

저온 출구의 배압조건에 따른 볼텍스 튜브의 온도분리 특성 연구

임 석 연[†]

동명대학교 자동차공학과

Temperature Separation Characteristics of a Vortex Tube Based on the Back Pressure of the Cold Air Exit

Seokyeon Im[†]

Department of Automotive Engineering, Tongmyong University

(Received August 13, 2016; Revised September 11, 2016; Accepted September 14, 2016)

Abstract – Electric vehicle ownership is expanding for two reasons: its technology features have enhanced fuel economy, and the number of vehicle emissions regulations is increasing. Battery performance has a large influence on the capability of electric vehicles, and even though battery thermal management has been actively researched, specific technological improvements to battery performance are not being presented. For instance, many industrial applications utilize vortex tubes as components for refrigeration machines because of their numerous intrinsic benefits. If electric vehicles incorporate vortex tubes for battery cooling, performance and efficiency advancements are possible. This study uses a counter-flow vortex tube to investigate its temperature separation characteristics, based on the back pressure of the cold air exit and the difference between the inlet and back pressures. The experiment uses a vortex tube with the following parameters: six nozzle holes, a 20 mm inner vortex diameter (D), a 14D tube length, a 0.7D cold exit orifice diameter, and a nozzle area ratio of 0.142. The measurements prove that the temperature difference between the hot air and cold air decreased because of the flow resistance of the hot air and the backflow phenomenon at the cold air exit. The flow resistance causes the temperature difference to decrease, and the back pressure of the cold air exit influences the flow resistance. The results show that the back pressure significantly influences the efficiency of temperature separation.

Keywords – back pressure(배압), energy separation(에너지 분리), geometric(형상), temperature separation(온도 분리), vortex tube(볼텍스 튜브)

Nomenclature

ΔT_h : Temperature difference between the inlet air and hot air, °C ($\Delta T_h = T_h - T_i$)

ΔT_c : Temperature difference between the inlet air and cold air, °C ($\Delta T_c = T_i - T_c$)

y_c : Cold air mass fraction (cold air mass flow/

inlet air mass flow)

P_i : Inlet pressure of vortex tube, kgf/cm²

P_b : Back pressure of cold exit, kgf/cm²

1. 서 론

현대 사회는 화석연료의 무분별한 사용으로 인해 대기오염과 자원고갈 문제에 직면하고 있다. 특히, 화석연료의 연소를 통해 동력을 발생시키는 기존의 내연기관 자동차는 대기 오염의 주요 원인으로 인식되고 있

[†]Corresponding author : imsy@tu.ac.kr

Tel: +82-51-629-1628, Fax: +82-51-629-1519

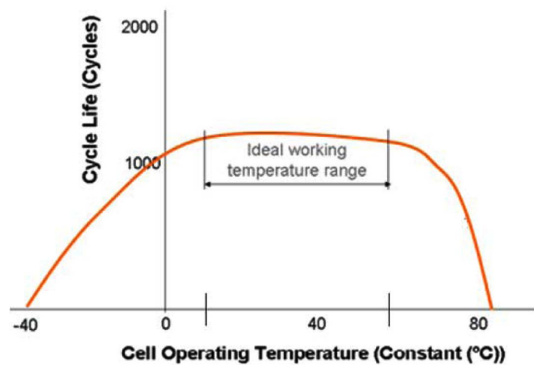


Fig. 1. Battery life and operation temperature [1].

어 연비 및 배출가스 규제가 더욱 강화되고 있는 실정이다. 강화되는 규제를 만족시키기 위해서는 기존 자동차 기술의 한계성 때문에 전기자동차(Electric vehicle)와 연료전지 자동차(Fuel cell electric vehicle)와 같은 새로운 형태의 동력발생장치의 적용이 요구되고 있다. 이러한 전기자동차들은 주 동력원으로 배터리 전력을 사용하기 때문에 배출가스로부터 발생하는 환경오염 문제나 화석연료비의 상승과 같은 문제가 발생되지는 않지만, 상용화를 위해서는 해결해야 할 여러 가지 문제점이 남아 있는 실정이다. 가장 큰 당면 과제 중 하나는 배터리에서 발생하는 열을 적절히 제거해 성능 및 수명을 향상시키는 배터리 열관리(Battery thermal management) 기술이다. 효율이 낮은 곳에서 사용되던 배터리의 과도한 열방출로 인하여 온도가 상승되어 배터리의 수명과 성능에 크게 영향을 미치게 된다. 배터리의 이상적인 작동 온도는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 10~60°C로 알려져 있다. 따라서 배터리 열관리 제어는 과열조건에서 배터리 내구성 향상 및 차량의 운전성 향상을 위해 매우 중요하며, 이를 위한 냉각 시스템 개발이 무엇보다 필요한 실정이다.

