

와류실의 온도 분리 현상에 대한 연구

예아란* · Zhang Guang* · 김희동**
* 안동대학교 기계공학과

Study on the Temperature Separation Phenomenon in a Vortex Chamber

A Ran Ye*, Zhang Guang* and Heuy Dong Kim**
* Dept. of Mechanical Engineering, Andong Nat'l Univ.

(Received January 23, 2014 ; Revised July 1, 2014 ; Accepted July 21, 2014)

Key Words: Vortex Chamber(와류실), Energy Separation Phenomenon(에너지 분리 현상), Swirl Flow(선회유동), Unsteady Flow(비정상유동), Pressure Gradient Wave(압력구배파)

초록: 와류실은 압축된 공기를 이용하여 고온과 저온 가스로 분리할 수 있는 단순한 장치로, 차세대 새로운 열교환기로 각광받고 있으나, 와류실 내부에서 발행하는 물리적 유동특성에 대해 아직까지 많이 알려지지 않았다. 본 연구에서는 온도 분리 현상을 조사하기 위해 실험 및 수치해석을 수행하였다. 공급 압력에 따른 온도 변화를 측정하기 위하여 다수의 압력 및 온도 센서를 사용하였으며, CFD 기법을 적용하여 3차원 비정상 압축성 유동장을 조사하였다. 연구를 통해 온도 분리 현상은 점성일과 밀접한 관계가 있는 공급 압력과 와류실의 직경에 영향을 받았으며, 와류실에서 발생하는 온도분리 현상은 압력구배파의 개념으로 입증할 수 없었다.

Abstract: A vortex chamber is a simple device that separates compressed gas into a high-temperature stream and a low-temperature stream. It is increasing in popularity as a next-generation heat exchanger, but the flow physics associated with it is not yet well understood. In the present study, both experimental and numerical analyses were performed to investigate the temperature separation phenomenon inside the vortex chamber. Static pressures and temperatures were measured using high-sensitivity pressure transducers and thermocouples, respectively. Computational fluid dynamics was applied to simulate 3D unsteady compressible flows. The simulation results showed that the temperature separation is strongly dependent on the diameter of the vortex chamber and the supply pressure at the inlet ports, where the latter is closely related to the viscous work. The previous concept of a pressure gradient wave may not be a reasoning for temperature separation phenomenon inside the vortex chamber.

- 기호설명 -

D : 와류실 직경(m)
d : 출구 다이어그램 직경(m)
R : 와류실 반경(m)
H : 와류실 높이(m)
h : 중심 로드와 바닥 사이거리(m)
r : 직경(m)

v : 속도(m/s)
t : 시간(s)
T : 온도(K)
W : 일(kJ)
 μ : 점성($N \cdot s/m^2$)
 τ : 전단력(M/m^2)
 ρ : 밀도(kg/m^3)
w : 각속도(rad/s)
P : 압력(Pa)
A : 단면(m)

† Corresponding Author, kimhd@anu.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

첨자

- c : 중심에 부착한 센서 위치
- 25 : 중심에서 25mm 떨어진 위치
- 50 : 중심에서 50mm 떨어진 위치
- I : 분기관 마개에 부착한 센서 위치
- a : 대기압
- 0 : 공급 압력

1. 서론

와류실(Vortex chamber)은 고압의 작동유체를 주입하여, 저온과 고온으로 분리할 수 있는 단순한 기계적 장치이다. Fig. 1에 도식적으로 나타낸 바와 같이, 원통형으로 구성된 와류실에는 접선 방향의 기체 주입구가 설치되어 있으며, 고압의 기체가 주입하게 된다. 이때, 유체는 회오리바람과 같은 강한 와류를 형성하여 외곽부에서는 고온 상태가, 중심부에서는 저온 상태가 얻어진다. 이러한 와류실은 구조적으로 단순할 뿐만 아니라 유지보수가 필요하지 않아, 유체기기 분야에서 많은 관심을 받고 있다.

