

# 컨버징/다이버징 튜브를 적용한 에너지분리 특성

허혜성<sup>1</sup>, 김창수<sup>2</sup>, 이영선<sup>3</sup>, 박성영<sup>4</sup>

<sup>1</sup>공주대학교 공과대학 기계자동차공학부

<sup>2</sup>공주대학교 일반대학원 기계공학과,

<sup>3</sup>한국기계연구원 재료연구소

<sup>4</sup> 공주대학교 생산기술연구소

## Energy Separation Characteristics of Vortex tube with Converging/Diverging Tube

Hyaе-Seong Heo<sup>1</sup>, Chang-Su Kim<sup>2</sup>, Young-Seon Lee<sup>3</sup>, Sung-Young Park<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Div. of Automotive & Mechanical Engineering, Kongju National University

<sup>2</sup>Mechanical Engineering Dept., Graduate School, Kongju National University

<sup>3</sup>Korea Institute of Machinery & Materials

<sup>4</sup> Industrial Technology Research Institute, Kongju National University

### 요 약

볼텍스 튜브는 고압의 가스를 이용하여 고온 가스와 저온 가스로 에너지를 분리하거나 입자상 물질의 분리에 사용 할 수 있는 장치이다. 본 연구에서는 컨버징튜브( $D_{in}=10\text{mm}$ ,  $D_{out}=6\text{mm}$ )와 다이버징튜브( $D_{in}=6\text{mm}$ ,  $D_{out}=10\text{mm}$ )의 성능을 비교, 분석하였다. 기존에 제작된 베이스튜브( $D=6, 10\text{mm}$ )를 기준으로 하여 컨버징 튜브와 다이버징 튜브의 에너지분리 특성 실험을 수행하였다. 결과적으로 튜브의 입구직경보다 출구직경이 커지는 다이버징 튜브에서 우수한 성능을 확인 할 수 있었다.

### 1. 서론

일명 Ranque-Hilsch 볼텍스 튜브[1,2]라고도 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 단순하며 고온 및 저온 공기를 확실히 분리 할 수 있는 에너지 분리 특징과 응답성이 빠르다는 점에서 그 효과가 기대 되고 있다.

그림 1에 나타난 에너지 전달 이론으로 에너지 분리효과가 설명되고 있다[3]. 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 증가하여 튜브를 통해 흘러 나간다.

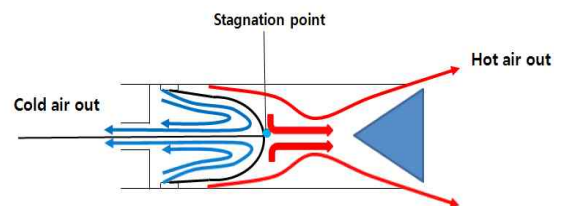


그림 1. 볼텍스 튜브의 에너지 분리 원리

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.

2. 본론

2.1. 볼텍스 튜브의 설계 및 제작

본 연구의 대상인 볼텍스 튜브는 그림 2(a) 베이스 튜브, 그림 2(b) 컨버징 튜브, 그림 2(c) 다이버징 튜브로 분류된다. 본 연구에 적용된 볼텍스 튜브는 길이(L), 오리피스 직경(Dc) 및 튜브 직경(D)을 표1과 같이 설계하였다.

