

저압용 vortex tube의 기하학적형상에 따른 에너지 분리특성에 관한 실험적 연구

오동진¹ · 류정인¹

¹충남대학교

An Experimental Study on the Energy Separation in the Geometric Setup of a Low Pressure Vortex Tube

Dongjin Oh¹ and Jungin Ryu¹

¹Chungnam National University

요 약

본 논문에서는 압축공기를 작동매체로 한 저압용 vortex tube에 대한 에너지분리 과정을 상세히 연구하였다. 먼저 vortex tube에서 에너지 분리되어 나오는 온공기와 냉공기의 온도변화에 대하여 실험하였고, vortex tube의 안쪽표면의 최대벽면온도 변화와 vortex tube 내의 온도분포를 통하여 vortex tube 내 유동장에서의 정체점의 위치에 대한 유용한 정보를 얻게되었다. 이를 바탕으로 vortex tube의 최적 길이와 throttle의 형상, sleeve에 따른 에너지분리과정 등을 실험을 통하여 알아보았다. 또한 본 연구에서는 디젤기관의 배기에 적용하기 위한 외통을 사용하였다. 이때 vortex tube에서 나오는 온공기가 180° 돌아 나오면서 vortex tube의 바깥쪽 벽면을 가열하게 된다. 이러한 기하학적 형상을 통하여 에너지분리효과가 증대됨으로 인하여 디젤기관의 배기가스에 적용 시 고온유동의 온도를 높이고자함에 본 연구의 목적을 두고자한다.

Abstracts — 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 the 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 length of the vortex tube, the optimum shape of the Throttle and the usefulness of the Sleeve. In this study Outer tube is used for the exhaust application. 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.

1. 서 론

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 얻

을 수 있을 뿐만 아니라 혼합유체로부터의 특정성분 분리에도 사용이 가능하다.

Hrtnett^[1] 등은 vortex tube 내의 속도, 압력 및 온도 분포를 측정하여 튜브의 벽면 쪽은 고온이고, 중심영역은 저온임을 밝혔으며, 튜브의 길이가 분리성능에 영향을 미친다고 보고하였다. Stephan^[2]은 튜브벽면온도를 측정하여 최대벽면온도의 위치가 저온공기 유량비에 따라 변한다는 것을 보였고, 관벽의 온도는 저온공기유량비가

증가할수록 상승함을 보였고, 차원해석을 통하여 저온공기 유량비만의 저온공기의 온도를 예측할 수 있는 상사식을 제시하였다. Takahama¹³⁾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-Lang¹⁴⁾의 연구를 통하여 vortex tube 내에서 에너지분리 뿐만 아니라 vortex tube 내부의 원심력을 이용하여 물질분리에 사용가능하며, 분리효과는 저온공기 유량비와 vortex tube의 지름비에 의존함을 보였다. Sibbersten¹⁵⁾은 미세 분진 분리를 수행하기 위해 vortex tube를 이용하여 디젤엔진의 탄소 입자를 분리하였다. 이 때 엔진에서 발생하는 탄소입자의 80%가 Throttle을 통과하여 배출됨을 발견함으로써 vortex tube를 이용하여 미세 입자의 분리가 가능함을 입증하였다.

이상과 같이 vortex tube에 대한 이론 및 실험적 연구가 수행되었으나, 대부분 고압형이며 소형인 vortex tube의 에너지 분리특성에 관한 것들이었고, 저압형이며 고온형 vortex tube의 에너지분리과정이나 물질분리에 대한 연구는 아직 미비한 상태이다.

본 연구에서는 위 연구에서 제시된 고압형이며 소형인 vortex tube의 에너지분리과정과 미세 입자 분리실험을 바탕으로 디젤기관의 배기에 적용하기 위한 저압형이며 대형인 vortex tube를 설계하고자 하며, 각종 기하학적 형상의 변화에 따라 에너지분리과정에 영향을 미치는 요소들을 찾아내고자 한다. 이를 바탕으로 향후 디젤기관의 배기가스 중 Soot입자를 분리하며, 고온출구로 나오는 배기 온도를 높임으로서 배기 중에서 Soot의 연소실험을 하기 위한 기초실험으로서 vortex tube의 에너지분리특성을 연구하고자 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 온도 등을 측정하는 데이터 처리부로 이루어져 있다.

