

저압용 보텍스튜브의 노즐면적비에 따른 에너지 분리특성에 관한 실험적 연구

오동진 · 최정원

충남대학교 기계공학부

E-mail : oh5dj@korea.com

An Experimental Study on the Energy Separation in the Ratio of Nozzle Area of a Low Pressure Vortex Tube

Dong-jin Oh and Jung-won Choi

Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University

요 약

본 논문에서는 압축공기를 작동매체로 한 저압용 보텍스튜브에 대한 에너지 분리과정을 상세히 연구하였다. 먼저 보텍스튜브에서 에너지 분리되어 나오는 온공기와 냉공기의 온도변화에 대하여 실험하였고, 보텍스튜브의 안쪽표면의 최대벽면온도 변화와 보텍스튜브 내의 온도분포를 통하여 보텍스튜브 내 유동장에서의 정체점의 위치에 대한 유용한 정보를 얻게 되었다. 이를 바탕으로 보텍스튜브의 노즐면적비와, 오리피스 크기에 따른 에너지분리 과정 등을 실험을 통하여 알아보았다. 이러한 기하학적 형상의 변화실험을 통하여 저압용 대형 보텍스튜브의 에너지 분리과정이 고압형 소형 보텍스튜브 보다 에너지 분리효과가 증대됨으로 인하여 최적의 노즐면적비와 오리피스지름비가 차이가 있음을 알 수 있었다.

Abstract — The process of energy separation in a low pressure vortex tube with compressed air as a working medium is studied in detail. Experimental data of the temperature of the cold and hot air leaving the vortex tube are presented. The variation of the maximum wall temperature along the inner surface of a vortex tube and the temperature distribution in a vortex tube provide useful information about the location of the stagnation point of the flow field at the axis of the vortex tube. Analysis of the results enabled to find the optimum ratio of nozzle area and the optimum shape of an orifice. From this optimum geometric setup of a low pressure and big vortex tube the effectiveness of energy separation was better than a high pressure and small vortex tube.

1. 서 론

보텍스튜브에 대한 연구는 1928년 프랑스의 물리학자 Ranque^[1]에 의하여 처음 발견된 후 독일의 물리학자 Hilsch^[2]에 의하여 학계에 널리 알려지게 되었으며, 그 후 에너지 분리가 일어나는 원인과 그 응용에 관하여 많은 사람들에 의하여 연구가 수행되었다. Ranque^[1]는 튜브에 접선 방향으로 흐르는 압축 공기를 연구하던 중 튜브의 중심 부분으로부터 나오는 공기의 온도가 튜브의 주변 부분으로부터 나오는 공기의 온도보다 낮은 현상을 발견하였다. 이후 독일의 물리학자 Hilsch^[2]는 튜브의 기하학적 조건과 튜브에 유입되는 압축 공기의 유입 압력

을 변화시키는 실험들을 하여 그 결과들을 체계적으로 정리하였다.

이러한 연구들 이외에도 보텍스튜브는 간단한 구조의 관을 이용하여 어떠한 화학작용이나 연관 작용 없이 압축공기로부터 저온공기와 고온공기를 분리하는 에너지 및 물질분리 장치이기도 하다. 보텍스튜브의 분리현상을 이용하면 압축공기나 기타의 고압 유체를 사용하는 경우 간단하게 저온유체와 고온유체를 동시에 또는 각각 분리하여 얻을 수 있을 뿐만 아니라 혼합유체로부터의 특정성분 분리에도 사용이 가능하다. 보텍스튜브의 물질 분리 효과에 관한 연구는 미비하지만 Linderstrom-Lang^[3]이 연구를 통하여 보텍스튜브 내에서 에너지분리 뿐만

