20Nm^3/hr급 볼텍스튜브의 에너지 분리 특성 연구

김창수[1], 박성영[2*]
[1]공주대학교 일반대학원 기계공학과, [2]공주대학교 기계자동차공학부
sungyoung@kongju.ac.kr

Study on the Energy Separation Characteristics of the 20Nm3/hr Level Vortex Tube

Chang-Su Kim[1], Sung-Young Park[1*]
[1]Mechanical Engineering Dept., Graduate School, Kongju National University
[2]Div. of Automotive & Mechanical Engineering, Kongju National University

요 약

고압의 가스를 이용하여 고온 가스와 저온 가스를 분리하거나 입자상 물질의 분리에 사용할 수 있는 장치인 볼텍스 튜브의 에너지 분리 특성을 파악하기 위하여 20Nm^3/hr급 볼텍스 튜브를 제작하고 이에 대한 실험을 진행하였다. 입구 압력, 저온측의 유량비가 온도에 미치는 영향을 분석하였다. 입구 압력이 높아질수록 고온측의 온도는 증가하고, 저온측의 온도는 강하하였다. 저온 유량비 80%를 전후하여 고온측 온도가 최고점을 나타냈고, 저온유량비 40%를 전후하여 저온측 온도가 최저점을 나타냈다.

1. 서론

볼텍스 튜브는 관내에 고압의 기체를 분사하여 생기는 볼텍스를 이용, 저온과 고온의 기체로 분리해 낼 수 있는 장치이다.[1] 저온의 공기는 기존의 냉각기들에 비해 성능은 떨어지지만 고압의 가스를 사용하는 장소라면 별도의 동력원을 필요로 하지 않고 저온의 공기를 얻을 수 있고, 고온의 공기 또한 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[2]가 열역학적인 효율을 높이기 위한 다양한 실험과 이론적 연구를 시작하였기 때문에 Ranque-Hilsch 효과라고도 불린다. 볼텍스 튜브내의 에너지 분리 현상을 설명하고자 Ahlborn[3]등과 Lewins[4]등은 단순 해석식 모델을 제시하였으며, Piralishvili[5]등은 상사법칙과 차원해석을 통한 모델을 Saidi[6]등은 열역학적인 에너지 모델을 제시하였다. 실험적 연구로는 Ahlborn[7]등이 피토 튜브를 사용하여 볼텍스 튜브내의 2차 회전류를 발견하였으며, Dincer[8]등과 Hoffmann[9]등은 제어밸브 최적화를 위한 실험적 연구를 수행하였다. 볼텍스 튜브의 에너지 분리효과가 발견된 이래 많은 연구가 진행되어 왔으나, 튜브내의 복잡하고 강력한 유동으로 인하여 아직까지도 볼텍스 튜브의 원리가 완벽히 규명되지 못하고 있는 실정이다.

본 연구의 목적은 볼텍스 튜브의 에너지 분리 성능 특성과 압력 및 유량비가 볼텍스 튜브의 성능에 미치는 영향을 파악하고 설계를 위한 기초 실험 자료를 구축하는 것이다.

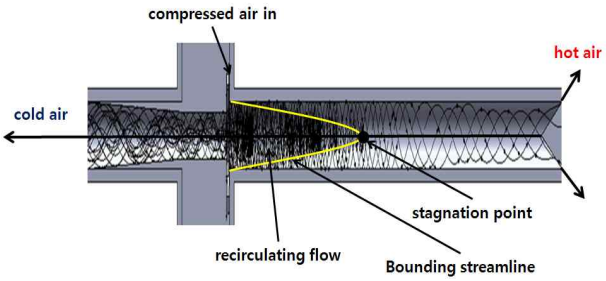
2. 본론

2.1. 볼텍스 튜브의 에너지 분리 원리

볼텍스 튜브에서 발생하는 에너지 분리에 대한 정확한 원리는 아직 명확히 밝혀지지는 않았지만, 일반적으로 그림 1에 나타난 에너지 전달의 이론으로 설명되고 있다. 입구에서 압축되어 들어온 기체가 볼텍스 발생기의 접선방향 노즐부를 거치면서 강력한 와류를 생성하고, 고온 출구쪽으로 진행한다.

