

대향류형 보텍스 튜브의 노즐형상 변화에 따른 튜브 내부의 온도분포에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Characteristics of Temperature Distribution in Internal Space of a Tube for the Formal Change of Counterflow Type Vortex Tube

황 승 식*
Seungsik Hwang

ABSTRACT

The aim of this study is to provide fundamental informations that make it possible to use a cool stream and a hot stream simultaneously. We changed the pressure of compressed air that flows into a tube, the inner diameter of orifice that a cold stream exits, and the mass flow rate ratio. And in each case, we measured the temperature of a cold stream and a hot stream in each exit of a tube. Also we measured the axial and the radial temperature distribution in internal space of a tube. From the study, following conclusive remarks can be made. First, As the number of nozzles increase, separation point move into the hot exit. Second, When we use guide vane type nozzle, the axial temperature distribution constant over the 0.75 of air mass flow rate ratio. Third, When we use Spiral type nozzle, axial and radial temperature distribution in the inner space is higher than another nozzle. Fourth, Axial and radial temperature distribution in the inner space vortex-tube is determined by separation point. And separation point is moved by changing of air mass flow rate ratio. At last, A heating apparatus is possible for vortex-tube to use.

주요기술용어 : Vortex tube(보텍스 튜브), Compressed air(압축공기), Mass flow rate ratio (질량 유량비), Separation point(정체점), The axial temperature distribution (축방향온도분포), The radial temperature distribution(반경방향온도분포)

1. 서 론

산업의 급속한 발전에 따라서 인간은 많은 기술 개발을 이룩하였다. 그러나, 산업의 발달은 자연의 파괴라는 문제점을 야기 시켰으며, 이로 인하여 자연은 도전과 개척의 대상이 아닌 인간과 공존해야 한다는 인식의 변화에 상응하여 세계

는 선진국을 중심으로 냉매 사용과 배출가스에 대한 규제를 강화하고 있으며, 전세계적으로 환경 친화적인 장치에 관심이 모이고 있다. 선진국 뿐 만아니라 국내에서도 새로운 대체 에너지와 대체 냉매의 개발 및 화석연료나 냉매를 사용하지 않는 새로운 냉난방 시스템의 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 연구들 중에서 보텍스 튜브는 고온과 저온 공기를 얻기 위한

* 회원, 국민대학교 기계공학과

대체 냉·난방 장치로서 화석연료의 부산물인 배출가스나 냉매의 사용에 대한 염려가 없는 환경 친화적인 장치로써 기대를 받고 있다. 이러한 보텍스 튜브는 사용 목적이나 기하학적 형상, 유동방향 등에 따라 여러 가지로 분류되나 일반적으로 작동유체의 유동형태에 따라 저온 공기와 고온 공기가 반대 방향으로 유동하는 Counterflow type과 같은 방향으로 흐르는 Uniflow type으로 나누어진다. Fig. 1은 Counterflow type과 Uni flow type 보텍스 튜브를 나타내는 개략도이다. 먼저 접선 방향으로 압축공기를 보텍스 생성실로 주입하면 노즐을 통과하면서 보텍스 유동인 회전을 생성시키고, 하류로 유동하는 동안 튜브내의 바깥쪽 공기와 중심부쪽 공기 사이에서 반경 방향으로 에너지 교환이 이루어지는 원형 튜브와 고온 출구를 통해 배출되는 공기의 유량비를 조절하기 위한 스톱 밸브 그리고 중심부의 저온 공기를 배출하는 저온 출구쪽의 오리피스로 구성되어있다. 1959~60년 Lay¹⁾는 Counterflow type과 Uniflow type에 대하여 연구하여 Counter flow type이 Uniflow type보다 온도분리가 더 양호하다고 발표하였다. Fig. 2의 (a)는 Fulton²⁾이 제시한 Counterflow type의 유동 형태이고, (b)는 Comassar³⁾가 제시한 Uniflow type의 유동 형태이다. 반경방향의 화살표는 에너지 분

리 현상의 결과로서 일어난 운동에너지의 흐름을 나타낸다. Fig. 2의 (a)에서 나타낸 점 "S"는 에너지분리가 진행되는 동안 보텍스 튜브 표면에는 길이 방향을 따라 최대 벽면 온도점이 나타나는데, 이 점에서 저온 공기와 고온 공기의 흐름이 나누어지게 되며 이 점 이후에는 반경방향의 에너지분리는 더 이상 일어나지 않는다. Fulton²⁾은 이 점을 정체점(stagnation point)이라 하였다.

