

## MARS/SMR을 이용한 비응축가스 이상유동 임계유량 실험장치 압력조절밸브의 설계 검증

### Design Validation of Pressure Control Valve of Test Facility for Two-Phase Critical Flow with Noncondensable Gas Using MARS/SMR

박현식, 김창희, 장석규, 정장환

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

#### 요 약

비응축가스 이상유동 임계유량 실험장치에 장착되는 압력조절밸브의 설계 검증을 위하여 MARS/SMR을 이용한 모의계산이 수행되었다. 압력조절밸브의 설계 검증을 위해 정상상태 모의계산과 제한조건 모의계산이 수행되었다. 밸브의 성능을 여러 실험조건에서 예측하기 위한 정상상태 모의계산의 결과는 압력용기의 압력변화에 따른 임계유량의 변화와 일정한 압력용기 압력에서 질소공급탱크의 압력변화에 따른 압력조절밸브의 개도의 변화를 보여주고 있다. 또한 두 가지 제한조건에 대한 계산 결과가 밸브의 제어특성 모의를 위해 사용된 MATLAB의 계산결과와 비교되어졌다. 위의 MARS/SMR을 이용한 설계검증 계산결과로부터 압력조절밸브는 여러 실험조건에서 실험장치의 압력용기가 요구하는 압력조절 기능을 충분히 수행할 것으로 예측된다.

#### Abstract

Simulations are performed using the MARS/SMR code to validate the design of pressure control valve installed in the test facility for the two-phase critical flow with noncondensable gas. Both steady state and limiting case calculations are performed to validate its design. Steady state calculation results, which is to predict its performance at various experimental conditions, show changes of the critical flow rate with the variation of the pressure of pressure vessel and the valve opening ratio of with the variation of the pressure of nitrogen supply tank at a fixed pressure of the pressure vessel. Also two limiting case calculation results are compared with those simulated using MATAB. The above simulation results using MARS/SMR predicts that the designed pressure control valve is able to properly regulate the pressure of the pressure vessel at various experimental conditions.

## 1. 서론

비응축가스 이상유동 임계유량 실험장치[1]는 소형 냉각재 상실사고시 일체형 원자로 SMART의 배관 파단부를 통하여 방출되는 비응축가스가 포함된 냉각재의 이상유동 임계유량 실험자료를 생산하기 위한 것이다. 실험장치의 설계 기준으로 설계압력 17.2 MPa, 설계 온도 353℃를 적용하고 있으며, 실험장치는 질소공급계통(Nitrogen Supply System), 압력용기(Pressure Vessel), 혼합기(Mixer), 시험대(Test Section) 및 방출계통(Suppression System)으로 구성된다.

실험기간 동안 압력용기내의 냉각수가 혼합기와 시험대를 거쳐 방출계통으로 방출될 때 압력용기의 압력이 일정한 값으로 유지될 수 있도록 하기 위해 질소공급계통은 압력용기보다 고압으로 유지되는 질소공급탱크(Nitrogen Supply Tank), 압력조절밸브(Pressure Control Valve, PCV)와 관련배관으로 구성된다. 압력조절밸브는 개폐도를 조절함으로써 질소공급탱크로부터 질소를 공급받아 압력용기 내부의 냉각수 방출로 생긴 체적의 변화를 보충해주어야 한다.

기존의 임계유량 실험장치에서는 다양한 방식으로 압력용기의 체적 변화를 보충해주고 있다. Smith 등[2]이 수행한 저압 임계유량 실험에서는 물을 주입할 때 펌프를 사용하였다. 그러나 고압에서는 일정한 압력을 유지하며 임계유량에 해당하는 물을 계속적으로 공급하는데는 한계가 있었다. 종합실험장치를 이용한 실험은 Fujii[3]가 LSTF 실험장치를 이용하여 수행한 실험과 Marviken test[4] 등이 있다. 종합실험장치를 이용한 고압 임계유량 실험의 경우 비교적 큰 압력용기를 사용함에도 불구하고 물이 압력용기를 빠져나옴에 따라 압력용기의 압력이 떨어지는 것을 피할 수 없다. 이후 지속적으로 고압에서 사용되는 실험장치 압력용기를 정체압력(Stagnation pressure)에 유지시키기 위한 노력이 이루어졌다. 대표적으로 Celata[5]의 경우는 압력용기를 두 개 설치하여 하나는 정체압력을 유지하는 기능을 하고, 다른 하나는 연결된 다른 압력용기를 가압하는 기능을 수행하도록 하였다. 본 실험장치에서는 고압의 질소가스 공급탱크와 압력조절밸브를 이용하여 압력용기의 압력을 일정하게 유지하는 향상된 압력유지 개념을 사용하고자 한다.

