



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

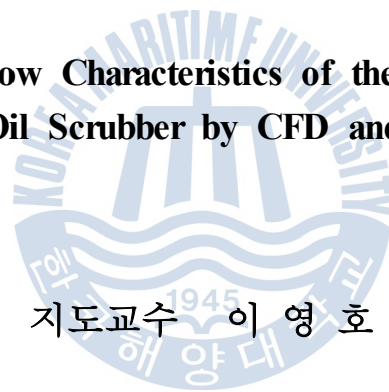
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

**CFD 및 실험에 의한 선박용 연료유 스크러버
노즐의 유동특성에 관한 연구**

**A Study on the Flow Characteristics of the Nozzle for Marine
Ship Fuel Oil Scrubber by CFD and Experiment**



지도교수 이영호

2012년 2월

한국해양대학교 대학원

기계공학과

김정윤

本 論 文 을 金 柱 潤 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함

위원장: 공학박사 박 권 하



위 원: 공학박사 정 형 호



위 원: 공학박사 이 영 호



2011년 12월 23일

한국해양대학교 대학원

기 계 공 학 과

김 정 윤

목 차

Abstract

Nomenclature

제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구동향	2
1.3 연구목적	3
제 2 장 CFD를 이용한 노즐 유동해석	4
2.1 수치해석 기법	4
2.1.1 지배방정식	5
2.1.2 이산화 방법	6
2.1.3 난류모델링	10
2.2 노즐형상과 분사조건	11
2.3 계산격자와 경계조건	14
2.4 결과 및 고찰	17
2.4.1 Hollow cone 노즐의 속도 분포	17
2.4.2 Full cone 노즐의 속도 분포	28
제 3 장 연료유 스크리머 노즐의 성능 실험	39
3.1 실험장치	39
3.1.1 순환펌프	40
3.1.2 송풍장치	41
3.2 계측장비	42
3.2.1 유량측정	42

3.2.2	압력측정	43
3.2.3	스크리버모델	44
3.3	PIV시스템	46
3.3.1	PIV개요	47
3.3.2	조명 및 추적입자	49
3.3.3	영상입력 및 저장장치	50
3.3.4	동일입자 추적	51
3.4	실험조건	52
3.5	실험결과 및 고찰	53
3.5.1	노즐의 분무각도	53
3.5.2	PIV를 이용한 유동가시화	55
3.5.3	PIV실험과 CFD해석의 속도 비교	60
제 4 장	결론	68
참고문헌	69
감사의 글		



A Study on the Flow Characteristics of the Nozzle for Marine Ship Fuel Oil Scrubber by CFD and Experiment

Jeong yoon KIM

Department of Mechanical Engineering

Graduate School of Korea Maritime University

Abstract

Regulation of the pollution emissions from the marine ships and strengthening the development of the related technologies are rapidly taking place. Of those emissions released significantly from the cargo tanks is VOC emission. Tankers that will not emit vapors into the atmosphere without machine that has recovery equipment and related technologies have already been developed. Vapors emitted from tankers to recovery machine is used as fuel in the ships that helps cut down the significant portion of the shipping costs needed for the fuel. With recovery facility, the scrubber includes the number of facilities that collects suspended particles in the gas by a high particulate collection device which sprays the liquid through the nozzle which is typically water. For the development of high-efficient design technique for F.O scrubber, nozzle performance analysis and internal flow characteristics through the PIV experiments were studied.

Nomenclature

D	: outer diameter	[mm]
g	: acceleration of gravity	[m/s ²]
F_h	: Grey Level of 1st frame	[-]
F_r	: Froude number	[-]
P_s	: Static pressure	[bar]
P_t	: Total pressure	[bar]
Q	: Flow Rate	[m ³ /s]
U	: Representative Velocity	[m/s ²]
u,v	: Velocity in the x,y - direction	[mm]
x	: Distance in Horizontal Direction	[mm]
y	: Distance in Vertical Direction	[mm]

Greek letters

γ : Specific Weight

θ : Rotation Angle of image



제 1 장 서 론

1.1 연구배경

전 지구적으로 진행되고 있는 기온 상승 현상인 지구온난화에 많은 영향을 미치고 있는 대표적 요인은 온실 기체의 증가에 의한 온실 효과이다. 그 중 원유를 운송하는 탱커선에서 발생하는 유증기에는 지구 온난화에 많은 영향을 미치는 온실가스인 메탄(CH₄)과, 대기중으로 방출되어 각종 독성물질, 발암물질 등의 대기오염을 유발시키는 휘발성유기화합물(VOC, Volatile Organic Compound)이 포함되어 있다. 또한 유증기는 아직 공식적으로 온난화효과가 검증되지는 않았지만, 지구온난화지수(GWP, Global Warming Potential)가 3~20에 이르는 것으로 추정되는 것이어서, 지구온난화 예방 및 대기오염방지를 위해 탱커선의 화물탱크에서 배출되는 유증기가 대기중으로 방출되는 것을 방지하기 위한 노력이 이뤄지고 있다. 더불어 일반인의 관심이 증가하면서 관련 기술 개발이 급격하게 이뤄지고 있는 실정이다. 유증기는 탱커선의 화물 적하 또는 운송 중에 주로 발생하며, 화물탱크에서 발생하는 유증기는 육상에 유증기 처리설비가 설치되어 있는 항구에 접안한 경우를 제외하고는 대기중으로 방출되며, 이는 부두 주변 지역 악취의 원인이기도 하다. 이러한 다양한 문제점을 해결하고, 탱커선의 화물탱크로부터 배출되는 유증기를 대기중으로 방출하지 않고 회수할 수 있는 설비 및 관련 기술이 개발되고 있다. 선박용 유증기 회수설비는 유증기의 회수를 통해 선박의 연료유로도 사용할 수 있게 된다.

1.2 연구동향

탱커선의 화물탱크에서 발생하는 유증기를 대기중으로 방출하지 않고 회수하기 위해서는 화물탱크에서 방출되는 선박에서 유증기를 회수할 수 있는 선박용 유증기 회수설비(SVRU)의 개발이 필요하며, 노르웨이의 경우에는 이미 관련 기술을 개발하여, 8척의 선박에 적용하여, 상당한 효과를 거두고 있으며, 향후 축적된 기술력을 바탕으로 자신들의 기술이 Global Standard가 될 수 있도록 IMO 활동을 전개할 것으로 예상되며, 이러한 IMO 활동이 전개될 경우에는 관련 기술에 대한 수요가 급증할 것으로 예상된다. 유증기 회수설비에 대한 원천기술은 노르웨이, 미국 등을 비롯한 선진국에서만 보유하고 있으며, 특허권 등과 같은 지적재산권으로 보호받고 있어, 독자적인 선박용 유증기 회수설비를 개발하기 위해서는 선진국이 보유하고 있는 유증기 회수설비 원천기술과 차별화된 유증기 회수설비 관련 기술을 개발할 필요가 있다.

국내에서 이뤄진 유증기 회수설비에 대한 연구가 모두 흡착제를 이용한 설비에 대해 이뤄진 것은, 육상용 유증기 회수설비의 상용화가 주로 미국을 중심으로 이뤄졌으며, 이러한 영향으로 세계적으로 육상용 유증기 회수설비는 대부분 활성탄 등의 흡착제를 이용한 방식이기 때문인 것으로 보인다. 독자적인 선박용 유증기 회수설비개발을 통해 경제적 이익이 보장되고 환경적 이익도 추가될 수 있는 양면성을 갖추게 된다.

1.3 연구목적

최근 국제적인 VOC에 대한 규제 추세를 고려해 볼 때, 탱커선에 배출되는 VOC를 최소화하기 위해 선박용 VOC 회수설비의 설치를 의무화하고자하는 논의가 이뤄지고 있으며, 이를 대비하기 위해 선박용 유증기 회수설비의 개발은 매우 시급히 시행되어야 할 것으로 본다. 탱커선에서 화물탱크에 화물유를 적하하는 경우에는 적하되는 화물유의 약 0.05 ~ 1%가 유증기로 배출되는 것으로 알려져 있으며, 화물유를 운송하는 중에는 1일당 0.0005% 정도가 유증기로 배출되는 것으로 알려져 있다. 탱커선에서 배출되는 유증기를 회수하여, 선박에서 사용되는 연료유로 사용할 경우, 선박 운항에 필요한 연료유 비용을 상당부분을 감축할 수 있을 것으로 본다. 회수설비 중 하나인 연료유 스크러버(Scrubber)는 하단부의 충전물을 통과하는 유증기를 노즐의 액 분사를 통해 가스 속의 부유 고·액 미립자를 포집하며, 상단부의 데미스터(Demister)를 통과하여, 회수되어진다. 본 연구는 고효율 스크러버 설계기술 개발을 위해 스크러버용 노즐의 유동해석을 통한 해석기법의 정립과, 실험을 통한 내부유동 특성 분석과 해석결과의 비교를 통해 해석기법의 타당성을 검토, 연구하였다.

제 2 장 CFD를 이용한 노즐의 유동해석

2.1 수치해석 기법

본 연구에서는 유체기계 해석에 우수한 성능을 보이는 상용 CFD코드인 CFX-12을 사용하였다.

일반적으로 범용의 상용코드들은 SIMPLE 또는 SIMPLER, Rhie and Chow 방법과 같은 압력에 기초한 방정식으로부터 만들어져 있다. 이들 압력에 기초한 코드들은 일반적으로 다양한 물리적 모델들과 경계조건을 제공하고 다른 CAE 도구들과 연동을 포함하는 복잡한 Multi-physics 문제 등에 적용될 수 있다.

유체기계의 정확한 해석을 위해서는 점성저층(viscous sublayer) 영역을 안정적으로 처리 할 수 있는 최적화된 난류모델들이 필요하다. 현재 상용코드에서 오랫동안 적용되어온 $k-\epsilon$ 모델과 벽 함수의 조합은 유체기계에서 요구 되는 높은 해의 정밀도를 만족시킬 수 없다. 보다 정확한 해를 구하기 위해 점성저층에 대한 해석이 요구되고, 이를 만족시키기 위해서는 벽면근처에 종횡비 (aspect-ratio)가 매우 큰, 높은 격자 밀집도의 확보가 요구된다. 이러한 요구 조건을 만족하는 CFX-12의 수치기법의 핵심은 질량과 운동량 방정식의 연동화(coupled formation)이다. CFX-12은 압력기반 유한 체적법(finite volume method)을 fully implicit 이산화하여 얻어지는 방정식을 algebraic multigrid coupled solver를 이용하여 해석한다. SIMPLE 등 고전적인 segregated 접근방법에 비해 implicit coupling 방법은 수렴을 가속시키고, 압축성 유동에 있어서 수렴성의 난점을 피할 수 있고, 높은 종횡비의 격자를 다룰 수 있는 장점을 갖는다.

2.1.1 지배방정식

일반적인 유동에서 다루는 방정식은 질량, 운동량, 에너지 방정식이다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \rho u_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + S_{u_i} \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H - P) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j H) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \tau_{ij}) + S_T \quad (2.3)$$

여기서, ρ =밀도, u_i =속도, P =압력, μ =점성계수, H =전엔탈피, h =정적엔탈피, T =온도, τ_{ij} =응력텐서

상태방정식 $\rho = \rho(P, T)$, 점성계수와 변형률의 함수로서 응력텐서의 응력-변형률 관계, 그리고, $h = h(P, T)$ 가 이들 방정식에 추가된다.

난류유동은 와점성(eddy viscosity)이 추가되고 방정식은 레이놀즈 평균 물리량에 대해 풀다. 방정식의 일반적인 형태는 동일하다.

2.1.2 이산화 방법

CFX-12은 implicit pressure based 방법을 사용하며, 여기서 사용되는 주요 독립변수들은 (P, u_i, H) 이다. 일반적으로, 범용 상용코드는 위의 변수에 대해 해석을 수행하며, 이는 현장에서 일반적으로 부딪히는 비압축성 유동의 해석이 용이하기 때문이다.

Fig.2.1.1에서 실선으로 나타난 것은 일반적으로 알려져 있는 격자 즉, cell 이다. 실선으로 나타낸 cell, 즉 element를 다시 나누어 점선으로 표현된 sub-element를 구성하며 제어체적은 음영으로 나타낸 부분과 같이 node를 둘러싼 sub-element 들로 구성되며 hex, tetra, wedge, pyramid 등 모든 element 형태에 대해 동일하게 적용된다. 모든 변수 값과 유체의 물성치는 이 노드에 저장된다.

수치해석의 정확도는 노드 값으로 표현되는 적분점(IP)들에서의 표면 적분(fluxes) 값들의 정확도에 의해 결정된다. 계산을 통해 얻어진 해는 격자 노드에 저장되지만, 방정식의 대류항, 확산항, 압력구배항 등의 다양한 항들은 적분점에서의 해나 해의 구배 값을 필요로 하며 따라서, element 내부에서의 해의 변화를 계산하기 위해 finite element shape function이 사용된다. 이러한 방식을 FEM based FVM 혹은 element based FVM이라 한다. Fig.2.1.1과 같이 제어 체적면에서의 적분점의 개수가 2차원인 경우 일반적인 FVM의 4개에 비해 8개로 2배가 많은 것을 알 수 있다. 3D 육면체 격자의 경우 6개에서 24개로, 사면체의 2경우 4개에서 평균 60개로 적분 점이 많아지므로 비교적 성긴 격자에 대해서도 해의 정확도가 뛰어난 장점이 있다.

식(2.1), (2.2), (2.3)의 방정식들을 제어체적에 걸쳐 적분 함으로써 질량, 운동량, 그리고 에너지 방정식에 대한 이산화 적분식은 각각 식(2.4), 식(2.5), 식(2.6)과 같다.

$$\rho V \left(\frac{\rho - \rho^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} (\rho u_j \Delta n_j)_{ip} = 0 \quad (2.4)$$

$$\rho V \left(\frac{U_i - U_i^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} m_{ip} (u_i)_{ip} = \sum_{ip} (P \Delta n_i)_{ip} + \sum_{ip} (\mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \Delta n_j)_{ip} + \overline{S_{ui}} V \quad (2.5)$$

$$\rho V \left(\frac{(H - P/\rho) - (H^0 - P^0/\rho)}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} m_{ip} H_{ip} = \sum_{ip} (k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} \Delta n_j)_{ip} + \overline{S_{\phi}} V \quad (2.6)$$

여기서, $(\Delta n_j)_{ip}$ 는 적분점 위치에서 국부 표면 벡터이다. 그리고, 제한 체적의 적분점 표면을 통과하는 m_{ip} 는 질량유동이다. 모든 방정식들은 시간간격의 제한을 피하기 위하여 implicit하게 다루어지며, 비정상 항에는 1차와 2차 backward Euler 방정식이 사용된다. 확산항은 element shape function의 미분형태로 각 적분점의 위치에서 구배계수를 계산함으로써 결정된다. 대류항은 Upwind, Quick 등 몇몇 기법에 의해 평가될 수 있으나, 기본 설정된 기법인 high-resolution 기법을 사용한다. High-resolution 기법은 대류항에 대한 2차 정확도의 upwind biased approach에 기초한 기법이며 Barth와 Jespersen에 의해 기술된 방법과 유사하고, 식(2.7)과 같다.

$$\phi_{ip} = \phi_P + \underline{\beta(\nabla \phi)_{ip}} \overline{\Delta r_{ip}} \quad (2.7)$$

식(2.8)과 같이 divergence 형태에서 모든 항들에 대해 질량 divergence 항은 표면적분의 형태로 변환된다.

$$m_{ip} = \rho_{ip} u_{j,ip} \Delta n_{j,ip} \quad (2.8)$$

밀도는 다른 대류 항처럼 표준 high resolution 스킴을 적용하여 계산되고, 식(2.9)와 같다.

$$\rho_{ip} = \rho_P + \underline{\beta(\nabla \rho)_{ip}} \overline{\Delta r_{ip}} \quad (2.9)$$

이 upwind biased 평가는 운동량과 에너지 방정식의 다른 대류량과 마찬가지로 유동이 압축성이어도 안정적이며, 2차의 정확도를 가진다.

