

CO₂ 흡수용 20Nm³/hr급 Vortex tube의 에너지 분리 현상에 관한 해석적 연구

김창수¹, 정영철¹, 한근희², 박성영^{1*}
¹공주대학교 기계자동차공학부, ²한국에너지기술연구원

Computational Study on the Energy Separation of the Vortex Tube for CO₂ Reduction

Chang-Su Kim¹, Young-Chul Jung¹, Keunhee Han² and Sung-Young Park^{1*}

¹Div. of Automotive & Mechanical Engineering, Kongju National University

²Korea Institute of Energy Research

요 약 고압의 가스를 이용하여 고온 가스와 저온 가스를 분리하거나 입자상 물질의 분리에 사용 할 수 있는 장치인 볼텍스 튜브의 에너지 분리 특성을 적용하여 CO₂ 흡수를 위한 장치설계의 기본 설계 자료를 구축하기 위하여 전산유체 해석을 수행하였다. 설계를 위한 기초 자료를 확보하기 위하여, 볼텍스 튜브의 길이, 볼텍스 발생기의 오리피스 직경 및 고온 측과 저온 측의 유량비등이 볼텍스 튜브의 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 튜브의 길이가 길어짐에 따라 고온 출구측의 온도는 감소하지만, 저온 출구측의 온도에 미치는 영향은 미미하였다. 볼텍스 발생기의 오리피스 직경이 축소됨에 따라 저온측 온도는 강하하나 고온측 온도의 변화는 미미하였다. 고온 유량비가 증가함에 따라 고온 출구 쪽의 온도가 강하하였다. 본 연구의 결과는 CO₂ 흡수 장치의 기본 설계 자료로 응용될 수 있을 것이다.

Abstract Vortex tube is the device that can separate small particles from the compressed gas, as well as compressed gas into hot and cold flow. In this study, computational approach has been performed to analyze the characteristics of the vortex tube. Energy separation characteristics of the vortex tube has been tested for various geometric design parameters. For the given conditions, it is found that as the tube is lengthened, hot end temperature is reduced but cold end temperature does not influenced much. As the orifice diameter decreases, cold end temperature decreases. Also, as hot gas fraction increases, hot end temperature decreases. The results from this study can be used for the basic design parameter of the CO₂ reduction device.

Key Words : Vortex tube, Generator, Throttle valve, Orifice diameter

1. 서론

일명 Ranque-Hilsch 볼텍스 튜브라고도 불리는 볼텍스 튜브는 관내에 고압의 기체를 분사하여 생기는 볼텍스를 이용, 저온과 고온의 기체로 분리해 낼 수 있는 장치이다.[1~2] 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 때

본 논문은 에너지관리공단의 에너지·자원기술 개발사업의 연구과제로 수행되었음.

*교신저자 : 박성영(sungyoung@kongju.ac.kr)

접수일 08년 12월 29일

수정일 09년 04월 16일

게재확정일 09년 04월 22일

문에 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. 또한 Aydin[10]등과 Li[11]등은 볼텍스 튜브의 가시화를 통한 실험적 연구를 수행하였다.

볼텍스 튜브의 에너지 분리 원리를 규명하기 위하여 표준 k-ε 난류 모델과 RNG k-ε 난류 모델을 사용하여 다양한 해석적 연구가 진행되었으며[12], 특히 Behera[13]등은 2차 회전류와 에너지 분리의 원리를 해석적 접근을 통하여 확인하였다. 또한 Eiamsa-ard[14]등은 Algebraic Reynolds Stress Model을 Farouk[15]등은 Large Eddy Simulation 기법을 이용하여 볼텍스 튜브에 대한 해석적 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.

