



정압기지내의 안전밸브 분출용량 관계식 검증을 위한 유동해석(I)

- 정압기 유동 해석 및 질량 유량 검증

†권혁록 · 노경철 · 김영섭* · 이성혁

중앙대학교 기계공학부, *가스안전연구원 신뢰성평가연구팀
(2008년 5월 15일 접수, 2008년 6월 16일 수정, 2008년 6월 16일 채택)

Numerical Analysis for Evaluation of Ejection Capacity Relationship of Safety Valves in Pressure Regulating Station (I)

- Flow Analysis and Mass Flow Rate Verification of Pressure Regulator

†Hyuk Rok Gwon · Kyung Chul Roh · Young Seop Kim* · Seong Hyuk Lee

School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University

**Korea Gas Safety Corporation, Reliability Assessment & Research Team*

(Received May 15, 2008, Revised June 16, 2008, Accepted June 16, 2008)

요 약

가스 정압기지 내의 가스 정압기는 배관 내의 높은 가스의 압력을 일정한 압력으로 낮추는 역할을 한다. 가스 정압기는 흐르는 가스의 유동을 제어할 뿐 아니라, 하류의 압력을 제어하는 데도 사용한다. 가스 정압기지의 안전성을 위해서 정압기와 정압기에 연결되어 있는 안전밸브의 유동 특성을 파악하는 것은 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 정압기의 질량 유량 및 유동 특성을 다양한 입구 및 출구 압력 조건, 그리고 개도율에 대하여 수치해석 방법을 이용하여 알아보았다. 이러한 질량 유량에 대한 수치해석 결과는 정압기 제조사로부터 제안되는 실험 수식을 통하여 검증하였다. 결론적으로, 수치해석 결과와 실험 수식을 통해 얻어진 결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

Abstract – Gas pressure regulators in pressure regulating station reduce high-pressure gas in a process line to a lower. Gas pressure regulators are not flow control devices, they are used to control delivery pressure only. For the safety of pressure regulating station, it is essential to study flow regime and characteristics of a safety valves that is connected to a pressure regulator. For this, it is necessary to understand flow characteristics and the flow rate of upstream component part such as gas pressure regulators in regulating station. In the present study, numerical analysis of flow characteristics and the mass flow rate of a pressure regulator is conducted under the several inlet, outlet conditions and open rates. Then, the numerical result of the mass flow rate is verified with experimental equation from manufacture of pressure regulator. Consequently, the numerical result is comparatively good agreement with values from experimental equation.

Key words : pressure regulating station, pressure regulator, safety valve, open rate, computational fluid dynamics

I. 서 론

천연가스를 공급하는 정압기지 내에는 정압을 위한 여러 장치들이 있다. 그 중 가장 중요한 것이 정압기와 안전밸브이다. 정압기는 시간적으로 변동되는 부하에 대하여 1차 압력 및 부하유량의 변동에 관계없이 2차

압력을 일정하게 유지시키는 목적을 위하여 사용한다. 안전밸브는 정압기의 2차 압력이 정압기의 고장이나 온도 팽창, 기압의 변화 등으로 상승된 경우에 대기 중으로 가스를 방출하여 승압을 방지하는 데 사용된다. 따라서 정압기 및 안전밸브의 정확한 특성과 기존 설계 기준들을 명확히 검증하는 것은 시설 안전에 있어서 필수적이다[1-5]. 최근 들어 정압기지 시설 관련 사고가 빈번하게 발생되면서 가스 압력이 상승하였을 때

†주저자: hrgwon99@wm.cau.ac.kr

안전밸브의 정상적인 작동과 방출 성능이 적절하게 설계되었는지 판단하는 것은 매우 중요한 사항으로 대두되고 있다[6,7].

이를 위해서는 먼저 안전밸브 이전 요소에서의 가스의 유동 특성 및 유량을 정확히 파악하여야 할 필요가 있다. 실제 정압기지 내에는 여러 배관 및 여러 요소가 있으나, 압력 손실이 가장 크고 안전밸브를 통하는 유동에 영향을 줄 수 있는 것은 정압기이다.