아니라 보텍스튜브 내부의 원심력을 이용하여 물질분리가 가능하며, 그 분리효과는 저온공기 유량비와 보텍스튜브의 지름비에 의존함을 보였다. 이러한 보텍스튜브에 대한 이론 및 실험적 연구가 수행되어져 왔으나 아직 미비하고, 그나마 대부분이 소형이며 고압용 보텍스튜브의 에너지분리와 저온부에 중점을 둔 연구들이었다. 따라서 본 연구에서는 미세 입자의 분리가능성에 대한 연구를 하기 위하여 고온부에 중점을 둔 저압용이며 대유량 보텍스튜브의 제작의 필요성을 갖게 되었다. 보텍스튜브의 에너지분리는 다양한 파라미터에 의해 영향을 받고 있는데, 특히 기하학적 형상의 경우 에너지분리에 가장 큰 영향을 주고 동시에 설계자의 입장에서 쉽게 접근할 수 있는 제어인자이기도 하다. 또한 에너지 분리현상에 대한 정확한 원리가 잘 알려져 있지 않기 때문에 이론적으로 보텍스튜브의 효율을 향상시키는 것은 어려운 실정이며, 먼저 보텍스튜브의 기하학적 형상에 대한 체계적이고 다양한 실험을 통하여 저압용 보텍스튜브의 에너지 분리특성에 관한 연구를 하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2-1. 실험장치

Fig. 1은 저압용 보텍스튜브의 에너지 분리실험을 하는데 사용된 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 압축공기를 시험부에 공급하는 공기공급부, 압축공기가 에너지 분리를 일으키는 시험부 및 공기의 유량과 배출되는 고온 및 저온 공기의 온도 등을 측정하는 데이터 처리부

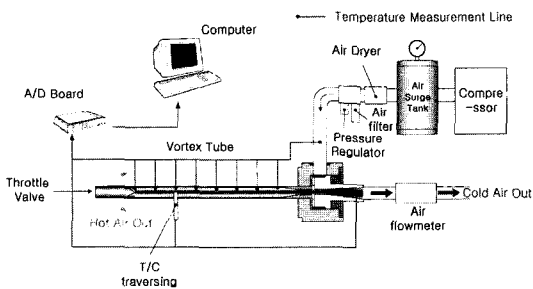


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus for the vortex tube.

Table 1. Dimension of the vortex tube.

Tube length (L)	400 mm					
Inner diameter of vortex tube (D)	20 mm					
Inner diameter of nozzle (dn)	3.0 mm					
Number of nozzle holes (Nh)	6					
Nozzle area ratio (Sn)	0.130	0.142	0.153	0.164	0.176	

로 이루어져있다.

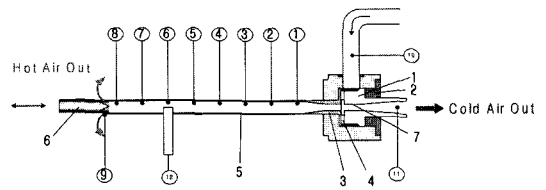
2-1-1. 압축공기공급부

에너지분리에 필요한 압축공기를 발생시키는 공기압축기(air compressor)와 공기저장탱크(air surge tank), 안전밸브(safety valve), 필터(filter), 공기건조기(air dryer), 일정압을 공급하기 위한 압력조정기(pressure regulator)로 구성되었다.

2-1-2. 시험부

시험부는 Fig. 1에 그 개략도를 나타냈으며, 공급된 압축공기를 통과시켜 보텍스를 형성하도록 만든 보텍스 발생기와 그 압축공기가 빠져나가며 분사하는 노즐, 보텍스를 일으켜 에너지분리가 일어나는 보텍스튜브를 단열 효과를 높이도록 각각 아크릴로 제작하였다. 이 외에도 저온공기 배출유량과 에너지분리에 영향을 미치는 저온출구 오리피스, 그리고 저온공기 배출량을 제어하는 스톱밸브 등으로 구성되어 있다.

실험에 사용된 보텍스튜브의 상세한 치수는 Table 1에 제시하였으며, 보텍스튜브의 구조와 열전대 부착 위치는 Fig. 2와 같다. 보텍스튜브는 직경 20 mm의 비교적 대형이며, 길이는 지름의 20배로 하였다. 이는 ‘튜브의 길이가 보텍스튜브 지름의 약 20배 정도이면 충분한



- 1. Vortex Generator
- 2. Holder
- 3. Sleeve
- 4. Nozzle
- 5. Tube
- 6. Throttle Valve
- 7. Orifice
- 1 ~ 12 Thermocouples

(D : 20 mm, L=20D)

Number	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
Length (x)	4D	6D	8D	10D	12D	14D	16D	18D
Dimensionless length (x/L)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9

Fig. 2. Cross section of the vortex tube and location of the thermocouples.

