CLEAN TECHNOLOGY, Vol. 16, No. 3, September 2010, pp. 213~219

CO_2 흡수용 100 Nm^3/hr급 Vortex Tube의 에너지분리 특성에 관한 실험적 연구

김창수,† 한근희,‡ 박성영*

공주대학교 생산기술연구소, †일반대학원 기계공학과
330-717 충남 천안시 부대동 275

‡한국에너지기술연구원
305-343 대전시 유성구 장동 71-2

(2010년 8월 24일 접수; 2010년 9월 17일 수정본 접수; 2010년 9월 20일 채택)

An Experimental Study on the Energy Separation of the 100 Nm^3/hr Vortex Tube for CO_2 Absorption

Chang-Su Kim,† Keunhee Han,‡ and Sung-Young Park*

Industrial Technology Research Institute and †Department of Mechanical Engineering
in the Graduate School, Kongju National University
275 Budae-dong, Cheonan, Chungnam 330-717, Korea

‡Korea Institute of Energy Research
71-2 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Korea

(Received for review August 24, 2010; Revision received September 17, 2010; Accepted September 20, 2010)

요 약

볼텍스튜브는 고압의 가스를 이용하여 고온 가스와 저온 가스를 분리하거나 입자상 물질의 분리에 사용할 수 있는 장치이다. 이러한 볼텍스튜브의 에너지분리 특성과 물질분리 특성을 활용하여, 연소가스로부터 CO_2를 흡수하는 장치의 핵심부품으로 적용할 수 있다. 본 연구에서는 CO_2 흡수용 볼텍스튜브의 기본설계 자료를 구축하기 위하여 에너지분리 성능실험을 수행하였다. 설계를 위한 기초 자료를 확보하기 위하여, 볼텍스 발생기의 오리피스 직경, 노즐면적비 및 튜브의 길이가 에너지분리 특성에 미치는 영향력을 실험을 통하여 분석하였다. 결과적으로 오리피스 직경이 볼텍스튜브의 성능에 지배적인 설계인자임을 확인하였으며, 노즐면적비와 튜브길이의 영향력은 미미하였다. 오리피스 직경이 작고(Dc=0.6D), 노즐면적비가 중간 이상(AR=0.14~0.16)이며, 튜브 길이가 긴 모델(L=16D)이 저온 출구 측과 고온 출구 측의 열전달에서 가장 우수한 성능을 나타내었다. 본 연구의 결과는 CO_2흡수용 100 Nm^3/hr급 볼텍스튜브의 기본설계 자료로 활용될 예정이다. 볼텍스튜브를 적용한 CO_2흡수 공정을 적용하면 기존의 대형 흡수탑 대비 상당한 공간과 에너지의 절감 효과가 기대된다.

주제어 : 볼텍스튜브, 에너지 분리, CO_2 흡수, 트로틀밸브

Abstract : Vortex tube is the device that can separate small particles from the compressed gas, as well as compressed gas into hot and cold gas. Due to energy and particle separation ability, a vortex tube can be used as the main component of the CO_2 absorption device. In this study, experimental approach has been performed to analyze the energy separation characteristics of the vortex tube. To obtain the preliminary design data, energy separation characteristics of the vortex tube has been tested for orifice diameter, nozzle area ratio, and tube

* To whom correspondence should be addressed.
E-mail : sungyoung@kongju.ac.kr

length. As a result, the orifice diameter is the major factor of the vortex tube design. The nozzle area ratio and tube length have a minor effect on the energy separation performance. For Dc=0.6D, AR=0.14~0.16, and L=16D, maximum energy separation has been occurred. The result from this study can be used as the basic design data of the 100 Nm^3/hr class vortex tube applied to the CO_2 absorption device. Compared with the CO_2 absorption process containing an absorption tower, the process with a vortex tube is expected to have a huge advantage of saving the installation space and the operating cost.

Keywords : Vortex tube, Energy separation, CO_2 Absorption, Throttle valve

1. 서 론

일명 Ranque-Hilsch 볼텍스튜브라고도 불리는 볼텍스튜브는 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 조작이 단순하며 응답성이 빠르다는 점에서 그 효과가 기대되고 있다. 볼텍스튜브는 강력한 와류 유동을 생성하므로 고온의 공기와 저온의 공기를 분리할 뿐만 아니라, 입자상 물질의 분리에도 적용이 가능하다.