그림 1은 압력조절밸브의 설계검증과 관련한 실험장치의 개략도이다. 실험기간 동안 압력용기 내부의 압력을 일정한 실험조건으로 유지시키기 위해 압력조절밸브를 실시간으로 조절해야 한다. 선정된 압력조절밸브는 압력용기로 질소를 충분히 공급할 수 있어야 할 뿐만 아니라, 밸브의 특성은 제어기의 신호를 감당할 수 있어야 한다.

본 연구는 MARS/SMR을 이용하여 압력조절밸브와 관련된 비응축가스 이상유동 임계유량 실험장치를 모사하여 압력조절밸브의 작동특성을 살펴보고, 또한 밸브의 동특성 모의를 위한 MATLAB의 계산결과와의 비교를 통해 설계된 압력조절밸브의 성능을 검증하고자 한다.

## 2. MARS/SMR을 이용한 압력조절밸브의 설계 검증 계산

압력조절밸브의 설계검증과 관련하여 질소공급탱크, 압력용기, 시험대와 방출탱크로 구성되는 비응축가스 이상유동 임계유량 실험장치를 MARS/SMR을 이용하여 모사하였다. 그림 1이 보여주는 것과 같이 압력공급원으로 작용하는 질소공급탱크와 압력용기가 압력조절밸브

를 포함한 배관으로 연결되어 있다. 압력용기 하단의 방출배관에서 순간개방밸브(QOV, Quick Opening Valve)가 열리면서 압력용기 내부의 물이 하부탱크로 방출될 때 질소공급탱크의 압력(P1)은 시간불변이고 압력용기의 압력(P0)는 압력조절밸브의 개도에 의하여 시간에 따라 P1과 P0 사이의 압력으로 변화될 것이다.

MARS/SMR에서 사용된 임계유량 모델은 수정된 Henry-Fauske 모델이고, 압력조절밸브의 개도는 밸브의 개방 단면적으로 입력하였고, 장치의 Nodalization은 최대한 단순하게 처리하였다.

MARS/AMR을 이용한 모의계산은 두 가지 경우로 나뉘어 계산되어졌다. 먼저 질소공급탱크와 압력용기의 사이에 설치되어 압력용기의 압력 조절기능을 수행하는 압력조절밸브의 성능을 여러 실험조건에서 예측하는 정상상태 모의계산(Steady State Calculation)을 수행하였고, 또한 MATLAB 계산의 검증자료로 사용되는 제한조건 모의계산(Limiting Case Calculation)을 수행하였다.

## 2.1 Nodalizations

그림 2는 압력조절밸브의 설계검증과 관련한 실험장치의 정상상태 모의계산을 위한 MARS/SMR의 Nodalization을 보여주고 있다. 질소공급탱크와 방출탱크(Suppression Tank)는 TDV Component를 이용하였고, 압력용기와 시험대는 Pipe Component를 이용하였으며, 두 파이프의 연결은 SJ Component를 이용하였으며, PCV와 QOV의 모사에는 SJ Component를 이용하였다.

제한조건 모의계산을 위한 MARS/SMR의 Nodalizations는 질소공급탱크의 모사를 위해서는 SJ Component를 사용하였다는 점만 다르고, 압력용기 및 방출탱크 등의 모사는 그림 2의 정상상태 모의계산을 위한 Nodalization의 경우와 같은 방식으로 모사되었다.

## 2.2 정상상태 모의계산 (Steady State Calculation)

정상상태 모의계산의 목적은 시간이 경과되더라도 P0를 초기값으로 일정하게 유지하도록 압력조절밸브의 개도를 조절하는 것이다. MARS/SMR에서 압력조절밸브의 개도를 P0가 일정하게 유지되도록 입력하면 정상상태의 실험을 모의하는 것이 된다. 이때의 개도에 대한 데이터를 압력조절밸브의 설계 검증에 사용한다.