2-1-1. 압축공기공급부

에너지분리에 필요한 압축공기를 발생시키는 에어컴프레서(air compressor)와 에어서지탱크(air surge tank), 안전밸브(safety valve), 필터(filter), 공기건조기(air dryer), 일정압을 공급하기 위한 압력조정기(Pressure regulator)로 구성되어 있다.

2-1-2. 시험부

시험부는 공급된 압축공기를 분사하며 vortex를 일으키는 nozzle과 vortex가 전진하며 에너지분리가 일어나는 vortex tube가 주요부로 구성되어 있다. 이 때, vortex tube는 기관에 적용 시 고온에 견디고 열전달이 좋게 하기 위하여 steel을 단열시켜 사용하였다. 이 외에도 저온공기 배출량을 제어하는 throttle valve, 저온공기 배출유량에 영향을 미치는 저온출구orifice, vortex 형성에 영향을 주는 sleeve, 물질분리와 에너지 분리된 고온공기의 통로인 외통(outer tube) 등으로 이루어져 있다.

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

2-1-3. 계측부

온도 측정장치용 센서는 튜브의 안쪽 벽면온도를 측정하기 위해 등 간격으로 부착된 8개의 K형 열전대, 입구와 냉기부, 온기부, 외통의 온도를 측정하기 위한 열

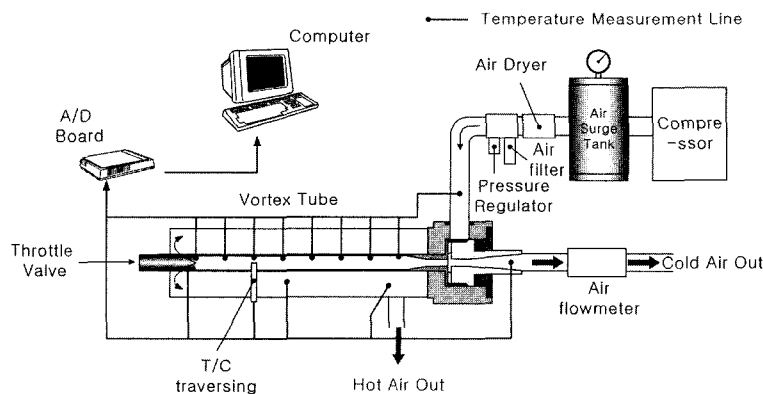


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

Table 1. Dimension of vortex tube (unit : mm).

Tube length (L)	400				
Tube inner diameter (D)	20				
Nozzle diameter (d_n)	3.0				
Cold end orifice (d_c)	12				
Number of Nozzle holes (H_n)	6 EA				
Nozzle area ratio (S_n)	0.142				
Test length of tube (L)	12D	14D	16D	18D	20D

전대, 그리고 튜브 내 온도분포를 측정하기 위해 이동 용으로 장착된 열전대 등으로 구성되어 있다. 공급되는 압축공기의 입구유량과 저온출구 orifice를 통해 배출되는 저온유량을 측정하기 위하여 유량계(rotameter)를 설치하였다. 데이터처리는 A/D 변환장치를 통해 PC에서 처리하였다.

