

EGR Cooler 대체용 Vortex Tube의 에너지 분리 현상에 관한 실험적 연구

김창수¹, 박성영^{2*}

¹공주대학교 일반대학원 기계공학과, ²공주대학교 기계자동차공학부

Experimental Study on the Energy Separation of the Vortex Tube for EGR Cooler

Chang-Su Kim¹ and Sung-Young Park^{2*}

¹Mechanical Engineering Dept., Graduate School, Kongju National University

²Div. of Automotive & Mechanical Engineering, Kongju National University

요 약 고압의 가스를 이용하여 고온 가스와 저온 가스를 분리하거나 입자상 물질의 분리에 사용 할 수 있는 장치인 볼텍스 튜브의 에너지 분리 특성을 적용하여 자동차의 EGR Cooler 대체장치의 기본 설계 자료를 구축하기 위하여 실험을 수행하였다. 설계를 위한 기초 자료를 확보하기 위하여, 볼텍스 튜브의 입구 압력, 저온출구 및 고온출구 압력 변화에 따른 에너지 분리 특성을 분석하였다. 공급압력이 상승할수록 에너지 분리 효과가 상승하였으며, 최고온도는 저온유량비가 약 0.85 에서, 최저온도는 저온유량비가 약 0.35 에서 발생하였다. 볼텍스 튜브의 고온측 출구온도는 고온측 및 저온측 출구압력에 영향을 받으며, 저온측 출구온도는 출구압력 변화에 독립적인 온도변화 특성을 나타내었다. 본 연구의 결과는 자동차의 EGR Cooler 대체장치의 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. Due to energy separation ability, a vortex tube can substitute for an EGR cooler of the automotive engine. In this study, experimental approach has been performed to analyze the energy separation characteristics of the vortex tube. Energy separation characteristics of the vortex tube has been tested for supply pressure, cold-out pressure, and hot-out pressure. As increasing supply pressure, energy separation effect increased. Maximum temperature exists about 0.85 of the cold-out-flow-ratio, and minimum exists about 0.35. Hot-out temperature of the vortex tube is affected by the hot-out and cold-out pressure. However, for the given conditions, cold-out temperature is independent of exit pressure change. The results from this study can be used for the basic design parameter of the EGR cooler substitute of an automotive engine.

Key Words : Vortex tube, EGR cooler, Throttle valve, Energy separation,

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. 저온의 공기는 기존의 냉각기들에 비해 성능은 떨어지지 만 고압의 가스를 사용하는 장소라면 별도의 동력원을 필요로 하지 않고 저온과 고온의 공기를 동시에 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[1]가 열역학적인 효율을 높이기 위한 다양한 실험과 이론적 연구를 시작하였기 때문에 Ranque-Hilsch 효과라고도 불린다. 볼텍스 튜브내의

*교신저자 : 박성영(sungyoung@kongju.ac.kr)

접수일 09년 11월 16일

수정일 10년 01월 11일

게재확정일 10년 01월 20일

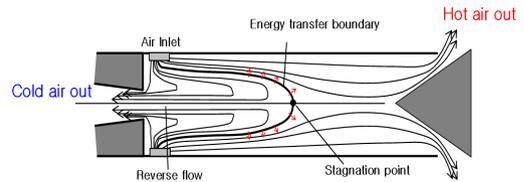
에너지 분리 현상을 설명하고자 Ahlborn[2]등과 Lewins[3]등은 단순 해석식 모델을 제시하였으며, Piralishvili[4]등은 상사법칙과 차원해석을 통한 모델을 Saidi[5]등은 열역학적인 에너지 모델을 제시하였다. 실험적 연구로는 Ahlborn[6]등이 피토 튜브를 사용하여 볼텍스 튜브내의 2차 회전류를 발견하였으며, Dincer[7]등과 Hoffmann[8]등은 제어밸브 최적화를 위한 실험적 연구를 수행하였다. 또한 Aydin[9]등과 Li[10]등은 볼텍스 튜브의 가시화를 통한 실험적 연구를 수행하였다.

