

보텍스 생성실 지름비가 에너지 분리에 미치는 영향

유 갑 중[†], 이 병 화^{*}, 최 인 수^{**}

경북대학교 기계공학부, ^{*}경북대학교 대학원, ^{**}상주대학교 기계공학부

The Effect of a Vortex Chamber Diameter Ratio on Energy Separation

Kap-Jong Riu[†], Byung-Hwa Lee^{*}, In-Su Choi^{**}

School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Taegu 702-701, Korea

^{*}Graduate School, Kyungpook National University, Taegu 702-701, Korea

^{**}School of Mechanical Engineering, Sangju National University, Sangju 742-711, Korea

(Received February 14, 2001; revision received April 11, 2001)

ABSTRACT: As an alternative cooling method to reduce environmental hazard, vortex tubes have been studied for energy separation into cold and hot streams. Hence, the experiments were carried out systematically to find the best ratio of vortex chamber diameter to tube diameter. Also, the work was done to investigate how inlet pressure and geometric ratios of vortex tube affected temperature differences at two ends as well as cooling capacity and cooling efficiency. The result showed that the maximum temperature differences at the both ends and the maximum cooling efficiency were obtained when the ratio of vortex chamber diameter was about 1.45, while the inlet pressure was not higher than 0.7 MPa.

Key words: Vortex tube(보텍스 튜브), Vortex chamber diameter ratio(보텍스 생성실 지름비), Cold end orifice diameter ratio(저온출구 오리피스 지름비), Cold mass fraction(저온출구 질량유량비)

기 호 설 명

D : 보텍스 튜브 지름 [mm]

D_o : 보텍스 생성실 지름 [mm]

d_c : 저온출구 오리피스 지름 [mm]

L : 보텍스 튜브의 길이 [mm]

m_i : 유입공기유량 [g/s]

P_i : 유입공기압력 [MPa]

Q : 냉각용량 [J/s]

ΔT : 입구와 출구의 온도차 [°C]

y : 저온출구 질량유량비
(=저온출구 질량유량 / 유입질량유량)

그 리 스 문 자

η : 냉각효율

δ : 보텍스 생성실 지름비, D_o/D

하첨자

a : 주위

c : 저온출구

h : 고온출구

i : 입구

[†] Corresponding author

Tel.: +82-53-950-5571; fax: +82-53-957-4994

E-mail address: kjriu@kyungpook.ac.kr

1. 서 론

보텍스 튜브(vortex tube)는 유체를 접선방향으로 유입시키는 입구노즐과 2개의 출구로 구성되어 있다. 이 장치는 입구에서 접선방향으로 유입된 고압유체를 저온유체와 고온유체로 분리하는 일종의 에너지분리 장치이다. 여기서 에너지분리는 초가에 균일한 유동이 외부에서의 열전달이나 축일 없이 둘 이상의 상이한 에너지 준위를 가지는 유체로 나누어지는 유체역학적 과정으로 정의된다.⁽¹⁾

보텍스 튜브는 Ranque⁽²⁾에 의해 발견된 이후 지금까지 많은 연구가 진행되어 왔다. 이 중 본 연구와 관계된 보텍스 튜브의 기하학적 형상에 대한 연구들을 살펴보면 다음과 같다.

Hilsch⁽³⁾는 보텍스 튜브의 노즐 면적비를 일정하게 하고 저온출구 오리피스 지름비를 바꾸면서 실험을 수행하였다. Hartnett⁽⁴⁾는 보텍스 발생기의 노즐 면적비에 비례하여 에너지분리가 증가한다고 하였다. Martynovskii⁽⁵⁾는 다양한 보텍스 발생기 노즐의 형상에 대해 연구를 수행하여 최적의 노즐 수를 구하였고, Takahama⁽⁶⁾는 보텍스 발생기 노즐의 전체 면적과 튜브 단면적 간의 비, 즉 노즐 면적비가 17.46×10^{-2} 일 때 보텍스 튜브의 최대 효율이 나타남을 보였다. Riu⁽⁷⁾는 보텍스 생성실에서 최적 노즐 면적비와 부분유입률을 구하였다. 또한 Riu et al.⁽⁸⁻¹¹⁾은 최적의 보텍스 튜브 형상을 구하기 위해 보텍스 튜브에 대한 다양한 실험을 수행하여 왔다.