최근 Baliavsky^(1,2)에 의해 수행된 실험적 연구에 따르면, Fig. 2에 나타낸 바와 같이, 원통 내부의 외곽부에서는 750 K 정도의 고온이, 중심부에서는 250 K 정도의 저온이 측정되었으며, 이런 온도 분리 현상을 압력구배파(Pressure gradient wave)의 개념으로 설명하였다. 그러나 그의 온도 측정값에 대한 신뢰성에 의문이 제기되고 있으며, 압력구배파의 개념 또한 유체공학 전문가에게 이해가 되지 않고 있어, 문헌⁽¹⁾에서 얻어진 온도 분리에 대한 체계적이고 과학적인 연구가 필요하다.

한편, 와류실은 1933년 프랑스 기술자 J. Ranque⁽³⁾에 의해 와류관(Vortex tube)의 형태로 처음 고안되어, 1946년 R. Hilsch⁽⁴⁾이 설계 제작하여 실험을 수행하였다. 그 후, 와류관은 Ranque vortex tube(RVT), Hilsch vortex tube (HVT) 또는 Ranque-Hilsch vortex tube (RHVT)로 알려지게 되었으며, 와류관에서 발생하는 온도분리현상을 규명하기 위하여, 수많은 연구⁽⁵⁻⁸⁾가 수행되었다.

이런 와류관에 비해 와류실은 구조가 단순하고 온도분리 성능이 뛰어나다고 알려져 있어 와류실에 대한 관심이 증가하고 있으나, 현재까지 이를 뒷받침할 연구결과를 찾아보기 힘들다. 따라서

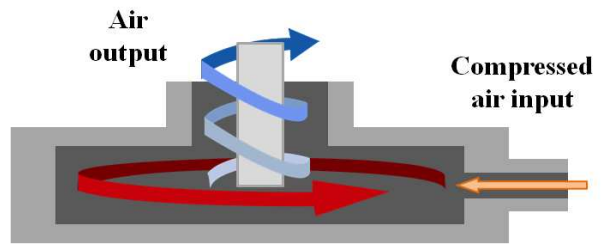


Fig. 1 Configuration of vortex chamber

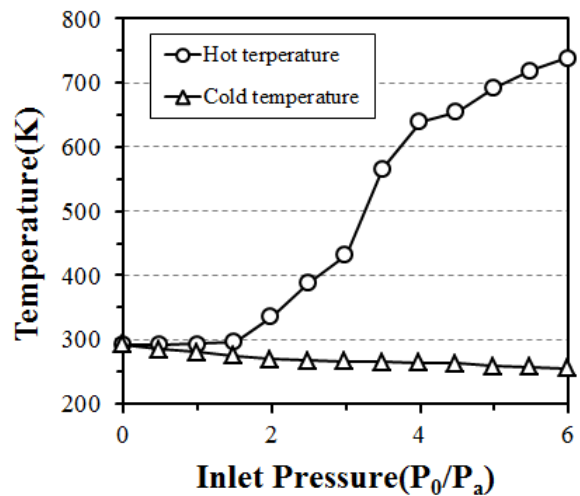


Fig. 2 The temperature in the vortex chamber as a function of the inlet pressure [Ref.1]

와류실 내부에서 발생하는 온도 분리 현상을 물리적으로 설명할 수 있는 체계적인 연구가 필요하며, 이와 더불어 와류실의 최적화 설계가 이루어진다면, 장치 와류실의 많은 공학적 응용을 기대할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 와류실 내부에서 발생하는 온도 분리 현상을 조사하기 위하여 실험 및 수치해석을 수행하였다. 실험적 연구를 위해 소형 와류실을 제작하여 각 위치에서의 압력 변화에 따른 온도 변화를 측정하였고, 수치해석적 기법을 사용하여 3차원 비정상 압축성 유동장을 조사하였다.

2. 실험방법

본 실험 장치는 압축기, 제습기, 압축탱크, 전동 밸브, 와류실로 구성되어있으며, 연구에 사용된 와류실은 문헌⁽¹⁾의 실험 장치를 바탕으로 설계하였다. Fig. 3(a)는 와류실의 정면도, Fig. 3(b)는 A-A' 단면을 기준으로한 평면도로, 와류실 직경 $D = 140$ mm, 출구 직경 $d = 30$ mm, 와류실

