

기관적용 저압용 vortex tube의 에너지 분리특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Energy Separation in a Low Pressure Vortex Tube for Engine

오 동 진*, 임 석 연*, 윤 면 근**, 류 정 인***
Dongjin Oh, Sugyeon Lim, Myeonkeun Yoon, Jeongin Ryu

ABSTRACT

The process of energy separation in a low pressure vortex tube with 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 the vortex tube and the temperature distribution in the vortex tube provides useful information about the location of the stagnation point of the flow field at the axis of the vortex tube.

In this study Outer tube is used for the application of Diesel engine exhaust. The hot gas flow is turned 180° and passes the outside of the vortex tube a second time heating it. From this geometric setup of a vortex tube the effects of energy separation and the prediction of the ignition of Diesel Soot is presented by experimental data.

주요기술용어 : Vortex tube(보텍스튜브), Energy separation(에너지분리), Diesel engine exhaust(디젤기관 배기), Nozzle area ratio(노즐면적비), Outer tube(외통)

Nomenclature

D : inner diameter of vortex tube, mm
L : tube length, mm
 r_o : inner radius of vortex tube, mm
 d_n : inner diameter of nozzles, mm
 d_c : diameter of cold end orifice, mm
 p_o : pressure of the inlet air, kPa
Q : mean air flow rate, ℓ /min

S_n : nozzle area ratio(nozzle area/tube area)
 H_n : the number of nozzle holes
 T_w : inner wall temperature of vortex tube, °C
x/L : dimensionless length of tube
 r/r_o : dimensionless radius of tube
 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, °C
 ΔT_c : temperature difference between inlet air and cold air, °C

* 회원, 충남대학교 대학원
** 회원, 한국기계연구원
*** 회원, 충남대학교 기계공학부

Subscripts

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

1. 서론

vortex tube에 대한 연구는 1928년 Ranque에 의하여 처음 발견된 후 Hilsch에 의하여 학계에 널리 알려지게 되었으며, 그 후 에너지 분리가 일어나는 원인과 그 응용에 관하여 많은 사람들에 의하여 연구가 수행되었다. 이러한 vortex tube의 분리현상을 이용하면 압축공기를 사용하는 장소에서 간단하게 저온유체 및 고온유체를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 혼합유체로부터의 특정성분 분리에도 사용이 가능하다.

Hrtnett¹⁾ 등은 vortex tube 내의 속도, 압력 및 온도분포를 측정하여 튜브의 벽면 쪽은 고온이고, 중심영역은 저온임을 밝혔으며, 튜브의 길이가 분리능에 영향을 미친다고 보고하였다.

Stephan²⁾은 튜브벽면온도를 측정하여 최대벽면온도의 위치가 저온공기유량비에 따라 변한다는 것을 보였고, 관벽의 온도는 저온공기유량비가 증가할수록 상승함을 보였다. 또한 차원해석을 통하여 저온공기유량비만의 저온공기의 온도를 예측할 수 있는 상사식을 제시하였다.

Takahama³⁾는 vortex 생성실에서 유동하는 공기의 온도, 속도 분포간의 관계와 관 노즐, 냉출구 orifice 등의 치수에 대한 연구를 수행하여 높은 에너지 분리효율을 갖는 vortex tube의 표준형태를 설계하는 자료를 얻었다.

vortex tube의 물질분리 효과에 관한 연구는 미비하지만 Linderstrom-Lang⁴⁾의 연구를 통하여 vortex tube 내에서 에너지분리 뿐만 아니라 vortex tube내부의 원심력을 이용하여 물질분리에 사용 가능하며, 이러한 분리효과는 저온공기유량비와

vortex tube의 지름비에 의존함을 보였다.

특히 Sibbersten⁵⁾은 미세분진 분리를 수행하기 위해 vortex tube를 이용하여 디젤엔진의 탄소 입자를 분리하였다. 이 때 엔진에서 발생하는 탄소 입자의 80%가 Throttle valve를 통과하여 배출됨을 발견함으로써 vortex tube를 이용하여 미세입자의 분리가 가능함을 입증하였다.

