

## 소형 가스사이클론 집진장치를 이용한 PM 전처리 시스템의 유동 가시화

양용수 · 이경훈<sup>1</sup> · 조현정<sup>2\*</sup>

국립수산과학원 수산공학과, <sup>1</sup>전남대학교 해양기술학부, <sup>2</sup>강원도립대학교 해양경찰과

### Flow visualization of PM preprocessing system using the small scale gascyclone precipitator

Yongsu YANG, Kyoungsoon LEE<sup>1</sup> and Hyeonjeong Jo<sup>2\*</sup>

*Fisheries Engineering Division, National Institute of Fisheries Sciences, Busan 46083, Korea*

*<sup>1</sup>School of Marine Technology, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea*

*<sup>2</sup>Department of Marine Police and Technology, Gangwon State University, Gangneung 25425, Korea*

This study is aimed to design the mechanical gascyclone precipitator with an outstanding collection efficiency as one of ways to reduce exhaust gas of small-scale vessels. It estimated fine particles generated from diesel engines which has become one of the biggest environmental issues currently. Specifically, it quantitatively analyzed the flowing process from the cyclone gas exit; a duct via part to the collecting part of Cylindrical lower using DPIV (Digital Particle Image Velocimetry). Since the gas inlet height part became wider the previous theoretical dimensions, internal fluid characteristics of cyclone where the speed of internal swirl had been slow were investigated by temporary streamline of fine particles at 14–20  $\mu\text{m}$ . The results showed that collecting efficiency was three times higher than the conical type utilized previously. In addition, this study supplemented imprecision problems from the previous theoretical equation and CFD interpretation with an experimental method. It also provided a basic data to design the cyclone precipitator by size of diesel engines for vessels.

Keywords : CFD, DPIV, Flow visualization, Gascyclone precipitator

#### 서론

최근 2007년도를 기준으로 해양수산 분야에서 발생되는 이산화탄소 (CO<sub>2</sub>)의 비중이 전체 연료소모량의 2.7%, 어선 등의 소형선박은 약 0.6%를 차지하고 있으므로 전체 에너지 사용량의 약 3.3%를 차지하고 있다. 해양수산업은 다른 산업에 비해서는 높은 편은 아니지

만 (Bong, 2011), 기후협약에 의해서 유럽 등 선진국의 단호한 입장으로 IMO의 규제강화로 인한 대형 선박을 포함한 연근해 어선어업의 배기가스 감축방안이 마련되어야 한다. 수산부분의 경우, 중간 투입에서 연료유가 차지하는 비중은 6.9%로 168개 산업 가운데 28위, 총 투입에서 차지하는 비중은 3.6%로 26위이다 (MOF,

\*Corresponding author: [hnjjo@gw.ac.kr](mailto:hnjjo@gw.ac.kr), Tel : +82-33-660-8202, Fax : +82-33-660-8205

2012). 유류 사용이 절대적인 운송부분의 특수성을 감안할 때, 수산부분이 여타 산업들 가운데 연료유 투입 비중이 가장 높은 산업의 하나라고 할 수 있다. 해운 분야의 배출 온실가스 중 CO<sub>2</sub>의 비중이 99%에 해당하며, IMO의 규제는 주로 CO<sub>2</sub> 규제에 초점을 맞춰져 있지만 배기가스 (NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, PM) 등도 중요한 규제 대상이 되고 있다. 한편, 대기업으로 분류되는 국내 조선업의 산업적 특성 때문에 소형선박의 배기가스 저감 방안에 관한 연구가 미비하며, 최근 어선용 디젤엔진의 배출가스 저감 필터를 이용하여 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> 제거를 위한 연구가 진행되었다 (Lee et al., 2014).

연근해 어선은 연통의 위치가 낮고 습도가 높아서 PM의 확산이 빠르게 일어나지 않는 에어로졸 (aerosol) 현상의 발생 가능성이 높다. PM의 크기가 0.1~70 μm로 다양하고, 그 이상의 크기는 중력의 영향으로 공기 중에 확산되지 않고 선박으로 유입되어 육상보다 그 피해가 심할 것으로 예상되나 역학적 조사된 사례는 없다. 선박의 디젤엔진에서 배출되는 유해한 배기물질은 크게 입자상 및 가스상 오염물질로 나눌 수 있으며, 이는 연료의 불완전 연소, 고온 고압에서 혼합물의 반응, 윤활유 및 첨가제의 연소 그리고 연료의 첨가제와 연료 중에 들어 있는 유황 성분의 연소 등에 의해 생성된다. 미세먼지 입자 (PM10)는 직경이 10 μm 이하인 먼지를 뜻하며, 자연적 발생 보다는 인위적인 엔진의 매연 등과 같은 원인이 지배적이라고 알려져 있다 (Hyun and Chang, 2014).