2-2. 실험방법

vortex tube에 장착한 열전대와 유량계는 예비실험을 통하여 보정하였다. vortex tube에 압축공기를 보낸 뒤 저온과 고온부의 온도변화가 정상상태($\pm 0.2^\circ\text{C}$)에 도달한 뒤에 저온출구와 고온출구 및 vortex tube의 길이에 따른 무차원 온도를 측정하였고, 특히 외통(outer tube)을 설치하고 측정할 때는 충분히 열전달이 이루어질 때까지 시간을 두고 측정하였다. 입구의 공기압력(P_0)은 기 관측용의 목적으로 1.0 kg/cm^2 로 저압의 범위에서 측정하였고, 저온공기 유량비(y_c)를 0.1~1.0까지 변화시키며 연구를 수행하였다. 이 때, 고온출구에 throttle valve를 두어 저온공기유량을 조절하도록 하였다. nozzle은 기초실험을 통하여 vortex tube와의 면적비 $S_n=0.130\sim 0.176$ 까지 5개를 실험한 결과 가장 에너지분리가 잘 이루어져 고온형으로 적합한 $S_n=0.142$ 를 선택하여 실험하였다. vortex tube는 직경 20 mm의 대형이며, 처음 길이는 지름의 20배로 하였다. 이는 “vortex tube의 길이가 지름의 약 20배 정도이면 충분한 성능을 발휘한다.”고 한 Takahama^[3]의 실험 결과를 기초로 하였다. 이 실험결과로 나타난 벽면온도분포를 기초로 vortex tube 길이를 $L=12D, 14D, 16D, 18D, 20D$ 의 5개구간으로 나누어 실험하였다.

또한, 저온출구 orifice는 Riu^[6]의 실험결과로부터 최대성능을 나타낸 직경 12 mm($d_c=0.6D$)를 선택하여 에너지분리 효과를 실험하였다. 저온공기 유량을 조절하도록 고온출구에 설치된 throttle valve의 형상을 변화시켜 에너지분리 특성을 조사하였다. 이 때 vortex tube의 재질은 디젤기관적용을 위한 목적으로 steel tube를 사용하였고, 이후 열전달 효과를 높이기 위한 외통(outer tube)을 설치한 뒤 실험을 하여 에너지분리 과정을 조사하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. Vortex tube의 길이가 에너지분리에 미치는 영향

기초실험을 통하여 vortex tube의 길이에 따른 무차원 벽면온도는 nozzle의 다른 전 실험영역에서 vortex tube의 길이(L)가 증가함에 따라 $L=16D$ 영역까지 증가하다가 다시 감소하는 것으로 나타났다. “튜브의 길이가 vortex tube 지름의 약 20배 정도이면 충분한 성능을 발휘한다.”고 한 Takahama^[3]의 실험 결과 보다 최대 온도를 나타내는 영역이 상당히 앞당겨짐을 알 수 있다.

또한, y_c 가 증가함에 따라 고온출구 쪽으로 갈수록 벽면온도가 상승하다가 감소하는데, 이는 노즐로부터 분출되면서 vortex를 형성하여 유동하면서 에너지분리가 계속적으로 일어나 벽면이 가열되어 온도가 상승되어 오다가 정체점(stagnation point)에서 에너지분리가 종료되어 더 이상 온도 상승이 없는 것으로 생각된다.

$y_c=0.9$ 에서는 $T_{w,max}$ 이 무차원 벽면길이 $L=6D$ 영역까지 저온출구 쪽으로 이동하는 데, 이는 Stephan^[2] 등의 소형 vortex tube 실험에서 제시된 $y_c=0.9$ 에서 무차원 벽면길이 $L=10D$ 영역까지 이동한 것보다 더 많이 저온출구 쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다. $y_c=0.9$ 에서 정체점의 위치가 고온출구 쪽에서 다시 저온출구 쪽으로 이동하는데 고온출구의 유출 단면적이 감소되어 벽면부근의 고온 유동만 고온출구 쪽으로 배출되기 때문인 것으로 생각된다.

이를 바탕으로 본 시험에서는 vortex tube의 길이를 $L=12D, 14D, 16D, 18D, 20D$ 로 5개를 제작하여 실험하였다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 $y_c=0.9$ 에서 모두 고