이상과 같이 보텍스 튜브의 기하학적 형상에 대한 기존의 연구들은 보텍스 발생기의 노즐 형상, 노즐 면적비 및 보텍스 생성실을 구성하는 저온출구 오리피스 지름비 등에 대한 것들이다.

그러나 보텍스 튜브 내경에 대한 보텍스 생성실 지름의 비가 보텍스 튜브의 에너지분리 현상에 미치는 영향에 대한 연구는 부족한 실정이다. 보텍스 튜브에서는 압축공기의 유동이 보텍스 생성실에서 강한 와류유동으로 변화된 후 튜브로 유입된다. 그리고 튜브 내를 유동하는 공기량과 유동상태는 보텍스 생성실의 단면적과 튜브의 단면적 차에 의해서 민감하게 변화한다.

따라서 보텍스 생성실의 지름비는 보텍스 튜브의 에너지분리에 중요한 인자로 판단되며, 본 연구에서는 소형 보텍스 튜브에서 생성실의 지름비

에 따른 에너지분리 특성과 효율을 조사하여 보텍스 생성실 설계시에 최적의 설계자료를 얻고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 실험에 사용된 실험장치의 전체적인 구성을 나타낸 그림이다.

실험장치는 공기공급부, 실험부, 그리고 데이터 처리부로 구성된다. 공기공급부는 공기압축기①과 압축된 공기에서 $40 \mu\text{m}$ 까지의 이물질질을 제거하는 필터②, 고온다습한 압축공기를 대기온도상태로 냉각시켜 주는 에프터 쿨러③, $5 \mu\text{m}$ 까지의 미세한 이물질질을 제거하는 메인 필터④, 압축공기에서 수분을 제거하는 공기건조기⑤, 일정한 압력의 공기를 공급하기 위한 압력조정기⑥를 장착하였다.

실험부는 보텍스 튜브 입구측의 압력을 측정하기 위한 압력 모듈⑦과 보텍스 튜브의 입구, 저온출구 및 고온출구에 각각 부착된 K형 열전대로 구성되어 있다. 데이터 처리부는 유량을 측정하기 위한 오리피스 유량계⑩, 측정된 차압을 전

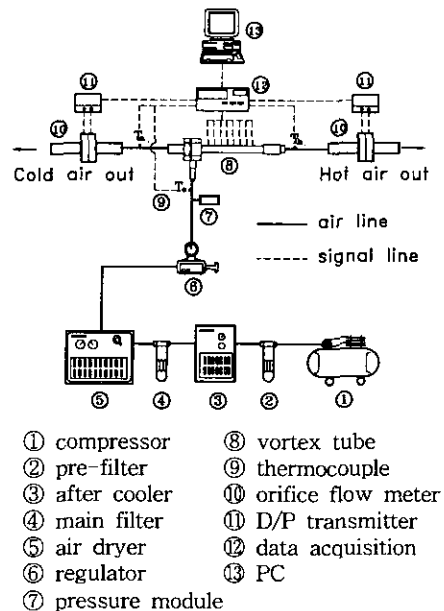


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

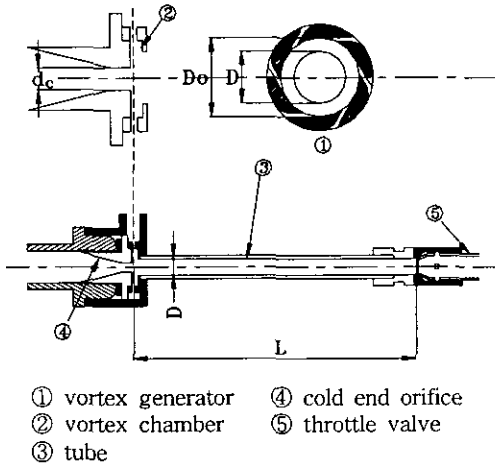


Fig. 2 Cross-sectional views of vortex generator chamber and vortex tube.

기적 신호로 변환시키는 차압 모듈(Fco42)① 및 전기적 신호를 처리하는 데이터 획득 장치인 NetDAQ(2645A)②, 이를 보관 및 처리하는 컴퓨터③로 구성된다.