한편, 미세먼지는 발생원 자체에서 제어하기에는 비용의 증가와 기술적 한계가 있다. 사이클론 집진장치는 제작 및 운용비가 저렴하고 고압, 고온과 같은 악조건에서도 운전이 가능하며, 선박과 같이 공간적 제약이 있는 환경에서는 효율성을 극대화 할 수 있다 (Wark et al., 1998). 이러한 미세먼지 제어를 위한 집진장치로는 가스 사이클론 집진방법을 통한 중력식 방법이 효과적이므로, 사이클론 설계를 위한 실험적인 유동 해석과 기존

경험적 이론식과 비교를 통한 경제적이고 효율적인 방법을 시뮬레이션 기법을 이용하여 최적의 설계방안을 유출하기 위한 노력을 하고 있다. 사이클론 집진장치의 구조는 형태적으로 하나의 입구를 중심으로 흡입되는 분진 등이 외벽을 타고 하부의 집진부에 모여서 출구 쪽으로 이탈을 방지하는 방식이다. 원뿔형 사이클론 집진장치에 대한 연구들은 여러 연구자들에 의해 다방면적으로 진행되고 있다 (Kim, 1993).

본 연구에서는 소형 원통형 가스사이클론 집진기에 관한 연구로 하부 칸막이 설치에 따른 내부 유동 특성을 이해하기 위하여 DPIV (Digital Particle Image Velocimetry) 를 이용하여 유동의 변화에 따른 미세먼지의 이동을 2차원적으로 분석하였다.

### 재료 및 방법

본 연구에서 소형 어선을 대상으로 설계된 사이클론 집진장치의 실제 모델을 모사하여 유동가시화를 위한 아크릴소재의 모형을 제작하였다 (Fig. 1).

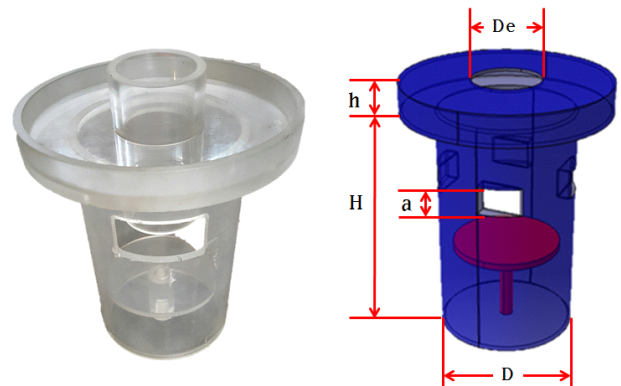


Fig. 1. Gascyclone dust collector model.

유동가시화 실험은 고속카메라 (VH-310M-M264, ViewWorks, USA), 532 nm의 Nd-Yag 레이저 (VA-II-N-532-Green, Viasho, China), PIV 소프트웨어 (Thinkers EYES, TNTech, Korea), 퍼스널컴퓨터, 아크릴 시작품

Table 1. Cylindrical shape of the outer cyclone dust collector

	H (overall height)	h (cylinder height)	D (cyclone dia)	De (cyclone gas exit duct dia)	a (gas inlet height)
height (m)	0.2	0.025	0.1	0.04	0.04

모델 (150 mm (D)×198 mm (H))을 구성하여 실험하였다 (Fig. 2).

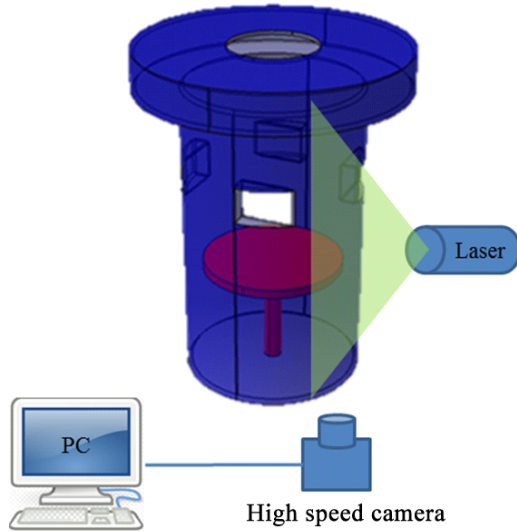


Fig. 2. PIV configuration for gascyclone visualization.

