〈 논문 〉

정압기의 임계유동 특성과 배관망해석 모델링에 관한 연구 (II)
- 개도비 영향 -

신창훈† · 하종만* · 이철구* · 허재영* · 임지현** · 주원구**

(2005년 3월 22일 접수, 2005년 11월 21일 심사완료)

A Study About Critical Flow Characteristics and the Pipeline Network Modeling of a Pressure Regulator (II)
- The Influence of a Opening Ratio -

Chang Hoon Shin, Jong Man Ha, Cheol Gu Lee, Jae Young Her,
Ji Hyun Im and Won Gu Joo

Key Words: Pressure Regulator(정압기), Critical Flow(임계유동), Pipeline Network(배관망), Opening Ratio(개도비), Numerical Analysis(수치해석), CFD(전산유체역학)

Abstract

The suitable pressure regulator modeling at each opening ratio and pressure ratio is very important to obtain reliable results, especially in small scale pipeline network analysis such as a pressure regulator system. And it is needed to confirm both whether temperature recovery is achieved after passing by the pressure regulator's narrow neck and how much amount of low temperature area that can cause condensate accumulation is distributed by various PCV models and driving conditions. In this research, the numerical model resembling P company pressure regulator that is used widely for high pressure range in commercial, is adopted as the base model of CFD analysis to investigate pressure regulator's flow characteristics at each pressure ratio and opening ratio. And it is also introduced to examine pressure regulator's critical flow characteristics and possibility of condensation or freezing at each pressure ratio and opening ratio. Additionally, the comparison between the results of CFD analysis and the results of analytic solution obtained by compressible fluid-dynamics theory is attempted to validate the results of CFD modeling in this study and to estimate the accuracy of theoretical approach at each pressure ratio and opening ratio too.

1. 서 론

정압시스템과 같은 소규모 배관망 해석에서는 배관길이에 따른 마찰손실의 영향보다는 유체기계에 의한 손실이나 벤딩, 이음새, 고도차 등에서 발생되는 부차적 손실이 더욱 중요하다.[1,2] 또한 이들 유체기계는 배관망의 수송요구에 따라 작동상황이 매우 크게 변화되며, 특히 정압기는 내부형상이 복잡하고, 작동조건에 따른 유동 변화가 커서 배관계통에서 큰 손실을 유발하고 전체 배관계통의 유동특성에 영향을 주는 주요 원인이 되는 경우가 많다.[2,3] 따라서 일반적인 배관망 운영에서 필수적으로 사용되는 정압시스템 해석과 같은 소규모 배관망 해석에서 각 작동조건의 변화에 무관하게 신뢰성 있는 결과를 산출할 수 있는 적절한 정압기 모델링은 매우 중요하다.

또한 천연가스와 같은 특수한 기체의 수송을 담당하는 경우, 설비유지와 안전문제에 중대한 영향을 미칠 수 있는 배관 내의 응축과 응결(매

† 책임저자, 회원, 한국가스공사 연구개발원
E-mail : chshin@kogas.re.kr
TEL : (031)400-7554 FAX : (031)416-7231
* 한국가스공사 연구개발원
** 회원, 연세대학교 기계공학부

탄 하이드레이트) 문제를 방지하기 위한, 탄화수소이슬점과 물(H_20) 이슬점 기준을 만족하고 있는지에 대한 검증을 위하여, 요구압력을 맞추기 위해 각 개도비로 조절되는 정압기 목을 통과한 이후의 유동이 정상적으로 압력과 온도 회복을 달성하고 있는지에 대한 검토가 요구되며, 정압기의 형상과 구조에 따른 내부 응축물의 축적 여부나 저온영역의 분포 크기에 대한 상세한 조사와 검토가 절실히 요구된다.

이에 본 연구에서는 앞선 본 연구논문 (I)편[이후, 본 연구 (I)편]의 압력비 영향에 대한 검토에 이어, 동일한 정압기 모델, 즉 중, 고압용 정압기로 많이 사용되는 P사 정압기를 기본 모델로 유사한 형상의 정압기 모델을 구성하여 전산유체역학적 해석방법을 통하여 각 입출구 압력비 조건과 각 개도비에서의 정압기 내부 압력, 온도, 속도(마하수) 등의 유동상태량 분포를 면밀히 조사하고자 한다. 이를 통하여 각 압력비와 개도비에 따른 정압기의 유동특성을 규명하고 배관내부에서의 응축과 응결의 발생 가능성을 검토하며 유동의 질식에 따른 국부적인 온도강하 영역의 크기와 분포 범위, 응축물의 축적 가능성 등에 대하여 상세한 조사를 수행하고자 한다.

아울러 본 연구 (I)편의 압력비 영향에 대한 검토에 부가하여 정압시스템과 같은 소규모 배관망 해석에서 각 압력비 조건에서 개도비가 변화되는 경우에도 신뢰성 있는 해석이 가능한 이론적 정압기 유동해석 방법을 검토하고자 각 경우에 대하여 정압기의 임계유동특성을 규명하고, 이때 전산유체역학 해석을 통해 산출된 입출구 유동상태량을 기본 자료로 압축성 유체역학 이론의 적용을 통한 해석 가능성을 검토, 신뢰성을 비교, 검증하고자 한다.