Implicit 방법에서 중요한 것은 ρu 의 선형화이다. 먼저 ρu 는 Newton-Raphson 선형화에 의해 확정되어 식(2.10)과 같다.

$$(\rho u) \approx \rho^n u^0 + \rho^0 u^n - \rho^0 u^0 \quad (2.10)$$

여기서 위첨자 n은 새로운 값 (implicit)을 의미하고 0는 예전 (지연된 값) 시간레벨이다. 이러한 선형화는 전 영역에 걸친 마하수의 신뢰성 있는 수렴을 보장한다.

식(2.11)과 같이 밀도에 대한 상태방정식은 압력의 향으로 구성된 ρ^n 의 implicit 표현을 얻기 위하여 차분되며 앞서 제공된 상태방정식에서 미분항 $a\rho/aP$ 를 계산한다.

$$\rho^n = \rho^0 + \frac{\partial \rho}{\partial P} (P^n - P^0) \quad (2.11)$$

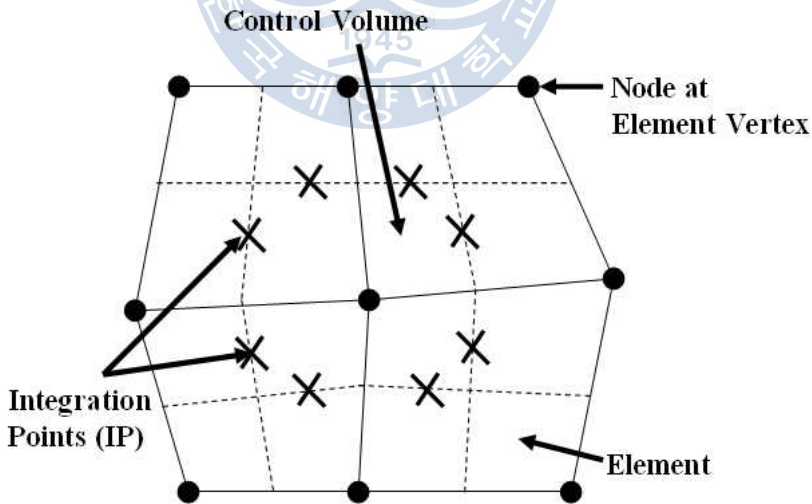


Fig.2.1.1 Mesh arrangement and terminology for dual mesh

Effect of Averaging

어떤 하나의 cell이 다수의 dispersed 상으로 구성된 particle, droplet, bubble 등으로 채워져 있다고 생각하자. cell에 채워져 있는 dispersed 상의 양은 volume fraction으로 정량화된다.

- CFX에서는 phase-weighted 평균기법을 제공한다.
- 단일 cell에 채워진 개별적인 particles, droplet bubble 등은 통계확률에 의해 α (volume fraction)로 평균화되어 표현된다.
- 평균화가 수행된 후에는 개별적인 particle의 경계는 의미가 없으며, 단일 cell은 VOF로 표현된다.

Fig.2.1.2의 좌측그림은 단일 cell에 담겨있는 particle을 나타내고 있으며, particle과 continuous 상 사이에 명확한 경계가 구분된다.(실제 물리적 특성) 그러나, 우측 그림의 경우 좌측에서 particle이 볼륨 내에서 차지하는 체적을 평균하여 VOF의 형태로 나타낸 것이다.

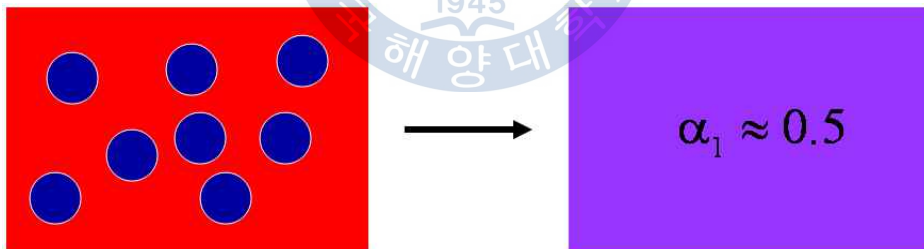


Fig.2.1.2 Averaged particles as volume fraction

2.1.3 난류모델링

유동해석을 수행할 때 가장 큰 에러의 원인 중의 하나는 난류모델의 부적절한 사용이라 할 수 있으며, 특히 변면 근처의 격자생성에 있어 모든 영역에 y^+ 를 일정한 수준으로 유지 한다는 것은 3차원 유동장의 경우 상당히 어려운 작업이다. 일반적으로 Wilcox model의 단점으로 자유 유선에 민감한 결과를 보이는 것을 들 수 있는데 CFX-12에서는 이러한 단점을 보완하여 벽면근처에서는 $k-\omega$ 모델을 사용하고 바깥쪽은 $k-\epsilon$ 모델을 사용하는 BSL(Baseline Model)과 SST(Shear Stress Transport) 모델을 지원한다. $k-\omega$ 모델의 또 다른 장점은 쉽게 자동 벽 처리법(automatic wall treatment)로 확장이 가능하다는 것이다. 이는 가능한 격자의 y^+ 에 무관하게 해의 정확성을 확보하기 위한 것이다. 표준 viscous sub-layer model 들이 벽면 전단응력을 정확히 해석하기 위해 $y^+ \approx 1$ 의 수준을 요구하는 반면 자동벽면처리 기법은 성긴 벽면 격자를 처리 할 수 있는 장점이 있다.

$k-\omega$ SST 모델은 난류전단응력의 수송을 계산하기 때문에 역압력구배에 의해 발생하는 유동박리 크기와 발생 시점을 정확히 예측할 수 있다.

2차원 얇은 전단층에서 난류는 그 자신을 국부 조건들에 순응시킬 정도로 유동 방향으로 항상 완만하게 변화한다. 만일 난류 특성들의 대류와 확산을 무시할 수 있으며 평균유동에 대한 난류의 영향을 혼합길이의 개념으로 표현하는 것이 가능하다. 재순환유동의 경우와 같이 대류 및 확산을 무시할 수 없으면 혼합길이를 위한 간결한 대수적 처방을 더 이상 사용할 수 없다. 혼합길이모델은 이러한 종류의 일반성이 부족하다. 진보적인 방법은 난류의 동역학을 고려하는 것으로 $k-\epsilon$ 모델은 난류 운동 에너지에 영향을 미치는 메커니즘에 초점을 맞춘다.

2.2 노즐형상과 분사조건

2.2.1 노즐형상

본 연구의 수치해석 대상으로 사용된 노즐은 각각 hollow cone 타입의 노즐과 full cone 타입의 노즐이다. 각 노즐의 실물을 fig.2.2.1 (a)와 (b)에 나타내었다. Table.2.1은 각 노즐의 사양을 표시하였다. 분사조건은 10 bar 로 동일하다.



(a) Hollow cone type nozzle



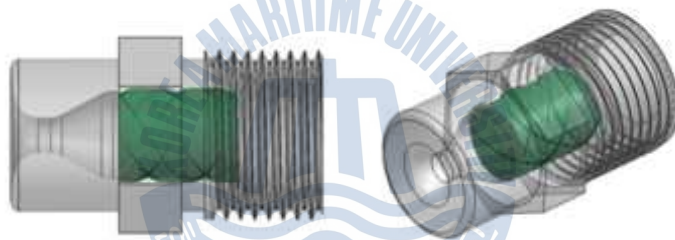
(b) Full cone type nozzle

Fig.2.2.1 Full cone type nozzle

Table 2.1 Specification

	Fig 2.2.1	Fig 2.2.2
Spray type	Hollow cone	Full cone
External diameter	20 [mm]	30 [mm]
Diameter	5 [mm]	3 [mm]
Pressure	10 bar	10 bar
Weight	86.5 g	238.5 g

노즐의 3D 형상은 다음과 같다.



(a)



(b)

Fig.2.2.2 3D modelling of hollow cone type nozzle



(a)



(b)

Fig.2.2.3 3D modelling of full cone type nozzle

2.3 계산격자 및 경계조건

2.3.1 계산격자

계산 격자의 품질은 CFD해석에 있어서 해석 결과의 신뢰성 및 해의 수렴성에 직접적인 영향을 미친다. 보다 우수한 계산격자를 확보하기 위해 격자 생성 툴인 ICEM-CFD 12.1을 사용하여 격자 생성을 수행 하였으며 격자의 구성은 Tetrahedral-prism grid로 격자를 구성하였으며, 전체 격자수는 약 170만 노드이다. 각각의 노즐의 방사각을 고려하여 surface를 삽입하여 fine mesh를 구성하였다. 컴퓨터는 CPU i7, RAM 8GB의 사양으로 10대 병렬 연결하여 CFD해석을 수행하였다.

노즐의 유동 해석을 위해 사용 소프트웨어인 Ansys CFX 12.1을 사용하였으며, 난류 모델은 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.



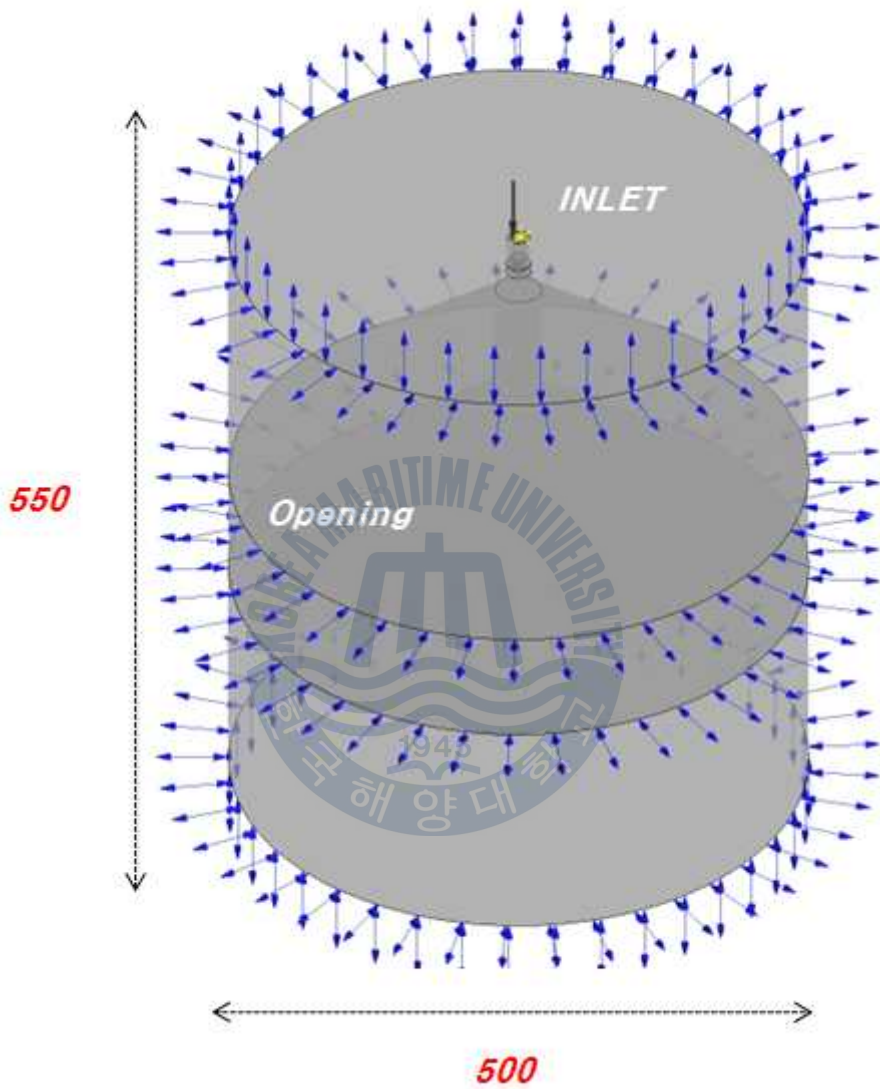
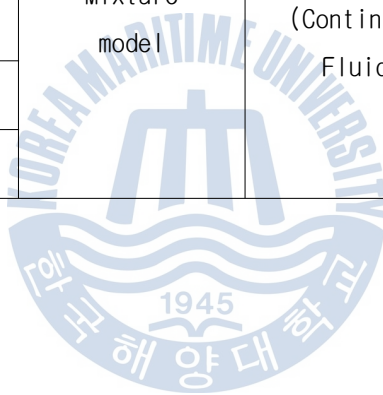


Fig.2.3.1 Boundary condition of scrubber nozzle

경계조건으로 입구영역에 압력조건을 부여하였고, 그 외면은 opening 조건으로 처리하였다. 노즐의 압력에 따른 초기 스크러버용 노즐의 CFD 해석을 위한 조건은 Table 2.2에 나타내었다.

Table.2.2 Specifications of the domain calculation conditions

No.	Pressure [bar]	Fluid fair model	Morphology
1	4	Mixture model	Water ,Air (Continuous Fluid)
2	6		
3	8		
4	10		
5	12		



2.4 결과 및 고찰

2.4.1 Hollow cone 노즐의 속도분포

본 연구에서는 해석을 위하여 입구에 압력을 4bar에서 12bar 사이 변화를 주어 해석하였다. Fig.2.4.1의 그래프는 CFD와 실험을 통한 유량(Q) 비교 곡선이다. CFD와 실험의 유량값이 유사함을 확인하였다.

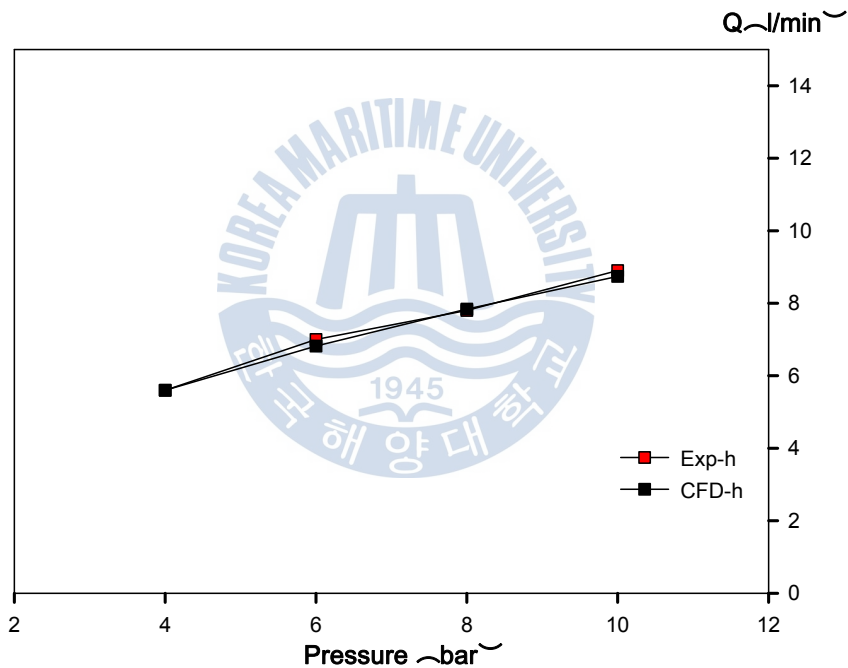


Fig.2.4.1 Pressure-massflow curve of hollow cone nozzle

Fig.2.4.2는 노즐내부의 swirler의 영향으로 인해 노즐 출구부에서 회전류가 생김을 확인할 수 있다. 이 회전류는 중공형 타입의 분사형태를 보인다.

각각의 압력에서 결과는 중심단면에서의 속도분포, 속도벡터, 유선에 대한 결과를 나타내었다. Fig.2.4.3에서 Fig.2.4.5는 압력이 증가함에 따라 노즐 출구부분에서 일정거리까지의 속도가 증가함을 확인할 수 있다.