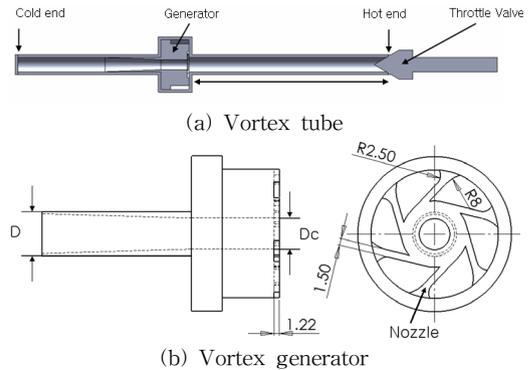
본 연구에서 적용된 볼텍스 튜브는 보일러등의 배기 가스에서 CO₂가스를 흡수제를 통하여 흡수하기 위하여 특수하게 제작된 20Nm³/hr급의 모델이다. 이는 볼텍스 튜브내에서 발생하는 2차 볼텍스로 인하여 CO₂ 흡수제의 체류시간이 길어지고, 혼합 효율이 상승하는 볼텍스 튜브의 장점에 착안한 것이다. 본 연구의 목적은 CO₂흡수용 볼텍스 튜브의 에너지 분리 성능 특성을 파악하고 설계를 위한 기초 자료를 구축하는 것이다.

2. 본론

2.1 해석 모델

본 연구의 대상은 CO₂흡수를 위하여 제작된 20Nm³/hr 급 볼텍스 튜브이며, 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. 트로틀 밸브는 고온 가스 출구 측에 배치되며 그림 1과 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 베이스 모델은 튜브의 직경(D) 10mm를 기준

으로 노즐의 면적비 (AR=4An/πD²), 오리피스 직경(Dc) 및 튜브의 길이(L)를 표 1과 같이 설계하였다. 여기서 An은 그림 1에 표시된 6개 노즐부의 총 단면적이다. 본 연구에 사용된 볼텍스 튜브의 주요 설계 변수는 오리피스 직경 및 튜브의 길이이며, 표 1에 명시된 바와 같다.



[그림 1] 볼텍스 튜브의 개략도

[표 1] 볼텍스 튜브의 제원 및 해석 변수

(* : Base Model)

Parameter	Symbol [unit]	Dimensions
Tube Diameter	D [mm]	10
Nozzle area ratio	AR [-]	0.14
Orifice diameter	Dc [mm]	0.6D, 0.7D*, 0.8D
Tube length	L [mm]	12D, 14D*, 16D

유동해석은 SolidWorks의 통합 환경을 지원하는 상용 유동해석 소프트웨어(FloWorks)를 사용하였으며, 총 20만개 이상의 유체 유동 격자로 구성하여 계산을 수행하였다.

2.2 지배방정식 및 경계조건

볼텍스 튜브 내부의 유동은 정상 상태의 난류 유동으로 가정하였으며, 본 연구에서 사용된 상용 소프트웨어에서 적용된 연속방정식, 운동량방정식 및 에너지 방정식의 표현은 식 (1)~(3)와 같다. 또한 난류운동에너지 방정식과 난류운동에너지 소산방정식은 식(4) 및 (5)로 표현된다. 난류 모델로서 표준 k-ε 모델을 적용하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial P}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i \right] + \frac{\partial p}{\partial t} \quad (3)$$

$$- \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \epsilon + S_i u_i + Q_H$$

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + S_\epsilon \quad (5)$$

유동을 기술하는 지배방정식의 수렴조건은 사용된 소프트웨어(FloWorks)[16]에서 제공되는 자동 목표치 수렴 방식을 사용하였다. 이 방법은 목표치를 설정하고, 일정 수렴기간동안 목표치의 최대값과 최소값의 차로써 정의되는 분산값을 계산하여 수렴의 여부를 결정하는 방식이다. 본 연구의 해석에서는 출구측의 질량유동율, 속도, 정압력 및 온도를 목표치로 설정하여 수렴 조건을 제어하였다.