Fig. 2는 실험에 사용한 보텍스 튜브의 상세한 구조와 보텍스 생성실의 형상을 나타낸 그림이다. ①은 보텍스 발생기의 단면도, ②는 저온출구 오리피스와 결합된 보텍스 생성실의 형상, ⑤는 고온출구 스톱밸브를 보여준다.

실험에 앞서 온도보정장치(Calibrator-741B)와 기준온도(ice-point)를 사용하여 열전대를 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 범위 내에서 보정하였다. 차압계는 0.5%의 범위 내로 마이크로 마노메터(Fco12)로 보정하였다. 그리고 저온 및 고온 쪽 배관은 단열을 위해 PVC 관을 사용하였으며, 오리피스와 보텍스 튜브도 충분히 단열하여 외부와의 열교환에 의한 영향을 가능한 배제시켰다.

2.2 실험방법

본 실험에 사용된 보텍스 튜브의 상세한 치수와 보텍스 노즐의 크기는 Table 1에 나타내었다. 보텍스 튜브의 지름은 5.6 mm이고 길이(L)는 168 mm로 지름의 30배인 역류형(counter-flow)의 보텍스 튜브를 사용하였다. 이때 보텍스 발생기의 노즐 직경은 0.9 mm, 구멍 수는 6개이고, 저온출구 오리피스 지름은 2.5 mm이다. 이는 Riu et al.^(7,8)의 결과에 의해 최대 성능을 나타내는 노

Table 1 Specification of vortex tube

| | |
|---|--------|
| Vortex tube diameter (D) | 5.6 mm |
| Vortex tube length (L) | 168 mm |
| Nozzle diameter (d_n) | 0.9 mm |
| Cold end orifice diameter (d_c) | 2.5 mm |
| Nozzle area ratio (S_n) | 0.155 |
| Cold end orifice diameter ratio (ξ) | 0.446 |

Table 2 Dimension of vortex generator

| Vortex chamber diameter (mm) | Diameter ratio of vortex chamber (δ) |
|------------------------------|---|
| 5.6 mm | 1.00 |
| 6.6 mm | 1.18 |
| 7.6 mm | 1.36 |
| 8.1 mm | 1.45 |
| 8.6 mm | 1.54 |
| 9.6 mm | 1.71 |
| 10.6 mm | 1.89 |

즐의 면적은 튜브 면적의 0.155, 그리고 저온출구 오리피스 지름은 보텍스 튜브 내경의 0.446로부터 결정된 것이다.

한편 보텍스 튜브 지름(D)에 대한 보텍스 생성실 지름(D_0)의 비인 보텍스 생성실 지름비(δ)가 에너지분리에 미치는 영향을 조사하기 위하여, Table 2와 같이 보텍스 생성실의 지름이 5.6~10.6 mm인 7개의 보텍스 발생기를 제작 실험하였다.

본 실험에서는 입구온도를 25°C 로 고정하고 입구압력을 0.3, 0.5, 0.7 MPa로 하였고, 고온출구의 스톱밸브를 조절하여 저온출구 질량유량비를 변화시켜가며 실험을 수행하였다.

작동유체를 공기로 사용하여 저온출구와 고온출구의 온도가 각각 $\pm 0.2^\circ\text{C}/\text{min}$ 내에서 변할 때를 정상상태에 가정하였고, 이에 도달하는 시간은 약 10분이 소요되었다. 아울러 모든 결과는 동일한 조건 아래 10회의 실험에서 얻은 측정값을 평균한 것이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 유입유량

Fig. 3은 보텍스 튜브의 지름에 대한 보텍스

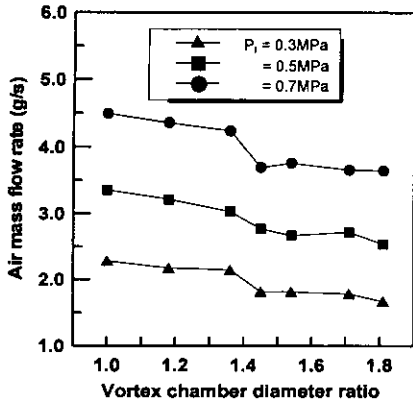


Fig. 3 Air mass flow rate versus vortex chamber diameter ratio at different inlet pressures.