성능을 발휘한다.”고 한 Takahama^[4]의 실험결과를 기초로 하였다.

2-1-3. 계측부

온도 측정장치용 센서는 튜브의 안쪽 벽면온도를 측정하기 위해 등간격으로 부착된 8개의 K형 열전대, 입구와 냉기부, 온기부, 외통의 온도를 측정하기 위한 열전대, 그리고 튜브 내 온도분포를 측정하기 위해 이동용으로 장착된 열전대 등으로 구성되어 있다. 공급되는 압축공기의 입구유량과 저온출구 오리피스를 통해 배출되는 저온유량을 측정하기 위하여 유량계(rotameter)를 설치하였다. 데이터처리는 A/D 변환장치를 통해 PC에서 처리하였다.

2-2. 실험방법

먼저 보텍스튜브에 장착한 열전대와 유량계는 예비실험을 통하여 보정하였다. 또한, 실험 시 보텍스튜브에 압축공기를 보낸 뒤 저온출구와 고온출구의 공기 온도변화가 정상상태($\pm 0.2^\circ\text{C}$)에 도달한 뒤에 측정하는 것을 기준으로 하였고, 그 시간에 도달하는 것은 대략 3분이 소요되었다. 실험은 입구 공기압력 P_0 를 0.4~1.6 kgf/cm²까지 5단계로 나누어 저압의 범위에서 측정하였고, 각 입구 공기압력에 따라 저온공기유량비 y_c 를 0.1~1.0까지 변화시키며 수행하였다. 이 때, 저온공기유량을 조절하도록 고온출구 쪽에 스톱밸브를 두어 유량을 변화시켜가며 다음과 같이 실험을 하여 에너지분리 특성을 알아 보았다.

보텍스튜브의 노즐면적비 S_n 에 따른 에너지 분리과정을 알아보기 위하여 Table 1과 같이 보텍스 발생기 노즐의 입구 지름을 $d_n=3$ 으로 하고, 노즐 출수는 실험을 통하여 가장 효율이 좋은 것으로 나타난 6개로 하였다. 노즐면적비를 변화시키기 위해 보텍스 발생기의 가공 깊이를 달리하여 노즐면적비 S_n 을 0.130~0.176까지 5개를 제작하였고, 각각의 보텍스 발생기에서 온도 측정실험을 하였다. 또한, 가공성이 양호하고 열전달율이 적은 아크릴로 노즐을 제작하였으며, 이 범위 밖의 노즐도 6개를 더 가공하여 실험하였으나 에너지 분리효율이 급격히 떨어지는 영역에 속하여 배제하였다.

온도 측정은 보텍스튜브로 유입되는 압축공기의 입구 온도, 저온출구의 공기온도, 고온출구의 공기온도를 측정하였다. 또한, 보텍스튜브의 무차원 길이에 따라 에너지분리과정을 알아보기 위하여 보텍스튜브의 안쪽 벽면 온도를 Fig. 2와 같이 보텍스튜브 지름(D)의 4~18배까지 등간격으로 부착하여 측정하였다. 또한, 튜브 내 온도분포를 알아보기 위하여 위에 설명한 무차원 길이에 따른 여덟 개 지점에서 보텍스튜브 반지름 r_i 방향에 대한 무차원 반경 r/r_i 온도를 측정하기 위하여 열전대를 이

동하며 측정하였다. 보텍스튜브는 에너지분리 효과를 정확히 측정하기 위하여 단열효과가 좋고 튜브 내 표면조도가 좋은 아크릴 튜브를 사용하였고 단열재로 단열시킨 뒤 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 노즐면적비에 따른 저압용 보텍스튜브의 에너지 분리 특성

보텍스튜브에 공급되는 공기유량은 공기가 유입되는 노즐의 노즐면적비 S_n 이 증가함에 따라 증가하였으나 그 증가율은 비선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 이는 노즐면적이 증가할수록 보텍스튜브에 공급되는 공기의 유량은 증가하나 보텍스튜브 내부 유동장에서의 전단력과 튜브벽면과의 마찰력 증가로 인하여 유량이 선형적으로 증가하지 않는 것으로 생각된다.