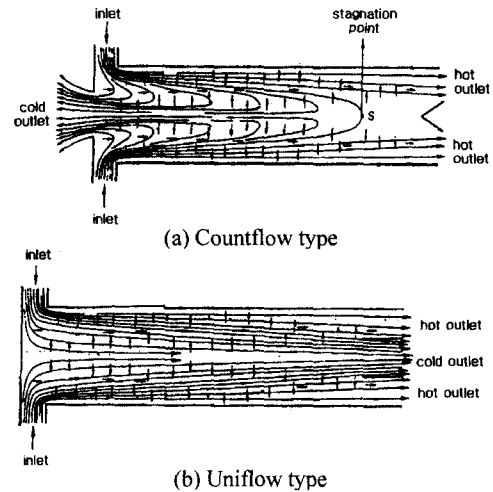


Fig. 2 Flow patterns of "Uniflow type" and "Counterflow type" vortex tubes

보텍스 튜브는 Ranque tube, Hilch tube⁴⁾ 및 Ranque-Hilsch 보텍스 튜브로 불리고 있으며 어떠한 연소나 화학 작용 없이 원형 직선 튜브의 접선 방향으로 뚫은 노즐을 이용하여 압축성 유체를 분사하는 것만으로 저온과 고온의 유체를 분리해 내는 장치로서 1931년 프랑스의 물리학자 Ranque⁵⁾는 튜브에 접선 방향으로 흐르는 압축 공기를 연구하던 중 튜브의 중심부분으로부터 나오는 공기의 온도가 튜브의 주변 부분으로부터 나오는 공기의 온도보다 낮은 현상을 발견하였다. 이후 독일의 물리학자 Hilsch는 튜브의 기하학적 조건과 튜브에 유입되는 압축 공기의 유입 압력을 변화시키며 실험을 하여 그 결과들을 체계적으로 정리하였다.⁴⁾ 그 후 Hilsch는 보다 상

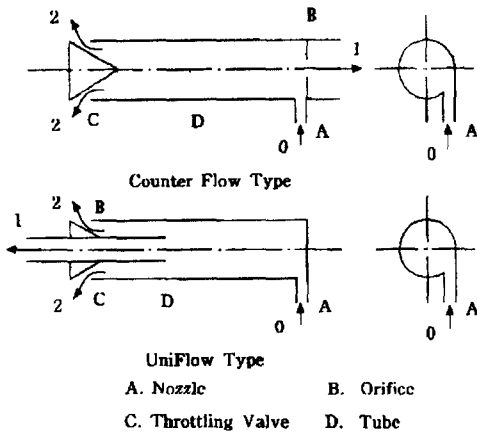


Fig. 1 Schematic diagram of "Counterflow type", "Uniflow type" vortex tubes

세한 연구를 진행하였다. 大野, 谷口⁶⁾는 Hilsch의 보텍스 튜브와 다른 치수의 장치에 대하여 성능 시험을 하여 Hilsch와 유사한 경향의 에너지 분리 결과를 얻었고 高浜 등^{7,9)}은 보텍스 튜브의 형상 조건을 변화시키면서 성능시험을 행하였다. 튜브에서 일어나는 에너지분리의 원인으로는 운동에너지가 중심부로부터 주변부로 전달되어 중심부 흐름이 저온으로 된다는 가설, 압축 공기를 튜브에 분사하는 노즐로부터 나온 직후의 분류와 저온 공기 배출구로 향하는 역류와의 접촉으로 인하여 온도 구배가 생긴다는 가설 등이 제기되고 있지만 에너지분리 현상의 정확한 원인은 규명되지 않고 있다. 따라서 본 연구는 보텍스 튜브로 유입되는 압축공기의 압력을 0.6MPa로 고정하고, 오리피스 직경은 최대 온도분리효과를 나타내는 13mm로 고정한 후, 노즐 수, 노즐 배열 형상 그리고 질량유량비 등의 보텍스 튜브의 구성요소를 변화시켜 가면서 보텍스 튜브내부의 온도분포를 측정함으로써 보텍스 튜브의 구성요소중 노즐의 형상 및 질량유량비¹⁰⁾의 변화에 따른 보텍스 튜브내부의 온도분포와 정체점에 대한 연구를 통하여 온도분리 효과의 원인을 찾아보고 실용화를 위한 기초자료를 얻고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