최근에 에너지 분리와 물질 분리 특성을 활용하기위해 자동차 엔진에 적용하는 시도가 주목되고 있다. 특히 엔진의 EGR (Exhaust Gas Recirculation) 장치는 고온의 배기열 저감을 위하여 열교환기 형태의 Cooler가 장착된다. EGR Cooler를 볼텍스 튜브로 대체하면, 재순환되는 배기가스의 온도를 저감시킬 뿐만 아니라 배기가스에 내포된 입자상물질(PM)을 분리하여 배기가스의 유해성분을 저감한다는 결과를 발표하였다.[11]

볼텍스 튜브의 에너지 분리효과가 발견된 이래 많은 연구가 진행되어 왔으나, 튜브내의 복잡하고 강력한 유동으로 인하여 아직까지도 볼텍스 튜브의 원리가 완벽히 규명되지 못하고 있는 실정이다. 하지만, 일반적으로 그림 1에 나타난 에너지 전달의 이론으로 에너지 분리효과가 설명되고 있다.[12] 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 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 역류되는 유동이 튜브의 중앙부에서부터 발생되게 된다. 이때 튜브의 중심선 상에 유동이 일시적으로 정지하는 정체점(stagnation point)이 발생하게 된다. 이러한 정체점을 꼭지점으로 종 모양의 역류 유동이 저온 출구 측으로 발생하게 되며, 이 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 열 전달량보다 크기 때문에 벽면 부근의 기체 온도는 상승하게 되고 튜브의 중심부의 기체는 냉각된다.



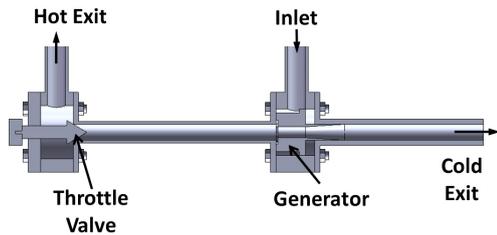
[그림 1] 볼텍스 튜브의 에너지 분리 원리

본 연구에서 적용된 볼텍스 튜브는 자동차 엔진의 배기가스 재순환장치에서 EGR Cooler를 대체하기 위하여 제작된 볼텍스 튜브이다. 본 연구의 목적은 EGR Cooler 대체용 볼텍스 튜브의 에너지 분리 특성을 파악하고 설계를 위한 기초자료를 구축하는 것이다.

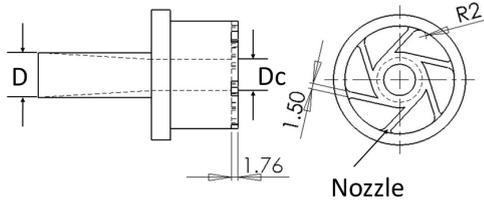
2. 볼텍스 튜브 설계 및 실험 방법

2.1 볼텍스 튜브의 설계 및 제작

본 연구의 대상은 자동차 엔진의 EGR Cooler를 대체하기 위하여 제작된 20Nm³/hr급 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 2(a)와 같이 원추의 형상을 가지고 있으며 60°의 내각을 가지고 있다. 볼텍스 발생기는 튜브 외경에 접선 방향으로 6개의 노즐을 가공하였고, 이를 통하여 볼텍스가 튜브내에 형성된다. 본 연구에 적용된 모델은 튜브의 직경(D) 12mm를 기준으로 노즐의 면적비($AR=4An/\pi D^2$), 오리피스 직경(Dc) 및 튜브의 길이(L)를 표 1과 같이 설계하였다. 여기서 An은 그림 2(b)에 표시된 6개 노즐부의 총 단면적이다. 본 연구에 사용된 볼텍스 튜브의 기본 형태는 기존의 연구[13]에서 설계된 볼텍스 튜브를 최적화한 모델이다.