볼텍스 튜브의 축방향으로 일정 거리를 지나면서 볼텍스의 강도가 저하되고, 저온 출구 측으로 배출되는 유동이 튜브의 중앙부에서부터 발생되게 된다. 이때 튜브의 중심선 상에 유동이 일시적으로 정지하는 정체점이 발생하게 된다. 이러한 정체점을 꼭지점으

로 종 모양의 역류 유동이 저온 출구 측으로 발생하게 되며, 이 종 모양의 표면이 에너지 전달과 운동량 전달의 교환이 이루어지는 경계면으로 작용하게 된다. 이러한 경계면에서 운동량의 전달이 에너지의 전달보다 크기 때문에 벽면 부근의 유동 유체의 온도는 상승하게 되고 튜브 중심부의 온도는 더욱 강하하게 되어 에너지 분리가 발생한다.



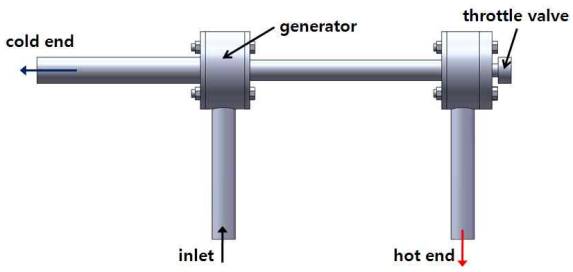
[그림 1] 볼텍스 튜브의 에너지 분리 원리 개략도

2.2 실험 모델 및 조건

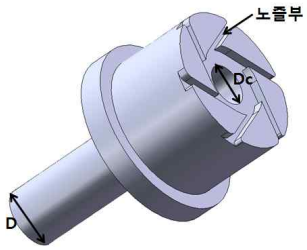
본 연구의 대상은 20Nm^3/hr급 볼텍스 튜브이며, 볼텍스 튜브의 구성은 볼텍스를 생성하는 볼텍스 발생기, 저온 출구와 고온 출구를 포함하는 튜브, 그리고 유량을 조절해주는 트로틀 밸브로 구성되어 있다. 트로틀 밸브는 고온 가스 출구 측에 배치되며 그림 2와 같이 원추의 형상을 가지고 있으며 60°의 내각을 가지고 있다. 볼텍스 발생기는 튜브 외경에 접선 방향으로 가공된 6개의 노즐을 가지고 있고, 이를 통하여 볼텍스가 형성된다. 본 연구에 적용된 모델은 튜브의 직경(D) 10, 12, 14mm를 기준으로 노즐의 면적비 (AR=4An/π D^2), 오리피스 직경(Dc) 및 튜브의 길이(L)를 표 1과 같이 설계하였다. 여기서 An은 그림 2에 표시된 6개 노즐부의 총 단면적이다. 이와 같은 설계를 바탕으로 그림 3의 볼텍스 튜브를 제작하고 실험을 진행하였다. 이 때, 고온측과 저온측의 유량비를 조절하기 위하여 트로틀 밸브 1회전에 1mm의 길이 변화를 가질 수 있도록 제작하였다.

[표 1] 볼텍스 튜브의 제원

Parameter	Symbol [unit]	Dimensions
Tube Diameter	D [mm]	10, 12, 14
Nozzle area ratio	AR [-]	0.14
Orifice diameter	Dc [mm]	0.7D
Tube length	L [mm]	14D