이상과 같이 vortex tube에 대한 이론 및 실험적 연구가 수행되었으나 아직 미비하고, 그나마 대부분 에너지 분리특성에 관한 것들이어서 본 연구에서는 위 연구에서 제시된 미세입자의 분리 가능성을 바탕으로 디젤기관에 적용할 저압용 vortex tube를 설계하고 배기가스 중 Soot입자를 분리하며, 나아가 배기온도를 높임으로서 Soot의 연소를 예측하기 위하여 그 에너지분리특성을 연구함으로써 그 가능성을 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 저압용 vortex tube의 에너지분리 실험을 하는데 사용된 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 압축공기를 시험부에 공급하는 공기공급부, 압축공기가 에너지 분리를 일으키는 시험부 및 공기의 유량과 배출되는 고온 및 저온 공기의 온도등을 측정하는 데이터 처리부로 이루어져 있다.

2.1.1 압축공기 공급부

에너지분리에 필요한 압축공기를 발생시키

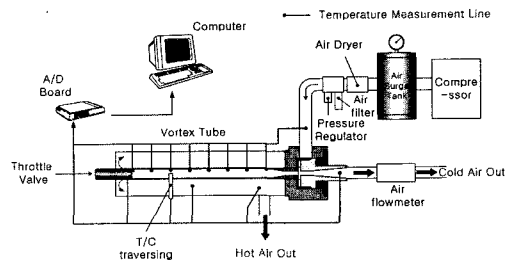


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

는 에어컴프레서(air compressor)와 에어서지탱크(air surge tank), 안전밸브(safety valve), 필터(filter), 공기건조기(air dryer), 일정압을 공급하기 위한 압력조정기(Pressure regulator)로 구성되었다.

2.1.2 시험부

시험부는 공급된 압축공기를 분사하는 노즐(nozzle)과 vortex를 일으켜 에너지분리가 일어나고 단열효과를 높이기 위해 아크릴로 제작한 vortex tube, 저온공기 배출량을 제어하는 throttle valve, 저온공기 배출유량에 영향을 미치는 orifice, 물질분리와 에너지 분리된 고온공기의 통로인 외통(outer tube)으로 구성되어 있다.

실험에 사용된 vortex tube의 상세한 치수는 Table 1에 주어져 있으며, vortex tube의 상세한 구조와 열전대 부착 위치는 Fig. 2와 같다.

vortex tube는 직경 20mm의 비교적 대형이며, 길이는 지름의 20배로 하였다. 이는 “튜브의 길이가 vortex tube 지름의 약 20배 정도이면 충분한 성능을 발휘한다.”고 한 Takahama³⁾의 실험 결과를 기초로 하였고, 저온출구 orifice는 기존의 실험결과로부터 최대성능을 나타낸 직경 12mm ($d_c=0.6D$)를 선택하였으며, 노즐은 입구 지름 $d_n=3$ 이고, vortex tube와의 면적비 $S_n=0.130\sim 0.176$ 까지 5개를 제작하였다.

이 범위 밖의 노즐은 같은 노즐면적비 비율로 총 4개를 더 제작하여 시험한 결과 에너지 분리 효율이 급격히 떨어져 배제하고 본 시험에서는 비교적 효율이 좋은 5개를 제작하여 사용하였다. 또한 저온공기 유량을 조절하도록 고온출구에 throttle valve를 두어 유량을 변화시켜가며 실험을 하여 에너지분리 특성을 조사하였다.