배터리 열관리에 대한 연구는 다양한 방법들에 의해 시도되고 있다. Pesaran[2, 3]은 능동 냉각, 공기 냉각과 액체 냉각, 가열 및 냉각의 혼합을 고려하지 않은 냉각시스템을 이용한 열관리 방법에 대하여 연구를 진행하였고, Kim[4]은 진보된 배터리 열관리 모델을 개발하여 냉각수 등과 같은 설계변수들의 변화에 따른 배터리 냉각효과를 검토하였다. 그 외에도 전기자동차용 배터리 냉각을 위해 배터리 팩을 하나의 집중 열용량으로 가정한 열관리 모델을 이용하거나 별도의 열관리 디자인 모델을 개발하여 냉각수 등 설계 변수들을

변화시키면서 냉각효과를 관찰하는 해석 기법과 배터리 팩을 구현할 수 있는 실험 장치를 구성하고, 이 배터리 팩으로 냉매에 의한 냉각공기 또는 대기 공기를 공급하여 냉각하는 실험 기법의 연구가 많이 진행되고 있다[5].

친환경 자동차의 배터리 열관리는 다양한 해석 기법 및 실험 방법에 의해 배터리 성능과 수명에 밀접한 영향을 미치는 연구가 진행되고 있음에도 불구하고 아직까지 효율적인 방안이 제시되고 있지 않은 실정이다. 연구의 대부분은 해석 기법에 의해 진행되고 있으며, 일부 실험 연구는 냉매에 의한 냉각 공기를 이용하거나, 대기 공기를 이용하여 배터리 팩을 냉각시키는 방법들만 제시되고 있을 뿐이다. 따라서 배터리 열관리에 대한 연구는 새로운 개념과 방법들의 시도에 의해 다각적이고 지속적으로 연구가 진행되어야 한다고 생각한다.

볼텍스 튜브는 간단한 구조의 관을 이용하여 어떠한 화학변화나 연소현상 없이 압축공기로부터 저온공기와 고온공기를 분리하는 온도분리 장치이다. 볼텍스 튜브의 온도분리 효과는 Ranque[6]에 의해 처음 발견되고, Hilsch[7]의 다양한 실험과 이론적 연구를 통해 널리 알려지게 되었기 때문에 Ranque-Hilsch 효과라고도 불린다. Lay[8], Bruun[9]과 Takahama[10]는 튜브 내부의 압력과 온도를 측정함으로써 배출 유량에 따른 에너지분리 특성과 효율 특성을 분석하였으며, Stephan[11]은 Gortler Vortex에 의한 내부 유동강도 특성에 대한 연구를 진행하였다.

볼텍스 튜브에 대한 다양한 연구 중 가장 보편적으로 받아들여지는 온도분리 이론은 Fulton[12]이 제안한 자유 볼텍스와 강제 볼텍스 이론으로 Fig. 2에 의해 설명될 수 있다. 압축된 유체는 점선방향의 볼텍스 노

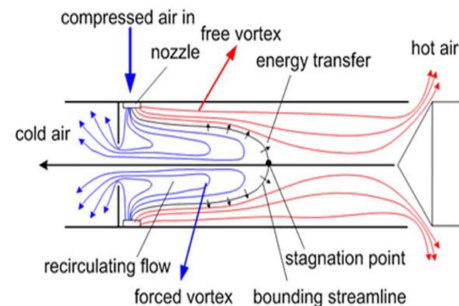


Fig. 2. Supposed flow pattern and energy flow in a counter flow type [12, 13].