볼텍스튜브의 에너지분리 효과는 Ranque에 의해 처음으로 발견되었지만, Hilsch[1]가 열역학적인 효율을 높이기 위한 다양한 실험과 이론적 연구를 시작하였기 때문에 Ranque-Hilsch 효과라고도 불린다. 볼텍스튜브 내의 에너지분리 현상을 설명하고자 Ahlborn and Gordon[2]과 Lewins and Bejan[3]은 단순해석모델을 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 피토튜브를 사용하여 볼텍스튜브 내의 2차 회전류를 발견하였으며, Dincer et al.[7]과 Peng et al.[8]은 제어밸브 최적화를 위한 실험적 연구를 수행하였다. 또한 Aydin and Baki[9]와 Li et al.[10]은 볼텍스튜브의 가시화를 통한 실험적 연구를 수행하였다.

이와 같이 볼텍스튜브의 에너지분리효과가 발견된 이래 다수의 연구가 진행되어 왔으나, 튜브 내의 복잡하고 강력한 유동으로 인하여 아직까지도 볼텍스튜브의 원리가 완벽히 규명되지 못하고 있는 실정이다. 하지만, 일반적으로 Figure 1에 나타난 에너지전달 이론으로 에너지분리효과가 설명되고 있다

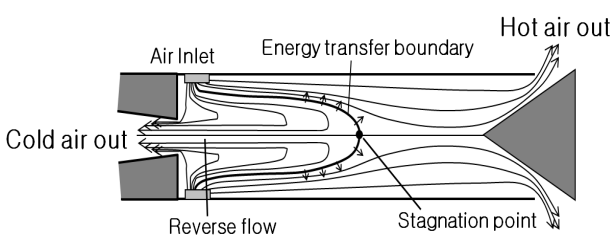


Figure 1. Energy separation principle of the vortex tube.

[11]. 입구에서 압축되어 들어온 기체가 볼텍스 발생기의 접선방향 노즐부를 거치면서 강력한 와류를 생성하고, 고온 출구 쪽으로 진행한다. 튜브내의 나선 회전유동은 크게 강제 볼텍스(forced vortex)와 자유 볼텍스(free vortex) 두 부분으로 구분될 수 있다. 튜브의 중심부는 강체 회전에 가까운 강제 볼텍스를 형성하며, 튜브의 벽면에서는 강제 볼텍스에 의한 자유 볼텍스가 생성된다. 이때 자유 볼텍스는 축방향의 유동과 벽면과의 마찰로 인하여 자유 볼텍스 내부에 2차적인 볼텍스를 수반하는 것으로 알려져 있다. 따라서 자유 볼텍스의 속도는 급격히 증가하게 된다.

볼텍스튜브의 축방향으로 일정 거리를 지나면서 볼텍스의 강도가 저하되고, 저온 출구 측으로 역류되는 유동이 튜브의 중앙부에서부터 발생되게 된다. 이때 튜브의 중심선 상에 유동이 일시적으로 정지하는 정체점(stagnation point)이 발생하게 된다. 이러한 정체점을 꼭지점으로 하여 종 모양의 역류 유동이 저온 출구 측으로 발생하게 되며, 이 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 강하하게 되어 에너지분리가 발생한다. 즉, 볼텍스튜브 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 기체온도는 상승하게 되고 튜브 중심부의 기체는 냉각된다.

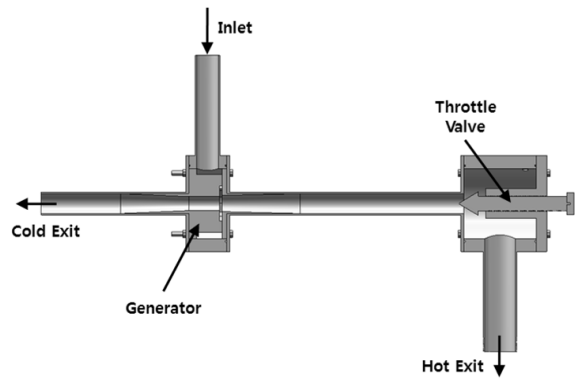
본 연구에서 적용된 볼텍스튜브는 보일러의 연소에서 발생한 CO_2 가스를 흡수제로 흡수하기 위하여 특수하게 제작된 100 Nm^3/hr급의 모델이다. 이는 볼텍스튜브 내에서 발생하는 볼텍스로 인하여 CO_2 흡수제의 체류시간이 길어지고, 혼합효율이 상승하며, 최종적으로 흡수제를 분리할 수 있는 볼텍스튜브의 장점에 착안한 것이다. CO_2를 흡수한 흡수제는 사이클론과 동일한 원리로 고온 출구 측으로 분리 배출되고, 나머지 배기가스는 열에너지를 빼앗기고 저온 출구 측으로 배출된다. 저온 측으로 배출된 저온의 가스는 공정의 냉각용으로 사용이 가능하다. 또한 볼텍스튜브를 활용하면 현재 사용되는 CO_2 흡수장치의 크기를 대폭 축소할 수 있는 장점이 있다. 현재 CO_2 흡수에 사용되는 장치는 대형의 흡수탑 공정을 사용하고 있으나, 흡수탑 공정은 설치비용과 상당한 공간을 필요로 한다. 볼텍스튜브를 CO_2 흡수장치에 적용하면 동일한 처리용량의 기존 흡수탑 크기 대비 약 1/5로 장치의 축소가 가능하다. 따라서 대형