(a) 볼텍스 튜브



(b) 볼텍스 발생기

[그림 2] 볼텍스 튜브의 개략도

[표 1] 볼텍스 튜브의 제원 및 해석 변수

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

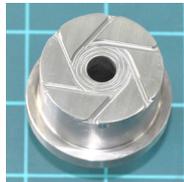
그림 3은 제작된 볼텍스 튜브의 각 요소부품을 보여주고 있다. 특히 그림 3(b)는 트로틀 밸브와 조절나사 결합부를 보여주고 있다. 여기서 눈금이 달린 조절밸브를 1회 전하면 트로틀 밸브의 높이가 1mm씩 이동하도록 제작하였다.



(a) 볼텍스 튜브



(b) 트로틀 밸브



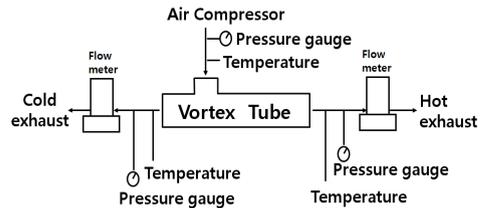
(c) 볼텍스 발생기

[그림 3] 볼텍스 튜브 시제품

2.2 실험 장치 및 방법

볼텍스 튜브의 에너지 분리효과를 실험하기 위하여 그림 4와 같이 압력센서, 온도센서 및 유량계를 공기압 입구, 저온출구 및 고온출구 측에 각각 설치하였다. 정상상태에 도달하는 시간을 단축하기 위하여 단열재로 볼텍스 튜브를 단열하였다.

가압공기는 150마력의 컴프레서와 1,000 liter의 공기 탱크를 연결하여 일정한 공급압력을 유지하였다. 볼텍스 튜브를 SUS304로 가공하였기 때문에 공기압을 공급한 후 약 10분 정도의 정상화 시간이 요구되었다. 공급압의 조절은 입구측의 압력레귤레이터를 사용하였으며, 조건 별 총 3회의 실험을 수행한 후 결과값을 산술평균하였다.



(a) 볼텍스 튜브 실험장치의 개략도



(b) 유량 및 온도 측정장치



(c) 단열된 볼텍스 튜브

[그림 4] 볼텍스 튜브 실험 장치

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 에너지 분리 특성

본 연구에 사용된 볼텍스 튜브는 볼텍스 발생기에 가공된 6개 노즐을 통하여 강력한 스웰 속도를 유발하는 장치이며, 튜브 내부의 유동장이 성능을 지배하는 가장 큰 인자가 된다.

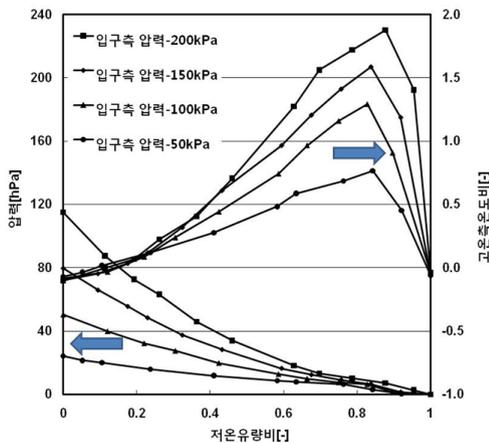
그림 5 및 그림 6은 볼텍스 튜브의 성능시험을 수행한 결과이다. 입구부의 압력을 게이지압력으로 50kPa에서 200kPa까지 50kPa 단위로 증가 또는 감소하였으며 이에 따른 입구 및 출구부의 온도와 압력을 측정하였다. 그림 5 및 그림 6의 x, y축에 표현된 저온유량비와 온도비의 정의는 다음과 같다.