높이 $H = 25 \text{ mm}$, 중심 로드와 하부디스크 사이 거리 $h = 15 \text{ mm}$ 로 구성되었다. 공급 압력에 따른 온도 분리 효과를 실험하기 위해 다수의 압력 센서와 온도센서를 분기관, 중심축, 하부 디스크에 각각 설치하였으며, \bullet 와 \times 기호는 각각 온도, 압력센서의 위치를 의미한다. 대기의 압력과 온도는 각각 $P_a = 101.2 \text{ kPa}$, $T_a = 291 \text{ K}$ 이고, 전동 밸브를 이용하여 압력비 P_0/P_a 를 1 ~ 6의 범위에서 약 1 단계씩 증가시켜 실험을 수행하였으며, 정확한 실험을 위해 가압 후, 온도가 정상상태에 도달할 때까지 압력을 일정하게 유지시켰다.

3. 수치해석 방법

본 연구에서는 3차원 압축성 N-S방정식에 Fully Implicit Finite Volume Scheme을 적용하여, 대류항은 2차정도 Upwind Scheme을, 비정상항은 4단계 Runge-Kutta법을 이용하여 적분하였다. 또 수치해석은 압축성 유동을 고려하여 지배방정식을 Density-Based Solver 인 Coupled Scheme을 적용하였다.

Fig. 4는 본 연구에서 적용된 도메인의 형상과 Grid 분포도를 나타낸다. 원통형으로 구성된 와류실의 형상은 대칭면 기준으로 1/4영역을 계산 영역으로 설정하였으며, 주기 경계 조건을 적용하였다. 사용된 격자수는 약 20만개로 본 연구에서는 여러 격자에 대한 예비수치계산을 수행하여, 격자의존성을 확인하였다. 또 본 연구에서 사용된 기체는 대기상태의 공기를 적용하였으며, 경계조건으로 입구와 출구에서 각각 Pressure inlet, Pressure outlet을 적용하여, Pressure inlet에서 전압력과 전온도(291K)를 지정하였으며, 정압은 대기 조건의 압력을 적용하였다. 또 벽면에서는 단열, no-slip 조건을 적용하였다. 난류 모델은 문헌(5,6)에 적용된 RNG $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.

온도분리에 영향을 주는 변수를 분석하기 위해 공급 압력, 중심축과 하부 디스크 사이의 거리, 와류실 직경과 점성일을 변화시켜 수행하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 압력의 영향

문헌(1)에 의하여 수행된 실험적 연구 조건과 동일하게 설정하여 공급압력에 따른 온도를 조사하였다.