정압기는 도시가스의 공급능력을 향상시키고 효율을 극대화하기 위하여, 중압 또는 고압의 도시가스를 요구되는 압력으로 감압, 조정하기 위한 설비이다.

따라서 본 연구에서는 천연가스 고압배관의 정압기지 내 안전밸브의 방출 성능 설계 검증과 설치 기준 마련을 위한 데이터 확보를 위해 정압기를 통과하는 유동의 분석 및 질량유량을 다양한 입·출구 조건 및 개도율에 따라 계산하고 그 결과를 검증하였다.

II. 표준형 정압기지 개략도

본 연구에 적용한 정압기지는 한국가스공사 표준형 정압기지이며, Fig. 1에 정압기지의 개략도가 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 정압기지로 유입되는 가스의 압력은 7 MPa이고, 유입된 가스는 밸브와 필터 등 부대 설비와 정압기를 통하여 감압된 후 출구로 유출되며, 출구의 유출 압력은 0.85 MPa를 유지하면서 운전되고 있다. 만약 정압기나 배관 내에 이물질이 끼거나, 이상 현상이 발생하여 유출 압력이 기준 압력인 0.85 MPa 보다 상승하게 되면, 상승된 압력만큼의 유량을 보조관(bypass)쪽의 안전밸브를 통하여 대기로 방출하여 배관 내의 압력을 정상상태로 유지시키게 된다.

실제 정압기지에서는 세 개의 운전 선로가 있으나,

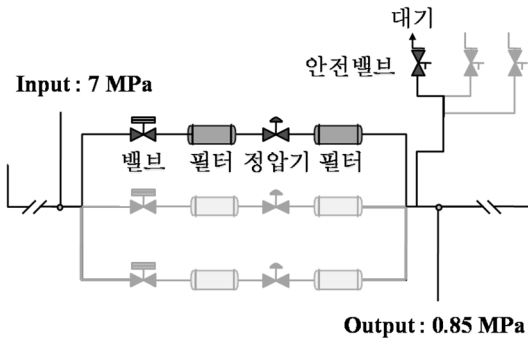


Fig. 1. Schematic of KOGAS pressure regulation station.

본 연구에서는 작동 환경(예비 선로, 모니터링 선로) 및 설치의 유사성을 감안하여 단일 선로에 대하여서만 해석을 수행하였다. 또한 유동해석의 특성상 정압기와 안전밸브를 제외한 나머지 설비들은 각각의 부차적 손실을 계산하여 수치해석 시 고려하였다. 본 연구에서 사용한 정압기는 Pietro Fiorentini®의 Reflux 819이다.

III. 정압기의 유동 해석

3.1. 모델링 및 격자 생성

Pietro Fiorentini®에서는 Reflux 819 정압기의 단면을 제공하고 있으나[8], 정확한 외형에 대한 수치 정보가 부족하여, 입구 배관 직경(8 inch)을 바탕으로 PTC®의 Pro-engineering Wildfire 2.0을 이용하여 3차원 CAD 모델링을 수행하였다[9]. 정압기의 격자 생성에는 상용 격자 프로그램인 ANSYS®의 ICEM-CFD V10.0을 사용하였으며[10], 수렴성 및 해석시간의 효율성 향상을 위해 육면체 격자(hexahedral mesh)를 구성하였다. 정압기의 격자 모습이 Fig. 2에 나타나 있으며, 실제 정압기를 통과한 고압가스가 확관을 통과하기 때문에 확관까지 고려하여 격자를 생성하였다. 전체 격자의 개수는 약 40만 개이고 정압기의 개도율 변화에 따라 25%, 50%, 75%, 그리고 100%의 4 종류로 격자를 구성하였다.

3.2. 정상 및 비정상 상태의 정압기 유동해석

정상상태 및 비정상상태에서 정압기를 통과하는 고압가스의 해석을 하였다. 정상상태에서는 개도율의 변화에 따른 가스 유량 관계식을 도출하기 위하여, 출구 압력은 0.85 MPa로 고정하였으며, 정압기의 개도율은 25%, 50%, 75%, 그리고 100%로 변화시키면서 해석을

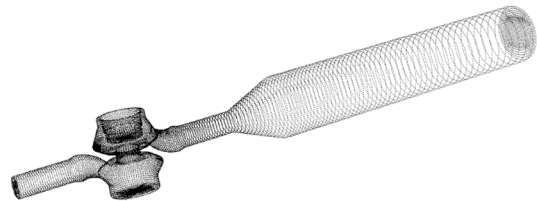


Fig. 2. Mesh generation of Reflux 819 pressure regulator.

