

실제기체 상태방정식을 적용한 열압축기 내부유동에 대한 수치해석 강위관¹ · 최두열¹ · 신지영² · 김무근[†]

(원고접수일 : 2011년 1월 12일, 원고수정일 : 2011년 2월 16일, 심사완료일 : 2011년 2월 16일)

Numerical Analysis for the Internal Flow of Thermal Vapor Compressor with real gas equation of state

Wee-Kwan Kang¹ · Du-Yeol Choi¹ · Jee-Young Shin² · Moo-Geun Kim[†]

요 약 : 열압축기는 고압 증기를 이용하여 저압 증기를 중간압으로 이송하는 일종의 이젝터이다. 이젝터에 대한 기존의 수치해석 연구는 대부분 작동유체를 이상기체로 취급하고 있으나 상변화가 발생하는 경우 이상기체 거동에서 크게 벗어날 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이상기체 상태방정식 대신 Redlich-Kwong 방정식을 적용하여 열압축기 내부 유동을 수치 해석하였고, realizable $k-\epsilon$ 모델과 SST $k-\omega$ 모델을 비교한 결과 SST $k-\omega$ 모델이 shock diamond 패턴과 박리 및 난류경계층을 잘 예측하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 실제기체 상태방정식을 사용한 경우가 이상기체 상태방정식을 사용한 경우에 비해 상대적으로 디퓨저 입구 부분과 디퓨저 목부분에서 에너지 손실이 많은 것을 알 수 있었으며, 디퓨저 출구부분에서 shock train에 의한 압력상승은 상대적으로 적으나 pseudo shock에 의한 압력상승은 동일한 것으로 확인되었다.

주제어 : 열압축기, 실제기체모델, RK 상태방정식, 이젝터

Abstract: TVC is a kind of ejector which entrains low pressure working fluid by using the high pressure working fluid. While most papers relating with ejectors treat the working fluid as an ideal gas for convenience, the fluid doesn't behave as the ideal gas when phase change occurs. In this study, numerical analysis is conducted by applying Redlich-Kwong equation of state instead of ideal gas equation of state. Two turbulent models are compared for the better prediction and SST $k-\omega$ model is preferred rather than realizable $k-\epsilon$ model by comparison. Energy loss at the diffuser inlet and throat using the real gas equation of state is relatively greater than that using ideal gas law. For the real gas case, pressure increase due to shock train at the diffuser outlet is relatively smaller than the ideal gas case, but both cases have the same pressure increase due to a pseudo shock.

Key words: Thermal vapor compressor, Real gas model, Redlich-Kwong equation of state, Ejector

1. 서 론

최근의 연구 보고서에 의하면 21세기에는 전 세계적으로 물 부족 현상이 심화될 것이며, 2025년

이 되면 거의 모든 국가가 물 부족 현상을 겪고, 그 중 절반의 국가들은 물 자원의 고갈을 맞을 것으로 예상된다[1].

[†] 교신저자(인제대학교 기계자동차공학부, E-mail : mechkmg@inje.ac.kr Tel : 055-320-3184

1 (주) Fluid & Thermal Engineering

2 동의대학교 기계공학과

이러한 수자원 부족에 따라 해수(sea water)로부터 담수(fresh water)를 생산하는 담수화 기술이 고부가가치 미래 성장산업으로 주목받고 있다.

담수화기술은 크게 상변화(phase change)의 유무에 따라서 증발법과 역삼투법(reverse osmosis)으로 구분한다. 이 중에서 증발법에 의한 생산량이 전 세계 담수 생산량의 75% 이상을 차지하고 있으며, 2005년 이전에 설치된 대부분의 증발식 담수 설비는 다단 플래쉬(multi-stage flash; MSF) 방식이다.

그렇지만, 최근 MSF 방식 담수설비의 교체 주기에 들어서면서 다중효용 (multi-effect; ME) 방식의 담수설비가 증가하는 추세인데, 이는 열압축기(thermal vapor compressor; TVC)의 효율 향상에 의한 것이다.

ME 방식 담수설비의 성능향상을 위한 연구로는 열교환기 성능향상을 위한 튜브 형상 및 배치 방법 개선, 튜브 표면의 액막 유량과 열전달계수의 상관관계, 불응축 가스의 적절한 제거 방안, 스케일의 방지 및 제거, 그리고 TVC를 이용하여 전체 공정의 소요 증기량을 줄이는 연구 등이 수행되고 있다. 특히 ME 방식에서 TVC의 흡입성능은 담수설비 전체 효율에 직접적으로 영향을 미치는 중요한 요인으로 경우에 따라 소요증기량을 절반으로 줄일 수 있으므로 경제적 운전에 매우 큰 영향을 미친다.

