

<응용논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2011.35.5.517

ISSN 1226-4881

볼텍스 튜브의 에너지 분리 특성에 대한 실험적 연구

이준순* · 한근희** · 박성영****

* 공주대학교 기계자동차공학부, ** 한국에너지기술연구원, *** 공주대학교 생산기술연구소

Experimental Study on Energy Separation Characteristics of Vortex Tube

Jun-Sun Lee*, Keun-Hee Han** and Sung-Young Park****

* Div. of Automotive & Mechanical Engineering, Kongju National Univ.,

** Korean Institute of Energy Research

*** Industrial Technology Research Institute, Kongju National Univ.

(Received September 7, 2010 ; Revised December 17, 2010 ; Accepted December 27, 2010)

Key Words: Vortex Tube(볼텍스 튜브), Energy Separation(에너지 분리), Throttle Valve(트로틀 밸브), Inlet Pressure(입구 압력), Orifice Diameter(오리피스 직경)

초록: 볼텍스 튜브는 고압의 가스를 이용하여 고온 가스와 저온 가스를 분리하거나 입자상 물질의 분리에 사용 할 수 있는 장치이다. 본 연구에서는 직경 10mm의 볼텍스 튜브의 기본 설계 자료를 구축하기 위하여 에너지 분리 성능 실험을 수행하였다. 설계를 위한 기초 자료를 확보하기 위하여, 공급압력, 볼텍스 발생기의 오리피스 직경 및 튜브의 길이가 에너지 분리 특성에 미치는 영향력을 실험을 통하여 분석하였다. 결과적으로 오리피스 직경과 공급압력이 볼텍스 튜브의 성능의 지배적인 성능인자임을 확인하였다. 튜브길이와 성능에 미치는 영향은 미미하였다. $D_c=0.7D$, $L=16D$ 의 볼텍스 튜브에서 가장 우수한 에너지 분리효과를 얻을 수 있었다.

Abstract: A vortex tube is a device that can separate small particles from a compressed gas or separate a compressed gas into hot and cold flows. We experimentally analyzed the energy-separation characteristics of a vortex tube with a diameter of 10 mm. We measured the energy-separation characteristics of the vortex tube for different inlet air pressures, orifice diameters, and tube lengths. The orifice diameter and inlet pressure are important for the vortex tube design and operation. The tube length has a small effect on the energy-separation performance. Maximum energy separation occurs for a vortex tube with $D_c = 0.7 D$ and $L = 16 D$.

1. 서 론

일명 Ranque-Hilsch 볼텍스 튜브라고도 불리는 볼텍스 튜브는 관내에 고압의 기체를 분사하여 생기는 볼텍스를 이용하여 공급된 기체를 저온과 고온의 기체로 분리해 낼 수 있는 장치이다. 저온의 공기는 기존의 냉각기들에 비해 성능은 떨어지지만 고압의 가스를 사용하는 장소라면 별도의 동력원을 필요로 하지 않고, 저온과 고온의 공기를 동시에 얻을 수 있다는 점과 조작성이 간단하며 응답성이 빠르다는 점에서 그 효과가 기대되고 있다. 볼텍스 튜브는 강력한 와류 유동을

생성하므로 고온의 공기와 저온의 공기를 분리할 뿐만 아니라, 입자상 물질의 분리에도 적용이 가능하다.

볼텍스 튜브의 에너지 분리 효과는 Ranque에 의해 처음으로 발견되었지만, Hilsch⁽¹⁾가 열역학적인 효율을 높이기 위한 다양한 실험과 이론적 연구를 시작하였기 때문에 Ranque-Hilsch 효과라고도 불린다. 볼텍스 튜브내의 에너지 분리 현상을 설명하고자 Ahlborn and Gordon⁽²⁾과 Lewins and Bejan⁽³⁾은 단순 해석 모델을 제시하였으며, Piralishvili and Fuzeeva⁽⁴⁾는 상사법칙과 차원해석을 통한 모델을, Saidi and Allaf Yazdi⁽⁵⁾는 열역학적인 에너지 모델을 제시하였다. 실험적 연구로는 Ahlborn and Groves⁽⁶⁾가 피토 튜브를 사용하여 볼텍스 튜브내의 2차 회전류를 발견하였으며,

† Corresponding Author, sungyoung@kongju.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

Dincer 등⁽⁷⁾과 Peng 등⁽⁸⁾은 제어밸브 최적화를 위한 실험적 연구를 수행하였다. 또한 Aydin and Baki⁽⁹⁾와 Li 등⁽¹⁰⁾은 볼텍스 튜브의 가시화를 통한 실험적 연구를 수행하였다.

이와 같이 볼텍스 튜브의 에너지 분리효과가 발견된 이래 다수의 연구가 진행되어 왔으나, 튜브내의 복잡한 유동현상으로 인하여 아직까지도 볼텍스 튜브의 원리가 완벽히 규명되지 못하고 있는 실정이다. 하지만, 일반적으로 Fig. 1에 나타난 에너지 전달 이론으로 에너지 분리효과가 설명되고 있다.⁽¹¹⁾ 입구에서 압축되어 들어온 기체가 볼텍스 발생기의 접선방향 노즐부를 거치면서 강력한 와류를 생성하고, 고온 출구쪽으로 진행한다. 튜브내의 나선 회전 유동은 크게 강제 볼텍스(forced vortex)와 자유 볼텍스(free vortex) 두 부분으로 구분될 수 있다. 튜브의 중심부는 강제 회전에 가까운 강제 볼텍스를 형성하며, 튜브의 벽면에서는 강제 볼텍스에 의한 자유 볼텍스가 생성된다. 이때 자유 볼텍스는 축방향의 유동과 벽면과의 마찰로 인하여 자유 볼텍스 내부에 또 다른 볼텍스를 수반하는 것으로 알려져 있다. 따라서 자유 볼텍스의 속도는 급격히 증가하게 된다.

