

Vortex Tube 성능 개선을 위한 절두체의 형상 매개변수에 대한 연구

구 한 범, 박 준 용, 손 덕 영, 최 윤 호*
 아주대학교 기계공학과

A PARAMETRIC STUDY OF CONICAL FRUSTUM GEOMETRY FOR IMPROVEMENT OF COOLING PERFORMANCE OF VORTEX TUBE

H.B. Koo, J.Y. Park, D.Y. Sohn and Y.H. Choi*
 Department of Mechanical Engineering, Ajou University

Vortex tube is a thermal static device that separates compressed air into hot and cold streams. In general, the cooling efficiency of vortex tubes is lower than that of traditional air conditioning equipment and vortex tubes are mainly used for industrial spot cooling applications because of their quick responses. In this study, conical frustums are employed in the nozzle chamber to improve the cooling performance. Conical frustums can be used to decrease the ineffective mass fraction that directly passes through the cold exit without energy separation. The shape optimization of conical frustums has been performed using full factorial design. It is found that the height of frustums has the largest main effects on the cooling performance. Computational results show that the cooling performance can be increased by about 10% within the considered range of the design parameters. This is because the ineffective mass fraction toward the cold exit is decreased by about 20%.

Key words : 볼텍스 튜브(Vortex Tube), 에너지 분리(Energy Separation), 원뿔 절두체(Conical Frustum), 실험계획법(Design of Experiment), 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)

1. 서 론

Vortex tube는 압축된 기체의 에너지를 분리하는 장치이다. 두 개의 출구로 각각 저온 및 고온의 기체를 토출하며, 기존의 다른 열교환기와 비교하여 매우 간단한 형상과 빠른 응답성을 가진다. 압축 기체를 제외하고 별다른 동력원 없이 저온 또는 고온의 기체를 빠르게 얻을 수 있기 때문에 압축 기체를 쉽게 구할 수 있는 산업현장에서 국소 냉각을 위해 주로 쓰이고 있다. Vortex tube의 에너지 분리 현상은 Ranque[1]에 의해 처음으로 발견되었으나, Hilsch[2]가 여러 가지 실험과 이론적인 연구를 수행하면서 Ranque-Hilsch 효과라고 불리기도 한다.

Vortex tube가 발견된 이래로 vortex tube의 에너지 분리 현

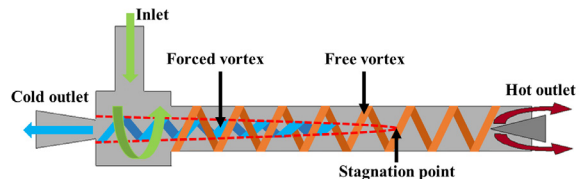


Fig. 1 Ranque-Hilsch vortex tube

상에 대하여 많은 연구가 진행되었지만[3,4], 아직까지 에너지 분리에 대한 원리가 완벽하게 규명되지 못하고 있다. 그렇지만 지금까지의 연구에 따르면, Fulton[5]이 제안한 원리가 가장 보편적으로 받아들여지고 있으며, 그 원리는 Fig. 1에 나타난 자유 볼텍스와 강제 볼텍스로 설명된다. 압축된 기체가 접선방향의 노즐로 토출되며 강한 와류를 생성하고, 대부분의 기체는 축 방향으로 진행하며 고온 출구를 향한다. 자유 볼텍스인 1차 와류가 축 방향으로 진행할 때, 유동이 정체되는 구간에서 강제 볼텍스인 2차 와류가 형성되며 저온 출구를 향한다. 초기 와류는 자유 볼텍스로 튜브의 벽 부근을 따르는

Received: August 3, 2015, Revised: December 11, 2015,
 Accepted: December 14, 2015.