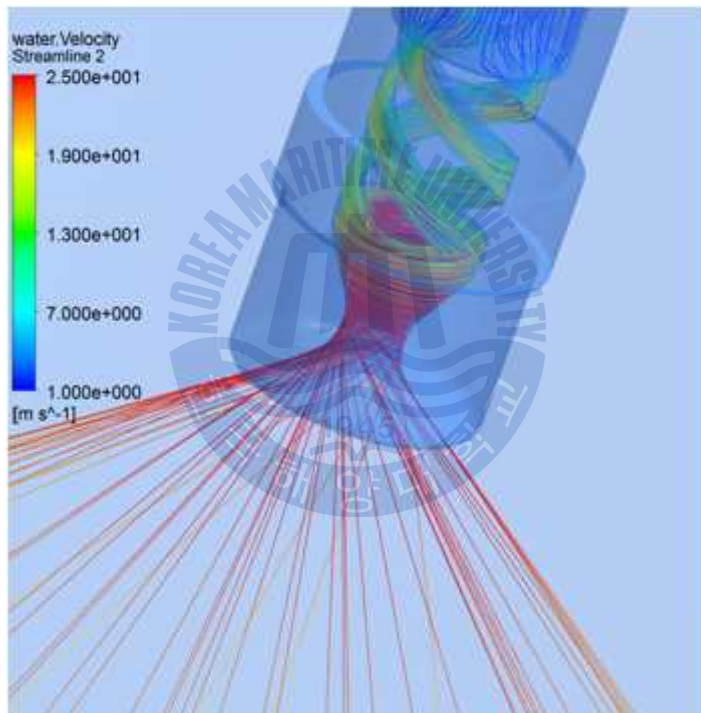
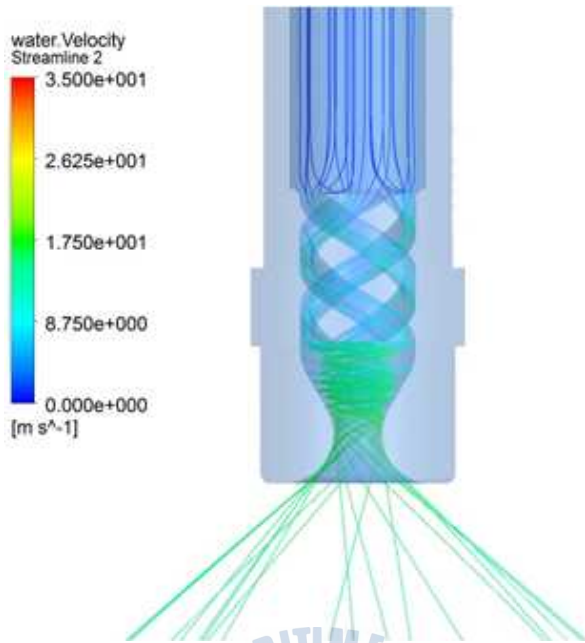
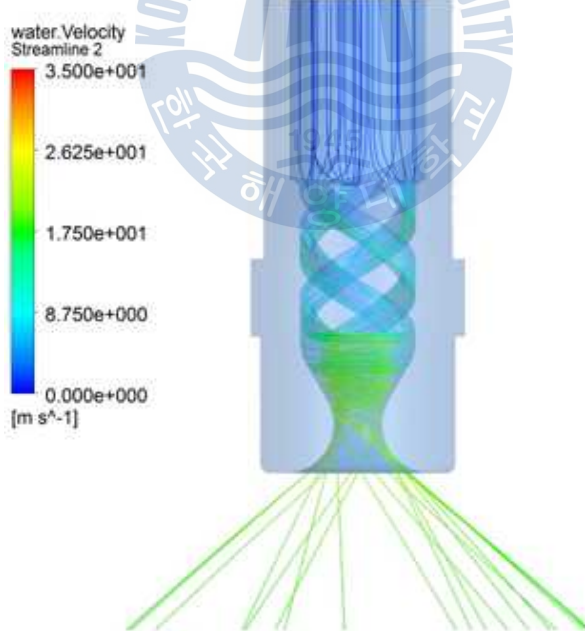


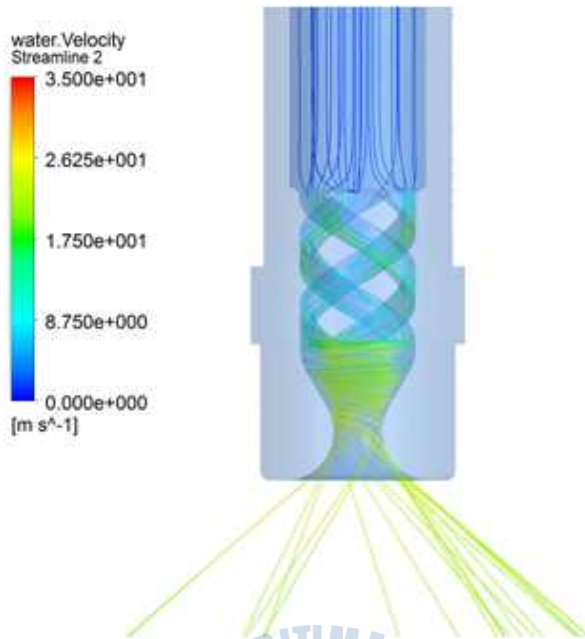
Fig.2.4.2 Streamline of hollow cone nozzle



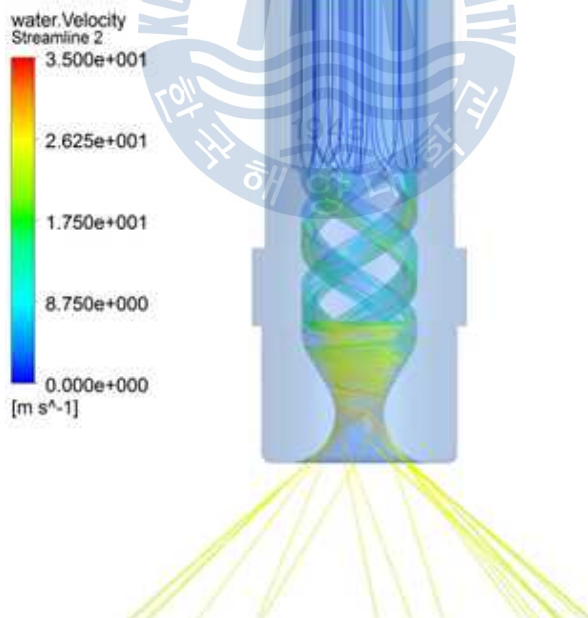
(a) 4 bar



(b) 6 bar



(c) 8 bar



(d) 10 bar

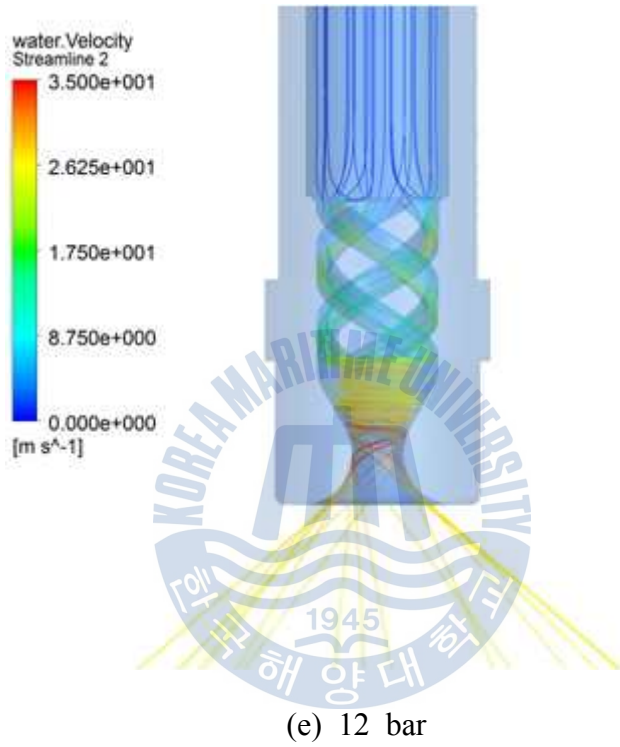
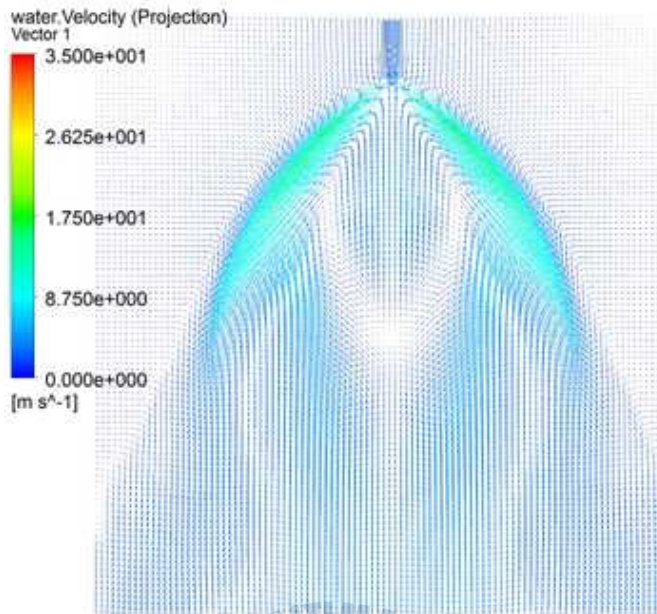
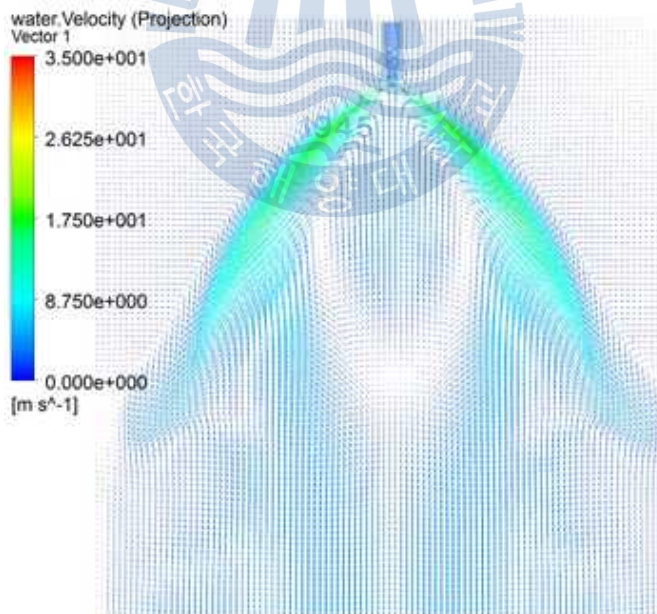


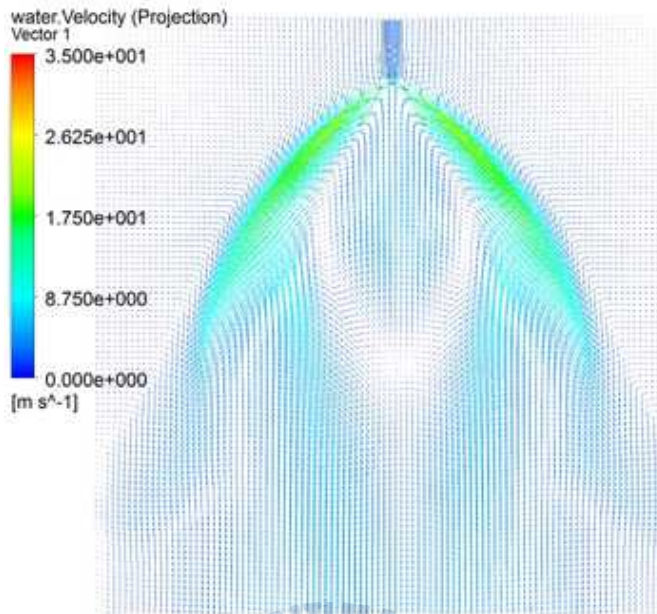
Fig.2.4.3 Streamline of hollow cone nozzle



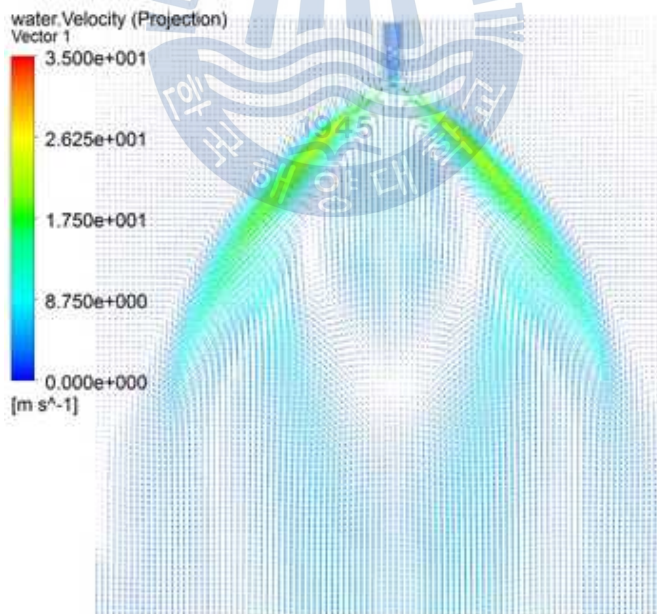
(a) 4 bar



(b) 6 bar



(c) 8 bar



(d) 10 bar

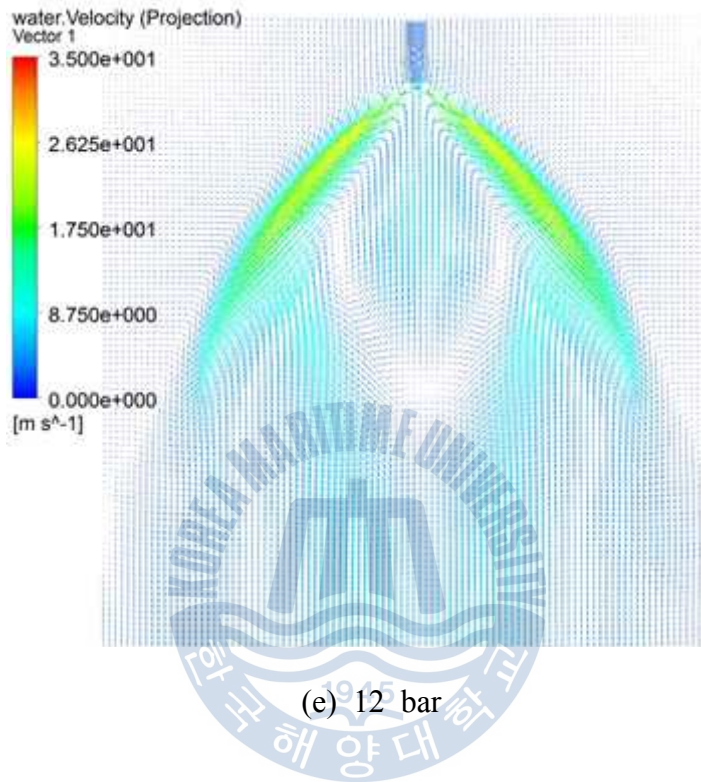
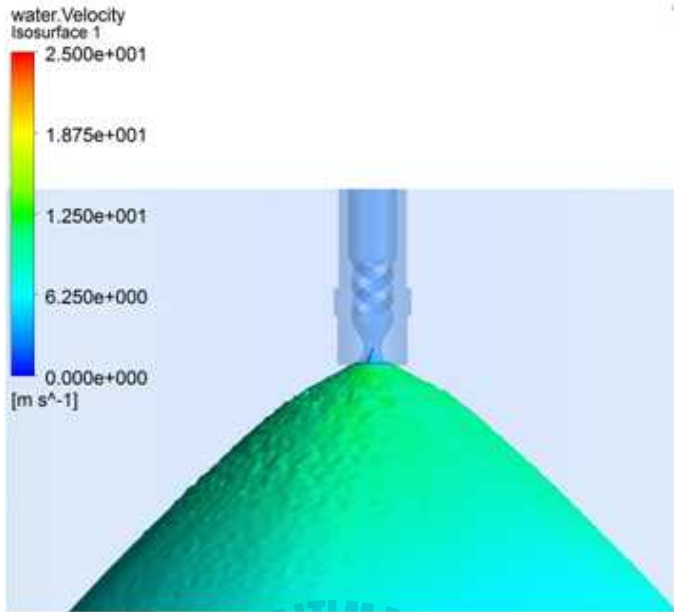
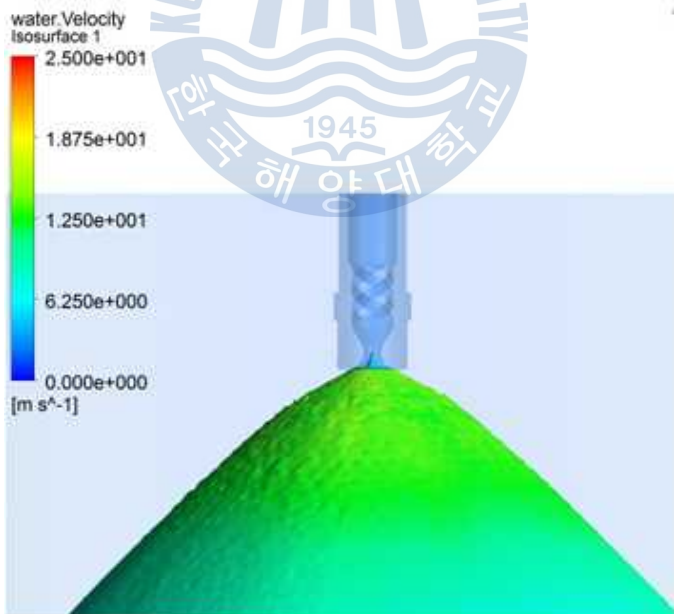


