



공학석사 학위논문

충돌분무를 이용한 액적분포 최적화에 관한 연구

A Study on Optimization of Droplet Distribution Using Impaction Spray



한국해양대학교 대학원

기계공학과

장 범 석

본 논문을 장범석의 공학석사 학위논문으로 인준함.





한국해양대학교 대학원

목

List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	viii
1. 서 론	
1.1 연구배경	1
1.2 연구목적	3
2. 충돌면 직경 및 거리에 따른 계산적 고찰	
2.1 수학적 모델 및 계산 조건	5
2.1.1 수학적 모델	5
2.1.2 계산 조건	7
2.2 충돌면의 직경 및 충돌거리에 따른 분무 특성	10
2.2.1 무충돌 분무특성	10
2.2.2 충돌에 의한 액적분무특성	11
2.2.3 충돌에 의한 유동특성	27
2.2.4 충돌에 의한 증발연료의 분포특성	38
2.3 요약	49
3. 충돌면 직경 및 거리에 따른 실험적 고찰	
3.1 실험장치 및 실험조건	50
3.1.1 실험장치	50
3.1.2 실험조건 및 방법	55
3.2 상용노즐의 유량에 따른 분무형상	57
3.3 충돌면의 거리에 따른 충돌분무특성	59
3.3.1 충돌면의 직경 4mm	59
3.3.2 충돌면의 직경 3mm	63

		3.3	3.3	충돌	면의	직경	2mm ••••••	•••••	•••••	•••••	•••••	67
	3.4	충	돌	면의	직경	및	충돌거리에	따른	분무각도	•••••	•••••	71
	3.5	충	돌	면의	직경	및	충돌거리에	따른	액적분포.	부피 ·		74
4.	결	론	••••	•••••	•••••			•••••		•••••	•••••	76





List of Tables

Table	1	Calculation	condition	1	 9
Table	2	Input data	•••••	••••	 9
Table	3	Calculation	condition	2	 56





List of Figures

Fig.	1.1 IMO sulfur limits for years 2008 - 2020 (wt%)	2
Fig.	1.2 ECA(Emission Control Area)	4
Fig.	2.1 Calculation grids	7
Fig.	2.2 Definitions 1 ·····	8
Fig.	2.3 Scatter, vector, vapor at no pip	10
Fig.	2.4 Spray distribution in the case of 3mm distance	11
Fig.	2.5 Spray distribution in the case of 5mm distance	12
Fig.	2.6 Spray distribution in the case of 7mm distance	13
Fig.	2.7 Spray distribution at pip diameter 0.1mm according to impaction	
	distance	14
Fig.	2.8 Spray distribution at pip diameter 0.2mm according to impaction	
	distance	15
Fig.	2.9 Spray distribution at pip diameter 0.3mm according to impaction	
	distance 1945	16
Fig.	2.10 Spray distribution at pip diameter 0.4mm according to impaction	
	distance	17
Fig.	2.11 Spray distribution at pip diameter 0.5mm according to impaction	
	distance	18
Fig.	2.12 Spray distribution at pip diameter 1.0mm according to impaction	
	distance	19
Fig.	2.13 Spray distribution at pip diameter 1.5mm according to impaction	
	distance	20
Fig.	2.14 Spray distribution at pip diameter 2.0mm according to impaction	
	distance	21
Fig.	2.15 Spray distribution at pip diameter 2.5mm according to impaction	
	distance	22

Fig.	2.16 Maximum distance of droplets at distance 3mm	24
Fig.	2.17 Maximum distance of droplets at distance 5mm	26
Fig.	2.18 Maximum distance of droplets at distance 7mm	26
Fig.	2.19 Vector distribution in the case of 3mm distance	27
Fig.	2.20 Vector distribution in the case of 5mm distance	28
Fig.	2.21 Vector distribution in the case of 7mm distance	28
Fig.	2.22 Vector distribution at pip diameter 0.1mm according to impaction	
	distance	29
Fig.	2.23 Vector distribution at pip diameter 0.2mm according to impaction	
	distance	30
Fig.	2.24 Vector distribution at pip diameter 0.3mm according to impaction	
	distance	31
Fig.	2.25 Vector distribution at pip diameter 0.4mm according to impaction	
	distance	32
Fig.	2.26 Vector distribution at pip diameter 0.5mm according to impaction	
	distance	33
Fig.	2.27 Vector distribution at pip diameter 1.0mm according to impaction	
	distance	34
Fig.	2.28 Vector distribution at pip diameter 1.5mm according to impaction	
	distance	35
Fig.	2.29 Vector distribution at pip diameter 2.0mm according to impaction	
	distance	36
Fig.	2.30 Vector distribution at pip diameter 2.5mm according to impaction	
	distance	37
Fig.	2.31 Contour distribution in the case of 3mm distance	38
Fig.	2.32 Contour distribution in the case of 5mm distance	39
Fig.	2.33 Contour distribution in the case of 7mm distance	39