* Corresponding author, E-mail: ychoi@ajou.ac.kr
 DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2015.20.4.007>
 © KSCFE 2015

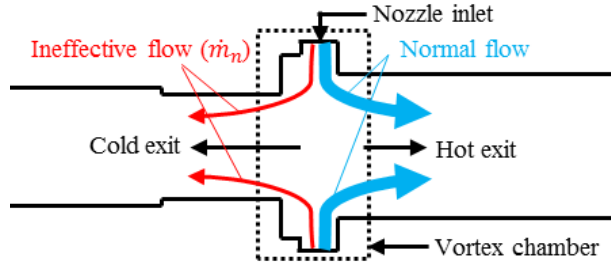


Fig. 2 Ineffective flow of vortex tube

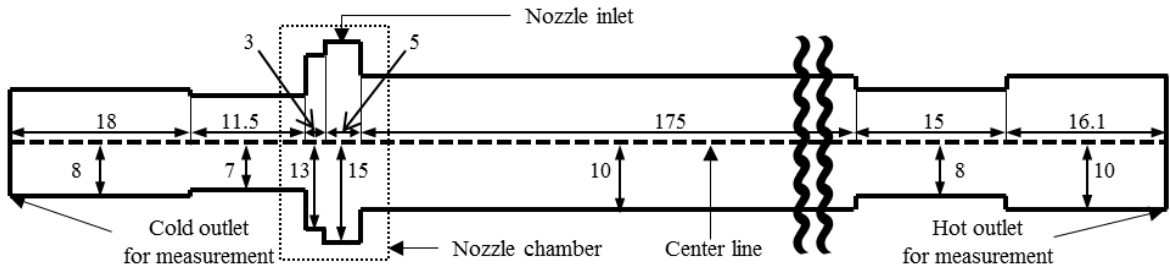


Fig. 3 Axial cross-section of vortex tube[mm]

데, 시간이 지나면서 튜브의 중심에서 강제회전에 가까운 강제 볼텍스가 형성되어 상대적으로 빠른 유동이 벽 부근의 유동에 운동량을 전달한다. 에너지 분리는 튜브의 모든 구간에서 발생하는데, 2차 외류가 1차 외류에서 받는 열전달보다 많은 운동량을 전달하면서 벽면 부근의 1차 외류는 온도가 상승하게 되고 튜브 중심부의 2차 외류는 에너지를 잃는다[6].

Behera et al.[7]과 Aljuwayhel et al.[8]은 2차원 vortex tube에 대한 CFD 해석을 통하여 유동층 사이의 전단과 열전달로 인해 에너지 분리가 일어난다고 제안하였고, 압력과 튜브 길이 변화에 따른 온도 차이를 분석하였다. Lee et al.[9]은 저온 출구 직경과 튜브 길이가 냉방성능에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다. Dincer et al.[10]은 고온출구의 콘 모양 컨트롤 밸브의 형상이 온도 분리 성능에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였고, Park[11]은 노즐의 입구 개수가 냉방성능에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다. 그리고 Dutta et al.[12]은 난류 모델에 따른 실험결과와의 차이를 정리하였다.

현재까지 vortex tube의 냉방성능을 높이기 위하여 노즐과 튜브 등의 형상을 바꾸는 다양한 연구가 진행되었지만, 최적화된 형상은 그 연구에서 적용한 단일 형상에만 냉방성능이 최대일 뿐, 일반적인 모든 경우에 적용되는 형상에 대한 연구 사례는 없다. 특히, Fig. 2에 나타낸 것과 같이 노즐에서 토출된 1차 외류가 에너지 분리 메커니즘을 거치지 않고 저온 출구를 향하는 비효율적인 거동을 방지하는 연구 사례는 없다.

본 연구에서는 Fulton[5]이 제안한 원리에 근거하여 절두체

모양의 형상을 이용해 vortex tube의 냉방성능을 개선하고, 실험계획법을 활용하여 절두체 형상이 vortex tube 냉방성능에 미치는 영향을 분석한다.

2. 지배 방정식

본 연구에서는 vortex tube의 열유동 해석을 위해 상용코드인 FLUENT 13.0을 이용하였으며, 3차원 압축성 Reynolds Averaged Navier-Stokes(RANS) 지배방정식을 사용하였다. 난류 모델은 vortex tube 유동에 대한 수치해석으로 정확도가 높은 standard $k-\epsilon$ model을 사용하였고[12], 수식의 각 상수는 일반적인 값 $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$, $C_{\mu} = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_{\epsilon} = 1.3$ 을 사용하였다. 해석 기법은 압력기반의 해법 (pressure based method)을 이용하고, 이산화 기법으로는 2차의 공간 정확도를 얻기 위해 2차 풍상차분법(2nd order upwind method)을 이용하였다.

