

# 상용 CFD 프로그램을 사용한 베인형 관성분리기의 설계인자 영향 검토

이담연·류재문<sup>†</sup>  
충남대학교 선박해양공학과

## Study on the Effect of Design Parameters of the Vane Type Inertial Separator Using Commercial CFD Code

Dap-Yeon Lee·Jae-Moon Lew<sup>†</sup>  
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National University

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Since the intake air of gas turbine engine of marine purpose contains water particles, inertial separator for separating the air and water particles are provided. Saw type and wave type separator are now used to separate inflow water particle from the gas. In this paper, the design parameters of saw type separator are studied by numerical simulations. Using the commercial CFD program, Star-CCM+, Lagrangian-Eulerian method was used to perform the analysis of two phase flow of the mist in the air. This method solves Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations in Eulerian framework for the continuous phase, while solves equation of motion for individual particles in Lagrangian framework. Lagrangian multiphase method was applied to monitor the particles of different sizes and shapes and to verify collision between particles by chasing particles. Water particles were injected through injectors located at the inlet of the separator and escape mode was used which assumes that the particles attached on the surface of inertial separator were removed from the simulation, effectively escaping the solution domain. Through the numerical computations with the inlet condition of constant water particle size in the wetness fraction of 85%, efficiency of eliminating the water particle and the pressure drop between the inlet and outlet were examined.

**Keywords** : Inertial separator(관성분리기), Saw type(톱날형), Escape mode(에스케이프 모드), Lagrangian multiphase method (라그랑지 다상법)

## 1. 서론

해상용 가스터빈 흡기장치는 디젤 엔진을 사용하는 일반 선박과 달리, 전시상황에 기동성을 중요시 하는 함정의 주 동력원으로 사용되고 있다. 또한 우리나라의 미래 전략 산업으로 육성되고 있는 해양 플랜트의 발전기 동력원으로 대부분 가스터빈이 사용되고 있어, 지속적으로 수요가 크게 증가할 것이 예상된다.

해상용 가스터빈 흡기장치는 해상에서 가스터빈 운용 시, 외부 물질 피해(foreign object damage), 침식(erosion), 부식(corrosion), 오염(fouling) 등으로부터 가스터빈 임펠러를 보호하고 가스터빈의 효율을 향상시키는 중요한 역할을 수행하는 핵심

장치이다 (GMRC SwRI, 2010). 따라서 가스터빈을 탑재하여 운용하는 모든 함정과 해양플랜트에는 이 장치가 설치되고 있다.

Fig.1은 해상용 가스터빈 흡기장치의 개략도이다. 해상에서는 염분이 포함된 스프레이 및 다양한 입자가 포함된 공기가 유입된다. 따라서, 염분과 수분이 제거된 건조한 공기가 가스터빈 임펠러로 흡입되도록 ①루버, ②관성분리기(inertial separator), ③ anti-ice rake, ④필터(filter), ⑤bow-in door, ⑥drain box, ⑦콘트롤박스 ⑧ 흡음기 등으로 구성되며, 루버, 관성분리기, 필터 및 흡음기의 설계가 대단히 중요하다. 따라서 이러한 구성품을 설계하기 위해서는 Computational Fluid Dynamics(CFD)를 활용한 유동해석을 수행하여 다양한 설계인자 변화에 대한 검토와 함께 모형시험을 통한 확인이 필요하다.

관성분리기는 물리적으로 밀도 차이가 많이 나는 공기와 물이 혼합된 유동이 곡률이 변화하는 면을 통과할 때 공기와 물 입자의 밀도 차이에 의한 관성력의 차이로 인해 공기와 물 입자를 분리하는 장치이다. 밀도가 큰 물 입자는 물체 표면에 붙어 이동하면서 지속적으로 유입되는 물 입자와 합쳐져 배수관으로 배출되도록 하고, 물과 분리된 공기가 가스터빈에 유입되도록 하는 것이다. 이러한 관성분리기는 다양한 분야에서 많이 사용되고 있다 (Lee, et al, 2013).