Fig. 3은 노즐면적비 S_n 이 다른 각각 0.130~0.176까지 5개의 보텍스 발생기에 대하여 전 실험구간인 입구압력 $P_0=0.4\sim 1.6$ kgf/cm² 중 입구압력 $P_0=1.0$ kgf/cm²일 때 보텍스튜브로 유입되는 입구공기와 고온공기온도차 ΔT_h , 입구공기와 저온공기온도차 ΔT_c , 입구공기와 최대무차원벽면온도차 $\Delta T_{w,max}$ 를 저온공기유량비 $y_c=0.1\sim 1.0$ 에 대하여 나타내었다. 실험한 결과 노즐면적비에 관계없이 전 실

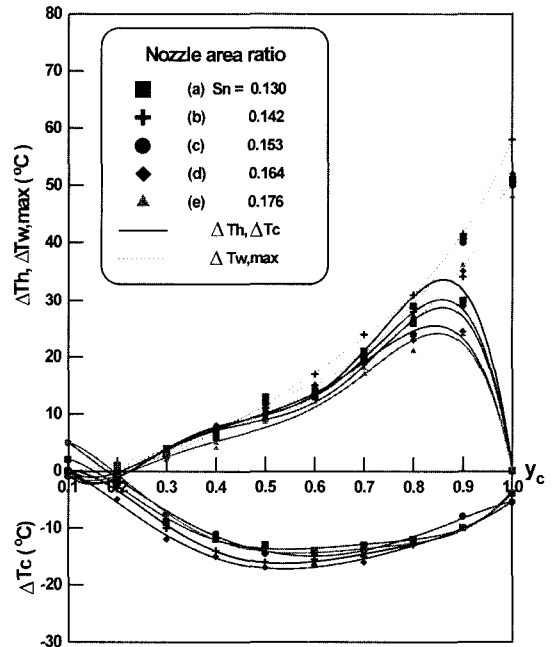


Fig. 3. Temperature differences ΔT_h , ΔT_c and $\Delta T_{w,max}$ according to S_n , $P_0=1.0$ kgf/cm², $T_0=26^\circ\text{C}$.

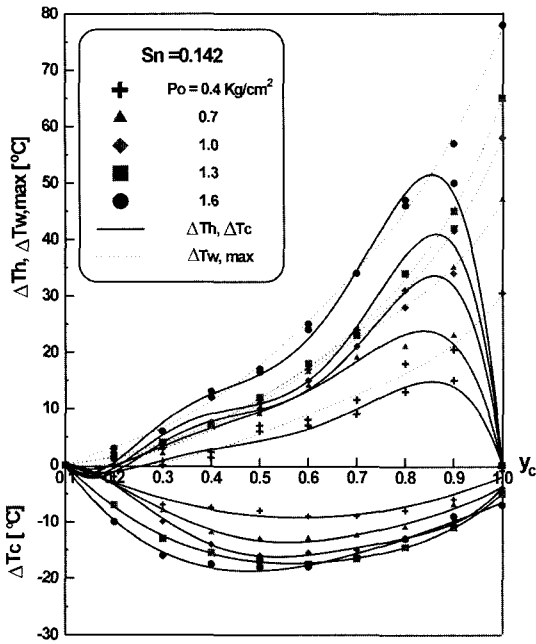


Fig. 4. Temperature differences ΔT_h , ΔT_c and $\Delta T_{w,max}$ according to P_o ($P_o=0.4, 0.7, 1.0, 1.3, 1.6 \text{ kgf/cm}^2$), $T_e=26^\circ\text{C}$ for $S_n=0.142$.