TVC에 대한 연구는 많지 않으나 TVC와 유사한 이젝터(ejector)에 대한 실험적 연구[2-4]와 상용 CFD 프로그램인 FLUENT를 이용해서 이젝터 내부유동에 대하여 해석한 선행 연구가 있다 [5-10]. 대부분의 선행 연구는 계산 편의상 작동

유체를 이상기체로 취급하고 있으며, 실험결과를 정성적으로는 비교적 잘 예측하고 있다. 그러나, 작동유체의 종류와 운전조건에 따라, 예를 들어, 응축과 같은 상변화를 동반하는 경우, 이상기체 거동에서 크게 벗어나므로, 실제 현상을 정확하게 해석하기에는 문제점이 있다.

응축 상변화 현상은 작동유체인 과열수증기가 열압축기를 지나 노즐 출구에서 급속하게 팽창하면서 단시간에 발생한다. 이러한 팽창과정으로 과열 수증기상태는 액체와 증기가 공존하는 과포화상태로 변화된다. 따라서, 운전조건에 따라 이러한 영역에서 운전되는 TVC 내의 증기의 유동을 정확히 파악하기 위해서는 증기의 정확한 열역학 상태량을 사용할 필요가 있다.

본 연구에서는 TVC 내부의 수증기 거동을 보다 정확하게 파악하기 위해 Van der Waals 식에 기초한 Redlich-Kwong 상태방정식을 적용하고, 상용 프로그램인 FULENT를 이용한 수치해석을 수행하여, 실제 기체 상태 방정식을 사용한 경우와 이상 기체 상태방정식을 사용한 경우의 TVC의 작동 특성을 비교 분석하였다.

2. TVC의 작동원리

Figure 1은 TVC의 기본구조로서 고압 증기를 고속의 제트형태로 변환시키기 위한 구동노즐(jet nozzle), 구동증기에 의하여 저압의 증기가 흡입되는 유로인 흡입실(suction chamber), 흡입증기가 구동증기보다 상대적으로 낮은 압력에 의해서 가속되고 혼합되는 디퓨저 입구(diffuser inlet), 구동증기와 흡입증기의 에너지 교환과 혼합이 이루어

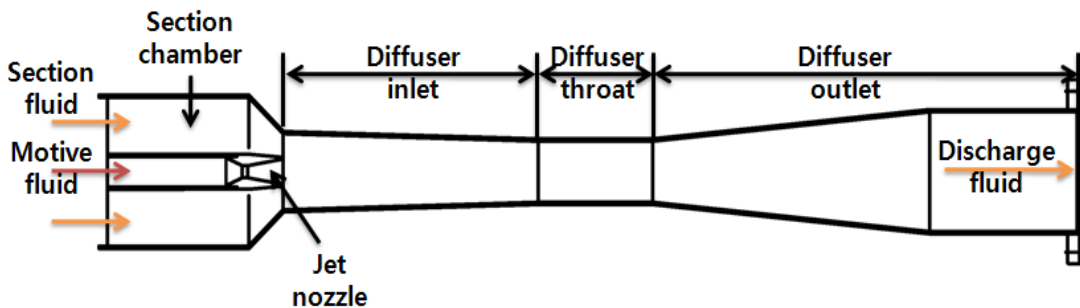


Figure 1: Schematic diagram of the thermal vapor compressor

어지는 디퓨저 목(diffuser throat), 그리고 음속의 유체를 아음속으로 압축시켜 토출하는 디퓨저 출구(diffuser outlet)로 구성되어 있다.

이러한 TVC의 중요한 성능평가 요소인 흡입유량비(entrainment ratio)는 다음과 같이 구동노즐을 통한 작동유체 유량에 대한 흡입유량의 비로 정의한다.

$$E.R. = \frac{m_s}{m_m} \quad (1)$$

여기서 m_m 은 주 유동의 질량유량이고, m_s 는 흡입되는 유체의 질량유량이다.