$$\text{저온유량비} = \frac{\text{저온측 토출 유량}}{\text{총 유량}} \quad (1)$$

$$\text{온도비} = \frac{\text{출구측 온도} - \text{입구 온도}}{\text{입구 온도}} \quad (2)$$

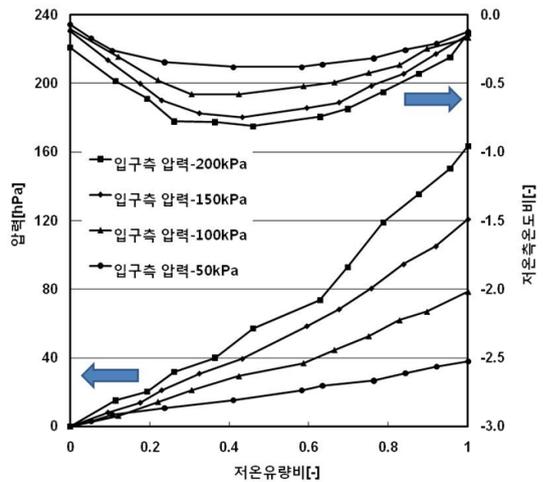
저온유량비는 전체 공기유량 대비 저온측으로 토출되는 공기유량의 비로서 저온유량비가 1.0이 되면 고온측의 트로틀 밸브가 닫혀 저온측으로만 유동이 발생함을 의미한다. 온도비는 입구온도를 기준으로 한 출구온도차의 비율이다.

그림 5는 고온 출구측의 압력 및 온도 변화의 특성을 나타내고 있다. 입구압력이 증가할수록 출구측의 온도비와 출구압력이 상승하고, 저온유량비가 증가할수록 고온측 압력은 감소한다. 저온유량비가 0에서 0.8사이에서는 저온유량비가 증가할수록 온도비가 증가하며, 약 0.85 근방에서 최대값을 나타내고 0.9에서 1.0까지 온도비가 급격히 감소한다. 최대 고온 온도분리특성을 보이는 구간은 저온유량비 0.8 ~ 0.9 구간이다. 이는 고온측으로 토출되는 유량감소에 기인한 것으로 판단된다.



[그림 5] 공급압력과 저온유량비에 따른 고온 출구의 압력 및 온도 변화

그림 6은 저온 출구측의 압력 및 온도 변화의 특성을 나타내고 있다. 입구압력이 증가할수록 저온 출구측의 압력이 증가하고, 저온측 온도비가 감소한다. 저온유량비가 증가할수록 저온측 압력은 증가한다. 실험된 입구압력의 조건에서 저온유량비가 0.3~0.4근처에서 최저 온도비를 얻을 수 있다.



[그림 6] 공급압력과 저온유량비에 따른 저온 출구의 압력 및 온도 변화

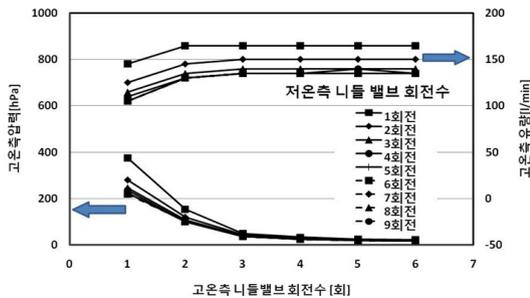
고온의 유체를 사용하고자 하는 목적이라면 0.8~0.9의 저온유량비 구간을 사용할 수 있고, 본 연구에서와 같이 저온 유체를 사용할 목적이라면 저온유량비 0.3~0.4 사이의 값을 사용하는 것이 바람직하다. 출구의 온도와 유량은 상관관계가 있으므로 적절한 구간을 목적에 맞게 사용할 수 있을 것이다.