생성실의 지름비(δ)에 따라 유입되는 공기질량 유량의 변화를 나타내고 있다. 이때 저온출구측 유량과 고온측 유량은 동일한 상태이다. 저온출구 질량유량비(y)가 증가함에 따라 고온측의 출구면적이 줄어들고, 오리피스 쪽으로 역류하는 부분이 증가한다. 따라서 유입되는 공기의 저항이 커지므로 유입공기유량은 약간 감소하게 된다. 이러한 성향은 $y=0.1$ 에서 0.9의 실험범위에서 비슷하게 나타났다.

입구의 압력이 커지면 공기의 질량유동은 증가하지만, 보텍스 생성실의 지름비가 커지면 공기유량은 감소하고 있다. 보텍스 튜브의 지름이 일정할 때 보텍스 생성실의 지름이 커지면, 유입되는 공기의 원심력이 증가하여 생성실 벽면 부위의 압력이 상승하게 된다. 입구압력이 0.3~0.5 MPa일 때, 보텍스 생성실 벽면의 압력은 중심부보다 1.5~2.5배 정도 높은 것으로 알려져 있다.⁽¹²⁾ 또한 보텍스 생성실의 지름비가 커지면, 생성실과 튜브관 사이의 유로에 급속소비가 증가하여 노즐에서 생성실로의 유동장애가 커지게 된다.

그러므로 생성실 지름비에 따라 공기의 유입량이 감소하는데, $\delta=1.45$ 이상에서 가장 큰 감소를 보인다. 이는 보텍스 생성실과 튜브와의 연결부의 급속소 형태에 기인한 재순환 영역이 급격히 성장하여 공기유량의 감소가 나타난 것으로 사료되며, 보텍스 발생기의 설계시 생성실의 지름비를 1.45 이하로 선정하는 것이 바람직하다고 본다.

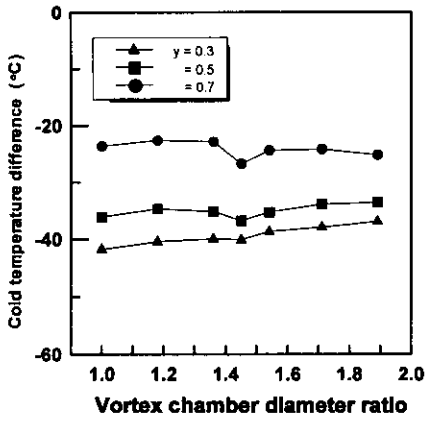
3.2 고온 및 저온출구의 온도차

Fig. 4는 저온출구 질량유량비(y)가 0.3, 0.5 및 0.7일 때 보텍스 생성실 지름비에 따른 저온출구 온도차(ΔT_c)의 변화를 나타낸 그림으로서, (a), (b), (c)는 보텍스 튜브의 입구에서의 압력(P_i)이 각각 0.3, 0.5 및 0.7 MPa일 때이다. 그림에서 y 를 0.3, 0.5, 0.7만을 나타낸 것은 y 가 0.3에서 저온출구의 공기온도가 가장 낮고, 0.7 이상인 경우는 고온출구의 공기온도가 최대가 되기 때문이다.⁽¹³⁾

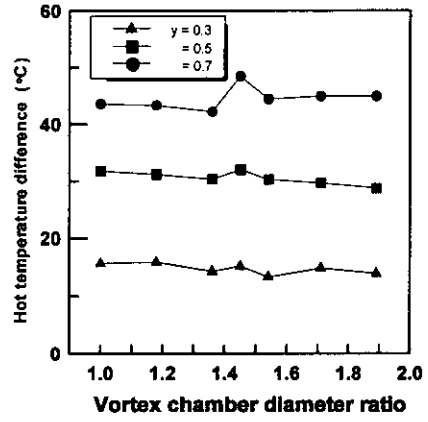
전반적으로 입구압력의 증가에 따라 저온출구의 온도차는 커지나, 저온출구의 질량유량비는 작아질수록 저온 온도차가 커지는 경향을 보인다. 이는 입구압력의 상승과 함께 공기의 유입속도 및 와류강도가 높아지므로 에너지분리가 활발해지기 때문이다. 하지만 저온측의 유량이 작을 때는 반대편의 스톱 밸브는 더욱 개방된 상태이므로, 상대적으로 많은 양의 공기가 고온측(스톱 밸브측)으로 배출된다. 그러므로 저온측으로의 역유동반경이 작아지고, 고온출구 쪽으로 흐르는 외부원환구역과 역유동구역 사이의 에너지분리가 일어나는 경계면이 줄어들어 에너지분리량이 적고 저온 온도차도 감소하는 것으로 판단된다.