볼텍스 튜브의 축방향으로 일정 거리를 지나면서 볼텍스의 강도가 저하되고, 저온 출구 측으로 역류되는 유동이 튜브의 중앙부에서 발생하게 된다. 이때 튜브의 중심선 상에 유동이 일시적으로 정지하는 정체점(stagnation point)이 발생하게 된다. 이러한 정체점을 꼭지점으로 역류 유동이 저온 출구 측으로 발생하게 되며, 이 정체점을 중심으로 한 종 모양의 표면이 에너지 전달과 운동량 전달의 교환이 이루어지는 경계면으로 작용하게 된다. 경계면에서의 운동량 전달이 에너지 전달보다 크기 때문에 벽면 부근의 유체 온도는 상승하게 되고 튜브 중심부의 온도는 더욱 강하게 되어 에너지 분리가 발생한다. 즉, 볼텍스 튜브 내부의 속도차이로 인하여 관의 중심에서 벽면 방향으로 운동량의 전달이 이루어지게 되고 이에 따른 에너지 균형을 위해 열이 중심부로 이동하지만, 운동량의 전달이 열전달량보다 크기 때문에 벽면 부근의 기체 온도는 상승하게 되고 튜브 중심부의 기체는 냉각된다.

일반적으로 가솔린 직접분사장치와 배기가스재순환장치(EGR)를 장착하고 있는 불꽃점화엔진은

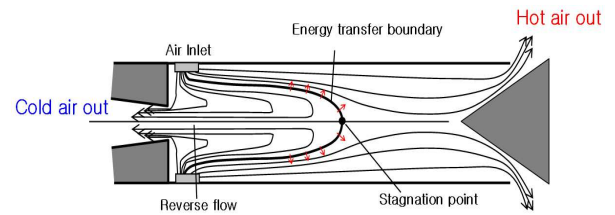


Fig. 1 Energy separation principle of the vortex tube

직접분사장치로 인하여 다량의 입자상 물질과 특정 배기가스가 발생된다. 자동차에서 발생하는 배기가스 성분중 NOx를 저감하기 위하여, 배기가스를 연소실에 재순환시켜 연소온도를 억제하는 방법을 사용하고 있다. 이때 고온의 연소가스는 EGR 쿨러를 통과하여 저온으로 연소실에 공급되게 된다.

EGR 장치에 볼텍스 튜브를 장착하면, 첫 번째로 볼텍스 튜브의 저온 출구측으로 배출되는 저온의 깨끗한 연소가스를 연소실에 공급할 수 있는 장점이 있다. 둘째로, 볼텍스 튜브의 와류는 입자상 물질들을 원심분리하여 고온측 출구로 배출할 수 있다. 저온의 청정한 공기는 엔진 연소를 최적화하여 연비 향상 및 배기가스 저감에 큰 효과가 있을 것이며, 저온의 연소가스 공급은 EGR 쿨러의 크기를 축소할 수 있는 부수적인 효과도 있다.

본 연구의 목적은 가솔린 직접분사장치와 배기가스재순환장치를 장착한 불꽃점화엔진에 적용하기 위한 볼텍스 튜브의 에너지 분리 성능특성을 파악하고 설계를 위한 기초 자료를 구축하는 것이다.

2. 볼텍스 튜브의 설계 및 실험 방법

2.1 볼텍스 튜브의 설계 및 제작

본 연구의 대상인 볼텍스 튜브의 구성은 볼텍스를 생성하는 볼텍스 발생기(vortex generator), 저온 출구와 고온 출구를 포함하는 튜브, 그리고 유량을 조절해주는 트로틀 밸브(throttle valve)로 구성되어 있다. 본 연구에 적용된 모델은 튜브의 직경(D)을 기준으로 오리피스 직경(Dc) 및 튜브의 길이(L)를 Table 1과 같이 설계하였다. 트로틀 밸브는 고온 가스 출구 측에 배치되며 Fig. 2(a)와 같이 원추의 형상을 가지고 있으며 60°의 내각을 가지고 있다. 특히 트로틀 밸브의 끝에 조

절나사를 결합하여, 조절나사를 1회전하면 원추형상의 트로틀 밸브가 튜브의 축방향으로 1mm씩 이동하도록 제작하였다. 볼텍스 발생기는 튜브 외경에 접선 방향으로 6개의 노즐을 가공하였고, 이를 통하여 볼텍스가 튜브 내에 형성된다. 본 연구에 사용된 볼텍스 튜브의 기본 형태 및 설계 변수의 범위는 기존 연구⁽¹²⁾의 실험 결과를 바탕으로 설계되었다.

