

# 정압기 임계유동특성 및 배관망해석 요소로서의 고려에 관한 수치해석적 연구 (II) : 단면적 및 개도 변화

신창훈<sup>†</sup> · 하종만<sup>\*\*</sup> · 이철구<sup>\*\*</sup> · 허재영<sup>\*\*</sup> · 임지현<sup>\*\*\*</sup> · 주원구<sup>\*\*\*</sup>

## Numerical Study for The Critical-Flow-Characteristics of The Pressure Regulator and Considerations as a Pipe Network Element (II) : Influence of the Cross-Sectional-Area and Opening Ratio

C. H. Shin<sup>†</sup>, J. M. Ha<sup>\*\*</sup>, C. G. Lee<sup>\*\*</sup>, J. Y. Her<sup>\*\*</sup>, J. H. Im<sup>\*\*\*</sup>, W. G., Joo<sup>\*\*\*</sup>

**Key Words:** Pressure Regulator(정압기), Pipe Network Analysis(배관망해석), CFD(전산유체역학)

### Abstract

The major parameters governing the fluid dynamical and thermo-dynamical behavior in the large pipeline network system are friction loss and the pipeline length. But in local pipeline networks and relatively short distance pipeline system, secondary loss and the considerations of the moving states of the fluid machine are also important. One of the major element in local pressure control system is pressure regulator. It causes the variations of the physical properties in that pipeline system. When it is under working, the accurate analysis of the flow properties is so difficult. In this study, some numerical approaches to investigate the critical-flow-characteristics of the pressure regulator have been done according to the variations of the opening ratio or cross-sectional area and the detail examinations and considerations of the pressure regulator as a pipeline network elements have been carried. Finally the flow-field distributions and critical-flow-characteristics have been presented in detail and the critical flow phenomena and the relation to the opening ratio or cross-sectional-area ratio have been studied.

### 1. 서 론

기체수송을 담당하는 대규모 배관망 해석에서 일반적으로 배관망의 열, 유체역학적 거동을 결정하는 주요 인자는 배관의 마찰저항과 총길이이다. 그러나 비교적 짧은 구간의 소규모 배관망 해석이나 밸브 등의 유체기계 요소의 영향에 관심이 있는 국소적 관점의 경우에는 이러한 마찰

손실의 영향이외에도 벤딩이나 이음, 고도차의 영향 등은 물론 밸브계통 상에 존재하는 유체기계요소 등에서 발생하는 부차적 손실이나 이들의 작동상황에 따른 고려가 많은 영향을 주며, 이에 대한 고려가 해석의 정확성에 미치는 영향은 적지 않다.

정압기의 경우, 내부 형상이 복잡하고, 유로 저항이 큰 경우가 많아 전체 배관망의 저항을 증가시키고 전체 배관망의 유동특성에 영향을 주는 주요 원인이 되는 경우가 많다. 특히 정압기가 정압기능을 수행중인 경우, 정압밸브의 개도 혹은 단면적은 원래 배관의 것에 비하여 크게 변화하는 것이 일반적이다. 이 경우 유동 저항의 증가는 물론 유량이나 정압기 전후방의 유동상태량의 변화는 필수적이며, 이 때 제작사에서 제공되는 유량방정식의 정확도나 압축성 유동의 이론적

† 한국가스공사 연구개발원

E-mail : chshin@kogas.or.kr

TEL : (031)400-7554 FAX : (031)416-9014

\* 한국가스공사 연구개발원

\*\* 연세대학교 대학원 기계공학부

\*\*\* 연세대학교 기계공학부

해석과의 오차는 적지 않을 것이다.