즐을 빠르게 통과하게 되고, 이때 볼텍스 튜브 중심부 분은 빠른 유동속도를 갖는 “자유 볼텍스”가 형성되어 튜브 내 벽면 쪽은 중심부에 비해 속도가 느리게 형성 된다. 이 후 유체 유동은 스톱 밸브 방향으로 이동 하면서 “자유 볼텍스”는 유체층 사이의 마찰 작용에 의해 볼텍스 튜브의 중심부에서 “강제 볼텍스”로 변화 하게 된다. 이러한 유동 변화로 인하여 관의 중심부에서 내부 벽면쪽으로 운동량 전달이 일어나게 되며 이때 볼텍스 중심부가 벽면에 가까운 유동보다 더 냉각되게 되고, 벽면은 고온 유동이 되면서 스톱밸브 쪽의 고온 출구단으로 배출되게 된다. 온도분리가 진행되는 동안 입구에 공급된 압축공기는 정체점(Stagnation-point)을 기점으로 온도분리는 더 이상 이루어지지 않으며 이 정체점의 벽면 온도는 고온 출구단의 온도보다 더 높게 된다. 이러한 정체점의 위치는 저온출구로 배출되는 유량 즉, 저온공기 유량비(y_c)에 따라 좌우로 이동 된다.

또한, 이러한 볼텍스 튜브의 온도분리 특성은 유체의 유동작용에 의해 발생하는 특성이기 때문에 튜브 내부의 표면 거칠기에 의해 온도분리 특성이 달라질 수 있다는 것에 착안하여 Oh 등[14]은 튜브 재질의 표면 거칠기에 따른 온도분리 특성을 확인하였다.

따라서 본 연구에서는 전기자동차 및 연료전지 자동차 등과 같은 친환경 자동차의 배터리 팩 냉각에 온도 분리를 갖는 볼텍스 튜브의 적용을 위해 볼텍스 튜브의 유동에 영향을 미치는 튜브 내부의 표면거칠기와 배압과의 영향성을 검토하기 위한 사전 연구로서 저온공기 출구의 배압과 입구압력과 배압과의 차이에 따른 온도분리 특성을 검토하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

볼텍스 튜브의 배압조건에 대한 온도분리 특성을 확인하기 위해 본 실험에서는 단류형에 비해 온도분리 효율이 상대적으로 우수한 대향류형(counter-flow type)[12, 15] 볼텍스 튜브를 사용하였다. 실험장치는 Fig. 3와 같고, 볼텍스 튜브의 기하학 형상은 Table 1에 나타내었다.

실험장치는 압축공기 공급부, 볼텍스 튜브에 의해 온도분리를 일으키는 시험부, 배압 조절부 및 데이터 처리부로 구성되었다. 저온공기 유량비(y_c)의 확인을 위해 압축공기 공급부 및 저온 출구부에 공기 유량계가 적용되었으며, 압축공기 공급시 발생하는 공기 맥동현

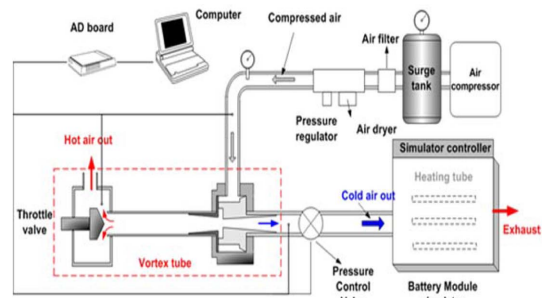


Fig. 3. Schematic diagram of experimental apparatus.

Table 1. Experimental parameters

Material properties	Value
Number of nozzle holes	6
Inner diameter of vortex(mm)	20
Inner diameter of nozzles(mm)	3.0
Tube length(mm)	280
Cold exit orifice hole diameter(mm)	14
Nozzle area ratio	0.142

상을 방지하기 위해 공기 공급부에 서지탱크가 사용되었다.

온도 측정을 위한 열전대는 볼텍스 튜브 입구, 고온 공기 출구 및 저온공기 출구에 각각 설치하였으며, 공급압력 및 배압의 확인을 위해 압력 센서는 볼텍스 입구 및 저온공기 출구에 각각 설치되었다. 저온공기 유량비(y_c)는 고온공기 출구에 구성된 스톱 밸브에 의해 제어되도록 구성되어 있다. 또한, 배압 조절부는 저온출구 후단에 위치하여, 밸브 제어에 의해 배압이 조절될 수 있도록 하였다.