흡수탑의 단점인 설치비의 절감이 가능하고 운전 및 제어의 간편성으로 인하여 상당한 에너지 절감효과를 기대할 수 있을 것이다. 본 연구의 목적은 볼텍스튜브를 CO_2 흡수공정에 적용하기에 앞서, 볼텍스튜브의 기본적인 에너지분리특성을 파악하고 장치 설계를 위한 기초 자료를 구축하는 것이다.

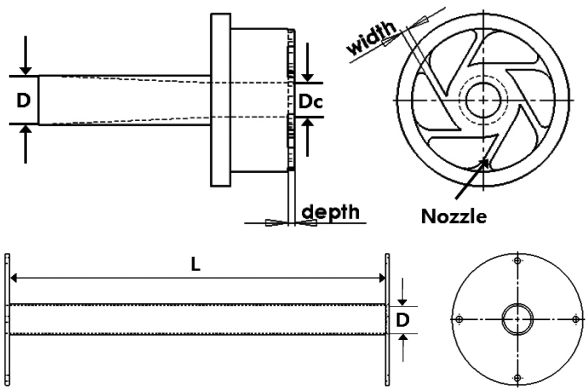
2. 볼텍스튜브 설계 및 실험방법

2.1. 볼텍스튜브의 설계 및 제작

본 연구의 대상인 볼텍스튜브의 구성은 볼텍스를 생성하는 볼텍스 발생기(vortex generator), 저온 출구와 고온 출구를 포함하는 튜브, 그리고 유량을 조절해주는 트로틀밸브(throttle valve)로 구성되어 있다. 트로틀밸브는 고온 가스 출구 측에 배치되며 Figure 2(a)와 같이 원추의 형상을 하고 있으며 60°의 내각을 가지고 있다. 볼텍스 발생기는 튜브 외경에 접선 방향으로 6개의 노즐을 가공하였고, 이를 통하여 볼텍스가 튜브 내에 형성된다. 본 연구에 적용된 모델은 튜브의 직경(D)을 기준으로 노즐의 면적비 ($AR=4An/\pi D^2$), 오리피스 직경(Dc) 및 튜브의 길이(L)를 Table 1과 같이 설계하였다. 여기서 An은 Figure 2(b)에 표시된 6개 노즐부의 총 단면적이다. 본 연구에



(a) Vortex tube



(b) Vortex generator and tube

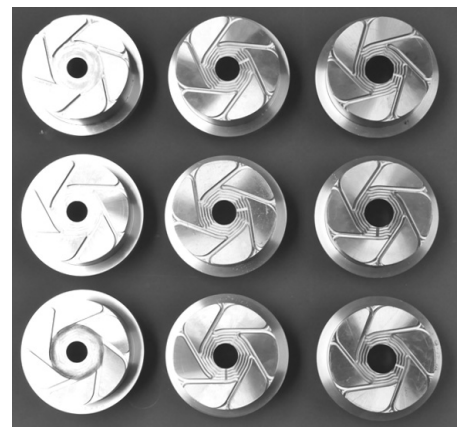
Figure 2. Schematic diagram of the vortex tube.

Table 1. Design parameters of the vortex tube

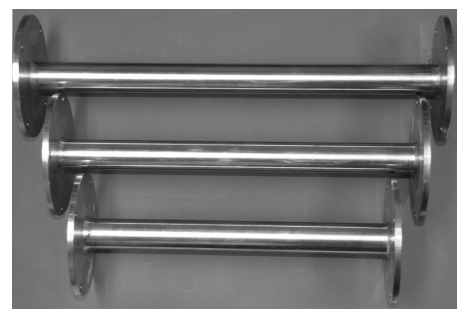
Parameter	Symbol [unit]	Dimension
Tube Diameter	D [mm]	27
Nozzle area ratio	AR [-]	0.12, 0.14, 0.16
Orifice diameter	Dc [mm]	0.6D, 0.7D, 0.8D
Tube length	L [mm]	12D, 14D, 16D

사용된 볼텍스튜브의 기본 형태 및 설계 변수의 범위는 기존 연구[12]의 실험 결과를 바탕으로 100 Nm^3/hr급에 타당하도록 재설계되었다.