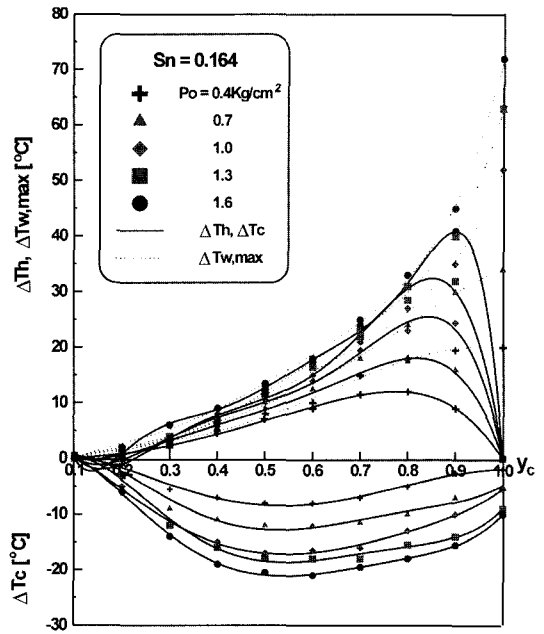


Fig. 5. Temperature differences ΔT_h , ΔT_c and $\Delta T_{w,max}$ according to P_o ($P_o=0.4, 0.7, 1.0, 1.3, 1.6 \text{ kgf/cm}^2$), $T_e=26^\circ\text{C}$ for $S_n=0.164$.

험영역에서 y_c 가 증가함에 따라 ΔT_h 는 증가하다가 다시 감소하고 있으며, 이때 최대고온공기온도차 $\Delta T_{h,max}$ 는 $y_c=0.9$ 에서 나타났고, $y_c=1$ 에 가까워지면서 고온출구의 스톱밸브가 거의 닫혀져 유동저항이 증가하면서 에너지 분리가 감소되어 온도가 떨어졌다. 이를 통하여 저압용이며 비교적 대형인 보텍스튜브를 사용한 본 실험에서는 기존의 고압형·소형 보텍스튜브 실험에서 제시한 노즐면적비 $S_n=0.138$ 보다 약간 큰 $S_n=0.142$ 에서 $\Delta T_{h,max}$ 를 나타냄을 알 수 있었다.

Fig. 4는 $S_n=0.142$ 일 때 입구공기의 압력변화에 따른 ΔT_h , ΔT_c , $\Delta T_{w,max}$ 을 나타내었다. 이때 $T_{w,max}$ 는 $y_c=1.0$ 까지, 즉 스톱밸브를 완전히 닫을 때까지 벽면온도가 계속 올라가며, $\Delta T_{h,max}$ 보다 전 압력범위에서 높았고 y_c 의 변화에 대하여는 가장 고온공기를 얻을 수 있는 $y_c=0.9$ 에서 대략 7°C 정도 더 높았다. 이 때, 전 실험영역에서 ΔT_c 는 y_c 가 증가함에 따라 증가하다가 $y_c=0.5\sim 0.6$ 에서 최저저온공기온도차 $\Delta T_{c,max}$ 를 나타내고 감소하는 것으로 나타났다. 이때, $\Delta T_{c,max}$ 는 기존의 실험에서 제시한 노즐면적비 $S_n=0.153$ 보다 큰 면적비인 $S_n=0.164$ 에서 나타냄을 발견할 수 있었다. Fig. 5는 $S_n=0.164$ 일 때 입구공기의 압력에 따른 ΔT_h , ΔT_c , $T_{w,max}$ 을 나타내었다.

이러한 실험결과를 통하여 y_c 가 증가함에 따라 고온출구 쪽 스톱밸브가 조금씩 닫히면 고온출구의 유동

단면적이 적어지면서 저온출구로 역류되는 중심부 유동이 원활해지고 중심부 유동과 벽면부근의 유동사이의 운동량전달이 증가함으로 에너지분리가 활발해져 ΔT_h 와 ΔT_c 가 증가하게 되는 것으로 사료된다. 그러나, y_c 가 더 증가하면 고온출구의 유동 단면적이 더욱 좁아져 고온공기층의 일부가 저온출구를 통하여 역류하게 되고 중심부의 저온공기층과 혼합되어 배출되면서 ΔT_c 는 다시 감소하고, ΔT_h 는 더욱 증가하게 되는 것이다. 이후로 $y_c=1$ 에 가까워지면 고온출구 쪽 스톱밸브가 거의 닫혀지면서 유동저항이 증가하게 되고 보텍스 유동이 원활하게 형성되지 못하면서 에너지 분리효과도 감소하게 되어 ΔT_c 가 급격히 감소하게 된다. 본 실험의 이러한 경향은 Stephan^[5]의 실험결과와 동일한 저온출구 유량비와 전 압력구간에서 같은 경향을 보이고 있다.