PIV기법은 유동장의 매질과 동일한 비중의 입자를 투입한 후 이들 입자들의 거동을 디지털 가시화 기술을 이용하여 입자들의 운동을 해석함으로써 유동장을 유체 역학적으로 분석하는 방법이다 (Lee, 1996). 사이클론 유동은 벽면을 기준으로 일정한 거리별로 다양한 형태의 유동장이 형성된다. 비접촉식 유동계측법인 PIV기법은 접촉식 센서의 설치가 힘들고 동시다점계측을 통한 유동해석이 필요할 경우 내부 유동해석에 유리하다는 장점을 가지고 있다.

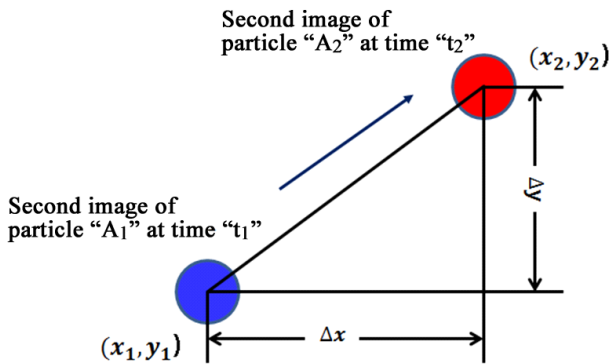


Fig. 3. Schematic diagram of PIV.

$$u = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta x}{\Delta t}, \quad v = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (1)$$

일정한 시간 간격 ( $\Delta t$ )의 두 영상의 입자들의 이동 거리를 이용해 식 (1)과 같이 입자를 추적해 속도를 구하는 방법에서 동일입자 추적알고리즘 (Centroid tracking algorithm)과 함께 중요한 것은 입자의 중심좌표를 구하는 것이다 (Fig. 3). 여기서  $u$ 는 x축의 속도성분,  $v$ 는 y축의 속도성분이며,  $\Delta t$ 는 두 영상간의 시간차이다. 고속카메라의 측정 속도는 250 frame/sec로 시간 간격 ( $\Delta t$ )은 4000  $\mu s$ 가 되도록 설정하였다. 카메라 촬영영상에서 픽셀 모두가 0~255 계조 (Grey-level)의 값을 갖는 농담영상 (Threshold image)이므로 이치방법 (Threshold method) 및 필요한 전 처리 (Image preprocess)를 잡음성분 (Image noise)을 모두 제거하고 윤곽선추적 (Boundary trace) 등의 처리를 통하여 단일 입자임을 확인한다. 추적 입자 평균 사이즈 14~20  $\mu m$ 의 Silver coated hollow glass를 사용하였다. 중심위치를 구하는 방법은 윤곽선의 좌표만을 이용하였다. 속도벡터를 구할 때의 내부까지 고려하여 식 (2)와 같은 면적모멘트 공식 (Image area moment method)을 이용하여 입자중심좌표를 구하면 오차 성분을 감소시킬 수 있다. 여기서  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ 는 각각의 면적모멘트,  $x_i$ ,  $y_i$ 는 입자를 구성하는 각 픽셀의 좌표이며,  $A_i$ 는 그 면적이다.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i x_i}{\sum_{i=1}^n A_i}, \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i y_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (2)$$

#### 계조치상호상관법

계조치 (Grey-level)를 이용한 상호상관법 (Cross correlation method)은 개개의 입자의 도심좌표 (Centroid position)를 이용하는 PTV (Particle Tracking Velocimetry)와는 달리 입자간의 미소간격을 갖는 연속된 두 프레임의 영상을 이용하여 이들의 계조치에 대하여 식 (3)과 같은 상호상관계수를 이용하여 최대 상관계수 (C<sub>fg</sub> : Correlation coefficient)의 위치를 속도벡터

의 종점좌표로 정하는 방법의 원리를 말한다 (Doh, 1998).

$$C_{fg} = \frac{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f}_i)(g_i - \bar{g}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f}_i)^2 \sum_{i=1}^{n^2} (g_i - \bar{g}_i)^2}} \quad (3)$$

