

공기공급 시스템에 적용되는 Vortex Tube의 에너지 분리특성에 관한 연구(Ⅱ)

—표면의 단열효과에 따른 영향—

A Study for Energy Separation of Vortex Tube Using Air Supply System(Ⅱ)

—the effect of surface insulation—

방 창 훈* · 추 홍 록** · 유 갑 종***

C.H. Bang · H.L. Choo · K.J. Riu

(1998년 4월 14일 접수, 1999년 1월 14일 채택)

ABSTRACT

The vortex tube is a simple device which splits a compressed gas stream into a cold stream and a hot stream without any chemical reactions. Recently, vortex tube is widely used to local cooler of industrial equipments and air supply system. In this study, the insulation effect of surface on the efficiency of vortex tube was performed experimentally. The experiment is carried out for nozzle area ratio of 0.194, diameter ratio of cold end orifice of 0.6 and input pressure ranging from 0.2Mpa to 0.5Mpa. The purpose of this study is focused on the effect of surface insulation of vortex tube with the variation of cold air mass flow ratio. The results indicate that the temperature difference of cold and hot air are higher about 12% and 30% than that of not insulated vortex tube respectively. Furthermore, for the insulated vortex tube, the similarity relation for the prediction of cold end temperature as the function of cold air mass flow ratio and input pressure is obtained.

* 경북대학교

** 대구보건대학 산업안전과

*** 경북대학교 기계공학부

1. 서 론

Vortex tube의 에너지 분리현상이 Ranque¹⁾에 의해 처음으로 발견된 이래 vortex tube는 공작물의 국소냉각, 전자부품의 냉각, 제어기기의 발열방지, 금형제품의 급속냉각, 공조설비 등에 사용되고 있으며 산업현장에서의 그 이용률이 점차 증대되고 있다. 또한 최근에는 작업자의 쾌적한 작업환경을 조성하여 작업능률을 향상시킬 목적으로 제철소 등의 고온, 고습 작업장이나 분진, 석면, 유해먼지나 가스, 증기 등이 많이 발생하는 작업장에서 냉각복(air cool jacket) 또는 공기공급식 호흡보호구의 공기공급시스템에 많이 활용되고 있다. 이러한 vortex tube를 이용한 냉각복 및 호흡보호구는 작업자의 능률향상뿐만 아니라 직업병의 예방 및 안전측면에서 매우 효율성이 높아 그 적용범위가 점차 확대될 전망이다. 그러나 아직까지 vortex tube의 에너지분리현상에 관한 자세한 구멍이 이루어지지 않고 있다.

지금까지 vortex tube의 에너지분리현상에 대해서 Fulton²⁾, Schultz-Grunow³⁾, Stephan⁴⁾ 등에 의해 이론적 연구가 수행되었고, Hilsch⁵⁾는 vortex tube가 일반 냉동기에 비하여 성능계수는 떨어지지만 천연가스의 액화등에 응용될 수 있다고 하였다. Hartnett⁶⁾ 등은 튜브내의 속도 및 압력, 온도분포를 측정하여 vortex tube의 벽면 쪽은 고온이고, 중심영역에서는 저온임을 밝혔으며, 튜브의 길이가 에너지분리 효과에 영향을 미친다고 하였다. Stephan⁷⁾ 등은 튜브내의 접선 속도로 인하여 생성된 Görtler vortex⁸⁾가 에너지분리를 일으키는 구동력임을 제시하였다. Bobrovnikov⁹⁾ 등은 공기중에 포함된 수증기가 vortex tube의 에너지분리 효과를 감소시킨다고 하였고, Takahama¹⁰⁾는 vortex tube의 단면적과 노즐 단면적과의 비 및 노즐의 개수에 대한 실험을 수행하여 노즐면적이 vortex tube 단면적의 0.17배일 때 최대효율이 나타난다고 하였다. Marshall¹¹⁾은 서로 다른 두종류의 가스를 혼합하여 여러 가지 vortex tube의 형상에 대하여 실험을 수행하여 질량분리에 대한 가능성을 보여주었다.