볼텍스 튜브, 발생기 및 트로틀 밸브는 SUS304로 제작되었으며, Fig. 3에 제작된 볼텍스 튜브의 각 요소부품을 보여주고 있다. Fig. 3(a)는 5가지의 오리피스 직경을 가진 5종의 볼텍스 발생기이며, Fig. 3(b)는 길이별 튜브를 보여주고 있다.

2.2 실험장치 및 방법

볼텍스 튜브의 에너지 분리효과를 실험하기 위하여 Fig. 4와 같이 압력센서, 온도센서 및 유량계를 공기압 입구, 저온출구 및 고온출구 측에 각각 설치하였으며, 정상상태에 도달하는 시간을 단축하기 위하여 단열재로 볼텍스 튜브를 단열하였다. 가압공기는 20마력급 컴프레서와 3,000 liter의 공기탱크를 연결하여 일정한 공급압력을 유지하였다. 입구부의 공급압력은 압력레귤레이터로 조절하였으며 입구 및 출구부의 온도와 압력을 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 공급압력(P_{in})에 따른 에너지 분리 효과

본 연구에 사용된 볼텍스 튜브는 볼텍스 발생기에 가공된 6개 노즐을 통하여 강력한 스윙 속도를 유발하여 볼텍스를 발생시키는 장치이다. 특히 중요한 작동 변수중의 하나는 공급되는 기체의 압력(P_{in})이다. 공급압력이 너무 낮으면 볼텍스가 생성되지 못하기 때문에 에너지 분리가 발생하지 않으며, 공급압력이 과도하게 높으면 노즐부에서 초킹이 발생하고 이로 인하여 에너지 분리 효율이 급격하게 감소하게 된다.

Fig. 5는 볼텍스 튜브의 공급압력 변동에 따른 성능실험을 수행한 결과이다. Fig. 5의 수평축 및 수직축에 표현된 저온유량비, 온도비 및 열전달률의 정의는 다음과 같다.

$$\text{Cold mass flow ratio} = \frac{\dot{m}_{\text{low ex}}}{\dot{m}_{\text{total}}} \quad (1)$$

Table 1 Design parameters of the vortex tube

Parameter	Symbol [unit]	Dimension
Tube Diameter	D [mm]	10
Orifice diameter	Dc [mm]	0.3D, 0.4D, 0.5D, 0.6D, 0.7D
Tube length	L [mm]	12D, 14D, 16D
Nozzle depth	width [mm]	1.5
Nozzle width	depth [mm]	1.4

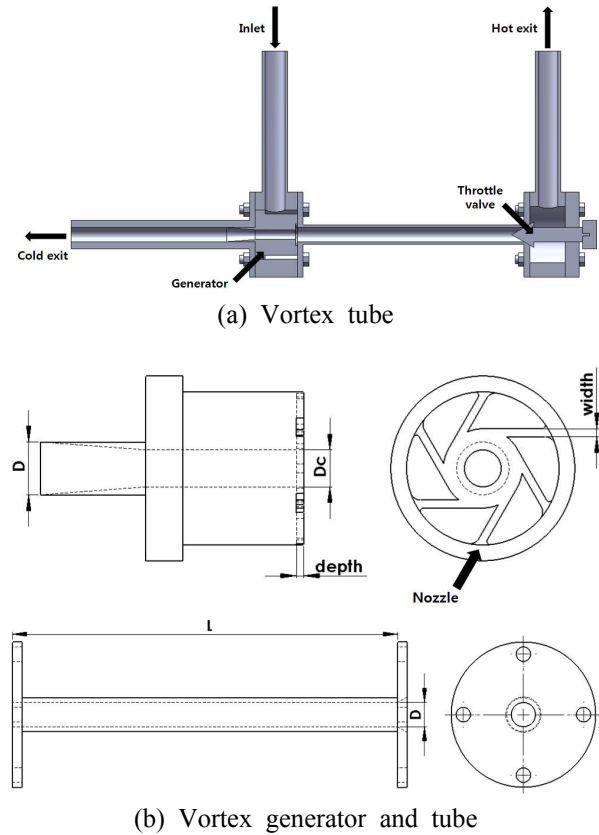


Fig. 2 Schematic diagram of the vortex tube

$$\text{Temperature ratio} = \frac{T_{\text{ex}} - T_{\text{in}}}{T_{\text{in}}} \quad (2)$$

$$\text{Heat transfer rate} = \dot{m}_{\text{ex}} C_p (T_{\text{ex}} - T_{\text{in}}) \quad (3)$$

여기서 \dot{m} 는 공기의 질량유량, T는 온도, C_p는 공기의 정압비열을 나타낸다. 첨자 ex는 출구, in은 입구, low ex는 저온측 출구 그리고 total은 전체를 의미한다. 저온유량비는 전체 공기유량 대비 저온측으로 토출되는 공기유량의 비로서 저온유량비가 1.0이 되면 고온측의 트로틀 밸브가 닫혀 저온측으로만 유동이 발생함을 의미한다. 온