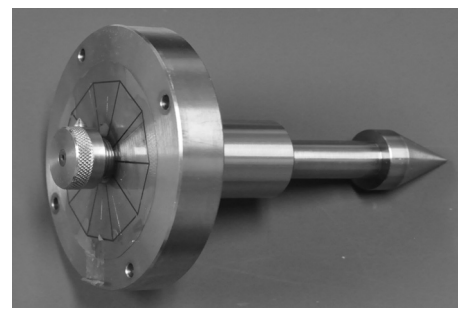
Figure 3은 제작된 볼텍스튜브의 각 요소부품을 보여주고 있다. Figure 3(a)는 제작된 9종의 볼텍스 발생기이며, 3가지의 오리피스 직경과 3가지의 노즐면적비를 조합하여 제작하였



(a) Vortex generator



(b) Tube



(c) Throttle valve

Figure 3. Vortex tube.

다. Figure 3(b)는 길이별 튜브를 보여주고 있다. 특히 Figure 3(c)는 트로틀밸브와 조절나사 결합부를 보여 주고 있다. 여기서 눈금이 달린 조절밸브를 1회전하면 원추형상의 트로틀밸브가 튜브의 축방향으로 1 mm씩 이동하도록 제작하였다.

2.2. 실험 장치 및 방법

볼텍스튜브의 에너지분리효과를 실험하기 위하여 Figure 4와 같이 압력센서, 온도센서 및 유량계를 공기압 입구, 저온출구 및 고온출구 측에 각각 설치하였으며, 정상상태에 도달하는 시간을 단축하기위하여 단열재로 볼텍스튜브를 단열하였다. 가압공기는 20마력급 컴프레서와 1,500 liter의 공기탱크를 연결하여 일정한 공급압력을 유지하였다. 볼텍스튜브를 SUS304로 가공하였기 때문에 공기압을 공급한 후 약 10분 이상의 정상화 시간이 요구되었다. 입구부의 공급압력은 압력레귤레이터로 조절하였으며 게이지압력으로 100 kPa을 설정하고 입구 및 출구부의 온도와 압력을 측정하였다.

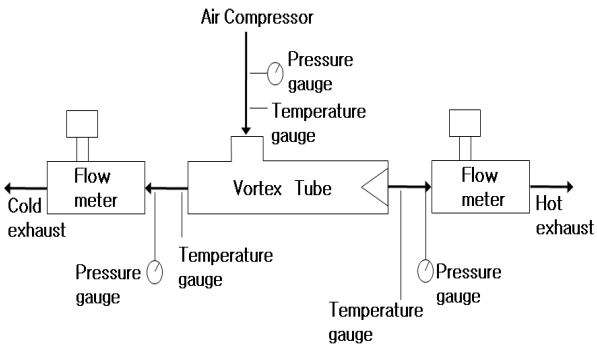


Figure 4. Schematic diagram of the vortex tube test rig.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 오리피스 직경 변경에 따른 에너지분리

본 연구에 사용된 볼텍스튜브는 볼텍스 발생기에 가공된 6개 노즐을 통하여 강력한 스월 속도를 유발하는 장치이다. 특히 중요한 설계 변수중의 하나는 저온의 공기가 분리되는 오리피스의 직경(Dc)이다. 오리피스의 직경이 과도하게 크면 6개의 노즐에서 나온 공기가 저온 측으로 직접 배출되고, 에너지분리를 발생시키는 경계면을 축소시키기 때문에 에너지분리 성능이 저하될 것이다. 반대로 오리피스 직경이 과도하게 작으면 유동의 저항으로 작용할 것이다.

Figure 5는 볼텍스튜브의 오리피스 직경 변경에 따른 성능실험을 수행한 결과이다. Figure 5의 수평축 및 수직축에 표현된 저온유량비, 온도비 및 열전달률의 정의는 다음과 같다.

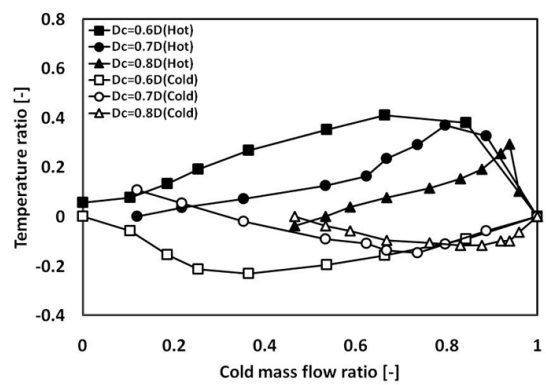
$$\text{Cold mass flow ratio} = \frac{\dot{m}_{\text{low ex}}}{\dot{m}_{\text{total}}} \quad (1)$$