Fig. 5는 T_c (저온), T_i (고온) 온도센서에서 측정

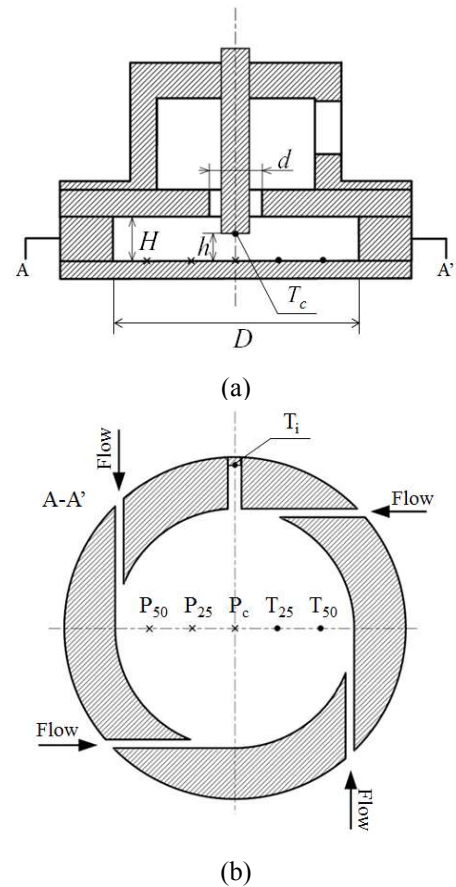


Fig. 3 Cross sectional view of (a) front view, (b) top view

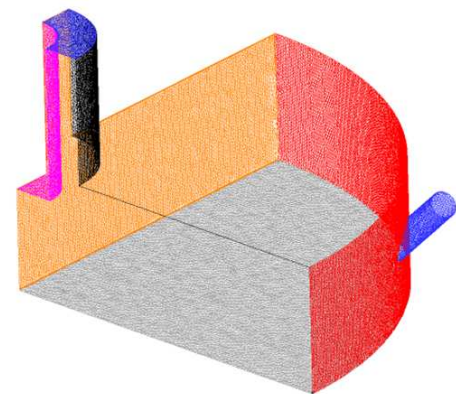


Fig. 4 Grid distribution of the vortex chamber

한 결과로써, 압력에 따른 온도를 그래프로 나타내었다. 공급압력이 증가함에 따라 저온과 고온의 차이가 커지는 경향성을 보여, 공급압력이 온도 분리에 영향을 주었음을 나타낸다. 저온의 경우, 문헌(1)의 결과와 유사한 결과 값을 가졌다. 그러나 고온의 경우, 압력이 증가함에 따라 온도 차이가 커졌으며, 압력비가 4 일 때 약 300 K 정

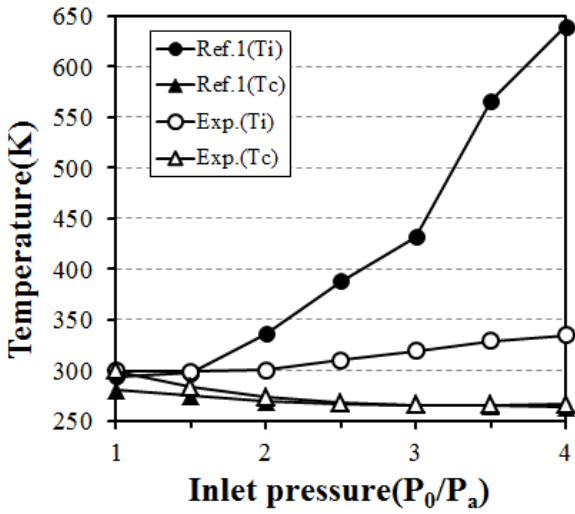


Fig. 5 Comparison of experimental result with experimental work[Ref.1] at P_i , P_c with different inlet pressures

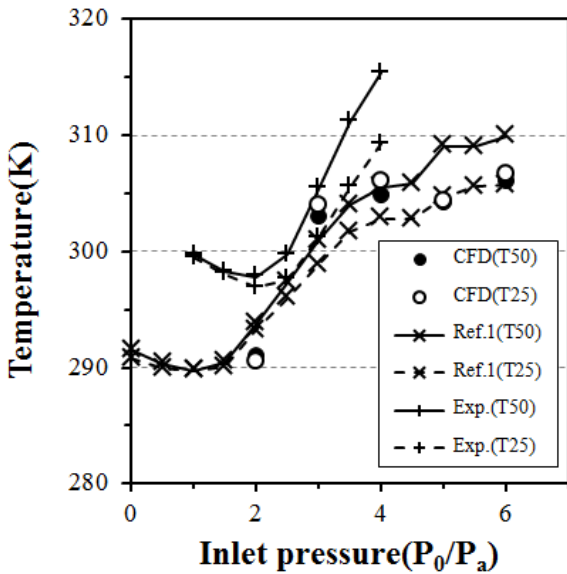
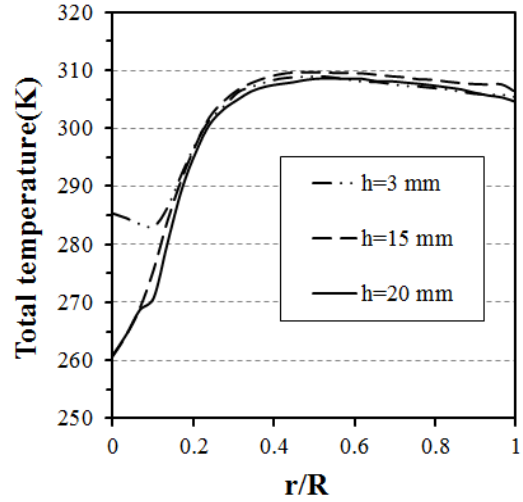