볼텍스 튜브에 의해 분리된 각각의 온도와 입구 공급 압력 데이터는 열전대(Thermal-couple) 및 압력센서를 사용하여 측정하고 DAQ를 이용하여 확인하였다.

배압에 따른 온도분리 특성 실험은 입구공급 압력 ($P_0=1.0 \text{ kgf/cm}^2$)에서 저온공기 유량비($y_c=0.3\sim0.8$)를 변화시키고, 배압조건은 입구 공급압력(P_1)을 최대 배압으로 하여, 0.10 kgf/cm^2 씩 변화시키면서 실험을 진행하였으며, 배압에 따른 온도분리 효과가 급격하게 저하되는 조건은 실험에서 배제하였다.

또한, 입구공급 압력과 배압과의 차이에 따른 온도 분리 특성 실험시 공급압력은 저압조건인 $P_0=0.5, 1.0, 1.50 \text{ kgf/cm}^2$ 로 하였으나, 저온공기유량비 조건은 저온

분리 특성이 상대적으로 우수한 $y_c=0.6$ 과 $y_c=0.7$ 조건에서 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 배압조건에 따른 온도분리 특성

볼텍스 튜브의 배압조건에 따른 온도분리 특성을 확인하기 위해 입구공급 압력을 1.0 kgf/cm^2 로 고정하고, 배압을 0.1 kgf/cm^2 간격으로 높여가며 고온공기 및 저온공기 온도차를 확인하였고, 이를 Fig. 4와 Fig. 5에 각각 나타내었다.

고온공기 온도차(ΔT_h)를 먼저 살펴보면, 저온공기유량비가 증가함에 따라 고온공기 온도차는 모든 배압조

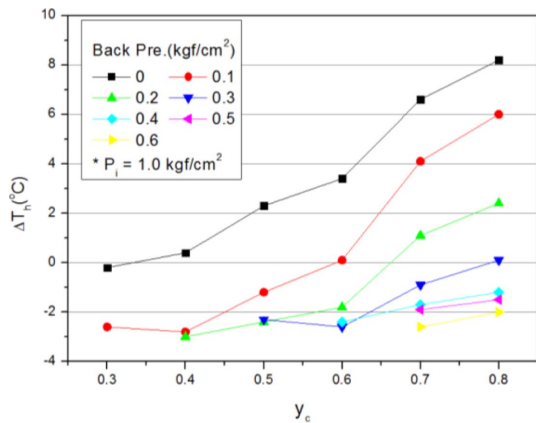


Fig. 4. Temperature difference ΔT_h between the inlet air and hot air according to the back pressure of the vortex tube.

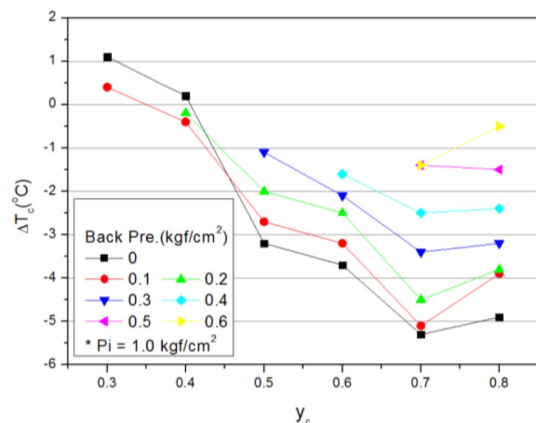


Fig. 5. Temperature difference ΔT_c between the inlet air and cold air according to the back pressure of the vortex tube.

건에서 증가하는 경향을 보이고 있고, 고온공기 온도차는 배압조건 $P_b=0 \text{ kgf/cm}^2$ 에서 최대 8.1°C 를 보이고 있다.

저온공기 출구의 배압이 증가함에 따라 고온공기 온도차가 감소하는 경향을 보이고 있는데, 이는 배압이 증가할수록 저온 출구로 배출되는 저온공기의 유동저항으로 인하여 튜브 내부의 볼텍스 강도 약화와 저온공기 출구로 배출되어야 될 저온공기가 배압의 증가로 인하여 고온공기 출구로 배출되기 때문에 발생한 온도분리 효과의 저하 현상으로 판단된다.