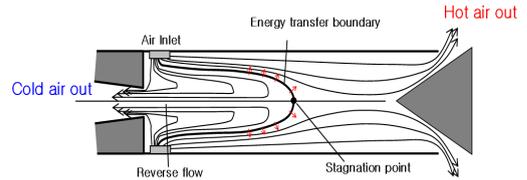
입구 경계조건으로는 20Nm³/hr의 유량을 볼텍스 튜브 6개 노즐의 입구 조건으로 적용하였으며, 입구의 공기 온도는 20℃ 상온으로 설정하였다. 고온과 저온측 출구조건은 대기압 조건을 설정하였고, 벽면은 단열조건을 적용하였다.

2.3 볼텍스 튜브의 에너지 분리 원리

볼텍스 튜브에서 발생하는 에너지 분리에 대한 정확한 원리는 아직 명확히 밝혀지지지는 않았지만, 일반적으로 그림 2에 나타난 에너지 전달의 이론으로 설명되고 있다. 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 이 강제 볼텍스에 의한 자유 볼텍스가 생성된다. 이때 자유 볼텍스는 축방향으로의 유동과 벽면과의 마찰로 인하여 자유 볼텍스 내부에 2차 볼텍스를 수반하는 것으로 알려져 있다. 따라서 자유 볼텍스의 속도는 급격히 증가하게 된다.

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 정체점(stagnation point)이 발생하게 된다. 이러한 정체점을 꼭

지점으로 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. 즉, 볼텍스 튜브 내부의 속도차이로 인하여 관의 중심에서 벽면 방향으로 운동량의 전달이 이루어지게 되고 이에 따른 에너지 균형을 위해 열이 중심부로 이동하지만, 운동량의 전달이 열 전달량보다 크기 때문에 벽면 부근의 기체 온도는 상승하게 되고 튜브의 중심부의 기체는 냉각된다.