3. 수치해석

고효율의 안정적인 운전특성을 갖는 TVC를 설계하기 위해서는 성능실험을 통하여 설계인자를 찾아내는 것이 필수적이지만, 대형 실험 설비를 구현하는 것이 시간적, 경제적으로 매우 어렵기때문에, 시간과 비용을 절감하기 위하여 상용 프로그램인 FLUENT를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 해석 대상인 TVC의 사양은 Table 1과 같으며 Gambit 2.3.16을 이용하여 약 25,000개의 격자를 생성하였고, 특히 강한 전단력 혹은 충격과가 발생할 것으로 예상되는 부분에 격자를 집중 배치하였다.

Table 1: Dimensions of TVC

Parameters	Values
Nozzle inlet diameter	52.5mm
Nozzle outlet diameter	44mm
Nozzle throat diameter	21mm
Nozzle converging angle	25°
Nozzle diverging angle	10°
Diffuser inlet diameter	132mm
Diffuser inlet length	744.2mm
Diffuser outlet length	833mm
Diffuser throat length	370mm
Diffuser converging angle	1°
Diffuser enlargement angle	3.5°

3.1 유동모델 및 경계조건

선행연구에서는 열압축기에 대한 난류 모델로 realizable $k-\epsilon$ 을 채택하여 수치 결과를 도출했다. 그러나, 이젝터 내부 유동에 대한 다른 연구결과를 보면, 레이놀즈수가 낮은 영역에서 $k-\epsilon$ 모델과 $k-\omega$ 모델에 따라 서로 다른 연구 결과를 제시하고 있다[11].

따라서, 본 연구에서는 우선 주어진 시스템에 대하여 선행연구에서 주로 사용한 realizable $k-\epsilon$ 모델과 SST $k-\omega$ 모델을 적용하여 어느 모델이 실제유동을 보다 잘 예측하는 지 비교 분석하였다. TVC 출구와 입구의 경계조건은 Table 2에 정리한 바와 같이 상태방정식과 난류모델에 따라 구동증기와 흡입증기 모두 초크 유동이 되는 배압과 구동증기만 초크 유동으로 되는 배압으로 나누어서 설정하였다.

Table 2: Operating conditions of TVC

Motive Pressure (kPa)	Equation of state	Turbulent model	Suction pressure (kPa)		Discharge Pressure (kPa)			
					A	B	C	D
360	Ideal Gas	realizable $k-\epsilon$	I	16	24	26	28	30
		SST $k-\omega$	II	8	18	20	22	23
			III	12	22	24	26	27
			IV	16	26	28	29	30
	Real Gas	realizable $k-\epsilon$	V	16	24	26	28	29
		SST $k-\omega$	VI	8	16	18	20	22
			VII	12	22	24	24.5	25
			VIII	16	24	26	28	29

3.2 실제기체 상태방정식

앞에서 언급한 바와 같이 이상기체 상태방정식의 결과와 비교 분석하기 위해 실제기체 상태방정식으로 Redlich-Kwong 방정식을 채택하였다.

$$p = \frac{RT}{(V-\tilde{b})} - \frac{a(T)}{V(V+b_0)} \quad (2)$$

윗식에서 사용된 변수는 다음과 같이 정의된다.

$$a(T) = a_0(T_c/T)^n \quad (3)$$

$$a_0 = 0.42747R^2T_c^2/p_c \quad (4)$$

$$b_0 = 0.08664RT_c/p_c \quad (5)$$

$$c_o = \frac{RT_c}{p_c + \frac{a_0}{V_c(V_c+b_0)}} + b_0 - V_c \quad (6)$$

$$\tilde{b} = b_0 - c_o \quad (7)$$

$$n = 0.4986 + 1.1735\omega + 0.475\omega^2 \quad (8)$$

$$\omega = -\log(p_v(T)/p_c) - 1.0 \quad (9)$$

여기서, p_v 는 온도 T 에 대한 포화증기 압력으로 $T = 0.7T_c$ 로 정의할 수 있다.