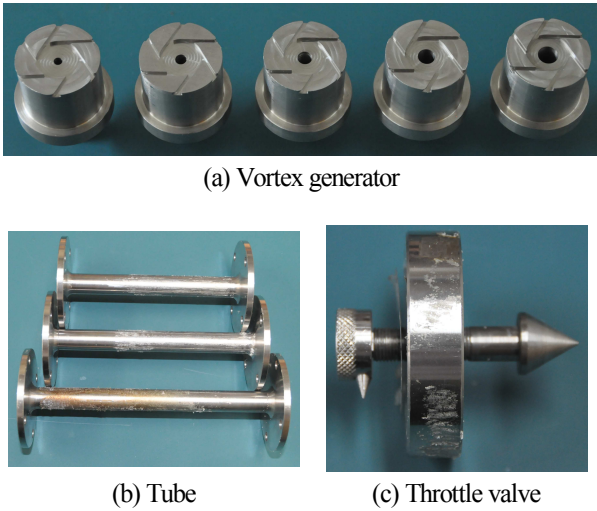


Fig. 3 Manufactured vortex tube and generator

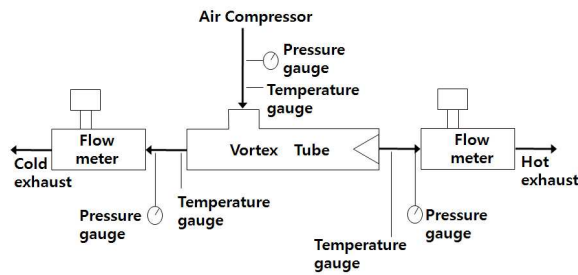


Fig. 4 Schematic diagram of the vortex tube test rig

도비는 입구온도를 기준으로 한 출구온도차의 비율이다. 열전달률은 입구와 출구의 온도차에 유동질량을 곱한 값으로 분리된 단위 시간당의 열 에너지량을 의미한다.

Fig. 5는 볼텍스 튜브의 길이가 직경의 16배이고 오리피스 직경이 튜브 직경의 0.7배일 때, 공급압력 변화에 따른 출구측의 온도비, 압력 및 열전달률 특성을 나타내고 있다. Fig. 5(a)에서 공급압력이 100kPa에서 400kPa로 상승함에 따라 고온 출구측의 온도비도 상승하고 있음을 보여주고 있다. 특히 공급압력이 300kPa 이상이 되면 온도비의 변화가 크지않음을 알 수 있다. 최대 온도비는 저온유량비 0.9부근에서 발생한다. 이러한 현상은 Fig. 5(b)의 저온 출구측의 온도비에서도 나타난다. 최소 온도비는 저온 온도비 0.3에서 0.4사이에서 발생하고 있다. 고온측 및 저온측의 출구압력은 공급압력이 증가함에 따라 선형적으로 증가한다.

하지만 이러한 볼텍스 튜브를 실제 공정에 적

용하기 위해서는 온도 자체보다는 배출되는 에너지의 양이 더욱 중요하다. Fig. 5(c)는 공급압력 변화에 대한 열전달률의 변화를 나타내고 있다. 주목할 점은 최대 및 최소 열전달률이 대부분 저온유량비 0.6에서 0.8사이에서 발생하고 있는 점이다. 즉, 오리피스 직경이 0.7D이고 튜브길이가 16D인 볼텍스 튜브를 적용할 경우 최대 열전달률을 얻기 위해서는 저온유량비 0.7부근에서 작동하는 것이 공급압력의 변동에 대하여 가장 우수한 성능을 유지할 수 있다.

3.2 오리피스 직경(Dc) 변경에 따른 에너지 분리 효과

볼텍스 튜브의 설계에서 가장 중요한 변수중의 하나는 저온의 공기가 분리되는 오리피스의 직경(Dc)이다. 오리피스의 직경이 과도하게 크면 6개의 노즐에서 나온 공기가 저온 측으로 직접 배출되고, 에너지 분리를 발생시키는 볼텍스를 축소시키기 때문에 에너지 분리 성능이 저하될 것이다. 반대로 오리피스 직경이 과도하게 작으면 유동 저항으로 작용할 것이다.

Fig. 6은 볼텍스 튜브의 길이가 직경의 16배일 때, 오리피스 직경 변화에 따른 출구측의 온도비, 압력 및 열전달률 특성을 나타내고 있다. Fig. 6(a)에서 오리피스 직경이 증가함에 따라 고온 출구측의 온도비가 상승하는 것을 볼 수 있다. 또한 오리피스 직경이 증가함에 따라 최대온도비가 0.9부근으로 수렴하고 있다. Fig. 6(b)의 저온 출구측 온도비는 오리피스 직경비가 0.5까지는 감소하는 경향을 보이다가 그 이후 오리피스 직경이 커지면 일부영역에서 증가하는 경향을 보인다. 특히 저온유량비가 0.3이상에서 오리피스 직경비가 0.5이상이면 온도비의 차이는 미미하다. 최소 온도비는 오리피스 직경비가 0.5이고 저온 유량비가 0.2에서 발생한다. 저온 유량비가 낮은 곳에서 온도비가 교차하여 불균일한 형태를 나타낸다. 하지만, 오리피스 직경이 증가함에 따라, 저온유량비 0 근처에서 온도비가 증가한다. 또한 오리피스 직경이 증가함에 따라, 최저온도비가 발생하는 저온유량비가 증가하는 경향을 보이고 있다. 예상할 수 있는 바와 같이 오리피스 직경의 변화는 고온 출구측 압력보다 저온 출구측의 압력에 더 큰 변화를 유발한다. 볼텍스 튜브의 성능에 미치는 오리피스 직경 변화를 열전달률로