[그림 2] 볼텍스 튜브의 에너지 분리 원리 개략도

3. 해석 결과 및 고찰

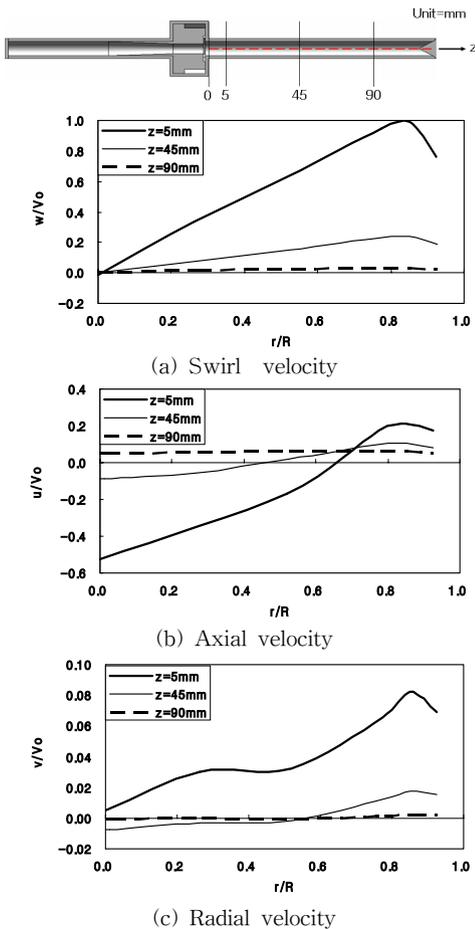
3.1 베이스 모델의 성능 특성

본 연구에 사용된 볼텍스 튜브는 6개 노즐을 통하여 강력한 스윙 속도를 유발하는 장치이며, 튜브 내부의 유동장이 성능을 지배하는 가장 큰 원인이 된다. 이때 튜브 내벽면의 접선방향, 튜브 축방향 및 반경방향을 θ , z , r 이라하고, 그 속도를 w , u , v 로 표현할 수 있다. 볼텍스 발생기에서부터 고온 튜브 측으로 5, 45, 90mm 위치한 부분의 유동 특성을 분석하면 그림 3과 같다. 그림 3(a)의 θ 방향 속도 w 는 스윙에 해당하는 속도 성분으로 $r/R=0$ 에서 모두 0에 가까운 값을 보이고 있으며 세 위치 모두 튜브 벽면 쪽으로 갈수록 속도가 선형적으로 증가하다 벽면 근처에서 속도가 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이때 선형적으로 증가하는, 강제회전에 가까운 지배적 유동영역이 강제 볼텍스 영역이다. 반면에 벽면 근처에서 속도가 감소하는 부분은 자유 볼텍스 영역이다. 볼텍스 발생기를 지나 z 방향으로 유동이 진행되어 감에 따라 ($z=5, 45, 90\text{mm}$), 즉 고온 출구에 가까워질수록 스윙 속도의 크기가 현저히 감소하는 것을 확인 할 수 있다.

그림 3(b)에서 $z=5\text{mm}$ 위치에 나타난 튜브 축방향(z)의 속도 성분 u 는 중심부에서 저온 출구쪽으로 토출되는 유동 흐름이 저온 출구측으로 생성되기 때문에 u 속도가

$r/R=0 \sim 0.65$ 까지 음의 값이 나타난다. 절대값으로 비교하였을 때 벽면 쪽의 속도보다 마찰이 없는 튜브 중심부의 속도가 더 빠르다는 것을 알 수 있다. 또한 $z=45\text{mm}$ 에서는 저온 출구측으로의 u 속도 성분이 작아지고 $z=90\text{mm}$ 에서는 출구 측으로 향하는 속도성분이 존재하지 않는다. 이는 $z=45 \sim 90\text{mm}$ 사이에 튜브 중심축선상에 u 속도 성분이 0가 되는 정체점이 존재하게 되는 것을 의미한다.

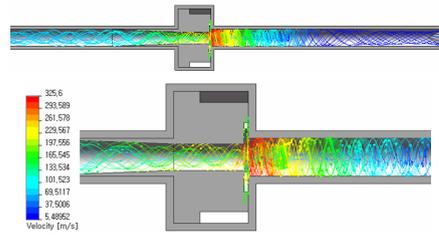
r 방향의 속도 성분인 v 는 가장 크기가 작으며, $z=5\text{mm}$ 위치의 v 는 벽면 쪽에 가까워질수록 속도가 증가하다가 벽면직전에 급격히 속도가 감소한다. 전체적으로 볼텍스 발생기 입구에서 멀어질수록 속도 성분의 크기가 감소함을 알 수 있다.



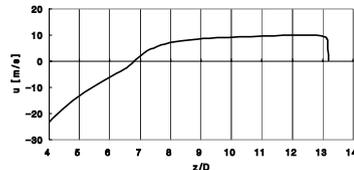
[그림 3] 볼텍스 튜브내의 속도 분포 (Base model)

그림 4는 볼텍스 튜브의 유동을 유선으로 표시한 그림이다. 입구에서 압축되어 들어온 공기가 볼텍스 발생기의 노즐부를 거치면서 강력한 볼텍스를 생성하고, 고온 출구 쪽으로 진행되고 있다. 일정 거리를 지나면서 볼텍스의

강도가 저하되고 나선회전 속도가 둔화되는 것을 볼 수 있다. 이때 벽면주위의 볼텍스의 강도가 약화되기 시작하는 부근에서 저온 출구 측으로 배출되는 유동이 튜브의 중앙부에서부터 발생되게 된다. 이때 튜브의 중심선 상에 유동이 일시적으로 정지하는 정체점이 발생하게 되는데, 그림 4(b) 베이스 모델의 해석 결과는 볼텍스 튜브 직경의 6.7배($z=6.7D$)되는 위치에서 정체점이 발생하였다.