실험장치는 압축 공기 공급부, 제습부, 실험부 그리고 계측부로 나뉘어 진다. Fig. 3은 실험 장치의 개략도이다. 압축 공기 공급부는 공기 압축기와 압력조정기로 이루어져 있고 압축 공기를 발생시켜 압축 공기를 실험부에 공급하며, 제습부는 압축공기중의 수분과 유분을 제거하기 위해서 공기건조기, 공기냉각기와 4개의 필터를 사용하였다. Fig. 4, 5, 6 및 7은 실험부의 개략도이다. 실험부는 분사된 압축 공기의 에너지 분리가 일어나는 튜브, 그리고 스톱 밸브와 저온 공기의 배출 유량을 조절하는 오리피스로 이루어져 있다. Fig. 5에서 보여지는 바와 같이 외경 50mm, 내경 19mm 그리고 길이 35mm인 아크릴

튜브를 가공하여 보텍스 생성실을 제작한 후, 직경 3mm, 2.12mm, 1.5mm의 구멍을 뚫어 노즐을 제작하였다. 노즐의 직경을 변화시킨 것은 노즐 수가 증가하더라도 노즐의 총 단면적은 일정하게 하기 위함이다. 챔버는 튜브와 노즐을 연결시켜주는 것으로서, 134×134×41mm인 것과 134×134×19mm인 2개의 아크릴 판을 가공하여 제작하였다. 높이가 41mm인 판의 안쪽으로는 직경이 50mm와 길이가 3mm인 홈을 내어, 노즐을 끼울 수 있도록 하였다. 바깥쪽으로는 직경 25mm의 구멍을 내어 튜브를 연결시켰다. 높이

