

보텍스튜브에서 랭퀴-힐쉬효과와 줄-톰슨효과가 에너지분리에 미치는 영향

유 갑 중[†], 방 창 훈^{*}, 김 병 하^{**}

경북대학교 기계공학부, ^{*}경북대학교 대학원, ^{**}경일대학교 기계공학부

The Influence of Ranque-Hilsch Effect and Joule-Thomson Effect to Energy Separation in a Vortex Tube

Kap-Jong Riu[†], Chang-Hoon Bang^{*}, Byung-Ha Kim^{**}

School of Mechanical Engineering, Kyunpook National University, Taegu 702-701, Korea

^{*}Graduate school, Kyungpook National University, Taegu 702-701, Korea

^{**}School of Mechanical Engineering, Kyungil University, Taegu, Korea

(Received July 15, 1999; revision received June 20, 2000)

ABSTRACT: Energy separation characteristic occurring in a counterflow vortex tube was studied experimentally, where air, CO₂, and R22 were used as working fluids. The experiments were carried out with pressure ratio from 3 to 8 and cold mass fraction(y) from 0.1 to 0.9. As results, Ranque-Hilsch effect showed different results from adiabatic expansion process. Temperature difference in vortex tube outlet was affected by Joule-Thomson effect as well as Ranque-Hilsch effect. The more effective the energy separation was, the more increased the entropy in the cold outlet of vortex tube was.

Key words: Vortex tube(보텍스튜브), Energy separation(에너지분리), Ranque-Hilsch effect (랭퀴-힐쉬효과), Joule-Thomson effect(줄-톰슨효과)

기 호 설 명

(저온출구 질량유량/ 유입 질량유량)

Z : 압축계수

- D : 보텍스튜브 지름 [mm]
- d : 지름 [mm]
- h : 엔탈피 [kJ/kg]
- L : 보텍스튜브 길이 [mm]
- P : 압력 [MPa]
- q : 단위질량당 방열량 [kJ/kg]
- S : 엔트로피 [kJ/kg °C]
- T : 온도 [°C]
- y : 저온출구 질량유량비

그리스문자

Δ : 상태량차(출구-입구)

μ_j : 줄-톰슨계수

하첨자

- c : 저온출구
- h : 고온출구
- in : 입구
- ist : 등온과정

[†] Corresponding author

Tel: +82-53-950-5571; fax: +82-53-955-8377

E-mail address: heat777@kebi.com

j : 교축과정
 max : 최대 값
 min : 최소 값

1. 서론

보텍스튜브는 간단한 구조의 원형관을 이용하여 어떠한 연소나 화학작용 없이 압축된 유체로부터 저온과 고온의 두 분류의 유체로 분리해내는 장치이다. 또한 조작이 용이하고 유지비용이 적으며 순간적인 on/off가 가능하며 스파크, 폭발 등의 위험성이 적고 국소냉각에 상당히 용이한 장점을 가지고 있다. 반면 소음이 크고 현재 사용되는 CFC계열의 냉동 장치보다 효율이 낮은 단점이 있다.

본 논문에서 보텍스튜브라 함은 에너지 분리장치 전체를 칭하는 것이고 튜브는 에너지 분리가 일어나고 있는 원형관만을 의미한다(Fig.2 참조).