4. 결과 및 고찰

난류 모델에 따른 TVC 내부의 유동을 비교하기 위해 동일한 입출구 조건에서 난류모델과 상태방정식에 따라 속도장을 비교한 결과를 Figure 2에 나타내었다. 해석 결과를 보면 노즐 출구에서의 유체 압력이 주변 압력보다 낮기 때문에 과소팽창(under-expansion)하는 것을 알 수 있고, 노즐 출구를 나온 유체는 팽창 팬(expansion fan)을 지나 디퓨저 입구 주변과 플룸(plume)의 경계를 이루는 제트 경계면을 형성하게 된다. 유체는 제트 경계면을 따라 일정한 압력을 유지하고, 하류로 갈수록 경사면 경사가 작아지면서 유동 축 방향으로 수축하게 된다. 제트 경계면에서 반사된 압축파들은 서로 합쳐지기 때문에 강도가 더 커져서 배열

충격파(barrel shock)를 형성한다. 이러한 노즐 내부의 유동 특성으로 인해 유동장은 다이아몬드 패턴을 이루게 되는데, 이 패턴이 반복되는 구간을 충격 셀(shock cell)이라 한다. 이와 같은 현상은 하류에서 반복적으로 나타나며, 점성효과가 상대적으로 현저히 커질 때까지 지속된다.

Figure 2에 보인 Desevaux[12]의 실험 결과를 보면 충격파 셀 패턴이 점진적으로 축소하며 사라지는 것을 알 수 있다. 한편 realizable $k-\epsilon$ 모델과 SST $k-\omega$ 모델을 사용하여 이젝터 내부 유동을 예측한 결과를 비교해보면 후자는 실험결과와 매우 유사한 형태를 보이는 반면, 전자는 축소 형태가 완만하지도 않고 축소 말단부가 갑자기 사라져 버리는 결과를 보이고 있다. 이것은 일반적으로 SST $k-\omega$ 모델이 저 레이놀즈 영역에 대한 예측 성능이 우수하여 제트 경계를 더 잘 찾아낸 결과로 판단된다. 따라서, 수치해석에 사용할 난류모델로 SST $k-\omega$ 모델을 선정하였고, 이를 이용하여 상태방정식에 따른 유동 특성의 차이를 비교 분석하였다.

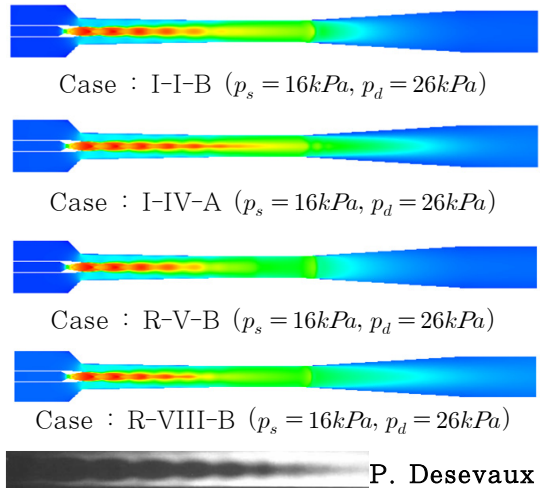


Figure 2: Filled contour of velocity: Effect of turbulent model and equation of state

Figure 3은 상태방정식에 따라서 유동장의 차이를 보여주고 있다. Case II-A와 VI-B는 입출구 조건이 $p_s = 8kPa, p_d = 18kPa$, Case III-A, VII-A는 $p_s = 12kPa, p_d = 22kPa$ 인 경우로 노즐

압력은 $p_m = 360kPa$ 로 일정하다. Figure 3에서 두 경우를 비교하면 실제기체 상태방정식을 사용하여 예측한 충격파 셀 구간이 이상기체 상태방정식을 사용한 경우에 비해 약간 짧게 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 이상기체 상태방정식을 사용하는 경우에 혼합실(mixing chamber)내 유동을 등엔트로피로 가정하지만, 실제기체 상태방정식을 사용하는 경우에는 비가역 유동으로 인해 손실이 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

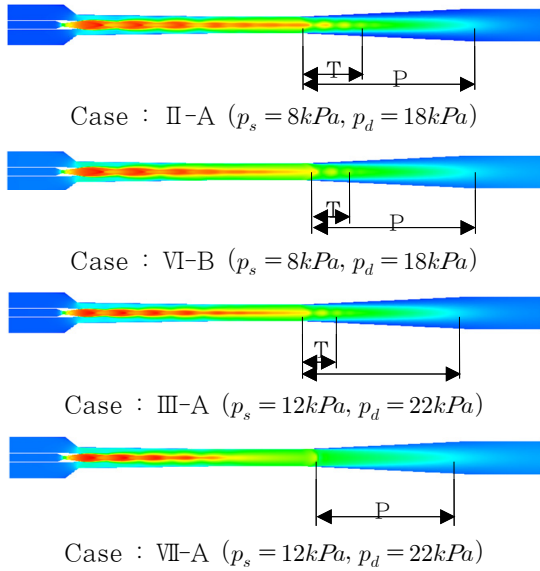


Figure 3: Filled contour of velocity (T : shock train, P : pseudo shock)