또한 일반적인 압력과 유량관계의 관점에서의 배관망 해석에 부가하여 정압기 후방에서의 온도나 밀도 분포 변화, 손실계수 산출 등에 관심이 있는 정압시스템을 비롯한 소규모 배관망 해석에 있어서 이러한 유체요소 전후방의 유동상태량과 부차적 손실계수의 산출은 필수적이며, 이에 대한 고려방안이 절실하다. 즉, 정압기의 개도가 변화된 경우, 배관망 해석을 위한 보다 정확한 손실계수의 산정이나 정압기 전후방의 온도와 밀도 등의 상세한 유동상태량 정보의 직접적인 획득은 매우 난해하여 이에 대한 적절한 접근방법에 대한 검토와 연구가 절실하다.

이에 본 연구에서는 중, 고압용 정압기로 많이 사용되는 P사 정압기를 기본 모델로 유사한 형상의 정압기 모델을 구성, 전산유체역학적 해석방법을 통하여 유로 단면적(개도)의 변화에 따른 정압기 임계유동 특성을 상세히 조사, 규명하고 정압기 전후방 유동상태량 정보의 산출을 시도하며, 배관망 해석에서 유체요소로서의 고려를 위하여 손실계수를 산출하고 각 압력비 조건에 따른 특성을 규명하고 배관망해석에의 적용 방안에 대하여 검토를 시행하고자 한다.

## 2. 연구 및 해석

### 2.1 연구 내용

중, 고압용 정압기로 많이 사용되는 P사 정압기를 기본 모델로 유사한 형상의 정압기 모델을 구성하여 전산유체역학적 방법으로 해석을 수행하여, 유로 단면적(개도)의 변화에 따른 정압기 임계유동 특성을 조사, 규명하고 정압기 전후방의 유동상태량과 손실계수의 산출을 시도하여 배관망 해석 요소로서의 고려 방안에 대하여 검토하고자 한다.

이 때, P사 8" 유사모델을 기준으로 출구정압은 1 bar로 고정하고 입구총압은 2 bar, 온도는 288.15 K를 기준으로 1.5 bar 와 4.0 bar의 두 경우를, 정압기 유로단면적을 조절하는 실린더 리그의 개도를 100%, 70%, 40%, 10% 인 세 가지 경우에 대하여 총 12가지 경우에 대한 정상상태 해석을 수행하였다.

### 2.2 전산 해석

해석모델은 P사 정압기의 제작사 카탈로그에서 제시된 정압기 형상제원과 제작사에서 홍보용으로 제작한 실제모델의 실측을 통하여 기본적인 형상을 구성하였다. 3차원 형상작업에는 AutoCAD r14를 사용하였으며, 해석대상이 열,유체역학적으로 특수한 해석을 요구하는 경우가 아니고, 대상의 형상이 복잡한 점에서 전산유체해석(CFD)용 코드를 사용하기 보다는 상용 S/W를 적용하는 것이 적절할 것으로 판단되어, 전산유체해석에는 Fluent 6.1을 사용하였고 이를 위한 격자구성에는 Gambit 2.1을 사용하였다.