2. 연구 내용

2.1 해석 구분

본 연구 (I)편에서 사용된 P사 정압기 유사 모델을 사용, 전산유체역학 해석을 통하여 각 입출구 압력비 조건에서 정압작용에 따른 정압기 목 단면적 변화, 즉 개도비 변화에 따른 정압기 내부의 압력, 온도, 속도(마하수) 등의 유동상태량의 산출을 시도하고자 한다.

이 때, 해석 대상은 출구정압을 1 bar로 고정하고 입구총압이 2 bar, 온도는 288.15 K을 기준 조건으로 아임계조건으로는 입구총압 1.5 bar, 1.75 bar 의 두 경우를 임계조건으로는 2.5 bar, 3 bar, 4 bar, 6 bar, 8 bar 의 다섯 가지 경우에 대하여, 각각 정압기 목의 유로단면적을 조절하는 실린더 리그의 개도 개방율을 100%, 70%, 40%, 10% 인 각 네 가지 경우로 하여, 총 32가지 경우에 대한 정상상태 해석을 수행하고자 한다.

마찬가지로 본 연구 (I)편에서의 이론해석 검토에 이어, 각 압력비 별 개도비 조건에서의 압축성 유체역학 이론 적용에 대한 타당성 검토와 신뢰성 검증을 위하여 정압기 내부유동을 비가역 단열과정을 겪는 1차원 압축성 유동으로 가정하여 각 압력비와 개도비에 대한 해석을 수행, 그 결과를 전산유체역학 해석을 통해 산출된 입출구 유동상태량과 비교, 검토하고자 한다.

2.2 전산유체역학 해석

해석모델은 본 연구 (I)편에서 사용된 P사 정압기 유사 모델과 동일하다. 3차원 형상화 작업에는 AutoCAD r14를, 전산유체해석의 수행에는 Fluent 6.1을 사용하였고 이를 위한 격자구성에는 Gambit 2.1을 사용하였다.[4] 기타 해석방법, 조건과 검증은 본 연구 (I)편에서와 동일하다.

단, 이 때 해석과 검증의 기준이 되는 제작사 제시 유량계수 관계식은 다음 식 (1)과 같다.[5]

***B-1** in sub-critical conditions: (Pe<2xPa)*

$$K_G = \frac{Q}{\sqrt{Pax(Pe-Pa)}}$$

***B-2** in critical conditions: (Pe≥2xPa)*

$$K_G = \frac{2xQ}{Pe} \quad (1)$$

이 때, K_G : 유량계수, Pe : 입구압력[bar], Pa : 출구압력[bar], Q : 체적유량[Stm³/h]이다.

2.3 압축성이론 해석

입출구 압력비와 개도비 변화에 따른 정압기 입출구 유동상태량의 산출을 위한 압축성 유체역학 이론은 본 연구 (I)편에서 압력비 조건에 적용이 타당하게 검토된 비가역 1차원 압축성 유동의 지배방정식을 도입하였으며, 단열과정의 가정을 도입하여 이를 시행착오법(Trial & Error Method)으로 정압기 입출구 유동상태량의 산출하였다.[6]

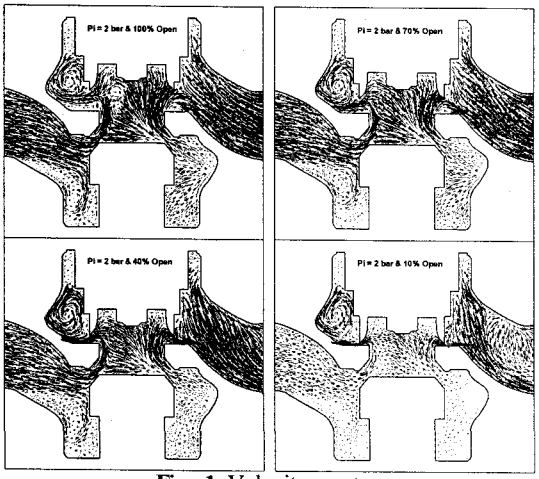
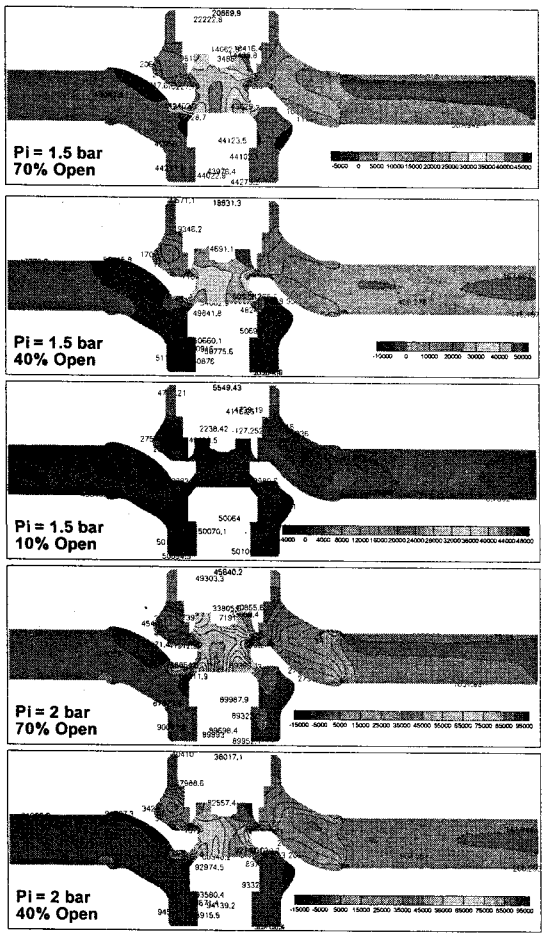