(a) Streamline and velocity



(b) Axial velocity of the tube centerline

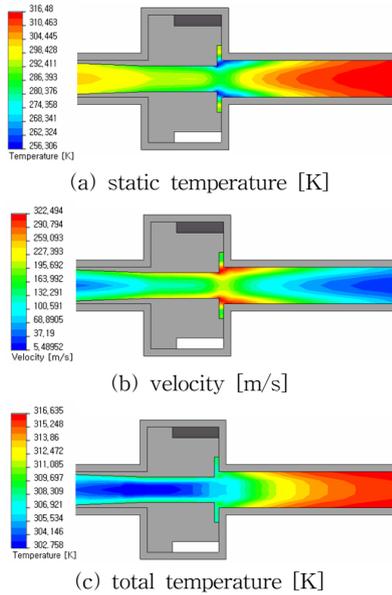
[그림 4] 볼텍스 튜브의 스트림 라인 및 축 방향 속도 성분 (Base model)

그림 5는 볼텍스 튜브 단면에서의 정온도, 전온도 및 속도 크기 분포를 도시화한 그림이다. 단열유동에서 정체 엔탈피(h_0)는 $h_0 = h + V^2/2$ 로 표현되며, 완전기체에 대하여 전온도(T_0)는 정온도(T)와 속도항으로 다음과 같이 표현된다.

$$T_0 = T + \frac{V^2}{2C_p} \quad (6)$$

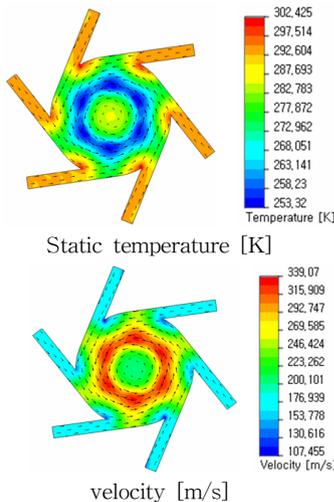
그림 5(a) 정온도의 분포는 볼텍스 발생기 노즐 출구부와 벽면 근처의 강력한 와류 속도에 의하여 온도가 강하하고, 튜브의 중심부에서는 온도가 상승한다. 그림 5(b)에 나타난, 볼텍스 튜브 내부의 유동속도를 고찰하면 발생기의 노즐 출구부에서 가장 강력한 속도 분포를 보이고 있으며, 튜브의 중앙으로 갈수록 속도가 감소함을 알 수 있다. 반면에, 그림 5(c)의 전온도 분포에서는 운동량의 전달에 의해 중심부가 저온으로, 벽면이 고온으로 에너지 분리가 일어나는 것을 확인할 수 있다. 노즐 출구부에서 전온도와 정온도의 온도구배가 역전되는 현상이 발생하는데, 이는 식(6)에 정의된 바와 같이 전온도가 노즐

출구의 강력한 스윙 속도성분을 포함하고 있기 때문이다.



[그림 5] 볼텍스 발생기내의 온도 및 속도 분포 (Base model)

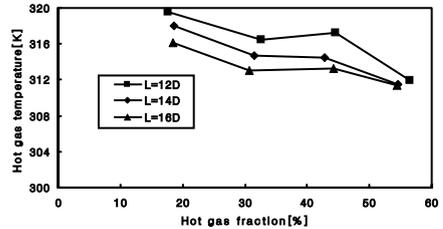
그림 6은 볼텍스 발생기의 입구부 단면에서의 온도와 속도를 보여주고 있다. 6개의 노즐 입구로 공기가 유입되어 볼텍스를 형성하고, 환상의 형태로 온도가 강하고 속도가 증가됨을 볼 수 있다. 이는 팽창에 의한 Joule-Thomson 효과가 발생하기 때문인 것으로 판단된다.