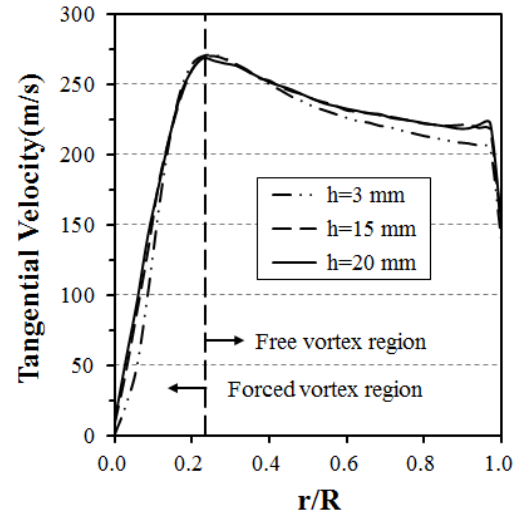
Fig. 6 Comparison of CFD result with experimental work[Ref.1] at two radial location with different inlet pressures

도의 큰 차이가 났다. 상기의 수많은 연구결과⁽⁵⁻⁸⁾와 비교하였을 때, 문헌⁽¹⁾과 같은 급격한 온도 상승이 없는 것에 반하여, 본 연구결과와 유사한 온도 분포가 나타난 것으로 보아 문헌⁽¹⁾에서 측정이나 계산의 오류가 있을 가능성이 보인다.

Fig. 6은 중심에서 25, 50 mm 떨어진 위치의 온도 변화를 이용하여, 실험결과와 수치해석 결과를 비교한 그래프이다. 실험 결과 모두 압력 공급 초기에 온도가 감소하는 것을 제외하고는 압력에 따라 온도가 증가하는 것이 관찰되었다.



(a)



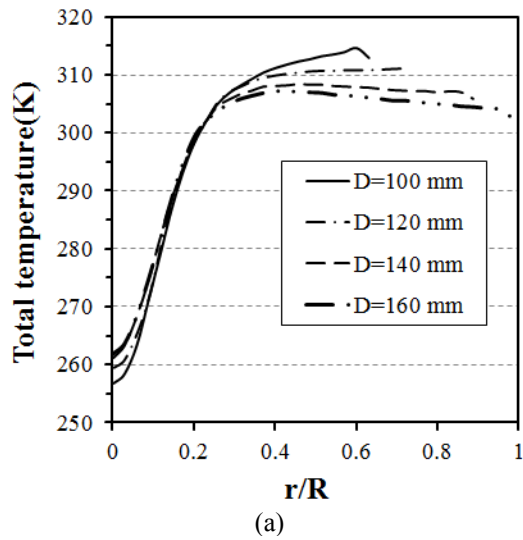
(b)

Fig. 7 (a) Total temperature and (b) tangential velocity with radius for different h at an axial location of 2mm from the bottom wall

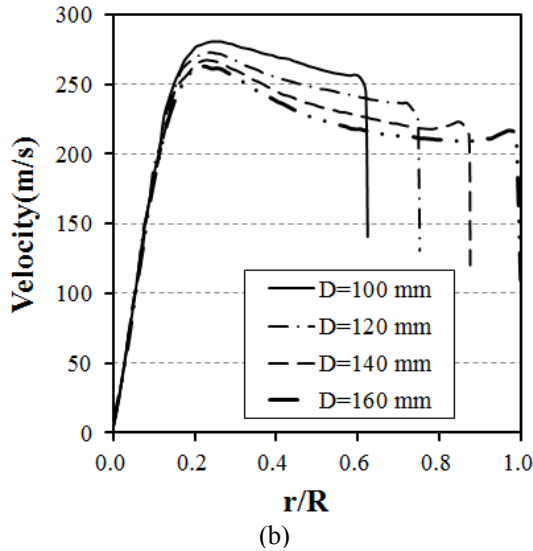
실험결과 온도 분포는 수치해석 결과와 상당한 불일치가 나타났는데, 이러한 차이는 와류실 내부에 고온부를 측정하는 부분이 공동(Cavity) 형상으로 되어 있어, 공동내부에서 형성되는 전단층의 불안정 및 압력파동이 발생하여, 시간이 경과함에 따라 와류실 내의 온도가 변화하게 된다. 이러한 온도 이력의 문제로 인하여, 실험과 수치해석 결과에 불일치가 나타나는 것으로 판단된다. 향후 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

4.2 간극(h)의 영향

Fig. 7은 중심축과 하부 디스크 사이의 간극변화에 따른 전온도와 속도를 나타낸 그래프이다. Fig. 7(a)에 나타난 바와 같이, 전온도는 반경이