또한, 보텍스튜브로 유입되는 입구압력(P_o)이 증가할수록 ΔT_h , ΔT_c 와 $T_{w,max}$ 이 모두 증가하는 경향을 보인다. 이는 입구압력의 증가로 인하여 동일한 노즐을 통하여 유입되는 유량이 증가하면서, 유동의 에너지 손실이 감소하고 노즐 출구에서의 유속의 증가로 보텍스튜브 내에서 각속도 차도 커짐에 따라 에너지분리도 더욱 커지게 된다. 노즐면적비가 증가함에 따라 ΔT_h , ΔT_c 와 $T_{w,max}$ 이 모두 증가하는 경향을 보이는데, 이는 노즐면적비가 커지면서 보텍스 유동속도를 변화시켜 유동이 벽면과 마

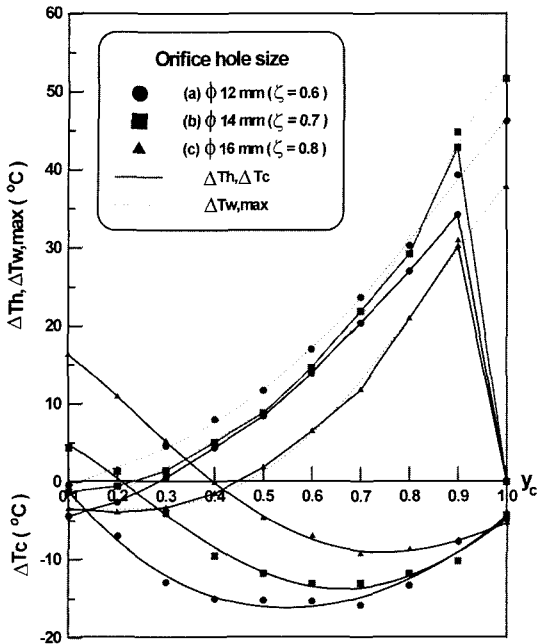


Fig. 6. Temperature differences ΔT_h , ΔT_c and $\Delta T_{w,max}$ according to the orifice hole size ($T_0=26^\circ\text{C}$, $P_0=1.0\text{ kgf/cm}^2$).

참되어 벽면부근의 유동을 더욱 가열시키며 에너지분리에 영향을 주고 ΔT_h 에 영향을 주게 된다. 하지만 노즐홀이 너무 커지면 유동속도가 다시 감소하고 에너지 분리성능도 그에 따라 감소되는 것으로 사료된다. 이러한 실험 결과를 통하여 저압용이며 비교적 대형인 보텍스 튜브에서는 $\Delta T_{h,max}$ 과 $\Delta T_{c,max}$ 를 나타내는 노즐면적비가 기존의 고압형·소형 보텍스 튜브와는 다른 경향을 보임을 알 수 있었다.

3-1-2. 저온출구 오리피스 직경에 따른 저압용 보텍스 튜브의 에너지분리 특성

Fig. 6은 노즐면적비 $S_n=0.142$ 이고, 입구공기 압력은 $P_0=1.0\text{ kgf/cm}^2$ 일 때, 보텍스 튜브의 지름 D에 대한 저온출구 오리피스지름비 ζ 가 0.6에서 0.8까지 변할 때, y_c 에 따른 ΔT_h , $\Delta T_{h,max}$, ΔT_c 의 실험결과를 나타냈다. 먼저 전체적인 경향은 모두 $y_c=0.9$ 에서 $\Delta T_{h,max}$ 가 나타났으나, ΔT_c 는 y_c 에 따라 최저점이 기준과 달리 나타났다. 이 이외에도 ζ 가 0.5에서 0.8까지 2개를 더 제작하여 실험하였으나 에너지 분리효율이 급격히 떨어져 배제하였다.

실험결과를 고찰하여 보면 그 동안 에너지 분리효율이 가장 큰 것으로 알려진 $\zeta=0.6$ 에서 $y_c=0.5\sim 0.6$ 일 때 ΔT_c 를 나타내어 기존의 소형 보텍스 튜브와 같은 결과를 보였으나, ΔT_h 는 오히려 $y_c=0.9$ 일 때 $\zeta=0.7$ 에서 약 10% 정도 상승되었다. 여기서 오리피스 직경이 커짐에 따라