관성분리기의 형상은 Fig. 2와 Fig. 3에 보인 바와 같이 톱날형상(saw type)과 파형상(wave-type)이 널리 사용되고 있다. 이중 톱날형상은 저속 유동에 사용되며, 파형상은 고속 유동에 사용되고 있다 (Swanborn, 1988).

본 연구에서는 톱날형 관성분리기(saw type vane separator)의 설계인자 변화가 관성분리기의 성능에 미치는 영향을 상용 프로그램인 Star-CCM+ ver. 8.04를 사용하여 수치계산으로 해석하였다. 여기서 관성분리기의 성능은 유입면과 유출면의 정압력 강하가 작고 유입면에서 유입된 물입자의 제거 효율로 정의하였고, 관성분리기의 설계인자로는 유입되는 입자 크기와 Fig. 2에 보인 관성분리기의 간격(b), 스펠(w) 및 베인각도( $\theta$ )로 택하였다.

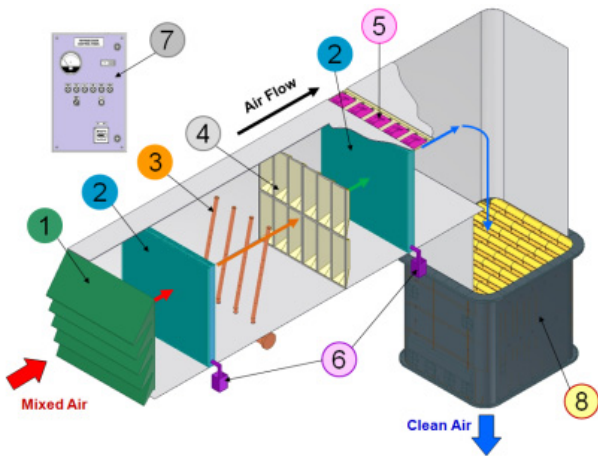


Fig. 1 Layout of gas turbine intake system  
 (①louver ②inertial separator ③anti-ice rake ④filter ⑤blow-in door ⑥drain box ⑦control box ⑧silencer)

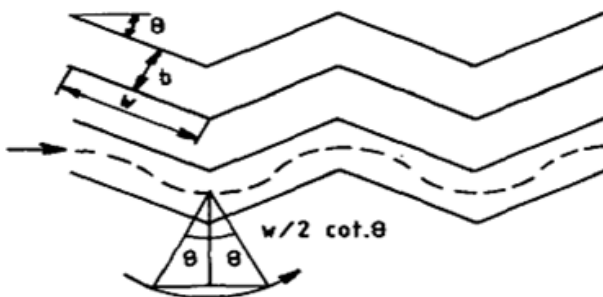


Fig. 2 Saw type separator

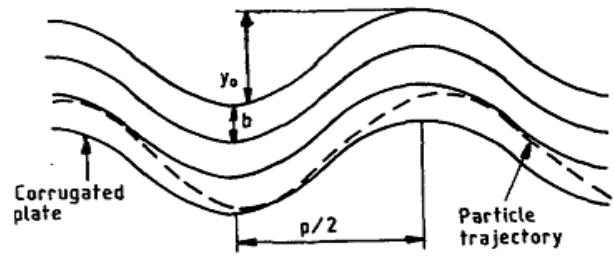


Fig. 3 Wave type separator

## 2. 지배방정식 및 계산법

본 논문에서는 공기 중에 수분이 포함된 2상 유동해석을 수행하기 위해 Eulerian-Lagrangian 방법을 사용하였다. 즉, 수분이 포함된 공기는 연속체로 간주하여 Euler 관점에서 정상상태의 RANS 방정식으로 해석하고 공기 중에 포함된 수분 입자들은 Lagrange 관점에서 운동방정식을 풀어 수분 입자의 궤적을 개별적으로 추적하는 방법을 사용하였다. 수치계산은 유한체적법(Finite Volume Method, FVM)을 기반으로 하는 상용 CFD 프로그램인 Star-CCM+ Ver.8.04를 사용하였다 (Star-CCM+ User Guide, 2013).

3차원 비압축성 정상 난류유동에 관한 연속방정식 및 운동량 방정식은 다음과 같다.