3. 계산 방법 및 경계 조건

3.1 모델 및 경계 조건

본 연구에서 사용된 vortex tube의 기본 형상은 Park et al.[13]의 연구와 Exair 사의 제품[14]을 참고하여 설계하였다. 입구와 노즐 챔버를 제외한 튜브의 축방향 단면을 Fig. 3에

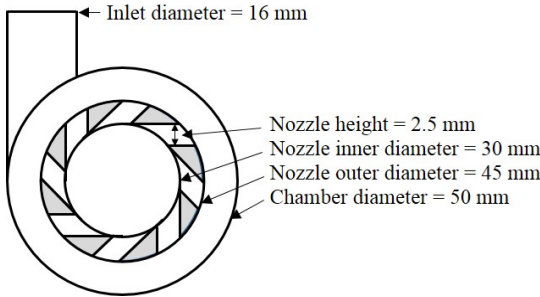


Fig. 4 Radial cross-section of nozzle chamber

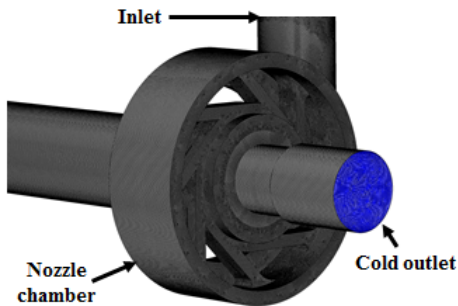


Fig. 5 Computational grid for a vortex tube(Grids near the nozzle chamber are depicted in this figure)

도시하였고, Fig. 4는 입구를 포함한 노즐 챔버에서의 반지름 방향 단면을 나타낸다.

Table 1에 각 경계조건을 나타내었으며, 저온 출구의 질량 분율 α 는 다음의 식으로부터 계산된다.

$$\alpha = \dot{m}_{\text{cold.outlet}} / \dot{m}_{\text{inlet}} \quad (1)$$

특히 고온 출구에서는 저온 출구의 질량분율($\alpha = 0.7$) 조건을 맞추기 위해 target mass flow 조건을 사용하였다. 그리고 냉방 성능(P_c)과 저온 출구 온도차(ΔT_c)는 다음과 같이 정의된다.

$$P_c = \dot{m}_{\text{cold.outlet}} c_p \Delta T_c \quad (2)$$

$$\Delta T_c = T_{\text{inlet}} - T_{\text{cold.outlet}} \quad (3)$$

Table 1 Boundary conditions

Inlet	Total pressure : 0.8 bar Total temperature : 297.15 K
Cold outlet	Atmospheric pressure
Hot outlet	Target mass flow condition for $\alpha = 0.7$
Wall	Adiabatic condition

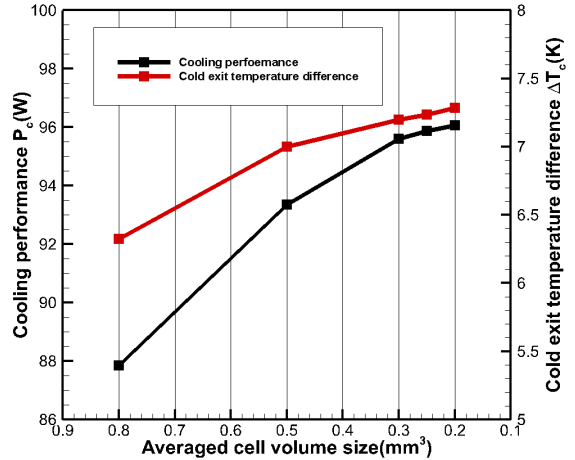


Fig. 6 Grid dependency test for the present work

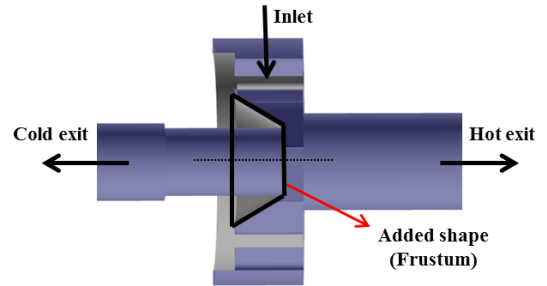


Fig. 7 Location of a conical frustum in the nozzle chamber

여기서 $\dot{m}_{\text{cold.outlet}}$ 은 저온 출구 질량유량(kg/s), T_{inlet} 은 입구 온도(K), $T_{\text{cold.outlet}}$ 은 저온 출구 온도(K)이고, c_p 는 비열로서 1006.43 J/kg-K의 값을 가진다.

