

공기공급 시스템에 적용되는 Vortex Tube의 에너지 분리특성에 관한 연구(II) -표면의 단열효과에 따른 영향-

추홍록*, 상희선**, 이병화***

대구보건전문대학**, 경일대학교**, 경북대 대학원***

1. 서론

vortex tube의 에너지 분리현상이 Ranque⁽¹⁾에 의해 처음으로 발견된 이래 vortex tube는 산업현장에서의 그 이용률이 점차 증대되고 있다. 특히, 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.

지금까지 vortex tube의 에너지분리현상에 대해서 Fulton⁽²⁾, Schultz-Grunow⁽³⁾, Stephan⁽⁴⁾ 등에 의해 이론적 연구가 수행되었고, Hilsch⁽⁵⁾는 Vortex tube가 일반 냉동기에 비하여 성능계수는 떨어지지만 천연가스의 액화등에 응용될 수 있다고 하였다. Hartnett⁽⁶⁾ 등은 튜브내의 속도 및 압력, 온도분포를 측정하여 보텍스튜브의 벽면 쪽은 고온이고, 중심영역에서는 저온임을 밝혔으며, 튜브의 길이가 에너지분리 효과에 영향을 미친다고 하였다. Stephan⁽⁷⁾ 등은 튜브내의 접선속도로 인하여 생성된 Görtler vortex가 에너지 분리를 일으키는 구동력임을 제시하였다. 유갑종⁽⁸⁾, 추홍록⁽⁹⁾ 등은 vortex tube의 저온출구 오리피스 직경의 변화가 에너지분리특성에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하였다.

본 연구에서는 상기의 연구결과⁽⁹⁾에서 제시된 최적의 오리피스 직경비 $\zeta=0.6$ 을 채택하여 vortex tube의 외부 표면조건을 단열조건으로 할때 나타날 수 있는 특성구명에 대해 구명하고자 한다.

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

2. 실험

본 연구에서 사용한 실험장치는 추홍록 등⁽⁹⁾의 연구에서 사용한 실험장치와 동일하다.

실험장치는 공기공급장치, 실험부 및 데이터 처리장치로 구성된다. 공기공급장치는 공기압축기(air compressor)와 안전밸브, 압축된 공기에서 불순물을 제거하는 필터(filter)와 공기건조기, 보텍스튜브에 일정한 압력의 공기를 공급하기 위한 압력조정기(pressure regulator)로 구성되어 있다. 실험부는 스테인레스와 동으로 제작된 보텍스튜브로 구성되어 있다. 데이터 처리장치는 A/D converter와 냉각공기와 고온공기의 유량을 측정하는 로타메타(rotameter), 데이터를 처리하기 위한 PC와 프린터로 구성되어 있다.

본 실험에서는 효율이 비교적 우수하고 일반적인 counterflow type의 보텍스튜브를 사용하였다. 보텍스튜브 표면에는 8개의 열전대(T type)를 등간격으로 부착하였다. 냉출구 오리피스는 추홍록 등⁽⁹⁾의 실험결과에서 최대성능이 나타난 냉출구 오리피스 직경비 $\zeta=0.6$ 으로 하였으며, 노즐면적비 $S_n=0.194$ 로 하였다. Vortex tube의 표면단열은 두께 9mm의 세라믹울과 25mm의 유리섬유를 사용하여 단열하였다. 실험은 입구압력을 0.2에서 0.5Mpa까지 4단계로 나누어 수행하였으며, 각 압력에 대하여 냉각공기 질량비(y)를 0에서 1까지 11단계로 변화시켰다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 입구압력 $P_0=0.2$ 및 0.5Mpa일때 저온공기 질량유량비 y의 증가에 따른 저온공기온도차 ΔT_c 의 변화를 나타낸 그림이다.

전반적으로 y의 증가에 따라 저온공기 온도차 ΔT_c 는 증가하다가 y=0.3에서 최대값에 도달한후 다시 감소한다. 이는 y가 증가할수록 고온출구쪽 압력이 증가하면서 튜브벽면과 중심부에 형성되는 역압력구배가 중심부의 저온공기를 역유동시키는 역할을 하기 때문이다. ΔT_c 는 입구압력에 관계없이 y의 전 범위에 대해서 단열인 경우가 비단열인 경우보다 크게 나타난다. 이는 단열인 경우 튜브표면에서 외부로의 열손실이 감소하고, Görtler Vortex의 강도가 증가하여 에너지 분리 효과가 증가하기 때문으로 생각된다. 그리고 단열인 경우와 비단열인 경우와의 온도차는 y가 증가할수록 점차 증가하다가 y=0.3에서 최대치를 나타낸후 다시 감소하는 성향이다. 보텍스튜브의 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 Stephan⁽⁴⁾의 결과와 일치한다.

Fig. 2는 입구압력 $P_0=0.2$ Mpa 및 0.5Mpa일때 저온공기질량유량비 y의 증가에 따른 고온공기온도차 ΔT_h 의 변화를 나타낸 그림이다.