1928년 Ranque⁽¹⁾에 의하여 에너지분리 현상이 처음 발견된 후, Hilsch⁽²⁾에 의하여 비로소 체계적인 연구가 수행되어 학계에 보고되었다. 보텍스튜브에 대한 연구는 지금까지 많은 사람들에 의해 이루어져 왔는데, 먼저 이론적 연구로는 Fulton⁽³⁾, Stephan⁽⁴⁾, Deissler & Perlmutter⁽⁵⁾, Kassner⁽⁶⁾ 등이 에너지분리에 대한 연구를 수행하여 그들 나름대로의 모델을 제시하였으나, 그 중에서도 Fulton⁽³⁾과 Kassner⁽⁶⁾가 제시한 랭귀-힐쉬효과에 의한 에너지 분리 모델이 현재 가장 널리 받아들여지고 있다. 이들이 제시한 모델에서는 튜브내에서 난류전단응력에 의한 일은 내부에서 외부로 이동하고, 외부에서 소산에 의하여 발생한 열은 외부에서 내부로 이동한다. 그러나 열에너지 전달량이 운동에너지 전달량에 비해 작기 때문에 보텍스 유동의 내부유체는 냉각되고 외부유체는 가열된다.^(3,6) 또한 실험적 연구로는 Hilsch⁽²⁾, Stephan⁽⁴⁾, Hartnett & Eckert⁽⁷⁾, Martynovskii⁽⁸⁾, Raiskii & Tunkel⁽⁹⁾ 등이 벽면온도 분포, 반경방향속도 분포, 상사해석, 튜브의 기하학적 형상, 비정상상태, 유동장 분포 등을 연구하였다. 또한 Collins & Lovelance⁽¹⁰⁾는 상변화를 수반하는 경우에 대하여 연구하였다.

이상에서와 같이 랭귀-힐쉬효과가 정설로서 받아들여지고 있지만, 현재까지 에너지분리의 원인이 완전히 규명되지 못하고 있다. 또한 랭귀-힐

쉬효과만으로 설명하면 작동유체에 따라 저온출구 질량유량비(y)가 0.3이하일 때, 입구온도보다 낮은 고온출구 온도를 가지는 경우에 대해(Fig. 5 참조) 명확하게 설명할 수가 없다.^(8,10) 이와 같은 현상은 작동유체가 보텍스 제너레이터의 노즐을 통과할 때 줄-튐슨효과에 의하여 온도강하가 일어나기 때문이다. 또한 예비실험으로 제너레이터 노즐의 입·출구온도를 측정된 결과 작동유체에 따라 각각 다른 온도강하량이 나타나고 있는 것을 확인하였다.

따라서 본 연구에서는 R22, 이산화탄소와 공기를 사용하여 에너지 분리현상을 조사하고 보텍스 튜브의 랭귀-힐쉬효과와 보텍스 제너레이터의 노즐에서 일어나는 줄-튐슨효과에 의한 결보기에 에너지 분리⁽¹⁰⁾와 실질 에너지 분리를 구명하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험은 두 가지 방법으로 실험을 수행하였다. 첫째는 공기와 이산화탄소를 실험할 경우 보텍스튜브를 기존의 개방회로⁽¹¹⁾에 장착하여 고온 및 저온출구에서 공기와 이산화탄소를 대기로 방출하였다. 둘째는 냉매를 실험할 경우로 Fig. 1에 나타난 밀폐회로에 의한 R22를 고온 및 저온출구에서 회수하여 계속 사용하였다. 실험장치는 냉동장치부(A), 데이터 측정부(B), 데이터 처리부(C)로 구성되어 있다.

냉동장치부에는 모터의 회전수를 조절하는 인버터(①), 모터(②), 냉매를 필요압으로 가압하는 압축기(③), 압축기에서 토출되는 고온·고압의 냉매에서 냉매오일을 분리하는 유분리기(④), 과열영역의 냉매에 포함되어 있는 불순물을 제거하기 위한 필터(⑤), 적절한 온도·압력으로 응축을 하는 응축기(⑧), 팽창밸브(⑨), 증발기(⑩), 기액분리를 위한 축적기(⑪)로 구성되어 있다.

데이터 측정부에는 보텍스튜브(⑥)의 입구측과 양출구측에 각각 부착한 T-type의 열전대와 압력계(PV350), 보텍스튜브의 전체유량과 저온출구에서의 질량유량을 측정하는 질량유량계(OVAL, D025S-SS-200)(⑦)로 구성되어 있다. 데이터 처리부에는 데이터 획득장치(⑫)(NetDAQ, 2640A)와