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

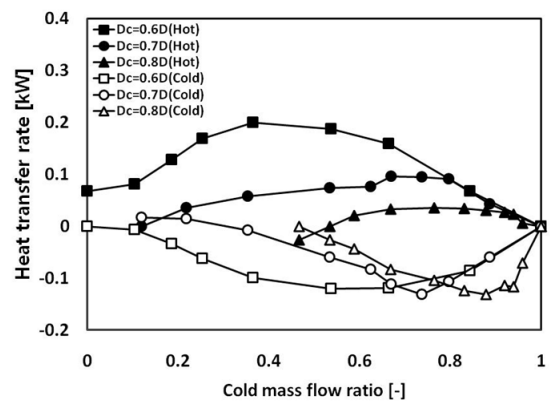
$$\text{Heat transfer rate} = \dot{m}_{ex} C_P (T_{ex} - T_{in}) \quad (3)$$

여기서 $\dot{m}$는 공기의 질량유량, T는 온도, C_P는 공기의 정압비열을 나타낸다. 첨자 ex는 출구, in은 입구, low ex는 저온 측 출구, 그리고 total은 전체를 의미한다. 저온유량비는 전체 공기유량 대비 저온 측으로 토출되는 공기유량의 비로서 저온유량비가 1.0이 되면 고온 측의 트로틀밸브가 닫혀 저온 측으로만 유동이 발생함을 의미한다. 온도비는 입구온도를 기준으로 한 출구온도차의 비율이다. 열전달률은 입구와 출구의 온도차에 유동질량을 곱한 값으로 분리된 단위시간당의 열에너지량을 의미한다.

Figure 5는 볼텍스튜브의 길이가 직경의 12배이고 노즐 면적비가 0.14일 때, 오리피스 직경 변화에 따른 출구 측의 온도비 및 열전달률 변화 특성을 나타내고 있다. Figure 5(a)에서 오리피스 직경 0.6D를 가지는 볼텍스튜브의 경우에 저온유량비가 0에서 0.7까지 증가함에 따라 고온 측 출구온도가 증가하며, 저온유량비 0.7부근에서 최대 온도를 나타낸다. 저온



(a) Temperature ratio



(b) Heat transfer rate

Figure 5. Energy separation Characteristics according to the orifice diameter variation (L = 12D, AR = 0.14).

유량비가 0.7이상 증가하면 다시 온도비가 감소한다. 이와 반대로 저온 출구 측 온도는 저온유량비가 증가함에 따라 감소하다가 저온유량비 0.4부근에서 최소 온도를 나타내며 저온유량비가 0.4보다 증가하면 온도비가 다시 증가한다. 이러한 경향은 문헌에 보고된 일반적인 볼텍스튜브의 온도분리 특성과 잘 일치한다[12].

오리피스의 직경이 튜브지름의 0.7배 (Dc=0.7D) 및 0.8배 (Dc=0.8D)로 증가할수록 에너지가 분리되는 저온 유량비 구간이 축소됨을 볼 수 있다. 이것은 오리피스 직경이 증가하고 고온 측으로의 유량이 많아지면, 에너지분리의 원동력이 되는 볼텍스의 생성 영역을 축소하고 에너지교환이 되는 경계면의 면적을 축소하기 때문인 것으로 사료된다. 이와 같이 에너지분리 영역이 축소되면서 최대 및 최소 온도비는 저온유량비가 높은 쪽으로 이동된다.

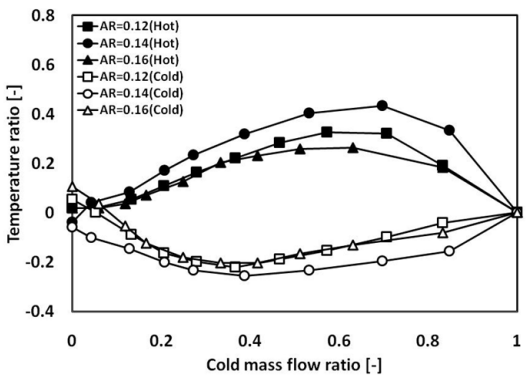
하지만 이러한 볼텍스튜브를 적용하기 위해서는 온도 자체보다는 배출되는 에너지의 량이 더욱 중요하다. Figure 5(b)는 오리피스 직경 변화에 대한 열전달률의 변화를 나타내고 있다. 주목할 점은 출구에서의 최대 온도비와 최대 열전달률이 각기 다른 저온유량비에서 발생하고 있다는 것이다. 즉, 오리피스 직경이 0.6D인 경우, 더 많은 열량을 얻기 위해서 최대 온도비인 저온유량비 0.7에서 작동하는 것보다 최대 열전달률이 발생하는 저온유량비 0.4 부근에서 작동하는 것이 바람직하다.