Table 1 Dimension of vortex tube(unit : mm)

Tube length (L)	400				
Inner diameter of tube(D)	20				
Nozzle diameter (d_n)	3.0				
Cold end orifice (dc)	12				
Nozzle holes (H_n)	6				
Nozzle area ratio (S_n)	0.130	0.142	0.153	0.164	0.176

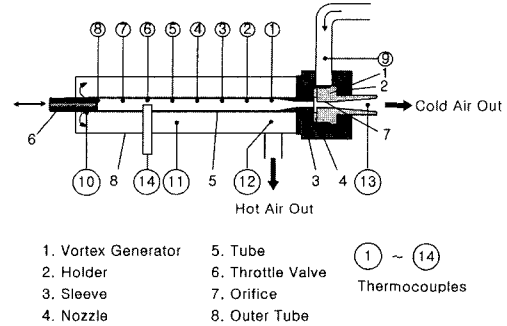


Fig. 2 Cross section of vortex tube and the location of thermocouples

2.1.3 계측부

온도 측정장치용 센서는 튜브의 안쪽 벽면 온도를 측정하기 위해 등간격으로 부착된 8개의 K형 열전대, 입구와 냉기부, 온기부, 외통의 온도를 측정하기 위한 열전대, 그리고 튜브 내 온도분포를 측정하기 위해 이동용으로 장착된 열전대(⑭) 등으로 구성되어 있다.

또한, 공급되는 압축공기의 입구유량과 orifice를 통해 배출되는 저온유량을 측정하기 위한 유량계(rotameter)를 설치하였다. 그리고 데이터 처리는 열전대와 A/D변환장치를 통해 PC에서 처리하였다.

2.2 실험방법

vortex tube에 장착한 열전대와, 유량계는 예비실험을 통하여 보정하였다. 먼저 실험 시 vortex tube에 압축공기를 보낸 뒤 저온과 고온부의 온도변화가 정상상태($\pm 0.2^\circ\text{C}$)에 도달한 뒤에 측정하였고 특히 외통(outer tube)을 설치하고 측정할 때는 충분히 열전달이 이루어질 때까지 시간을 두고 측정하였다.

실험은 입구 공기압력(P_0)을 $0.4\sim 1.6\text{kg/cm}^2$ 까지 5단계로 나누어 기관적용의 목적으로 저압의 범위에서 측정하였고, 저온공기유량비(y_c)를 $0.1\sim 1.0$ 까지 변화시키며 수행하였다.

먼저 vortex tube의 노즐면적비(S_n)에 따른 에너지 분리를 조사하기 위하여 Table 1과 같이 5개

의 노즐 직경이 다른 vortex generator를 제작하여 에너지분리 과정을 온도 측정실험을 통하여 수행하였다.

또한, 에너지분리 효과를 정확히 측정하기 위하여 단열효과가 좋고 튜브 내 표면조도가 좋은 아크릴튜브를 사용하여 단열재로 단열시킨 뒤 측정하였다. 이 실험과 같은 방법으로 튜브재질을 steel로 바꾸고 실험을 하여 튜브재질과 튜브 내벽의 표면조도가 에너지분리에 미치는 영향을 알아보았다. 또한 디젤기관적용을 위한 외통(outer tube)을 설치한 뒤 기초실험 결과에서 얻어진 결과를 바탕으로 고온형 vortex generator를 채택하여 열전달 효과를 높이기 위한 steel tube에 설치한 뒤 에너지분리 과정을 조사하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 노즐면적비가 에너지분리에 미치는 영향

vortex tube에 공급되는 공기유량은 공기가 유입되는 노즐의 노즐면적비(S_n)가 증가함에 따라 증가하고 있으나 그 증가율은 비 선형적으로 증가하고 있다. 이는 노즐면적이 증가할수록 vortex tube에 공급되는 공기의 유량은 증가하나 vortex tube 내부 유동장에서의 전단력과 튜브벽면과의 마찰력 증가로 인하여 유량이 선형적으로 증가하지 않는 것으로 생각된다.

Fig. 3은 노즐 홀 수가 6개이고, 노즐면적비 $S_n=0.130 \sim 0.176$ 이며, 입구압력 $P_0=0.4 \sim 1.6 \text{ kg/cm}^2$ 일 때 입구공기와 고온공기온도차(ΔT_h), 입구공기와 저온공기온도차(ΔT_c)를 저온공기유량비(y_c)에 대하여 나타내었다.