전반적으로 고온공기온도차 ΔT_h 는 y의 증가에 따라 증가하다가 y=0.8~0.9부

근에서 최대값에 도달한후 다시 감소하는 성향이다. 또한 ΔT_h 는 입구압력에 관계없이 y 의 전 범위에 대해서 단열인 경우가 비단열인 경우보다 크게 나타난다. 이러한 성향은 저온공기온도차 ΔT_c 에서의 성향과 일치한다.

보텍스튜브의 단열효과에 따른 ΔT_h 의 변화는 입구압력 P_o 가 0.2, 0.3, 0.4, 0.5Mpa로 증가함에 따라 각각 30.0, 34.0, 32.3, 31.7% 정도 증가한다.

Fig. 3은 각각의 입구압력 P_o 에 있어서 저온공기 질량유량비 y 의 증가에 따른 vortex tube의 효율 η 를 나타낸 그림이다.

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.

$$\eta = y \frac{C_p(T_o - T_c)}{RT_o \ln\left(\frac{P_o}{P_\infty}\right)^{\frac{1}{k}}} \quad (1)$$

보텍스튜브의 효율 η 는 y 가 증가함에 따라 점차 증가하다가 $y=0.6$ 에서 최대값에 도달한후 다시 감소하는 성향이다. 그리고 η 는 단열조건에 관계없이 $P_o=0.2$ Mpa일때 최대값이 나타나고, 입구압력이 증가함에 따라 감소한다. 즉, 입구압력의 증가에 의한 압축일의 증가에 비해 에너지분리가 효과적으로 증대되지 않는다.

Fig. 4는 단열조건인 경우 저온공기 질량유량비 y 의 증가에 따른 최대저온공기 온도차와 저온공기온도차와의 비 $\Delta T_c/\Delta T_{c,max}$ 를 나타낸 그림이다.

그림에서 ●는 실험적 결과이고, 실선은 곡선접합한 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 예측할수 있는 상사식을 구하기 위하여 실험적 결과들을 곡선접합한 결과 식 (2)와 같은 상사식을 구하였다.

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

또한 보텍스튜브를 단열하였을 경우 입구압력과 저온공기질량 유량비의 함수로 저온공기온도차를 예측할 수 있는 상사식을 식 (3)과 같이 구하였다.

$$\begin{aligned} \left. \frac{\Delta T_c}{T_o} \right)_{ins} = & -35.6 + 4.3e^{(P^2+y^2)} + 5.1P - 6.7P^{*2} + 7.7y \\ & - 15.0y^2 + 30.5 \cos(P^*y) + 0.9 \sin(P^*y) \end{aligned} \quad (3)$$

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

4. 결 론

압축공기를 작동유체로 사용하는 counter flow형의 보텍스튜브에 대하여 입구 압력($P_0=0.2\sim 0.5\text{Mpa}$)와 냉각공기질량비($y=0.0\sim 1.0$)를 변화하면서 단열효과에 따른 냉각능력을 조사하기 위한 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 보텍스튜브의 냉각능력은 튜브표면을 단열하였을 경우, 단열하지 않았을 경우보다 저온공기에 대하여 12%정도 높게 나타났으며, 고온공기는 30%정도 높게 나타났다.

2. 보텍스튜브 표면을 단열하였을 경우 냉출구온도차를 예측할 수 있는 상관식을 다음과 같이 구하였다.

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

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) 유갑중, 최병철, "Vortex Tube의 냉출구 Orifice에 관한 실험적 연구", 대한기계학회 논문집 (B), 제 20권, 제 3호, pp. 1061~1073, 1996.
- (9) 추홍록, 상희선, "공기공급 시스템에 적용되는 Vortex Tube의 에너지 분리 특성에 관한 연구 (I)-저온출구 orifice의 직경변화에 의한 영향-", 산업안전학회 추계학술대회, 1998.

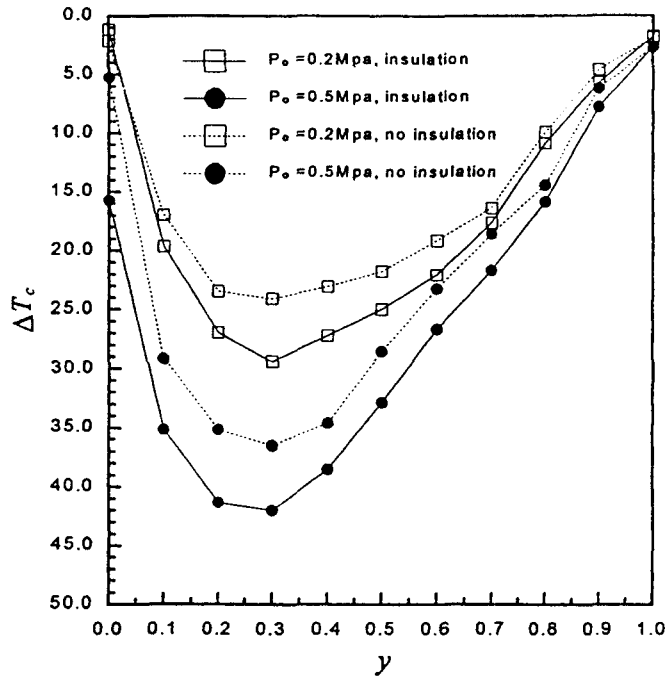


Fig. 1 Variation of cold temperature difference with the cold air mass ratio for different input pressure, $S_n=0.1944$