Fig. 1 Velocity vectors



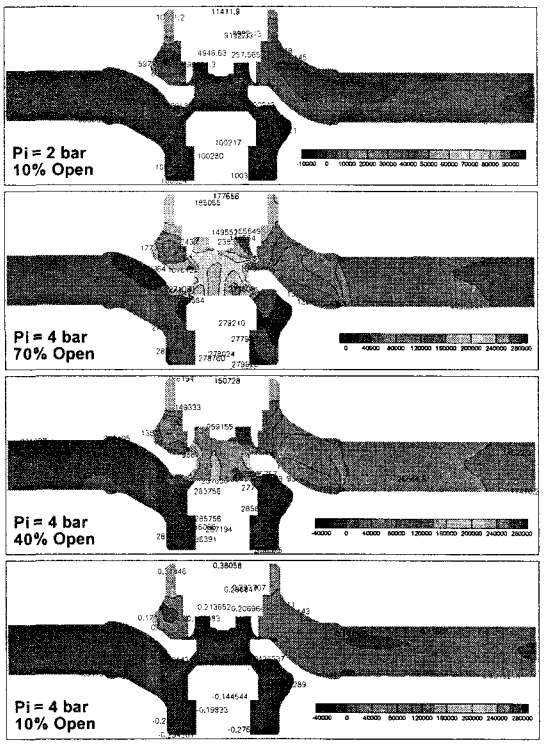


Fig. 2 Pressure[Pa] distributions at symmetric plane

3. 결과 및 고찰

3.1 전산유체역학 해석 결과

본 절에서는 전산유체역학 해석을 통하여 산출된 결과를 제시하고 각 압력비 별 개도비 조건에 따른 정압기 내부유동 특성을 조사, 검토하고자 한다. Fig. 1은 2 bar 조건에서 100%, 70%, 40%, 10% 로 개도가 변화될 때, 축 방향 대칭 단면에서의 속도분포의 변화를 순서대로 도시하였다. 각 그림에서 개도의 변화에 따른 속도분포와 와류구조의 변화를 관찰할 수 있다.

3.1.1 압력 분포

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

각 그림에서 개도의 감소, 즉 유로의 폐쇄가 커짐에 따라 실린더 리그 전후방의 압력차이가 크게 증가되고 있음을 볼 수 있다. 그러나 각

압력비 증가에 따른 내부 압력 분포의 변화는 크지 않은 것으로 보인다.

3.1.2 Mach 수 분포

Fig. 3은 앞 절과 동일한 경우에 대한 정압기 대칭단면 Mach 수 분포를 도시한 것이다. 각 그림에서 개도 감소에 따른 단면적 축소의 영향으로 유량과 유속은 감소되고 있음을 볼 수 있다. 그러나 입출구 압력비가 아임계조건인 1.5 bar 의 경우에도 개도가 10% 정도로 크게 감소된 경우, 정압기 목 단면적의 축소에 의해 정압기 목 부분의 유속은 음속에 도달되어 임계유동이 형성되고 있음을 볼 수 있다. 이러한 상황은 입구압력이 증가됨에 따라 더욱 두드러지게 나타나며, 입구압력이 4 bar인 경우는 개도가 약 40%에 불과한 조건에서도 임계상태에 도달되어 음속을 나타내고 있음을 볼 수 있다.

3.1.3 온도 분포

Fig. 4는 앞 절과 동일한 경우에 대한 정압기 대칭단면 온도 분포를 도시한 것이다. 모든 압력비 조건에서 목을 지난 후단 영역에서의 온도는 개도에 반비례하여 상승되고 있다. 이것은 유로 단면적의 축소에 따른 입구 유입 유량의 감소에 따라 출구에서 동일한 체적을 지나는 유속이 낮아져야 하는 까닭에 의한 것이다. 그러나 정압기 목 부근의 온도는 개도비에 비례하여 강하되는 현상을 보이고 있는데, 이것은 목의 단면적이 임계단면적에 접근하면서 목에서 유속이 증가되고 온도는 강하함에 따른 것으로 생각된다.

다음으로 압력비의 증가에 따라 내부 온도분포 폭이 커지는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 입출구 압력비가 커짐에 따라 임계유량으로 제한됨에 따라 통과하지 못하는 유동이 입구영역에서 상대적으로 높은 압력범위에서 머무르게 되고, 목과 출구부분에서 팽창되는 유동은 질식되어 임계온도의 범위에 도달됨에 따라 큰 온도차이가 발생되는 것으로 추측된다.