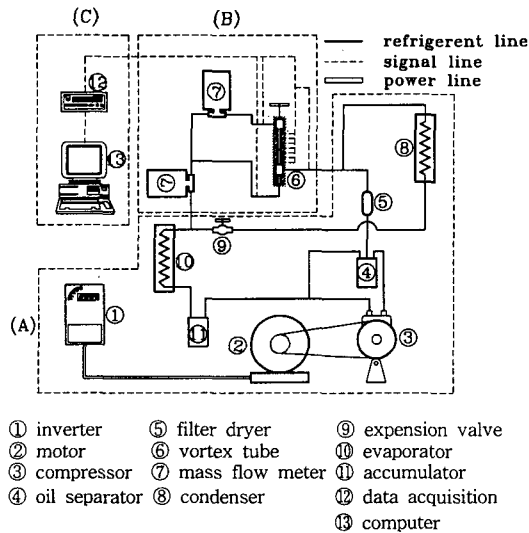


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup.

각각의 측정값을 처리하고 보관하는 컴퓨터(13)로 되었다.

실험에 앞서 온도보정장치와 영점 조정기(ice point)를 이용하여 열전대를 보정하였고, 냉매를 사용할 경우 냉동시스템내부에 불용축가스인 공기가 잔류하면 성능에 악영향을 미치게 되므로 냉매를 주입하기 전에 충분한 진공이 유지되어야 한다. 본 실험에서는 배기량 50 l/min, 진공도 1×10^{-3} torr의 성능을 가진 진공펌프(D10A)를 이용하여 진공작업을 수행하였다.

각 연결배관과 보텍스튜브는 폴리스티로폼을 이용하여 외부와 단열하였다. 공기와 이산화탄소를 이용할 경우도 같은 보텍스튜브를 사용하였다. 본 실험에서 사용된 보텍스튜브의 직경은 5.6

Table 1 Dimension of vortex tube and nozzle (unit : mm)

tube diameter	tube length	cold end orifice	nozzle number	nozzle diameter	nozzle area ratio
5.6	112	2.07	4	0.5	0.032

Table 2 Experimental condition and parameter

Inlet temp. (°C)	Inlet press. (MPa)	Press. ratio (P_{in}/P_c)	Working fluid
70	0.8	3 ~ 8	Air, CO ₂ , R22

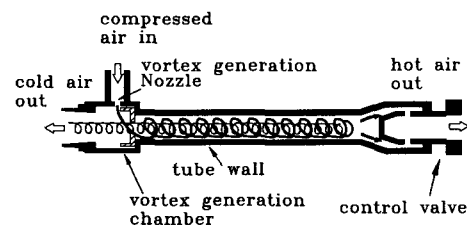


Fig. 2 Schematic diagram of vortex tube.

mm, 길이는 112 mm로 상세한 형상은 Fig. 2에 나타내었다. 실험에 사용된 보텍스튜브의 상세한 치수는 Table 1에 나타나 있다.

2.2 실험방법 및 범위

보텍스튜브의 입구온도와 압력을 각각 70°C, 0.8 MPa로 고정시키고 출구압력을 변화시키면서 압력비를 변화시켰다. 저온출구유량비(y)는 고온출구의 스로틀밸브를 조절하여 변화시켰다.

개방회로에서 실험할 경우, 압축기를 이용하여 공기를 가압한 후 항온조를 통과시켜 70°C까지 가열하였다. 또한 이산화탄소는 압력용기의 압력조정기를 이용하여 방출압력까지 조정하여 방출 후 항온조를 통과시켜 70°C를 유지하였다.

냉동시스템을 이용한 R22를 실험할 경우 먼저 R22를 주입하기 전에 시스템을 충분히 진공시킨 후 질량을 측정하여 R22를 주입하였다.

압축기의 회전수는 1000 rpm으로 고정하였다.