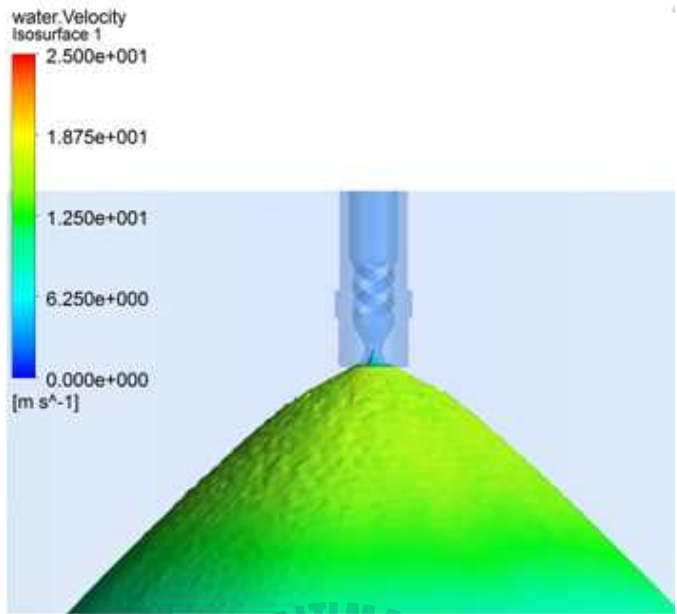
Fig.2.4.4 Velocity vector of hollow cone nozzle



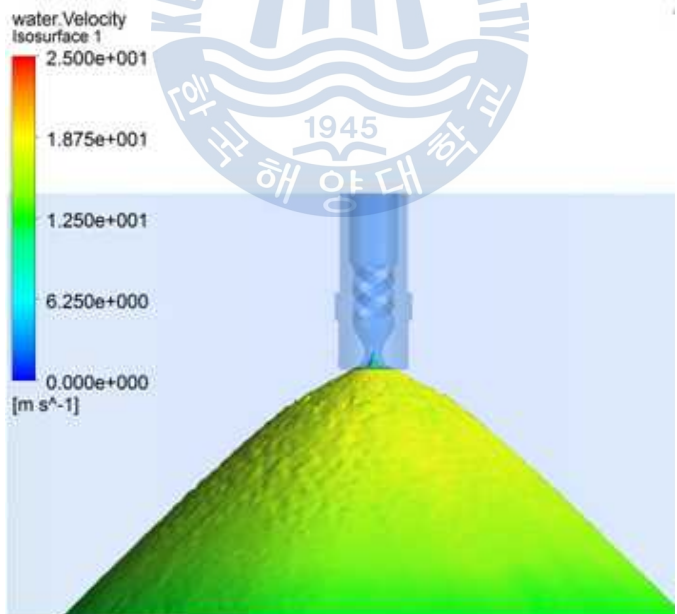
(a) 4 bar



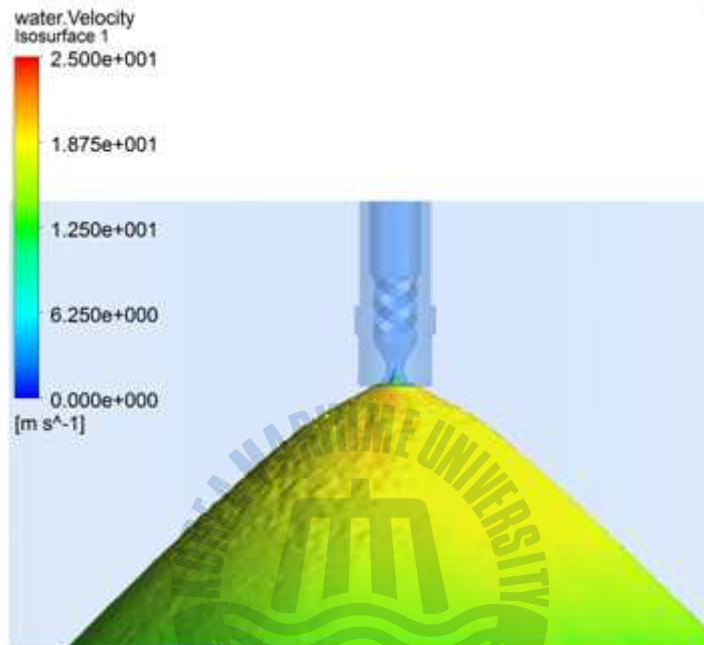
(b) 6 bar



(c) 8 bar



(d) 10 bar



(e) 12 bar

Fig.2.4.5 Volume fraction of hollow cone nozzle

2.4.2 Full cone 노즐의 속도분포

본 연구에서는 해석을 위하여 입구에 압력을 4bar에서 12bar 사이 변화를 주어 해석하였다. Fig.2.4.6의 그래프는 CFD와 실험을 통한 유량(Q) 비교 곡선이다. CFD와 실험의 오차는 분당 0.9 (l/min), 최대 15% 오차를 확인하였다.

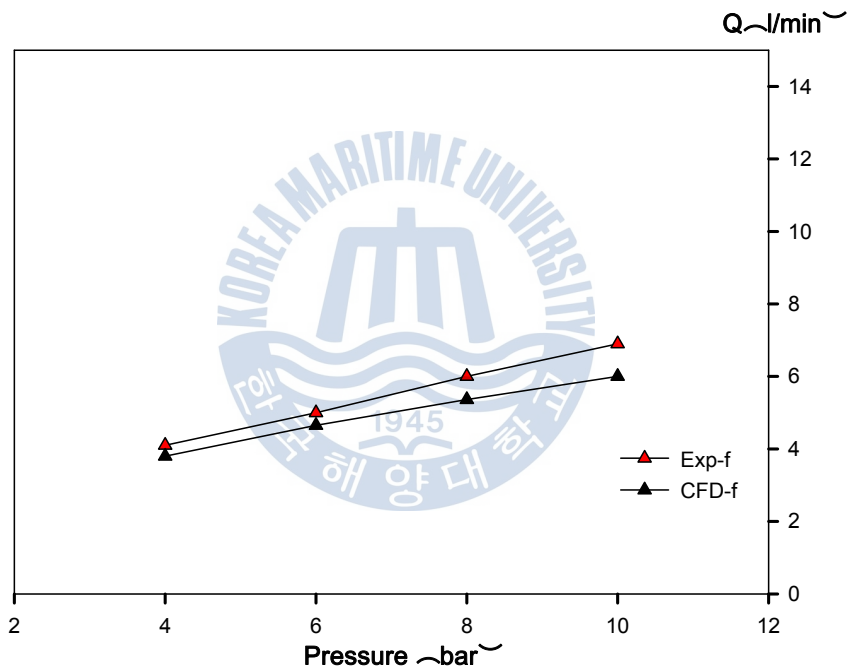


Fig.2.4.6 Pressure-massflow curve of full cone nozzle

Fig.2.4.5는 노즐내부의 swirler의 영향으로 인해 노즐 출구부에서 회전류가 생김을 확인할 수 있다. 이 회전류는 원형 타입의 분사형태를 보인다.

각각의 압력에서 결과는 중심단면에서의 속도분포, 속도벡터, 유선에 대한 결과를 나타내었다. Fig.2.4.6에서 Fig.2.4.8는 압력이 증가함에 따라 노즐 출구부분에서 일정거리까지의 속도가 증가함을 확인할 수 있다.

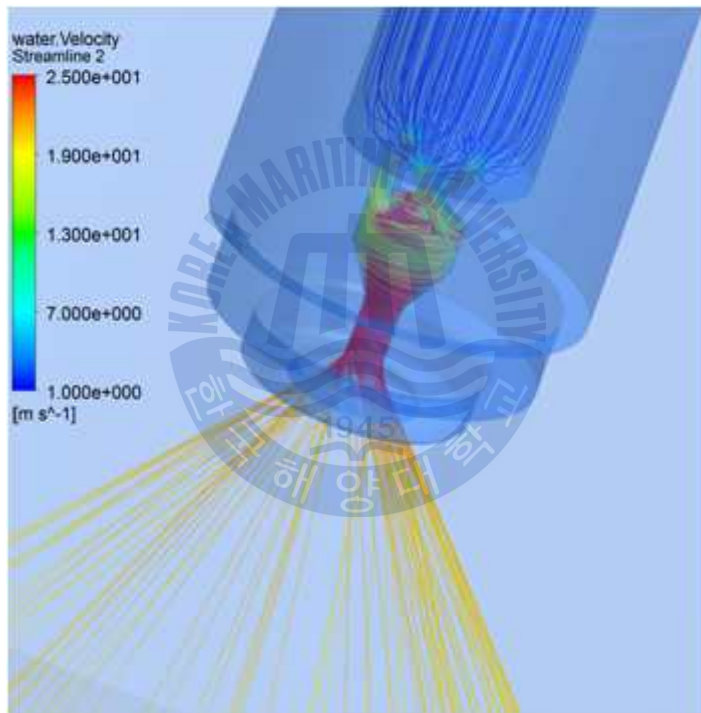
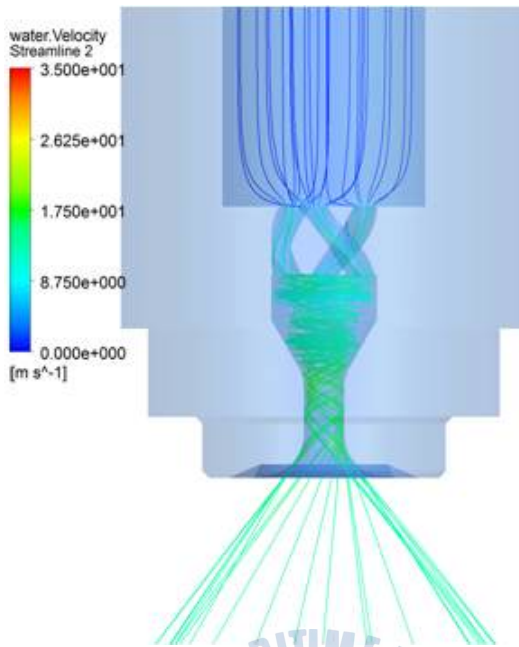
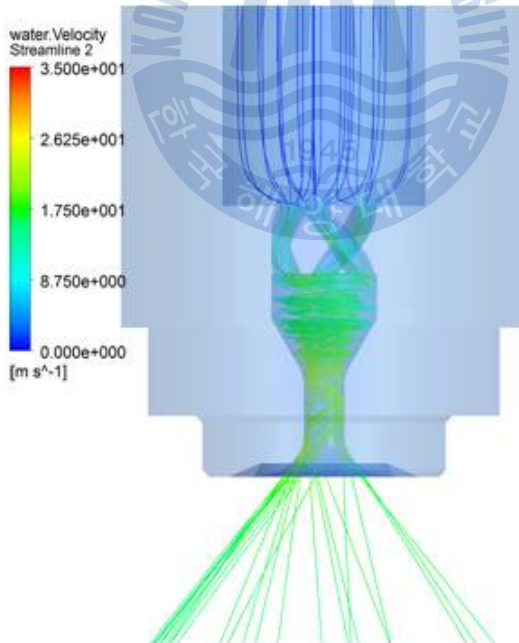


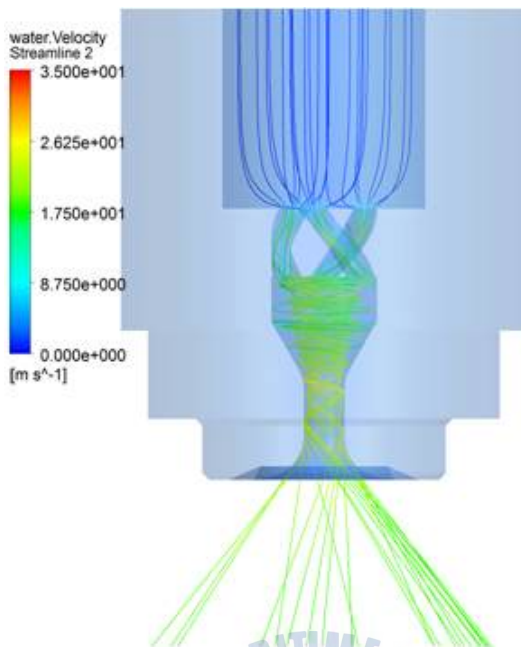
Fig.2.4.5 Streamline of full cone nozzle



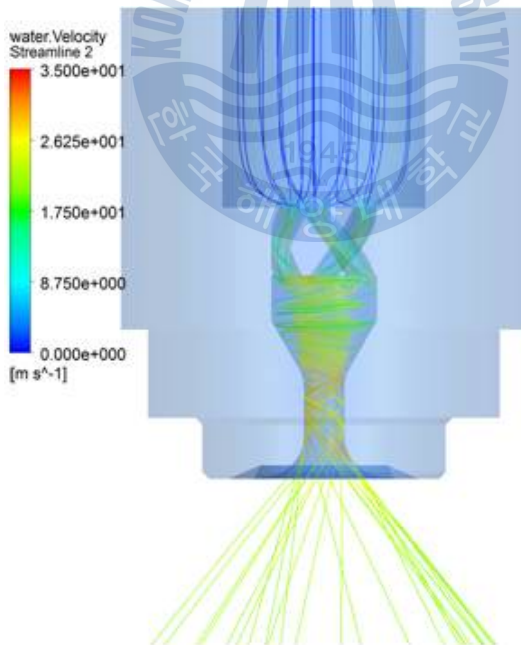
(a) 4 bar



(b) 6 bar



(c) 8 bar



(d) 10 bar

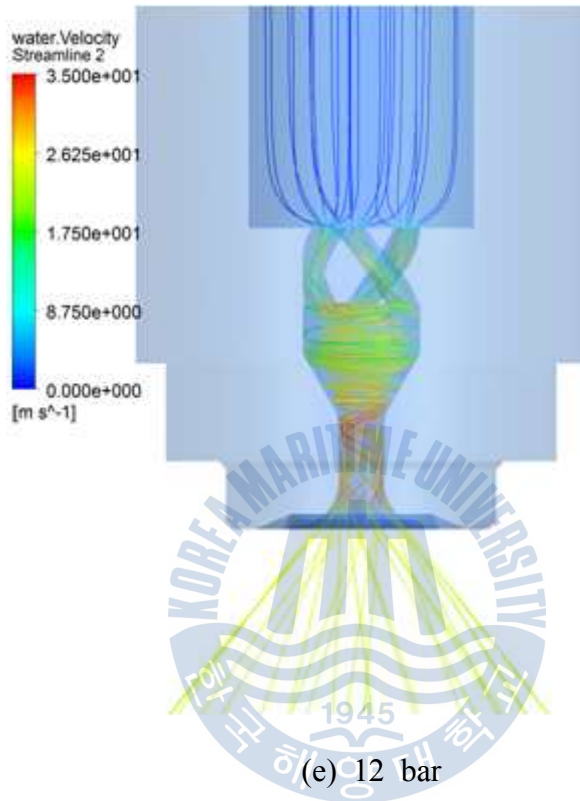
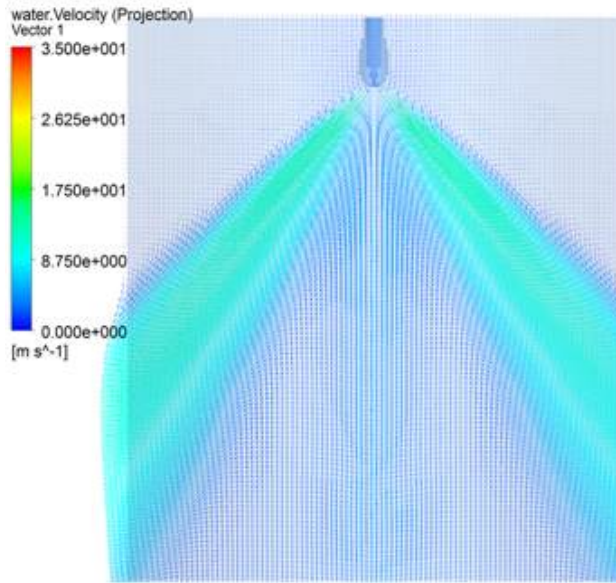
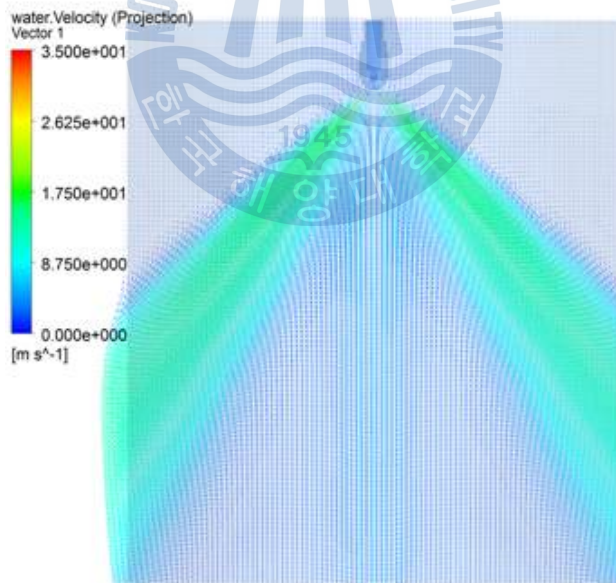