- 연속방정식

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

- 운동량 방정식

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial (\overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \nabla^2 U_i \tag{2}$$

난류모형은 Realizable  $k-\epsilon$  난류 모형을 사용하였고 벽함수는 표준 벽함수(standard wall function)를 사용하였다. 확산항의 이산화는 2차 중심 차분(central differencing), 속도-압력 연성해법은 정상유동 해석에서 많이 쓰이고 있는 Semi Implicit Method for Pressure Linked Equation(SIMPLE) 방법을 사용하였다 (Choi & Kim, 2010).

관성분리기 내 물입자의 궤적을 입자별로 추적하기 위해서 Lagrangian Multiphase(LMP) 유동 모델을 사용하여 공기 중의 물입자를 모델링하여 운동방정식을 풀고 유체입자의 궤적을 추적하였다. 이 모델은 고체 입자(solid particles), 액적(liquid droplets), 또는 기포(gas bubbles)를 모사할 때 사용하는 방식으로 관성분리기 입구면을 통해 유입된 입자 각각의 궤적을 추적하여 입자의 유동 패턴을 시각화 할 수 있다. 유입면에 injector를 두고 일정한 질량을 가진 일정 크기의 물 입자를 주입하였고, 주입된 물 입자가 관성분리기의 표면에 닿으면 입자들이 계산 영역

에서 제거되어 질량과 모멘텀이 모두 없어지는 것으로 처리하는 Escape mode 방법을 사용하였다. 자세한 내용은 Star-CCM+ User Guide (2013)를 참고하기 바란다.

수치계산에서 유입된 수분 질량과 출구면에서 배출된 수분 질량을 추정하여 관성분리기의 효율( $\eta$ )을 계산하였다.

$$\eta(\%) = \left(1 - \frac{\text{mass of water particles at the exit}}{\text{mass of water particles at the inlet}}\right) \times 100 \quad (3)$$

### 3. 수치계산

#### 3.1 계산 모델

Li, et al. (2007)는 Fluent 6.0을 사용하여 톱날형 관성분리기의 유동해석을 수행하였다. 본 논문에서는 Fig. 4에 보인 바와 같은 Li, et al. 의 관성분리기 형상에 대해 본 논문에서 택한 수치계산법을 사용하여 수치계산을 수행하고 Li, et al.의 계산 결과와 비교하여 본 논문에서 제안한 수치계산법의 타당성을 확인하였다.

#### 3.2 수치해석 조건 및 격자계

수치계산을 위해 유입(inlet) 및 유출(outlet) 경계면을 지정하고 그 밖의 나머지 면을 벽면(wall)으로 지정하였고, 공기와 함께 유입되는 물 입자는 유입 경계면에서 injector를 사용하여 내부에 주입시켰다. Table 1에 계산에 사용된 경계조건을 정리하였다. 유입되는 공기에 포함된 수증기 양은 Li, et al.을 따라 공기 질량의 9.8%만큼 혼합된 것으로 하였다.

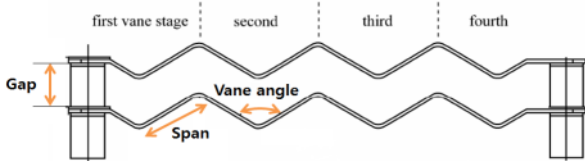


Fig. 4 Parameters of saw type vane separator (Li, et al., 2007)

Table 1 Boundary conditions of saw type separator

Boundary conditions		
Inlet	Velocity inlet (5.0 m/s)	
Outlet	Pressure outlet (0.0 Pa)	
Wall	Wall (no-slip condition)	
Wetness fraction	9.8%	
Density	Air	1.2kg/m <sup>3</sup>
	Water	998kg/m <sup>3</sup>

수치계산을 위해 트리머 격자를 사용하였으며, 벽면에 대해서는 y+ 값이 30이 되도록 3개의 층으로 이루어진 프리즘 레이어를 사용하여 격자를 생성하였다. 수치계산은 Fig. 5에 보인 바와 같은 3차원형상에 대해 수행하였고, 2차원 해석 결과는 중앙단면에서의 값을 선택하여 비교하였다. 계산에 사용된 격자수는 571,400개이며 Fig. 6은 Fig. 5에서의 중앙 단면에서의 격자의 개략 형상을 보여준다.