냉매주입이 끝나면 실험조건을 해당조건으로 하여 실험을 수행하였으며, 시스템이 정상상태가 되면 각 보텍스튜브의 입·출구에서의 온도와 압력을 측정한다. 이때 정상상태는 입구와 출구측의 온도가 $\pm 2^\circ\text{C}$ 변동을 이룰 때를 기준으로 하며 약 30분이 소요되었다. 상세한 실험조건 및 변수는 Table 2에 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 랭퀴-힐쉬효과와 줄-톰슨효과 영향

랭퀴-힐쉬효과(Ranque-Hilsch effect)와 단열 팽창과정을 비교하기 위하여 Fig. 3에 나타난 것처럼 1개의 입구와 2개 출구를 가진 보텍스 튜브를 가정하였다. 보텍스 튜브내의 유동이 완전히 규명되지 않았기 때문에 에너지 균형을 이용하였다. q 는 튜브 표면을 통한 단위질량당 방열량을 나타내며 여기서는 단열로서 가정하여 $q=0$ 으로 둔다. 따라서 에너지 균형을 정리하면 식(1)로 표현된다.

$$[y h_c + (1 - y) h_h] = h_{in} \quad (1)$$

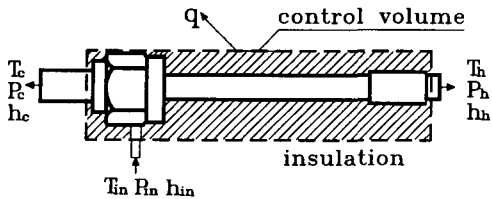


Fig. 3 Schematic diagram of Ranque-Hilsch process.

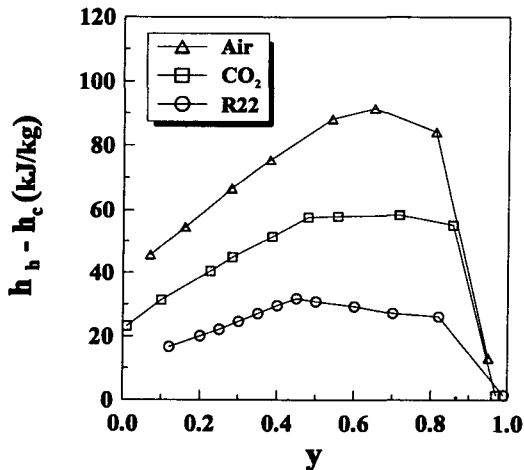


Fig. 4 Enthalpy difference between cold and hot outlet as function of cold mass fraction(y), ($P_{in}/P_c=5$).

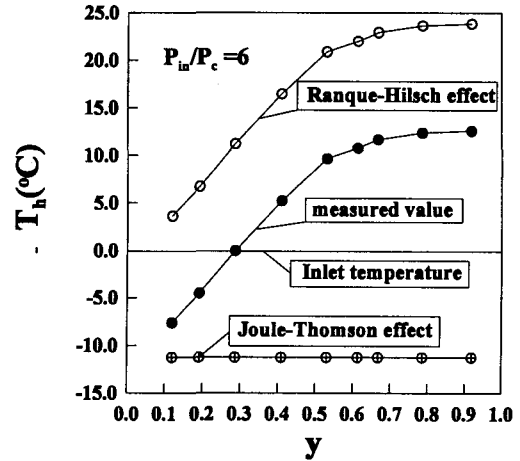


Fig. 5 Hot side temperature distribution as a function of cold mass fraction(y) for R22 at vortex tube, ($P_{in}/P_c=6$).

만일 보텍스 튜브의 고온 및 저온출구 압력을 P_o 로, 온도를 T_o 로 두고, 보텍스 튜브의 고온측과 저온측으로의 과정을 단열과정으로 가정하면, $P_h = P_c = P_o$ 이고 $T_h = T_c = T_o$ 가 된다. 따라서 $h_h = h_c = h_o$ 가 되어야 한다. 그러나 측정된 값(h_h, h_c)과 식(1)을 이용하여 각 작동유체가 입구압력 0.8 MPa, 입구온도 70°C, 압력비(P_{in}/P_c) 5 일 때에 대한 고온과 저온 출구 엔탈피차를 나타내면 Fig. 4와 같이 나타난다. 즉, 실험의 결과로부터 y 값에 관계없이 $h_{in} \neq h_h = h_c$ 인 결과를 얻을 수 있었다. 결국 보텍스 튜브에서 발생하는 과정은 단순한 단열팽창 과정이 아님을 알 수 있다.