전 실험영역에서 저온공기유량비(y_c)가 증가함에 따라 ΔT_h 는 증가하다가 다시 감소하고 있으며, 이때 최대고온공기온도차($\Delta T_{h,max}$)는 $y_c=0.9$ 에서 나타난다. 이는 y_c 가 증가함에 따라 Fig. 4의 온도분포에서 볼 수 있듯이 비교적 낮은 고온 공기층의 일부가 저온출구를 통하여 배출되기 때문에 ΔT_h 는 계속 증가하다가 $y_c=1$ 에 가까

워지면 고온출구의 Throttle valve가 거의 닫혀져 유동저항이 증가하므로 에너지분리가 감소되어 온도가 떨어지기 때문이라 생각된다. 또한 저압형 대형 vortex tube를 사용한 본 실험에서는 기존의 실험에서 제시한 노즐면적비 $S_n=0.138$ 보다 약간 큰 $S_n=0.142$ 에서 최대고온공기온도차($\Delta T_{h,max}$)를 나타냄을 발견할 수 있었다.

전 실험영역에서 ΔT_c 는 저온공기유량비(y_c)가 증가함에 따라 증가하다가 $y_c=0.5 \sim 0.6$ 에서 최대저온공기온도차($\Delta T_{c,max}$)를 나타내고 감소하는데, 이는 고온출구의 유출 단면적이 적어져 고온 공기층의 일부가 저온출구를 통하여 역류되어 저온공기와 혼합되어 배출되기 때문이라 생각된다. 이때, $\Delta T_{c,max}$ 는 기존의 실험에서 제시

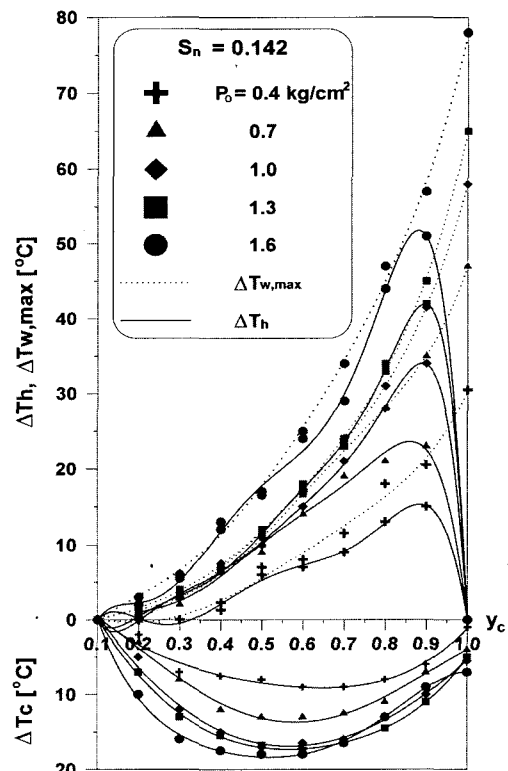


Fig. 3 Temp. differences, ΔT_h , ΔT_c and Inner wall max. Temp. ($T_{w,max}$) as functions of y_c with $P_0=0.4, 0.7, 1.0, 1.3, 1.6 \text{ kg/cm}^2$, $T_0=21^\circ\text{C}$ for $S_n=0.142$ (y_c : cold air mass ratio, P_0 : the pressure of the inlet air, T_0 : the temp. of the inlet air)

한 노즐면적비 $S_n=0.153$ 보다 큰 면적비인 $S_n=0.164$ 에서 나타냄을 발견할 수 있었다. 이는 유량이 증가함에 따라 유입되는 유동의 에너지 손실이 감소하여 운동량이 활발해져 에너지 분리효과가 증대되는 것으로 생각된다. 하지만 노즐 홀이 너무 커지면 유동속도가 감소되고 에너지 분리 성능은 다시 감소할 것으로 생각된다.

또한 입구압력(P_0)이 증가할수록 ΔT_h 와 ΔT_c 는 증가하는 경향을 보인다. 이는 입구압력의 증가로 인하여 동일한 노즐을 통한 유량이 증가하면서 노즐 출구에서의 유속의 증가로 vortex tube 내에서 각속도 차도 커짐에 따라 에너지분리도 더욱 커지게 되는 것으로 생각된다.