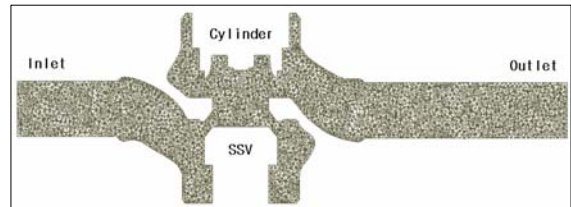


Fig. 1(a) Sectional view of grid system of the pressure regulator model

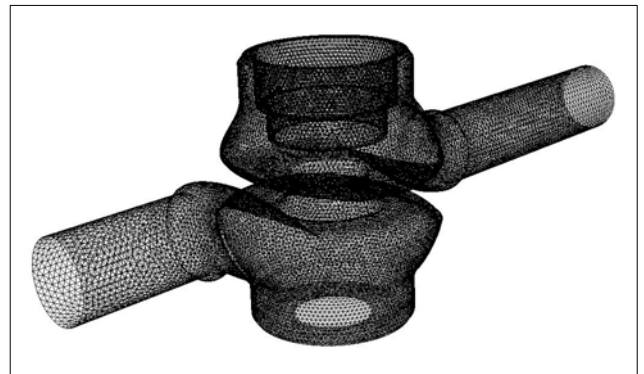


Fig. 1(b) 3D view of grid system of the pressure regulator model

해석은 2차 정확도의 Implicit Coupled Solver를 사용하여 각 경우에 대한 정상상태 해석을 수행하였고, 난류모델은 표준 k- $\epsilon$  모델을 적용하였다. 전체 구성된 격자계의 노드 수는 약 40만개 정도이다. 대상유체는 일반적인 조성의 천연가스(Natural Gas)로 하였고, 경계조건은 입구 총압(Stagnation Pressure) 일정조건, 출구는 정압(Static Pressure) 일정조건으로 적용하였다. 즉, 정압기 입구에는 일종의 대형 저장조가 연결되어 있어 균일한 압력을 지속적으로 제공하는 것으로 가정하였고, 출구는 대기압으로 설정하여 대기로 방

출되는 조건을 가정하였다. 물론 실제 정압시스템에서의 조건은 이와 같이 않으나, 입구 압력변화와 단면적 변화에 따른 정압기의 유동특성을 규명하고, 세부적인 특성을 파악하기에는 이러한 해석모델이 적절할 것으로 판단되었다. 아래 Fig 1.은 본 해석에서 구성된 3-D 해석모델의 격자 단면도와 투상도이다.

2.3 전산 해석 검증

해석의 신뢰성 및 경계조건의 타당성을 검증하기 위해 개도 100%경우에 대한 본 해석의 수행 결과를 P사에서 제시한 유량관계식의 결과와 비교를 수행하였다. 그 결과 출구에서의 유량은 각 경우에 제작사 관계식의 결과보다 약 +5 % 전후의 오차범위 내에서 만족되었다. 본 전산유체해석을 통하여 산출된 각 경우 질량유량은 다음 표 1에 제시하였다.

Table 1 Property values at inlet by each inlet pressure

Po1[bar]	V1	Ro1	To1	m1
1.25	93.25795	0.907327	290.8	3.029298
1.5	115.4753	1.065237	292.1	4.404081
1.75	127.7361	1.22879	292.1	5.619298
2	133.8391	1.389746	293.45	6.658852
2.5	139.105	1.724131	294.1	8.586251
3	140.5095	2.065872	294.1	10.39209
4	139.4594	2.757523	294.1	13.76793
6	140.1078	4.133227	294.1	20.73263
8	137.8977	5.525829	294.1	27.28089

단위: [m/s], [kg m<sup>3</sup>], [kg s]

3. 결과 및 고찰

3.1 전산유체역학 해석 결과

3.1.1 압력 분포

Fig 2. ~ Fig 4.는 입구압력이 1.5 bar, 2 bar, 4 bar인 경우에 대하여 각각 100%, 70%, 40%, 10% 개도인 상태에 대한 해석을 수행하여 정압기 대칭단면에서의 압력분포를 도시한 것이다.

개도의 감소, 즉 유로의 폐쇄에 따라 실린더 리그 전후방의 압력차이가 매우 증가되고 있음을 볼 수 있다. 반면 입구압력의 증가에 따른 내부 압력 분포는 전반적으로 큰 변화를 나타내고 있지 않는 것으로 보인다. 단, 입구 압력이 충분히 큰 경우인 4 bar의 경우는 실린더 리그에서의 단면적 감소에 따른 압력강하에 더불어 출구에서

의 압력강하도 발생되고 있음을 관찰할 수 있다.