Fig. 5 Grid system of vane separator

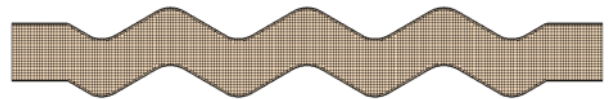


Fig. 6 Grid topology at the centerline of separator

#### 3.3 검증 계산

Fig. 7에는 간격 20 mm, 베인각도 120°, 스펠 27.14 mm의 관성분리기 형상에 대한 수치계산 결과를 Li, et al.의 계산 및 실험결과와 함께 비교하여 나타내었다. 관성분리기의 정확한 형상이 없어 유사하게 격자계를 생성하여 계산한 결과, 유속에 따른 압력 강하의 계산 결과가 유사한 경향을 나타내고 있어 본 논문에서 제안한 수치계산법이 타당하다고 판단하고, 이후 설계인자 변화가 관성분리기의 성능에 미치는 영향에 대한 수치 계산을 수행하였다.

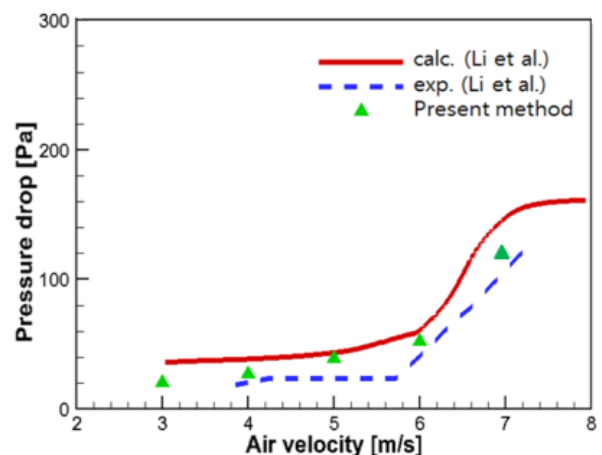


Fig. 7 Comparisons of pressure drop of saw type separator

### 3.4 설계 인자의 영향 계산

베인형 관성분리기의 설계인자 변화가 압력강하와 효율에 미치는 영향을 조사하기 위해 Table 2에 보인 바와 같이 설계 인자를 변화시켜 수치계산을 수행하였다.

Table 2 Design parameters of saw type separator

Parameter	Values
Particle size	20, 30, 40 $\mu\text{m}$
Gap(b)	20, 25, 30 mm
Span(w)	23.10, 27.14, 31.18 mm
Vane angle( $\theta$ )	100°, 120°, 140°

#### 3.4.1 입자 크기(Particle Size)의 변화

유입면에서 들어오는 물 입자의 크기가 관성분리기의 성능에 미치는 영향을 조사하기 위하여  $b=20\text{ mm}$ ,  $w=27.14\text{ mm}$ ,  $\theta=120^\circ$  (폰트 동일하게 수정요!)인 형상에 대한 수치해석을 수행하였다. 물입자의 크기는 20, 30, 40  $\mu\text{m}$ 의 세 가지 경우에 대한 계산을 수행하였다. Fig. 8에 물 입자 크기의 변화에 따른 유선을 나타내었으며, Fig. 9에는 정압력분포를 도시하였다. Fig. 8에서 유선의 두께가 변하는 것은 벽면에 부딪힌 물 입자가 외부로 배출되는 것으로 처리하는 Escape mode 채택에 따라 관성분리기의 효율을 나타낸다. Fig. 8에 보인 유선의 변화로부터 입자 크기가 커질수록 유선의 두께가 감소하므로 효율이 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 9에는 중앙 단면에서의 정압 구배를 나타내었다. 입자 크기 변화에 따라 압력은 큰 변화를 보이지 않고 있음을 알 수 있다. Table 3에는 식 (3)으로 계산한 효율을 나타냈으며, 유입면과 출구면의 평균 압력 차이를 계산한 압력강하를 나타내었다. 물입자의 크기 변화에 따른 유동해석 결과로 입자 크기가 클수록 효율이 증가하고 압력 강하도 커지고 있으나 압력 강하의 차이는 크지 않은 것으로 판단된다. 압력 강하는 유체와 벽면과의 마찰, 유체끼리의 마찰에 의해 발생하는 손실을 나타내며, 압력 손실은 유속의 제곱에 비례한다. 따라서, 입구면에서 일정 질량의 물입자가 포함된 공기가 일정 속도로 유입될 때 입자 크기에 따른 벽면과의 마찰에 의한 압력손실은 큰 차이가 없으나,