이상과 같이 vortex tube의 에너지 분리특성에 관한 많은 이론적, 실험적 연구가 수행되었지만 아직 정확한 특성구멍이 체계적으로 이루어지지 못하였다. 따라서 vortex tube의 모든 요소의 세부적인 최적조건이 구명되어야 한다. 이에 관한 연구로서 유갑중 등¹²⁾은 vortex tube의 저온출구 오리피스 직경의 변화가 에너지 분리특성에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하였다. 그 결과 저온출구 온도차를 결과로 한 최적의 오리피스 직경비 $\zeta=0.44$ 를 제시하였고, 최대 저온출구 온도차를 예측할 수 있는 일반적 상관식을 구하였다. 또한 추홍록 등¹³⁾은 저온출구 오리피스 직경의 변화에 따른 냉각능력을 조사하여 유갑중 등의 연구결과와 비교 고찰하였다. 그 결과 냉각능력으로 제시된 최적의 오리피스 직경비 $\zeta=0.6$ 을 제시하였다.

본 연구에서는 상기의 연구결과¹³⁾에서 제시된 최적의 오리피스 직경비 $\zeta=0.6$ 을 채택하여 vortex tube의 외부 표면조건을 단열조건으로 할 때 나타날 수 있는 효율향상 방안에 대해 구명하고자 한다.

따라서 본 연구에서는 vortex tube 표면의 단열효과가 에너지분리특성에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하여 단열효과에 따른 vortex tube의 저온공기 온도차를 예측할 수 있는 상사식을 제시하고, 그 결과를 기존의 연구결과와 비교 검토하고자 한다. 이러한 연구결과는 결과적으로 tube에 유입되는 압축공기의 소요동력을 감소시킴으로써 에너지 절감효과를 거둘 수 있다.

2. 실험

2.1 실험 장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도로서 추홍록 등¹³⁾의 연구에서 사용한 실험장치와 동일하다.

실험장치는 공기공급장치, 실험부 및 데이터처리장치로 구성된다. 공기공급장치는 공기압축기(air compressor)와 안전밸브, 압축된 공기에서 불순물을 제거하는 필터(filter)와 공기건조기, vortex tube에 일정한 압력의 공기를 공급하기 위한 압력조정기(pressure regulator)로 구성되

어 있다. 실험부는 스테인레스와 동으로 제작된 vortex tube로 구성되어 있다. 데이터 처리장치는 A/D converter와 냉각공기와 고온공기의 유량을 측정하는 로타메타(rotameter), 데이터를 처리하기 위한 PC와 프린터로 구성되어 있다.

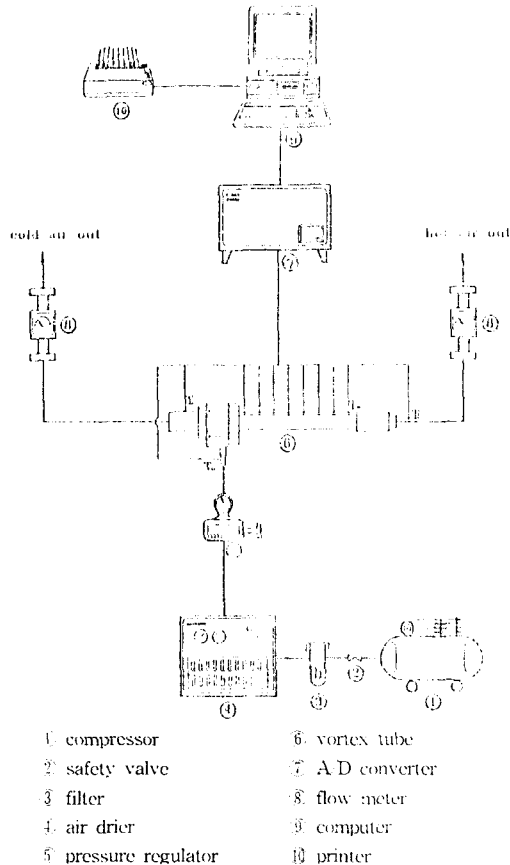
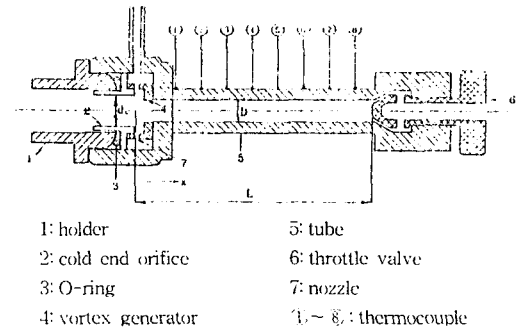