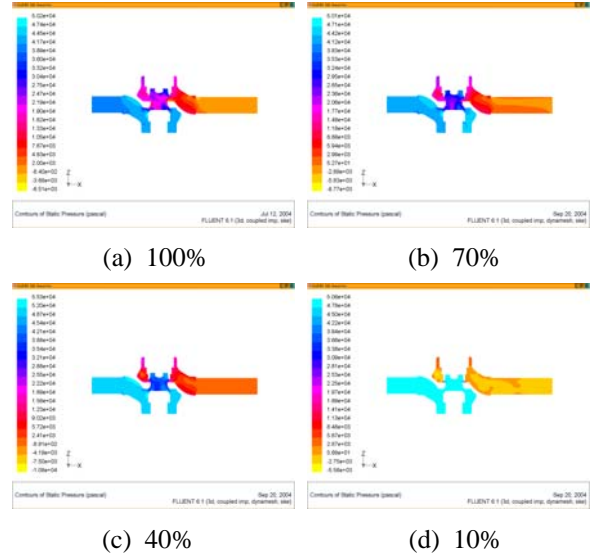


Fig. 2 Pressure distributions at Po1 = 1.5 bar

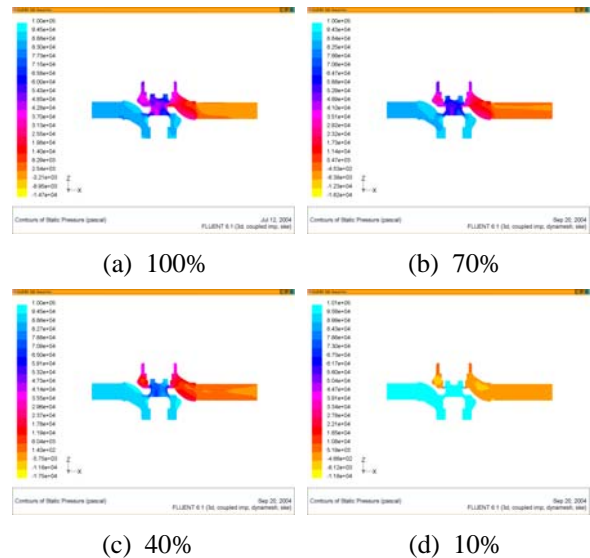
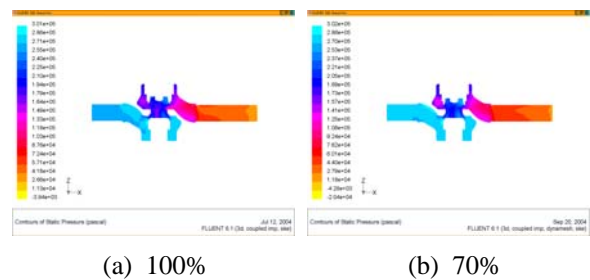
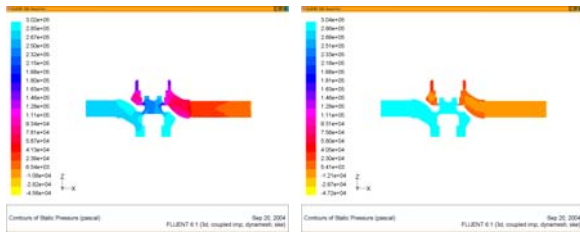


Fig. 3 Pressure distributions at Po1 = 2.0 bar



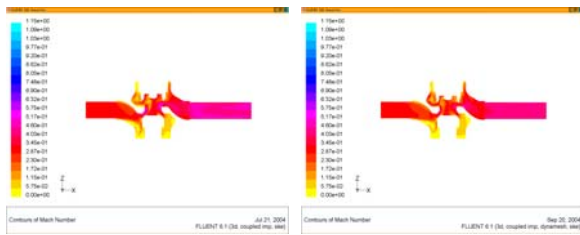


(c) 40% (d) 10%

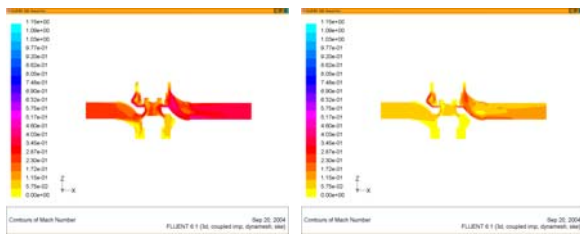
Fig. 4 Pressure distributions at Po1 = 4.0 bar