3.2 출구 압력변화에 따른 에너지 분리 특성

자동차의 배기관에 볼텍스 튜브를 장착하게 되면, 배기가스 재순환 배관에서의 압력변동에 의하여 고온측과 저온측에 특정 압력이 생성된다. 이때 출구측 압력변화에 따른 볼텍스 튜브의 에너지 분리 특성을 모사하기 위하여, 실험장치의 저온측과 고온측 출구에 장착된 니들밸브를 조절하여 출구압력에 따른 에너지 분리특성 실험을 수행하였다. 니들밸브를 완전히 닫은 상태에서 니들밸브의 회전수를 증가시키면 출구측의 압력은 강하한다. 결과값의 비교 분석을 위하여 공기의 공급압력을 150kPa로 고정하고, 트로틀 밸브를 0.5mm로 고정하였다. 그림 7과 8은 각각 니들밸브의 회전수에 따른 출구측의 압력과 유량변화를 나타내고 있다.

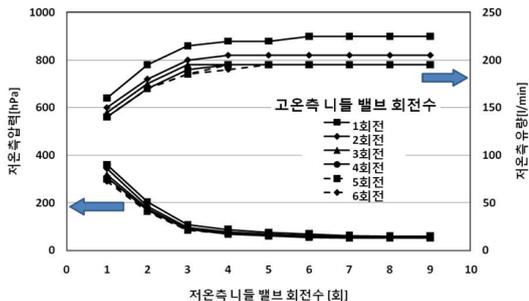
그림 7에서 고온측에 장착된 니들밸브의 회전수를 증

가시킴에 따라 고온측 압력이 감소된다. 이때 고온측 압력은 게이지 압력으로 표시되었다. 저온측 니들밸브의 회전수 증가도 고온측 압력강하에 영향을 미친다. 이는 저온측으로 방출되는 유량이 증가할수록, 고온측 유량이 감소하고 압력도 감소하기 때문이다. 여기서 주목할 점은 고온측 니들밸브가 3회전미만일 경우에 고온측 압력이 급격히 감소하지만 그 이상의 고온측 니들밸브회전은 고온측 압력에 미미한 영향을 미친다. 또한 저온측 니들밸브의 회전수가 3회전 미만에서는 고온측압력에 큰 영향을 미치며 이는 결과적으로 고온측 유량에도 영향을 미친다. 즉 고온측 니들 밸브가 3회전 이상이면 고온측 토출 유량이 안정되며, 이때의 유량은 저온측의 압력조건에도 영향을 받는다.



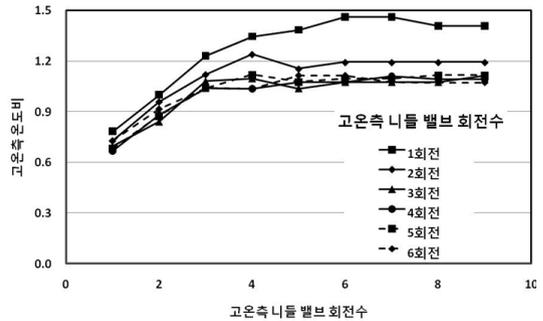
[그림 7] 고온측 유량조절밸브 회전수에 따른 고온측 압력 및 유량 변화

그림 8은 저온측 유량조절밸브 회전수에따른 저온측 압력 및 유량의 변화를 보여주고 있다. 저온측 니들밸브의 회전수를 증가시키면 3회전까지는 저온측 압력이 강하하며 저온측 유량도 증가한다. 고온측 밸브회전수의 변화는 저온측 압력에 미미한 영향을 미치지만, 저온측 유량에 미치는 영향은 크다. 특히 고온 니들밸브 회전수 3 미만에서는 큰 영향력을 가지지만 3회전이상에서는 미미한 영향을 미친다.