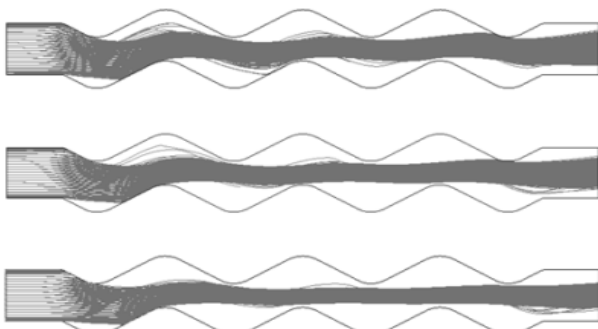


Fig. 8 Streamlines varying particle size (top : 20  $\mu\text{m}$ , middle : 30  $\mu\text{m}$ , bottom : 40  $\mu\text{m}$ )

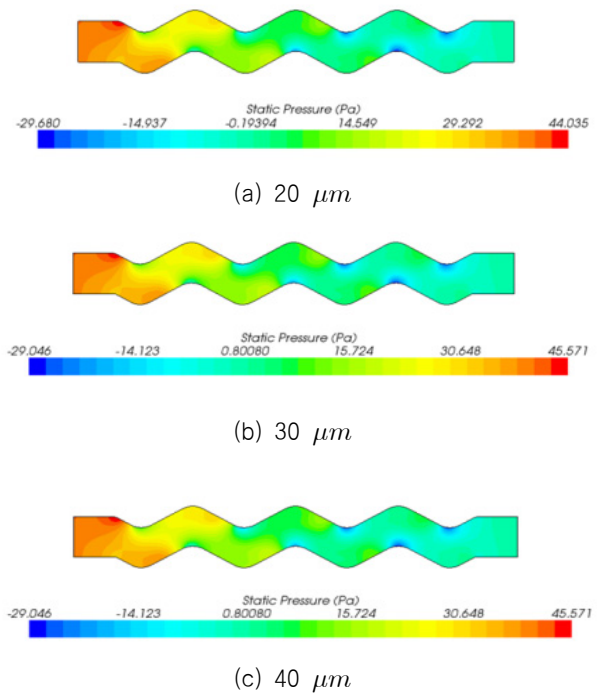


Fig. 9 Pressure contours varying particle size

Table 3 Effects of particle size on pressure drop and efficiency

	$\Delta P$	Efficiency
20 $\mu\text{m}$	38.9 Pa	40.2%
30 $\mu\text{m}$	39.2 Pa	52.4%
40 $\mu\text{m}$	40.0 Pa	60.9%

유체 입자사이의 마찰에 의한 압력강하는 입자가 클수록 커질 것으로 생각된다. 그러나 본 계산에 포함된 물 입자의 양이 많지 않아 입자 크기에 의한 압력손실은 입자가 커질수록 커지나 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

#### 3.4.2 관성분리기 간격(b)의 변화

관성분리기 간격이 성능에 미치는 영향을 조사하기 위하여  $w=27.14\text{ mm}$ ,  $\theta=120^\circ$  인 형상에 대해 간격을 20, 25, 30 mm의 세 가지로 바꿔가며 수치해석을 수행하였다. Fig. 10에 간격 변화에 따른 유체 입자의 유선을, Fig. 11에는 압력분포를 도시하였다. Fig. 10에 보인 유선은 폭이 증가할수록 두꺼워지는 것으로 나타나 효율이 감소하는 것을 알 수 있고, Fig. 11에 보인 정압 분포로부터 간격이 커질수록 압력 강하는 작아지는 것을 예상할 수 있다. 이는 동일한 질량의 수분이 유입될 때 관성분리기의 폭이 커질수록 벽면과 접촉하지 않고 통과하는 물 입자가 많을 것 이므로 타당한 결과로 생각된다. Table 4에 보인 효율과 압력강하 계산결과로부터 베인의 간격이 작을수록 효율이 증가하나, 압력 강하도 커지는 것이 확인되었다.