또한, 배압조건 $P_b=0.3 \text{ kgf/cm}^2$ 이상에서는 오히려 입구온도보다 낮아지는 경향을 보이고 있는데, 이는 고온공기 출구로 고온공기만 배출되어야 하나, 저온공기 출구의 배압증가로 인하여 저온공기의 일부가 고온공기 출구로 이동하게 되면서 발생한 현상으로 사료된다.

Fig. 5는 입구 압력조건 $P_i=1.0 \text{ kgf/cm}^2$ 에서, 배압과 저온공기 유량비에 따른 저온공기 온도차(ΔT_c)를 나타낸 것이다. 고온공기 온도차의 경우와 동일하게 저온공기유량비가 증가함에 따라 저온공기 온도차도 증가함을 보이고 있다. 그러나 저온공기 유량비 $y_c=0.8$ 구간에서 ΔT_c 는 증가하고 있는데, 이는 '저온공기 최대 온도차는 저온공기 유량비 $y_c=0.5\sim 0.7$ 구간에서 최대값을 갖는다'[16]는 선행연구와 동일한 경향을 보이는 것이며, 이러한 특성은 저온공기유량비가 증가함에 따라 고온출구 쪽 스로틀 밸브가 닫히면서 고온공기 출구의 유출단면적이 작아지고, 이로부터 저온공기 출구로 역류되는 중심부의 유동과 벽면 사이의 고온공기가 저온공기 출구쪽으로 배출되기 때문으로 볼 수 있다.

저온공기 온도차는 배압조건 $P_b=0 \text{ kgf/cm}^2$, 저온공기 유량비 $y_c=0.7$ 에서 최대 5.3°C 의 차이를 보이고 있다. 또한, 저온공기 출구의 배압이 증가함에 따라 저온공기 온도차는 감소하는 경향을 보이고 있으며, 이는 저온공기 출구의 배압증가로 인하여 볼텍스 튜브 내부의 볼텍스 강도 약화에 기인한 온도분리 효과의 저하로 판단된다.

3-2. 입구공급 압력과 배압의 압력차에 따른 온도분리 특성

볼텍스 튜브의 저온공기 출구의 배압에 따라 온도분리 효과가 감소되는 경향으로부터 입구공급 압력과 배압과의 차에 따른 온도분리 특성을 확인하기 위해 온도분리 효과가 명확하게 나타나는 구간인 저온공기 유량비 $y_c=0.6$ 과 $y_c=0.7$ 조건에서 검토하여, 고온공기 온

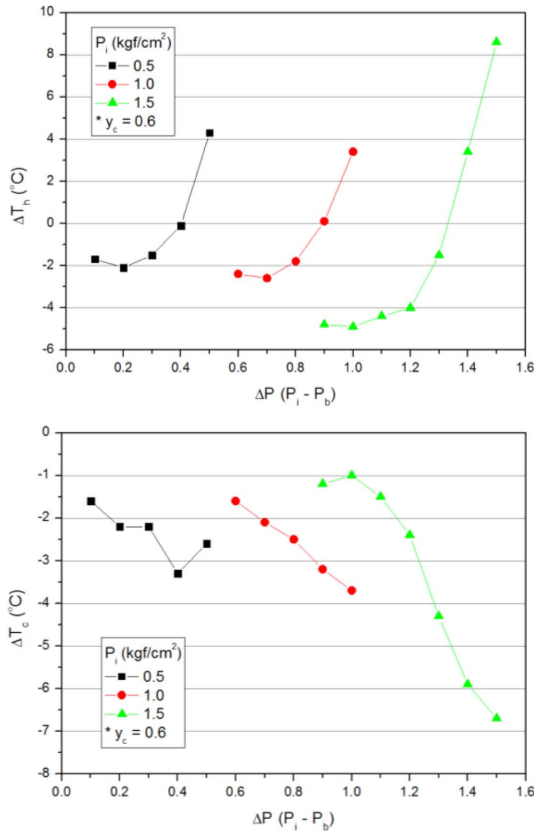


Fig. 6. Temperature difference ΔT_h and ΔT_c according to difference between the inlet pressure(P_i) and back pressure(P_b) at $y_c=0.6$.