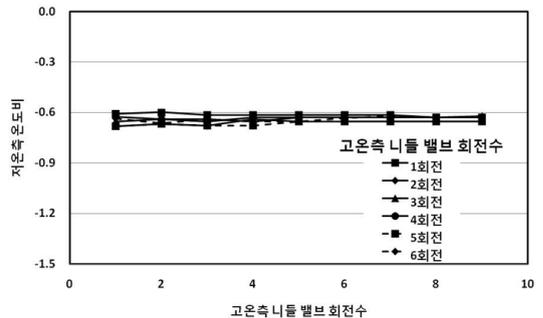
[그림 8] 저온측 유량조절밸브 회전수에 따른 저온측 압력 및 유량 변화

그림 9는 니들밸브 회전수에 따른 고온 출구측의 온도비를 나타내고 있다. 고온측 온도비는 저온측 압력이 낮고 고온측 압력이 높을 때 온도가 상승하는 특성을 보이고 있다. 고온측 니들밸브 3회전이상에서의 온도변화는 미미하다.



[그림 9] 저온측 유량조절 밸브 회전수에 따른 고온측 온도비의 변화

고온 출구측의 온도변화 경향에 반하여 그림 10에 나타난 저온 출구측의 온도는 저온 및 고온측의 압력변화에 거의 영향을 받지 않음을 나타내고 있다. 이는 저온측으로 토출되는 기체의 유량과 압력변화에도 불구하고 저온측 토출온도는 일정함을 나타낸다.



[그림 10] 저온측 유량조절 밸브 회전수에 따른 저온측 온도비의 변화

4. 결론

EGR Cooler 대체용으로 제작된 20Nm³/hr급 볼텍스 튜브를 설계 및 제작하였으며 에너지 분리특성 실험을 수행하였다. 입구의 공급압력과 고온 및 저온측의 출구측 압력에 의한 에너지 분리특성에 미치는 영향을 실험적으

로 연구하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 볼텍스 튜브의 공급압력을 증가시킬수록 에너지 분리효과가 상승하여 최고온도가 상승하고 최저온도가 강하한다. 최고온도는 저온유량비가 0.8 ~ 0.9 부근에서 발생하며, 최저온도는 저온유량비가 0.3 ~ 0.4 부근에서 발생한다.
- 2) 볼텍스 튜브의 고온측 출구온도는 고온측 및 저온측 출구압력에 영향을 받으며, 고온측압력이 높고 저온측압력이 낮을 때 고온측 출구 온도가 상승한다. 저온측 출구온도는 저온측 및 고온측 압력의 변화에 독립적인 온도변화 특성을 나타낸다.

참고문헌

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] J. Lewins and A. Bejan, "Vortex Tube Optimization Theory," Energy 24, pp. 931-943, 1999.
- [4] 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.
- [5] M. Saidi and M. Allaf Yazdi, "Energy Model of a Vortex Tube System with Experimental Results," Energy 24, pp.625-632, 1999.
- [6] B. Ahlborn and S. Groves, "Secondary Flow in a Vortex Tube," Fluid Dynamics Research 21, pp.73-86, 1997.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] O. Aydın and M. Baki, "An Experimental Study on

the Design Parameters of a Counterflow Vortex Tube," Energy 31, pp.2763-2772, 2006.

- [10] 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.
- [11] Y. Jung, D. Choi, S. Park, C. Kim, S. Lee, J. Ryu, "An Experiment Study on the Energy Separation in a Vortex Tube for Engine Exhaust Gas," KSAE Conference, pp.459-464, 2009.
- [12] N.F. Aljuwayhel, G.F. Nellis, S.A. Klein, "Parametric and internal study of the vortex tube using a CFD model," International Journal of Refrigeration 28, pp.442-450, 2005.
- [13] Dong-Jin Oh, "An Experimental Study on the Characteristics of a Low Pressure Vortex Tube," Chungnam National University, Doctoral Dissertation, 2003.

김 창 수(Chang-Su Kim)

[준회원]



- 2009년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 일반대학원 기계공학과 재학

<관심분야>

열 및 유체 유동해석, 재생에너지, 내연기관 성능개발

박 성 영(Sung-Young Park)

[정회원]



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

<관심분야>

열유체 해석, 내연기관 성능개발