(a)



(b)

Fig. 8 Variation of the (a) total temperature and (b) velocity with radius for different outer diameters D

증가함에 따라 급격하게 증가했으며, 최고값은 r/R 이 0.3 인 부근에서 관측되었다. $h = 3$ mm인 경우, 중심에서의 전온도 값은 다른 두 경우와 비교해서 높은 값을 가졌고 중심에서부터 r/R 이 0.1 인 부분까지 감소하였으며, 그 이후로는 증가하였다. 냉각 효과는 와류실의 중심 일부분에서 관측되었으며, 분기관이 부착된 부분에서의 온도는 입구 온도보다 높은 온도 값을 가졌다. U. Behera⁽⁶⁾의 연구에 의하면, 접선속도에 따라 자유와류와 강제와류가 존재하며, 이로 인해 다른 온도 특성을 보여주었다. Fig. 7(b)에 나타난 바와 같이, 횡축은 접선 속도를 그리고 종축은 중심축에서부터 거리 (r)를 와류실 반경(R)으로 무차원화 하였다. 강제

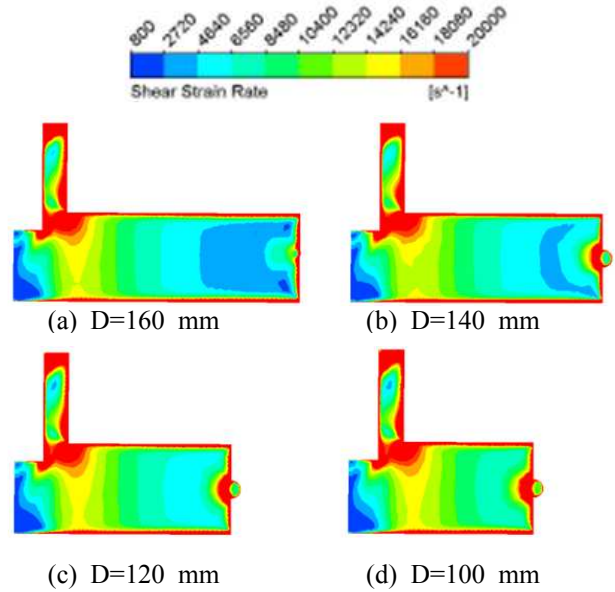


Fig. 9 Shear strain contours at an axial plane

와류는 r/R 이 약 0.25까지 나타났으며, 그 이후로는 자유와류로 변화했다. $h = 3$ mm는 다른 두 경우에 비교해 약간 낮은 속도값을 가졌으나, 간극 변화에 따라 접선속도에 큰 차이가 없으며, 간극의 변화는 온도분리에 영향을 주지 않았다.

4.3 와류실 직경의 영향

Fig. 8은 압력과 온도가 각각 6 bar, 291 K인 경우, $D = 160$ mm를 기준으로 와류실 직경에 따른 온도와 속도를 각각 나타내었다. Fig. 8(a)에 나타난 바와 같이, 와류실 직경이 줄어들수록, 중심부의 온도는 감소하였으며, 주변부의 온도는 증가하였다. Fig. 8(b)에서 나타난 바와 같이, 와류실 직경이 변화함에 따라, 자유와류 영역에서 높은 속도 차이가 발생했다. 특히 $D = 100$ mm인 경우, 다른 경우와 비교하여 매우 높은 속도 값을 가졌다. 이러한 높은 속도 차이는 유체층 사이의 마찰을 증가시켜, 주변부의 온도 증가에 영향을 주었다.

Fig. 9는 와류실 직경에 따른 전단력 분포도이다. 전단력 분포는 강제와류 영역에서 모두 유사한 패턴이 관측 되었으며, 자유와류 영역에서 전단력은 직경이 줄어들수록 높아졌다. 따라서, 와류실 직경 감소가 전단력 증가에 영향을 주었으며, 증가된 전단력이 주변부의 온도 증가에 영향을 준 것으로 보아, 와류실 직경이 전단력과 온도에 밀접한 연관이 있는 것으로 나타난다.