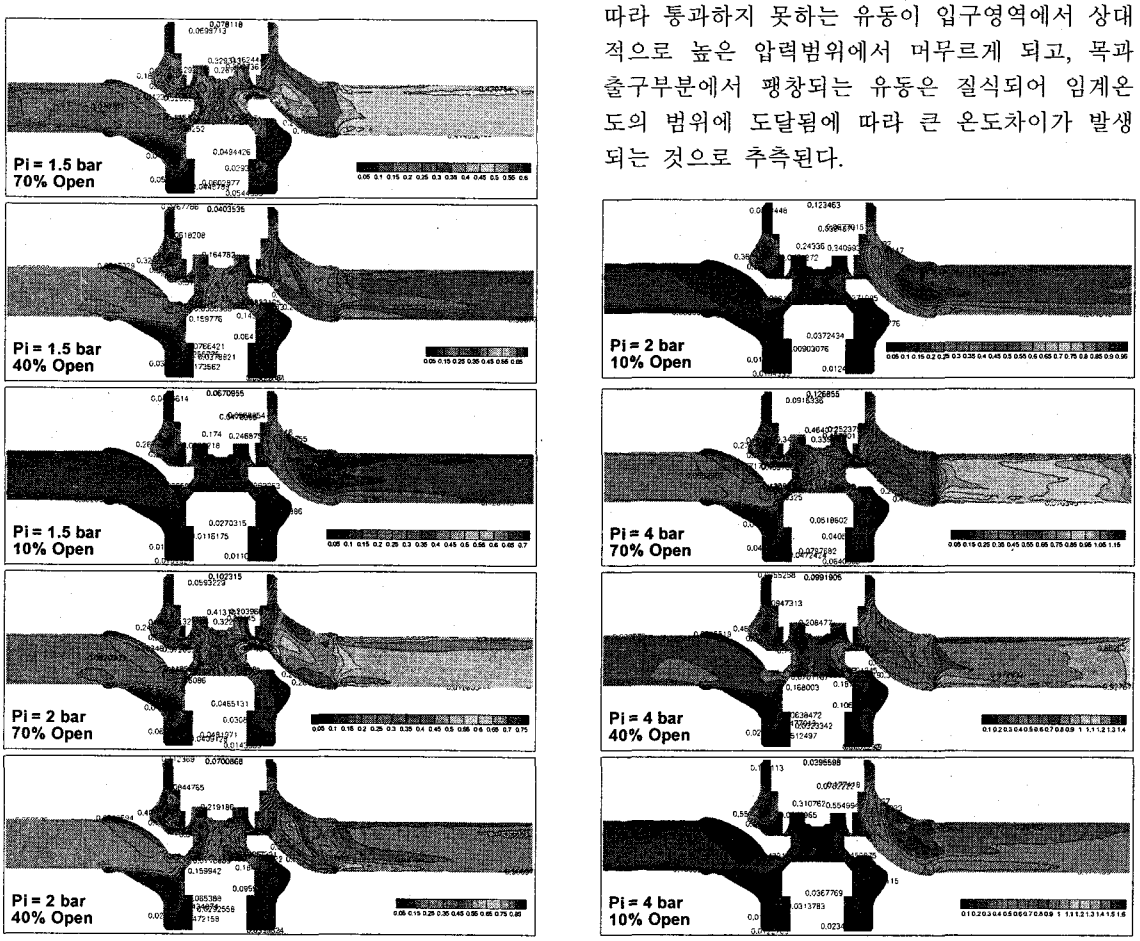


Fig. 3 Mach number distributions at symmetric plane

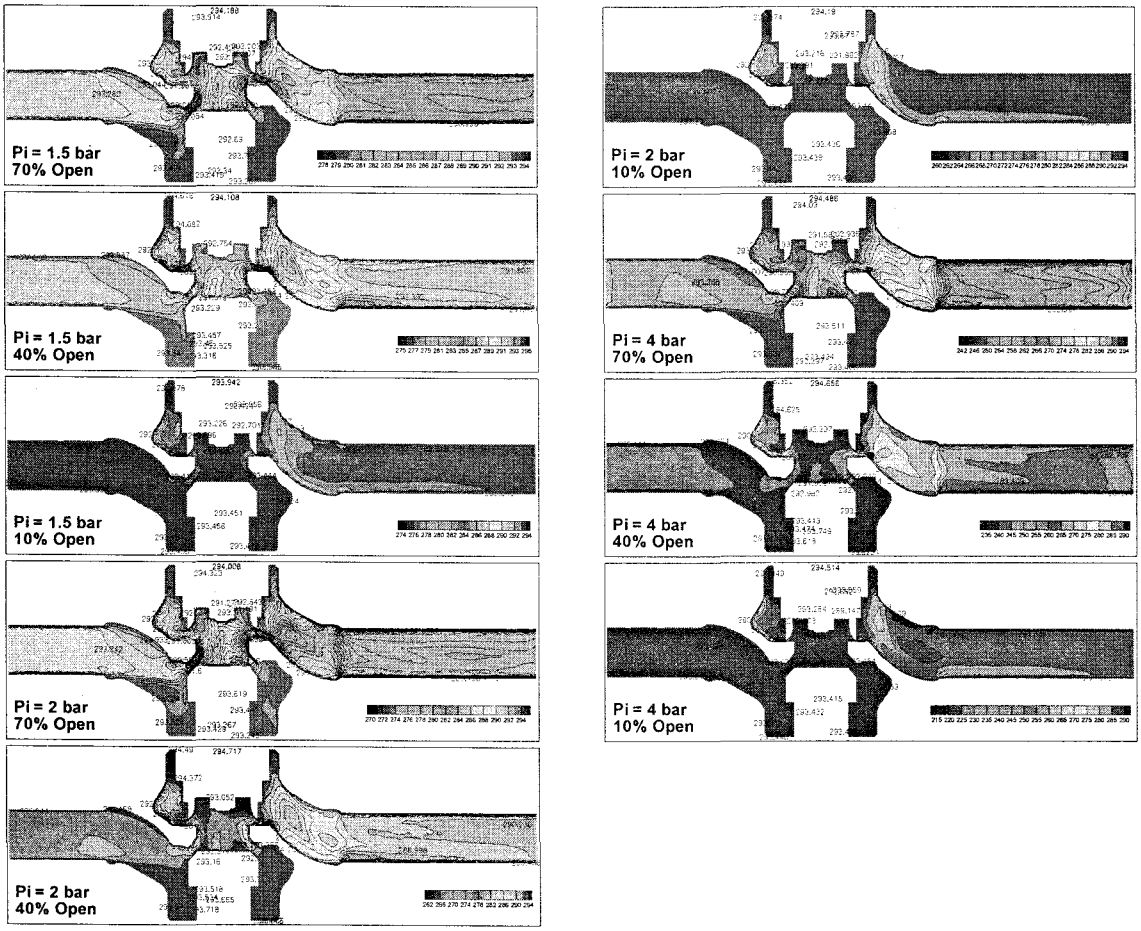


Fig. 4 Temperature[K] distributions at symmetric plane

특히 목 단면적 개도가 10% 인 경우, 유동은 일종의 교축과정을 겪는 것으로 보이며 이후 영역에서 국부적인 온도강하가 발생됨을 모든 압력비 조건에서 관찰할 수 있다. 그러나 목 부근에서의 온도가 탄화수소 이슬점 온도나 물의 이슬점 온도 이하로 유지되는 경우는 임계압력비 이상인 4 bar의 경우에서만 관찰되고 있다. 즉 입출구의 압력비가 비가역 단열과정의 임계유동 압력비 이상에서 목 단면적이 임계단면적에 근접하는 경우에 목 부근에서의 온도는 임계온도에 근접하게 강하되는 것을 알 수 있다.

그러나 목을 통과한 이후의 영역에서, 본 연구 대상 정압기 모델의 경우 목 후단의 형상이 아래로 흐르는 형태로 되어 있고, 응축이 발생될 경우 정체나 축적이 될 수 있는 하단부가 상대적으로 큰 곡률을 가진 형태로 되어 있으며, 유동의 주류에서 다소 떨어져 있는 관계로 온도의 회복이 빠르게 발생되는 것으로 보인다. 오히려 이 영역에서의 온도가 낮아지는 경우는 압력비가 작고 개도가 큰 경우에 나타나고 있는데, 이것은 온도강하의 정도가 작아 전체적인 온도범위가 이슬점 온도와는 여유가 있다. 물론 본 연구 (I)편에서 우려를 제기한 바와 같이 임계압력비 조건을 넘어서는 경우 목에서의 온도강하는 매우 컸고 압력비의 증가에 따라 더욱 큰 온도강하의 가능성도 여전히 존재하나 본 정압기 모델의 경우는 빠른 온도회복이 달성되고 축적이 되지 않는 구조와 형태로 되어 있어 모든 압력비와 개도비 범위에서 응축물의 축적 가능성은 낮은 것으로 보인다.

Table 1 Inlet property values by each opening ratio at each inlet stagnation pressure

1.5[bar]	Ro1[kg/m³]	V1 [m/s]	Ma1	m1 [kg/s]
100%	1.065237	115.4753	0.317558	4.028987
70%	1.066289	109.1531	0.299231	3.752419
40%	1.118079	89.00027	0.243481	3.278809
10%	1.110792	32.05545	0.087359	1.137176

2[bar]	Ro1[kg/m³]	V1 [m/s]	Ma1	m1 [kg/s]
100%	1.389746	133.8391	0.368073	6.052008
70%	1.402386	124.5786	0.34218	5.704838
40%	1.431454	100.5314	0.275333	4.675904
10%	1.479302	36.65018	0.099914	1.73076

4[bar]	Ro1[kg/m³]	V1 [m/s]	Ma1	m1 [kg/s]
100%	2.757523	139.4594	0.383434	12.432145
70%	2.787126	131.152	0.360551	11.812016
40%	2.846899	107.6081	0.294953	9.983103
10%	2.956967	38.60934	0.105262	3.776142