그림 2의 Nodalization을 사용하여 예비 test matrix의 일부, 즉 과냉도가 60 °C인 경우에 대하여 21 가지 경우의 계산을 수행하였다. 표 1은 이상유동 임계유량 실험의 예비 test matrix를 보여주고 있다. 표 1의 예비 test matrix를 바탕으로 압력용기의 과냉도가 60 °C인 30 가지 경우 중 이상유동 임계유량을 예측하기에 충분하다고 고려되는 21 가지 경우에 대하여 정상상태 모의계산이 이루어졌다. 정상상태 모의계산을 위한 계산 조건은 표 2와 같다.

주어진 공급 압력, 압력용기의 과냉도, 시험대의 내경에 대하여 일정한 압력용기의 압력을 유지하도록 하는 압력조절밸브의 개방 면적(Opening area)을 찾았다. 표 3은 21 가지 경우에 대한 정상상태 모의계산의 결과를 보여준다. 계산결과는 Valve의 최대 opening area가 29 % 이내임을 보인다. 초기에 압력조절밸브의 연결배관으로 고려된 2 인치가 다소 과대하게 설계되었음을 보인다. 보다 작은 배관 직경으로의 변경이 가능할 것으로 보인다.

그림 3은 시간에 따른 압력용기의 압력변화에 대한 전형적인 계산 결과이다. 압력용기의 압력이 100 bar, 과냉도가 60 °C, 공급 압력이 150 bar인 경우에 대하여 시험대의 내경이 각각 7 mm와 20 mm인 경우에 대한 시간에 따른 압력용기의 압력변화이다. 20 mm인 경우 정상상태(Steady state)를 이루는 시간은 약 8 초 정도였으며, 7 mm인 경우는 130 sec까지 정상상태를 이루었다. 본 계산은 이상적인 경우로써 질소공급시스템의 압력을 일정하게 유지하도록 하는 TDV component를 사용하였으며, 실제 실험상황의 모사에서는 질소공급시스템의 압력이 질소의 방출로 감소하기 때문에 SV component를 사용하는 것이 바람직하다.

그림 4는 압력용기의 압력변화에 따른 임계유량의 변화를 보여주고 있다. 그림 4는 시험대의 내경이 20 mm인 경우에 있어서의 시험대를 통해 방출되는 임계유량을 나타내고 있다.

그림 5는 공급압력의 변화에 따른 압력조절밸브의 개폐도를 보여주고 있다. 압력용기의 압력을 일정하게 유지하기 위하여 공급압력의 변화에 따라 개폐도가 변화를 보이고 있다. 압력용기의 압력은 30 bar로 유지되었으며, 공급압력은 60, 50, 및 40 bar로 변한다.

### 2.3 제한조건 모의계산 (Limiting Case Calculation)

제한조건 모의계산의 결과들은 MatLab을 이용한 압력조절밸브의 동특성을 모의할 때, 모의에 사용된 식들의 검증에 필요한 자료를 생산하기 위한 것이다. 그림 3의 nodalization을 사용하여, 다음의 두 가지 경우에 대한 계산을 수행하였다.

- Case A: QOV open, PCV closed
- Case B: PCV open, QOV closed

Case A인 경우는 그림 3의 Nodalization에서 압력용기에서 Suppression Tank까지를 모사하였고, Case B의 경우는 그림 3의 Nodalization에서 Nitrogen Tank에서 압력용기까지를 모사하였다. K 값은 선택된 밸브의 밸브상수( $C_v$ )에 해당되는 값을 사용하였다. 제한조건 모의계산에 대한 계산 조건은 표 4와 같다.