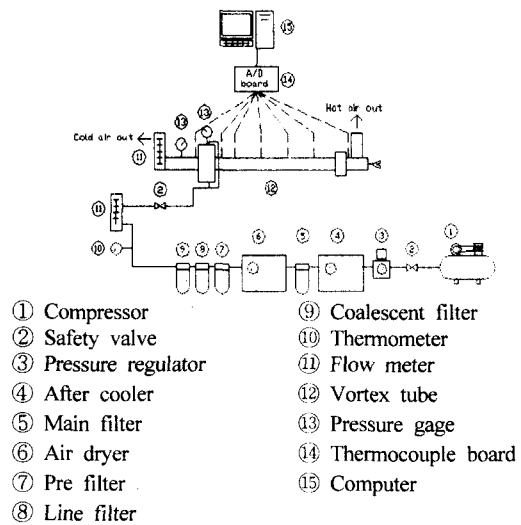


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

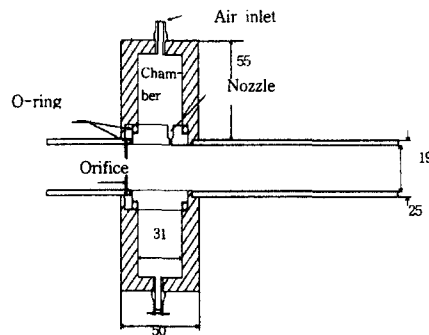


Fig. 4 Cross sectional view of chamber used in the experiment

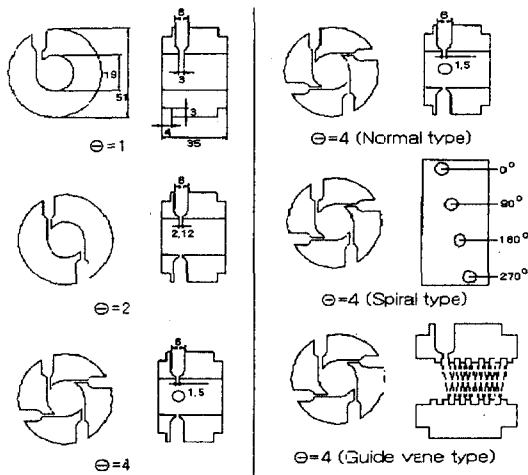


Fig. 5 Cross sectional view of nozzle used in the experiment

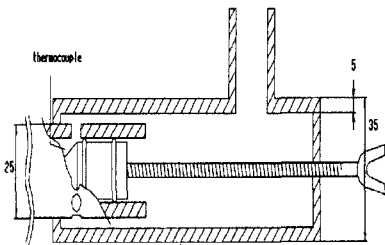


Fig. 6 Cross sectional view of part of hot exit

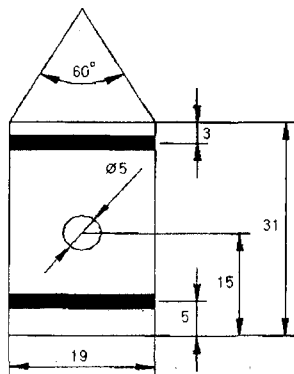


Fig. 7 Cross sectional view of part of cone used in the experiment

가 19mm인 판 안쪽으로는 직경 50mm의 홈을 파서 노즐과 연결시키고 오리피스를 놓을수 있는 원형 판을 넣었다. 외부에는 직경 25mm의 구멍

을 내어 저온 공기가 배출되도록 하였다. 스톱 밸브는 고온 공기의 배출 유량을 조절하는 것으로서 콘의 각도는 60°이고, 2개의 O링을 끼워서 공기가 새지 않도록 하였다. 오리피스는 저온 공기의 배출 유량을 조절하는 것으로 외경은 25mm, 내경은 13mm이다. 스톱 밸브와 오리피스는 저탄소강을 가공하여 제작하였다. 계측부는 보텍스 튜브에 공급되는 압축 공기의 유량을 측정하는 유량계와 이 때의 온도를 측정하는 온도계, 오리피스를 통해 배출되는 저온 공기의 유량을 측정하는 유량계, 보텍스 튜브에 공급되는 압축 공기의 온도와 배출되는 고온 및 저온 공기의 온도 그리고 튜브내의 온도분포를 측정하기 위한 T형 열전대 및 Data acquisition board로 구성되어 있다. 본 실험에 사용된 튜브는 내경 19mm, 두께 3mm의 아크릴 튜브이고 보텍스 튜브의 내경에 대한 길이의 비는 30이다. 본 실험에서는 튜브 내부의 온도분포를 알기 위하여 축방향으로는 튜브의 직경 D에 대한 L의 비(L/D)가 3, 6, 12, 18 및 24인 위치에 열전대를 설치하였다. 3점은 튜브 중심($r^*=0$ 여기서 $r^*=r/r_0$)에 열전대를 설치하였고, 6, 12, 18 및 24 위치에는 반경 방향으로 튜브 중심($r^*=0$), 튜브 표면 부분($r^*=1$) 그리고 이 두 위치의 중심점($r^*=0.5$)에 열전대를 설치하여 온도를 측정하고 온도 분리의 정도를 알아보기 위하여 노즐로 유입되는 압축공기온도(7°C)와의 차를 계산하였다. 이때 실험실의 외기 온도는 21°C로 유지시켰으며, 튜브외부는 단열재를 사용하여 보텍스 튜브를 단열시키고 실험하였다. 실험범위는 입구압력을 0.6MPa, 오리피스 직경은 13mm로 고정하고 질량유량비와 노즐수 및 노즐의 형상을 변화시키면서 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 노즐수의 변화에 따른 보텍스 튜브 내의 온도 분포