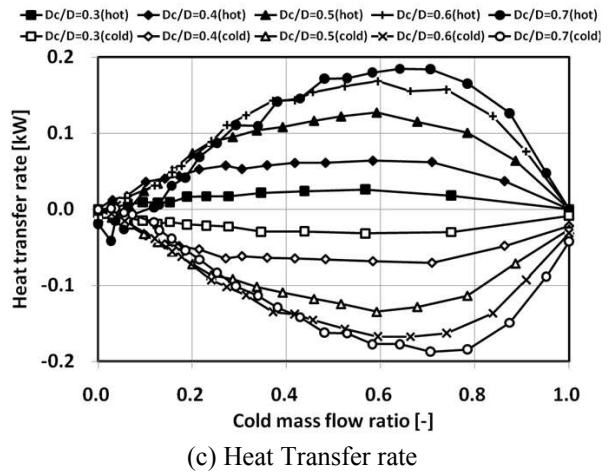
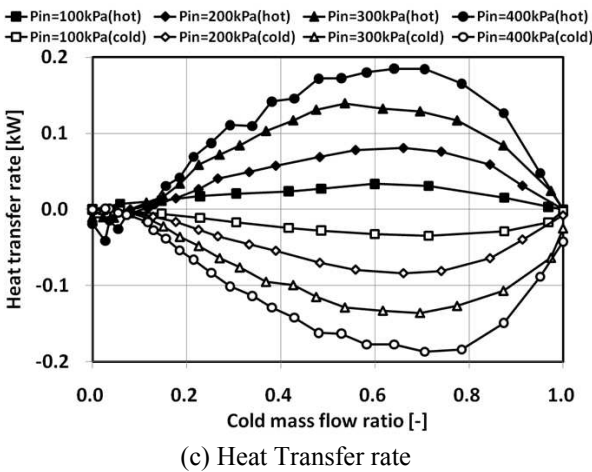
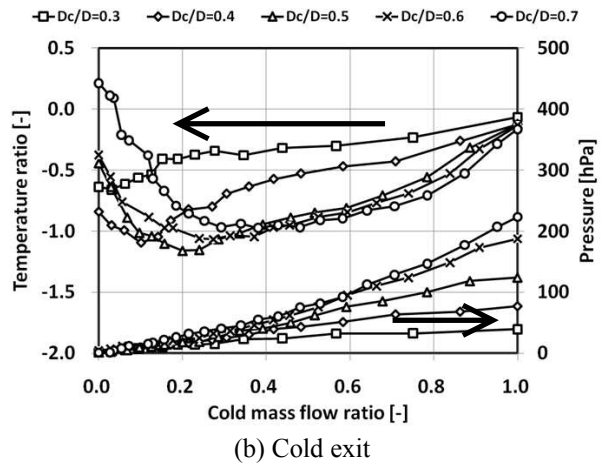
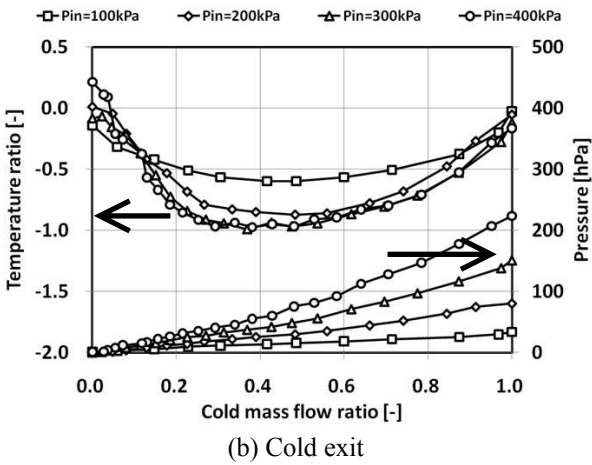
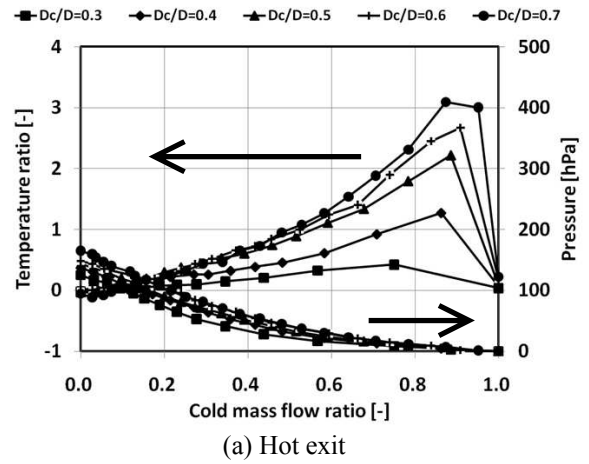
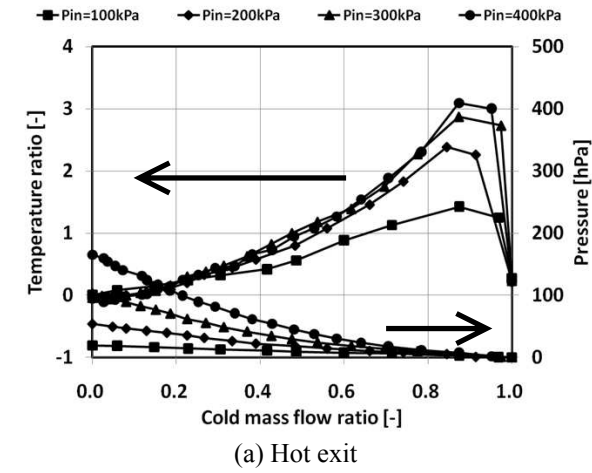