3.1.2 Mach 수 분포

Fig 5. ~ Fig 7.은 입구압력이 1.5 bar, 2 bar, 4 bar인 경우에 대하여 각각 100%, 70%, 40%, 10% 개도인 상태에 대한 해석을 수행하여 정압기 대칭단면에서의 Mach 수 분포를 도시한 것이다.

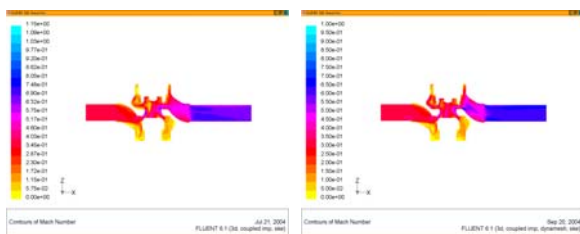


(a) 100% (b) 70%

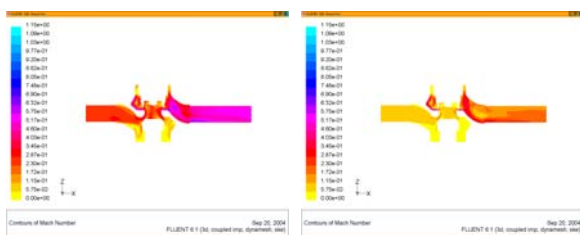


(c) 40% (d) 10%

Fig. 5 Mach # distributions at Po1 = 1.5 bar

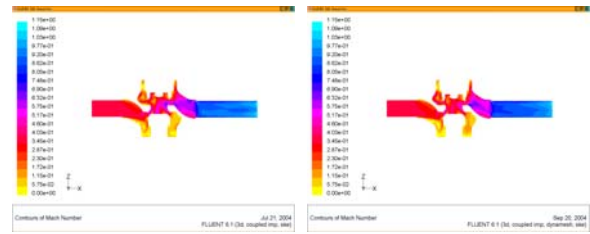


(a) 100% (b) 70%

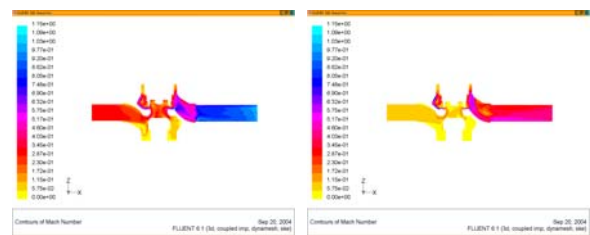


(c) 40% (d) 10%

(c) 40% (d) 10%  
Fig. 6 Mach # distributions at Po1 = 2.0 bar



(a) 100% (b) 70%



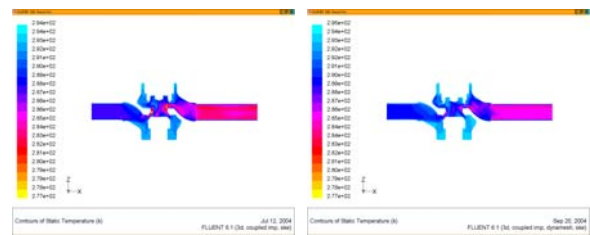
(c) 40% (d) 10%

Fig. 7 Mach # distributions at Po1 = 4.0 bar

개도의 감소에 따른 폐쇄효과로 전반적인 유동의 속도는 감소되고 있음을 볼 수 있다. 그러나 개도가 10% 정도로 크게 감소된 경우 유로 단면적의 축소에 따라 유속은 음속에 도달되고 있음을 볼 수 있고 이러한 단면적 축소에 따라 유동은 질식되어 임계유동이 형성되고 있음을 볼 수 있다. 이러한 상황은 입구압력이 증가됨에 따라 두드러지게 나타나며, 입구 압력이 4 bar인 경우는 개도가 약 40% 조건에서도 임계상태에 도달되어 음속을 나타내고 있다.