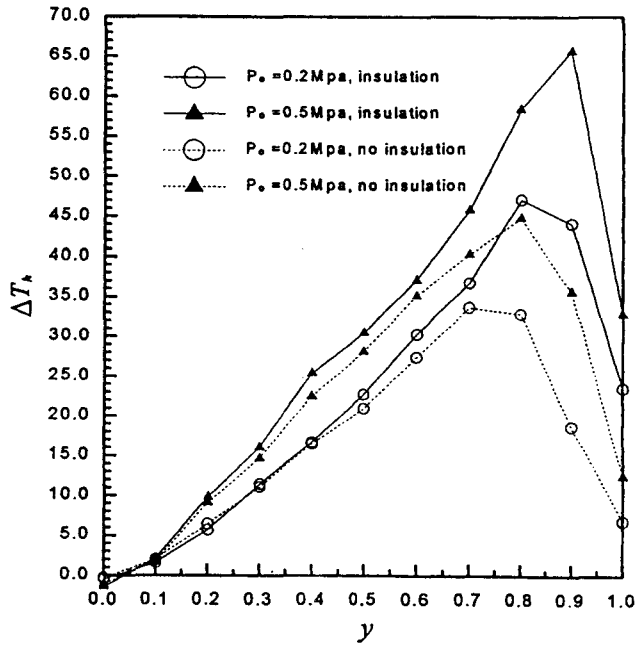


Fig. 2 Variation of hot temperature difference with the cold air mass ratio for different input pressure, $S_n=0.1944$

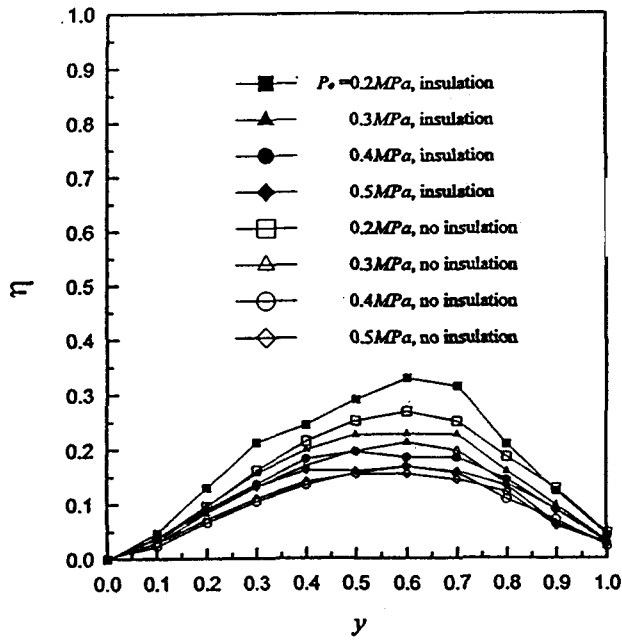


Fig. 3 Efficiency of the vortex tube with the cold air mass ratio for different input pressure, $S_n=0.1944$

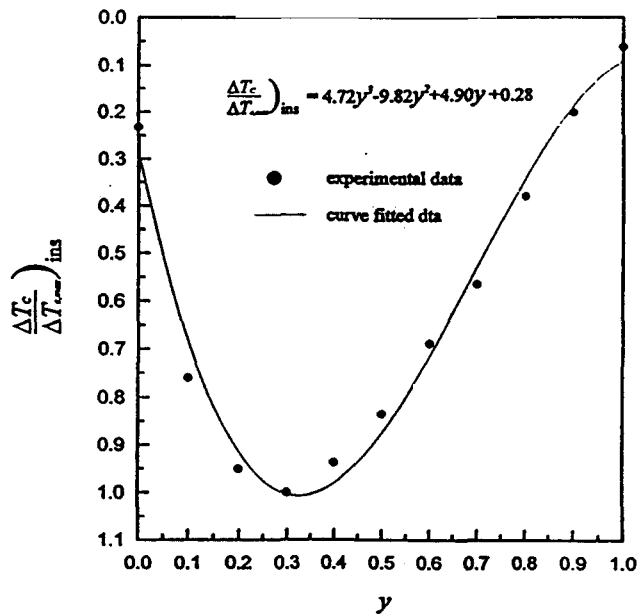


Fig. 4 Similarity relation for prediction of the cold air temperature with the cold air mass ratio for insulated vortex tube, $S_n=0.1944$