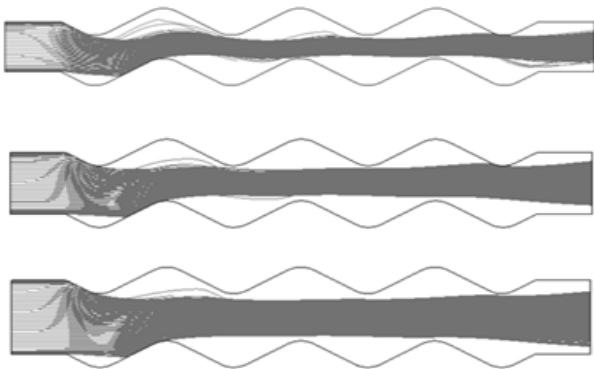


Fig. 10 Streamlines varying gap size (top : 20 mm, middle : 25 mm, bottom : 30 mm)

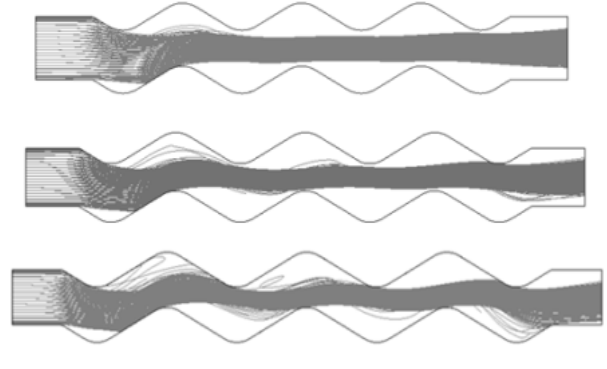


Fig. 12 Streamlines varying span size (top : 23.10 mm, middle : 27.14 mm, bottom : 31.18 mm)

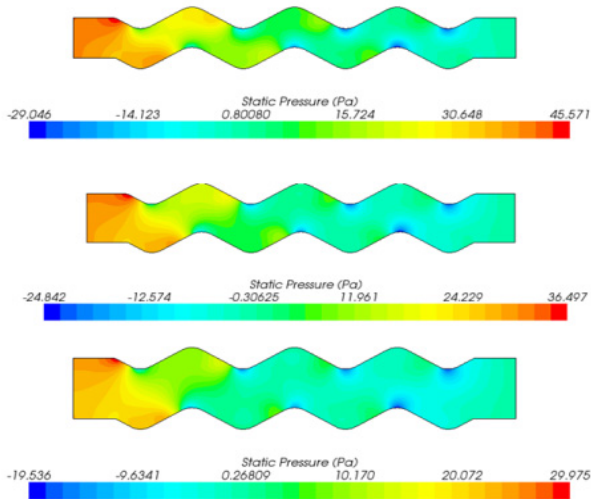


Fig. 11 Pressure contours varying gap size (top : 20 mm, middle : 25 mm, bottom : 30 mm)

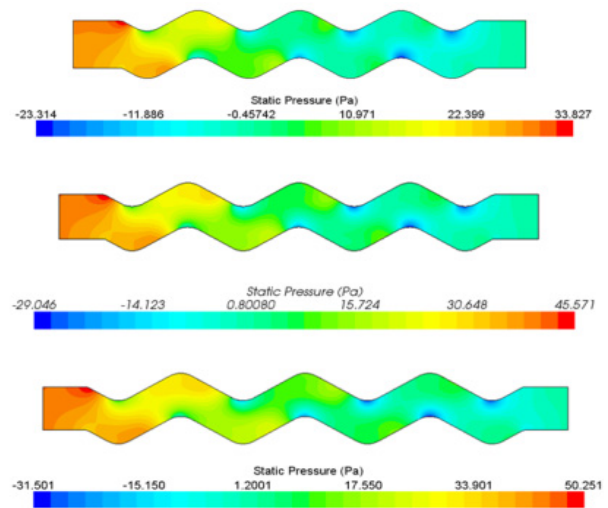


Fig. 13 Pressure contours varying span size (top : 23.10 mm, middle : 27.14 mm, bottom : 31.18 mm)