격자는 Fig. 5와 같이 입구와 노즐 챔버 부분은 사면체 비정렬 격자계, 나머지 부분은 육면체 비정렬 격자계를 사용하여 구성하였다. 해석의 신뢰도를 확보하기 위해 냉방 성능에 대한 격자의존성 평가를 한 결과, Fig. 6에 나타난 바와 같이 평균 셀 부피 크기 0.3 mm³부터는 냉방 성능(P_c)값과 저온 출구 온도차(ΔT_c) 값의 변화가 1% 이하이므로 본 연구에서는 평균 셀 부피 크기를 0.3 mm³(셀 개수 약 620만개)로 하여 계산을 진행하였다.

3.2 절두체에 대한 실험계획법

일반적인 vortex tube는 노즐에서 토출된 압축 기체 중 일부가 에너지 분리를 하지 않고 바로 저온 출구를 향한다. 이와 같은 비효율적인 거동을 최소화하기 위해 Fig. 7에서와 같이 원뿔 모양의 윗부분을 자른 절두체 형상을 노즐 챔버 안

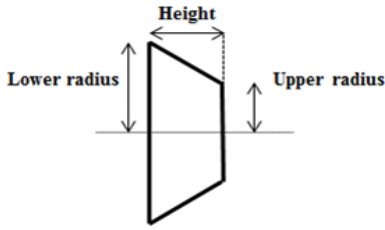


Fig. 8 Parameters of conical frustum

쪽에 적용시켜 그 영향을 분석하였다. 또한 Fig. 8에서와 같이 절두체의 높이, 윗면 반지름과 밑면 반지름을 세 개의 인자로 설정하여 실험계획법을 통해 더 높은 냉방성능을 얻고자 하였다.

본 연구에서는 각 인자의 주 효과와 교호 작용의 유무를 판단하기 위해 완전요인 설계법(full factorial design)을 이용하였다. 완전요인 실험은 모든 인자에 대한 조합을 실험하는 것으로 인자와 수준 수가 증가함에 따라 실험 횟수가 급격하게 증가하는 단점이 있지만, 본 연구에서는 인자와 수준이 많지 않으므로 Table 2와 같이 8개의 case를 설정하였다. 모든 case가 원뿔 절두체 모양을 유지해야 하므로, 윗면 반지름이 저온 출구의 반지름보다 작지 않게 설정하였다. 또한, 밑면 반지름이 노즐의 내측 반지름보다 작고 윗면 반지름보다는 크게 설정하였다. 절두체의 높이는 노즐의 폭(5 mm)에 대해 약 50%와 100% 크기로 설정하였다. 1차 실험계획법 결과를 분석한 후, 보다 작은 수치 범위에서 같은 방법으로 2차 실험계획법 결과를 분석하여 본 연구 모델에 최적화된 절두체 형상을 도출하였다.

4. 해석 결과

4.1 유동장 수치해석 결과

Fluent 상용코드를 사용하여 기본 형상(case 0)에 대해 계산한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 일반적인 vortex tube 내 거동과 마찬가지로 오른쪽의 고온 출구로는 전온도가 상승하며,

Table 2 Two-level full factorial design

Case	Lower radius	Upper radius	Height
0	-	-	-
1	10	7	3
2	10	8	5
3	14	8	5
4	14	8	3
5	10	8	3
6	10	7	5
7	14	7	3
8	14	7	5