단,  $f_i, g_i$ 는 상관영역 (Correlation coefficient Dimension) 내의 각 픽셀의 계조치를 나타내며,  $\bar{f}_i, \bar{g}_i$ 는 고속카메라에서 촬영된 영상화상에 대한 시간평균을 의미한다. 다음으로 계조치 상호상관법 (Cross-Correlation coefficient method)에서는 최대상관계수의 위치를 정수로 표시되는 픽셀값 이하의 정도로 정확하게 구하여야 한다. 즉 PIV의 다이내믹 레인지를 증가시키기 위해서는 이와 같은 서브픽셀 해상도문제를 해결하여야 하며, 이것은 PIV의 계측성능을 크게 좌우한다. 특히, 벡터의 시점과 종점간의 거리가 2~3픽셀 이하인 경우에는 얻어진 벡터의 정도에 결정적인 영향을 미친다 (Willert, 1991). 이와 같은 상호상관 PIV를 적용한 연구결과는 지금까지 다수의 연구 성과가 있으며, 이에 관하여 체계적으로 설명이 되어 있다.

### 결과 및 고찰

#### 측정영역의 결정

사이클론 유동은 선회류의 3차원 유동이 강하며 내부 속도가 벽면으로부터 접선 방향으로 빠르기 때문에 각 구간별 유동속도의 차이가 크다. PIV계산 특성 중 동일 공간의 계측영역에 입자 이동거리가 크게 차이나면 유동계산의 효율성이 떨어지고 검색영역을 다이내믹하게 조정할 수 없기 때문에 5개의 구역을 설정하여 측정하였다 (Fig. 4). 사이클론 내의 유동흐름 (Fluid flow)을 회전대칭 (Rotational symmetry)으로 가정한 2차원 수치해석의 해는 적절하지 않아 (Yong, 2008) 입구 쪽을 3개 (A, B, C)의 구역으로 나누고 비대칭 구조를 분석하기 위하여 대칭적 구역 (E)로 해석하였다.

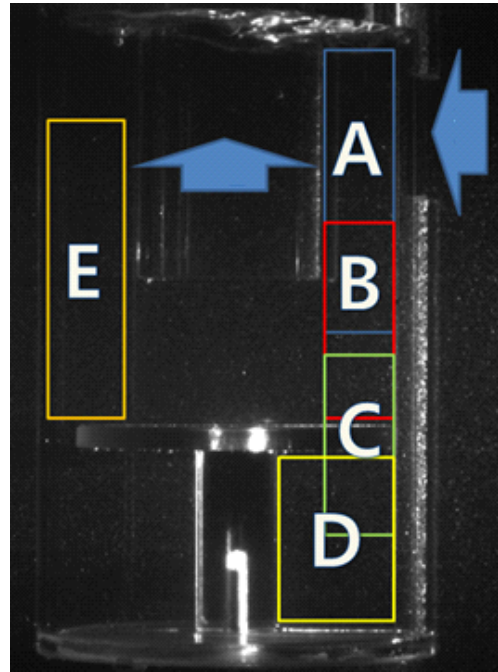


Fig. 4. Flow visualization of the measurement region cyclone dust collector.

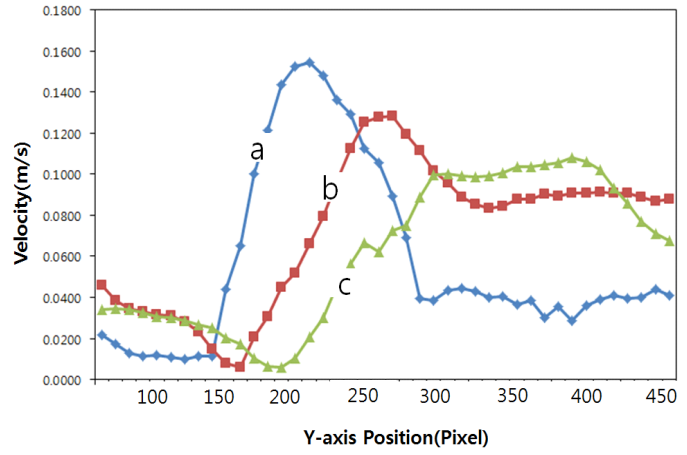
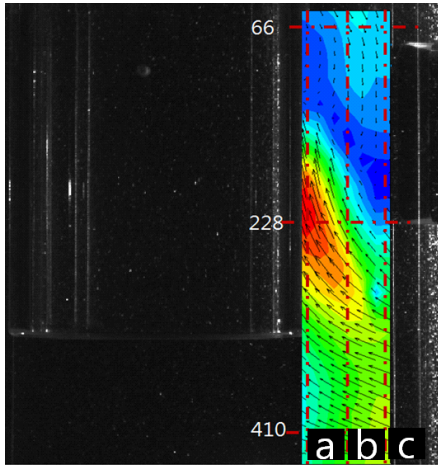
Table 2. Regional scale part for PIV visualization