(a) 볼텍스 튜브



(b) 볼텍스 발생기

(c) 트로틀 밸브

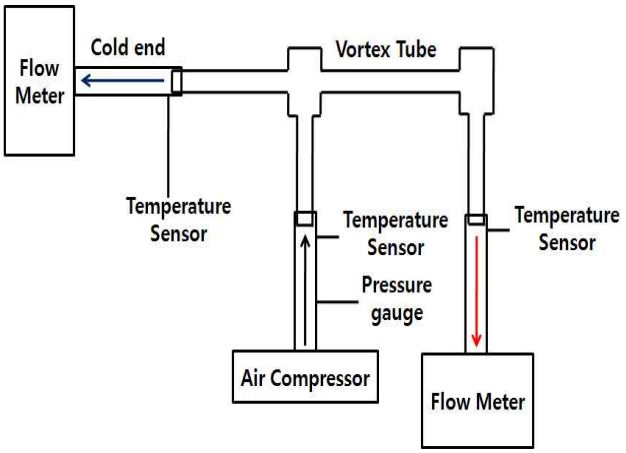
[그림 2] 볼텍스 튜브의 주요 부품

(a) Vortex tube

(b) Vortex generator

[그림3] 볼텍스 튜브 시제품

그림 4는 볼텍스 튜브 실험 장치 개략도로 입구측에 150마력의 컴프레서를 연결하였으며, 양쪽 출구측에 유량비를 측정하기 위하여 분당 500L 용량의 Flow Meter를 설치하였다. 또한 온도 측정을 위하여 입구와 각 출구측에 온도 센서를 장착하였다.

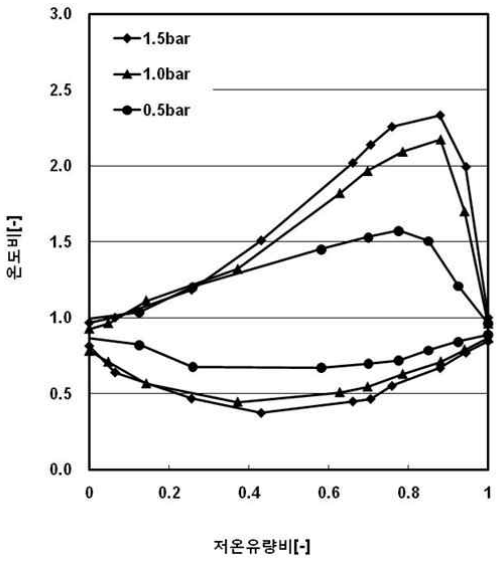


[그림4] 볼텍스 튜브 실험 장치 개략도

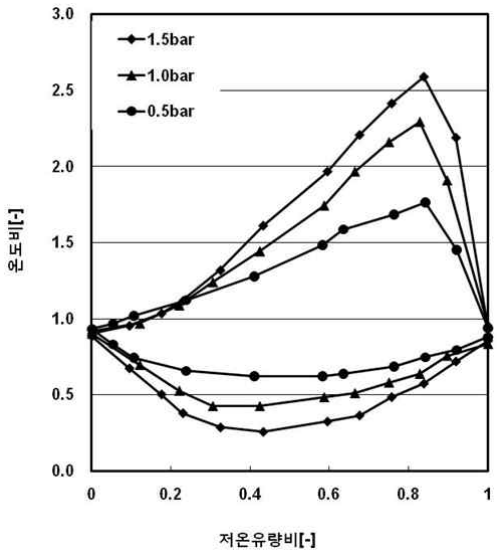
실험 방법은 입구 압력 조건과 유량비와의 관계를 알아보기 위해 입구의 압력을 0.5bar부터 1.5bar까지 0.5bar단위로 입구 압력을 조절하면서 트로틀 밸브로 저온측의 유량비를 조절하였다. 실험시 일정시간 동안 온도 안정화 시간을 가졌으며 반복 실험을 통해 그 평균값을 계산하였다.