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

1.5[bar]	Ro2[kg/m³]	V2 [m/s]	Ma2	m2 [kg/s]
100%	0.769062	163.7135	0.450877	4.028987
70%	0.762907	153.7056	0.422833	3.752419
40%	0.758047	135.1668	0.370164	3.278809
10%	0.743825	47.77567	0.129749	1.137176

2[bar]	Ro2[kg/m³]	V2 [m/s]	Ma2	m2 [kg/s]
100%	0.79165	238.9001	0.667211	6.052008
70%	0.786811	226.5807	0.632418	5.704838
40%	0.773648	188.874	0.522166	4.675904
10%	0.746668	72.43683	0.197401	1.73076

4[bar]	Ro2[kg/m³]	V2 [m/s]	Ma2	m2 [kg/s]
100%	1.066558	364.2601	1.064696	12.432145
70%	1.024432	360.3221	1.054119	11.812016
40%	0.879765	354.6083	1.033511	9.983103
10%	0.761664	154.9298	0.425564	3.776142

3.1.4 해석 결과 고찰

Table 1은 전산유체역학 해석을 통하여 산출한 각 입구압력 조건에서 개도비에 따른 입구의 유동상태량을 정리한 것이고 Table 2는 출구의 유동상태량을 정리한 것이다.

Table 1에서 각 압력비에서 개도가 감소될수록 입구 유속(Ma 수)이 비례하여 감소되고 이러한 유속의 감소는 질량유량의 감소로 이어지고 있음을 볼 수 있다. 그러나 질량유량은 각 개도비에 따른 변화보다 입구압력, 즉 밀도 변화에 의한 영향이 훨씬 크게 나타나고 있음도 동시에 확인할 수 있다. 여기서 제작사에서 제시한 유량식인 식 (1)에서 유량이 단지 압력과 개도의 함수로 표

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

40%	Ro1[kg/m³]	V1 [m/s]	Ma1	T1 [K]
1.5 bar	1.118079	89.00027	0.243481	291.0677
2 bar	1.431454	100.5314	0.275333	290.4108
3 bar	2.132735	109.0417	0.298925	289.8662
4 bar	2.846899	107.6081	0.294953	289.9684
6 bar	4.272765	106.9344	0.29308	290.0118
8 bar	5.686094	109.2942	0.299631	289.8582

10%	Ro1[kg/m³]	V1 [m/s]	Ma1	T1 [K]
1.5 bar	1.110792	32.05545	0.087359	293.1411
2 bar	1.479302	36.65018	0.099914	293.046
3 bar	2.217716	38.65434	0.105371	292.9997
4 bar	2.956967	38.60934	0.105262	293.0017
6 bar	4.434928	39.022	0.106391	292.9921
8 bar	5.912861	39.26607	0.107046	292.9853

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

40%	Ro2[kg/m³]	V2 [m/s]	Ma2	T2 [K]
1.5 bar	0.758047	135.1668	0.370164	288.0912
2 bar	0.773648	188.874	0.522166	282.5679
3 bar	0.815927	288.2034	0.817203	268.4247
4 bar	0.879765	354.6083	1.033511	255.5815
6 bar	1.297824	359.3416	1.052792	254.6704
8 bar	1.740771	359.5631	1.054418	254.5733

10%	Ro2[kg/m³]	V2 [m/s]	Ma2	T2 [K]
1.5 bar	0.743825	47.77567	0.129749	293.313
2 bar	0.746668	72.43683	0.197401	292.2629
3 bar	0.754054	113.2767	0.311995	289.574
4 bar	0.761664	154.9298	0.425564	286.8473
6 bar	0.787638	225.2496	0.62836	277.8828
8 bar	0.824836	295.398	0.843383	265.5948

시되는 이유와 타당성도 참고적으로 알 수 있다.

Table 2에서 출구유속(Mach 수)은 개도 감소에 따른 입구유량의 감소에 따라 감소되고 있음을 볼 수 있다. 따라서 아임계조건인 1 bar, 2 bar 의 경우 출구유동은 검토된 각 개도에서 질식되지 못하고 있다. 그러나 임계조건인 4 bar 의 경우에는 개도가 40%까지 축소되더라도 유동이 질식되고 있어 임계상태에 도달되고 있음을 볼 수 있다. 단, 10% 개도의 경우, 개도가 임계단면적 이하로 감소되어 목에서 유동이 질식되고 임계유량이 후방으로 공급됨에 따라 출구에서는 유동이 아임계상태로 유지되고 있음을 알 수 있다.

Table 3과 4는 각 개도비에서 입구압력조건에 따른 입구 유동상태량과 출구 유동상태량을 정리한 것이다. Table 3에서, 본 연구 (I)편에서 검토한 개도 100% 경우와 마찬가지로 입구(유량) 임계조건

(약 2 bar) 이후의 입구 상태는 고정되고, 밀도(압력)의 증가에 따른 유량의 증가만이 발생되고 있음을 볼 수 있다. 이러한 현상은 개도 40% 이상의 조건은 물론 약 4 bar 이상에서 임계단면적이 미달되는 10% 개도에서도 동일하게 나타나고 있다.