3.2 vortex tube 내 에너지분리가 무차원 벽면온도 및 tube 내 온도분포에 미치는 영향

vortex tube의 무차원 벽면온도는 전 실험영역에서 튜브의 길이(L)가 증가함에 따라 $L=16D$ 까지 증가하다가 다시 감소하는 것으로 나타났다. 이는 “튜브의 길이가 vortex tube 지름의 약 20배 정도이면 충분한 성능을 발휘한다.”고한 Takahama³⁾의 실험 결과 보다 약간 앞당겨짐을 알 수 있다.

y_c 가 증가함에 따라 $y_c=1.0$ 을 제외하고 전 구간에서 고온출구 쪽으로 갈수록 벽면온도가 상승하다가 감소하는데, 이는 노즐로부터 분출되면서 vortex를 형성하여 유동하면서 에너지분리가 계속적으로 일어나 벽면이 가열되어 온도가 상승되어 오나 Fig. 4에서 나타낸 정체점(stagnation point)에서 에너지분리가 종료되어 더 이상 온도 상승이 없는 것으로 생각된다.

$y_c=0.9$ 에서는 $T_{w,max}$ 이 무차원 벽면길이 2지점($L=6D$)까지 저온출구 쪽으로 이동하는 데, 이는 Stephan²⁾등의 소형 vortex tube 실험에서 제시된 $y_c=0.9$ 에서 무차원 벽면길이 $L=10D$ 까지 이동한 것보다 더 많이 저온출구 쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다.

이와 같이 $y_c=0.9$ 에서 정체점의 위치가 고온출구 쪽에서 다시 저온출구 쪽으로 이동하는데 이

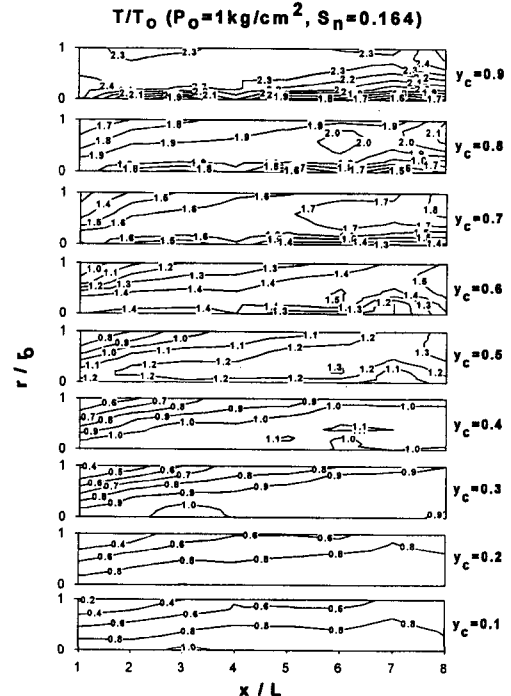


Fig. 4 Temp. distribution by the dimensionless tube radius(r/r_0) vs. the dimensionless tube length (x/L) as functions of y_c with $P_0=1.0\text{kg/cm}^2$, $T_0=21^\circ\text{C}$ for $S_n=0.164(T/T_0$: dimensionless temp., T: the temp. of the radial direction)

는 고온출구의 유출 단면적이 감소되어 벽면부근의 고온유동 만 고온출구 쪽으로 배출되기 때문인 것으로 생각된다.

3.3 기관적용 용 외통이 에너지분리에 미치는 영향

Fig. 5의 개략도에서 볼 수 있듯이 공기유동이 concave wall을 따라서 흐를 때, Görtler vortex가 나타남은 잘 알려져 있는데, 본 실험결과를 통하여 이것이 vortex tube에서의 에너지분리를 일으키는 주요한 구동력임을 알 수 있게 되었다. 먼저 튜브의 재질 및 튜브 내 표면조도에 따른 에너지 분리특성을 알아보기 위하여 실험하였다. Fig. 6의 (b)는 steel tube를 단열시키고, 입구공기 압력을 $P_0=1.0\text{kg/cm}^2$ 로 일정하게 주어 기초실험에서 얻어진 데이터를 분석하여 가장 고온공기를 얻

을 수 있는 vortex generator로 선정된 $S_n=0.142$ 로 실험을 하여 (a) acryl tube를 사용한 실험 데이터와 비교 분석하였다.

