자동차 배기계 적용을 위한 와류 튜브의 개발

이준순*, 박성영**
*공주대학교 기계자동차공학부
**공주대학교 생산기술연구소
e-mail : sungyoung@kongju.ac.kr

Development of the Vortex Tube for Automotive Exhaust System

Junsun Lee* and Sung-Young Park**
*Div. of Automotive & Mechanical Engineering, Kongju National University
**Industrial Technology Research Institute, College of Engineering, Kongju National University

요 약

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. 튜브길이가 성능에 미치는 영향은 미미하였다.

1. 서론

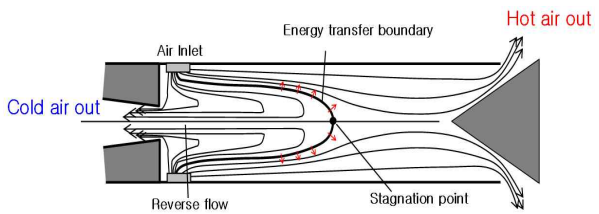
일명 Ranque-Hilsch 볼텍스 튜브라고도 불리는 볼텍스 튜브는 관내에 고압의 기체를 분사하여 생기는 볼텍스를 이용하여 공급된 기체를 저온과 고온의 기체로 분리해 낼 수 있는 장치이다. 저온의 공기는 기존의 냉각기들에 비해 성능은 떨어지지만 고압의 가스를 사용하는 장소라면 별도의 동력원을 필요로 하지 않고, 저온과 고온의 공기를 동시에 얻을 수 있다는 점과 조작이 단순하며 응답성이 빠르다는 점에서 그 효과가 기대되고 있다. 볼텍스 튜브는 강력한 와류 유동을 생성하므로 고온의 공기와 저온의 공기를 분리할 뿐만 아니라, 입자상 물질의 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, 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 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 그림 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 강체 회전에 가까운 강제 볼텍스을 형성하며, 튜브의 벽면에서는 강제 볼텍스에 의한 자유 볼텍스가 생성된다. 이때 자유 볼텍스는 축방

향의 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 출구측으로 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 출구측으로 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 강하하게 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.



[그림 1] Energy separation principle of the vortex tube

본 연구에서 적용된 볼텍스 튜브는 자동차에서 발생하는 배기가스 및 입자상 물질(PM)을 동시에 분리하기위해서 설계된 모델이다. 이는 튜브 내에서 발생하는 볼텍스와 배기가스의 수분을 활용하여 NOx 성분을 저감하고, 입자상 물질을 분리할 수 있는 볼텍스 튜브의 장점에 착안한 것이다. 입자상 물질은 사이클론과 동일한 원리로 고온 출구 측으로 분리 배출되고, 나머지 배기가스는 열에너지를 빼앗기고 저온 출구측으로 배출된다. 본 연구의 목적은 배기가스 저감 장치에 적용하기 위한 볼텍스 튜브의 에너지 분리 성능 특성을 파악하고 설계를 위한 기초 자료를 구축하는 것이다.

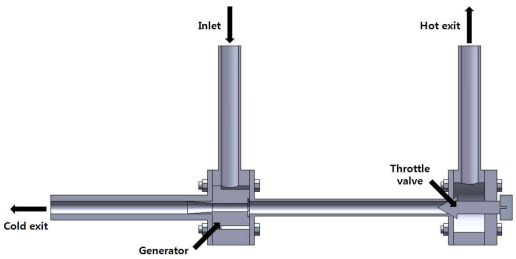
2. 볼텍스 튜브의 설계 및 실험 방법

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 표 1과 같이 설계하였다. 트로틀 밸브는 고온 가스 출구측에 배치되며 그림 2와 같이 원추의 형상을 가지고 있으며 60°의 내각을 가지고 있다. 특히 트로틀 밸브의 끝에 조절나사를 결합하여, 조절나사를 1회 전하면 원추형상의 트로틀 밸브가 튜브의 축 방향으로 1mm씩 이동하도록 제작하였다. 볼텍스 발생기는 튜브 외경에 접선 방향으로 6개의 노즐을 가공하였고, 이를 통하여 볼텍스가 튜브 내에 형성된다.