	A	B	C	D	E
Length ratio (mm/pixel)	0.182	0.200	0.185	0.196	0.185
Measurement speed ( $\mu s$ )	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000

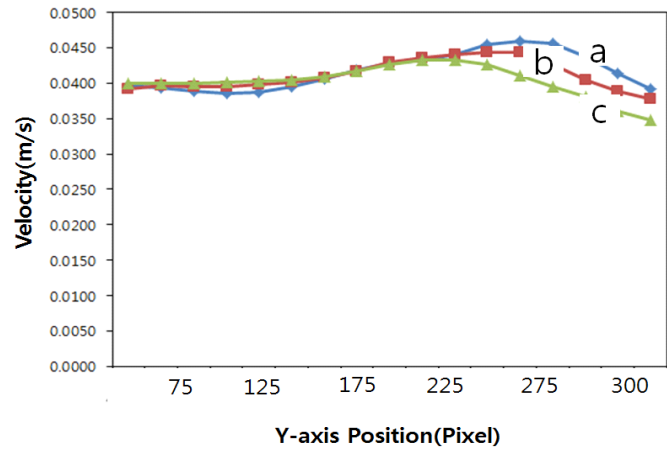
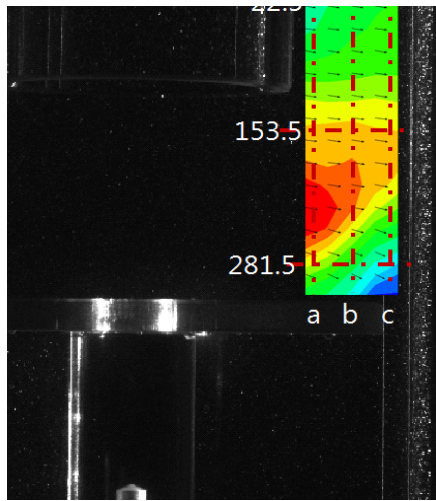
#### 입구벽면 유동해석

지금까지 연구된 사이클론 유동은 선회류의 특징이 강할수록 외벽의 유동속도가 강하고 일정한 사이각을 이루고 회전한다. 내벽에서부터 20 mm 간격으로 유속을 계측한 결과, 구역 A는 벽면에서 일정한 유동방향을 가지는 선회류의 특징을 보여주고 있다. 내부 토출구 입구와 벽면 사이의 유동은 구역 B에서 집진 칸막이 방향으로 유동장이 형성된다. 내부 토출구 주위의 유동이 벽면과 집진 칸막이 사이의 회전 유동장이 구역 C에서 형성되고 있다. 집진 칸막이 내부는 회전 유동장이 발생하고 구역 D의 360에서 속도구배가 강해 집진 칸막이 내부의 미세먼지가 효과적으로 차단되었다. 구역 D의 유동패턴을 통해 집진 칸막이 내의 분진이 배출되지 않는 것을 확인할 수 있다. 구역 C는 비대칭적인 사이클론 유동의 특성을 보여주고 있다 (Fig. 5).