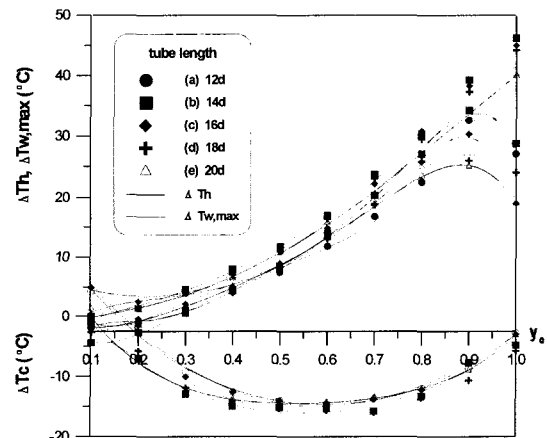


Fig. 2. Temperature differences ΔT_b , ΔT_c and inner wall maximum temperature ($T_{w,max}$) as functions of y_c with $L=12D, 14D, 16D, 18D, 20D$, for $S_n=0.142$ ($T_0 : 21^\circ\text{C}$, $P_0=1.0 \text{ kg/cm}^2$). $\Delta T_b=T_b-T_0$, $\Delta T_c=T_c-T_0$. y_c : cold air mass ratio, P_0 : the pressure of the inlet air, T_0 : the temperature of the inlet air.

온공기온도차(ΔT_h)가 가장 크게 나타났는데, $L=14D$ 영역에서 최고온공기온도차($\Delta T_{h,max}$)를 보였고 최대무차원벽면온도차($\Delta T_{w,max}$)도 또한 거의 최대로 나타났다.

기초실험을 통하여 vortex tube의 무차원 벽면온도는 전 실험영역에서 $L=16D$ 영역까지 증가하다가 다시 감소하는 것으로 확인되었으나, 오히려 vortex tube 길이에 따른 에너지분리효율은 $L=14D$ 인 vortex tube에서 최대값을 갖게 됨을 알게 되었다.

3.2. Throttle valve의 형상이 에너지분리에 미치는 영향
Vortex tube에 공급되는 공기유량은 공기가 유입되는

노즐을 지나 vortex tube에서 에너지분리를 일으키며 나오게 되는데, 저온공기와 고온공기의 유량비를 조절하는 것이 throttle valve이다.

본 실험에서는 저온공기유량비(y_c)로 냉공기와 온공기의 비율을 총 10단계($y_c=0.1\sim 1.0$)로 나누어 실험을 하였다. 또한, 기초실험을 통하여 throttle valve의 형상이 vortex tube 내 에너지분리과정에 영향을 주게되며, 에너지분리가 종료되는 정체점(stagnation point)의 위치도 변하게 함을 발견하게 되었는데 이에 따라 throttle valve의 cone의 각도를 각각 45° , 60° , 90° 로 바꾸어 실험하였다.

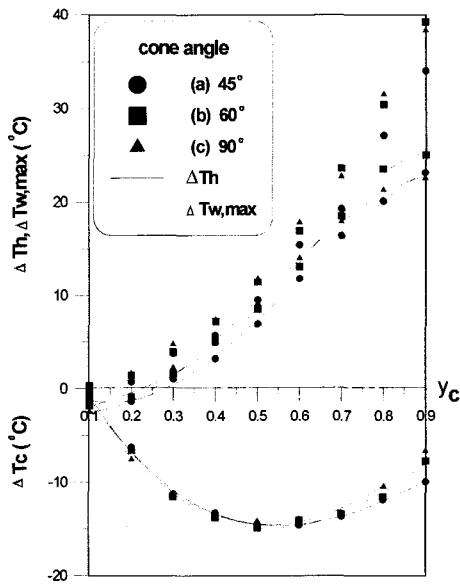
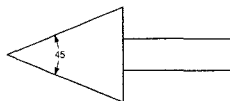
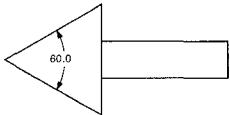


Fig. 3. Temperature differences ΔT_h , $\Delta T_{w,max}$ and ΔT_c as functions of y_c with $L=20D$ for $S_n=0.142$ ($T_o : 21^\circ C$, $P_o=1.0 \text{ kg/cm}^2$).