보텍스 튜브 전체를 통하여 나타나는 온도변화를 좀더 상세하게 구분하면 튜브내에서 랭퀴-힐쉬효과와 보텍스 제너레이터의 노즐통과시의 줄-톰슨효과로 나타낼 수 있다. 즉, 보텍스 제너레이터의 노즐을 통한 기체의 팽창과정은 단열과정으로 고려될 수 있다.⁽¹²⁾

줄-톰슨효과에 의한 이상기체의 온도강하는 식(2)를 사용하여 구한다.

$$\mu_j = \frac{RT^2}{PC_p} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P \quad (2)$$

그러나 이상기체가 아닌 경우에는 물성치 데이

터⁽¹⁵⁾를 이용한다.

Fig. 5는 작동유체가 R22이고, 압력비가 6일 때 저온출구 유량비(y)에 따른 보텍스 튜브의 랭귀-힐쉬효과에 의한 고온출구 작동유체의 온도상승량과 제너레이터 노즐의 줄-튐슨효과에 의한 온도강하량을 나타낸 그림이다. 랭귀-힐쉬효과에 의한 온도상승량(○)은 실제 측정된 온도상승량(●)에 제너레이터 노즐에서 계산된 줄-튐슨효과에 의한 온도강하량(⊕)을 더하여 얻었다. 현재까지의 논문에는 보텍스튜브의 에너지 분리에 의한 고온 및 저온 출구온도차를 측정된 값으로 표현하고 있다.⁽¹⁻⁹⁾ 그러나 이 측정된 온도차는 Fig. 5에서와 같이 보텍스 튜브의 랭귀-힐쉬효과에 의한 온도차와 제너레이터 노즐에서 줄-튐슨효과에 의한 온도차에 의하여 나타난 결과로 해석되어야 한다.

특히, R22와 같은 경우는 그림에서 나타나듯이 제너레이터 노즐에서 줄-튐슨효과로 인해 $y < 0.3$ 영역에서 측정된 온도값은 입구온도보다 낮은 온도분포가 측정되었다. 그러나 랭귀-힐쉬효과만 고려하면 입구온도보다 증가하여야 한다. 따라서 보텍스튜브에서 에너지분리량을 평가할 경우, 작동유체에 따른 제너레이터 노즐에서 줄-튐슨효과에 의한 온도강하량을 고려해야 한다.

Fig. 6에는 제너레이터 노즐을 통한 작동유체별 압력강하에 대한 온도강하를 나타내었다. 공기의 경우는 식(2)을 이용하였고, R22 및 이산화탄소는 REFPROP⁽¹⁵⁾를 이용하였다. 작동유체가 보텍스튜브 노즐 입구압력에서 노즐 출구압력으로 팽창할 때, 노즐 입출구의 온도차는 R22, 이산화탄소, 공기순으로 작아진다.

이는 식(2)로 표현된 줄-튐슨계수가 공기인 경우 1.1429°C/MPa이고 이산화탄소는 8.4321°C/MPa, R22는 15.808°C/MPa로 나타나기 때문이다.

3.2 작동유체별 저온출구의 엔트로피 증가량

보텍스튜브내에서 발생하는 에너지분리과정은 열역학 제 1법칙을 만족하므로 보텍스튜브의 입구에서 엔탈피와 고온 및 저온출구에서의 엔탈피의 합은 동일한 값을 가진다.⁽¹⁴⁾ 또한 보텍스 튜브내의 에너지분리과정은 비가역 단열과정이므로

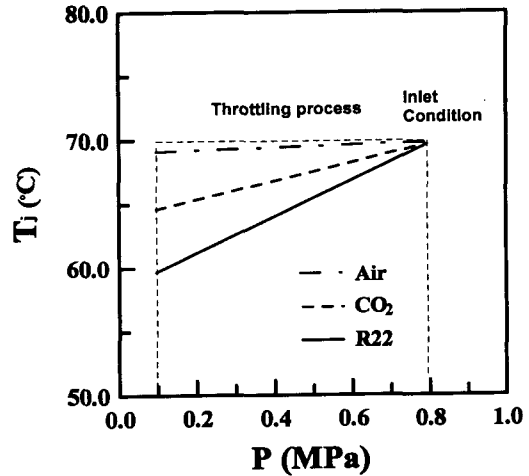


Fig. 6 Diagram of throttling process for each working fluid.