Table 4 Effects of gap on pressure drop and efficiency

	$\Delta P$	Efficiency
b=20 mm	38.9 Pa	52.4%
b=25 mm	30.2 Pa	41.5%
b=30 mm	23.1 Pa	35.6%

Table 5 Effects of span on pressure drop and efficiency

	$\Delta P$	Efficiency
w=23.10 mm	28.6 Pa	48.5%
w=27.14 mm	38.8 Pa	52.4%
w=31.18 mm	44.2 Pa	60.4%

### 3.4.3 관성분리기의 스펠(w) 변화

관성분리기 스펠(w)의 변화에 따른 영향을 조사하기 위하여 b=20 mm,  $\theta=120^\circ$  인 형상에 대한 수치해석을 수행하였다. 관성분리기의 스펠은 23.1 mm와 27.14 mm, 31.18 mm의 세 가지 경우에 대한 계산을 수행하였다. Fig. 12에 스펠 변화에 따른 유선을 보였으며, 스펠이 길어질수록 물 입자가 벽면에 부딪히는 길이가 길어져 유선의 두께가 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 13에는 압력분포를 도시하였고, 스펠이 길어질수록 압력 강하가 커지는 것을 알 수 있다. Table 5에는 압력강하와 효율을 정량적으로 계산한 결과를 보였고, 유동해석 결과로 베인의 스펠이 길수록 효율이 증가하나, 압력 강하도 커지는 것을 알 수 있다.

### 3.4.4 베인 각도( $\theta$ )의 변화

베인 각도의 변화에 따른 효율변화와 압력강하의 변화를 조사하기 위하여 b=20 mm, w=27.14 mm 형상에 대한 수치해석을 수행하였다. 관성분리기의 경사각은  $100^\circ$ 와  $120^\circ$ ,  $140^\circ$ 의 세 가지 경우에 대한 계산을 수행하였다. Fig. 14에 각도 변화에 따른 유선을, Fig. 15에는 입력분포를 도시하였고, Table 6에는 효율과 압력강하를 나타내었다. 베인 각도가 커질수록 유선의 두께가 증가하였고, 압력 강하는 커지는 것을 알 수 있고, 이 계산결과로부터 베인 각도가 클수록 효율이 증가하지만, 압력 강하도 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 베인 각도가 커짐에 따라 벽면과 접촉하는 물 입자 수가 많아지기 때문이라 생각된다.

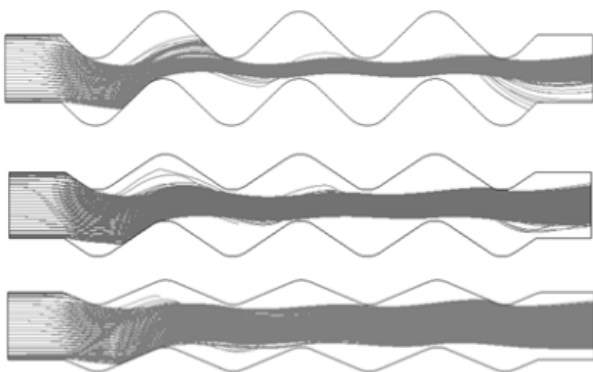


Fig. 14 Streamlines varying vane angle( $\theta$ )  
(top : 100°, bottom : 120°, bottom : 140°)