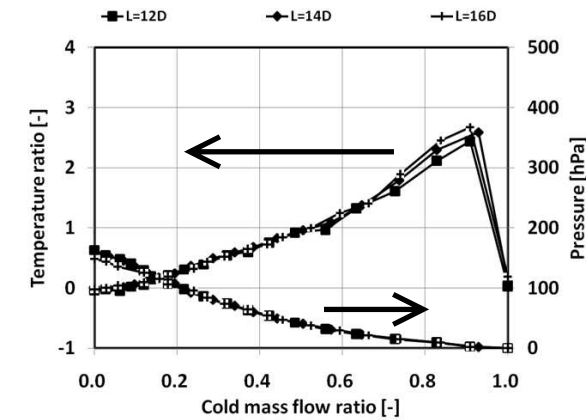
Fig. 5 Temperature ratio and heat transfer rate according to the inlet pressure variation ($D_c=0.7D$, $L=16D$)

Fig. 6 Temperature ratio and heat transfer rate according to the orifice diameter variation ($L = 16D$, $P_{in}=400kPa$)

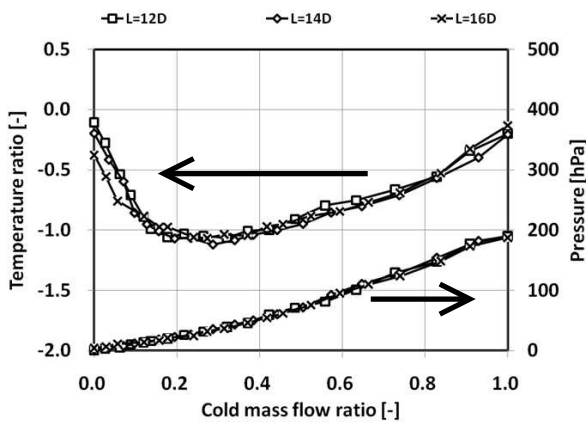
표현하면 Fig. 6(c)와 같다. 오리피스 직경비가 증가할수록 고온 및 저온측의 열전달률의 크기도 동시에 증가하게 되며, 오리피스 직경비가 0.7이고 저온유량비가 0.7부근에서 가장 우수한 에너

지 분리현상을 보이고 있다.

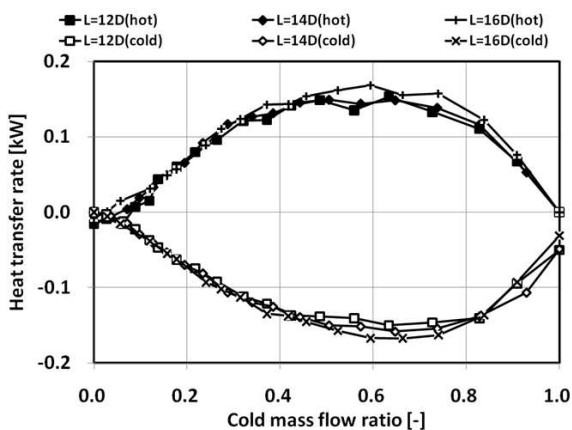
3.3 튜브길이(L) 변경에 따른 에너지 분리 효과
볼텍스 튜브의 길이는 튜브 설계의 또 다른 성



(a) Hot exit



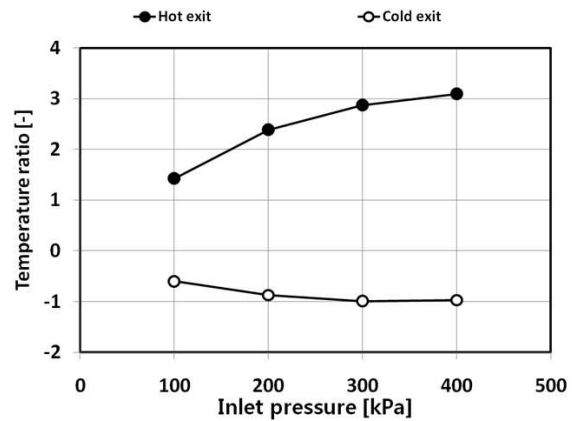
(b) Cold exit



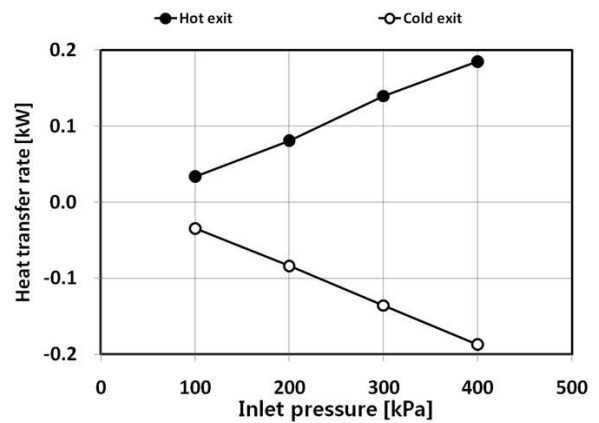
(c) Heat Transfer rate

Fig. 7 Temperature ratio and heat transfer rate according to the tube length variation ($D_c=0.6D$, $P_{in}=400kPa$)