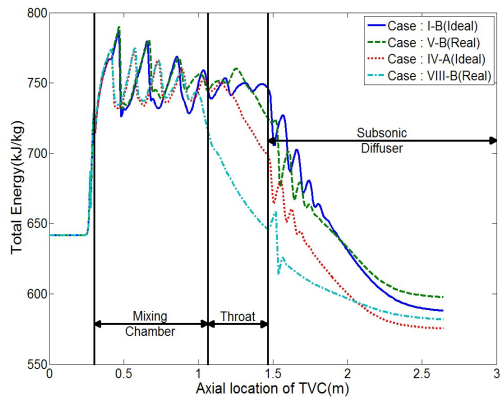


Figure 4: Total Energy distribution along the centerline of TVC

Figure 4에서도 실제기체 상태방정식을 사용하는 경우 이상기체 경우에 비하여 상대적으로 에너지 손실이 많기 때문에 축방향으로 동일한 위치에서 총에너지가 작은 것으로 예측되고 있다. 그러나 아음속 디퓨저(subsonic diffuser) 구간에서는 실제기체 상태방정식을 적용한 경우 발생하는 수직 충격파 수가 이상기체 경우에 비하여 작기 때문에 손실 에너지가 작아 디퓨저 하류에서는 전체에너지 크기가 역전되는 결과가 나타난다.

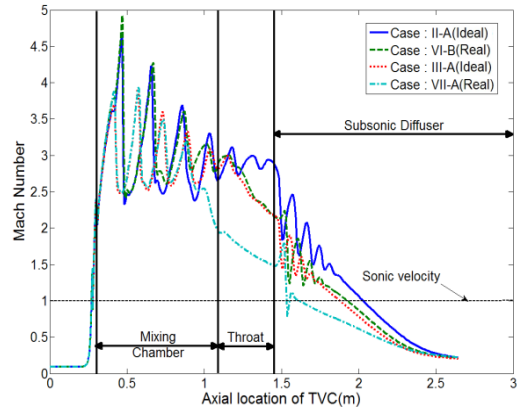


Figure 5: Mach Number distribution along the centerline of TVC

Figure 5는 중심축의 마하수 분포를 나타낸 것으로 Case II-A의 경우 아음속 디퓨저 입구부분에서 마하수 약 2.9에서 수직 충격파가 생성되기 때문에 후단에 연속으로 다수의 충격파가 생성되어 Shock train(ST)을 형성한다. Case VI-B의 경우도 마하수 약 2.2에서 수직 충격파가 생성되어 후단에 다수의 충격파가 생성되지만 Case II-A에 비해 상대적으로 ST의 발생 영역이 짧은 것을 볼 수가 있다. 특별히 아음속 디퓨저 영역에서 4가지 경우를 비교해 보면 3가지 경우는 최초의 수직 충격파 이후 유속이 아음속 이상이었지만 VII-A의 경우는 최초의 충격파 이후 바로 아음속으로 감소함을 알 수 있고, 그 결과 마하수 약 1.6에서 수직 충격파가 하나만 생성된 것을 알 수 있다.[10]

Figure 6은 Case II-A(ideal), VI-B(real)에 대한 정압 분포를 디퓨저 출구 부분의 중심축과 벽을 따라 나타낸 것이다. ST의 영향에 의한 압력

상승은 위치에 따라 다르지만 유사충격파(pseudo-shock wave)의 영향에 의한 압력 상승은 같은 것을 알 수가 있다. 이상기체 상태방정식을 적용한 경우, ST 영역이 길기 때문에 운동에너지가 압력에너지로 전환되면서 에너지 손실이 상대적으로 크다. 반면에, 실제기체 방정식을 적용한 경우는 운동에너지가 작고 ST 영역이 짧아 운동에너지가 압력에너지로 전환될 때 에너지 손실이 적다. 결국 ST 이후의 총 에너지는 이상기체의 경우가 실제기체의 경우보다 작기 때문에 이때부터 나타나는 유사충격파에 의한 압력 상승은 오히려 이상기체일 경우가 작다. 따라서, 전체적으로 이상기체 상태방정식을 사용한 경우와 실제기체 상태방정식을 사용한 경우 압력 상승은 크게 차이가 없다고 볼 수 있다.