(a) the cone angle of the throttle valve : 45°



(b) the cone angle of the throttle valve : 60°



(c) the cone angle of the throttle valve : 90°

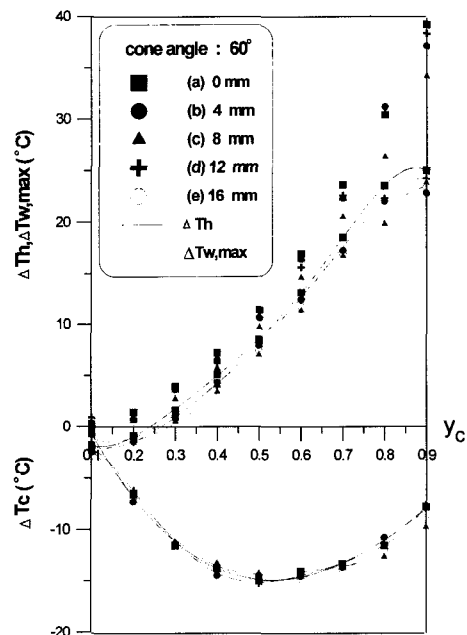
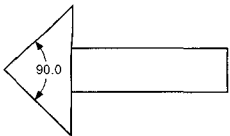
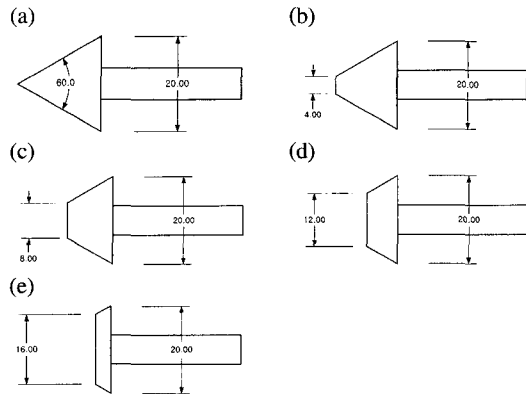


Fig. 4. Temperature differences ΔT_h , $\Delta T_{w,max}$ and ΔT_c as functions of y_c with $L=20D$ for $S_n=0.142$ ($T_o : 21^\circ C$, $P_o=1.0 \text{ kg/cm}^2$) the cone angle of the throttle valve : 60° .



실험결과 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 최대고온공기온도차($\Delta T_{h,max}$)는 $y_c=0.9$ 에서 동일하게 나타나는데, 그 중에서도 cone의 각도가 60° 일 때 가장 크게 나타났고, 최대무차원벽면온도차($\Delta T_{w,max}$)도 거의 최대로 나타났다. 하지만, 최대저온공기온도차($\Delta T_{c,max}$)는 $y_c=0.5\sim 0.6$ 에서 나타났으며 각각의 throttle valve에서 큰 차이를 나타내지 않았다.

Cone의 각도는 Fig. 4와 같이 가장 효율이 좋게 나타난 60° 로 하고, cone 선단부를 그림과 같이 절단하여 각각 실험한 결과, 큰 차이는 나지 않지만 이전과 마찬가지로 cone 선단부가 60° 인 throttle valve가 가장 에너지 분리가 잘 됨을 알 수 있었다.

3.3. Sleeve가 에너지분리에 미치는 영향

압축공기는 vortex generator의 nozzle을 통하여 들어오면서 vortex를 형성하며 vortex tube로 나가게 된다. 이때 유동이 vortex tube로 들어오며 급확대 되어 유동저

항을 받게 됨에 따라 Fig. 5와 같은 제작한 sleeve를 적용시켜 저압형 vortex tube에서 sleeve가 에너지 분리에 미치는 영향을 알아보기 위하여 실험하였다.

실험한 결과 Fig. 5에 나타난 바와 같이 sleeve로 인하여 최대고온공기온도차($\Delta T_{h,max}$)와 최대무차원벽면온도차($\Delta T_{w,max}$)가 모두 약 10% 정도 향상됨을 알 수 있었다. 최대저온공기온도차($\Delta T_{c,max}$)는 $y_c=0.5\sim 0.6$ 에서 각각 나타났으며 큰 차이를 나타내지 않았고, 다른 영역에서는 sleeve에 의해 오히려 저온공기온도차가 작게됨을 알 수 있다.