능 변수 중의 하나이다. Fig. 7은 오리피스 직경이 튜브직경의 0.6배인 경우에 튜브길이 변화에 따른 성능 실험결과를 보여주고 있다. 볼텍스 튜브 길이의 변화는 저온 및 고온 출구의 온도비 및 압력비에 미미한 영향을 미치고 있다. Fig.



(a) Temperature ratio



(b) Heat transfer rate

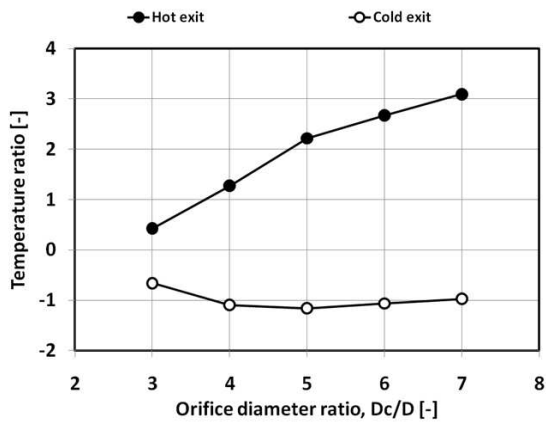
Fig. 8 Maximum temperature ratio and heat transfer rate according to the inlet pressure variation ($D_c=0.7D$, $L=16D$)

7(c)에서 튜브길이가 길어질수록 열전달률이 미미하게 증가하고는 있으나 그 차이가 미미하다. 결론적으로 본 실험에서 수행된 튜브길이의 범위에서 튜브길이가 에너지 분리에 미치는 영향력은 미미하다.

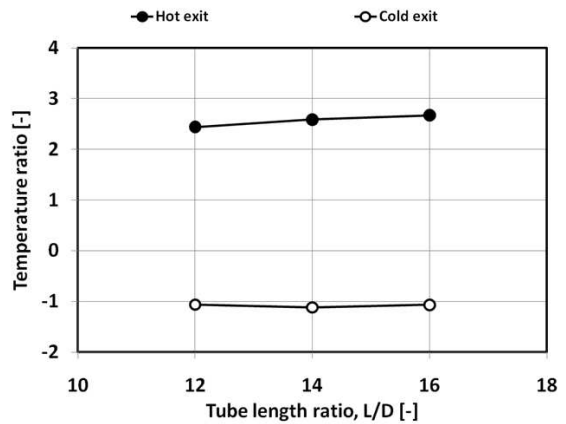
3.4 최대 온도비 및 최대 열전달률

Fig. 8은 고온 및 저온측의 최대 및 최소 온도비와 열전달률을 공급압력 변화에 대하여 나타낸 그림이다. 공급압력이 증가할수록 Fig. 8(a)의 고온 및 저온 온도비의 크기는 증가하며, 저온 출구측 온도비는 -1.0의 값에 수렴하고 있다. 하지만 Fig. 8(b)의 유량을 고려한 열전달률은 고온 및 저온 모두에서 선형적인 증가를 보이고 있다.

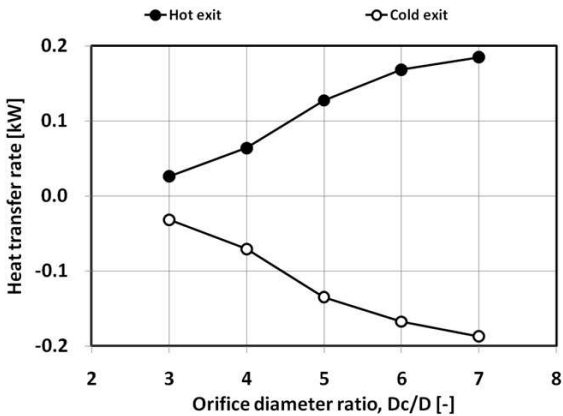
Fig. 9는 고온 및 저온측의 최대 및 최소 온도비와 열전달률을 오리피스 직경 변화에 대하여



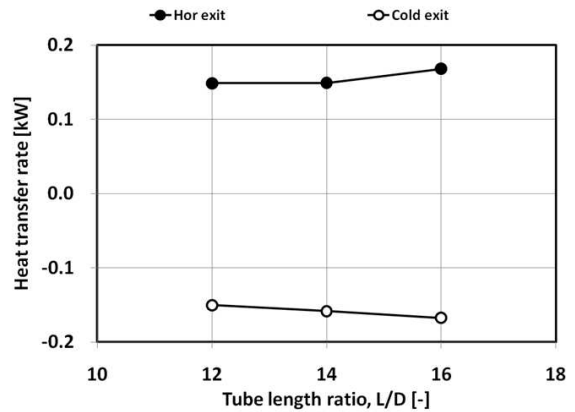
(a) Temperature ratio



(a) Temperature ratio



(b) Heat transfer rate



(b) Heat transfer rate

Fig. 9 Maximum temperature ratio and heat transfer rate according to the orifice diameter ratio variation ($L = 16D$, $P_{in}=400kPa$)