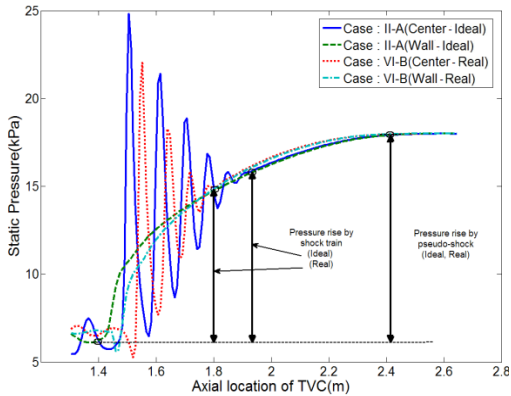


Figure 6: Static Pressure distribution along the centerline and wall of TVC

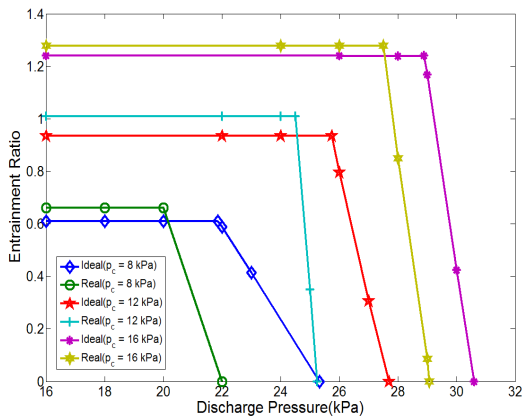


Figure 7: Performance characteristics of TVC

Figure 7은 방출압력(p_c)에 따라 흡입유량비의 분포를 나타낸 그래프이다. 전체적으로 실제기체 상태방정식을 사용한 경우가 이상기체 상태방정식을 사용한 경우보다 흡입유량비가 작은 것을 알 수 있다. 이것은 구동유체가 팽창 팬을 지나면서 비가역적으로 압력이 상승하기 때문에 실제기체 상태방정식을 사용한 경우 에너지 손실이 크고, 그 영향으로 실제기체 상태방정식을 사용한 경우 압력 팽창이 상대적으로 적기 때문인 것으로 판단된다.

흡입 측 질량유량이 줄어들기 시작하는 임계압력과 유체가 흡입실 쪽으로 역류하기 시작하는 Break-down pressure를 비교해 보면 실제기체 상태방정식을 사용한 경우가 이상기체 상태방정식을 사용하는 경우에 비해 낮은 압력 범위에 위치하는 것으로 나타난다. Figure 5의 마하수 분포를 보면 디퓨저 목에서 실제기체 상태방정식을 사용한 경우가 상대적으로 마하수가 낮은 것으로 나타나고 있다. 따라서, 실제기체 상태방정식을 사용하는 경우 이상기체로 생각하는 경우에 비해 후단의 역압력 구배를 이겨낼 정도의 충분한 에너지를 가지고 있지 않기 때문에 낮은 압력에서 임계압력 지점이 생성된다고 볼 수 있다.

5. 결 론

열압축기의 구동 조건에 따라 작동유체가 상변화하는 경우 작동유체를 이상기체로 보기 어렵기 때문에 실제기체 상태방정식인 Redlich-Kwong 방정식을 사용하여 다양한 경계조건에서 내부 유동을 수치 해석하여 비교, 분석하였다. 수치 해석한 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

선행 연구에서 검증된 realizable- $k-\epsilon$ 모델과 SST $k-\omega$ 모델을 비교해 본 결과 SST $k-\omega$ 모델이 상대적으로 shock diamond 패턴과 박리 및 난류경계층을 잘 예측하는 것을 확인할 수 있었다.

구동 조건이 동일한 경우에 실제기체 상태방정식을 사용한 경우가 이상기체 상태방정식을 사용한 경우에 비해 상대적으로 디퓨저 입구 부분과 디퓨저 목부분에서 에너지 손실이 많았다. 디퓨저 출구 부분에서 shock train에 의한 압력상승은 상대적

으로 적으나 의사충격파에 의한 압력상승은 동일하게 나타났다.