그림 6부터 10은 두 제한조건 모의계산의 계산 결과들을 보여준다. 압력용기 내부에서의 압력, 및 압력용기 내부 기체부피 등의 값들이 계산되어졌고, 압력용기로 유입(Case B)되거나 유출(Case A)되는 유량이 계산되어졌다. 그림 6, 7과 8은 제한조건 모의계산 Case A에 대한 모사 결과로써 각각 시간에 따른 압력용기의 압력, 순간개방밸브를 통한 유량 및 압력용기의 기체부피의 추이를 보여주고 있다. 또한 그림 9와 10은 제한조건 모의계산 Case B에 대한 모사 결과로써 각각 시간에 따른 압력용기의 압력 및 순간개방밸브를 통한 유량의 추이를 보여주고 있다.

### 2.4 MATLAB을 이용한 압력조절밸브의 동특성 모의 계산결과와의 비교

질소공급탱크와 압력용기를 연결하는 배관상의 압력조절밸브의 제어특성 모의를 위하여 MATLAB을 이용하여 질소가스탱크를 이용한 압력용기 가압시스템의 동특성을 모사하였다.[6] MATLAB을 이용한 계산결과가 MARS/SMR을 이용한 제한조건 모의계산의 결과와 비교되어졌다. 그림 6은 Case A, 즉 압력조절밸브가 닫혀 있고 순간개방밸브가 열려있는 경

우에서의 압력용기를 통한 냉각수의 방출유량을 보여주고 있다. 두 결과가 약간의 차이는 있으나 밸브의 동특성은 비교적 잘 예측하는 것을 알 수 있다. 또한 Case B, 즉 순간개발밸브가 열려있고, 압력조절밸브가 닫혀 있는 경우에 있어 그림 9에서 보듯이 압력용기로 유입되는 질소의 유량 및 압력의 변화는 두 계산이 비슷한 결과를 보여주고 있다. 이와 같은 MATLAB과 MARS/SMR을 이용한 압력조절밸브의 제한조건에 대한 계산결과는 설계된 압력조절밸브가 적절한 제어를 통해 본 실험장치에서 요구되는 압력조절 기능을 충분히 수행할 수 있다는 것을 보여준다.

### 3. 결론

밸브의 개폐를 통해 압력용기의 압력을 일정하게 유지하면서 질소공급계통으로부터 질소를 공급받을 수 있도록 설계된 비응축가스 이상유동 임계유량 실험장치에 사용되는 압력조절밸브의 설계검증을 MARS/SMR을 이용하여 수행하였다. 설계된 압력조절밸브의 검증을 위해 먼저 밸브의 성능을 여러 실험조건에서 예측하는 정상상태 모의계산이 이루어졌고, 또한 밸브의 동특성 계산의 검증자료로 사용되는 제한조건 모의계산이 수행되었다. 정상상태 모의계산의 결과는 압력용기의 압력에 따른 임계유량의 변화를 예측할 수 있었고, 압력용기의 일정한 압력에서 질소공급탱크의 압력변화에 따른 압력조절밸브의 개도 변화를 예측할 수 있었다. 또한 두 가지 제한조건에서의 모의계산을 수행하여 그 결과를 MATLAB 계산의 결과와 비교함으로써 밸브의 동특성 모사결과를 검증할 수 있었다. 이러한 일련의 MARS/SMR을 이용한 모의계산 결과로부터 설계된 압력조절밸브는 압력용기에서 요구하는 압력조절 기능을 충분히 수행할 것으로 예측되어진다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 중장기 사업의 일환으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. 장석규 외, “비응축가스 이상유동 임계유량 실험장치 기본설계,” KAERI/TR-1697/2000, 2000.
2. R. V. Smith, L. B. Cousins and G. F. Hewitt, “Two-Phase Two-Component Critical Flow in a Venturi,” AERE-R 5736, 1968.
3. M. Fujii, T. Watanabe, H. Nakamura and Y. Kukita, “Two-phase discharge rate through a sharp-deged thin-plate orifice,” 203-209, 199x.
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.

6. 김창희 외, “비응축가스 이상유동 임계유량 실험장치의 압력용기 압력제어”, 원자력학회 춘계학술발표회, 2001.