엔트로피는 증가한다.⁽¹²⁾ 한편, 보텍스튜브는 냉각을 목적으로 사용하기 때문에 저온출구 유체만을 사용한다. 그러므로 저온출구에서의 엔트로피 변화만을 고려하였다.⁽¹⁴⁾

Fig. 7은 저온출구 온도강하에 대한 저온 출구 엔트로피 변화를 나타낸 그림이다. 입구·출구압력과 입구온도를 고정시키고 저온출구 질량유량비(y)를 변화시키며 저온출구 온도를 측정하여 최저 저온출구온도($T_{c,min}$)를 구하였다.

여기서 최저 저온출구 온도는 압력 및 유체에 따라 다소 차이가 있으나 저온출구 질량유량비(y)가 약 0.3부근일 때 나타났다. 엔트로피 변화의 계산은 최저 저온출구온도가 나타날 경우일 때 온도 및 압력을 사용하였다.

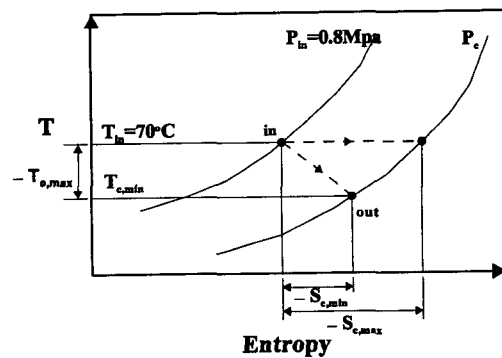


Fig. 7 Diagram of temperature-entropy.

보텍스튜브 내에서는 랭퀴-힐쉬과정에 의하여 저온출구로 온도강하가 발생하고 이로 인하여 저온 출구에서 엔트로피 증가는 작게 나타난다. 특히 저온출구 온도가 최소가 되는 $y=0.3$ 부근 일 때 저온출구 엔트로피 증가가 가장 작게 나타난다. 반면 저온 출구에서 온도강하가 전혀 발생하지 않는다면 엔트로피 증가가 가장 크게 될 것이다.

본 실험에서는 보텍스튜브 내에서 랭퀴-힐쉬과정에 의한 저온출구로의 엔트로피증가량을 구하기 위하여 이상기체인 공기는 식(3)⁽¹⁴⁾을 이용하였고, 이산화탄소와 R22는 측정된 저온출구온도와 압력을 이용하여 REFPROP⁽¹⁵⁾을 사용하였다.

$$\Delta S_{c, \min} = C_p \cdot \ln[(T_{c, \min})/T_{in}] + R \cdot \ln(P_{in}/P_c) \quad (3)$$

Fig. 8은 입구압력이 0.8 MPa, 입구온도 70°C 일 때, 압력비에 따른 저온출구의 엔트로피 최소 증가량을 식(3)으로 구하여 나타낸 그림이다.

전체적으로 압력비가 증가할수록 엔트로피차는 증가한다. 이는 온도강하에 의한 엔트로피차 감소보다 팽창에 의한 비가역성의 증가가 더욱 크기 때문이다.

결국 Fig. 4의 결과와 비교해 보면 에너지분리

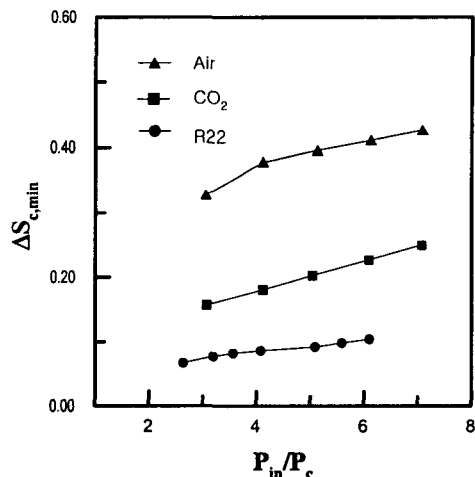


Fig. 8 Entropy increase as a function of pressure ratio for working fluids ($P_{in}=0.8$ MPa, $T_{in}=70^\circ\text{C}$).