Table 4의 개도 40%의 경우는 (I)편에서 검토한 개도 100% 경우와 마찬가지로 출구(유동) 임계조건(약 3.5 bar)이후에서 출구 유동은 음속에 도달되어 고정되고 있다. 단 개도 10%의 경우, 즉 목의 단면적이 임계단면적보다 작아지는 경우, 출구 유동은 목에서 제한된 임계유량만이 후방으로 공급됨에 따라 임계상태에 도달되지 못하고 있음을 볼 수 있다.

3.2 1차원 압축성이론 해석 결과

본 연구 (I)편에서와 동일하게 1차원 비가역 단열과정 압축성유동 지배방정식 식을 적용하여 각 입출구 압력비 조건에 대한 유동상태량을 시행착오법을 통하여 산출하였다.

3.2.1 해석 결과 고찰

Table 5는 각 압력비별 개도변화에 따른 입구 상태량 계산 결과를 대표적인 경우인 압력비 1.5 bar, 2 bar, 4bar의 세 경우에 대하여 정리한 것이고 Table 6은 출구상태량 결과를 정리한 것이다.

Table 5와 Table 1을 비교하여 보면, 각 압력비 조건에서 개도 100%, 70%의 경우에는 비교적 좋은 일치를 보이고 있는 반면에 개도 40%와 10%의 경우는 오차가 크게 나타나고 있고 이것은 출구의 결과인 Table 6과 Table2에서도 동일한 현상이 발생하고 있음을 볼 수 있다. 이는 본 연구 (I)편의 Fig. 2에서 제시한 본 정압기 CFD 해석모델의 검증에서 보듯이 개도가 100%개도에 가까운 경우보다 낮은 개도에 접근하면서 오차가 커지고 있다는 점과 특히 유량(KG)이 작은, 즉 낮은 개도에서는 유사한 크기의 오차가 상대적으로 매우 큰 비율로 인식되어 오차가 커진 것으로 보인다.

즉, 유량과 압력관계가 본 해석과 같은 1차원 압축성유동 이론해석에서는 기본적인 유동의 지배인자가 된다. 따라서 이론해석의 수행에서 개도 변화는 유량의 개념으로 적용되어 주어진 입출구 압력비와 유량의 관계에 따라 유동상태가 결정되게 되는 것이다. 그러므로 전산유체해석에서 유량 값이 비교적 잘 일치되었던 개도 100% 근방에서의 결과는 좋은 일치를 보이고 반면 개도가 작은 10%와 40%의 결과는 오차가 크게 나타나게 되는 것이다.

다시 말해, 본 연구의 모든 경우, 즉 입출구 압력비와 개도비 조건의 변화와 무관하게 각 압력비 조건에서 유량이 정확히 주어지는 경우 1차원 비가역 단열과정을 가정한 압축성유동 이론해석은 매우 적절하고 신뢰성 있는 결과를 산출하고 있음을 확인할 수 있다. 이를 보다 확실히 확인

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

1.5[bar]	Ro1[kg/m³]	V1 [m/s]	Ma1	m1[kg/s]
100%	1.0751	127.0401	0.306851	4.26132
70%	1.08547	116.3901	0.281126	3.941744
40%	1.1105	86.09141	0.207944	2.982861
10%	1.140307	17.96499	0.043394	0.639151
10%수정	1.137528	31.21189	0.075389	1.107737

2[bar]	Ro1[kg/m³]	V1 [m/s]	Ma1	m1[kg/s]
100%	1.419672	136.9541	0.330797	6.06621
70%	1.435856	125.2553	0.30254	5.611277
40%	1.474576	92.29635	0.222932	4.246258
10%	1.520152	19.18383	0.046337	0.909865
10%수정	1.514603	36.66373	0.088559	1.732567

4[bar]	Ro1[kg/m³]	V1 [m/s]	Ma1	m1[kg/s]
100%	2.839343	136.9541	0.330797	12.13242
70%	2.871713	125.2553	0.30254	11.22255
40%	2.949153	92.29635	0.222932	8.492515
10%	3.040304	19.18383	0.046337	1.819729
10%수정	3.026741	39.51908	0.095454	3.731957

Table 6 Outlet property values by each opening ratio at each inlet stagnation pressure

1.5[bar]	Ro2[kg/m³]	V2 [m/s]	Ma2	m2[kg/s]
100%	0.771623	176.8288	0.43026	4.26132
70%	0.770426	163.8211	0.3983	3.941744
40%	0.76706	124.514	0.30207	2.982861
10%	0.762107	26.8548	0.06494	0.639151
10%수정	0.762596	46.51119	0.11251	1.107737

2[bar]	Ro2[kg/m³]	V2 [m/s]	Ma2	m2[kg/s]
100%	0.78938	246.0624	0.60557	6.06621
70%	0.785851	228.6314	0.56141	5.611277
40%	0.776218	175.1612	0.42747	4.246258
10%	0.76251	38.20763	0.09242	0.909865
10%수정	0.764358	72.57972	0.17577	1.732567

4[bar]	Ro2[kg/m³]	V2 [m/s]	Ma2	m2[kg/s]
100%	0.996202	389.9543	1	12.13242
70%	0.922653	389.4644	1	11.22255
40%	0.830194	327.546	0.82668	8.492515
10%	0.765342	76.13257	0.18449	1.819729
10%수정	0.776197	153.9503	0.3757	3.731957

하기 위하여 각 Table 5와 6의 맨 아래에, 전산유체역학 해석결과인 Table 1과 2에서 산출된 10% 유량과 근사한 값을 이론해석에 10% 유량으로 수정, 대입하여 해석한 결과를 제시하였다. 제시된 결과에서 보듯이 오차는 크게 줄어 CFD 해석결과와 좋은 일치를 보이고 있음을 알 수 있다.