표 1. 비응축가스 이상유동 임계유량 실험의 예비 Test Matrix

사용측 압력 P0 (bar), (Pxx)	공급측 압력 P1 (bar), (a, b, c)	D=20, 7 mm (Dxx), Subcooling Degree dT = 0, 10, 60 °C (Txx)
120 (P12)	180 (a)	3(P1) x 2(D) x 3(dT) = 18 cases
	160 (b)	
	130 (c)	
100 (P10)	150 (a)	3(P1) x 2(D) x 3(dT) = 18 cases
	130 (b)	
	110 (c)	
80 (P08)	120 (a)	3(P1) x 2(D) x 3(dT) = 18 cases
	100 (b)	
	90 (c)	
60 (P06)	90 (a)	3(P1) x 2(D) x 3(dT) = 18 cases
	80 (b)	
	70 (c)	
30 (P03)	60 (a)	3(P1) x 2(D) x 3(dT) = 18 cases
	50 (b)	
	40 (c)	
		Total 90 cases, ex) P12D20T10a

표 2. MARS/SMR을 이용한 정상상태 모의계산의 계산조건

Parameter	Value	etc
ID of Nitrogen Gas Supply Line	25 mm	
Volume of Nitrogen Gas Tank	3.6 m <sup>3</sup>	
Volume of Pressure Vessel	1.3 m <sup>3</sup>	
ID of Discharge Line	7, 20 mm	2 cases
Pressure of Pressure Vessel, P0	120, 100, 80, 60, 30 bar	5 cases
Pressure of N2 Gas Tank, P1	각 P0에 대해 3 가지	3 cases
Temperature of Pressure Vessel, T0	sat. temp. - 60	1 case
Initial Void Fraction of Pressure Vessel	약 0.5	

표 3. MARS/SMR을 이용한 정상상태 모의계산의 결과

Run ID	Opening Area	m_in	m_out	Area Ratio	Duration
	(m <sup>2</sup> )	(kg/s)	(kg/s)		(sec)
P12D20T60a	0.000111	4.6349	35.059	0.2191	7
P12D20T60b	0.000121	4.4911	34.965	0.2388	7
P12D20T60c	0.000146	4.4029	34.951	0.2881	7
P12D07T60a	0.0000136	0.56788	4.3546	0.0268	119
P12D07T60b	0.0000151	0.56417	4.3591	0.0298	119
P12D07T60c	0.0000183	0.55187	4.3511	0.0361	119
P10D20T60a	0.000103	3.584	32.577	0.2033	8
P10D20T60b	-	-	-	-	-
P10D20T60c	-	-	-	-	-
P10D07T60a	0.0000126	0.43843	4.0479	0.0249	130
P10D07T60b	-	-	-	-	-
P10D07T60c	0.0000167	0.42613	4.0427	0.0330	130
P08D20T60a	0.000095	2.6445	29.723	0.1875	10
P08D20T60b	-	-	-	-	-
P08D20T60c	-	-	-	-	-
P08D07T60a	0.0000114	0.31734	3.6959	0.0225	147
P08D07T60b	-	-	-	-	-
P08D07T60c	0.0000149	0.31107	3.6889	0.0294	147
P06D20T60a	0.0000792	1.6535	26.244	0.1563	11
P06D20T60b	-	-	-	-	-
P06D20T60c	-	-	-	-	-
P06D07T60a	0.0000097	0.20251	3.2672	0.0191	168
P06D07T60b	-	-	-	-	-
P06D07T60c	0.0000126	0.2046	3.2731	0.0249	168
P03D20T60a	0.0000465	0.64718	19.676	0.0918	18
P03D20T60b	0.0000570	0.66109	19.888	0.1125	18
P03D20T60c	0.0000694	0.64391	19.737	0.1370	18
P03D07T60a	0.0000057	0.0793319	2.4488	0.0112	> 200
P03D07T60b	0.0000067	0.0777069	2.4446	0.0132	> 200
P03D07T60c	0.0000085	0.0788648	2.4574	0.0168	> 200



표 4. MARS/SMR을 이용한 제한조건 모의계산의 계산조건

Parameter	Value	
	Case A	Case B
ID of Nitrogen Gas Supply Line	NA	25 mm
Volume of N2 gas tank	NA	3.6 m <sup>3</sup>
Volume of Pressure Vessel	1.3 m <sup>3</sup>	1.3 m <sup>3</sup>
ID of Discharge Line	20 mm	NA
Pressure of PV, P0	120 bar	120 bar
Pressure of N2 gas tank, P1	NA	200 bar
Temperature of Pressure Vessel, T0	sat. temp. - 60	sat. temp. - 60
Initial void fraction of Pressure Vessel	0.1	1.0