효과가 클수록 저온출구 엔트로피 증가량 또한 커짐을 알 수 있다.

Fig. 9는 작동유체가 공기, 이산화탄소, R22일 때, 입구에 대한 저온출구 압력비에 따른 엔트로피 증가비($\Delta S_{c, \min}/\Delta S_{ist}$)를 나타낸 그림이다.

여기서 ΔS_{ist} 는 등온과정에 의한 최대 엔트로피 증가량을 의미하며, Fig. 7을 이용하여 구한 값이다. 또한 $\Delta S_{c, \min}$ 는 랭퀴-힐쉬효과에 의한 엔트로피 증가량을 나타내며 식(3)에 의해 계산한 값이다.

전체적으로 압력비의 증가에 따라 저온출구의 엔트로피 증가율은 감소하다가 작동유체에 따라 압력비 5~7정도에서 다시 증가하는 경향을 보여 준다. 이는 압력비나 작동유체에 관계없이 엔트로피 증가율($\Delta S_{c, \min}/\Delta S_{ist}$)이 0.67로 일정하게 나타난 Negm⁽¹⁴⁾의 결과와 차이를 보이고 있다. 이는 Negm의 경우 보텍스튜브의 직경이 비교적 큰 16 mm이고 출구압력을 고정시켜 놓고 입구압력을 변화시켰으나, 본 연구에서 사용한 보텍스튜브의 직경은 5.6 mm로 소형이고, 입구압력을 고압으로 고정시키고 출구압력을 변화시키며 수행되었기 때문에 팽창에 의한 손실이 증가하기 때문으로 사료된다.

결론적으로 에너지 분리현상을 단지 측정된 온도만으로 평가를 하게 되면 Fig. 5에서와 같이 고온

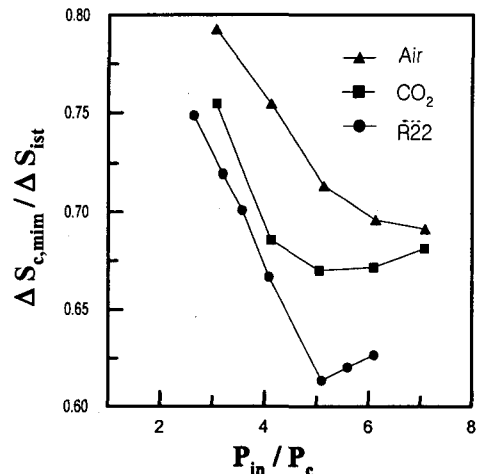


Fig. 9 Minimum entropy increase rate as a function of pressure ratio for each working fluid.

출구의 온도가 입구온도보다 낮아지는 경우를 발생시키게 되어, 보텍스튜브의 고온출구에서는 입구보다 높은 온도의 유체가 나온다는 기존의 설명^(1,17)을 위배하는 것처럼 보이게 된다. 따라서 에너지분리는 Fig. 4와 같이 엔탈피를 이용하여 설명하여야 한다.

또한 일반적으로 분자를 구성하는 원자의 수가 적을수록 더욱 낮은 저온출구 온도를 갖는다. 그러므로 저온출구 온도는 R22, 이산화탄소, 공기순으로 낮게 나타난다.^(4,8,14) 그러나 저온출구의 온도강하만으로 에너지분리의 효율을 평가하게 되면 엔트로피 증가가 가장 큰 공기가 효율적인 것으로 평가된다. 따라서 에너지분리를 효율적으로 이용하기 위해서는 엔트로피의 증가는 작고 온도강하는 큰 유체를 선택하여야 한다.