Fig.	2.34	Contour	distribution	at	pip	diameter	0.1mm	according	to	impact	ion
		distance	•••••	•••••	•••••	•••••	•••••	•••••	•••••	•••••	40

Fig. 2.35 Contour distribution at pip diameter 0.2mm according to impaction distance 41

- Fig. 2.36 Contour distribution at pip diameter 0.3mm according to impaction distance 42
- Fig. 2.37 Contour distribution at pip diameter 0.4mm according to impaction distance 43
- Fig. 2.38 Contour distribution at pip diameter 0.5mm according to impaction distance 44
- Fig. 2.39 Contour distribution at pip diameter 1.0mm according to impaction distance 45
- Fig. 2.40 Contour distribution at pip diameter 1.5mm according to impaction distance 46
- Fig. 2.41 Contour distribution at pip diameter 2.0mm according to impaction distance 47
- Fig. 2.42 Contour distribution at pip diameter 2.5mm according to impaction distance 48
- Fig. 3.1 Experimental apparatus 51
- Fig. 3.2 Camera
 52

 Fig. 3.3 Lens
 52

 Fig. 3.4 Pip
 53

 Fig. 3.5 Light source
 53

 Fig. 3.6 Light intensity controler
 54

 Fig. 3.7 Schematic diagram of experimental apparatus
 54

 Fig. 3.8 Definition 2
 55

 Fig. 3.9 Nozzle used in scrubber spray shape
 55
- Fig. 3.10 Commercial nozzle 58

Fig.	3.11	Spray shape according to distance 1	60
Fig.	3.12	Spray shape according to distance 2	61
Fig.	3.13	Spray shape according to distance 3	62
Fig.	3.14	Spray shape according to distance 4	64
Fig.	3.15	Spray shape according to distance 5	65
Fig.	3.16	Spray shape according to distance 6	66
Fig.	3.17	Spray shape according to distance 7	68
Fig.	3.18	Spray shape according to distance 8	69
Fig.	3.19	Spray shape according to distance 9	70
Fig.	3.20	Angle according to distance	72
Fig.	3.21	Volume according to distance	74
Fig.	3.22	Optimized spray shape	77
Fig.	3.23	Optimized spray shape according to flow rate	78

1945

Ó



A Study on Optimization of Droplet Distribution Using Impaction Spray

Jang, Beom Seok

Department of Mechanical Engineering Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

Diesel engines are the main power source for many years. Hazardous substances generated by the use of diesel engines, environmental pollution problems are emerging due to sulfur oxides (SOx), nitrogen oxides (NOx), and carbon dioxide (CO2). Sulfur oxides and nitrogen oxides cause water pollution, acid rain that causes soil pollution, photochemical smog that is harmful to the human body, and warming due to carbon dioxide. For this reason, emission regulations are being strengthened in order to reduce the substances that harm the environment.

Among them, wet scrubber is attracting attention because it can reduce sulfur oxides and its maintenance cost is comparatively low compared to other fields. Scrubbers have often been used on land. The scrubber used in the land is not limited in size, so it can reduce the emission of harmful substances by controlling the size, but the ship is different. Since pre-regulated vessels are still in use, these vessels will install scrubbers to meet regulatory requirements.



The size of wet scrubber used in ship and the flow rate of wash water is designed to match the maximum continuous output of the engine. However, the ship doesn't always operate at the maximum continuous output, but the output changes depending on the situation. When the output is reduced, the amount of harmful substances contained in the exhaust gas is decreased. When the output is increased, the amount of harmful substances is increased. Therefore, utilization of the scrubber adapted to the continuous maximum output is inefficient. In this paper, the nozzle used in scrubber is targeted so that the dust collection rate is not decreased according to the flow rate change. The optimal spray shape of the commercial nozzle at the flow rate of 100% was determined through the experiment. The optimum condition having the same spray shape even when the flow rate was low, according to the diameter and the collision distance of the impact surface I would like to present it.