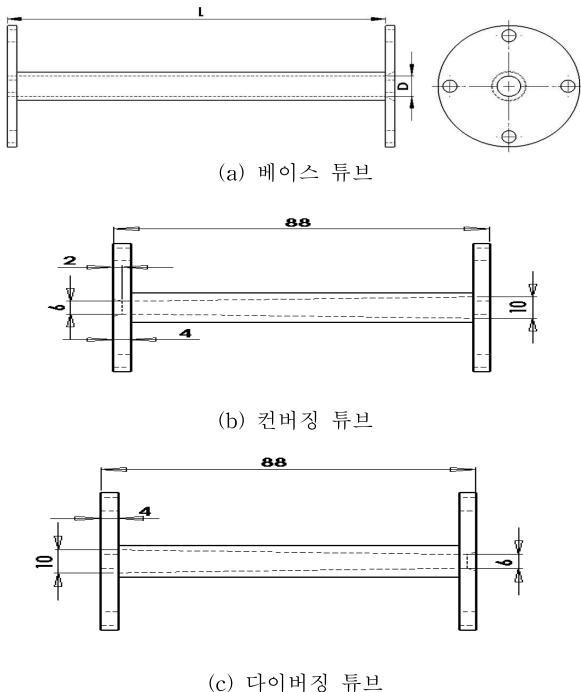


그림 2. 볼텍스 튜브 설계도면

표 1. 볼텍스 튜브의 제원 및 변수

변수	기호 [단위]	치수
튜브 직경 (입구직경/출구직경)	$D_m/D_{out}$ [mm/mm]	6/6, 6/10, 10/10, 10/6
오리피스 직경	$D_c$ [mm]	6.4
튜브길이	$L$ [mm]	88

그림 3(a)은 본 실험에 사용될 베이스 튜브의 사진이다. 그림 3(b)는 트로틀 밸브이다. 트로틀 밸브는 고온가스 출구 측에 배치되고, 60°의 내각을 가진 원추의 형상을 가지고 있다. 특히 트로틀 밸브의 끝에 조절나사를 결합하여, 조절나사를 1회전하면 트로틀 밸브가 튜브 축방향으로 1mm씩 이동하도록 제작하였다. 그림 3(c)는 볼텍스를 생성하는 볼텍스 발생기(vortex generator)의 사진이다. 볼텍스 발생기는 튜브 외경에 접선 방향으로 6개의 노즐을 가공하였고, 이를 통하여 볼텍스가 튜브 내에 형성된다.

그림 3(d)와 그림 3(e)는 본 연구에 사용된 컨버징 튜브와 다이버징 튜브의 사진이다.



(a) 베이스 튜브



(b) 트로틀 밸브



(c) 제너레이터



(d) 다이버징 튜브



(e) 컨버징 튜브

그림 3. 볼텍스 튜브 실험 장비.

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 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. 그림 5는 본 연구

에 직접 사용될 장치이다. 입구측 온도, 저온측 온도, 고온측 온도, 저온측 압력 및 고온측 압력 측정이 가능하다.

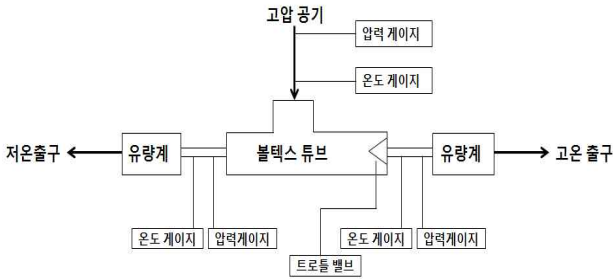


그림 4. 볼텍스 튜브 실험 개략도



그림 5. 볼텍스 튜브 실험 장치.

### 2.3 실험결과

본 연구에 사용된 볼텍스 튜브는 볼텍스 발생기에 가공된 6개 노즐을 통하여 강력한 스윙 속도를 유발하여 볼텍스를 발생시키는 장치이다. 본 연구에는 Tube직경의 변화가 에너지 분리에 미치는 효과에 대한 실험을 수행하였다. 그림 6은 볼텍스 튜브 형상에 따른 3개의 튜브를 비교한 결과 그래프이다. 그림 6의 x축은 유량비, y축은 온도차이다. 유량비와 온도차는 다음과 같이 정의된다.

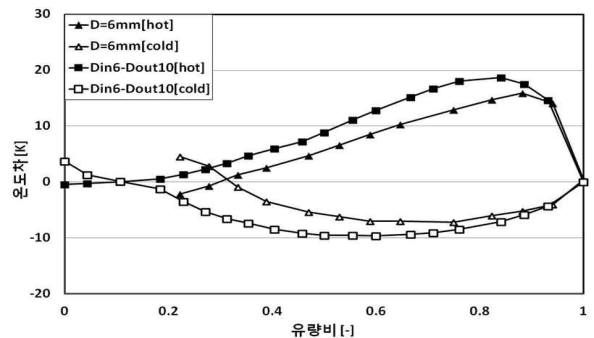
$$\text{Cold mass flow ratio} = \frac{\dot{m}_{\text{low ex}}}{\dot{m}_{\text{total}}} \quad (1)$$