3.2. 노즐면적비 변경에 따른 에너지분리

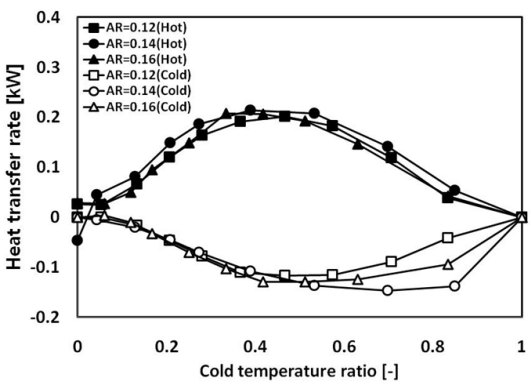
볼텍스튜브에서 에너지분리특성에 영향을 미치는 또 다른 설계 인자중의 하나는 볼텍스 발생기의 노즐면적비(AR)이다. Figure 6은 튜브길이가 튜브직경의 14배이고 오리피스의 직경이 튜브직경의 0.6배인 경우의 실험결과를 보여주고 있다. Figure 6(a)의 온도비 변화의 경우에, 노즐면적비가 0.14인 경우가 고온 및 저온 출구 측에서 가장 우수한 온도비 변화를 보이고 있다. 하지만 Figure 6(b)에서 노즐면적비에 따른 열전달률 변화는 고온 측과 저온 측 모두에서 미미하다. 단지 저온유량비 0.5이상의 저온 측 열전달률은 AR=0.14일 경우가 가장 우수하다. 따라서 노즐면적비의 변화는 저온 측 토출유량이 많은 경우의 저온 측 열전달률을 제외하면 에너지분리에 미치는 영향은 미미하다.

3.3. 튜브길이(L) 변경에 따른 에너지분리

볼텍스튜브의 길이는 튜브 설계의 또 다른 성능 변수이다. 볼텍스튜브의 길이가 길수록 에너지분리를 위한 충분한 공간이 확보되는 장점이 있으나 너무 길면 제작 및 장착시 문제의 소지가 있기 때문에 유사한 성능이면 짧은 길이를 갖는 것이 유

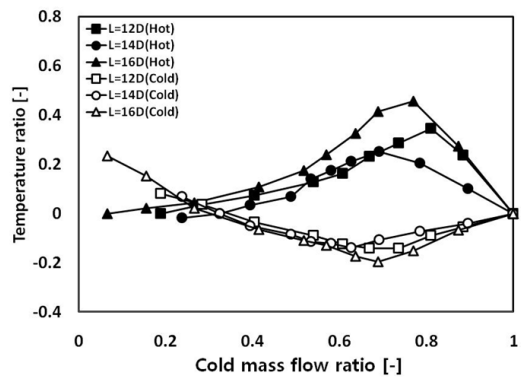


(a) Temperature ratio

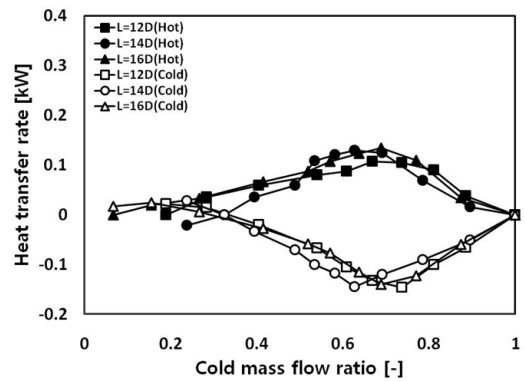


(b) Heat transfer rate

Figure 6. Energy separation characteristics according to the nozzle area ratio variation (L = 14D, Dc = 0.6D).



(a) Temperature ratio



(b) Heat transfer rate

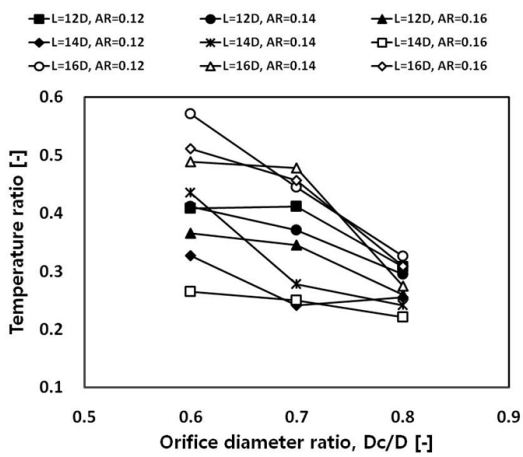
Figure 7. Energy separation characteristics according to the tube length variation (Dc = 0.7D, AR = 0.16).