3.1.3 온도 분포

Fig 8. ~ Fig 10.은 입구압력이 1.5 bar, 2 bar, 4 bar인 경우에 대하여 각각 100%, 70%, 40%, 10% 개도인 상태에 대한 해석을 수행하여 정압기 대칭단면에서의 온도 분포를 도시한 것이다.



(a) 100% (b) 70%

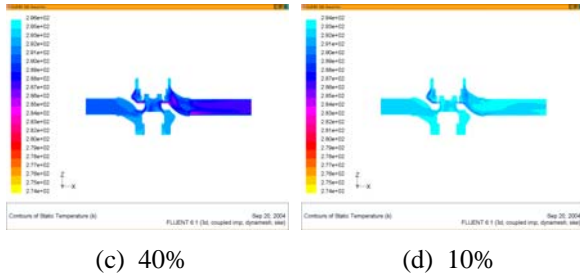


Fig. 8 Temperature distributions at Po1 = 1.5 bar

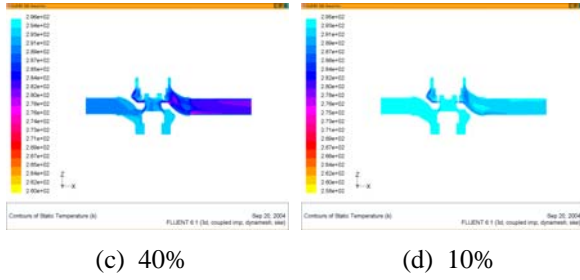
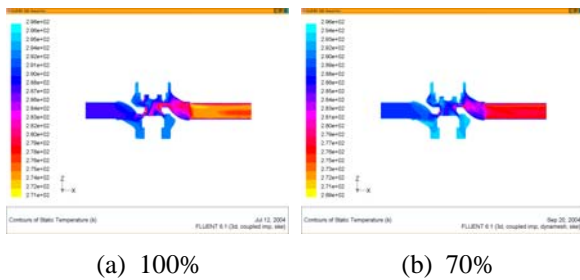


Fig. 9 Temperature distributions at Po1 = 2.0 bar

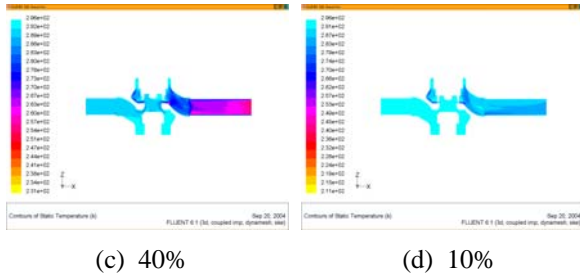
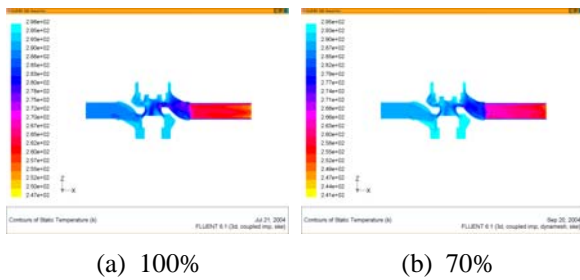


Fig. 10 Temperature distributions at Po1 = 4.0 bar

전반적으로 온도는 개도의 감소에 따른 유동의 제약에 따라 감하 폭이 둔화되는 경향을 나타내고 있다. 그러나 개도가 10% 인 경우, 유동은 일

종의 교축과정을 겪게 되며 이에 따른 단면적 축소부분 통과 후에 국부적인 온도강하가 발생됨을 관찰할 수 있고, 이 역시 입구압력이 충분히 큰 4 bar의 경우에 현상이 더욱 뚜렷하며, 온도가 상대적으로 크게 떨어지는 것으로 나타나고 있다.