보텍스 생성실 지름비(δ)의 영향을 살펴보면, 저온출구 질량비(y)가 작을 때는 δ 의 증가에 따라 저온출구 온도차(ΔT_c)가 약간 감소하고, y 가 클 때는 δ 의 상승에 따라 ΔT_c 가 미소하게 증가하는 경향을 보인다. 하지만 입구압력이 증가함에 따라 그 영향력은 줄어들고, $y \geq 0.5$ 이고 $\delta=1.45$ 일 때 저온출구 온도차가 최대치를 보인다. 이는 보텍스 유동의 강도를 결정짓는 데 있어 최적의 δ 가 존재하기 때문으로 생각된다. 즉, δ 가 증가하면 보텍스 생성실의 지름이 커짐으로써 보텍스 생성실로 유입되는 압축공기의 회전유동이 원활해져 보텍스의 강도가 증가하게 된다. 그러나 δ 가 너무 증가하게 되면, 와류 유동하는 공기가 보텍스 생성실에서 튜브로 유입될 때 유동저항이 증가하여 보텍스 유동의 강도는 오히려 감소된다.

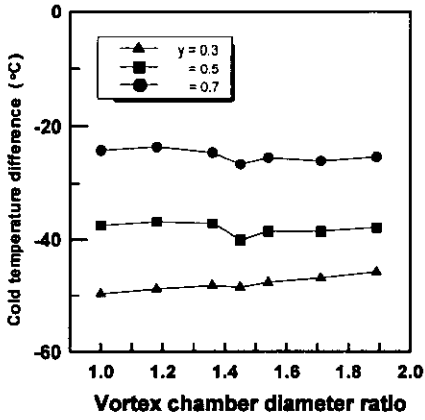
Fig. 5는 Fig. 4와 동일한 조건에서 보텍스 생성실 지름비에 따른 고온출구 온도차(ΔT_h)의 변화를 나타낸 그림이다.



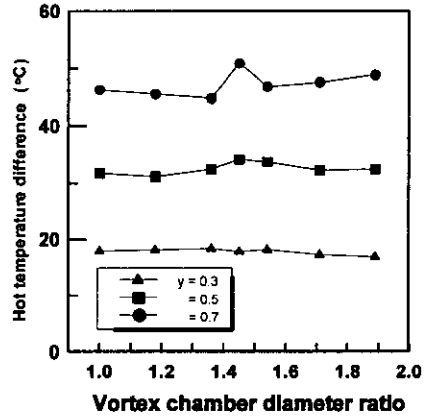
(a) $P_i=0.3$ MPa



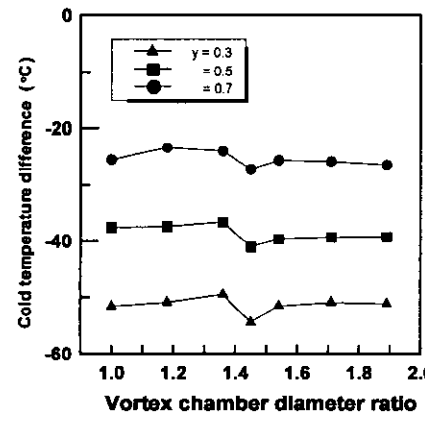
(a) $P_i=0.3$ MPa



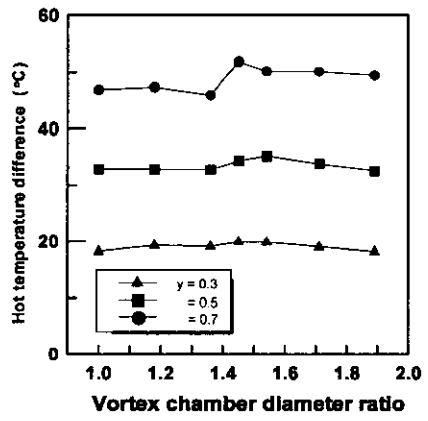
(b) $P_i=0.5$ MPa



(b) $P_i=0.5$ MPa



(c) $P_i=0.7$ MPa



(c) $P_i=0.7$ MPa

Fig. 4 Cold temperature difference versus vortex chamber diameter ratio for different cold-end mass flow rates.