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig. 2는 실험에 사용한 vortex tube의 상세한 구조 및 표면온도측정을 위한 열전대의 위치를 나타낸 그림이다¹³⁾.

본 실험에서는 효율이 비교적 우수하고 일반적인 counterflow type의 vortex tube를 사용하였다. vortex tube 표면에는 8개의 열전대(T type)를 등간격으로 부착하였다. vortex tube의 직경은 5mm로 하였으며, 길이는 직경의 21배(L=21D)로 하였다¹³⁾. 냉출구 오리피스

는¹³⁾의 실험결과에서 최대성능이 나타난 냉출구 오리피스 직경비 $\zeta=0.6$ 으로 하였으며, 노즐면 적비 $S_n=0.194$ 로 하였다. Vortex tube의 표면단열은 두께 9mm의 세라믹울과 25mm의 유리섬유를 사용하여 단열하였다.



thermocouple location	(unit: mm)							
number	1	2	3	4	5	6	7	8
length(x)	11.6	23.2	34.8	46.4	58.0	69.6	81.2	92.8
dimensionless length(x/L)	0.11	0.22	0.33	0.44	0.55	0.66	0.77	0.88

Fig. 2 Cross-sectional view of vortex tube and thermocouple location

2.2 실험방법 및 범위

실험에 앞서 예비실험을 통하여 vortex tube의 입구와 출구, 그리고 주위온도를 측정하기 위한 열전대와 냉출구와 온출구의 유량을 측정하는 유량계를 보정하였다. vortex tube가 작동을 시작하여 냉각공기와 고온공기의 온도가 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 이내일 때를 정상상태로 정하였으며, 본 실험에서 정상상태에 도달하는 시간은 약 5분이 소요되었다.

모든 실험장치의 전원을 연결하고 먼저 공기 건조기를 충분히 예열한 후 안전밸브를 닫은 상태에서 공기압축기를 시동하여 공기 탱크(tank)에 공기가 충전하면 안전밸브를 서서히 열어 압축공기가 필터(filter)를 거쳐 공기건조기를 지나 압력조정기(pressure regulator)에 도달하게 한다. 압력조정기를 조절하여 vortex tube의 입구 압력을 설정한 후 저온공기와 고온공기의 유량을 확인하고 드로틀밸브를 이용하여 냉각공기

질량비(y)값을 조정한다. 정상상태에 도달하면 A/D converter로 온도를 측정한다.

실험은 입구압력을 0.2에서 0.5Mpa까지 4단계로 나누어 수행하였으며, 각 압력에 대하여 냉각공기 질량비(y)를 0에서 1까지 11단계로 변화시켰다. 여기서 냉각공기 질량유량비(y)는 입구공기 유량에 대한 냉각공기의 질량유량비이다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 입구압력 $P_0=0.2$ 및 0.5Mpa일 때 저온공기 질량유량비 y 의 증가에 따른 저온공기 온도차의 ΔT_c 의 변화를 나타낸 그림이다.