결과적으로 1차원 압축성 이론해석은 입출구 압력비나 개도비의 변화와 무관하게 각 압력비 조건에서 유량이 정확히 주어지는 경우 신뢰성 있는 결과를 산출할 수 있으며, 정압시스템과 같은 소규모 배관망 해석에서 마찰손실을 동반한 비가역 단열과정 1차원 압축성유동 이론의 도입과 적용이 타당함을 다시 확인하였다.

3.2.2 손실계수 및 유동계수 산출

Fig. 5는 각 입출구 압력비에서 개도변화에 따른 정압기의 손실계수(K_c)와 기체유동인자(C_f)를를 1차원 압축성유동 이론해석으로 산출하여 도시한 것이다. 즉, 정압기 모델링을 위한 정압기의 손실계수와 유동계수가 CFD해석과 이론해석을 통해 산출된 물리량을 바탕으로 적절히 산출되고 있음을 볼 수 있다.

이 때, 사용된 압축성유동의 손실계수(K_c)와 기체유동인자(C_f)는 본 연구 (I)편에서와 같다.[7]

Fig. 5에서 손실계수는 개도의 축소에 따라 증가되고 있으며, 특히 개도가 약 30 ~ 40 %이하로 축소된 이후에는 급격한 증가가 발생되고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 기체유동인자의 경우에도 마찬가지로 나타나고 있으나 상대적인 증가폭은 손실계수가 훨씬 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

(1) 입구 유동은 입구압력이 비가역단열 임계조건에 도달되면, 각 개도비에서의 마하수가 고정되어 질량유량의 증가는 오직 밀도(압력)의 함수가 된다. 반면 출구에서의 유동은 입출구 압력비가 임계조건에 해당되는 경우에도 목의 단면적이 임계단면적에 미달되는 개도비까지는 임계상태에 도달되나, 더욱 축소되어 임계단면적 이하가 되면 후방의 유동은 목의 임계유량으로 제한되어 출구에서의 유동은 임계상태에 도달되지 못한다.

(2) 본 연구 (I)편에서 우려를 제기한 바와 같이 임계압력비 조건을 넘어서는 경우 목에서의 온도강하는 매우 컸고 압력비의 증가에 따라 더욱 큰 온도강하의 가능성도 여전히 존재하나 본 정압기 모델의 경우는 빠른 온도회복이 달성되고 축적이 되지 않는 구조와 형태로 되어 있어 모든 압력비와 개도비 범위에서 응축과 축적의 가능성은 낮은 것으로 보인다.

(3) 1차원 압축성 이론해석은 입출구 압력비나 개도비의 변화와 무관하게 각 압력비 조건에서 유량이 정확히 주어지는 경우 신뢰성 있는 결과를 산출할 수 있음을 3차원 CFD 해석결과와 비교, 검토를 통하여 확인하였으며 정압시스템과 같은 소규모 배관망 해석에서의 마찰손실을 동반한 비가역 단열과정 1차원 압축성유동 이론의 적용이 타당함을 다시 확인하였다.

(4) 손실계수는 개도의 축소에 따라 증가되고 있으며, 특히 개도가 약 30 ~ 40 %이하로 축소된 이후에는 급격한 증가가 발생되고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 기체유동인자의 경우에도 마찬가지로 나타나고 있으나 상대적인 증가폭은 손실계수가 훨씬 크게 나타나고 있다.

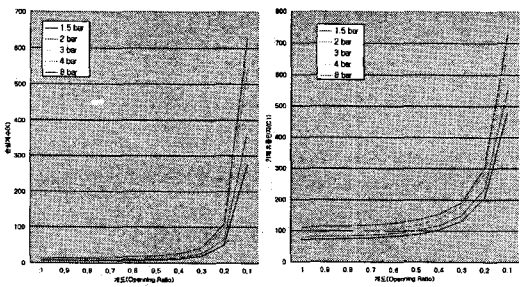


Fig. 5 Loss Coefficient(K_c) & Gas Flow Factor(C_f)

참고문헌

(1) Frank. M. White, 1987, "Fluid Dynamics."

(2) Robert P. Benedict, 1985, "Fundamentals of Pipe Flow," Wiley.

(3) Shapiro, A. H., 1953, "The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow," Ronald, New York.

(4) Fluent Inc., 2003, "FLUENT 6.1 User's Guide."

(5) Pietro Fiorentini®, 2001, "PRESSURE REGULATOR Manual."

(6) Streeter, V. L. and Wylie, E. B., 1975, "Fluid Mechanics," 6th ed., McGraw-Hill, New York.

(7) Flow Master Co., 2004, "Flow-Master2 Manual."