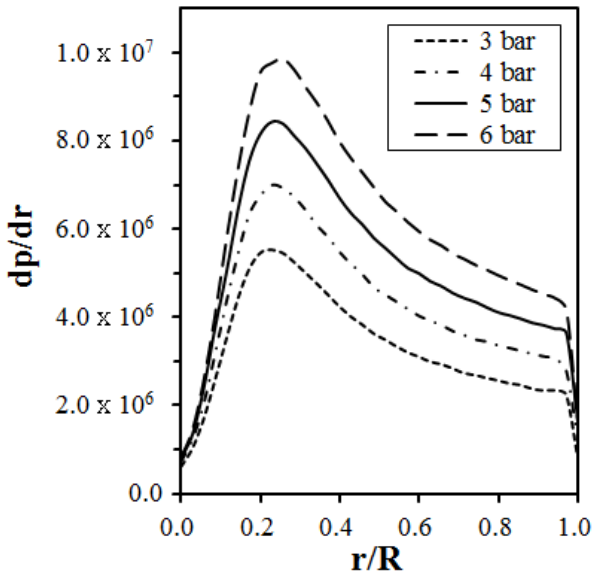


Fig. 10 Radial variation of pressure gradient for different inlet pressures

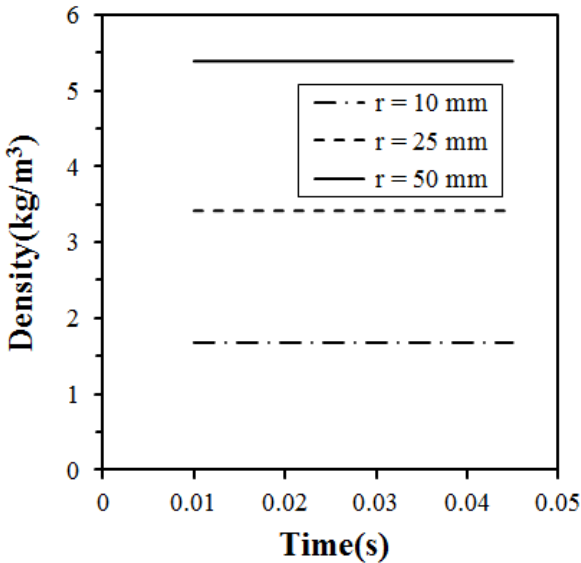


Fig. 11 Density variation of time at three different radial locations

4.4 PGEW

압력구배파는 음파와 유사한 탄성파의 종류로 문헌⁽²⁾의 온도 분리 현상을 설명하기 위해 소개되었다. 압력구배파는 유동장 내의 압력과 밀도 변화가 발생할 때 존재하므로 Fig. 10과 같이 입구의 압력을 점차적으로 증가시켜 반경에 따른 압력구배를 그래프로 나타내었다. 압력구배는 r/R 이 0.25 지점에서 최고값을 가졌고 자유 와류 영역보다 강제 와류 영역에서 기울기가 가팔랐다. 이러한 압력 구배는 속도장에서 시간과 공간의 불

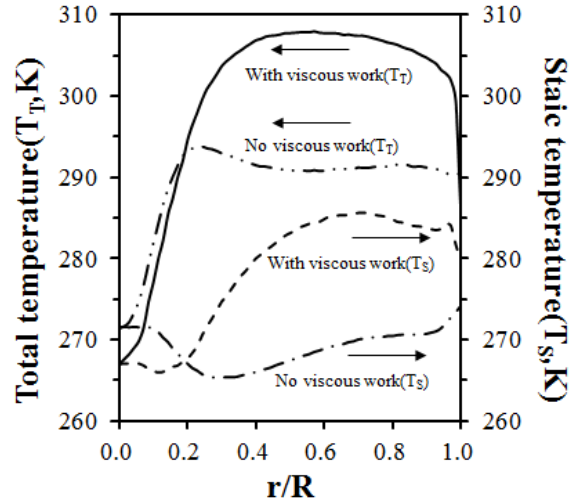


Fig. 12 Radial variation of temperature with and without viscous work

안정성에 기여한다. 비정상 압축성 유동장에서의 밀도변화를 조사하기 위해, 중심에서 10 mm, 25 mm, 50 mm 떨어진 위치의 시간에 따른 밀도변화를 측정하였으며, Fig. 11과 같다. 그 결과 밀도는 압력과 시간에 관계없이 일정한 값을 가졌으며, 압력구배로 인한 에너지 전달은 발생하지 않았다. 그러므로 와류실 내부에서 발생하는 온도 분리 현상은 압력구배파의 개념으로 설명할 수 없다.