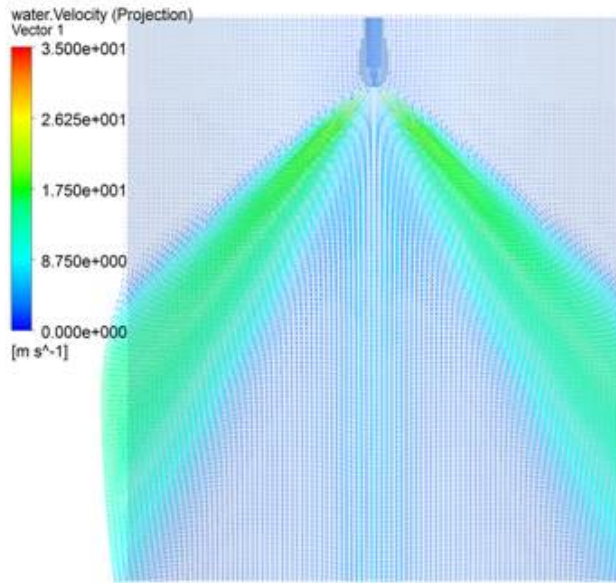
Fig.2.4.6 Streamline of full cone nozzle



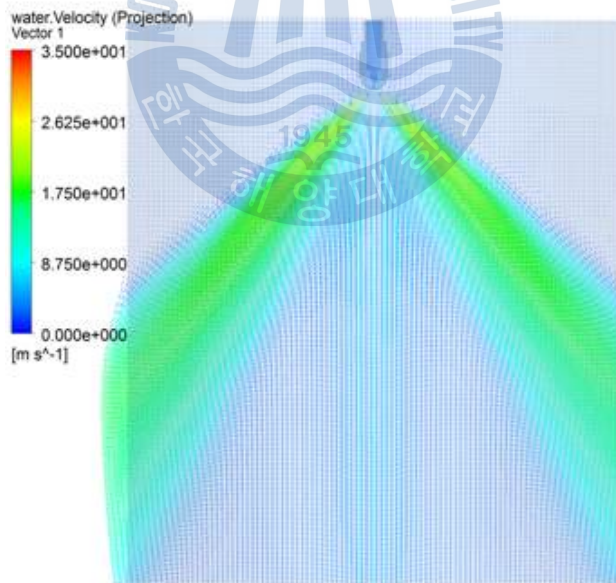
(a) 4 bar



(b) 6 bar



(c) 8 bar



(d) 10 bar

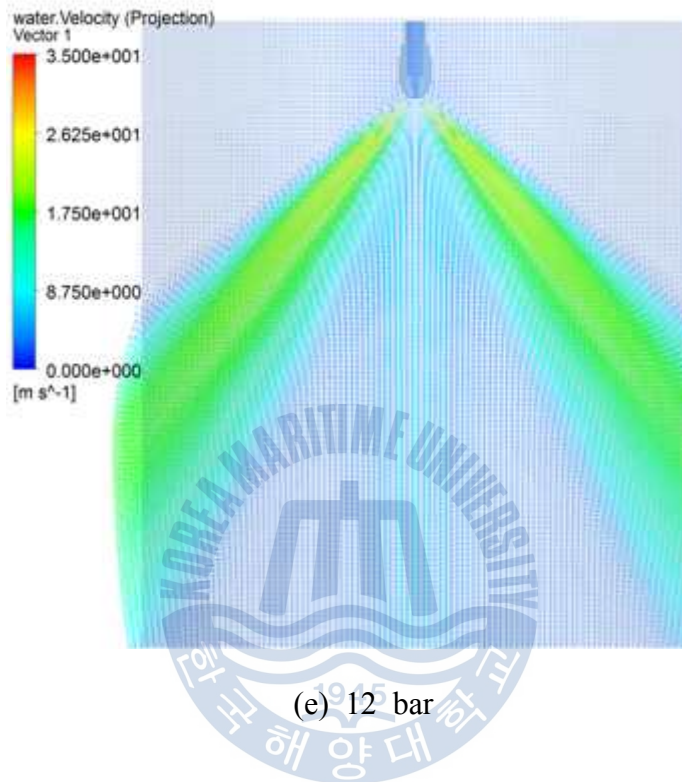
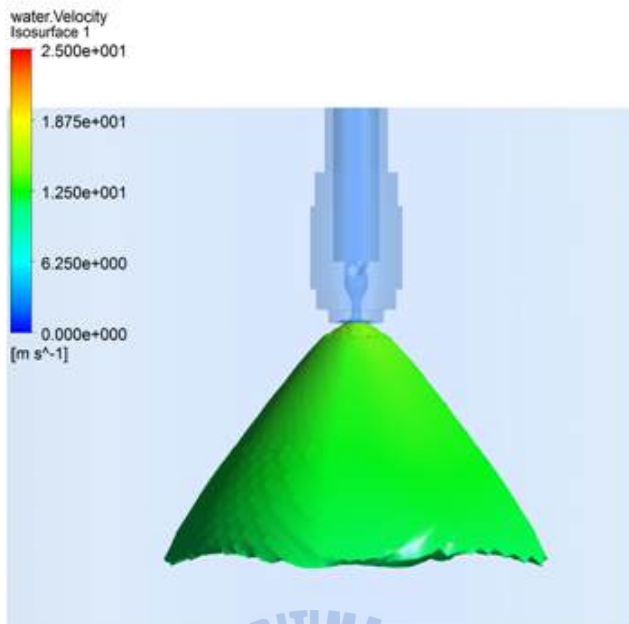
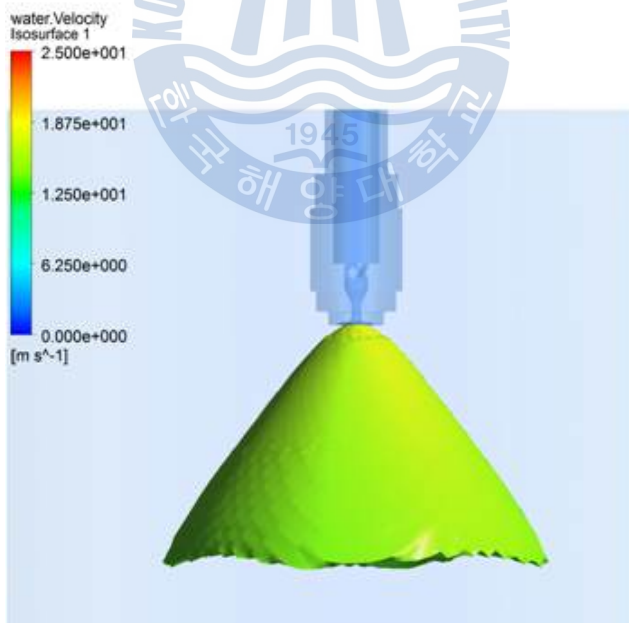


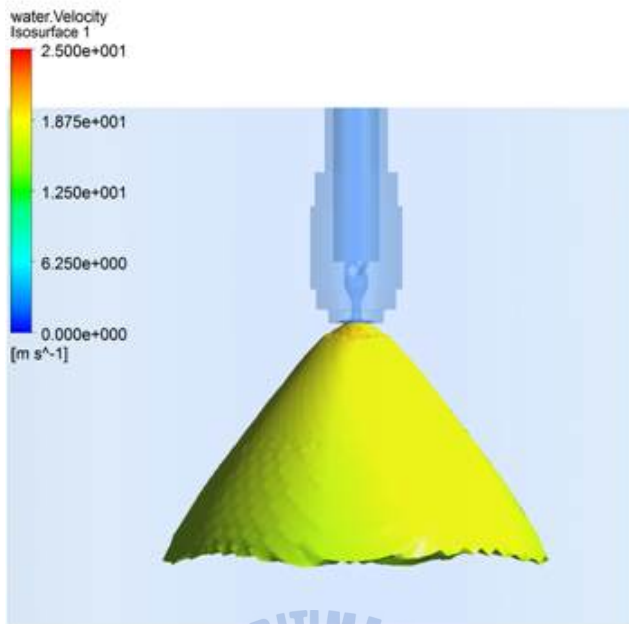
Fig.2.4.7 Velocity vector of hollow cone nozzle



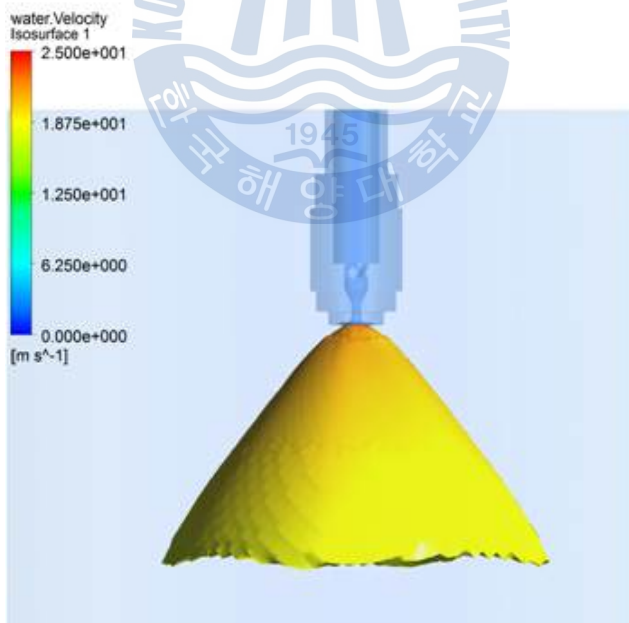
(a) 4 bar



(b) 6 bar



(c) 8 bar



(d) 10 bar

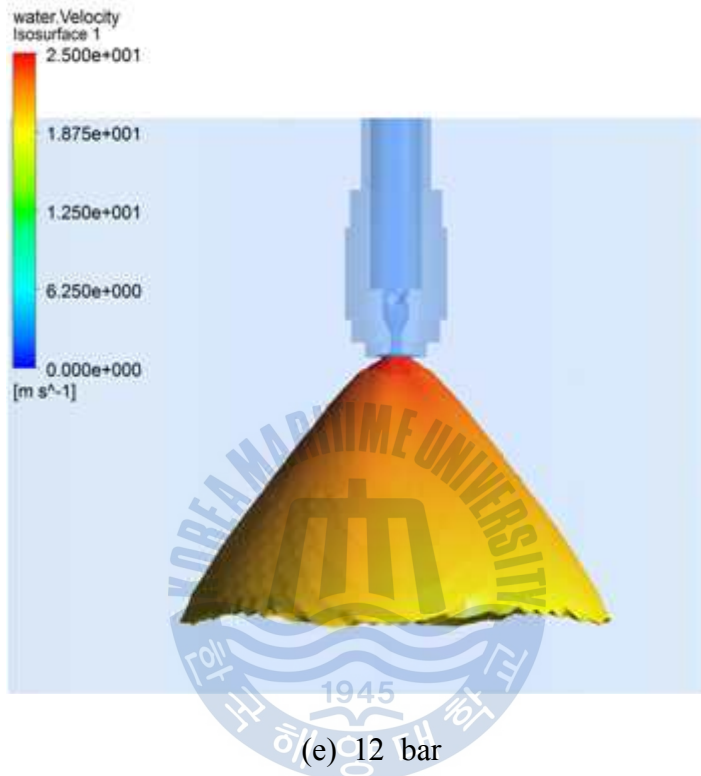


Fig.2.4.8 Volume fraction of hollow cone nozzle

제 3 장 연료유 스크러버 노즐의 성능 실험

3.1 실험장치

본 실험 장치는 PIV 유동 계측을 위하여 설치한 모형물이다. 타워형 스크러버 내부의 정확한 유동계측을 위하여 실물대비 1:1의 비율로 제작하였다. 초기 실험조건들의 검증을 위하여 압력센서 및 유량계를 설치하였다.

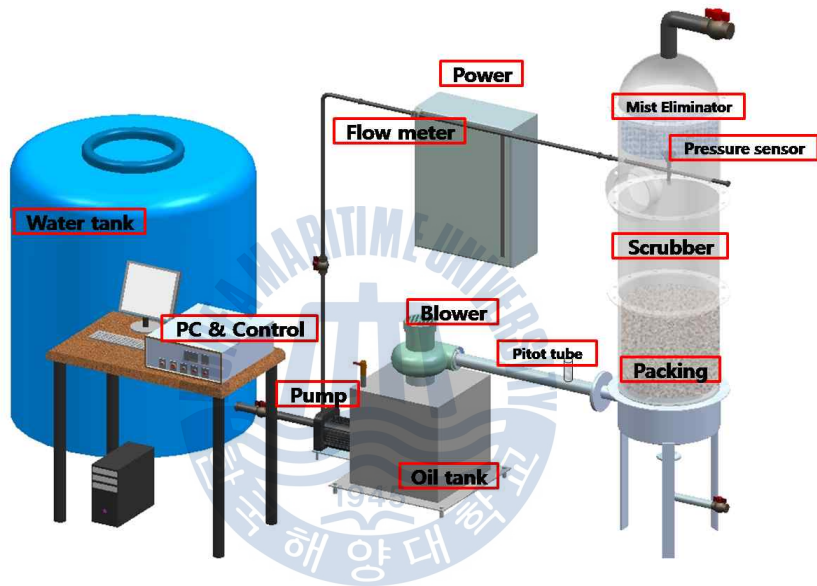


Fig.3.1 Experiment apparatus

Table.3.1. Scrubber Mock-up test condition

Nozzle of the injection pressure	10 bar
Nozzle Flow rate	Type 1 : 9.2 ℓ /m Type 2 : 6.7 ℓ /m
Flow of the blower	360 m3/h

3.1.1 순환펌프

Fig.3.1.1.은 본 실험에 사용된 부스터펌프를 보여주고 있다. 노즐의 분사조건인 10bar 에 적합한 분당 유량 25ℓ/min, 전양정 120m의 다단펌프를 설치하였다.



Fig.3.1.2 Multistage booster pump

3.1.2 송풍장치

Fig.3.1.3은 본 실험에 사용된 고 압력 송풍기를 보여주고 있다. 초기 실험의 풍량 조건인 360 CFM 에 적합한 송풍기를 설치하였다.



Fig.3.1.2 Blower

3.2 계측장비

3.2.1 유량측정

실험에 사용된 센서는 유량센서, 압력센서, 피토판이 사용되었으며 데이터로그를 통하여 컴퓨터에 실시간 저장하였다. 최대유량 20ℓ/min, 정확도는 $\pm 0.5\%$ 의 유량계를 사용하였다.