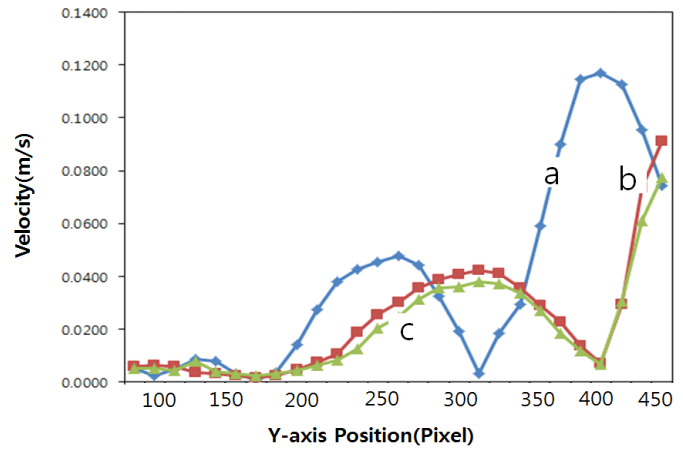
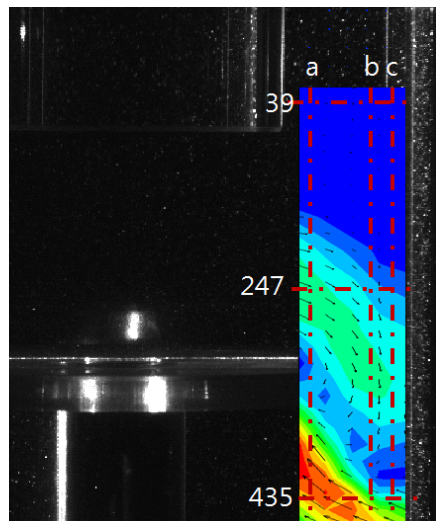
소형 가스사이클론 집진장치를 이용한 PM 전처리 시스템의 유동 가시화



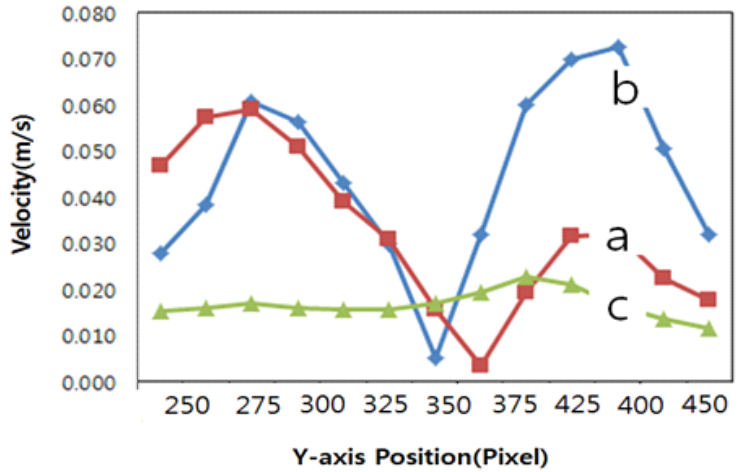
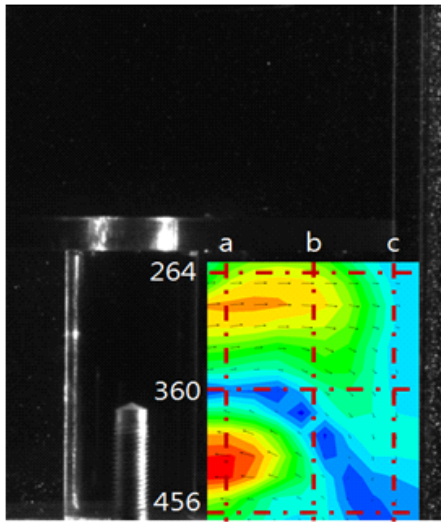
(a) Part A



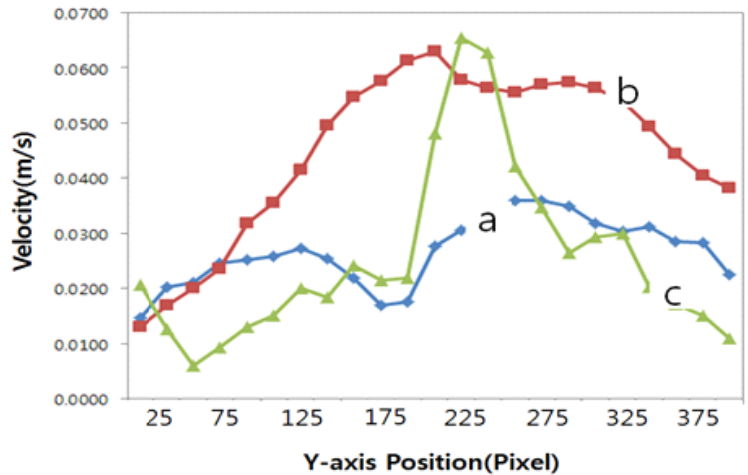
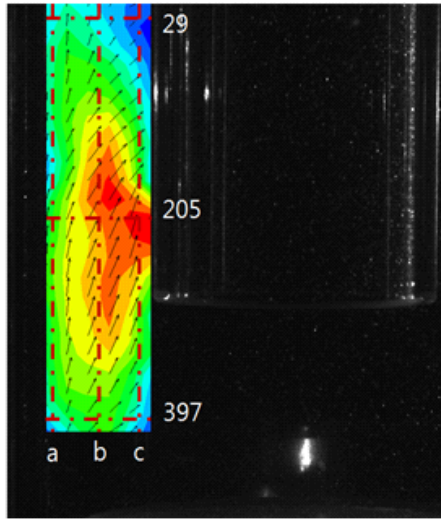
(b) Part B



