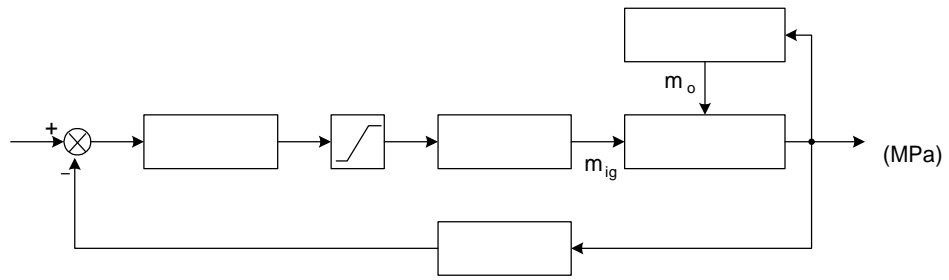


그림 5. 압력용기 압력제어 블록 다이어그램

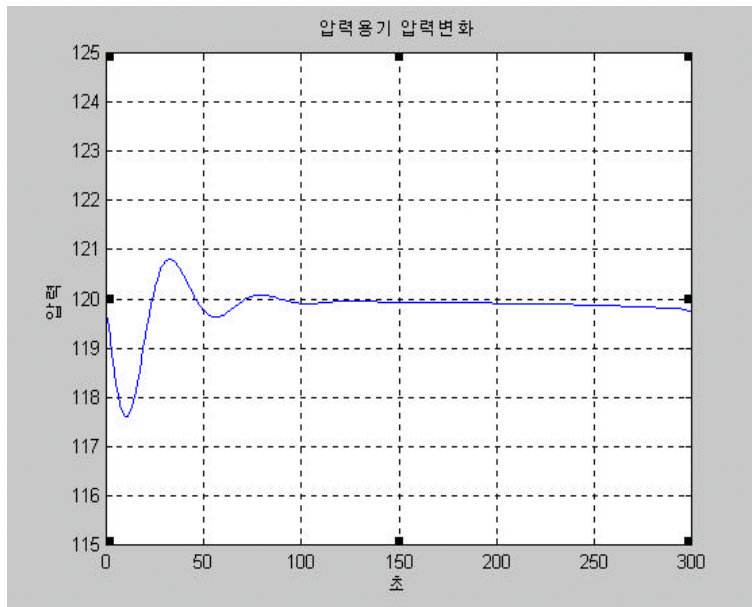


그림 6. 압력용기의 압력제어 모의실험 결과

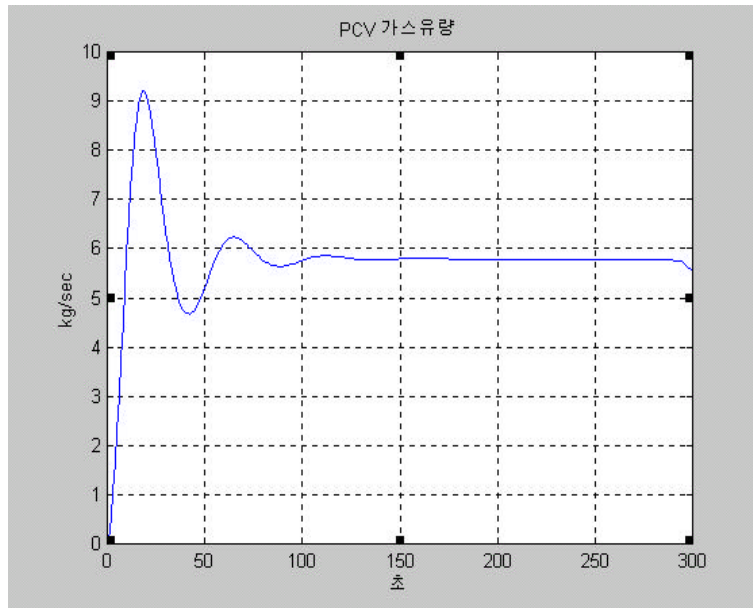


그림 7. 압력용기의 압력제어시 PCV를 통한 질소가스 유량

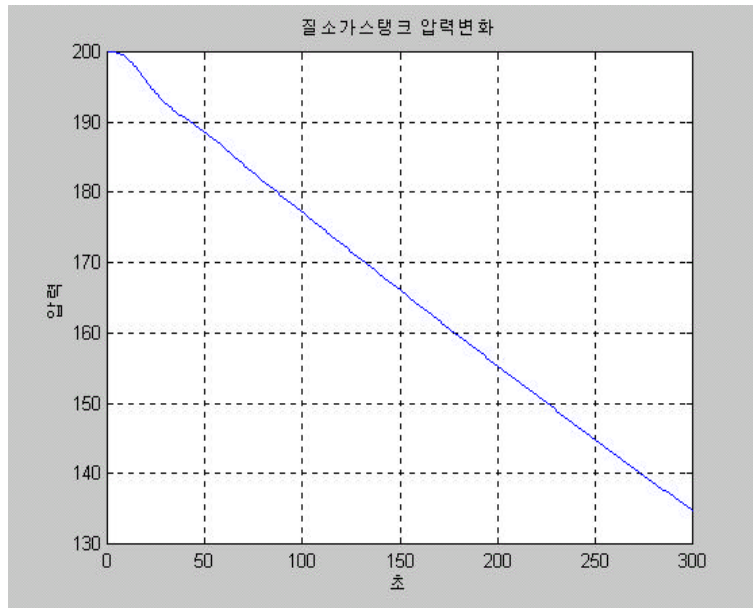


그림 8. 압력용기의 압력제어시 질소가스탱크의 압력변화