Table 1. Boundary condition of pressure regulator.

Condition	Normal state	Abnormal state
Inlet pressure (MPa)	7	7-
Outlet pressure (MPa)	0.85	1.08, 1.5, 2, 3
Open rate (%)	25, 50, 75, 100	25, 50, 75, 100

Table 2. Simulation condition of pressure regulator.

Solving method	Condition
Solver	Density based solver
Discretization	Second order upwind
Gradient option	Green-Gauss cell based
Courant number	5
Turbulent modeling	Standard k-ε
Working fluid	Methane (CH ₄)

수행하였다.

해석에는 상용 열·유체 해석 프로그램인 ANSYS®의 Fluent V6.3을 이용하였다[11]. 또한 비정상상태에서는 출구의 압력을 1.08 MPa, 1.5 MPa, 2 MPa, 그리고 3 MPa로 변화시키면서 정압기의 개도율을 정상상태와 마찬가지로 네 가지 경우로 변화시키면서 해석을 수행하였다. 정압기의 전체 해석 케이스(case)에 대한 경계 조건이 아래의 Table 1에 정리되어 있다. 해석 조건은 Table 2에 나타내었다. 정압기를 통과하는 도시가스는 메탄, 에탄, 프로판 등 여덟 가지 이상의 다양한 가스의 혼합물이지만, 메탄이 전체 가스의 90% 이상을 차지하기 때문에 수치해석에서는 메탄만을 사용하여 해석을 수행하였다.

전체 해석 케이스에서 비정상상태에의 경우 출구압력 1.5 MPa, 개도율 75%인 경우의 압력, 온도, 속도분포, 밀도분포를 Fig. 3에 나타내었다. 또한 개도율의 변화에 따른 정상 상태 및 비정상상태의 전체 해석 결과는 Table 3~6에 나타내었다.

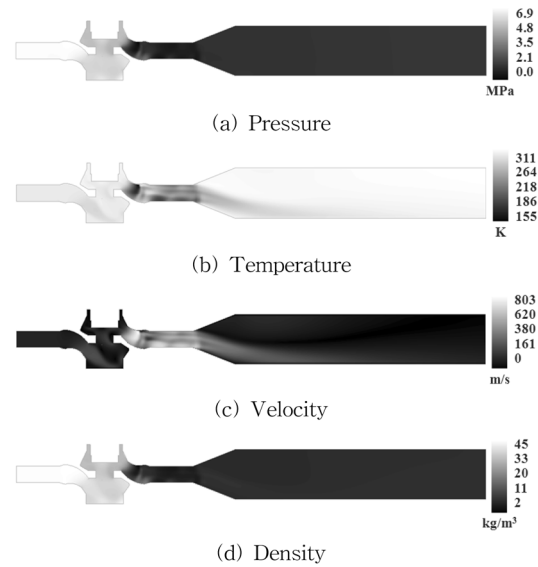


Fig. 3. Contour of several properties (outlet pressure 1.5 MPa, open rate 75%).

정압기의 유동해석 결과를 살펴보면 온도의 경우 단열 팽창 조건으로 인해 국부적으로 낮은 온도의 영역이 존재하나 응축 임계온도인 -160°C 이하로 떨어지지 않아 응결 현상 등은 발생하지 않음을 알 수 있다. 속도분포에서 알 수 있듯이 국부적으로 정압기의 출구에서 급격한 유동 변화 현상이 발생하였으나 확관을 통과한 후 유속의 급격한 하락으로 인해 안정화 되는 것을 확인하였다. 입구와 출구를 통과하는 유량과 입구

Table 3. Numerical results w.r.t outlet pressure (open rate 25%).