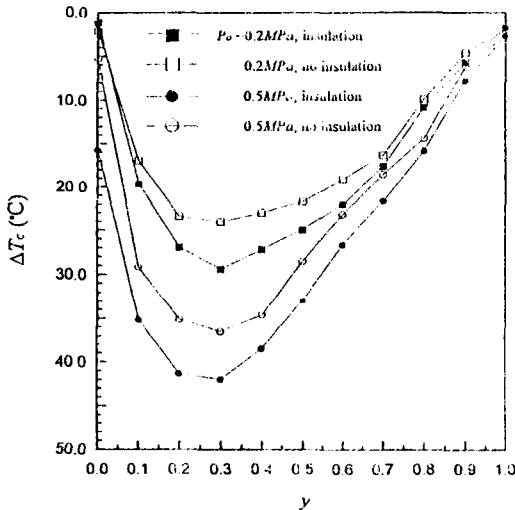


Fig. 3 Cold air temperature difference with the cold air flow rate for input pressure $P_0=0.2, 0.5$ Mpa and $S_n=0.194$

전반적으로 y 의 증가에 따라 저온공기 온도차 ΔT_c 는 증가하다가 $y=0.3$ 에서 최대값에 도달한 후 다시 감소한다. 이는 y 가 증가할수록 고온출구쪽 압력이 증가하면서 튜브벽면과 중심부에 형성되는 역압력구배가 중심부의 저온공기를 역유동시키는 역할을 하기 때문이다¹³⁾. ΔT_c 는 입구압력에 관계없이 y 의 전 범위에 대해서 단열인 경우가 비단열인 경우보다 크게 나타난다. 이는 단열인 경우 튜브표면에서 외부로의

열손실이 감소하고, Görtler vortex의 강도가 증가하여 에너지분리 효과가 증가하기 때문으로 생각된다. 그리고 단열인 경우와 비단열인 경우와의 온도차는 y 가 증가할수록 점차 증가하다가 $y=0.3$ 에서 최대치를 나타낸 후 다시 감소하는 성향이다. 이러한 성향은 입구압력에 관계없이 일정하게 나타난다. vortex tube의 단열효과에 따른 ΔT_c 의 변화는 P_0 가 0.2, 0.3, 0.4, 0.5Mpa로 증가함에 따라 각각 18.1%, 10.0%, 10.4%, 13.0% 정도 증가한다. 이러한 정량적 증가량은 Stephan⁴⁾의 결과와 일치한다.

Fig. 4는 입구압력 $P_0=0.2$ Mpa 및 0.5Mpa일 때 저온공기 질량유량비 y 의 증가에 따른 고온공기 온도차 ΔT_h 의 변화를 나타낸 그림이다.

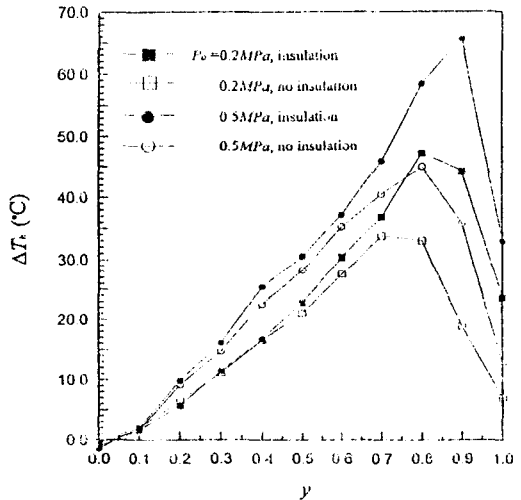


Fig. 4 Hot air temperature difference with the cold air flow rate for input pressure $P_0=0.2, 0.5$ Mpa and $S_n=0.194$

전반적으로 고온공기 온도차 ΔT_h 는 y 의 증가에 따라 상승하다가 $y=0.8\sim 0.9$ 부근에서 최대값에 도달한 후 다시 감소하는 성향이다¹³⁾. 또한 ΔT_h 는 입구압력에 관계없이 y 의 전 범위에 대해서 단열인 경우가 비단열인 경우보다 크게 나타난다. 이러한 성향은 저온공기 온도차 ΔT_c 에서의 성향과 일치한다(Fig. 3 설명참조). 단, 저온공기 질량유량비 $y=0.8$ 이후에서는 $P_0=0.2$ Mpa에서 단열인 경우가 $P_0=0.5$ Mpa에서 비단

열인 경우보다 더욱 크게 나타난다. 이는 $y=0.8$ 이후에서는 입구압력의 증가에 의한 에너지분리 효과보다 단열효과에 의한 영향을 크게 작용하기 때문이다. vortex tube의 단열효과에 따른 ΔT_h 의 변화는 입구압력 P_0 가 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 Mpa로 증가함에 따라 각각 30.0, 34.0, 32.3, 31.7% 정도 증가한다.