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

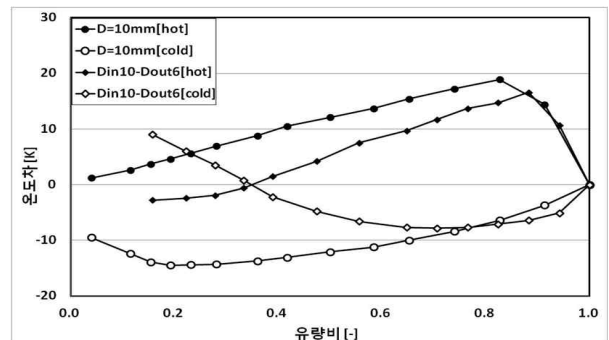
$\dot{m}$ 는 공기의 질량유량,  $T$ 는 온도를 나타낸다. 첨자 ex는 출구, in은 입구, low ex는 저온측 출구 그리고 total은 전체를 의미한다. x축의 저온유량비는 전체 공기유량 대비 저온측으로 토출되는 공기유량의 비로서 저온유량비가 1.0이 되면 고온측의 스톱 밸브가 닫혀 저온측으로만 유동이 발생함을 의미한다. y축의 온도차는 출구온도에서 입구온도의 차이를 의미한다.

그림 6(a)와 그림 6(b)는 오리피스직경과 길이가 일정한 볼텍스 제너레이터에서 볼텍스 튜브 형상에 따른 실험 결과를 나타낸다. 그림 6(a)는 형상이 두 개의 베이스 튜브와 다이버징 튜브를 비교한 그림이다. 그 결과 다이버징 튜브에서 더 우수한 효과가 나타났다. 다이버징 튜브의 고온측 최고 온도차는 유량비가 0.8부근에서 약 18K으로 나타났다. 그에 비해 베이스 튜브는 유량비가 0.9에서 고온측 최고 온도차가 약 15K으로 나타났다. 저온측 온도에서는 유량비 0.4~0.5 부근에서 다이버징 튜브가 더 낮은 온도차를 나타냈다. 결과적으로 베이스 튜브보다 다이버징 튜브에서 온도차 결과 값이 더 우수하였다.

그림 6(b)는 베이스 튜브와 컨버징 튜브의 결과를 비교한 그래프이다. 그림 6(b)는 베이스 튜브 온도차가 컨버징 튜브대비 더 높은 결과 값이 나타났다. 베이스 튜브의 고온측 최고 온도차는 유량비 0.8부근에서 약 18K이 발생하였다. 컨버징 튜브는 유량비가 0.9부근에서 약 15K로 발생하였다. 저온측 최고 온도차의 경우 베이스 튜브는 유량비 0.2부근에서 저온측 최저 온도차는 약 -15K 값이 나타난 반면 컨버징 튜브는 저온측 최저 온도차가 유량비 0.7부근에서 약 -9K로 나타났다. 결과적으로 베이스 튜브에서 더 우수한 에너지분리 효과가 나타났다.



(a) 베이스튜브 D=6mm 및 다이버징튜브 Din=6mm, Dout=10mm 비교



(b) 베이스튜브 10mm 및 컨버징튜브 Din=10mm, Dout=6mm 비교  
그림 6. 저온유량비에 따른 온도차

4. 결론

공급압력이 일정한 조건에서 볼텍스 튜브 형상에 따른 에너지분리 특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 볼텍스 튜브의 형상에 따른 실험결과, 다이버징 튜브에서 우세한 온도차 결과 값이 발생하였다.
- 2) 다이버징 튜브와 베이스 튜브의 유량에 따른 압력을 비교 분석한 결과, 다이버징 튜브의 고온측 압력이 베이스 튜브보다 열세한 결과를 나타내었다. 베이스 튜브와 다이버징 튜브의 입구직경이 동일한 경우, 저온측 압력은 동등하게 나타났다. 그러나 서로 다른 출구직경에서는 베이스 튜브가 다이버징 튜브보다 약 20hpa 우세한 결과를 보였다.
- 3) 컨버징 튜브와 베이스 튜브의 유량에 따른 압력을 비교 분석한 결과, 베이스 튜브가 컨버징 튜브 대비 고온측 및 저온측 압력 모두에서 낮은 결과를 보였다.