도차 및 저온공기 온도차를 Fig. 6과 Fig. 7에 각각 나타내었다. $y_c=0.6$ 일 경우, 고온공기 온도차는 압력차가 1.5 kgf/cm² 조건에서 최대 8.4°C, 저온공기 온도차는 최대 6.7°C를 보이고 있다. 또한, 입구 공급압력과 배압 사이의 차이가 증가할수록 고온 및 저온공기 온도차는 증가하며, 배압이 증가함에 따라 온도 분리차는 감소하는 경향을 보이고 있다.

$y_c=0.7$ 일 경우, 고온공기 온도차는 최대 8.5°C, 저온공기 온도차는 6.6°C를 보이고 있다. 입구 공급압력과 배압 사이의 차이가 커질수록 온도차는 증가하였으며, 이를 통해 배압이 높을수록 온도 분리는 감소하는 것을 알 수 있었다. 이는 저온공기 출구의 배압이 증가할수록 볼텍스 튜브 내부의 볼텍스 강도가 약화되고, 저온공기 출구로 배출되어야 할 저온공기의 역류현상에 의한 온도분리 효과의 저하로 판단된다.

Fig. 6과 Fig. 7에서 배압이 감소함에 따라 ΔT_h 와

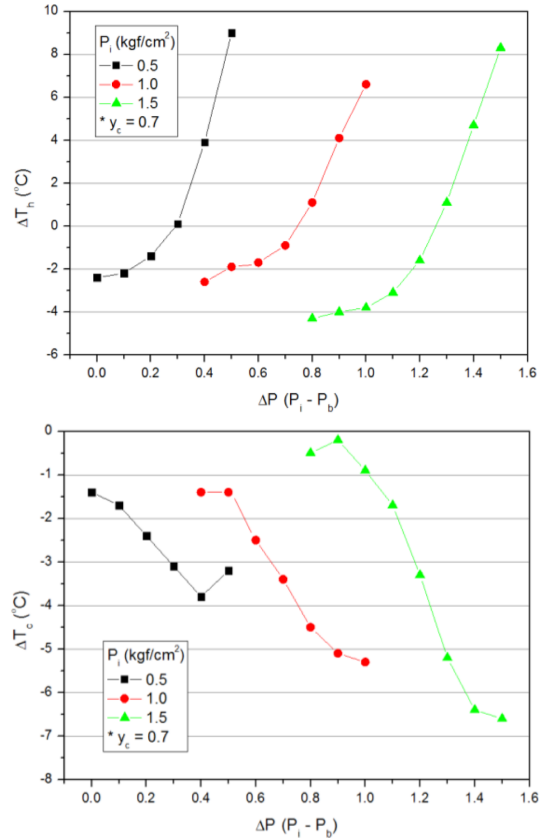


Fig. 7. Temperature difference ΔT_h and ΔT_c according to difference between the inlet pressure(P_i) and back pressure(P_b) at $y_c=0.7$

ΔT_c 온도분리 특성은 개선되는 특성을 보이고 있으나, $P_i=0.5$ kgf/cm²에서 $\Delta P=0.5$ kgf/cm²($P_b=0$)일 경우, ΔT_c 값이 $\Delta P=0.4$ kgf/cm²에 비해 악화되는 특성을 보이고 있다. 이러한 특성은 저압조건에서는 볼텍스 튜브 내부에 걸리는 구동압력이 약하지만 저온출구에 걸리는 배압에 의해 볼텍스 튜브 내부에 적절한 구동압력이 발생되어 오히려 볼텍스 튜브내부의 온도분리 효과를 개선시켜서 발생되는 현상으로 사료된다.

따라서 전기자동차의 배터리 팩 냉각을 위해 볼텍스 튜브 시스템의 적용을 고려할 경우, 배터리 팩의 구조로부터 발생할 수 있는 배압을 적절하게 제어하는 것이 볼텍스 튜브가 갖는 온도분리 효과를 최대로 활용할 수 있는 최선의 방안이며, 향후 적용을 위해서는 배압의 방지 및 최소화를 위한 연구가 반드시 필요하리라 생각된다.