Fig.5는 각각의 입구압력 P_0 에 있어서 저온공기 질량유량비 y 의 증가에 따른 vortex tube의 효율 η 를 나타낸 그림이다.

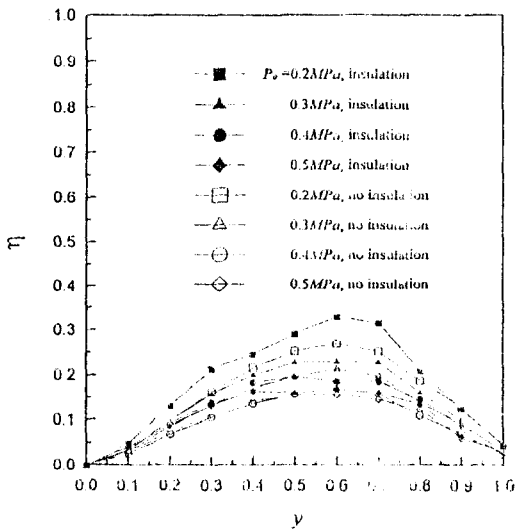


Fig.5 Efficiency of the vortex tube with the cold air mass ratio for different input pressure and $S_n=0.1944$

여기서 vortex tube의 효율은 압축기에 의하여 대기압 상태의 공기를 입구압력으로 압축하는데 필요한 일과 vortex tube에 의해 분리된 저온공기 에너지와의 비로 정의하였으며 식(1)과 같다.

$$\eta = y \frac{C_p(T_0 - T_c)}{RT_0 \ln\left(\frac{P_0}{P_\infty}\right)^{(1/k)} \dots \dots \dots (1)$$

Vortex tube의 효율 η 는 y 가 증가함에 따라 점차 증가하다가 $y=0.6$ 에서 최대값에 도달한 후 다시 감소하는 성향이다. 그리고 η 는 단열 조건에 관계없이 $P_0=0.2$ Mpa일때 최대값이 나

타나고, 입구압력이 증가함에 따라 감소한다. 즉, 입구압력의 증가에 의한 압축일의 증가에 비해 에너지분리가 효과적으로 증대되지 않는다. 또한 입구압력에 관계없이 단열인 경우의 η 가 비단열인 경우보다 y 의 전 범위에 있어 크게 나타난다.

Fig.6은 단열조건인 경우 저온공기 질량유량비 y 의 증가에 따른 최대저온공기 온도차와 저온공기온도차와의 비 $\Delta T_c / \Delta T_{c,max}$ 를 나타낸 그림이다.

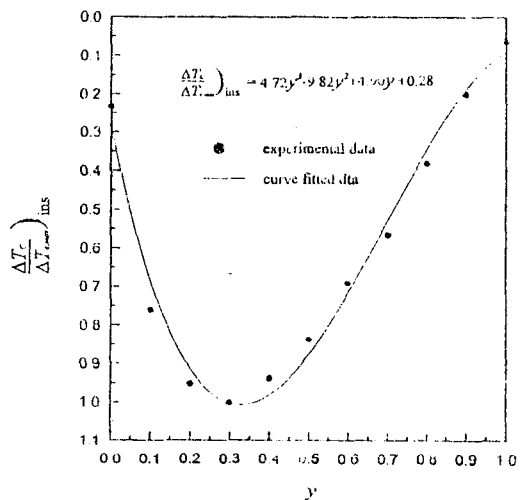


Fig.6 Similarity relation for prediction of the cold air temperature with the cold air mass ratio for insulated vortex tube, $S_n=0.1944$

그림에서 ●는 실험적 결과이고, 실선은 곡선 접합한 값이다. $\Delta T_c / \Delta T_{c,max}$ 는 y 의 증가에 따라 증가하다가 $y=0.3$ 부근에서 최대값을 나타낸 후 다시 감소하는 성향이다.