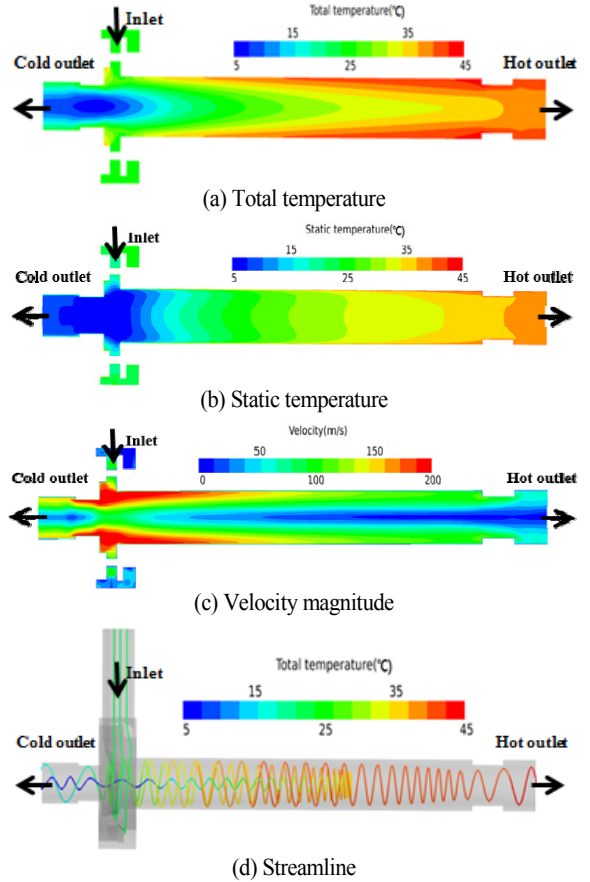


Fig. 9 Total temperature, static temperature and velocity magnitude contours and streamline at axial cross-section for case 0

왼쪽의 저온 출구로는 전온도가 감소하며 토출된다. 튜브 내에 강한 와류가 형성되므로 튜브 중심 부분에서는 유동이 거의 없다. Fig. 9(a)는 축방향 전온도 분포를 나타내고 Fig. 9(b)는 축방향 정온도 분포를 나타낸다. 노즐에서 토출된 공기는 튜브 내 벽 근처부터 서서히 전온도가 증가하고 고온 출구가 가까워짐에 따라 정온도도 함께 증가하는 것으로 나타난다. 온도 분포를 나타낸 동일한 평면에서의 속도 크기 분포를 Fig. 9(c)에 나타내었다. 속도는 노즐 부근에서 팽창에 의해 가장 빠르며, 저온과 고온 출구로 갈수록 감소하는 경향이 나타났다. 또한 강한 와류로 인해 튜브 중앙 부분은 전체적으로 벽 부근보다 속도가 낮다. 그리고 vortex tube의 대표적인 streamline을 Fig. 9(d)에 나타내었다. 노즐을 지나며 와류가 강하게 발생하고, tube 방향으로 와류가 진행하다가 중간 지점에서 일부 유동이 tube 안쪽으로 이동하면서 저온출구 방향으로 방향을 바꾸어 토출됨을 볼 수 있다.

Table 2의 형상 정보를 바탕으로 Fluent 상용코드를 사용하

여 계산한 결과를 Table 3에 나타내었다. case 5가 약 106 W의 가장 큰 냉방성능을 보였으며 기본 형상(case 0)과 비교하여 약 10%의 냉방성능이 향상되었다. 대체적으로 낮은 온도차이와 낮은 냉방 성능을 보이는 case는 절두체의 높이가 큰 case들(2,3,6,8)이었으며, 이는 절두체의 높이가 튜브 입구까지 높아지면서 입구 유동을 방해하여 질량 유량이 감소하고 이에 따라 ΔT_c 도 함께 감소하여 냉방성능이 저하되는 것으로 볼 수 있다. 밑면 반지름과 윗면 반지름의 차이로 인하여 발생하는 냉방성능의 차이는 높이에 비해 크지 않은 것으로 나타났다.