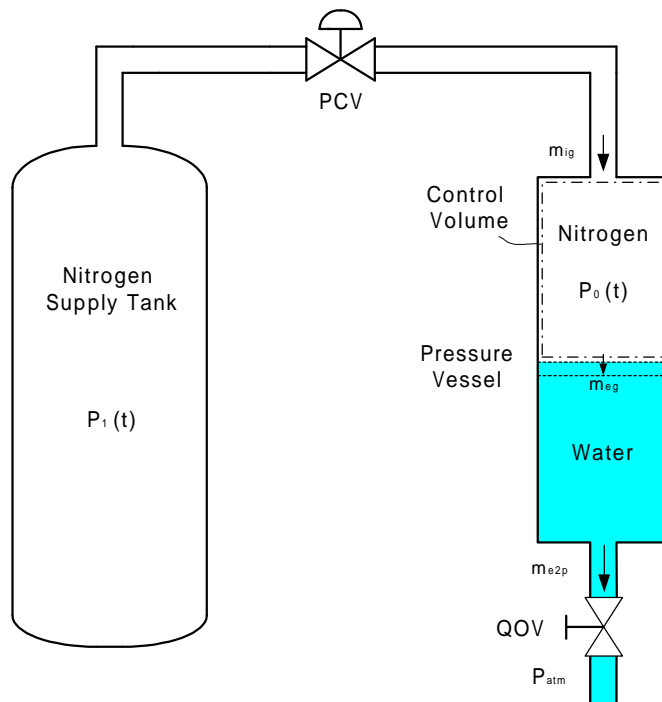


그림 1. 압력조절밸브의 설계검증과 관련한 실험장치의 개략도

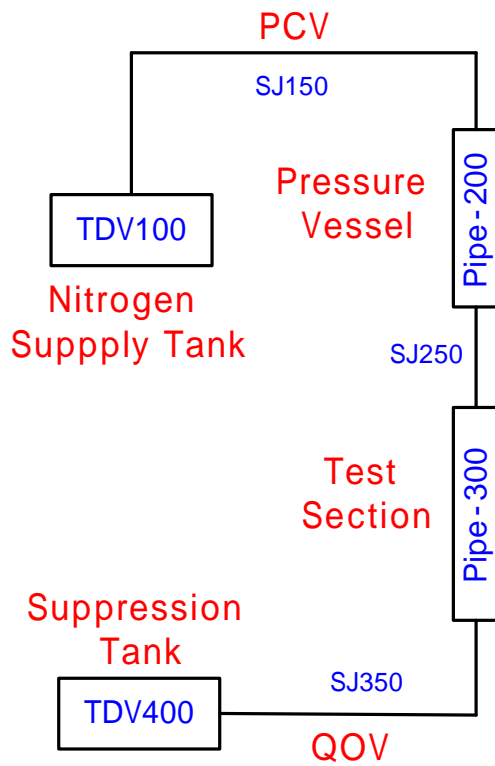


그림 2. 압력조절밸브의 설계검증과 관련한 실험장치의 MARS/SMR Nodalization

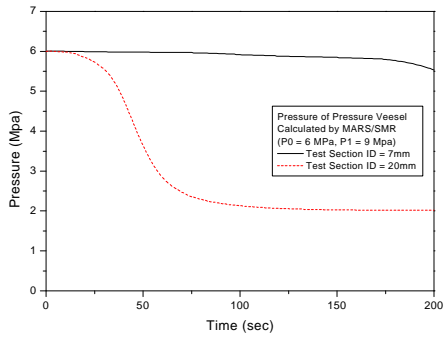


그림 3. 시간에 따른 압력용기 압력의 변화

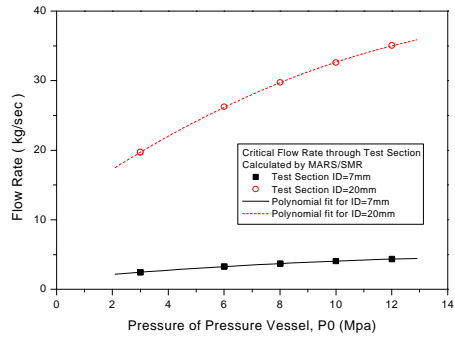


그림 4. 압력용기의 압력변화에 따른 임계유량의 변화

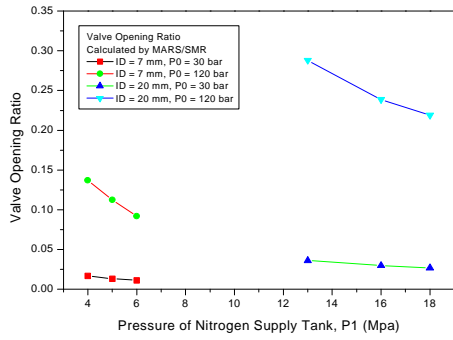


그림 5. 공급압력의 변화에 따른 압력조절밸브의 개폐도

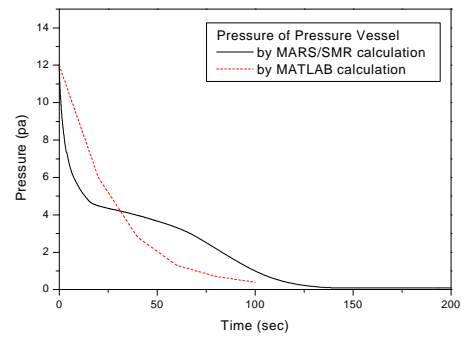