이를 통하여 고찰하여 보면, sleeve의 구경은 정체점에서부터 역류되어지는 저온 역류층의 두께와 직접 연관되어 지므로 기초실험에서 얻어진 vortex tube 내 온도분포를 고려하여 설계되어야하고, 소형, 고압형 vortex tube뿐만 아니라 저압형, 대형 vortex tube에도 sleeve가 효율적으로 적용되어짐을 확인할 수 있었다.

3.4. 기관적용 용 외통이 에너지분리에 미치는 영향

기초실험을 통하여 튜브의 재질에 따른 에너지분리특성을 알아보았다. vortex tube를 steel로 하여 단열 시키고, 입구공기 압력을 $P_0=1.0 \text{ kg/cm}^2$ 로 일정하게 주어 얻어진 데이터를 분석하여 가장 고온공기를 얻을 수 있는 vortex generator인 $S_n=0.142$ 로 선택하였고, acryl tube를 사용한 실험 데이터와 비교 분석하였다. 이를 통하여 관의 재질에 따른 에너지분리에 미치는 영향이 그리 크지 않음을 확인하였고, 오히려 관 내면의 표면조도가 vortex 형성에 훨씬 더 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

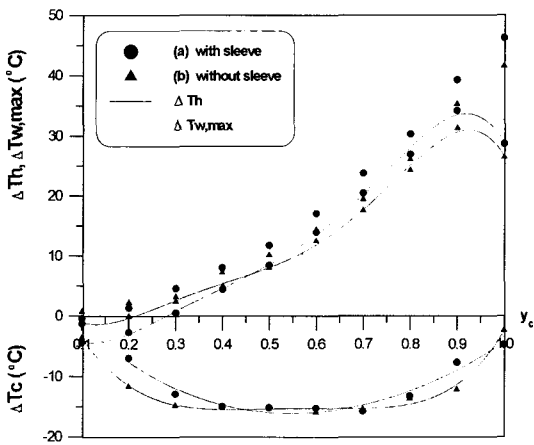


Fig. 5. Temperature differences ΔT_h , $\Delta T_{w,max}$, and ΔT_c as functions of y_c with $L=14D$ for $S_n=0.142$ ($T_0 : 21^\circ\text{C}$, $P_0=1.0 \text{ kg/cm}^2$).

- (a) the steel tube with sleeve
- (b) the steel tube without sleeve

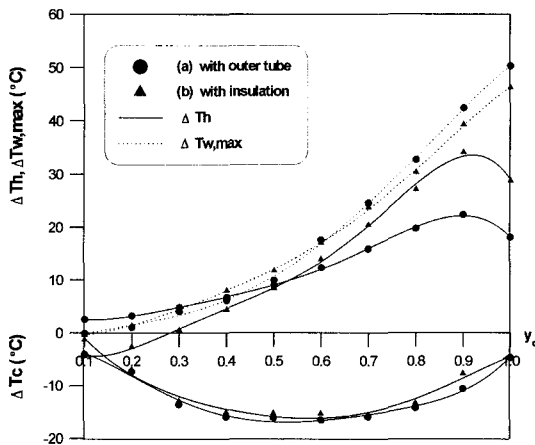
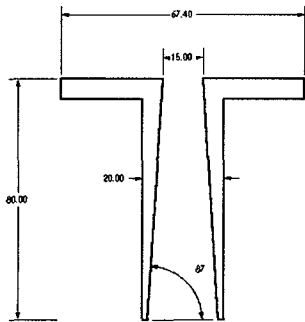


Fig. 6. Temperature differences ΔT_h , $\Delta T_{w,max}$ and ΔT_c as functions of y_c with $L=14D$ for $S_n=0.142$ ($T_0 : 21^\circ\text{C}$, $P_0=1.0 \text{ kg/cm}^2$).