4.2 절두체 형상 평가

절두체 형상이 vortex tube의 노즐 부근 유동에 미치는 영향을 분석하기 위해 “비효율 유량 분율(β)”을 정의하여 기본 형상과 비교하였다. 비효율 유량 분율 β 는 다음과 같이 정의한다.

$$\beta = \dot{m}_n / \dot{m}_{inlet} \tag{4}$$

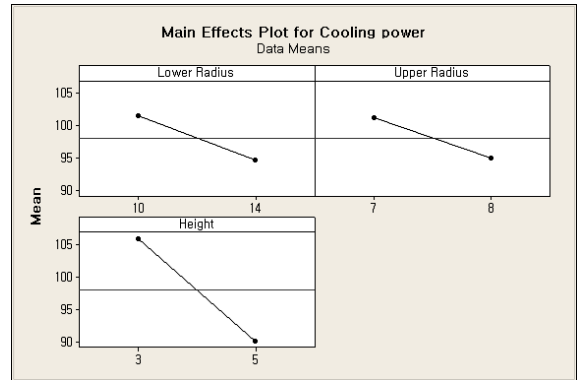
여기서 \dot{m}_n 은 Fig 2에서 나타낸 것과 같이 튜브에서 에너지 분리를 하지 않고 노즐에서 바로 저온 출구를 향하는 유량이고, \dot{m}_{inlet} 은 입구 유량이다. 현재까지 알려진 에너지 분리 메커니즘에 의하면 에너지 분리는 전적으로 튜브 내에서 이루어지므로 효율을 최대화하기 위해서는 노즐에서 바로 저온

Table 3 Computational results of temperature difference and cooling performance

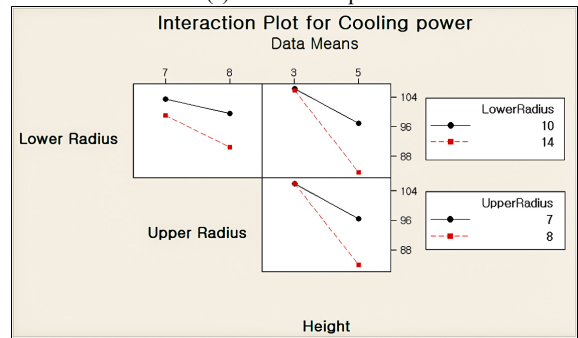
Case	ΔT_c (K)	P_c (W)
0	7.52	96.10
1	8.27	106.04
2	7.52	92.68
3	6.32	75.17
4	8.12	105.54
5	8.18	106.31
6	8.12	100.82
7	8.27	105.91
8	7.42	91.90

Table 4 Comparison of ineffective mass fraction(β) and total pressure

Case	Ineffective mass fraction(β)	Total pressure(kPa)
0	0.40	73.90
1	0.31	70.21
2	0.27	61.61
3	0.26	50.81
4	0.31	68.35
5	0.32	68.83
6	0.28	67.28
7	0.30	69.47
8	0.27	61.61



(a) Main effects plot



(b) Interaction plot

Fig. 10 1st DOE analysis results

출구로 향하는 유량이 없어야 한다.

저온출구에서 tube 방향으로 5 mm 떨어진 단면에서의 비효율 유량 분율과 고온출구를 향하는 유동의 전압력을 Table 4에 나타내었다. 절두체 형상이 있는 모든 vortex tube는 비효율 유량 분율이 줄어들었지만, 절두체 형상으로 인해 같은 단면의 압력 강하가 커진 case들(2,3,8)은 냉방성능이 오히려 감소하였다. 냉방성능이 가장 좋은 case 5는 기본 형상 대비 비효율 유량 분율이 약 20% 감소하였고 압력강하는 크지 않다. 이를 통해 냉방성능을 향상시키기 위해서는 압력강하가 작은 절두체 형상을 이용하여 비효율 유량 분율을 최소화해야 함을 알 수 있다.

4.3 1차 인자별 영향도 평가

Minitab 13.0을 이용하여 분석한 1차 인자별 영향도 평가 결과를 Fig 10에 나타내었다. Fig 10(a)는 인자의 주 효과, Fig 10(b)는 인자들 간의 상호작용 효과를 나타낸다.