$y_c=0.1\sim 0.4$ 까지 ΔT_c 가 오히려 입구공기온도보다 증가하는 것은 입구공기가 들어와 보텍스실에서 생성된 보텍스 유동의 일부가 오리피스 직경이 커져서 그대로 방출되게 되어 T_c 가 고온이 되는 것으로 사료된다. 반면에 같은 $y_c=0.1\sim 0.4$ 구간에서 T_h 가 입구온도보다 낮은 이유는 보텍스 튜브로 나가며 에너지분리된 고온과 저온공기가 그대로 고온출구로 나가기 때문이다. 이러한 현상은 스토클밸브의 개도량에 따라 보텍스 튜브 안의 압력이 변하게 되는데, 이 때 튜브 벽면과 중심부의 역압력 구배를 형성하게 되고, 저압인 중심부의 저온공기는 역 유동하게 된다. 이 때 y_c 가 커지며 고온출구의 유출 단면적이 적어지면 비교적 고온인 공기까지 저온출구 쪽으로 역 유동하게 되는데 저온출구 오리피스 지름 d_c 가 $\zeta=0.7$ 까지 커지면서 ΔT_c 는 적어지고, ΔT_h 는 최대로 높아지게 되는 것이다.

4. 결 론

압축공기를 작동유체로 사용하는 대항류형 저압용 보텍스 튜브의 기하학적 형상의 변화에 따른 에너지 분리 과정에 대하여 입구압력 $P_0=1.0\text{ kgf/cm}^2$ 로 하고 저온공기 유량비를 $y_c=0.1\sim 1.0$ 로 변화시키면서 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 노즐면적비 변화 시 최대고온공기온도차($\Delta T_{h,max}$)는 노즐면적비 $S_n=0.142$ 일 때, 최저저온공기온도차($\Delta T_{c,max}$)는 $S_n=0.164$ 에서 나타내어 고압형·소형 보텍스 튜브의 최적 영역에서 변화됨을 보였고, 에너지 분리효율도 같은 실험조건 시 상승하였다.
- 2) 고압형·소형 보텍스 튜브에서 에너지 분리효율이 가장 큰 것으로 알려진 오리피스지름비 $\zeta=0.6$ 에서 저온공기유량비 $y_c=0.5\sim 0.6$ 일 때 최저저온공기온도차를 나타내었으나, 최대고온공기온도차는 오히려 $\zeta=0.7$ 의 영역으로 변화되었고, 에너지 분리효율도 약 10% 상승하였다.

사용기호

- D : inner diameter of vortex tube, mm
- H_n : number of nozzle holes
- T_w : inner wall temperature of vortex tube, $^\circ\text{C}$
- L : tube length, mm
- r_o : inner radius of vortex tube, mm
- x/L : dimensionless length of tube
- d_n : inner diameter of nozzles, mm
- r/r_o : dimensionless radius of tube
- d_c : diameter of cold end orifice, mm
- p_0 : pressure of the inlet air, kPa

S_n : nozzle area ratio (nozzle area/tube area)
 Q : mean air flow rate, τ/min
 y_c : cold air mass flow ratio(cold air mass flow/
 inlet air mass flow)
 ΔT_h : temperature difference between inlet air and
 hot air, $^{\circ}\text{C}$
 ΔT_c : temperature difference between inlet air and
 cold air, $^{\circ}\text{C}$

Subscripts

h : hot
 o : inlet
 c : cold
 max. : maximum
 n : nozzle or number
 w : inner wall of vortex tube

참고문헌

1. Rangué, G.J.: "United State Patent", Serial No. 646.020, Applied December 6. (1932).
2. Hilsch, R.: "The Use of Expansion of Gases in a Centrifugal Field as a Cooling Process", Review of Scientific Instruments, 8(2), 108 (1947).
3. Linderstrom-Lang, C.U.: "Gas Separation in the Ranque-Hilsch Vortex Tube", Int. J. Heat Mass Transfer, 1195 (1964).
4. Takahama, H.: "Studies on Vortex Tubes (2nd Report, Reynolds Number The Effect Of the cold Air rate and the Partial Admission of Nozzle on the energy Separation", Bulletin of Jsme, 9(33), 121 (1996).
5. Stephan, K. *et. al.*: "K. A Similarity Relation for Energy Separation in a Vortex Tube", Int. J. Heat Mass Transfer, 27(6), 911 (1984).