Fig. 8의 (a), (b) 및 (c)는 저온 출구 오리피스 직경은 13mm, 노즐수가 1개 그리고 입구 압력이

0.6MPa일 때 질량 유량비 변화에 따른 보텍스 튜브 내부의 온도차 ΔTr^* (무차원 반지름 위치 온도와 유입 공기 온도와의 차)를 무차원 튜브길이 (L/D)에 대하여 나타낸 것이다. Fig. 8의 (a)는 무차원 반지름이 $r^*=1$ (보텍스 튜브의 벽면) 일 때, (b)는 무차원 반지름이 $r^*=0.5$ (보텍스 튜브의 벽면과 중심의 가운데 점) 및 (c)는 $r^*=0$ (보텍스 튜브의 중심점)일 때의 보텍스 튜브 내의 온도차 분포를 나타낸 그래프이다. 전체적인 경향은 질량유량비가 0.25인 경우를 제외하고는 유동이 진행함에 따라 반경 방향 위치에 무관하게 보텍스 튜브 내부의 온도는 상승하다가 감소하는 경향을 보이고 있다. 이것은 노즐을 통하여 고속으로 분출된 공기가 스톱 밸브를 향하여 유동하면서 에너지 분리가 연속적으로 일어나 고온 공기와 저온 공기의 분리가 종료되고 보텍스 튜브의 입의 단면의 온도가 최대가 되는 점, 즉 정체점²⁾ 이후에서는 에너지 분리가 더 이상 일어나지 않기 때문에 이점 이후의 보텍스 튜브 내의 단면 온도는 감소하는 것이라고 생각된다. 그러나, 질량유량비가 0.25인 경우 고온 출구가 대부분 개방되어 있어 고온 출구 쪽의 압력과 중심 영역의 압력차가 작고 역류되는 유량이 미소하여 보텍스 튜브 입구 쪽에 정체점이 나타나면서 에너지 분리 현상이 미흡한 것을 나타낸다. 질량 유량비가 증가할수록 온도차는 증가하며 온도차의 기울기도 증가하고 있다. 이는 질량 유량비가 증가하면 역압력 구배가 성장하고 에너지 분리가 활발하기 때문에 온도차는 증가한다. 또한 질량 유량비가 증가함에 따라 정체점의 위치는 보텍스 튜브 입구 쪽에서 스톱 밸브 쪽으로 이동하고 다시 입구 쪽으로 이동한다. 이러한 경향은 질량 유량비가 증가함에 따라 보텍스 튜브의 중심 유동과 벽면 쪽 유동과의 압력차가 증가하여 스톱 밸브 쪽으로 이동하면서 에너지 분리가 더 활발하게 일어나고, 질량 유량비가 0.75보다 증가하면 스톱 밸브가 외부의 고온 공기에 저항을 증가시켜 정체점이 입구 쪽으로 이동하기 때문에 나타난 현상이라고 사료된다. 그럼 전체에

걸쳐 질량 유량비가 1일 때는 최대 온도차를 나타내고 있다. 질량 유량비가 1일 때는 고온 출구 쪽이 완전히 막혀 있어 와류가 고온 출구로 유출되지 못하고 모두 역류하면서 정체점이 입구 근처에 위치하여 에너지 분리 효과가 작게 나타나고 있지만 보텍스 튜브 표면에 온도 상승이 발생하기 때문에 보텍스 튜브 표면을 고온열원으로 응용할 수 있을 것이라고 사료된다. Fig. 8의 (a)는 L/D 가 증가함에 따라 질량 유량비의 범위가 0.75~1일 때 벽면 온도는 상승하다가 최대점에 이른 후 다시 감소하고 있으며, 질량 유량비가 0.5이하에서는 벽면 온도가 일정 온도까지 상승한 후, 더 이상 상승하지 않고 일정한 온도를 유지하고 있다. 이 결과는 Fulton²⁾이 제시한 보텍스 튜브 내부의 유동에 대한 결론과 일치한다. (b)와 (c)도 (a)와 유사한 경향을 나타내고 있다.