The larger the diameter of the impaction surface is, the less the droplet in the depth direction becomes, and the spread in the radial direction develops and It is preferable that the droplet density region is present near the impacted surface. When the flow rate is 25%, the impaction diameter is 3 mm and impaction distance is 5 mm. The flow rate is 50, the impaction diameter is 2mm and impaction distance is 1mm. When flow rate 75%, the impaction diameter is 2 mm and the impaction distance is 5 mm.

KEY WORDS: SOx 황산화물, NOx 질소산화물, Impaction distance 충돌거리, Spray angle 분무각도



제1장 서론

1.1 연구배경

디젤 엔진은 오랜 기간 여러 분야에서 이용된 주 동력원이다. 디젤엔진의 사용 으로 발생하는 유해물질 황산화물(SOx), 질소산화물(NOx), 이산화탄소(CO₂) 등으 로 인해 환경오염 문제가 대두되고 있다. 황산화물과 질소산화물은 수질오염, 토 양오염의 원인이 되는 산성비, 인체에 해로운 광화학 스모그의 원인이 되며 이산 화탄소로 인해 온난화현상도 진행되고 있다[1][2]. 이러한 이유로 환경에 피해를 주는 물질들을 저감시키고자 배출규제가 강화되고 있다.

기존의 질소산화물 배출규제의 경우, 기존 엔진의 운전조건을 최적화시키는 방 법으로 규제를 만족시켰다.(Tier I, Tier II) 하지만 그 이후 시행된 Tier II로 인해 선박의 운전조건을 최적화시키는 것만으로는 만족시키기 어려워졌다. 이에 따라 규제 만족을 위한 다양한 연구되었다[3].

황산화물에 대한 배출규제의 경우 연료에 포함된 황 함량을 제한하는 방법이 고안되었다. 국제해사기구(International Maritime Organization)의 규제에 따 르면 Fig. 1.1에서 확인할 수 있듯이 배기가스에 포함된 황함량이 2012년까지는 4.5%, 2012년부터 3.5%로 제한되었다. 2020년부터 황함량을 0.5%로 제한한다 고 발표한바 있다. 배출가스 제한구역인(Emission Control Area)에서는 2015년 부터 0.1%로 제한되었다. 하지만 앞서 언급한 연료에 포함된 황함량을 줄이는 방법은 연료양의 증가로 인해 한계를 가진다.

그 중 습식 스크러버는 황산화물을 저감할 수 있고 유지비가 다른 장에 비해 비교적 저렴한 장점이 있어 주목받고 있다. 스크러버는 본래 육상에서 자주 사용 되어 왔다. 육지에서 사용되는 스크러버는 크기의 제약이 없어 크기를 조절하여 유해물질의 배출을 저감시킬 수 있지만 선박의 경우 얘기가 다르다. 규제 전의 선박들이 아직도 이용되고 있기 때문에 이러한 선박들이 규제를 만족하기 위해



스크러버를 설치하게 된다. 하지만 기존 선박의 배치도에 크기가 큰 스크러버를 설치하기란 매우 어렵다. 따라서 선박에 설치될 스크러버는 크기의 제약이 발생 하게 된다. 선박에서도 육지와 동일한 효과를 가지기 위해서는 스크러버의 내부 형상 변화 또는 스크러버에서 사용되는 세정수의 분무를 효과적으로 하는 것이 다.



Fig. 1.1 IMO sulfur limits for years 2008 - 2020 (wt%)

1.2 연구목적

기존 선박에 스크러버를 설치하기 위해선 막대한 비용이 발생하며 스크러버에 서 사용되는 세저수의 양이 약 10톤, 스크러버를 가동하기 위한 추가전력, 배기 가스와 반응을 하고난 세정수를 중화시키기 위한 약품처리 등 추가적인 유지비가 필요하다. 또한 선박 스크러버의 크기와 세정수의 유량 등은 엔진의 연속최대출 력에 맞춰 설계된다. 하지만 선박은 항상 연속최대출력으로 운항하지 않고 상황 에 따라 출력이 변한다. 출력이 감소하면 배기가스에 함유된 유해물질의 양은 적 어지고, 출력이 증가하면 유해물질의 양이 증가하기 때문에 연속최대출력에 맞춘 스크러버의 활용은 비효율적이다. 즉 선박은 엔진 부하의 크기에 따라 배기가스 에 포함된 유해물질의 양이 달라진다[4]. Fig. 1.2에서 확인할 수 있듯이 배출가 스제한구역(ECA)은 바다와 인접한 부근에 집중 분포하고 있으며 특히 이 구역에 서 부하의 변동이 심하여 해양을 운항 중일 때 보다 유해물질의 양이 많아질 때 가 발생한다[5]. 따라서 엔진의 출력이 감소하면 세정수의 유량을 감소시키고 엔 진의 출력이 증가하면 세정수의 유량을 높이는 방법이 더 효율적인 선박용 스크 러버의 활용이라고 생각된다. 선박에서 사용되는 스크러버의 효율을 높이는 방법 으로 스크러버의 내부구조개선 및 세정수의 분무형상을 개선하는 방법이 있다. 현재 내부구조개선에 대한 연구[6-8]는 활발히 진행 중이다.