3.1.4 출구상태량 해석 결과

표2는 각 개도조건에서 입구압력 변화에 따른 입구 유동상태량을 정리한 것이다. 표3은 같은 조건에서의 출구상태량을 정리한 것이다.

Table 2 Inlet property values by each inlet stagnation pressure at each opening ratio

70%	Ro1	V1	Ma1	T1	m1
1.5	1.066289	109.1531	0.299231	289.8586	4.166839
2	1.402386	124.5786	0.34218	288.784	6.254556
4	2.787126	131.152	0.360551	288.2781	13.08655
40%	Ro1	V1	Ma1	T1	m1
1.5	1.118079	89.00027	0.243481	291.0677	3.56291
2	1.431454	100.5314	0.275333	290.4108	5.152131
4	2.846899	107.6081	0.294953	289.9684	10.9674
10%	Ro1	V1	Ma1	T1	m1
1.5	1.110792	32.05545	0.087359	293.1411	1.274566
2	1.479302	36.65018	0.099914	293.046	1.941047
4	2.956967	38.60934	0.105262	293.0017	4.086991

Table 3 Outlet property values by each inlet stagnation pressure at each opening ratio

70%	Ro2	V2	Ma2	T2	Po2
1.5	0.762907	153.7056	0.422833	286.3698	12298.47
2	0.786811	226.5807	0.632418	278.0691	29045.52
4	1.024432	360.3221	1.054119	254.3817	132850.8
40%	Ro2	V2	Ma2	T2	Po2
1.5	0.758047	135.1668	0.370164	288.0912	9347.127
2	0.773648	188.874	0.522166	282.5679	19200.84
4	0.879765	354.6083	1.033511	255.5815	96103.39
10%	Ro2	V2	Ma2	T2	Po2
1.5	0.743825	47.77567	0.129749	293.313	1127.297
2	0.746668	72.43683	0.197401	292.2629	2652.432
4	0.761664	154.9298	0.425564	286.8473	12649.59

표2에서 개도의 감소에 따라 유속(Mach 수)과 질량유량이 감소되고 있음을 볼 수 있고, 반면에 밀도와 온도는 상대적으로 증가되고 있음을 볼 수 있다. 표3에서 출구 밀도의 증가는 나타나나 그 증가비율은 매우 둔화된 것을 볼 수 있고, 특히 개도가 크게 감소된 경우 입구압력의 증가에

도 불구하고 밀도의 증가는 거의 나타나고 있지 않다. 반면에 유속은 개도가 어느 정도 확보된 경우 입구압력조건에 따라 유동이 질식되고 있음을 알 수 있다. 이 때 온도는 크게 떨어지고 있다.

**Table 4** Inlet property values by each opening ratio at each inlet stagnation pressure

1.5[bar]	Ro1	V1	Ma1	T1	m1
100%	1.065237	115.4753	0.317558	288.0805	4.404081
70%	1.066289	109.1531	0.299231	289.8586	4.166839
40%	1.118079	89.00027	0.243481	291.0677	3.56291
10%	1.110792	32.05545	0.087359	293.1411	1.274566
2[bar]	Ro1	V1	Ma1	T1	m1
100%	1.389746	133.8391	0.368073	288.1051	6.658852
70%	1.402386	124.5786	0.34218	288.784	6.254556
40%	1.431454	100.5314	0.275333	290.4108	5.152131
10%	1.479302	36.65018	0.099914	293.046	1.941047
4[bar]	Ro1	V1	Ma1	T1	m1
100%	2.757523	139.4594	0.383434	288.2378	13.76793
70%	2.787126	131.152	0.360551	288.2781	13.08655
40%	2.846899	107.6081	0.294953	289.9684	10.9674
10%	2.956967	38.60934	0.105262	293.0017	4.086991