그림 6. 제한조건 모의계산 Case A에 대한 모사 결과: 압력용기의 압력

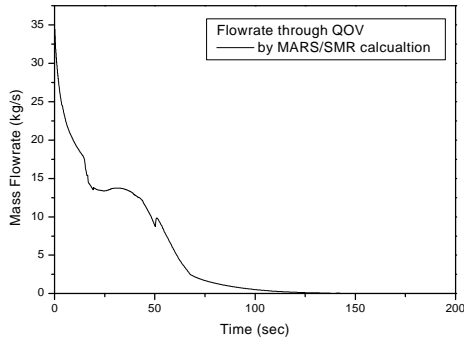


그림 7. 제한조건 모의계산 Case A에 대한 모사 결과: QOV를 통한 질량유량

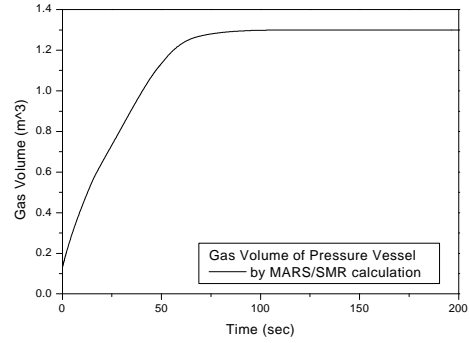


그림 8. 제한조건 모의계산 Case A에 대한 모사 결과: 압력용기의 기체부피

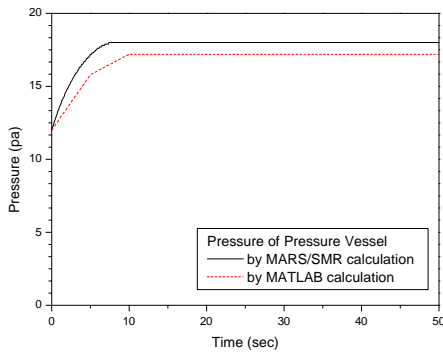


그림 9. 제한조건 모의계산 Case B에 대한 모사 결과: 압력용기의 압력

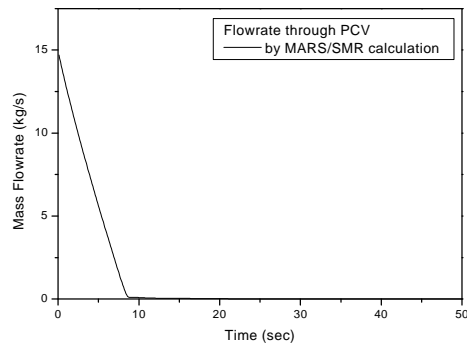


그림 10. 제한조건 모의계산 Case B에 대한 모사 결과: PCV를 통한 질량유량