3. 실험 결과

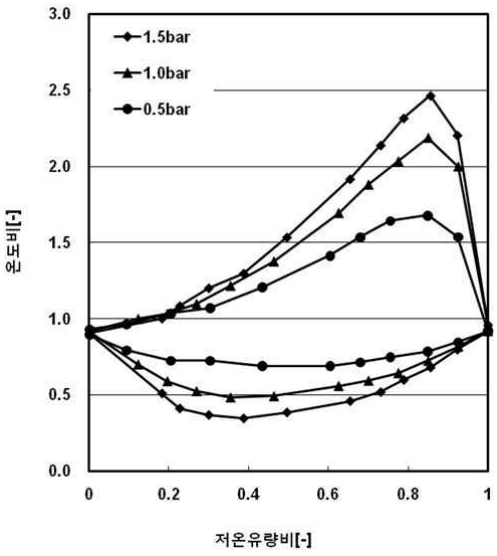
그림 5는 튜브 지름별 입구 압력 조건에 따른 온도비를 그래프로 나타낸 것이다. 온도비는 고온측과 저온측의 온도를 입구 온도로 나눠준 무차원수이다. 그래프에서 보이는 바와 같이 볼텍스 튜브 직경에 따라 상승폭이 약간의 차이가 있지만 세 가지 튜브에서 동일하게 입구측의 압력이 증가할수록 고온측의 온도비는 높은 상승폭을 보이는 반면 저온측의 경우 입구 압력이 증가함에 따라 온도비가 높아지긴 하지만 고온측의 온도비에 비해 미미하게 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 고온측의 경우 저온유량비 80%부근에서 최고점을 나타내고 있고, 저온측의 경우 저온유량비 40%부근에서 최저점을 나타내었다.



(a) D=10mm



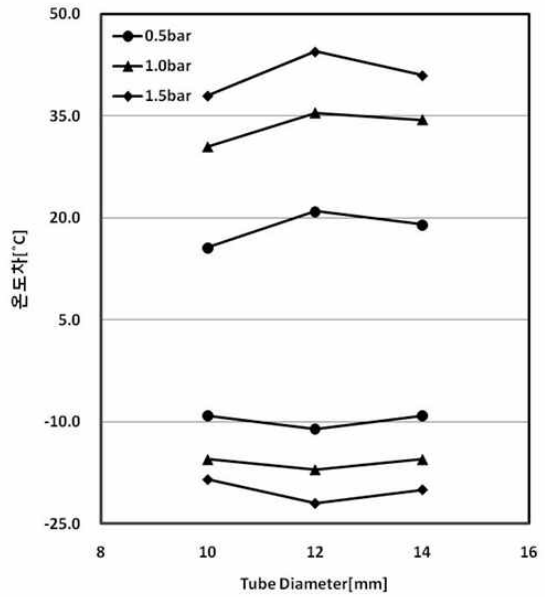
(b) D=12mm



(c) D=14mm

[그림5] 입구 압력에 따른 온도비 변화

그림 6은 입구 압력별 고온측 최대온도 및 저온측 최저온도와 입구온도의 차이를 사용하여 그래프로 나타낸 것이다. 볼텍스 튜브 직경 10mm, 12mm, 및 14mm 모두 압력이 높아질수록 온도차가 커지는 것을 확인할 수 있다. 이때 볼텍스 튜브 직경에 따라 약 3~4℃정도의 차이가 나타나게 되는데 이는 실험시 습도량과 실험오차에서 기인한 차이로 사료된다.



[그 림6] 볼텍스 튜브의 최대 및 최저 온도차

4. 결 론

20Nm^3/hr급 볼텍스 튜브의 기초 실험을 진행하며 압력과 저온유량비에 따른 고온측과 저온측의 온도비를 비교, 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 볼텍스 튜브의 입구 압력이 높아질수록 고온측의 온도는 높은 상승폭을 보이는 반면 저온측 온도의 경우 그 변화량이 미미하였다.

2) 20Nm^3/hr급 볼텍스 튜브의 모든 입구 압력 조건에서 고온측에서는 저온유량비 80%부근에서 온도가 최고값을 나타내었으며, 저온측에서는 저온유량비 40%부근에서 온도가 최저값을 나타내었다.

참고문헌

[1] S. Eiamsa and P. Promvonge, "Review of Ranque-Hilsch Effect in Vortex Tube" Renewable & Sustainable Energy Reviews 12, pp.1822-1842, 2008.

[2] 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.

[3] 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.

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

[5] 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.

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

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

[8] 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.

[9] 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.