Fig. 9의 (a), (b) 및 (c)는 노즐 직경이 2.12mm 인 노즐수가 2개의 노즐을 사용할 때 질량 유량비 변화에 따른 보텍스 튜브 내부의 온도차 ΔTr^* 를 L/D 에 대하여 나타낸 것이다. Fig. 9의 (a)는 무차원 반지름이 $r^*=1$, (b)는 무차원 반지름이 $r^*=0.5$ 그리고 (c)는 $r^*=0$ 일 때의 보텍스 튜브 내의 온도차 분포를 나타낸 그래프이다. 전체적인 경향은 Fig. 8과 유사하게 무차원 반경 방향 위치와 무관하게 유동이 진행하면서 보텍스 튜브 내부의 온도는 상승하다가 감소하는 경향을 보이고 있다. 그러나 노즐수가 1개일 때보다는 정체점이 생기는 위치가 조금 더 고온 공기 출구 쪽으로 이동하고 있는데 이는 노즐 직경이 더 작아져 같은 압력으로 같은 단면적을 통하여 들어오는 압축 공기라도 노즐 직경이 작기 때문에 유입되는 압축 공기 양이 많아지고 압축공기가 상대적으로 더 빠른 접선 속도를 갖고 유입하여 온도 분리가 더 이상 진행되지 않는 정체점의 발생 위치가 더 길어진 것이라고 생각한다. 이는 질량 유량비가 0.25일 때, 튜브 내 온도차 분포는 L/D 가 증가함에 따라 계속해서 증가하고 고온 공기 출구 근처까지 에너지 분리가 진행하고 있음을 나타내고 있다. 정체점의 위치가 고온 출구 근처에서 발

생하기 때문에 저온 공기 온도와 고온 공기 온도도 노즐수가 1개 일 때 보다 높은 온도차 값을 나타낸다고 생각한다.

Fig. 10의 (a), (b) 및 (c)는 노즐 직경이 1.5mm 인 노즐수 4개의 노즐을 사용할 때 질량 유량비 변화에 따른 보텍스 튜브 내부의 온도차 ΔTr^* 를 L/D에 대하여 나타낸 것이다. Fig. 10의 (a)는 무차원 반지름이 $r^*=1$, (b)는 무차원 반지름이 $r^*=0.5$ 그리고 (c)는 $r^*=0$ 일 때의 보텍스 튜브 내의 온도차 분포를 나타낸 그래프이다. 전체적인 경향은 Fig. 9과 유사한 경향을 보이고 있고 온도 분리뿐만 아니라 내부 온도 분포도 노즐수가 4개 일 경우에 가장 크게 나타나고 있다. 노즐수가 증가할수록 온도 분리와 내부 온도 상승도 커지고 있음을 알 수 있다.

3.2 노즐형상의 변화에 따른 보텍스 튜브 내의 온도 분포

Fig. 11의 (a), (b) 및 (c)는 노즐 직경이 1.5mm 인 보텍스 생성실에 안내깃이 있는 4공 노즐을 사용했을 때 질량 유량비 변화에 따른 보텍스 튜브 내부의 온도차 ΔTr^* 를 L/D에 대하여 나타낸 것이다. Fig. 11의 그림 (a)는 무차원 반지름이 $r^*=1$, (b)는 무차원 반지름이 $r^*=0.5$ 그리고 (c)는 $r^*=0$ 일 때의 보텍스 튜브 내의 온도차 분포를 나타낸 그래프이다. 전체적인 경향은 무차원 반지름의 위치에 상관없이 질량 유량비가 0.5이하에서는 튜브 내의 온도차 분포가 상당히 불규칙적으로 나타나고 있으며 질량 유량비가 0.75이상에서는 온도차가 급상승 한 후 일정 값을 유지하면서 서서히 감소하고 있다. 안내깃이 있는 보텍스 튜브는 저온 공기의 온도와 고온 공기의 온도 차이가 다른 노즐에 비하여 상대적으로 낮은 온도 차 값을 나타내고 있지만 질량 유량비가 0.75이상에서는 튜브 내부의 온도 분포가 무차원 길이 방향에 따라 거의 일정한 값을 나타내고 있다.