Fig. 5 Hot temperature difference versus vortex chamber diameter ratio for different cold-end mass flow rates.

입구압력의 증가에 따라 고온출구 온도차는 약간 증가하나, 저온출구 질량비가 높아지면 고온 온도차(ΔT_h)는 현저히 증가한다. 이는 저온측 유량이 증가하면 고온측 스톱 밸브의 개방면적은 줄어들어 튜브 벽면의 고온 공기류만 배출되기 때문이다. 보텍스 생성실 지름비(δ)에 대한 고온 온도차(ΔT_h)의 영향은 비교적 적으나, $\delta=1.45$ 일 때 동일한 입구압력 및 유량비에서 고온 온도차(ΔT_h)는 최대를 보인다.

이상과 같이 저온 및 고온측 온도차를 고려할 때, 동일한 입구 및 출구조건에서 적절한 보텍스 생성실 지름비는 그 값이 1.45로 사료된다.

3.3 냉각용량 및 냉각효율

Fig. 6은 보텍스 생성실 지름비에 따른 냉각용량의 변화를 입구압력별로 나타낸 그림이며, 여기에 사용된 식은 다음과 같다.

$$Q_c = y m_i C_p (T_i - T_c) \quad (1)$$

저온출구 질량유량비에 대한 경향은 유량비의 증가에 따라 냉각량도 증가하다가, $y=0.5$ 부근에 최대가 되고 다시 감소하였다. 저온출구의 온도차는 Fig. 4에서 $y=0.3$ 일 때 가장 크지만, 냉각용량은 식(1)과 같이 저온출구 유량과의 관계로 $y=0.5$ 부근에서 최대가 된다.

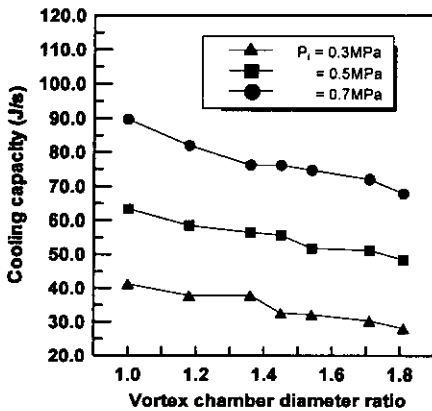


Fig. 6 Cooling capacity versus vortex chamber diameter ratio at different inlet pressures.

또한 Fig. 6에서 보텍스 생성실 지름비(δ)가 1.0에 가까울수록 냉각용량은 증가함을 보여준다. 이는 δ 의 감소에 따른 Fig. 4의 저온출구 온도차 보다는 Fig. 3의 유입질량의 증가 영향이 더 크기 때문으로 판단된다. 또한 입구압력의 증가에 따라 저온출구 유량도 증가하므로 냉각용량은 증가하고 있다.

Fig. 7은 저온출구 유량비가 0.5일 때, 입구압력과 보텍스 생성실 지름비(δ)의 변화에 대한 냉각효율(η)을 나타낸 그림이며, 냉각효율은 식(2)로 계산되었다.

효율식(2)는 대기압의 공기를 입구압력으로 단열압축하는 데 필요한 일에 대한 저온출구의 냉각용량으로 비로 결정되었다.⁽⁶⁾

$$\eta = \frac{y(T_i - T_c)}{T_i \left\{ 1 - \left(\frac{P_c}{P_i} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right\}}$$

입구압력이 증가함에 따라 냉각효율은 감소하고 있다. 이는 입구압력의 증가에 따른 단열압축일의 증가에 비해 에너지분리가 비례하여 증가하지 않음을 보여주고 있다. 하지만 동일한 입구압력에서는 보텍스 생성실 지름비가 증가함에 따라 냉각효율은 약 2% 이내로 일정하지만, 보텍스 생성실 지름비가 1.45 부근에서는 약 14% 정도 증가하고 있다.