또한, (d)는 상용 steel pipe를 내면 가공하지 않고 그대로 사용하여 실험하였고, (b)의 내면 가공된 튜브의 실험 결과와 비교하였다. 이를 통하여 Fig. 6과 같이 기존의 다른 실험들에서 선행된 관의 재질에 따른 에너지분리에 미치는 영향은 그리 크지 않음을 확인하였다.

오히려 (b), (d)의 실험결과로부터 내면가공을 한 튜브의 최대고온공기온도차($\Delta T_{h,max}$)가 10°C 상승함으로 볼 때, 튜브 내면의 표면조도가 vortex 형성에 훨씬 더 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

다음은 (c)와 같이 vortex tube의 외부에 고온출구에서 나오는 공기를 통과시키기 위하여 외통(outer tube)을 사용하여 측정하였다, 이 때 Fig. 7의 (b)에 나타난 바와 같이 vortex tube의 벽면이 가열됨으로서 튜브 안쪽벽면의 Görtler vortex의 강도가 커져 에너지분리를 일으키는 구동력이 커졌음을 알 수 있었다.

따라서 예상과 같이 무차원 벽면온도는 증가하게 되었으나, 고온출구의 공기온도는 실험결과와 같이 약간 감소하는 것으로 나타났다.

이는 고온출구에서 나오는 공기가 외통으로 인한 배압 증가의 영향으로 고온공기의 일부가 저온출구 쪽으로 이동하는 원인으로 생각된다.

이에 따라 ΔT_c 도 상승하여 외통이 없는 것보다 같은 조건에서 약 3°C 올라갔다.

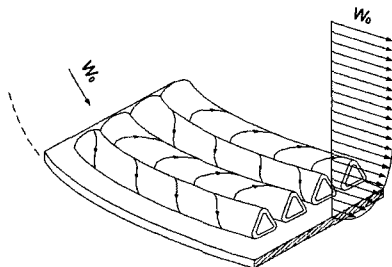


Fig. 5 Schematic diagram of the Görtler vortex on a concave wall

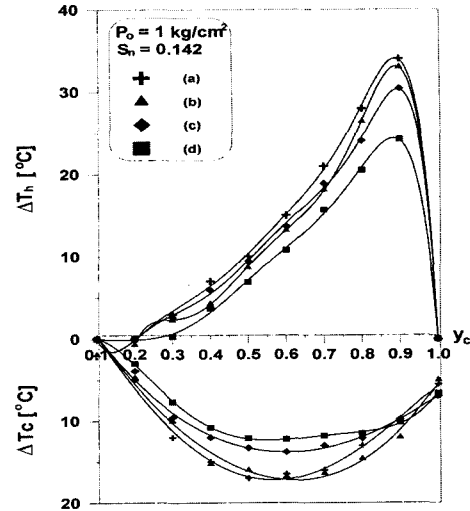


Fig. 6 Temp. differences, ΔT_h and ΔT_c as functions of y_c with $P_o=1.0\text{kg/cm}^2$, $T_o=21^\circ\text{C}$ for $S_n=0.142$

- (a) The acryl tube with insulation (Surface roughness : $R_a=0.01\mu\text{m}$)
- (b) The steel tube with insulation (Inner surface polished, $R_a=0.23\mu\text{m}$)
- (c) The steel tube with outer tube (Inner surface polished, $R_a=0.23\mu\text{m}$)
- (d) The steel tube with insulation (Commercial pipe, $R_a=1.74\mu\text{m}$)