실제기체 상태방정식을 사용한 경우 디퓨저 목에서 후단의 역압력 구배를 이겨낼 정도의 운동에너지가 이상기체 상태방정식을 사용한 경우보다 적기 때문에 낮은 압력에서 임계압력 지점이 생성되는 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] UN water, "Coping with water scarcity, A strategic issue and priority system wide action", August 2006.
- [2] T. Ueda., "On the performance characteristics of steam ejectors", Japan Society of Mechanical Engineers, vol. 4, no. 13, pp. 124~130, 1961.
- [3] K. Matsuo, K. Sasaguchi, K. Tasaki and H. Mochizuki, "Investigation of supersonic air ejectors, Part 1. Performance in the case of zero-Secondary flow", Bulletin of the JSME, Series B, vol. 24, no. 198, pp. 2090-2097, 1981.
- [4] K. Matsuo, K. Sasaguchi, K. Tasaki and H. Mochizuki, "Investigation of supersonic air ejectors, Part 2. Effects of throat-area-ratio on ejector performance", Bulletin of the JSME, Series B, vol. 25, no. 210, pp. 1898-1905, 1982.
- [5] Amel Hemidi, Francois Henry, Sebastien Leclaire, Jean-Marie Seynhaeve, and Yann Bartosiewicz, "CFD analysis of a supersonic air ejector. Part I: Experimental validation of single-phase and two-phase operation", Applied Thermal Engineering, vol. 29, pp. 1523-1531, 2009.
- [6] Amel Hemidi, Francois Henry, Sebastien Leclaire, Jean-Marie Seynhaeve, and Yann Bartosiewicz, "CFD analysis of a supersonic air ejector. Part II: Relation between global operation and local flow features", Applied Thermal Engineering, vol. 29, pp. 2990-2998, 2009.
- [7] T. Sriveerakul, S. Aphornratana, and K. Chunnanond, "Performance prediction of steam ejector using computational fluid dynamics: Part 1. validation of the CFD results", International Journal of Thermal Sciences, vol. 46, pp. 812-822, 2007.
- [8] T. Sriveerakul, S. Aphornratana, and K. Chunnanond, "Performance prediction of steam ejector using computational fluid dynamics. Part 2. flow structure of a steam ejector influenced by operating pressures and geometries", International Journal of Thermal Sciences, vol. 46, pp. 823-833, 2007.
- [9] K. Pianthong, W. Seehanam, M. Behnia, T. Sriveerakul, and S. Aphornratana, "Investigation and improvement of ejector refrigeration system using computational fluid dynamics technique", Energy Conversion and Management, vol. 48, pp. 2556-2564, 2007.
- [10] K. Matsuo, Y. Miyazato, and Heuy-Dong Kim, "Shock train and pseudo-shock phenomena in internal gas flows", Progress in Aerospace Sciences, vol. 35, pp. 33-100, 1999.
- [11] Y. Bartosiewicz, Zine Aidoun, P. Desevaux, Yves Mercadier, "Numerical and experimental investigations on supersonic ejectors," International Journal of heat and mass transfer,

vol. 26, pp. 56-70, 2005.

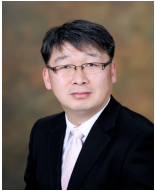
- [12] P. Desevaux., "A method for visualizing the mixing zone between two co-axial flows in an ejector", Optics and Lasers in engineering, vol. 35, pp. 317-323, 2001.

저 자 소 개



강위관(姜渭寬)

1982년생, 2008년 인제대학교 기계공학과 졸업, 2010년 인제대학교 기계공학과(공학석사), 2010년 -현재 (주)에프티이(연구원). 관심분야: 전산유체역학



최두열(崔斗烈)

1968년생, 1993년 한국해양대학교 기계공학과 졸업, 2008년 한국해양대학교 기계공학과(공학석사), 2008경상대학교 정밀기계공학과(박사), 2008년 -현재 (주)에프티이(대표이사). 관심분야: 담수 설비



신지영(申智榮)

1967년생, 1990년 서울대학교 기계공학과(공학사), 1992년 서울대학교 기계공학과(공학석사), 1996년 서울대학교 기계공학과(공학박사), 1999년 -현재 동의대학교 공과대학 기계공학과(교수). 관심분야: 에너지 시스템



김무근(金茂根)

1959년생, 1981년 서울대학교 기계공학과(공학사), 1984년 서울대학교 기계공학과(공학석사), 1991년 서울대학교 기계공학과(공학박사), 1992년 -현재 인제대학교 공과대학 기계자동차공학부(교수). 관심분야: 냉동공조시스템