Properties	Outlet pressure				
	0.85	1.08	1.5	2	3
Inlet mass flow rate (kg/s)	117.49	118.03	117.03	117.02	116.77
Outlet mass flow rate (kg/s)	114.90	109.74	113.37	112.29	114.19
Inlet velocity (m/s)	79.25	79.62	78.92	78.92	78.75
Outlet velocity (m/s)	63.04	49.03	36.72	28.35	19.53
Mean velocity (m/s)	125.51	113.01	96.65	73.38	52.08
Inlet temperature (K)	298.46	298.45	298.48	298.48	298.48
Outlet temperature (K)	302.21	308.01	300.27	299.81	304.68
Mean temperature (K)	294.07	297.99	294.27	296.42	301.12
Inlet density (kg/m ³)	44.89	44.89	44.89	44.90	44.90
Outlet density (kg/m ³)	6.08	7.40	10.29	13.52	49.64
Mean density (kg/m ³)	14.44	15.31	17.34	19.74	24.45

및 출구에서의 속도, 온도, 밀도 등은 면적평균(area average)방법을 이용하여 계산하였으며, 정압기의 전체 유동장의 속도, 온도, 밀도의 값은 체적평균(volumetric average)방법을 이용하였다.

질량유량은 Fig. 4에 나타나 있다. 질량 유량 해석 결과를 살펴보면 비압축성 유체의 해석결과와는 달리 개도율이 작은 경우에는 질량유량이 감소하는 경향을 보이지만, 개도율이 큰 경우 및 출구압력의 변화에는 변화가 별로 없음을 알 수 있다. 이는 정압기내의 유동이 압축성 유동이기 때문에 Table 3~6에서 나타나 있듯이 출구의 밀도가 압력에 따라서 변하고 이로 인하여 질량 유량은 출구 압력의 변화에 따라 크게 변하지 않음

을 알 수 있다.

3.3. 수치해석 결과의 비교 및 타당성 검증

본 연구에서는 Pietro Fiorentini®의 정압기인 Reflux 819를 사용하여 형상을 모델링하였고, 격자를 구성하여 수치해석을 수행하였다. 본 연구에서 도출된 결과를 검증하기 위해서는 실험을 통한 검증이 적절하나 여러 제반여건의 한계로 인하여 Pietro Fiorentini®에서 제시하는 분출량에 대한 관계식을 이용하여 수치해석 결과를 비교, 검증하였다.

Pietro Fiorentini®에서는 Reflux 819의 분출유량에 대한 식을 실험 데이터를 기반으로 제공하고 있으며 임

Table 4. Numerical results w.r.t outlet pressure (open rate 50%).

Properties	Outlet pressure				
	0.85	1.08	1.5	2	3
Inlet mass flow rate (kg/s)	131.05	132.44	130.86	130.86	130.49
Outlet mass flow rate (kg/s)	133.20	132.43	127.31	125.31	130.57
Inlet velocity (m/s)	88.75	89.74	88.62	88.62	88.35
Outlet velocity (m/s)	71.96	59.60	40.77	30.69	21.76
Mean velocity (m/s)	128.23	119.87	98.67	79.46	54.27
Inlet temperature (K)	298.07	298.03	298.08	298.08	298.09
Outlet temperature (K)	300.12	300.94	299.46	299.76	299.89
Mean temperature (K)	297.16	391.96	294.36	295.78	298.29
Inlet density (kg/m ³)	44.70	44.70	44.70	44.70	44.71
Outlet density (kg/m ³)	6.11	7.57	10.32	13.53	19.95
Mean density (kg/m ³)	35.82	14.93	16.87	19.28	24.24

Table 5. Numerical results w.r.t outlet pressure (open rate 75%).

Properties	Outlet pressure				
	0.85	1.08	1.5	2	3
Inlet mass flow rate (kg/s)	136.14	137.18	136.36	136.83	137.44
Outlet mass flow rate (kg/s)	137.48	135.41	135.96	137.83	133.33
Inlet velocity (m/s)	92.41	93.14	92.56	92.89	93.33
Outlet velocity (m/s)	73.83	59.33	43.77	34.13	22.63
Mean velocity (m/s)	123.84	120.44	100.96	86.68	57.60
Inlet temperature (K)	297.91	297.89	297.90	297.89	297.87
Outlet temperature (K)	298.86	304.15	301.14	303.25	305.20
Mean temperature (K)	291.90	295.74	295.38	297.50	301.29
Inlet density (kg/m ³)	44.61	44.60	44.61	44.60	44.59
Outlet density (kg/m ³)	6.13	7.50	10.26	13.37	19.60
Mean density (kg/m ³)	14.99	15.78	17.72	19.87	24.53

Table 6. Numerical results w.r.t outlet pressure (open rate 100%).