스크러버 집진율의 척도는 세정수와 배기가스의 접촉성에 따라 나뉜다. 여기서 필요한 것이 무화이다. 무화란 액적이 미세한 액적으로 되는 것을 의미하며 이를 이용해 표면적을 높인다면 배기가스와 세정수의 화학적 반응이 활발해 진다. 이 를 내부구조개선과 더불어 집진율을 높일 수 있을 것이다. 무화를 촉진시키기는 여러 방법이 존재한다. 그 중에서도 선박엔진에 영향을 주지 않을 수 있는 충돌 분무를 이용한 연구를 진행했다. 디젤엔진 내부에서 돌출된 충돌면에 연료를 충 돌시켜 무화를 실행하였다[9]. 또한 충돌면에 각도를 주어 연소실 내벽에 축적되 지 않고 표면적을 크게 함으로써 가솔린기관의 균일혼합을 이루고자 하였다. 이 는 [10]과 같이 Weber number를 기반으로 한 충돌모델이다. 이 모델을 기반으 로 연료의 무화를 촉진시키는 연구에 도움을 주고 있다. 충돌면의 면적을 계산하



여 연소실이 큰 경우와 작은 경우에 대해 적절한 대안을 제시하였다[11]. OSKA 형 연소실에서 충돌면의 크기를 다르게 하여 분석한 내용이다[12]. 단공분사노즐 을 이용해 액적의 무화를 발생시키고 이에 따라 무화된 액적들이 공기유동강도를 높여 연료와 잘 섞이고 증발을 충분히 시켜 연소효율 또한 향상시켰다[13]. 이렇 게 스크러버 내부형상의 변화를 통해 집진율을 높이는 연구가 진행되었지만 충돌 분무를 이용한 세정수의 분포에 관한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 스크러버 내부에서 사용되는 노즐을 타겟으로 유량 변화 에 따라 집진율이 감소되지 않게 하는 것이다. 수치적 해석을 통해 최적의 분무 형상을 선정하고 실험을 통해 유량 100%에서 상용노즐의 분무형상을 파악하여 충돌면의 직경과 충돌거리에 따라 유량이 낮은 경우에도 동일한 분무형상을 가지 는 최적의 조건을 제시하고자 한다.



Fig. 1.2 ECA(Emission Control Area)

제 2 장 충돌면 직경 및 거리에 따른 계산적 고찰

2.1 수학적 모델 및 계산 조건

Collection @ kmou

2.1.1 수학적 모델

기상의 유동에 대하여 연속방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식 및 연료증발 방정식이 Eulerian형으로 주어지며, 고압축성유동에 대한 $k-\epsilon$ 모델이 적용된 다. 액상의 유동에 대하여 움직이는 궤적, 운동량, 질량, 에너지 방정식은 Lagrangian형으로 쓰여지며, 각 액적군은 크기, 온도, 속도, 등 모든 성질이 동일한 수천 개의 액적으로 이루어진다. 액상에 대한 기상의 영향은 액상의 방정식에서 전단응력의 항으로 고려되며, 기상에 대한 액상유동의 영향은 기 상의 방정식에서 생성항의 형태로 고려된다. 속도/압력쌍의 해석은 PISO 알 고리즘을 사용하여 해석된다. 일반좌표계(ξ^{l})로 변형된 기상의 전달방정식은 다음과 같이 일반 텐서표시법과 함께 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta\rho\Phi) + \frac{1}{\sqrt[2]{g}}\frac{\partial}{\partial\xi^{i}}(\theta\rho U^{i}\Phi - \frac{\theta\Gamma_{\Phi}q_{ij}}{\sqrt[2]{g}}\frac{\partial\Phi}{\partial\xi^{j}}) = \theta S_{\Phi} + S_{\Phi}^{d}$$
(1)

여기에서 U^i 는 수직유동항, u^i 는 속도벡터 V의 직교좌표성분이며, P_{ij} 는 면적 벡터의 직교좌표성분이다.