리하다. Figure 7은 오리피스 직경이 튜브직경의 0.7배이고 노즐면적비가 0.16일 경우에 볼텍스튜브 길이변화에 따른 성능 실험결과를 보여주고 있다. Figure 7(a)에서 볼텍스튜브의 길이가 길어질수록 고온 측 온도가 상승하고 저온 측 온도가 미미하게 강하하는 것을 볼 수 있다. 즉, 저온 측보다 고온 측의 온도 변화가 더 큰 것을 알 수 있다. 하지만 Figure 7(b)의 열전달률은 저온과 고온 측 모두 볼텍스튜브의 길이 변화에 크게 영향을 받지 않음을 보여주고 있다. 이는 튜브의 길이 증가가 에너지분리의 메카니즘에 미미한 영향을 미치고 있음을 의미한다.

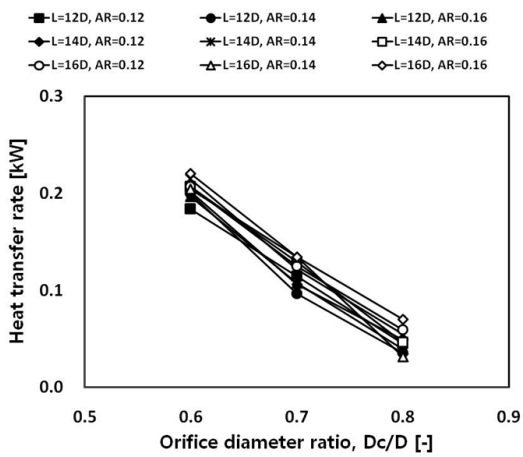
3.3. 최대 온도비 및 열전달률

Figure 8은 고온 측 및 저온 측의 최대 온도비를 도시화 한 그림이다. 실험에 사용된 성능 변수 중에서 오리피스 직경이 최대 온도비에 가장 큰 영향을 미치는 성능 변수이다. 오리피스 직경이 증가할수록 온도비와 열전달률이 감소하였다. 특히 열전달률은 오리피스 직경비 변화에 대하여 선형적인 변화를 보이고 있다.

최대 온도비는 오리피스 직경과 노즐면적비가 작고 튜브길이가 긴 모델(Dc=0.6D, AR=0.12, L=16D)에서 발생하였다. 최대 열전달률은 오리피스 직경이 작고 노즐면적비와 튜브길이가 긴 모델(Dc=0.6D, AR=0.16, L=16D)에서 발생하였으며, 이 값은 최소 열전달률이 발생하는 모델(Dc=0.8D, AR=0.14, L=16D)의 6배에 해당하는 값이다.

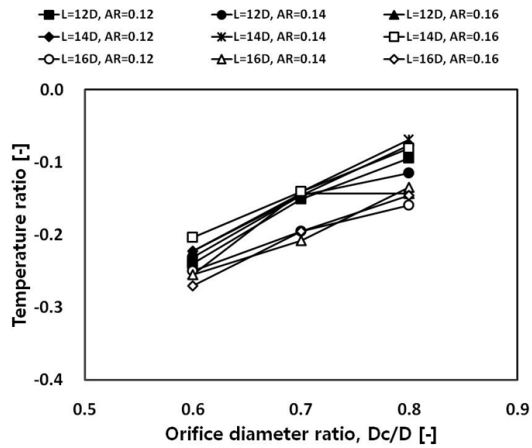


(a) Maximum temperature ratio

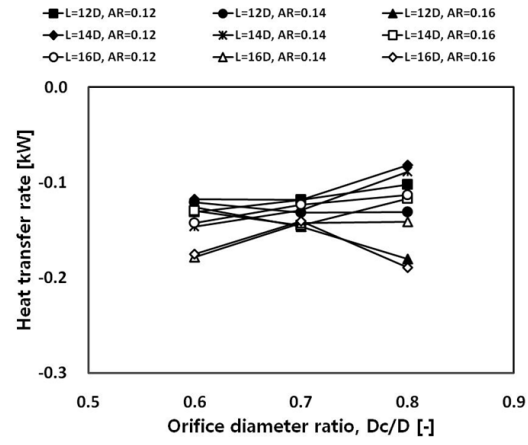


(b) Heat transfer rate

Figure 8. Maximum temperature ratio and heat transfer rate of the hot exit.



(a) Minimum temperature ratio



(b) Heat transfer rate

Figure 9. Maximum temperature ratio and heat transfer rate of the cold exit.