(a) Data logging system



(b) Flow meter

Fig.3.2.1 Instrumentation

3.2.2 압력측정

압력트랜스미터는 최대압력 2.0 MPa, 직진성오차 0.15%/FS의 압력센서를 사용하였다.



Fig.3.2.2 Pressure Sensor

3.2.3 스크러버 모델

입입 된 오염가스에 물을 분사시켜 충전물 표면에서 오염가스와 물이 접촉 반응되어 오염물질을 흡수, 제거한 청정공기를 대기 중으로 방출시킨다. 이런 원리를 이용한 장치가 세정식 집진 장치 또는 흡수탑 스크러버라고 한다. 비가 온 후 대기가 깨끗해 지는 것과 같은 원리이다.

세정에 사용되는 액체는 보통 물이지만 특수한 경우에는 표면 활성제를 혼합하는 경우나 산화제를 사용하는 경우도 있다. 상황에 따라서 순환시켰던 물을 재 순환 시켜 사용하기도 한다. 흡진 기체와의 접촉 면적을 높여 포집효과를 증가시키기 위하여 분무시킨 물방울의 모양과 크기에 따라 노즐의 종류를 달리하거나 분출시키는 수압을 높여주기도 하지만, 그럴 경우 효율은 높지만 폐수처리와 공업용수의 과잉 사용과 양수 펌프의 동력비 등 경제적인 문제점이 많다. 원칙적으로 물방울과 먼지 입자와의 접촉에 따라 입자가 제거되기 때문에 흔히 확산, 관성충돌, 충전층 집진과 같이 비슷한 기초 이론이 적용된다.

(1) 스크러버 구성요소

본 실험에 적용 된 스크러버 타입인 흡수탑 스크러버의 구성요소로는 가스를 충전탑으로 유입시키는 송풍기와 흡수액을 순환시키는 역할을 하는 순환펌프, 그리고 충전탑으로 이루어진다. 충전탑에는 흡수액을 균일하게 분사하는 액체 분사시스템인 노즐이 부착된다. 충전층에 발생하는 미스트를 제거하는 구성요소로서 데미스터가 부착되며, 하단부에는 유해가스와 흡수액이 접촉하는 곳으로서 유해가스를 흡수하는 것은 흡수액 이므로 효율적인 흡수를 위하여 기,액 접촉면적을 크게 하기 위해 충전물이 장착되어진다.

(2) 흡수탑 스크러버 특성

충전탑은 적은 투자비용으로 높은 처리효율을 나타낸다. 기본적인 분류는 기액의 흐름에 따라 향류, 병류, cross flow로 나뉘어 진다. 향류에 경우 흡수액은 하단방향으로 흐르고 가스는 상방향으로 흐르면서 처리하는 방법이다. 병류방식은 흡수액과 가스의 흐름이 동일방향으로 일어나며, 압력손실도 적은 반면 처리효율 또한 낮은 편이다. cross flow 방식은 가스의 흐름은 대부분 수평이고 흡수액은 하단방향으로 분사된다. 극히 제한적인 방법이긴 하나 특수한 충전물을 사용하면서 처리효율을 상승시킬 수 있는 장치도 개발되어 사용되고 있다.

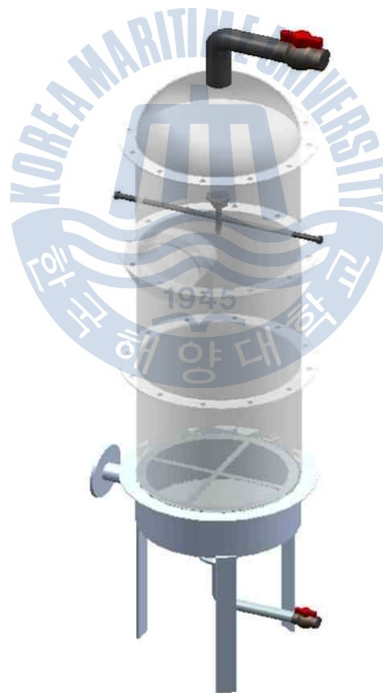


Fig.3.2.3 3D modeling Packed tower

3.3 PIV 시스템

Fig.3.3.1은 실제의 PIV 실험 장치를 보여 주고 있다. 유동가시화를 위한 조명장치로서는 4W 출력의 레이저를 이용하였으며, 영상입력장치는 고해상도를 가지는 디지털 고속도 카메라(Photoron PCI)를 사용한다. 각종 전처리 조작은 (주) 아이아이티의 전용처리 소프트웨어(CACTUS 3.3)를 이용하였다.



Fig.3.3.1 PIV equipment for Scrubber

3.3.1 PIV 개요

흐르는 유체의 속도 및 압력과 같은 유동특성을 파악하는 것은 유체공학 관련의 제반문제를 해결하기 위하여 필요 불가결한 요소이다. 전통적인 유동가시화(flow visualization)기법은 적절한 조명장치와 추적입자 그리고 이를 기록할 수 있는 카메라를 이용하여 직관적으로 이해하기 쉬운 영상을 제공할 수 있음으로서 어떠한 복잡한 유동장도 쉽게 이해 될 수 있는 장점이 있다. 그러나 정량적인 유동정보, 예를 들어, 시간에 따라 변화하는 전체유동장의 속도벡터 값과 같은 데이터의 제공이 원리적으로 불가함으로서 유체역학적인 엄밀한 해석이 어렵다. 따라서, 실용적인 측면에서도 물리적인 유동정보에 대한 계측이 필요하게 된다. 지금까지 유체계측에 있어서 속도를 얻기 위하여 열선유속계(hot-wire anemometer) 또는 LDV(Laser Doppler Velocimetry)가 사용되어 왔다.

이러한 점계측(pointwise) 속도측정기법은 신뢰성과 정도면에서 우수한 성능이 입증되었으나 시간평균의 값만을 제공하며, 트레이싱에 필요한 과도한 계측시간 등의 문제점 때문에 유동현상의 기본특성인 비정상(unsteady)의 동시다점계측(instantaneous & simultaneous)이 원리적으로 불가능하다.

이러한 배경에서 종래의 정성적인 가시화기법과 디지털 영상처리기술을 새로이 접목한 PIV(Particle Image Velocimetry)가 속도계측의 새로운 실험기법으로서 1980년대 초반부터 본격적으로 소개가 되었으며 최근에는 전산유체역학(CFD)의 장점을 능가하는 유동장의 대표적인 계측기법으로서 크게 각광을 받고 있다.

PIV의 기본원리는 다음과 같다. 즉, 유동장의 국소속도는 어느 한 점을 통과하는 미소추적입자가 미소시간동안 이동한 직선거리 및 방향을 알면

쉽게 구해진다. 즉 임의의 입자운동에 요하는 시간간격 및 벡터변위의 관계로부터 쉽게 구할 수 있다. 유동장에 유체와 동일한 비중을 갖는 추적입자(tracer particle)을 분포시키고 이들 입자의 순간분포를 미소시간차를 가진 두 영상에서 공간대응 시키는 방법(예를 들어, 상호상관기법)에 의하여 속도벡터를 동시다점으로 구할 수 있다. 따라서 원리적으로는 2차원뿐만 아니라 3차원으로도 용이하게 확장이 가능하며, 최근에는 Stereoscopic PIV, Volume 3차원PIV 등의 3차원 속도장 측정방법이 개발되어 유동해석 연구에 널리 활용되고 있다.

따라서 PIV기법은 LDV 등이 갖는 점계측의 한계를 근본적으로 해결할 수 있으며, 고성능 PC 및 고해상도 CCD카메라, 고속도카메라와 같은 영상입력장치와 신뢰성있는 데이터처리 소프트웨어의 발전에 힘입어 속도계측장비로서 독보적인 지위를 유지하고 있다.

현재에는 dynamic PIV로 알려진 시간해상도(time-resolved) PIV가 널리 이용되고 있으며, 이 경우에는 고해상도(1K x1K), 고속도카메라(500-10000 fps at full frame)가 사용되고 있다. dynamic PIV에서는 post-processing기법으로서 속도벡터 분포와 같은 기본정보뿐만 아니라 유동정보의 애니메이션까지 용이하게 제작할 수 있는 전용 소프트웨어의 지원이 필수적이다.

3.3.2 조명 및 추적입자

영상 처리를 하기 위해서는 측정하고자 하는 계측단면에 대하여 적절한 조명의 공급이 절대적으로 필요하다. 이러한 조명은 유동장에 투입된 추적입자의 표면 산란광 영상이 주위의 배경영상보다 높은 계조치(gray level)을 갖게 하여 명암대비가 뚜렷하고 잡음이 없는 영상을 획득하는데 크게 기여한다. 특히 고속 유동장에서 깨끗한 영상을 획득하기 위해서는 일반적으로 높은 출력의 광원이 필요하게 된다. 본 실험에서는 이를 위하여 최대 5W출력의 레이저를 이용하며 532nm의 녹색광을 발생시킨다. 레이저에서 발생하는 광선은 보통 지름 2mm의 원형 직진광이며 실린드릭 렌즈를 통해 두께 2mm정도의 2차원 시트라이트(sheet light)가 만들어진다. 또는 레이저로부터 나오는 직진광을 fiber optics에 연결하고 렌즈 조합세트에 구성된 헤드를 임의의 계측위치로 이동하여, 시트라이트의 폭과 퍼짐각을 쉽게 조정할 수 있는 beam delivery 시스템도 이용된다.

PIV는 유동장에 골고루 분포된 추적입자가 미소시간동안 이동한 입자 영상을 컴퓨터로 분석하여 속도벡터 데이터를 얻는 방법이므로 사용되는 입자의 선정이 계측정도에 큰 영향을 미친다. 일반적으로 추적입자는 표면에서의 산란성이 좋아야 하고 입자와 작동유체와의 밀도차가 될 수 있으면 작아서 추종성(traceability)이 우수하여야 한다. 입자의 직경은 유체의 유동에 잘 추종하기 위해서 작을수록 좋으나, 산란에 의한 입자 영상을 카메라에서 잘 취득할 수 있도록 어느 정도 이상의 크기를 가져야 한다. 보통 공기에서는 수 μm ~수십 μm 의 크기가 보통이다. 물과 같은 액체에서는 크기의 제약이 덜하여 수십 μm ~수백 μm 의 입자가 사용된다. 본 연구에서는 직경 50 ~ 60 μm 의 직경을 가지는 송화가루를 추적입자로 사용하여 본 실험을 수행 하였다.

3.3.3 영상입력 및 저장장치

본 과제에서는 영상입력장치로 1280(H)×1024(V)의 고해상도를 가지는 디지털고속도카메라(Photron PCI)를 사용한다. 일반적인 CCD카메라나 가정용 캠코더 등은 frame rate가 30장/초로 고정되어 있어 이와 같은 입력 장비로는 보통 0.5m/sec이상의 속도계측이 어렵고 유동장의 비정상(unsteady) 특성을 확보할 수 있는 연속촬영이 곤란하여 시계열적인 유동 현상 해석이 문제가 된다. 이를 해결하기 위하여 고속도카메라가 널리 이용된다. 1000fps 정도의 카메라를 사용하면 십수m/s 정도의 유동장을 연속적으로 저장할 수 있다. 다수의 연속영상을 고속촬영할 수 있으므로 dynamic PIV 적용 및 animation제작에 적합하다. 근래에는 초당 10,000frame 이상을 기록할 수 있는 고속도카메라가 있으나 부분해상도(segment frame)가 128x34pixel 정도이며 이 같은 영상은 유동장의 극히 일부분만을 계측할 수밖에 없으므로 일반적인 유동장 해석용으로는 부적합하다. 고속도카메라를 PIV용으로 사용하고자 한다면 보통, full frame (현재에는 공간해상도가 1K x 1K인 것이 주종을 이룸)에서 500fps이상이 되어야 한다. PIV에서는 입자의 칼라영상정보가 필요하지 않으므로 흑백용 고속도카메라가 권장된다. 상용 고속도카메라의 pixel당 dynamic 레인지는 8~12bit이나 8bit(256계조)로서도 충분하다.

3.3.4 동일입자 추적

PIV 해석을 위해서는 먼저 입자가 주입된 유동장을 레이저조명을 이용하여 가시화한다. 다음, 이들 개별 입자 또는 입자군의 이동이 직선적으로 이루어질 수 있는 미소시간 간격을 하드웨어(보통 고속도카메라의 fps상)에서 미리 설정하고 카메라를 이용하여 연속적으로 메모리에 기록한다. 그리고, 동일한 시간간격을 갖는 두 장의 영상을 1조로 하여 시간적인 순서로 입자의 이동변위를 소프트웨어 상에서 자동적으로 추적함으로써 속도벡터를 구한다.

최근에는 이와 같은 광학적 PIV기법은 거의 이용되지 않고 있으며, 획득된 영상의 밝기정보(계조치)를 디지털화한 후 조사면적에 대한 상관계수를 직접 컴퓨터상에서 연산함으로써 속도장을 구하는 방식이 PIV 기법의 주류를 이루고 있으며 본 실험에서도 이를 이용한다.

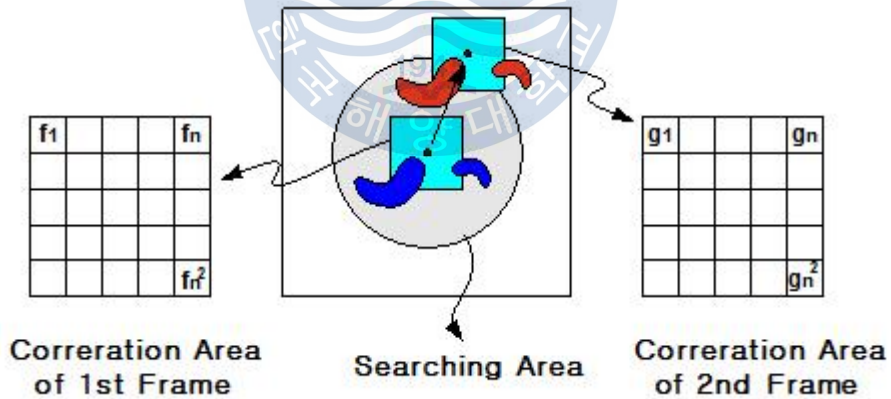


Fig.3.3.2 Diagram of cross correlation method

3.4 실험조건

노즐의 사용압력은 10bar의 조건으로 Hollow cone타입의 노즐과 full cone타입의 노즐에 대해서 출구부분의 속도측정과 전체 유동장을 계측하였다. 송풍기 가동시 스크러버 중간단의 유동현상을 확인하기 위하여 입자를 유입하여 유동장을 측정하였으며, 입자는 송화가루를 사용하였다. 이 때 노즐은 가동시키지 않는다.



Fig.3.3.2 Measureing section of scrubber

3.5 실험결과 및 고찰

3.5.1 노즐의 분무각도

PIV 계측을 이용한 노즐의 분무각도를 Fig. 3.5.1 ~ 2 와 같이 나타내었다. Hollow cone 타입의 노즐의 설계 방사각인 90도 보단 큰 94도의 방사각을 보였다. 분사압력은 10bar이며, 분당유량은 11.3 ℓ/m 이다.

Full cone 타입의 노즐은 설계 방사각이 60도 보단 큰 66도의 방사각을 보였다. 분사압력은 동일하며, 분당유량은 8.5 ℓ/m 이다. 분사압력이 10bar이상 일때 설계 방사각과 유사한 방사각을 보임을 확인하였다. 본 연구에 적용된 스크러버 모델에 적합한 노즐의 선정을 위해서는 추가적인 연구와 함께 면밀한 검토가 필요 할 것으로 판단된다.