주 효과 플롯에서는 모든 인자의 값이 작을 때 가장 큰 성능을 나타내는 것으로 분석되었다. 이 중 절두체의 높이가 가장 큰 영향도를 가지고 있는 것으로 나타났고 설계한 수준 범위에서 최대 냉방성능은 약 106 W로 분석되었다. 밑면 반

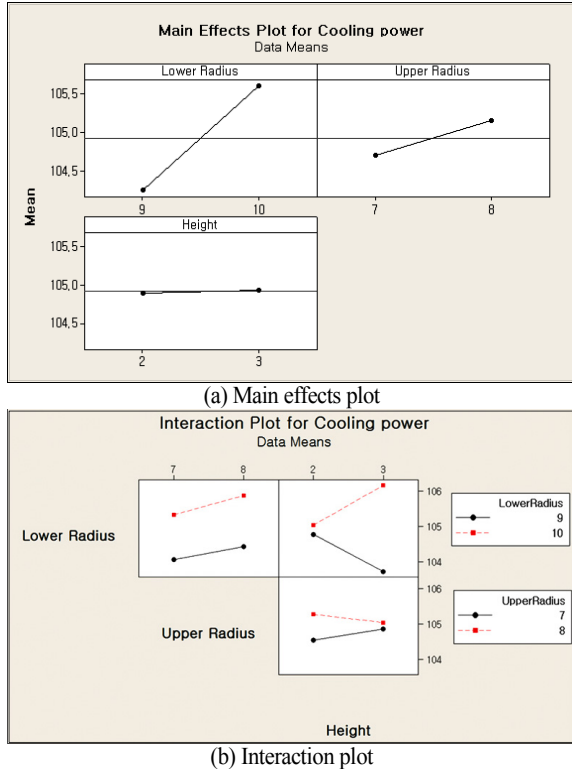


Fig. 11 2nd DOE analysis results

지름과 윗면 반지름은 비슷한 주 효과를 가지고 있으며, 작은 수준에서 약 5 W 정도의 개선 효과를 기대할 수 있는 것으로 나타났다.

상호작용 플롯에서는 높이와 밀면 반지름, 윗면 반지름의 교호작용이 큰 것으로 판단되며 주 효과 분석에서와 마찬가지로 모든 인자의 수준 값이 낮을 때 냉방성능이 높은 것으로 나타났다.

4.4 2차 인자별 영향도 평가

1차 인자별 평가에서 모든 인자의 수준 값이 작을 때 vortex tube의 냉방성능이 가장 높았으므로 1차 인자별 평가보다 작은 수준에서의 2차 인자별 영향도 평가를 수행하여 보다 높은 냉방성능을 얻고자 하였다. 그리고 그 결과를 1차 인자별 평가와 같은 방법으로 Fig. 11에 나타내었다. 밀면 반지름의 영향도가 가장 크게 나타났고, 높이는 영향이 거의 없는 것으로 분석되었다. 가장 영향도가 큰 밀면 반지름에 의한 개선 범위는 약 1 W로, 1차 인자별 영향도 평가의 주 효과와 비교하여 2차 인자별 주 효과가 현저하게 낮다. 상호작용 플롯에서도 주 효과와 마찬가지로 2차 인자의 효과가 매우 낮고 1차 평가와는 다른 교호작용이 일어난다. 더 작은 범위의

수준에서 수행한 2차 평가의 결과가 1차 평가보다 냉방성능 개선 정도가 현저하게 낮으므로 1차 평가의 결과를 토대로 최적의 형상을 설계하는 것이 바람직하다고 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 일반적으로 알려진 vortex tube의 에너지 분리 현상의 원리에 근거하여 절두체 형상이 냉방성능에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 각 인자의 영향도를 알아보기 위하여 실험계획법 중 완전요인설계법을 이용하여 case를 도출하고 이를 바탕으로 CFD 해석을 진행하였다.

절두체 형상은 본 연구에서 처음 제안하는 형상으로 노즐 부근에서 에너지 분리를 하지 않고 저온 출구로 바로 빠져나가는 유량을 최소화시키기 위해서 사용한다. 본 연구를 통해 vortex tube 노즐 부분에서 유동을 방해하지 않을 정도의 크기를 갖는 절두체 형상의 구조물은 냉방성능을 개선시킬 수 있다는 것을 확인하였다. CFD 해석 결과와 실험계획법을 통해 도출한 가장 적절한 절두체 형상에서 tube 부분의 전압력 강하가 상대적으로 작고 비효율 유량 분율이 약 20% 감소하였다. 이에 따라 냉방성능이 약 10% 증가하는 것을 확인하였다.