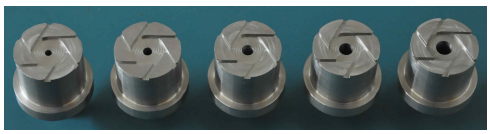
[표 1] Design parameters of the vortex tube

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

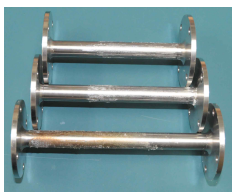


[그림 2] Schematic diagram of the vortex tube

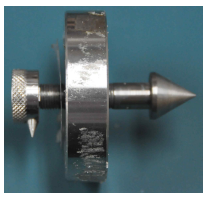
볼텍스 튜브, 발생기 및 트로틀 밸브는 SUS304로 제작되었으며, 그림 3에 제작된 볼텍스 튜브의 각 요소부품을 보여주고 있다. 그림 3(a)는 5가지의 오리피스 직경을 가진 5종의 볼텍스 발생기이며, 그림 3(b)는 길이별 튜브를 보여주고 있다.



(a) Vortex generator



(b) Tube

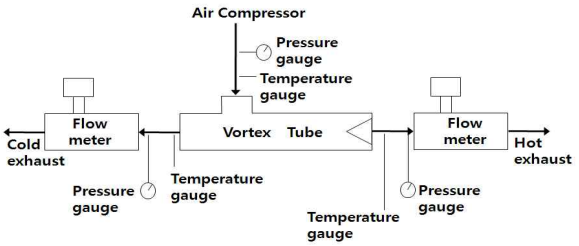


(c) Throttle valve

[그림 3] Manufactured vortex tube and generator

2.2. 실험장치 및 방법

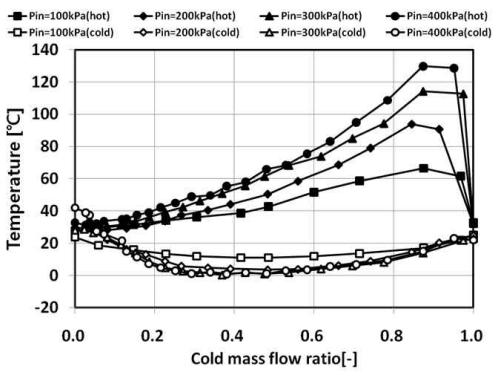
볼텍스 튜브의 에너지 분리효과를 실험하기 위하여 그림 4와 같이 압력센서, 온도센서 및 유량계를 공기압 입구, 저온출구 및 고온출구 측에 각각 설치하였으며, 정상상태에 도달하는 시간을 단축하기위하여 단열재로 볼텍스 튜브를 단열하였다. 가압공기는 20마력급 컴프레서와 3,000 liter의 공기탱크를 연결하여 일정한 공급압력을 유지하였다. 입구부의 공급압력은 압력레귤레이터로 조절하였으며 입구 및 출구부의 온도와 압력을 측정하였다.



[그림 4] Schematic diagram of the vortex tube test rig

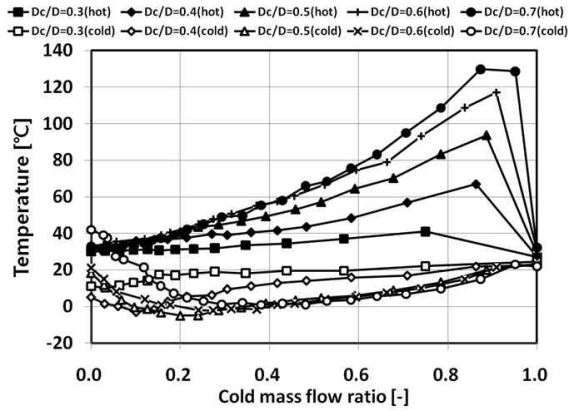
3. 실험 결과 및 고찰

그림 5는 볼텍스 튜브의 길이가 직경의 16배이고 오리피스 직경이 튜브 직경의 0.7배일 때, 공급압력 변화에 따른 출구측의 온도 특성을 나타내고 있다. 공급압력이 100kPa에서 400kPa로 상승함에 따라 고온 출구측의 온도가 상승하고 있음을 보여주고 있다. 특히 공급압력이 300kPa이상이 되면 온도의 변화가 크지 않음을 알 수 있다. 최고 온도는 저온유량비 0.9부근에서 발생한다. 최저 온도는 저온 온도 0.3에서 0.4사이에서 발생하고 있다.