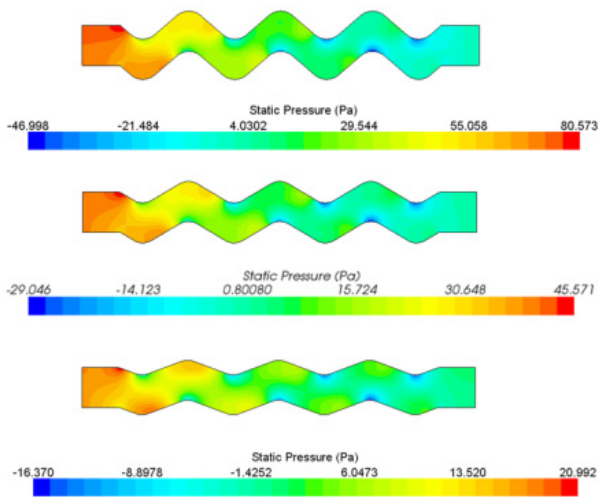


Fig. 15 Pressure contours varying vane angle( $\theta$ )  
(top : 100°, bottom : 120°, bottom : 140°)

Table 6 Effects of slope angle on pressure drop and efficiency

	$\Delta P$	Efficiency
$\theta = 100^\circ$	73.2 Pa	64.2%
$\theta = 120^\circ$	38.9 Pa	52.4%
$\theta = 140^\circ$	17.4 Pa	39.3%

#### 4. 결 언

본 논문에서는 관성분리기를 설계할 때 중요하게 고려되는 압력강하와 수분제거 효율에 미치는 설계인자 특성을 확인하기 위하여 CFD 상용프로그램 Star-CCM+ Version 8.04를 사용하여 톱날형(saw type) 관성분리기의 폭(b), 베인 각도( $\theta$ ), 스펀(W), 물입자의 크기를 변화시켜 수치계산을 수행하였다.

수치계산 결과 공기 중에 포함된 물의 입자 크기가 클수록 효율이 증가되나 압력 강하는 크게 변하지 않는 것으로 나타났다. 관성분리기 간의 간격(b)이 작아질수록, 관성분리기의 베인 각도

( $\theta$ )가 커질수록 그리고 관성분리기의 스펀(w)이 길어질수록 효율은 증가하나 압력 강하가 커지는 것을 확인하였다.

수치계산 결과로부터 설계인자 변화로 관성분리기의 효율이 증가하면 압력강하 역시 커지는 결과를 보이고 있으므로, 수분제거 효율을 높이고 압력강하를 최소화시키기 위해서는 관성분리기의 간격, 베인 각도 및 스펀 길이를 적절히 선택하는 것이 중요하다고 판단된다.

설계 인자 최적화를 위해서는 CFD의 활용이 타당하며, 최종적으로 실험적 확인도 필요하다고 여겨진다. 앞으로 파형상 관성분리기에 대한 설계인자 검토 연구도 필요하다고 생각된다.

#### 후 기

본 연구는 방위사업청 민간겸용기술사업인 “해상용 가스터빈 흡기장치 개발” 중 “가스터빈 흡기장치 설계를 위한 모델링 및 내부 유동 시뮬레이션 해석”(과제번호 13-DU-MC-07)과제의 지원으로 수행되었음을 밝힙니다.

#### References

CD-adapco, 2013. *User Guide Star-CCM+ version 8.04*.

Choi, J.K. & Kim, H.T., 2010. A study of using wall function for numerical analysis of high reynolds number turbulent flow. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(5), pp.647-655.

Lee, S.Y. Hong, W.S. Shin, W.H. Kim, G.J. & Song, D.K., 2013. Evaluation of removal efficiency of water contents using inertial impaction separator. *Particle and Aerosol Research*, 9(1), pp.23-29.

Li, J. Huang, S. & Wang, X., 2007. Numerical study of steam-water separators with wave-type vanes. *Chinese Journal Chemical Engineering*, 15(4), pp.492-498.

Gas Machinery Research Council Southwest Research Institute (GMRC SwRI), 2010. *Guideline for gas turbine inlet a filtration systems. RELEASE 1.0*, Dallas: GMRC SwRI.

Swanborn, R. A., 1988. *A new approach to the design of gas-liquid separators for the oil industry*. Ph. D. Delft: Technische Universiteit



이 답 연

류 재 문