Fig. 12의 (a), (b) 및 (c)는 노즐 직경이 1.5mm 인 보텍스 생성실에 노즐 4개를 나선 방향으로 설치하여 만든 노즐을 사용했을 때 질량 유량비

변화에 대해 보텍스 튜브 내부의 온도차 ΔTr^* 를 L/D에 대하여 나타낸 것이다. Fig. 12의 그림 (a)는 무차원 반지름이 $r^*=1$, (b)는 무차원 반지름이 $r^*=0.5$ 그리고 (c)는 $r^*=0$ 일 때의 보텍스 튜브 내의 온도차 분포를 나타낸 그래프이다. 전체적인 경향은 무차원 반경 방향 위치와 무관하게 유동이 진행함에 따라 보텍스 튜브 내부의 온도가 상승하다가 감소하는 경향을 보이고 있다. 그러나 노즐수가 4개인 일반형 보다 저온 공기와 고온 공기의 온도 분리의 절대값과 보텍스 튜브 내부에서의 온도차의 절대값이 크게 나타나고 있다. 이와 같이 되는 이유는 일반형 4공 노즐보다는 나선형노즐에서 유입되는 압축 공기의 유량과 접선 속도가 더 크기 때문이라고 생각한다.

4. 결론

압축 공기를 작동유체로 사용하는 대향류형 보텍스 튜브를 사용하여 오리피스 직경을 13mm, 입구 압력을 0.6MPa로 고정하고, 질량 유량비와 노즐의 구성요소를 변화시켜 가면서 보텍스 튜브내의 온도분포를 알아보기 위한 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Normal type의 노즐에서 노즐수가 증가할수록 튜브내부의 압력변화로 인하여 정체점의 위치가 고온 출구쪽으로 이동한다.
- 2) 노즐 직경이 1.5mm인 보텍스 생성실에 안내깃이 있는 4공 노즐을 사용했을 때 질량유량비가 0.75이상에서는 튜브내부의 온도분포가 무차원 길이방향에 따라 거의 일정하다.
- 3) 노즐 직경이 1.5mm인 보텍스 생성실에 노즐 4개를 나선 방향으로 설치하여 만든 노즐을 사용했을 때 다른 노즐을 사용했을 때보다 내부 온도분포가 높게 나타난다.
- 4) 보텍스 튜브 내의 모든 온도분포는 정체점의 위치에 따라 결정되며 이 정체점은 (유효 오리피스 직경이고, 일정압력이라면) 질량 유량비의 조절에 의해서 이동할 수 있음을 알았다.
- 5) 무차원 반지름이 $r^*=1$ (보텍스 튜브의 벽면)

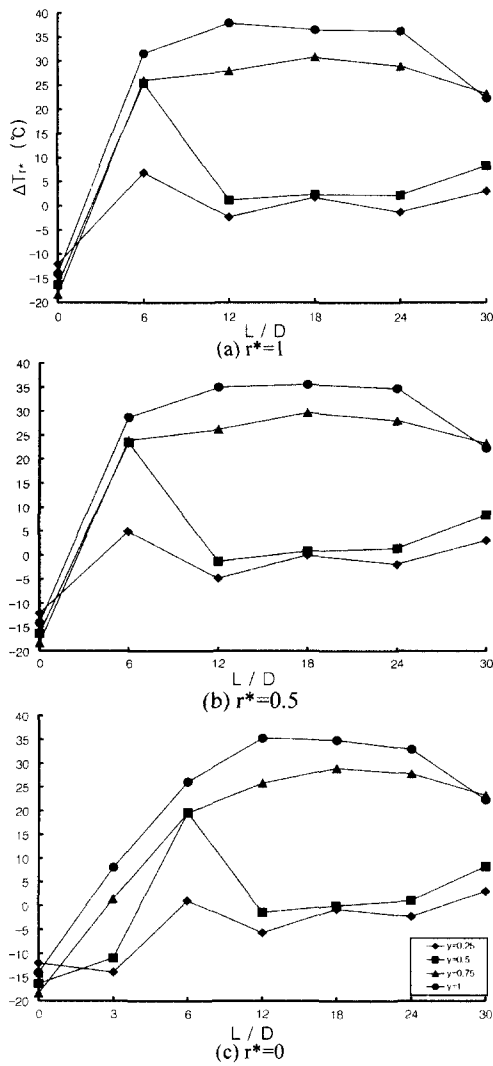


Fig. 11 Temperature difference of non-dimensional radial direction along to the non-dimensional tube length with variable cold air mass flow ratio ($d_o=13\text{mm}$, $P_{in}=0.6\text{MPa}$, $\Theta=4$, guide vane type)