가장 효과적인 절두체 형상을 도출하기 위해 완전요인 실험계획법을 이용한 인자별 영향도 평가를 수행한 결과 1차 평가에서는 절두체의 높이가 가장 영향도가 높았고, 밀면 반지름, 윗면 반지름과 높이 모두 작은 수준에서 냉방성능이 향상되는 것으로 나타났다.

더 작은 수준에서 진행한 2차 영향도 평가에서는 밀면 반지름이 가장 영향도가 큰 것으로 나타났지만, 1차 영향도 평가결과에 비해 현저히 낮은 범위에서 효과가 나타났다. 따라서 1차 영향도 평가의 결과에 의해 절두체의 높이가 가장 영향도가 크다고 할 수 있다. 그러나 vortex tube의 형상에 관계없이 최대의 냉방성능을 갖는 절두체 형상을 설계하기 위해서는 기존 실험계획법보다 포괄적인 인자를 이용하여 실험계획법을 더 진행할 필요가 있다.

Note

This paper is a revised version of the paper presented at the KSCFE 2015 Spring Annual meeting, Jeju, May 14-15, 2015.

References

[1] 1933, Ranque, M.G., "Experiences sur la detente giratoire avec simultanes d'un echappement d'air chaud et d'un

- enchappement d'air froid," *J. Phys. Radium*, Vol.7, No.4, pp.112-114.
- [2] 1947, 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.
- [3] 2006, Skye, H.M., Nellis, G.F. and Klein, S.A., "Comparison of CFD analysis to empirical data in a commercial vortex tube," *International Journal of Refrigeration*, Vol.29, No.1, pp.71-80.
- [4] 1997, Ahlbom, B. and Groves, S., "Secondary flow in a vortex tube," *Fluid Dynamics Research*, Vol.21, No.2, pp.73-86.
- [5] 1950, Fulton, C.D., "Ranque's tube," *Refrigerating Engineering*, Vol.5, pp.473-479.
- [6] 2010, Im, S.Y. and Yu, S.S., "Study on geometric Parameters for Optimization of Energy Separation Efficiency in a Vortex Tube," *Autumn Conference of Korean Society of Mechanical Engineers*, pp.2773-2778.
- [7] 2008, Behera, U., Paulb, P.J., Dinesha, K. and Jacob, S., "Numerical investigations on flow behaviour and energy separation in Ranque - Hilsch vortex tube," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.51, No.25, pp.6077-6089.
- [8] 2005, Aljuwayhel, N.F., Nellis, G.F. and Klein, S.A., "Parametric and internal study of the vortex tube using a CFD model," *International Journal of Refrigeration*, Vol.28, No.3, pp.442-450.
- [9] 2011, Lee, J.S., Han, K.H. and Park, S.Y., "Experimental Study on Energy Separation Characteristics of Vortex Tube," *Journal of Korean Society of Mechanical Engineers B*, Vol.35, No.5, pp.517-524.
- [10] 2009, Dincer, K., Baskaya, S., Uysal, B.Z. and Ucgul, I., "Experimental investigation of the performance of a Ranque - Hilsch vortex tube with regard to a plug located at the hot outlet," *International Journal of Refrigeration*, Vol.32, No.1, pp.87-94.
- [11] 2013, Park, S.Y., "Performance Characteristics of Vortex Tube according to the Number of Inlet Nozzle," *Annual Conference of the Korean Society of Automotive Engineers*, pp.2026-2029.
- [12] 2009, Dutta, T., Sinhamahapatra, K.P. and Bandyopdhyay, S.S., "Comparison of different turbulence models in predicting the temperature separation in a Ranque - Hilsch vortex tube," *International Journal of Refrigeration*, Vol.33, No.4, pp.783-792.
- [13] 2014, Park, J.Y., Koo, H.B., Sohn, D.Y., Lee, J.I., Choi, Y.H., So, S.Y. and Lee, N.R., "Study of Vortex Tube Performance Improvement Using DOE," *Korean Society for Computational Fluids Engineering Spring conference*, pp.189-194.
- [14] 2015, Exair Corporation. "Vortex tubes and spot cooling products catalogue," Available at [<http://www.exair.com>].