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

또한, vortex tube의 길이에 따른 에너지분리에 미치는 영향을 본 실험을 통하여 측정된 결과, 가장 효율이 좋은 튜브길이 $L=14D$ 인 vortex tube를 선정하였다. 이러한 최적의 기하학적 형상들을 선정하고 vortex tube의 외부에 고온출구에서 나오는 공기를 통과시키기 위하여 외통(outer tube)을 사용하였다. 이 때 외부의 고온유동에 의하여 vortex tube의 벽면이 가열됨으로서 vortex tube 안쪽벽면의 무차원 벽면온도는 예상과 같이 증가하게 되었으나, 고온출구의 공기온도는 실험결과와 같이 오히려 감소하는 것으로 나타났다. 이는 고온출구에서 나오는 공기가 외통으로 인한 배압 증가의 영향으로 고온공기의 일부가 저온출구 쪽으로 이동하는 원인으로 생각된다.

4. 결 론

입축공기를 작동유체로 사용하는 counter flow형 저압형 vortex tube에 대하여 vortex generator의 노즐면적비 $S_n=0.142$, 입구압력 $P_0=1.0 \text{ kg/cm}^2$ 로 하고 저온공기유량비를 $y_c=0.1\sim 1.0$ 로 변화시키면서 vortex tube의 기하학적 형상에 따른 에너지분리효과를 중점으로 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) vortex tube의 길이 $L=14D$ 에서 최대고온공기온도차($\Delta T_{h, \max}$)를 보였고, 최대무차원벽면온도차($\Delta T_{w, \max}$)도 최대로 나타났다. 이는 기초실험에서 vortex tube의 무차원 벽면온도는 전 실험영역에서 튜브의 길이(L)가 증가함에 따라 $L=16D$ 까지 증가하다가 다시 감소하는 것으로 확인되었으나, 오히려 tube 길이가 $L=14D$ 인 vortex tube에서 최대값을 갖게 됨을 알게 되었다.

2) Throttle valve의 cone 각도가 60° 일 때 최대고온공기온도차($\Delta T_{h, \max}$)는 가장 크게 나타났고, 최대무차원 벽면온도차($\Delta T_{w, \max}$)도 최대로 나타났다. 하지만, 최대저온공기온도차($\Delta T_{c, \max}$)는 $y_c=0.5\sim 0.6$ 에서 나타났으며 각각의 throttle valve에서 큰 차이를 나타내지 않았다. 또한, cone 선단부를 절단하여 각각 실험한 결과, 에너지분리에 큰 차이는 나지 않았고, 이전과 마찬가지로 cone의 각도가 60° 인 throttle valve에서 에너지분리가 가장 잘 됨을 알 수 있었다.

3) vortex tube의 재질을 열전달이 좋은 steel로 실험한 결과, 외통을 사용한 vortex tube의 벽면온도는 열전달로 인하여 상승하나, 최대고온공기온도차($\Delta T_{h, \max}$)는 고온출구로 나오는 유동에 미치는 배압의 영향으로 오히려 감소하는 것으로 나타났다.

이상의 실험을 통하여 저압형 대형 vortex tube의 에너지분리과정은 기존의 고압형 소형 vortex tube와는 에너지분리 과정이 차이가 남을 알 수 있었고, 디젤기관

의 배기에 적용하기 위한 vortex tube의 길이, Throttle의 형상, 외통으로 인한 영향 등을 알 수 있었다.

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, l/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

- Hatnett, J.P. and 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).
- Stephan, K., Lin, S., Durst, M., Huang, D. and Seher, H.: "An Investigation of Energy Separation in a Vortex Tube", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 26, No. 3, pp. 341-348 (1983).
- 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).

4. Linderstrom-Lang, C.U.: "Gas Separation in the Ranque-Hilsch Vortex Tube", Int. J. Heat Mass Transfer, pp. 1195-1206 (1964).
5. Sibbersten, W.: "Vorrichtung zum Entfernen oxidierbarer bzw verrennbarer Patikel aus Abgasen", German patent Office, patent DE 3917888 Al Dec., 12 (1990).
6. Riu, K.J.: "An Experimental Study for Cold End Orifice of Vortex Tube", Trans. KSME(B) Vol. 20, No. 3 (1996).