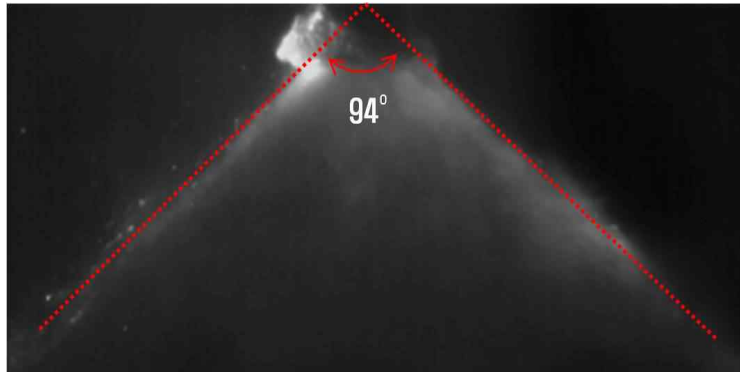


Fig.3.5.1 Angle of hollow cone nozzle (10000fps)

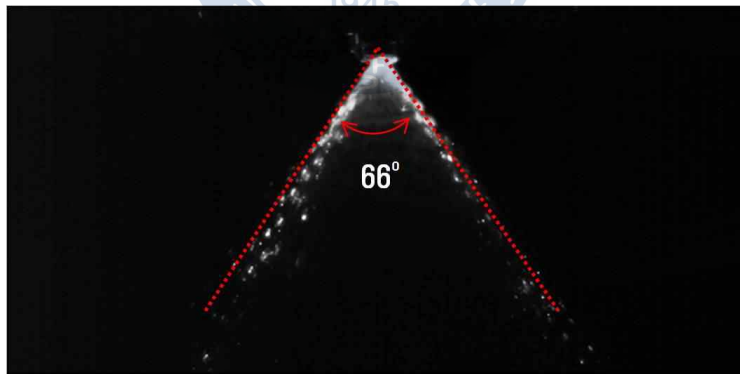


Fig.3.5.2 Angle of full cone nozzle (10000fps)

3.5.2 PIV를 이용한 유동가시화

PIV 계측을 이용한 노즐의 평균 속도 벡터를 나타내었다. Fig.3.5.3 ~ 4의 벡터장은 송풍기 가동시 속도 벡터를 나타내었다. 단일 노즐 분사시 보다 복잡한 유동현상을 확인하였다. Fig.3.5.5 ~ 6 은 노즐 단독 분사시 10000fps로 근접 촬영한 속도 벡터 이다. 출구단에서 최고 속도를 보였으며 점점 속도가 낮아짐을 확인하였다. 노즐의 특성에 맞게 대칭적인 분사형태를 보였으며, 중앙부에는 분사량이 많지 않음을 확인하였다.

Fig.3.5.7은 스크러버내에 충전물을 설치한 상태에서 송풍기 단독운전과 유동현상을 확인하기 위해 송화가루 입자를 하단 부분에서 분무하여 유동현상을 확인하였다. 스크러버 중간단의 유동현상으로 전면에 층류의 형태로 입자가 하단부에서 상단부로 유입됨을 확인하였다.



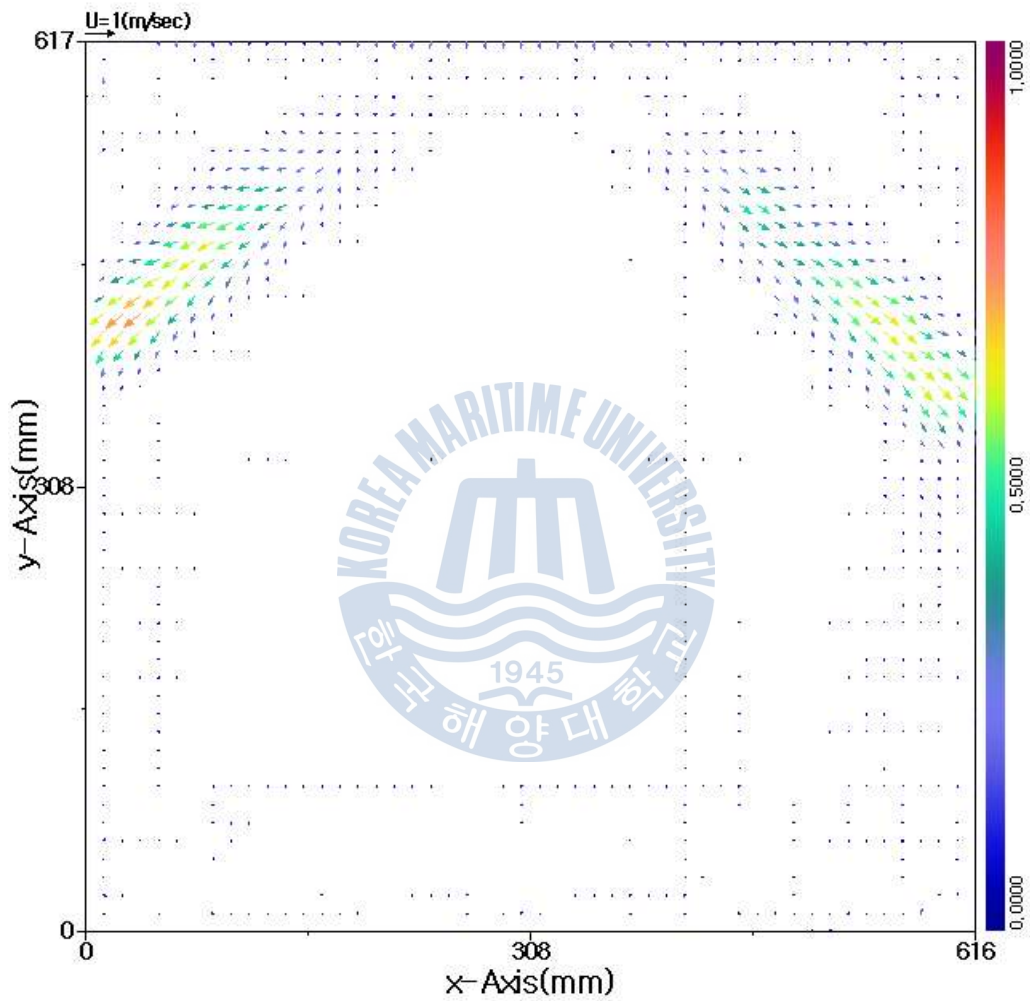


Fig.3.5.3 Average velocity vectors of hollow cone nozzle(1000fps)

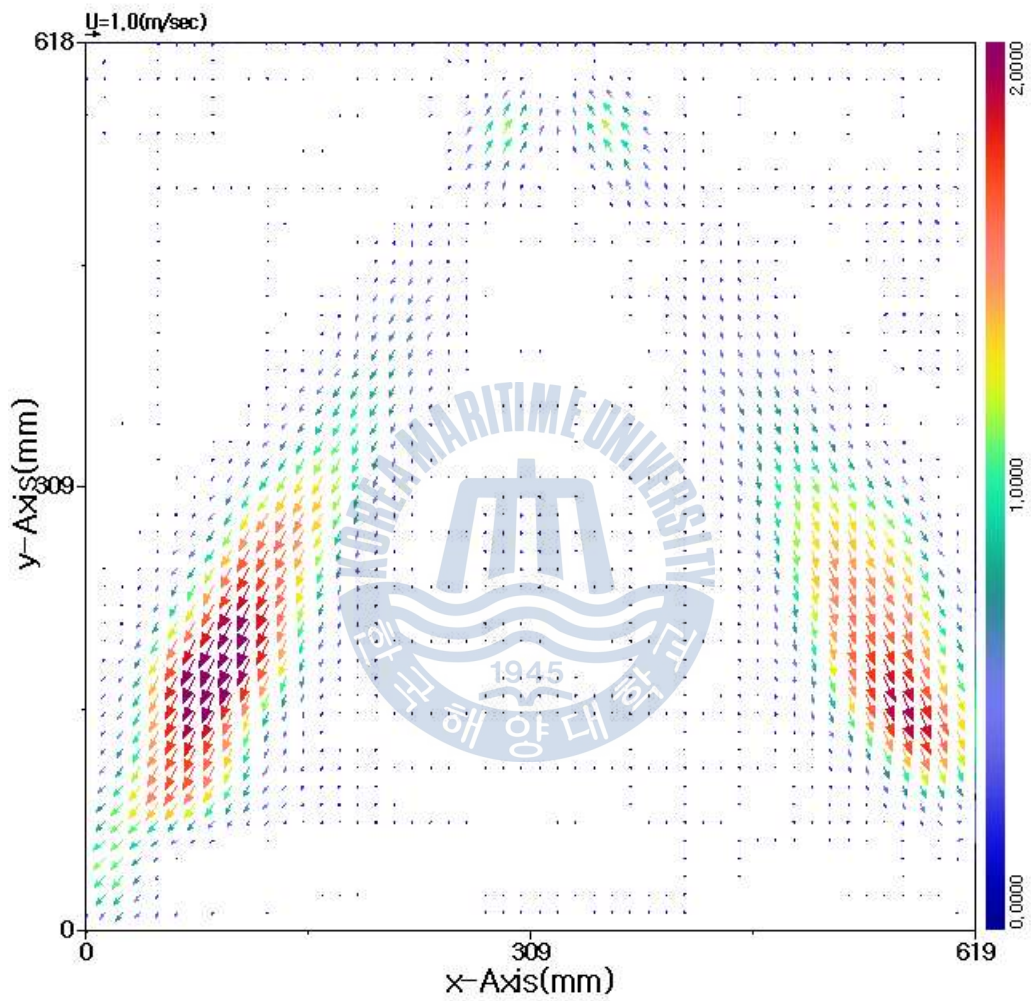


Fig.3.5.4 Average velocity vectors of full cone nozzle(1000fps)

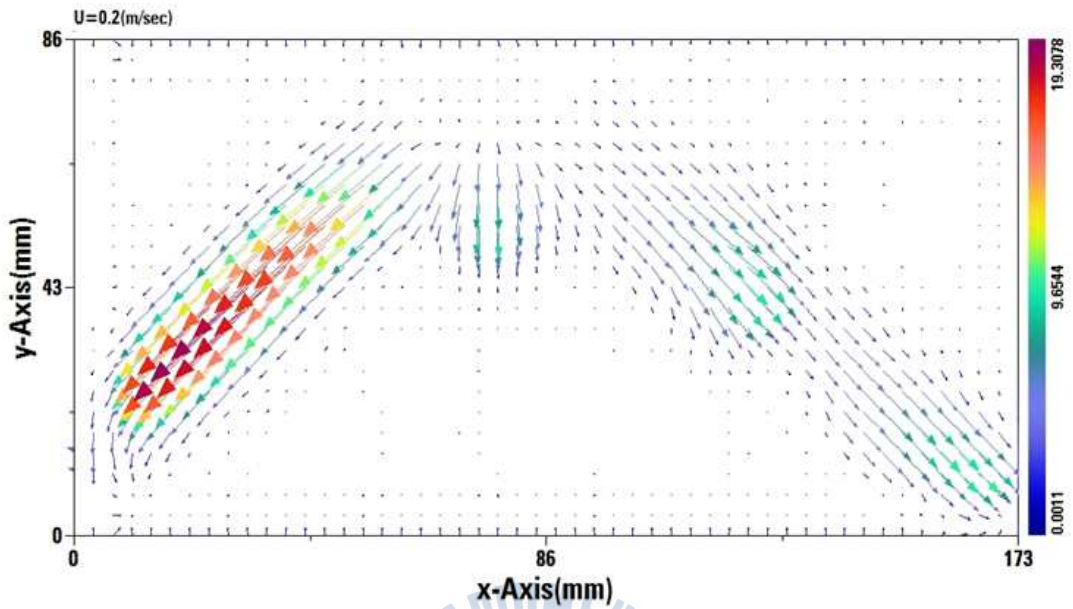


Fig.3.5.5 Average velocity vectors of hollow cone nozzle(10000fps)

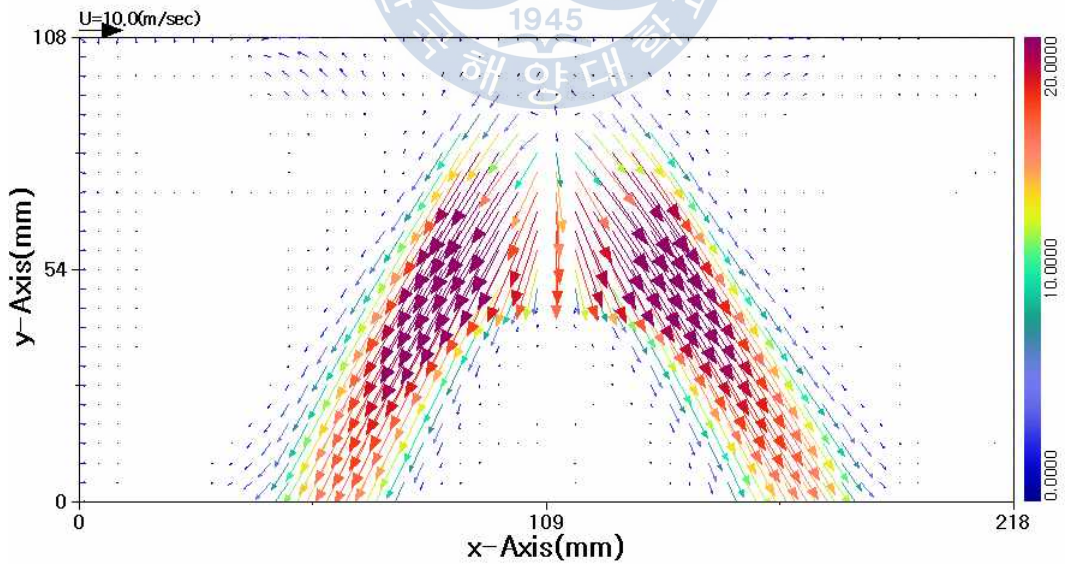


Fig.3.5.6 Average velocity vectors of full cone nozzle(10000fps)

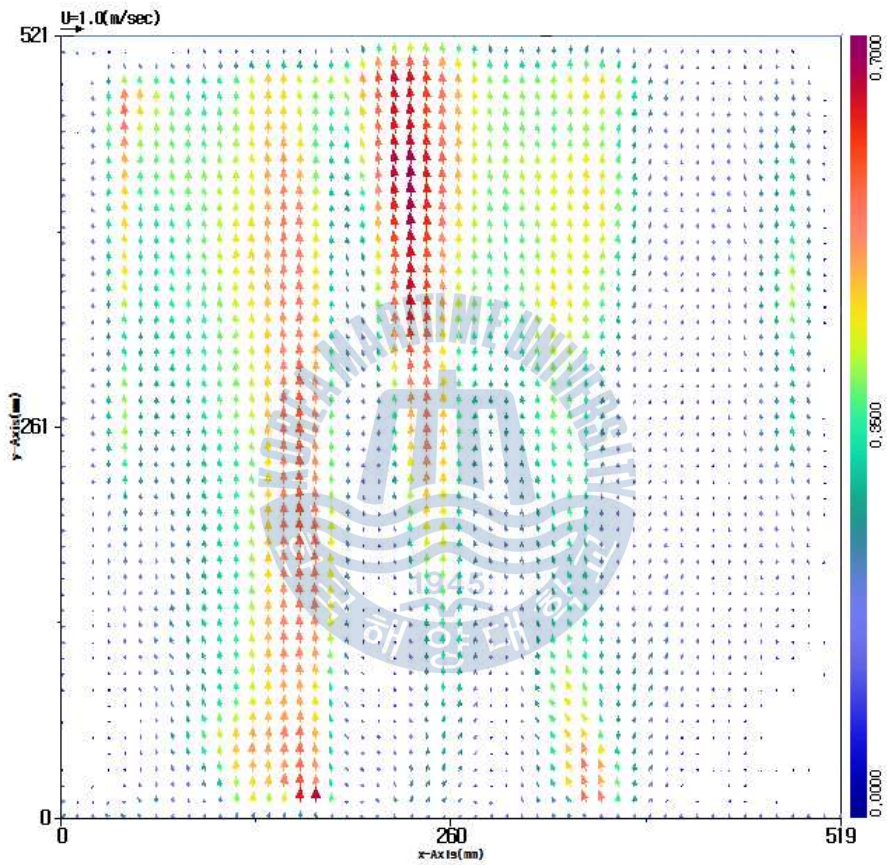


Fig.3.5.7 Average velocity vectors Only blower (2000fps)

3.5.3 PIV실험과 CFD해석의 속도 비교

PIV 계측을 이용한 노즐의 평균 속도와 CFD 해석 결과의 비교를 나타내었다. Fig.3.5.8 ~ 11 은 Hollow cone nozzle의 비교 값으로, 노즐의 방사각이 넓어 단일 측정으로 구간별 속도 비교가 가능하다. Fig.3.5.12 ~ 19 은 Full cone nozzle 의 비교 값으로, 노즐의 방사각이 좁아 상, 하단의 측정으로 구간별 속도를 비교 하였다. 비교 결과 1~2.5 m/s 의 차이를 확인하였다.