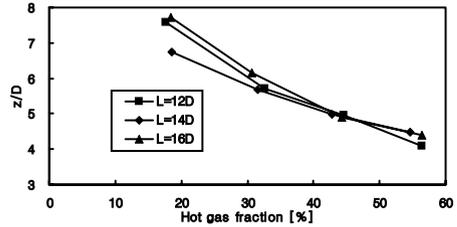
[그림 6] 노즐에서의 정온도 및 속도 분포 (Base model)

3.2 튜브 길이(L)에 따른 성능특성

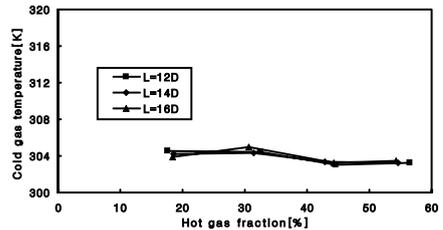
그림 7은 튜브의 길이(L)에 따른 저온 출구 및 고온 출구의 온도 변화에 대한 계산 결과이다. 그림 7(a)와 같이, 튜브의 길이가 길어짐에 따라, 그리고 고온 측으로의 유량이 증대됨에 따라 고온측으로 토출되는 기체의 온도가 감소한다. 이는 튜브의 길이가 길어짐에 따라 스윙 속도가 약화되어 에너지 분리 효과가 감소하기 때문이다. 고온 출구측으로의 유량이 증가됨에 따라 그림 7(b)와 같이 정체점이 짧아지고, 이로 인하여 에너지가 교환되는 원추 모양 역류 유동부의 표면적이 감소하기 때문이다. 하지만 볼텍스 튜브 길이와 고온 출구 측으로의 유량 변화는 저온 측의 출구 온도에는 미미한 영향을 미침을 그림 7(c)를 통하여 알 수 있다.



(a) Hot gas temperature [K]



(b) Stagnation point location [-]



(c) Cold gas temperature [K]

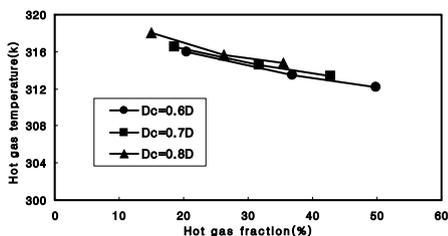
[그림 7] 볼텍스 튜브의 길이 변화에 따른 효과 (D=10, AR=0.14, Dc=0.7D)

3.3 오리피스 직경(Dc)에 따른 성능특성

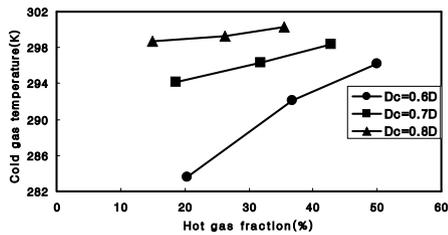
오리피스 직경은 온도분리의 효율에 영향을 미치는 중요한 인자 중의 하나이다. 오리피스 직경이 확대되면 노즐에서 저온 출구 측으로 직접 토출되는 유량이 증가하게 되

고 이는 저온측 온도 강하를 저해하는 요인으로 작용하게 될 것이다. 반대로 오리피스 직경이 축소되면 저온측의 유량은 감소하지만 온도 강하량은 증가할 것이다.

그림 8은 오리피스 직경과 유량비에 따른 고온과 저온측의 온도 변화를 해석한 결과로 오리피스 직경은 튜브의 직경(D)에 대비하여 0.6D, 0.7D 및 0.8D의 세 가지 경우를 해석을 하였고, 고온 출구 측에 위치한 트로틀 밸브를 조절하여 고온 측 토출유량을 조절하여 유량비를 변경하였다. 그림 8(a)와 같이 오리피스 직경 변화에 따른 고온 출구 측의 온도 변화는 미미하나, 그림 8(b)와 같은 저온 측의 온도 변화는 상당한 차이를 보이고 있다. 오리피스의 직경이 작아질수록 저온 측으로 토출되는 가스의 온도강하가 급격히 이루어지게 되는데, 이는 오리피스 직경의 축소로 인하여 노즐에서 저온측 튜브로 직접 유입되는 유동량이 감소하기 때문인 것으로 판단된다.