(c) Part C



(d) Part D



(e) Part E

Fig. 5. Velocity vector contour of flow at each part.

유체입자 (Fluid element)의 각운동량 (Angular momentum)에 비례하는 그 입자의 회전을 측정하는 것을 유체입자의 와도 (Vorticity)라 한다. 양의 와도는 반시계방향으로 회전하는 것을, 음의 와도는 시계방향으로 회전하는 것을 의미한다. 벡터분석에서 와도는 속도의 꼬임 (Curl)으로 정의된다 (Fig. 6). 사이클론 외벽과 내부토출구의 와도성분을 구역 C와 같이 표시한 것으로 벽면방향으로 와도의 형성이 강하며 하부 칸막이입구로 구역 흡입력이 강하게 발생하고 있다. 구역 D는 내부유동은 실린더 후류에서 발생하는 유동 (Kwag, 2012)과

유사성을 가지며, 중심 원형 지지대를 중심으로 내부에서 회전하는 것을 볼 수 있다. 이것은 내부의 유동이 일정하게 회전하는 것으로 내부의 입자들이 집진되는 것을 알 수 있다.

원통형은 원뿔형보다 하부의 면적이 넓어져서 포집량은 증가하지만, 배기구 토출면적이 줄어 엔진 부하의 원인이 될 수 있다. 압력강하를 줄이기 위해, 기존의 이론적 내통입구 면적보다 실험모델의 내통입구 면적을 증가시켰다. 기존 연구에 따르면 흡입구를 넓게 하면 선회류의 내부 거동이 원활 하지 않고 내부의 유동이

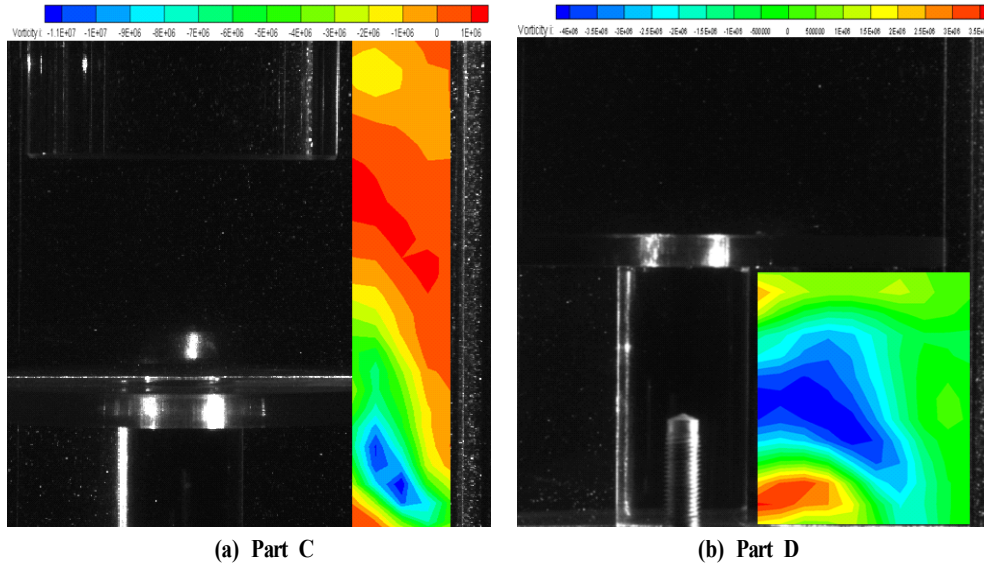


Fig. 6. Vorticity contour of flow at each part C and D.

충돌하는 현상이 발생한다. 그 결과, 흡입부의 상부 유동의 충돌은 분진의 확산을 높여 분진 등이 중심부를 통해 외부로 토출되는 확률을 높여 집진능력이 낮아진다. 따라서 본 실험 결과를 통해서 내부 유동장과 와도의 특성을 고려할 때 내부 유동속도가 저속에서도 집진효율이 우수할 것으로 판단된다.