Properties	Outlet pressure				
	0.85	1.08	1.5	2	3
Inlet mass flow rate (kg/s)	136.64	136.77	138.63	136.17	137.26
Outlet mass flow rate (kg/s)	132.75	135.45	128.92	136.22	132.31
Inlet velocity (m/s)	88.88	88.97	90.24	88.56	89.30
Outlet velocity (m/s)	71.11	58.34	42.55	32.95	22.38
Mean velocity (m/s)	124.66	122.88	101.42	82.54	58.16
Inlet temperature (K)	297.92	297.92	297.86	297.94	297.91
Outlet temperature (K)	301.60	301.60	311.48	299.63	304.91
Mean temperature (K)	293.69	293.92	301.78	295.91	300.88
Inlet density (kg/m ³)	44.61	44.60	44.87	44.61	44.60
Outlet density (kg/m ³)	6.09	7.57	9.92	13.53	19.63
Mean density (kg/m ³)	14.53	15.45	17.04	19.76	24.32

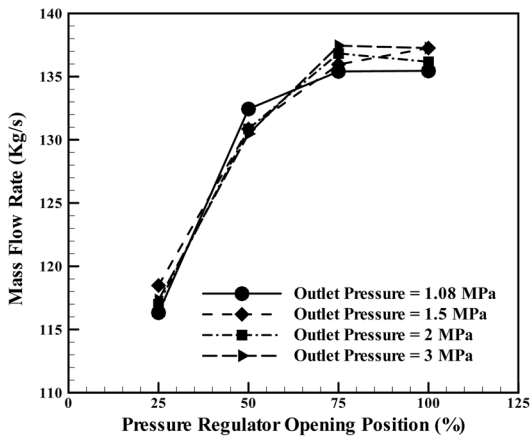


Fig. 4. Mass flow rate w.r.t opening rate and outlet pressure.

계유동인 경우 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = \frac{K_g}{2} \times P_u = 0.526 \times C_g \times P_u \quad (1)$$

여기서 P_u 는 입구단의 압력, 직경에 따른 실험상수인

K_g 와 C_g 는 Table 7에 나와 있으며, 본 연구에서는 8 inch 배관의 정압기를 사용하였다. 또한 수식에 상대밀도도 적용 시 실제 현상과의 보정을 위해 다음과 같은 보정계수(correction factor)를 계산된 유량에 곱해야 한다는 항목이 나와 있으며, 그에 따른 관계식은 아래와 같다.

$$F_c = \sqrt{\frac{175.8}{S \times (273.16 + t)}} \quad (2)$$

여기서 t 는 섭씨온도, S 는 고압가스의 상대 밀도를 의미하고 그 값은 0.554이다. 계산을 통한 보정계수는 1.0494이다.

수치해석을 통한 분출량과 앞에서 살펴본 수식을 통한 분출량을 비교해 본 결과는 Table 8에 나타나 있다. 연구에서의 수치해석 결과와 Pietro Fiorentini®에서 제안하는 수식 및 보정계수를 이용한 결과를 비교해 보는 것은 수치해석 결과의 신뢰성의 검토 면에서 상당한 의의가 있다. Pietro Fiorentini®에서 제안하는 수식은 출구 압력에 따른 변화를 무시하기 때문에 값이 일정함을 알 수 있다.

Table 8에서 두 결과를 비교해보면 실제 두 값의 오차는 최대 17.57%로서 비교적 잘 일치하는 것을 알 수

Table 7. C_g and K_g values.