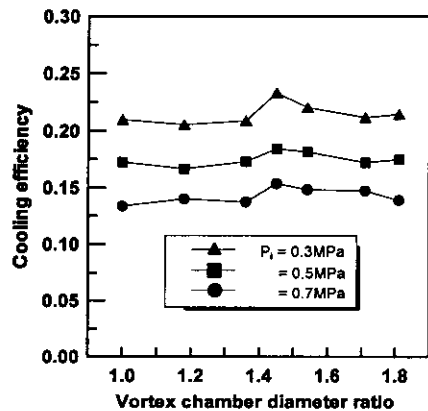


Fig. 7 Cooling efficiency versus vortex chamber diameter ratio at different inlet pressures.

4. 결 론

보텍스 생성실 지름비가 1.0~1.89이고, 입구압력은 0.3~0.7 MPa일 때, 저온출구 질량유량비를 0.1에서 0.9로 변화시키면서 보텍스 튜브의 에너지 분리 특성, 냉각능력 및 효율을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 보텍스 생성실 지름비가 1.45 이상에서 보텍스 튜브로 유입되는 공기의 질량유량이 크게 감소한다.

(2) 상기의 실험조건에서 보텍스 생성실 지름비가 1.45일 때, 저온 및 고온출구 온도차가 최대로 된다.

(3) 보텍스 생성실 지름비가 낮을수록 보텍스 튜브의 냉각용량은 증가하며, 저온출구 질량유량비가 0.5 부근에서 최대이다.

(4) 보텍스 튜브의 냉각효율은 입구압력이 증가함에 따라 감소하지만, 보텍스 생성실 지름비가 1.45에서 다른 경우보다 14% 정도 높다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단의 1997년도 에너지 기술개발사업과제 중 에너지 절약사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 관계자 여러분께 깊은 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- Graham, P. A., 1972, A Theoretical Study of Fluid Dynamic Energy Separation, Report No. TR-ES-721.
- Ranque, G. J., 1932, United State Patent, Applied December 6, Serial No. 646.020.
- Hilsch, R., 1947, The Use of Expansion of Gases in a Centrifugal Field as a Cooling Process, Review of Scientific Instruments, Vol. 8, No. 2, pp. 108-113.
- Hartnett, J. P., 1957, Experimental Study of the Velocity and Temperature Distribution in a High Velocity Vortex-type Flow, ASME Trans., Vol. 79, pp. 751-758.
- Martynovskii, V. S. and Alekeseev, V. P., 1957, Investigation of the Vortex Thermal Separation Effect for Gases and Vapors, Soviet Phys., Vol. 1, pp. 2233-2243.
- Takahama, H. and Kawashima, K. I., 1966, An Experimental Study of Vortex Tube, B. of JSME, Vol. 9, No. 33, pp. 227-245.
- Riu, K. J. and Choi, B. C., 1996, The Experimental Study for Cold End Orifice of Vortex Tube, KSME Trans. (B), Vol. 20, No. 3, pp. 1061-1073.
- Riu, K. J., Do, H. S., Park, H. S. and Kim, C. S., 1998, The Effect of a Geometric Form of Generator of a Vortex Tube on Energy Separation, Proc. of SAREK, pp. 802-807.
- Riu, K. J. and Lee, J. H., 1999, The Effect of the Number of Nozzle holes on the Energy Separation, J. of SAREK, Vol. 11, No. 5, pp. 507-514.
- Riu, K. J., Kim, J. S. and Lee, J. H., 2000, Study on the Characteristics of One Hole Vortex Generator, Proc. of SAREK, pp. 692-699.
- Riu, K. J., Bang, C. H. and Kim, B. H., 2000, The Influence of Ranque-Hilsch Effect and Joule-Thomson Effect to Energy Separation in a Vortex Tube, J. of SAREK, Vol. 12, No. 8, pp. 703-710.
- Negm, M. I. M., Serag, A. Z. and Abdel Ghany, S. M., 1988, Generalized Correlations for Process of Energy Separation in Vortex Tubes, Modelling Simulation and Control, Part B, Vol. 4, No. 4, pp. 47-64.
- Kim, J. H., 1996, An Experimental Study to Optimize a Vortex Tube for Increasing Energy Separation, M. Sc. Thesis, Kyungpook National University, Taegu, Korea.