4.5 점성일의 영향

Frohlingdorf⁽⁵⁾의 수치해석적 연구에 따르면 회전하는 유체층은 전단응력에 의해 기계적 에너지를 발생한다고 주장하였으며, 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$dW = -\mu \left(\omega r^2 \frac{\partial \omega}{\partial r} \right) dA_r \tag{1}$$

점성일이 온도에 미치는 영향을 알아보기 위해 점성일 유무에 따른 전온도와 정온도를 Fig. 12와 비교하였다. 와류실의 형상은 h = 20 mm, D = 140 mm이고, 압력비와 온도는 각각 4, 291 K이며, 전온도는 T_T, 정온도는 T_S로 표기하였다. 전온도에서 점성일을 고려하였을 때와 고려하지 않았을 때를 비교하면, 외곽부의 온도는 최대 약 308 K까지 증가하고, 중심부의 온도는 약 267 K까지 감소하였다. 점성일을 고려한 경우, Fig. 8(b)에 나타난 바와 같이, 와류실 중심에서 생성된 열은 높은 속도 차이로 인해 와류실 주변부로 전달되기 때문에 자유와류 영역에서 높은 온도를 가졌으며,

점성일을 고려하지 않은 경우, 속도 차이로 인한 열전달이 포함되지 않았기 때문에 자유와류 영역에서 낮은 온도를 가졌다.

5. 결 론

본 연구에서는 와류실 내부에서 발생하는 온도 분리 현상을 조사하기 위해 실험 및 수치해석을 수행하였다. 와류실의 설계 변수에 대한 온도 분리 영향을 분석한 결과 다음과 같다.

(1) 와류실의 직경과 공급 압력은 온도 분리의 중요한 성능 변수이다. 이때, 온도 분리 효과는 작은 직경과 높은 압력에서 극대화된다.

(2) 와류실 내부 유동에는 압력구배가 존재하지 않았으며, 에너지 전달을 유발하는 압력구배의 개념은 온도분리현상을 확증하지 못한다.

(3) 점성일은 와류실의 온도 분리에 지배적인 영향을 미치며, 특히 자유와류 영역의 온도 증가에 밀접한 영향을 준다.

참고문헌

(References)

- (1) Beliavsky, Y., 2012, "Experimental Investigation of a Temperature Separation Effect Inside a Short Vortex Chamber," 9th International Conference on Heat Transfer, *Fluid Mechanics and Thermodynamics*, Malta.
- (2) Beliavsky, Y., 2013, "The Pressure Gradient Elastic Wave : Energy Transfer Process for Compressible

Fluid with Pressure Gradient," *Journal of Engineering and Automation*, Vol. 3, pp. 53~64.

- (3) Ranque, G. J., 1933, "Experiments on Expansion in a Vortex with Simultaneous Exhaust of Hot Air and Cold Air," *Journal of Physics*, Radium(Paris), Vol. 4, pp. 1125~1130.
- (4) Hilsch, R., 1947, "The Use of the Expansion of Gases in a Centrifugal Field as Cooling Process," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 18, No. 2, pp. 108~113.
- (5) Frohlingsdorf, W. and Unger, H., 1999, "Numerical Investigations of the Compressible Flow and the Energy Separation in the Ranque-Hilsch Vortex Tube," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 415~422.
- (6) Behera, U., Paul, P. J., Dinesh, K. and Jacob, S., 2008, "Numerical Investigations on Flow Behaviour and Energy Separation in Ranque-Hilsch Vortex Tube," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, pp. 6077~6089.
- (7) Xue, Y., Arjomandi, M. and Kelso, R., 2010, "A Critical Review of Temperature Separation in a Vortex Tube," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 34, pp. 1367~1374.
- (8) Gao, C. M., Bosschaart, K. J., Zeegers, J. C. H. and Waele, A., 2005, "Experimental Study on a Simple Ranque-Hilsch Vortex Tube," *Cryogenics*, Vol. 45, No. 3, pp. 173~183.