Fig. 10 Maximum temperature ratio and heat transfer rate according to the tube length variation ($D_c=0.6D$, $P_{in}=400kPa$)

나타낸 그림이다. Fig. 9(a)에서 오리피스 직경이 증가할수록 고온 출구측의 온도비는 지속적으로 증가하지만, 저온 출구측의 온도비는 저온유량비가 0.4 이상이면 그 변화량은 미미하다. 하지만 Fig. 9(b)의 유량을 고려한 열전달률은 고온 및 저온 모두에서 오리피스 직경이 커질수록 증가하고 있다. 특이한 점은 고온측과 저온측에서 열전달의 방향을 나타내는 부호는 다르지만 그 크기가 거의 일치한다는 점이다.

Fig. 10은 고온 및 저온측의 최대 및 최소 온도비와 열전달률을 튜브길이 변화에 대하여 도시화한 그림이다. 온도비 및 열전달률 모두 튜브 길이에 대하여 미미한 성능의 차이를 보여주고 있으나, 튜브길이가 16D인 모델이 12D 모델대비 약 12%정도 향상된 열전달률을 보이고 있다.

4. 결론

직경 10mm의 볼텍스 튜브를 설계 및 제작하였으며, 에너지 분리특성 실험을 수행하였다. 볼텍스 튜브와 볼텍스 발생기의 설계 변수에 대한 에너지 분리특성의 영향을 실험적으로 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 볼텍스 튜브에 공급되는 공기의 압력은 매우 중요한 성능 변수 중의 하나이며 공급압력이 증가할수록 온도비와 열전달률이 증가하였다. 특히 최대 열전달률은 공급압력에 대하여 선형적으로 증가하였다.

(2) 오리피스 직경은 볼텍스 튜브의 성능에 지배적인 영향을 미치는 설계인자이며, 오리피스 직경이 클수록 출구 측의 열전달률과 온도비의

크기가 증가하였다. 하지만, 본 연구에서 수행한 범위내에서 튜브 길이는 온도비와 열전달률에 미미한 영향을 미쳤다.

(3) 저온 출구측과 고온 출구측의 열에너지를 모두 사용하는 튜브 10mm의 볼텍스 튜브를 설계한다면, 큰 직경의 오리피스($D_c=0.7D$)와 긴 ($L=16D$)길이의 튜브를 사용하는 것이 최대의 열전달률을 얻을 수 있다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단의 에너지·자원연구개발사업의 연구과제로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Hilsch, R., 1947, "The Use of the Expansion of Gases in a Centrifugal Field as Cooling Process," *The Review of Scientific Instruments*, Vol 18, No. 2, pp. 108-113.
- (2) Ahlborn, B. and Gordon, J., 2000, "The Vortex Tube as a Classic Thermodynamic Refrigeration Cycle," *Journal of Applied Physics*, Vol. 88, No. 6, pp. 3645-3653.
- (3) Lewins, J. and Bejan, A., 1999, "Vortex Tube Optimization Theory," *Energy*, 24, pp. 931-943.
- (4) Piralishvili, S. and Fuzeeva, A., 2006, "Similarity of the Energy-Separation Process in Vortex Ranque Tube," *Journal of Engineering Physics and Thermodynamics*, Vol. 79, No. 1, pp. 27-32.
- (5) Saidi, M. and Allaf Yazdi, M., 1999, "Energy Model of a Vortex Tube System with Experimental Results," *Energy*, 24, pp. 625-632.
- (6) Ahlborn, B. and Groves, S., 1997, "Secondary Flow in a Vortex Tube," *Fluid Dynamics Research*, 21, pp. 73-86.
- (7) Dincer, K., Baskaya, S., Uysal, B. and Ucgul, I., 2009, "Experimental Investigation of the Performance of a Ranque-Hilsch Vortex Tube with regard to a Plug Located as the Hot Gas," *International Journal of Refrigeration*, 32, pp. 87-94.
- (8) Peng, W., Hoffmann, A., Dries, H., Regelink, M. and Stein, L., 2005, "Experimental Study of the Vortex End in Centrifugal Separator: The Nature of the Vortex End," *Chemical Engineering Science*, 60, pp. 6919-6928.
- (9) Aydin, O. and Baki, M., 2006, "An Experimental Study on the Design Parameters of a Counterflow Vortex Tube," *Energy*, 31, pp. 2763-2772.
- (10) Li, X., Yan, H., Meng, J. and Li, Z., 2007, "Visualization of Longitudinal Vortex Flow in an Enhanced Heat Transfer Tube," *Experimental Thermal and Fluid Science*, 31, pp. 601-608.
- (11) Aljuwayhel, N.F., Nellis, G.F. and Klein, S.A., 2005, "Parametric and internal study of the vortex tube using a CFD model," *International Journal of Refrigeration*, 28, pp. 442-450.
- (12) Oh, D.-J., 2003, "An Experimental Study on the Characteristics of a Low Pressure Vortex Tube," *Doctoral Dissertation, Chungnam National University, Daejeon, Korea.*