Nominal diameter (mm)	25	50	80	100	150	200	250
Size (inches)	1"	2"	3"	4"	6"	8"	10"
C_g	575	2220	4937	8000	16607	25933	36525
K_g	605	2335	5194	8416	17471	27282	38425

Table 8. Mass flow rate comparison between numerical results and datas from Pietro Fiorentini®.

Outlet pressure		0.85	1.08	1.5	2	3
Mass flow rate	Numerical result	132.75	135.45	128.92	136.22	132.31
	From Pietro Fiorentini®	156.40				
Relative error (%)		15.12	13.40	17.57	12.90	15.40

있다. 고려할 수 있는 오차의 원인은 수치해석 시 적용한 모델링의 부정확성을 들 수 있다. 실제 정압기를 모델링할 경우에는 레이저 절단(laser cutting)을 이용하여 정확한 치수를 산정하여 모델링을 해야 하지만 비용 문제로 인하여 정확한 치수 측정이 불가하였다. 따라서 이러한 모델링의 부정확성으로 인한 결과의 오차가 발생할 수 있음을 생각해 볼 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 천연가스 고압배관의 정압기지 내 안전밸브 설치 기준 마련을 위한 데이터 확보를 위하여 현재 가스안전공사 정압기지 내에 설치중인 Pietro Fiorentini®의 Reflux 891 정압기를 이용하여 수치해석 방법을 이용하여 정압기 내의 유동특성 및 질량 유량을 살펴보았다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 정압기지 내 정압기의 정상 및 비정상상태에서의 다양한 출구 압력 및 개도율에 따른 유동 특성 및 유량을 예측하였다.
- 2) 개도율이 큰 경우 출구압력의 변화와 관계없이 질량 유량이 일정한 것을 확인하였다.
- 3) 수치해석 결과의 타당성을 확보하기 위하여 Pietro Fiorentini®에서 제시하는 수식 및 보정계수를 이용하여 계산한 결과 수치해석 결과와 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 에너지 기술혁신 프로그램으로 지원되었으며 이 논문은 “차세대에너지안전연구단”의 연구 결과입니다(세부과제번호: 2007-M-CC23-P-11-1-000) 또한 본 연구는 “한국가스안전공사”의 2007년 위탁용역과제로 지원되었습니다(관리번호: KGS 2007-091).

참고문헌

- [1] 신창훈, 하종만, 이철구, 허재영, 임지현, 주원구, “정압기의 임계유동 특성과 배관망해석 모델링에 관한 연구(1) - 압력비 영향 -”, *대한기계학회논문집 B 권*, **29**(12), 1291-1298, (2005)
- [2] 신창훈, 하종만, 이철구, 허재영, 임지현, 주원구, “정압기의 임계유동 특성과 배관망해석 모델링에 관한 연구(1) - 개도비 영향 -”, *대한기계학회논문집 B 권*, **29**(12), 1299-1306, (2005)
- [3] Curt Miller and Lindsey Bredemyer, “Innovative Safety Valve Selection Techniques and Data”, *Journal of Hazardous Materials*, **142**(3), 685-688, (2007)
- [4] Ralf Diener and Jürgen Schmidt, “Sizing of Throttling Device for Gas/Liquid Two - Phase Flow, Part 1 : Safety Valves”, *Process Safety Progress*, **23**(4), 335-344, (2004)
- [5] El Golli Rami, Bezian Jean-Jacques, Grenouilleau Pascalb and Menu François, “Stability Study and Modelling of a Pressure Regulating Station”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **82**(1), 51-60, (2005)
- [6] Naci Zafer and Greg R. Luecke, “Stability of Gas Pressure Regulators”, *Applied Mathematical Modelling*, **32**(1), 61-82, (2008)
- [7] El Golli Rami, Bezian Jean-Jacques, Delenne Bruno and Menu François, “Modelling of a Pressure Regulator”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **84**(4), 234-243, (2007)
- [8] Pietro Fiorentini®, “Reflux 819 Manual”, (2006)
- [9] PTC®, “Pro-Engineering Wildfire 2.0 User’s Manual”, (2005)
- [10] ANSYS®, “ICEM-CFD 10.0 User’s Manual”, (2006)
- [11] ANSYS®, “FLUENT 6.3 User’s Manual”, (2007)