**Table 5** Outlet property values by each opening ratio at each inlet stagnation pressure

1.5[bar]	Ro2	V2	Ma2	T2	Po2
100%	0.769062	163.7135	0.450877	284.1468	14110.66
70%	0.762907	153.7056	0.422833	286.3698	12298.47
40%	0.758047	135.1668	0.370164	288.0912	9347.127
10%	0.743825	47.77567	0.129749	293.313	1127.297
2[bar]	Ro2	V2	Ma2	T2	Po2
100%	0.79165	238.9001	0.667211	276.4089	32758.17
70%	0.786811	226.5807	0.632418	278.0691	29045.52
40%	0.773648	188.874	0.522166	282.5679	19200.84
10%	0.746668	72.43683	0.197401	292.2629	2652.432
4[bar]	Ro2	V2	Ma2	T2	Po2
100%	1.066558	364.2601	1.064696	254.1001	145529.8
70%	1.024432	360.3221	1.054119	254.3817	132850.8
40%	0.879765	354.6083	1.033511	255.5815	96103.39
10%	0.761664	154.9298	0.425564	286.8473	12649.59

표4는 각 입구압력 조건에서 개도변화에 따른 입구 유동상태량을 정리한 것이다. 표5는 같은 조건에서의 출구상태량을 정리한 것이다.

표4에서 각 입구압력조건에서 개도가 감소될수록 유속(Ma 수)과 질량유량은 감소되고 있음을 볼 수 있다. 반면에 밀도와 온도는 상승하고 있

음을 볼 수 있다. 표5에서 출구유속(Mach 수)은 역시 개도의 감소에 따라 감소되고 있음을 볼 수 있다. 그러나 입구압력이 4 bar 인 경우, 개도가 상당히 감소한 경우까지 출구 유동은 계속 질식된 임계상태를 유지하고 있음을 볼 수 있다. 또한 개도의 감소에 따라 출구 온도는 상당히 증가되며, 밀도는 감소되고 있음을 볼 수 있다.

#### 4. 결 론

(1) 개도의 감소에 따라 입구 유속(Mach 수)과 질량유량이 감소되고 있음을 볼 수 있고, 반면에 밀도와 온도는 상대적으로 증가된다.

(2) 각 입구압력조건에서 개도가 감소될수록 유속(Ma 수)과 질량유량은 감소되고 밀도와 온도는 상승하고 있음을 볼 수 있다.

(3) 입구 압력이 충분히 큰 경우, 즉 4 bar 인 경우, 개도가 상당히 감소한 경우까지 출구 유동은 계속 질식된 임계상태를 유지하고 있으며, 개도의 감소에 따라 출구 온도는 상당히 증가되며, 밀도는 감소되고 있음을 볼 수 있다

#### 참고문헌

- [1] Pietro Fiorentini<sup>®</sup>, 2001, "PRESSURE REGULATOR REFLUX 819"
- [2] Frank. M. White, 1987, "Fluid Dynamics", 2nd ed., Chap. 9
- [3] A. H. Shapiro, 1953, "The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow", Ronald, NewYork,
- [4] V. L. Streeter and E. B. Wylie, 1975, "Fluid Mechanics", 6th ed., McGraw-Hill, New York,
- [5] Robert P. Benedict, 1985, "Fundamentals of pipe flow", Wiley
- [6] E. Benjamin Wylie, Victor L. Streeter, 1997, "Fluid Transients in Systems", Prentice-Hall Inc. A Simon & Schuster Company
- [7] J. Ryun, R. Burton, P. Ukranertz, Y. M. Xu, 2001, "Two-dimensional pressure control valve", Proc. of the IME 2001; 215.9; ProQuest Science Journals pp.1031-1039
- [8] Fluent Inc., 2003, "FLUENT 6.1 User's Guide"