Figure 9는 저온 측 출구로 토출되는 공기의 최소 온도비와 열전달률의 실험결과를 나타내고 있다. Figure 9(a)의 온도비는 오리피스 직경이 가장 지배적인 성능인자이고, 고온 측 열전달률과 유사하게 오리피스 직경에 선형적인 특성을 보이고 있다. 튜브의 길이와 노즐면적비는 상대적으로 미미한 영향을 미치고 있다. 하지만 Figure 9(b) 열전달률 변화의 경우에는 특정한 경향을 파악하기 어려우나 노즐면적비가 크고 튜브의 길이가 긴 모델(L=16D, AR=0.16)이 오리피스 직경비와 무관하게 우수한 성능을 보이고 있다.

4. 결 론

CO_2 흡수용으로 적용될 100 Nm^3/hr급 볼텍스튜브를 설계

및 제작하였으며, 에너지분리특성 실험을 수행하였다. 볼텍스 튜브와 볼텍스 발생기의 설계 변수에 대한 에너지분리특성의 영향을 실험적으로 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 노즐 면적비와 튜브 길이 대비 오리피스 직경의 변화가 볼텍스튜브의 성능에 지배적인 영향을 미치는 설계인자이며, 오리피스 직경이 작을수록 고온 출구 측의 열전달률이 상승하고, 저온 출구 측의 온도가 감소하였다. 고온 측의 최대 열전달률과 저온 측의 최소 온도비는 오리피스의 직경변화에 대하여 선형적으로 변화하였다.
2) 노즐 면적비 및 튜브 길이는 열전달률에 미치는 영향은 미미하였지만, 온도비에는 상당한 영향을 미친다. 수행된 조건중에서 L=14D와 Dc=0.6D인 경우에는 노즐면적비가 0.14인 경우가 우수한 온도비 및 열전달률 성능을 나타내었다.
3) 저온 출구 측과 고온 출구 측의 열에너지를 모두 사용하고자 한다면, 오리피스 직경이 작고(Dc=0.6D), 노즐면적비가 중간이상(AR=0.14~0.16)이며, 튜브길이가 긴 모델(L=16D)을 사용하는 것이 바람직하다.

본 연구의 결과는 CO_2 흡수공정에서 흡수탑을 대신할 수 있는 볼텍스튜브의 기초 성능에 대한 것이다. 본 결과를 기초로 볼텍스튜브를 적용한 공정의 설계가 현재 진행 중에 있으며, 기존의 흡수탑 대비 상당한 공간과 에너지 저감효과가 있을 것으로 사료된다.

감 사

본 연구는 에너지관리공단의 에너지·자원기술 개발사업의 연구과제로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Hilsch, R., "The Use of the Expansion of Gases in a Centrifugal Field as Cooling Process," *Rev. Sci. Instrum.*, **18**(2), 108-113 (1947).
2. Ahlborn, B. and Gordon, J., "The Vortex Tube as a Classic Thermodynamic Refrigeration Cycle," *J. Appl. Phys.*, **88**(6), 3645-3653 (2000).
3. Lewins, J., and Bejan, A., "Vortex Tube Optimization Theory," *Energy*, **24**, 931-943 (1999).
4. Piralishvili, S., and Fuzeeva, A., "Similarity of the Energy-Separation Process in Vortex Ranque Tube," *J. Eng. Phys. Thermodyn.*, **79**(1), 27-32 (2006).
5. Saidi, M., and Allaf Yazdi, M., "Energy Model of a Vortex Tube System with Experimental Results," *Energy*, **24**, 625-632 (1999).
6. Ahlborn, B., and Groves, S., "Secondary Flow in a Vortex Tube," *Fluid Dyn.. Res.*, **21**, 73-86 (1997).
7. Dincer, K., Baskaya, S., Uysal, B., and Ucgul, I., "Experimental Investigation of the Performance of a Ranque-Hilsch Vortex Tube with regard to a Plug Located as the Hot Gas," *Int. J. Refrig.*, **32**, 87-94 (2009).
8. Peng, W., Hoffmann, A., Dries, H., Regelink, M., and Stein, L., "Experimental Study of the Vortex End in Centrifugal Separator: The Nature of the Vortex End," *Chem. Eng. Sci.*, **60**, 6919-6928 (2005).
9. Aydin, O., and Baki, M., "An Experimental Study on the Design Paramenters of a Counterflow Vortex Tube," *Energy*, **31**, 2763-2772 (2006).
10. Li, X., Yan, H., Meng, J., and Li, Z., "Visualization of Longitudinal Vortex Flow in an Enhanced Heat Transfer Tube," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, **31**, 601-608 (2007).
11. Aljuwayhel, N. F., Nellis, G. F., and Klein, S. A., "Parametric and internal study of the vortex tube using a CFD model," *Int. J. Refrig.*, **28**, 442-450 (2005).
12. Oh, D. J., "An Experimental Study on the Characteristics of a Low Pressure Vortex Tube," Doctoral Dissertation, Chungnam National University, Daejeon, Korea, 2003.