(a) Hot gas temperature [K]



(b) Cold gas temperature [K]

[그림 8] 볼텍스 튜브의 오리피스 직경 변화에 따른 효과 (D=10mm, AR=0.14, L=14D)

4. 결론

전산 유체해석을 통하여 20Nm³/hr급 볼텍스 튜브의 작동 원리를 분석하였으며, 볼텍스 튜브의 길이, 오리피스 직경, 고온 출구 측 유량비 변화에 따른 해석 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 볼텍스 튜브에서 발생하는 에너지 분리 효과는 볼텍스 튜브내의 유동장과 접선방향의 스월 속도분포

에 지배적인 영향을 받는다.

- 2) 볼텍스 튜브의 길이는 고온 출구 측으로 토출되는 기체의 온도에 영향을 미치는 인자이며, 튜브의 길이(L)가 길어짐에 따라 고온 출구 측으로 토출되는 기체의 온도는 감소하고 저온 출구 측으로 토출되는 기체의 온도에는 그 영향이 미미하다.
- 3) 일정한 유량조건에서 오리피스 직경(Dc)의 변화는 저온 출구 측의 온도변화에 영향을 미치는 중요 성능인자이다. 오리피스 직경을 축소하면 저온 측으로 토출되는 기체의 온도 강하는 급격하게 이루어 지지만, 고온 측으로 토출되는 기체의 온도 변화에는 그 영향이 미미하다.

참고문헌

- [1] S. Eiamsa and P. Promvong, "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.

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

[11] 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.

[12] H.M. Skye, G.F. Nellis, S.A. Klein "Comparison of CFD analysis to empirical data in a commercial vortex tube" International Journal of Refrigeration 29, pp.71-80, 2006.

[13] U. Behera, P.J. Paul, S. Kasthuriangan, R. Karunanithi, S.N. Ram, K. Dinesh, S. Jacob(2005), "CFD analysis and experimental investigations towards optimizing the parameters of Ranque-Hilsch vortex tube" International Journal of Heat and Mass Transfer 48, pp.1961-1973, 2005.

[14] S. Eiamsa-ard and P. Promvong, "Numerical Investigation of the Thermal Separation in a Ranque-Hilsch Vortex Tube" International Journal of Heat and Mass Transfer 50, pp.821-832, 2007.

[15] T. Farouk and B. Farouk, "Large Eddy Simulations of the Flow Field and Temperature Separation in the Ranque-Hilsch Vortex Tube" International Journal of Heat and Mass Transfer 50, pp.4724-4735, 2007.

[16] NIKA GmbH, "COSMOS-FloWorks User's Manual", 2007.

김 창 수(Chang-Su Kim) [준회원]



- 2009년 3월 ~ 현재: 공주대학교 일반대학원 기계공학과 재학

<관심분야>
열 및 유체 유동해석, 재생에너지, 내연기관 성능개발

정 영 철(Young-Chul Jung) [준회원]



- 2005년 2월 : 충남대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 충남대학교, 대학원 기계공학과 (박사과정)

<관심분야>
내연기관 성능개발, 에너지환경

한 근 희(Keunhee Han) [정회원]



- 2002년 2월 : 충남대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2009년 4월 ~ 현재 : 한국에너지기술연구원 온실가스연구단, 책임연구원

<관심분야>
온실가스 회수처리, 재생에너지 개발

박 성 영(Sung-Young Park) [정회원]



- 2002년 5월 : Texas A&M Univ., 기계공학과 (공학박사)
- 2006년 4월 ~ 현재 : 공주대학교, 기계자동차공학부, 교수

<관심분야>
열 및 유체 유동해석, 내연기관 성능개발