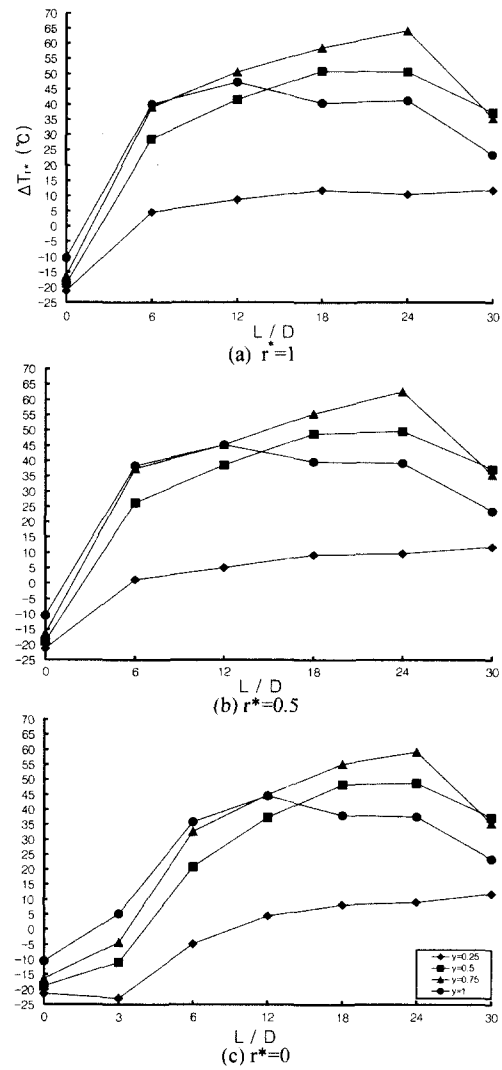


Fig. 12 Temperature difference of non-dimensional radial direction along to the non-dimensional tube length with variable cold air mass flow ratio ($d_o=13\text{mm}$, $P_{in}=0.6\text{MPa}$, $\Theta=4$, spiral type)

인 위치의 온도와 보텍스 튜브에서 분리되어져 나온 고온공기를 이용하여 보텍스 튜브를 고온 열원으로 응용이 가능하다.

참고 문헌

1) J. E. Lay, "An Experimental and Analytical

Study of Vortex-Flow Temperature Separation by Superposition of Spiral and Axial Flow-part 2," T. of ASME., J. of Heat Transfer. pp.213-222, 1959.

2) C. D. Fulton, "Ranque's Tube," Refrigerating Engineering, Vol.5, pp.473-479, 1950.

3) S. Coma sar, "The Vortex Tube," J. of

- American Society Naval Engineering, Vol.63, No.1, pp.99-108, 1993.
- 4) R. Hilsch, "The Use of the Expansion of Gases in a Centrifugal Field as Cooling Process," *The Review of Scientific Instruments* 18-2, 1947.
 - 5) G. J. Manque, *J. Physique Radium*, 7-4, p.122, 1933.
 - 6) 大野·谷口, 日本機械學會論文集 17-26, p.89, 1951.
 - 7) 高浜平七, "ボルテックス・チューブによる氣體のエネルギー分離", 日本機械學會誌 pp.68-560, 1965.
 - 8) 高浜平七, 日本機械學會論文集 pp.30-219, 1964.
 - 9) 高浜平七, 日本機械學會論文集 pp.31-225, 1965.
 - 10) K. Stephan, S. Lin, M. Durst, F. Hwang, D. Seher, "An Investigation of Energy Separation in a Vortex Tube," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.26, No.3, pp.341-348, 1983.