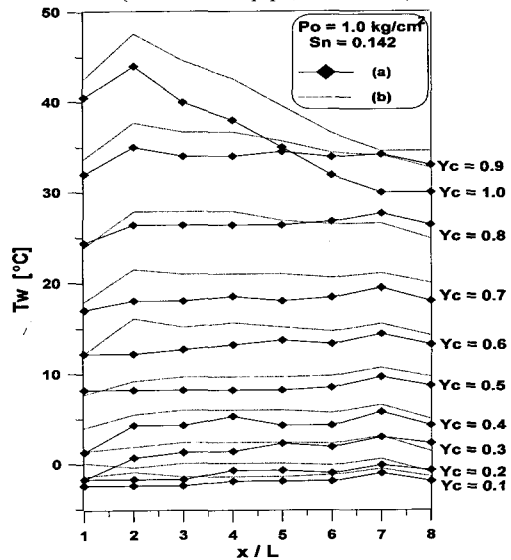


Fig. 7 Inner wall Temp. (T_w) along the dimensionless tube length (x/L) as functions of y_c with $P_o=1.0\text{kg/cm}^2$, $T_o=21^\circ\text{C}$ for $S_n=0.142$

- (a) The steel tube with insulation
- (b) The steel tube with outer tube

4. 결론

압축공기를 작동유체로 사용하는 counter flow 형이며 저압형인 vortex tube의 기하학적 형상의 변화에 따라 입구공기 압력($P_0=0.4\sim 1.6\text{kg/cm}^2$), 저온공기유량비($y_c=0.1\sim 1.0$)를 변화시키면서 에너지분리효과를 중점으로 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 노즐면적비(S_n) 변화 시 최대고온공기온도차는 $S_n=0.142$ 일 때, 최대저온공기온도차는 $S_n=0.164$ 에서 나타났으며, 이는 기존의 소형 vortex tube의 최적노즐비와는 다소 차이가 있다.

2) vortex tube의 최대 무차원 벽면온도는 저온공기유량비 $y_c=0.9$ 에서 튜브의 길이 $L=6D$ 지점까지 앞으로 이동하는 것으로 나타났는데, 이는 기존의 고압형에서 $L=12D$ 영역에서 최대 무차원 벽면온도를 나타낸 것과는 상당한 차이가 남을 알 수 있다. 또한, 튜브 내 반경방향의 온도 분포는 $y_c=0.9, L=16D$ 영역인 정체점에서 중심부와 벽면의 온도차가 약 13°C 정도로 최대온도차를 나타내었다.

3) vortex tube의 재질을 아크릴과 steel로 실험한 결과 재질에 따른 영향이 적다는 기존의 실험 결과를 확인했으며, 오히려 같은 steel 튜브에서 내면 가공을 함에 따라 최대고온공기온도차가 10°C 나 상승함으로 볼 때, 튜브 내면의 표면조도가 vortex 형성에 훨씬 더 큰 영향을 미침을 알 수

있었다. 또한, 외통을 사용한 vortex tube의 벽면온도는 튜브 밖의 고온공기의 열전달로 인하여 상승하나, 최대고온공기온도차는 고온출구로 나오는 유동이 외통으로 인한 배압의 영향으로 크게 상승하지 못함을 알 수 있었다.

참고 문헌

- 1) J. P. Hatnett, E. R. G. Eckert, "Experimental Study of the Velocity and Temperature Distribution in a High Velocity Vortex-type Flow," Trans. ASME, Vol.79, pp.751-758, 1957.
- 2) K. Stephan, S. Lin, M. Durst, D. Huang, H. Seher, "An Investigation of Energy Separation in a Vortex Tube," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.26, No.3, pp.341-348, 1983.
- 3) H. Takahama, "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.
- 4) C. U. Linderstrom-Lang, "Gas Separation in the Ranque-Hilsch Vortex Tube," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.7, pp.1195-1206, 1964.
- 5) W. Sibbersten, "Vorrichtung zum Entfernen Oxidierbarer bzw Verrennbarer Patikel aus Abgasen," German patent Office, Patent DE 3917888 Al Dec,12, 1990.