후기

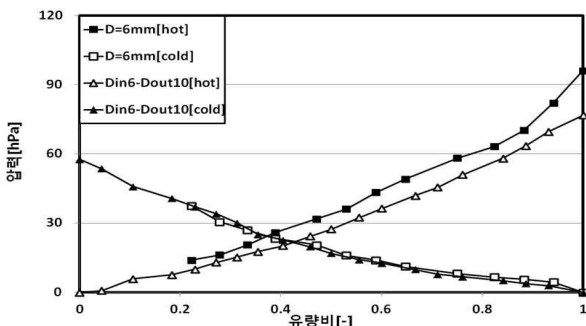
본 연구는 산업기술연구회 협동연구사업(B551179-11-02-00)의 지원으로 수행된 결과임.

참고 문헌

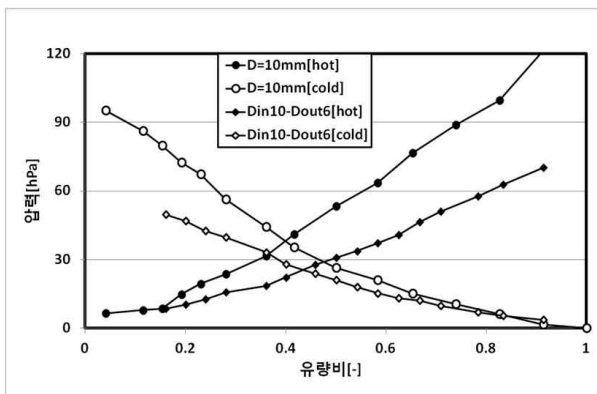
- [1] M. G. Ranque, "Experiences Sur La Detente Giratoire Avec Production Simulanees D'un Echappement D'air chaud Et D'un Echappement d'air Froid", J. Phys. Radium, Vol. 7, No. 4, pp.112-114, 1933
- [2] R. Hilsch, "The Use of the Expansion of Gases in a Centrifugal Field as Cooling Process," The Review of Scientific Instruments, Vol. 18, No. 2, pp.108-113, 1947.
- [3] N. F. Aljuwayhel, et al., "Parametric and Internal Study of the Vortex Tube Using a CFD Model", International Journal of Refrigeration 28, pp.442-450, 2005.

그림 7(a)는 저온유량에 따른 베이스 튜브(D=6mm)와 다이버징 튜브(D<sub>in</sub>=6mm, D<sub>out</sub>=10mm)에 대한 압력 값을 비교한 그래프이다. 베이스튜브에서 고온측 압력 값이 다이버징 튜브대비 더 높은 값이 발생하였다. 베이스 튜브는 유량비가 1.0부근에서 약 100hpa로 나타났다. 다이버징 튜브는 유량비 1.0부근에서 80hpa에 못 미치는 값이 발생하였다. 저온측 압력은 베이스 튜브와 다이버징 튜브가 유량비에 따라 거의 유사하게 점진적으로 줄어드는 값을 나타냈다.

그림 7(b)는 베이스 튜브(D=10mm)가 컨버징 튜브(D<sub>in</sub>=10mm, D<sub>out</sub>=6mm)보다 고온측 및 저온측 압력값이 더 높게 발생하였다. 베이스 튜브는 유량비 0.9부근에서 120hpa보다 우세한 값이 발생하였다. 반면 컨버징 튜브는 약 70hpa이 발생하였다. 저온측 압력은 베이스 튜브가 컨버징 튜브보다 우세한 압력 값을 나타낸다. 유량비에 따른 고온측 압력은 베이스 튜브와 컨버징 튜브의 압력차가 점점 상승하였다. 반면에 저온측 압력은 유량비가 증가함에 따라 베이스 튜브와 컨버징 튜브 압력차가 점점 감소하는 특성을 보였다.



(a) 베이스튜브 D=6mm 및 다이버징튜브 Din=6mm, Dout=10mm 비교



(b) 베이스튜브 D=10mm 및 컨버징튜브 Din=10mm, Dout=6mm 비교

그림 7. 저온유량비에 따른 저온 출구 및 고온 출구 압력 변화