본 연구에서는 vortex tube를 단열하였을 경우 저온공기 질량유량비 y 에 따른 저온공기 온도차를 예측할 수 있는 상사식을 구하기 위하여 실험적 결과들을 곡선접합한 결과 식(2)와 같은 상사식을 구하였다.

$$\left. \frac{\Delta T}{\Delta T_{c,max}} \right)_{ins} = 4.72y^3 - 9.82y^2 + 4.90y + 0.28 \dots \dots \dots (2)$$

또한 vortex tube를 단열하였을 경우 입구압

력과 저온공기질량 유량비의 함수로 저온공기온도차를 예측할 수 있는 상사식을 식(3)과 같이 구하였다.

$$\frac{\Delta T_c}{T_o} \Big|_{ins} = -35.6 + 4.3e^{(P^{*2}+y^2)} + 5.1P - 6.7P^{*2} + 7.7y - 15.0y^2 + 30.5 \cos(P^*y) + 0.9 \sin(P^*y) \quad (3)$$

식(3)에서 P*는 입구압력(P_o)을 대기압(P)으로 무차원화한 압력이다.

Fig. 7은 단열조건인 경우 실험적 결과와 상관식 (3)에 의한 결과를 상호비교하기 위하여 저온공기 유량비 y와 무차원 입구압력 P_o/P에 따른 무차원 저온공기온도차 ΔT_c/T_o를 나타낸 그림이다.

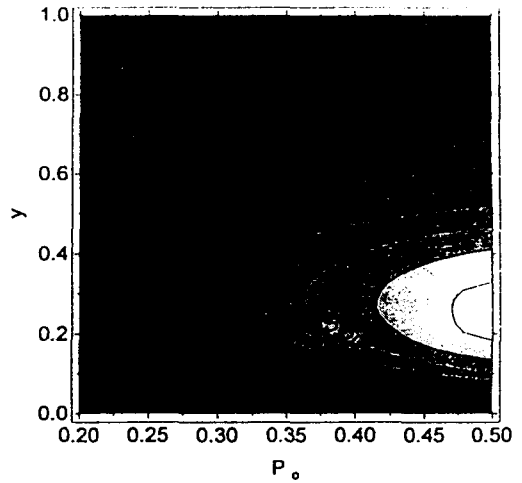
실험적 결과인 (a)와 곡선적합에 의한 결과 (b)가 잘 일치한다. 그리고 무차원 저온공기 온도차의 최대값은 저온공기 질량유량비 y가 0.3, 무차원 입구압력 P_o/P가 0.5일 때 나타난다. 따라서 vortex tube를 단열하였을 경우 유출되는 저온공기 온도차를 식(3)을 이용하여 유효하게 예측할 수 있다.

4. 결 론

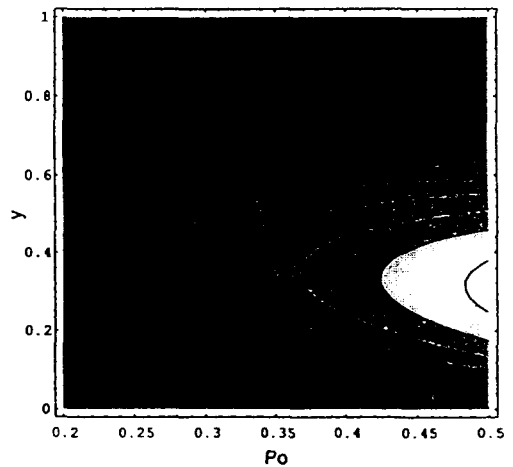
압축공기를 작동유체로 사용하는 counterflow 형의 vortex tube에 대하여 입구압력(P_o=0.2~0.5Mpa)과 냉각공기질량비(y=0.0~1.0)를 변화하면서 단열효과에 따른 냉각능력을 조사하기 위한 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Vortex tube의 냉각능력은 튜브표면을 단열하였을 경우, 단열하지 않았을 경우보다 저온공기에 대하여 저온공기온도차가 45℃ 정도 내에서 12%, 고온공기에 대하여 고온공기온도차가 65℃정도내에서 30%정도 높게 나타났다.
- 2) Vortex tube 표면을 단열하였을 경우 냉출구 온도차를 예측할 수 있는 상관식을 다음과 같이 구하였다.