### 결론

사이클론 집진장치는 운전비용이 저렴하고 집진효율이 우수하여 산업 전반적으로 다양한 용도로 사용되고 있다. 기존의 원뿔형 구조의 외통직경이 0.1 m 이상의 사이클론 집진장치에 대한 연구가 대부분이었다. 기존 선박의 배기가스의 토출 속도는 2~3 m/s로 사이클론이 최적화되는 속도 7~15 m/s보다 느려서 효과적인 유동구조가 형성되지 못했다. 이러한 이유로 내부의 잔류 분진 양이 증가하고 배기가스가 사이클론 집진기에서 엔진으로 역류하여 부하가 발생하는 압력강하가 일어날 수 있다. 사이클론 집진기에 진입하지 못하고 외벽에 부착된 분진들은 다시 역류하여 엔진에 무리를 줄 가능성이 높다. 연통내부의 속도를 높일 수 있는 방안으로 연통벽면과 사이클론 외벽사이의 거리를 줄이고 단면적이 감소되어 출구 속도를 높일 수 있다. 이와 같은 압력강하를 줄일 수 있는 설계를 위해 내통직경을 늘리고 내부 속도를 줄여서 발생하는 선회류의 속도 보상과 유

동특성을 본 연구를 통해서 확인할 수 있었다. 또한 어업인의 노령화와 배기가스 노출로 인한 조업과정에서 발생하는 피해를 예방하고, 저렴한 제작비용과 지속적으로 사용이 가능한 기계식 사이클론 집진 시스템을 설계하고 유동가시화 기법을 이용하여 검증하였다.

### 사사

본 연구는 국립수산과학원 수산과학연구사업 (R2016043)의 지원에 의해 수행되었으며, 현장 조사 수행에 도움을 주신 연구원님들과 본 논문을 사려 깊게 검토하여 주신 심사위원님들과 편집위원님께 감사드립니다.

### References

Adrian RJ and Yao CS. 1985. Pulsed laser technique application to liquid and gaseous flows and scattering power of seed materials. *Applied Optics* 24, 24-44. (DOI:10.1364/ao.24.000044)

Bong CK, Park SJ, Kim YG, Lee HK, Lee IH and Hwang UH. 2011. Study on the Calculation of GHG Emissions from General Ships by Tier3 Method. *Journal of KSEE*, 701-708. (DOI:10.4491/KSEE.2011.33.10.701)

Doh DH and Lee YH. 1998. A study on estimation of spatial-current field and boundry pressure distribution using 3D velocimetry PIV. *J Kor Soc Mechan Eng* 22(4), 468-479.

- Hyun DG and Chang HS. 2014. CLEAN TECHNOLOGY 20(3), 263-268.
- Kwag SH. 2012. Flow Analysis over Moving Circular Cylinder Near the Wall at Moderate Reynolds Number. J Kor Soc Mar Eng 36(8), 1091-1096.  
(DOI:10.5916/jkosme.2012.36.8.1091)
- Kim YJ. 1993. Cyclone dust collector. Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, 97.
- Lee KH, Kim SK, Kim SH, Yang YS and Park SW. 2014. Development and efficiency of filter device for the emission reduction from the diesel engine in fishing boat. J Korean Soc Fish Technol 50(1), 50–57.  
(DOI:10.3796/KSFT.2014.50.1.050)
- Lee YH and Choi JW. 1996. Classification and principle of PIV. J Kor Soc Mechan Eng 36(12), 1146-1162.
- MOF. 2012. Food, Agriculture, forestry and fisheries statistical yearbook(2010), Ministry of Oceans and Fisheries. (In Korean)
- Wark K, Warner CF and David WT. 1998. Air Pollution; Its Origin and Control 3th Edition, Addison-Wesley inc.
- Willert CE and Gharib M. 1991. M Digital Particle Image Velocimetry. Experiments in Fluids 10(4), 181-193.  
(DOI:10.1007/bf00190388)
- Yong JK, Kim CN and Cho YN. 2008. A Numerical Analysis on the Flow Characteristics and the Collection Efficiency for Fine Particles in a Cyclone. Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering 20(2), 144-153.
- 
2016. 08. 09 Received  
2016. 08. 29 Revised  
2016. 08. 29 Accepted