4. 결 론

전기자동차의 배터리 팩 냉각용 볼텍스 튜브의 온도 분리 특성을 검토하기 위한 선행연구로서, 볼텍스 튜브의 저온공기 출구에 걸리는 배압 및 입구 공급압력과 배압과의 압력차에 따른 온도분리 특성을 확인하였다.

저온출구의 배압이 증가함에 따라 볼텍스 튜브의 온도분리 특성은 악화되었고, 입구 공급압력과 배압과의 차이가 커질수록 온도분리 효과는 향상됨을 알 수 있었다. 그러나 입구 공급압력과 배압과의 압력차(ΔP)에 따른 온도분리 특성은 압력차 보다는 배압에 의한 영향이 더 큼을 알 수 있었다.

실험결과로 볼 때 볼텍스 튜브의 전기자동차 배터리 팩 적용을 위해서는 공급압력의 증가가 중요한 것이 아니라 배압을 최소로 하는 설계 방안을 찾는 것이 더 중요할 것으로 생각되며, 이러한 결과는 배터리 팩 냉각 적용을 위한 볼텍스 튜브 시스템의 최적 설계를 위한 기초 설계 정보를 제공하는데 그 의의를 둘 수 있을 것이다.

Acknowledgements

이 논문은 2014년도 동명대학교 교내학술 연구비 지원에 의하여 연구되었음(2014A012).

References

- [1] www.mpoweruk.com
- [2] Pesaran, A. A., "Cooling and Preheating of Batteries in a Hybrid Electric Vehicles", The 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, March, 16-20, 2003.
- [3] Pesaran, A. A., "Battery Thermal Management in EVs and HEVs: Issues and Solutions", Advanced Automotive Battery Conference, February 6-8, 2001.
- [4] Kim, G. H., "Battery Thermal Management Design Modeling", Advanced Automotive Battery Conference, October 23-28, 2006.
- [5] Han, J. Y., Park, J. S., Yu, S. S., Kim, S. S., "One-Dimension Thermal Modeling of NiMH Battery for Thermal Management of Electric Vehicles", Trans. Korean Soc. Mech. Eng., Vol. 38, No. 3, pp. 227-234, 2014.
- [6] Ranque, M. G, The Vortex Tube, US Patent No. 646,020, 1932.
- [7] Hilsch, R., "The Use of the Expansion of Gases in a Centrifugal Field as Cooling Process", Review of Scientific Instruments, Vol. 18, No. 2, pp. 108-113, 1947.
- [8] Lay, J. E., "An Experimental and analytical Study of Vortex Flow Temperature Separation by Superposition of Spiral and Axial Flows", Trans. ASME J. Heat Transfer, Vol. 81, pp. 202-212, 1959.
- [9] Bruun, H. H., "Experimental Investigation of the Energy Separation in Vortex Tubes", J. Mechanical Engineering Science, Vol. 11, No. 6, pp. 567-582, 1969.
- [10] Takahama, H., "Studies on Vortex Tubes", Bul. JSME, Vol. 8, No. 31, pp. 433-440, 1965.
- [11] Stephan, K., Lin, S., Durst, M., Huang, F., Seher, D., "An Investigation of Energy Separation in a Vortex Tube", Int. J Heat Mass Transfer, Vol. 26, No. 3, pp. 341-348, 1983.
- [12] Fulton C. D., "Rangue's Tube", Refrig. Engineering, Vol. 5, pp. 473-479, 1950.
- [13] Westley, R., "The College of Aeronautics (Cranfield) Note", No. 30(1955. 05) : No. 67(1957. 07).
- [14] Oh, D. J., Im, S. Y., Yoon, M. K., Ryu, J. I., "An Experimental Study on the Energy Separation in a Low Pressure Vortex Tube for Engine", Trans. Korean Soc. Auto. Eng., Vol. 10, No. 5, pp. 235-241, 2002.
- [15] Comasser, S., "The Vortex Tube", J. AM. Soc. Naval Eng., Vol. 63, No. 1, pp. 99-108, 1951.
- [16] Im, S., S., Yu, S., S., "Effects of Geometric Parameters on the Separated Air Flow Temperature of a Vortex Tube for Design Optimization", Energy, Vol. 37, pp. 154-160, 2012.