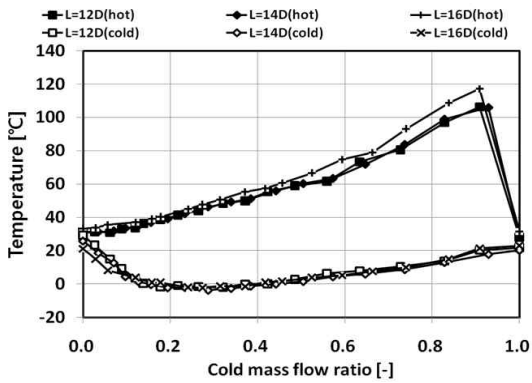
[그림 5] Temperature according to the inlet pressure variation (Dc=0.7D, L=16D)

볼텍스 튜브의 설계에서 가장 중요한 변수중의 하나는 저온의 공기가 분리되는 오리피스의 직경(Dc)이다. 그림 6은 볼텍스 튜브의 길이가 직경의 16배일 때, 공급압력 변화에 따른 출구측의 온도 특성을 나타내고 있다. 오리피스 직경이 증가함에 따라 고온 출구측의 온도가 상승하는 것을 볼 수 있다. 또한 오리피스 직경이 증가함에 따라 최대온도가 0.9 부근으로 수렴하고 있다. 저온 출구측 온도는 오리피스 직경비가 0.5까지는 감소하는 경향을 보이다가 그 이후 오리피스 직경이 커지면 일부영역에서 증가하는 경향을 보인다. 특히 저온유량비가 0.3이상에서 오리피스 직경비가 0.5이상이면 온도의 차이는 미미하다. 최저 온도는 오리피스 직경비가 0.5이고 저온유량비가 0.2에서 발생한다.



[그림 6] Temperature according to the orifice diameter variation (L = 16D, Pin=400kPa)

볼텍스 튜브의 길이는 튜브 설계의 또 다른 성능 변수 중의 하나이다. 그림 7은 오리피스 직경이 튜브직경의 0.6배인 경우에 튜브길이 변화에 따른 성능 실험결과를 보여주고 있다. 볼텍스 튜브 길이의 변화는 저온 및 고온 출구의 온도에 미미한 영향을 미치고 있다. 결론적으로 본 실험에서 수행된 튜브길이의 범위에서 튜브길이가 에너지 분리에 미치는 영향력은 미미하다.



[그림 7] Temperature according to the tube length variation (Dc=0.6D, Pin=400kPa)

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 온도차가 증가하였다
2) 오리피스 직경은 볼텍스 튜브의 성능에 지배적인 영향을 미치는 설계인자이며, 오리피스 직경이 클수록 출구측의 온도차가 크게 증가하였다. 하지만, 본 연구에서 수행한 범위 내에서 튜브 길이는 온도에 미미한 영향을 미쳤다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 그린카 등 수송시스템산업 원천기술개발사업의 연구과제로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] R. Hilsch, "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, 1947.

[2] B. Ahlborn and J. Gordon, "The Vortex Tube as a Classic Thermodynamic Refrigeration Cycle," Journal of Applied Physics Vol. 88, No. 6, pp. 3645-3653, 2000.

[3] J. Lewins and A. Bejan, "Vortex Tube Optimization Theory," Energy 24, pp. 931-943, 1999.

[4] S. Piralishvili and A. Fuzeeva, "Similarity of the Energy-Separation Process in Vortex Ranque Tube," Journal of Engineering Physics and Thermodynamics, Vol. 79, No. 1, pp. 27-32, 2006.

[5] M. Saidi and M. Allaf Yazdi, "Energy Model of a Vortex Tube System with Experimental Results," Energy 24, pp.625-632, 1999.

[6] B. Ahlborn and S. Groves, "Secondary Flow in a Vortex Tube," Fluid Dynamics Research 21, pp.73-86, 1997.

[7] K. Dincer, S. Baskaya, B. Uysal and I. Ucgul, "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, 2009.

[8] W. Peng, A. Hoffmann, H. Dries, M. Regelink and L. Stein, "Experimental Study of the Vortex End in Centrifugal Separator: The Nature of the Vortex End," Chemical Engineering Science 60, pp.6919-6928, 2005.

[9] O. Aydin and M. Baki, "An Experimental Study on the Design Paramenters of a Counterflow Vortex Tube," Energy 31, pp.2763-2772, 2006.

[10] X. Li, H. Yan, J. Meng and Z. Li, "Visualization of Longitudinal Vortex Flow in an Enhanced Heat Transfer Tube," Experimental Thermal and Fluid Science 31, pp.601-608, 2007.

[11] N.F. Aljuwayhel, G.F. Nellis, S.A. Klein, "Parametric and internal study of the vortex tube using a CFD model," International Journal of Refrigeration 28, pp.442-450, 2005.