속도 비교를 통하여, 하단부 저속의 속도에서 비교값의 차이가 적음을 확인하였으며, CFD 해석기법의 타당성을 검증하였다.



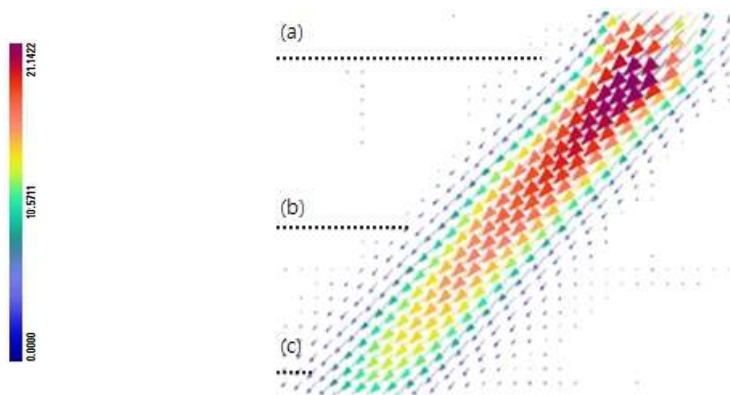


Fig.3.5.8 Velocity Distribution for hollow cone nozzle by PIV

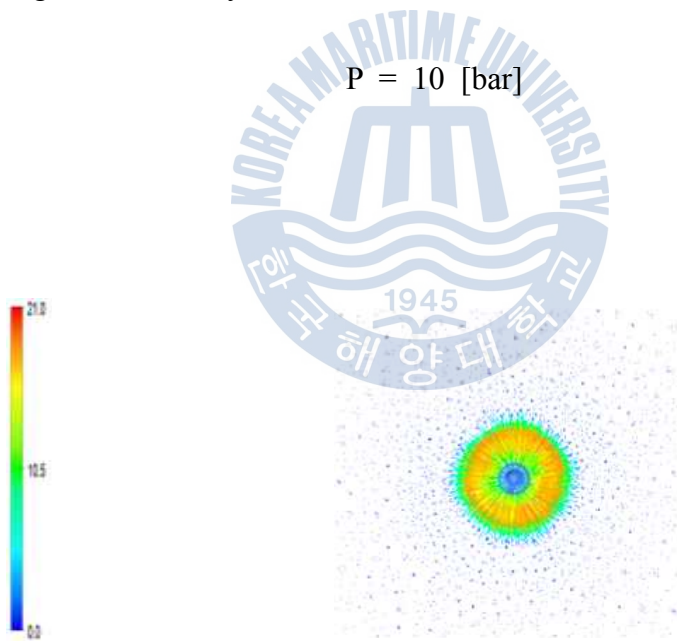


Fig.3.5.9 Velocity Distribution for hollow cone nozzle by CFD (a)

$P = 10$ [bar]

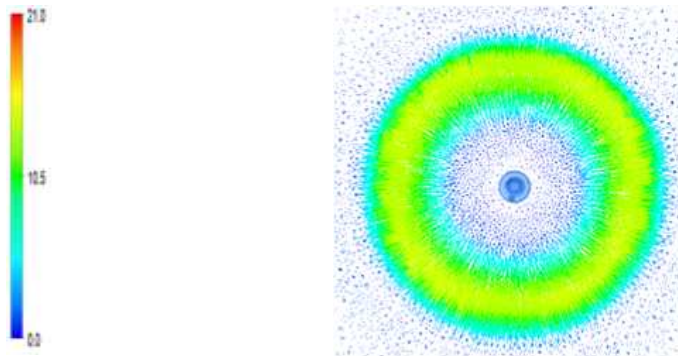


Fig.3.5.10 Velocity Distribution for hollow cone nozzle by CFD (b)

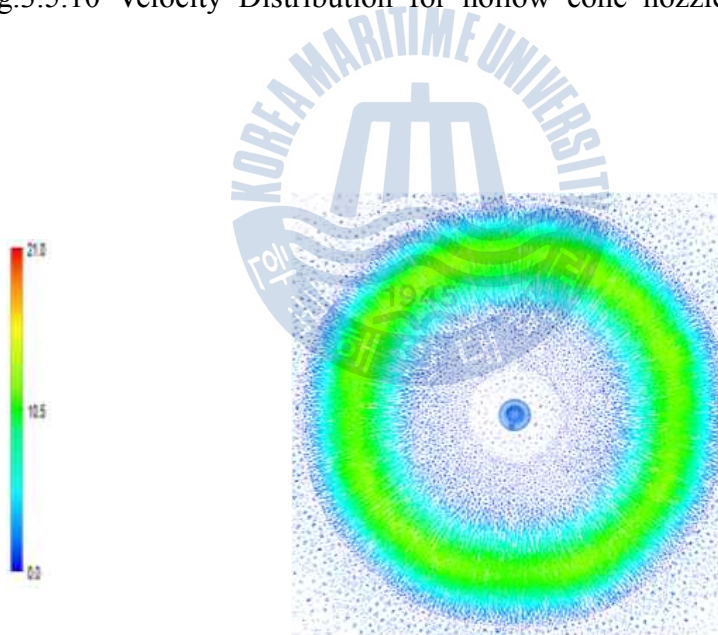


Fig.3.5.11 Velocity Distribution for hollow cone nozzle by CFD (c)

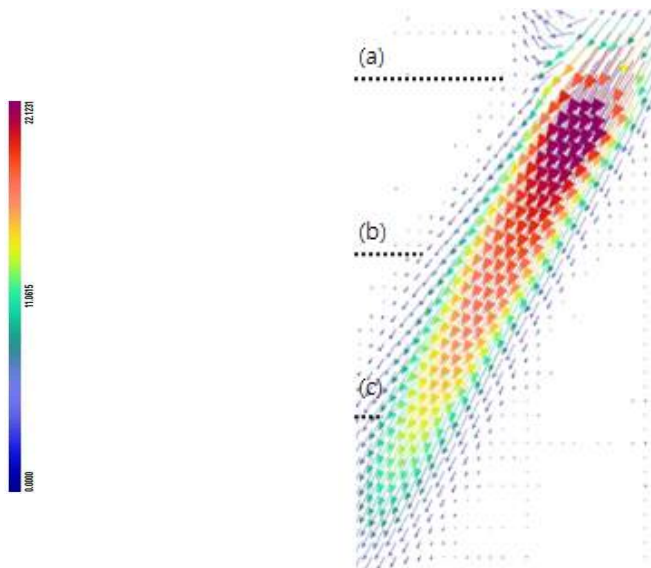


Fig.3.5.12 Velocity Distribution for full cone nozzle by PIV
(TOP) P = 10 [bar]

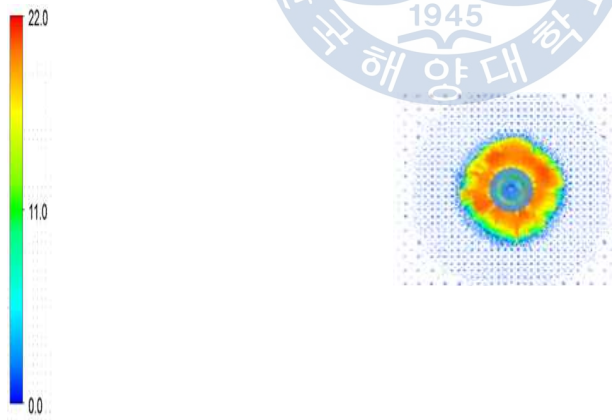


Fig.3.5.13 Velocity Distribution for full cone nozzle by CFD (a)
(TOP) P = 10 [bar]

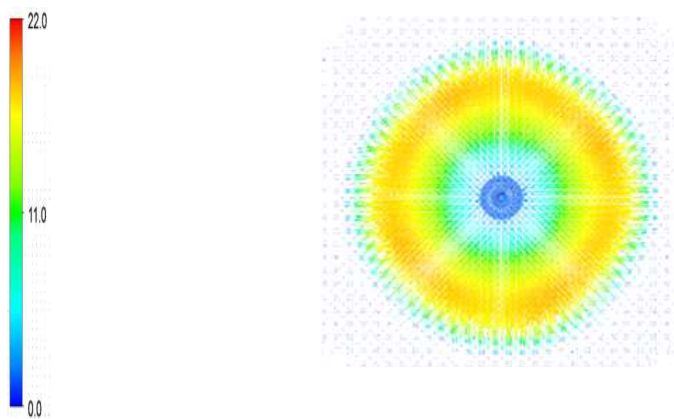


Fig.3.5.14 Velocity Distribution for full cone nozzle by CFD (b)
(TOP)

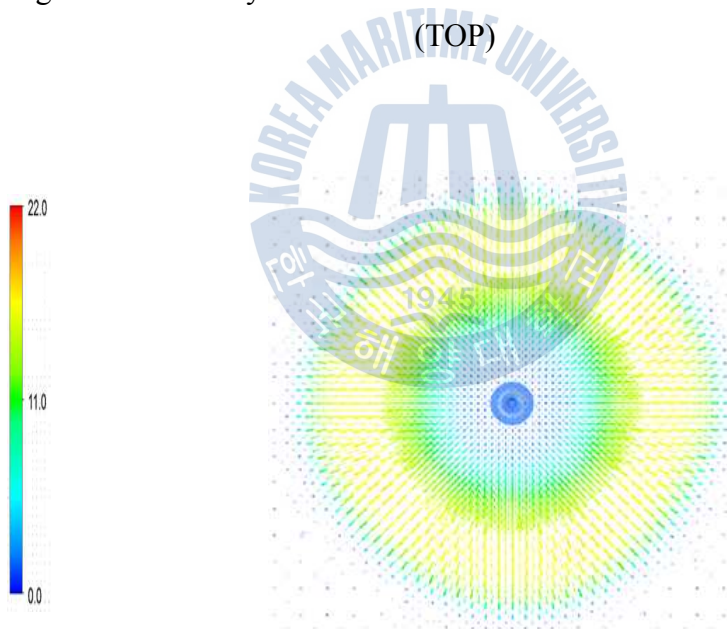


Fig.3.5.15 Velocity Distribution for full cone nozzle by CFD (c)
(TOP)

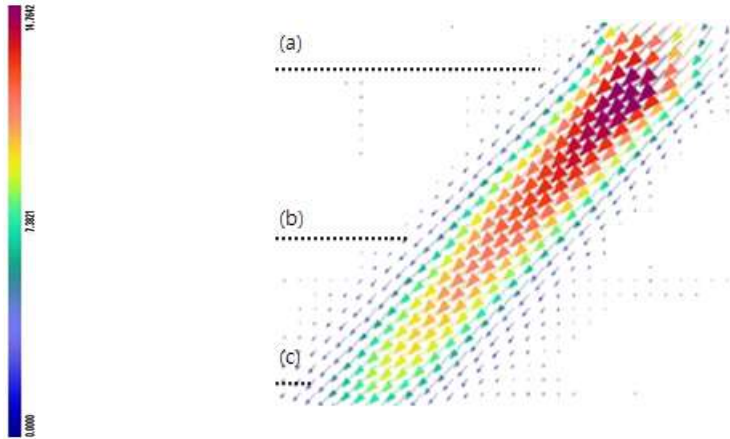


Fig.3.5.16 Velocity Distribution for full cone nozzle by PIV
(END) P = 10 [bar]

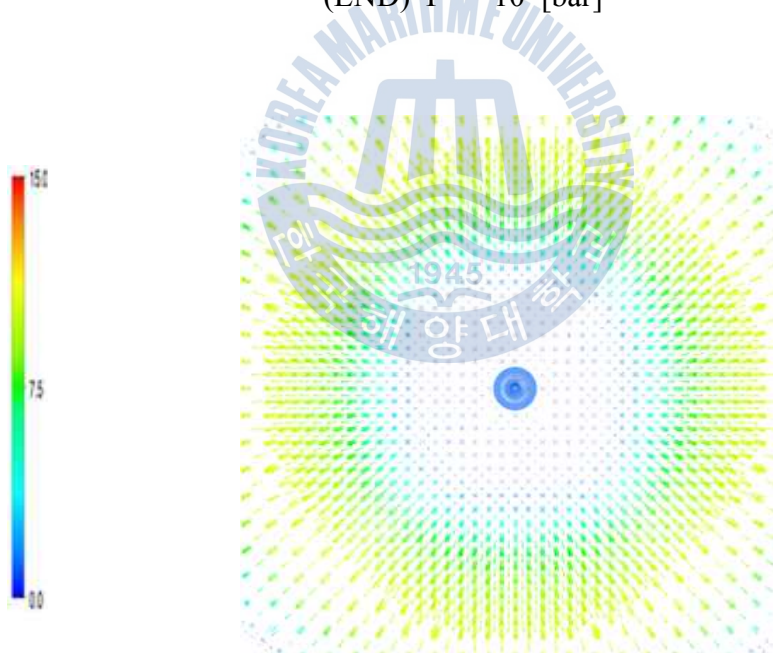


Fig.3.5.17 Velocity Distribution for full cone nozzle by CFD (a)
(END) P = 10 [bar]



Fig.3.5.18 Velocity Distribution for full cone nozzle by CFD (b)
(END)



Fig.3.5.19 Velocity Distribution for full cone nozzle by CFD (b)
(END)

제 4 장 결 론

본 연구에서는 스크러버 CFD 유동해석을 위한 설계기술 향상 및 성능 개선 연구를 위하여 우선적으로 스크러버용 노즐의 CFD 기법을 적용한 3차원 유동특성 해석 및 실험을 통한 내부유동 특성 분석의 목적으로 수행되었으며, 다음과 같이 결론을 요약정리 할 수 있다.

- 1) CFD 기법을 이용하여 스크러버용 노즐의 성능변수인 형상과 출구 직경에 따른 유동해석을 수행하여, 초기 해석기법을 정립하였다.
- 2) 실험값과 CFD해석 결과를 비교하여 해석기법의 타당성을 검토하였고, 스크러버용 노즐 및 소화노즐의 연구 및 설계에 해석기법이 적용될 수 있음을 보였다.
- 3) PIV 계측을 통하여 Hollow cone 타입의 노즐은 분무각도 94도, Full cone 타입의 노즐은 분무각도 66도를 측정하였으며, 계측값과 해석값의 구간별 속도 비교를 통하여 1~2.5 m/s 차이를 확인하였다.
- 4) PIV 계측을 통하여 스크러버 내에 충전물을 설치한 상태에서 송풍기 단독운전 시, 스크러버 중간단의 유동현상으로 전면에 층류의 형태로 입자가 하단부에서 상단부로 유입됨을 확인하였다.

참고문헌

- [1] Russel P. Fleming, "Automatic Sprinkler System Calculations", "The SEPE Handbook of fire protection Engineering", Sec.4, Ch.3, pp 4~72 NFPA, 2002
- [2] National Fire Protection Association, "NFPA 750 - Standard on Water Mist Fire Protection Systems", 2000 Edition, pp 5, NFPA, 2000
- [3] T. J. Casey, "Water and Wastewater Engineering Hydraulics" pp. 35-40, Oxford Univ Press,. 1992
- [4] Rolf H. Sabersky, 강창수, 유정렬, 조강래 공역, "유체유동", 개정3판, pp. 170-173, 범한서적주식회사, 1992
- [5] 김춘식, 이영호, 최민선, "유체역학", pp. 195-203, 효성출판사, 2001
- [6] Frank M. White, 조강래, 유정렬, 강신형 공역, "유체역학" 개정3판, pp. 391-400, 회중당, 1995
- [7] 이창효, 정희택, 최병일, 한용식, 김창, "소화노즐의 분무특성에 대한 설계 변수 영향의 수치해석적 연구", 한국액체미립화학회지, 제11권, 제4호, pp. 199-204, 2006
- [8] 양창조, "분무유동에서 입경 계측기법의 개발", 한국마린엔지니어링 학회, 제31권 제1호, pp. 67-73, 2007
- [9] 이상용, "액체의 미립화", 민음사 pp. 109-132, 1996