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_{c, max}} \Big|_{ins} = 4.72x^3 - 9.82x^2 + 4.90x + 0.28$$



(a) experimental data



(b) curve fitted data

Fig. 7 Comparison of cold air temperature by (a) the experimental results with the equation (3) for insulated vortex tube

- 3) Vortex tube의 효율은 입구압력이 낮을수록 크다.

기 호 설 명

- D : vortex tube의 지름, mm
- d : 지름, mm
- L : vortex tube의 길이, mm

- P : 압력, MPa
 P* : 무차원압력(=입구압력/대기압)
 S_n : 노즐면적비
 (=노즐면적/vortex tube 단면적)
 ΔT_c : 저온공기온도차(=T_o-T_c), °C
 ΔT_h : 저온공기온도차(=T_o-T_h), °C
 y : 저온공기유량비
 (=저온공기유량/입구공기유량)

【그리스 문자】

- ξ: 저온출구 오리피스지름비(=저온출구 오리피스지름/vortex tube의 지름)
 η: vortex tube의 효율

【하첨자】

- c : 저온공기
 h : 고온공기
 max: 최대값
 o : 입구공기

참 고 문 헌

- 1) Ranque, G.J., "United State Patent", Applied December 6., Serial No 646.020, 1932.
- 2) Fulton, C.D., "Ranque's Tube", Refrig. Eng., Vol. 5, pp. 473~479, 1950.
- 3) Schultz-Grunow, F., "Turbulenter Wärmedurchgang im Zentrifugalfeld", Forsch. Ing. Wes., Vol. 17, pp. 65~76, 1951.
- 4) Stephan, K., Lin, S., Durst, M., Huang, F. & Seher, D., "An Investigation of Energy Separation in a Vortex Tube", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 26, No. 3, pp. 341~348, 1983.
- 5) Hilsch, R., "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, 1947.
- 6) Hartnett, J.P. & Eckert, E.R. G., "Experimental Study of the Velocity and Temperature Distribution in a High Velocity Vortex-type Flow", Trans. ASME, Vol. 79, pp. 751~758, 1957.
- 7) Stephan, K., Lin, S., Durst, M., Huang, F. & Seher, D., "A Similarity Relation for Energy Separation in a Vortex Tube", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 27, No. 6, pp. 911~920, 1984.
- 8) Götler, H., "Dreidimensionales zur Stabilitätstheorie Laminarer Grenzschichten", Z. Agnew. Math Mech., Vol. 35, pp. 326, 1955.
- 9) Bobrovnikov, G.N., Pelyakov, A.A. & Ilina, N.J., "Untersuchung der Arbeit eines Wirbelrohres in Feuchter Luft (in Russian)", Kholodilnaja Technika, Vol. 11, pp. 25~27, 1976.
- 10) Takahama, H., "Studies on Vortex Tubes, 2nd Report, Reynolds Number, The Effects of the Cold Air Rate and the Partial Admission of Nozzle on the Energy Separation)", Bulletin of JSME, Vol. 9, No. 33, pp. 121~130, 1966.
- 11) Marshall, J., "Effect of Operating Conditions, Physical Size and Fluid Characteristics on the Gas Separation Performance of the Linderstrom-Lang Vortex Tube", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 20, pp. 227~231, 1977.
- 12) 유갑중, 최병철, "Vortex Tube의 냉출구 Orifice에 관한 실험적 연구", 대한기계학회 논문집(B), 제20권, 제3호, pp. 1061~1073, 1996.
- 13) 이병화, 추홍록, 상희선, "공기공급 시스템에 적용되는 vortex tube의 에너지 분리특성에 관한 연구(I) -저온출구 orifice의 직경변화에 의한 영향-", 산업안전학회지, Vol. 14, No. 4, pp. 9~18, 1998.