4. 결론

보텍스튜브 입구조건을 0.8 MPa, 입구온도 70 °C로 고정하고 작동유체를 공기, 이산화탄소, R22로 하여 압력비(P^*)를 3 ~ 8로 변화시키며 저온출구 질량유량비(y)에 따른 에너지분리 특성을 조사하여 보텍스튜브의 열역학적 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 랭퀴-힐쉬효과는 순수한 단열팽창과 상이한 현상이며 보텍스튜브출구에서 온도 변화는 랭퀴-힐쉬효과와 줄-툼슨효과의 복합적 작용으로 나타난다.

(2) 보텍스튜브의 저온출구 엔트로피 증가는 에너지 분리가 잘 일어나는 공기가 가장 크게 나타나며 R22에서 가장 작게 발생한다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단의 1997년도 에너지 기술개발사업과 과제중 에너지 절약사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 관계자 여러분께 깊은 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

1. Ranque, G. J., 1932, United State Patent, Applied December 6. Serial No 646.020.
2. Hilsch, R., 1947, The Use of Expansion of

- Gases in a Centrifugal Field as a Cooling Process, Review of Scientific Instruments, Vol. 8, No. 2, pp. 108-113.
3. Fulton, C. D., 1950, Ranque's Tube, Refrig. Engng., Vol. 5, pp. 473-479.
4. Stephan, K., Lin, S., Durst, M., Huang, F. & Seher, D., 1983, An Investigation of Energy Separation in a Vortex Tube, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 26, No. 3, pp. 341-348.
5. Deissler, R. G. and Perlmutter, M., 1960, Analysis of the Flow and Energy Separation in a Turbulent Vortex, J. of Heat Mass Transfer, Vol. 1, pp. 173-191.
6. Kassner, R. & Knoernschild, E., 1948, Friction Laws and Energy Transfer in Circular Flow, U.S.A.F. Air Material Command, Wright-Patterson AFB, Proj. No. LP-259, Tech. Rept. No. F-TR- 2198- ND, GS-USAF, AF Base No. 78, March.
7. Hartnett, J. P. and Eckert, E. R. G., 1957, Experimental Study of the Velocity and Temperature Distribution in a High Velocity Vortex-type Flow, Trans. ASME, J. of Heat Transfer, Vol. 79, pp. 751-758.
8. Martynovskii, V. S. and Alekseev, V. P., 1957, Investigation of the Vortex Thermal Separation Effect for Gases and Vapors, Soviet Phys.-Technical Phys., Vol. 1, pp. 2233-2243.
9. Raiskii, Yu. D. and Tunkel, L. E., 1974, Influence of Vortex Tube Configuration and Length on the Process of Energetic Gas Separation, J. of Engineering Physics, Vol. 27, No. 6, Dec., pp. 1578-1581.
10. Collins, R. L. and Lovelace, R. B., 1979, Experimental study of two-phase propane expanded through the Ranque-Hilsch tube, Trans. of ASME, J. of Heat Transfer, Vol. 101, No. 5, pp. 300-305.
11. Yun, H. M., 1996, Effect of working medium on energy separation phenomenon of a Vortex Tube, MS thesis, Kyungpook, National University, Taegu, Korea.
12. Yu. V. Chizhikov, 1997, Similarity of Flows

- in a Vortex Tube, Applied Energy-Russian Journal of Fuel, Power & Heat System, Vol. 35, No. 5, pp. 115-121.
13. A. Graham, 1972, A theoretical study of fluid dynamic energy separation, Report No. TR-ES-721, school of engineering and Applied science the George Washington University.
14. Negm, M. I. M, 1988, Generalized Correlations for the Process of Energy Separation Vortex Tube, Modelling, Simulation & Control, Vol. 14, pp. 47-64.
15. Thermodynamic properties of refrigerants and refrigerant mixtures database version 5.10, NIST Standard Reference Database 23.
16. Thermophysical Properties of Fluids, 1983, JSME Data Book, JSME.
17. Riu K. J., 1996, An Experimental Study for Cold End Orifice of Vortex Tube, Trans. KSME (B) Vol. 20, No 3, pp. 1061-1073.