액체의 질량전달방정식(droplet mass trasfer)은 El Watkil 등[14]에 의하여 실험과 이론에 의하여 제시된 식(2)를 이용한다.

$$\frac{dm_d}{dt} = -\pi D_d D \frac{P_t}{R_f T_m} ln \frac{P_t - P_{v,\alpha}}{P_t - P_{v,s}} Sh$$
⁽²⁾

여기서 P_t 는 전체압력, D는 확산(diffusivity), R_f 는 증발연료의 기체상수, T_m 은 평균액적표면온도, $P_{v,\alpha}$, $P_{v,s}$ 는 각각 자유공간 및 액적표면에서의 증발연료 압력(partial pressure of the fuel vapour far from or at the surace of droplet) 그리고 Sh는 셔우드수를 나타낸다. 본 연구에서 사용한 충돌모델은 *W*_e넘버에 의존하며, 충돌 후 액적의 법선방향 과 수직방향의 속도 및 액적직경은 다음과 같다.

₩ <80인 경우;

$$v_{an} = -v_{bn}$$

$$v_{at} = v_{bt}$$

$$D_{da} = D_{db}$$

$$W_{e} > 80 \text{ el} \neq \text{ f};$$

$$v_{an} = -R_{xx} \left(\frac{\sigma W_{e_{a}}}{\rho D d_{a}}\right) 0.5$$

$$v_{at} = v_{bt} \pm R_{xx} v_{f}$$

$$D_{da} = \frac{D_{db}}{N^{\frac{1}{3}}}$$

$$(3)$$

여기서 하첨자 a, b, d, n, t 는 각각 충돌 후, 충돌 전, 액적의 직경, 충돌면 과 수직 및 수평방향을 나타내며, R_{xx} 는 (0, 1)사이에서 발생하는 무작위 변 수를 나타낸다.

2.1.2 계산 조건

직접 가압방식인 P 타입 노즐(이하 상용노즐)[15]을 대상으로 하였으며, 충돌 면의 반경과 노즐에서 충돌면까지의 거리를 조절하여 액적의 분무거동을 분석 하였다. Fig. 2.1은 축대칭 원통의 중심에서 반경방향으로의 계산격자를 나타 낸다. Fig. 2.1의 (a)는 노즐과 충돌면의 사이 거리가 3 mm이고 충돌면의 반 경이 0.5 mm인 경우이고, (b)는 노즐과 충돌면의 사이 거리가 7 mm이고 충 돌면의 반경이 2.5 mm이다.



Fig. 2.1 Calculation grids

Fig. 2.2는 본 논문에서 사용되는 충돌분무에 대한 용어로서 분무반경, 분무깊 이 등을 나타낸다.

Table 1은 계산조건 전체를 나타내며, 충돌반경이 0.1에서 2.5까지이며 노즐 에서 충돌면까지의 거리가 3 ~ 7 mm로 총 45가지의 계산조건을 나타낸다.



Fig. 2.2 Definitions 1



거리(mm) 반경(mm)	3	4	5	6	7
0.1	case1	case10	case19	case28	case37
0.2	case2	case11	case20	case29	case38
0.3	case3	case12	case21	case30	case39
0.4	case4	case13	case22	case31	case40
0.5	case5	case14	case23	case32	case41
1.0	case6	case15	case24	case33	case42
1.5	case7	case16	case25	case34	case43
2.0	case8	case17	case26	case35	case44
2.5	case9	case18	case27	case36	case45
Y		1945	16		

연구대상의 노즐과 분위기 조건은 Table 2와 같다. 대상노즐의 분공경과 압력 및 분사각은 각각 1 mm, 1.5 bar, 2°이며, 분위기 압력과 온도는 배기가스 조건인 300K와 1.0 bar이다.

Table 2 : Input data

Simulated variables	Values
Nozzle Diameter[mm]	1.0
Injection Pressure[bar]	1.5
Injection angle[°]	2
Trap Temperature[K]	300
Trap pressure[bar]	1.0



2.2 충돌면의 직경 및 충돌거리에 따른 분무 특성

2.2.1 무충돌 분무특성

실험적 연구에 기초한 벽면 모델을 포트란으로 해석하고 Techplot으로 읽어 내었다. 액적은 Discrete Droplet Model (DDM)으로 구성되었다. Figure 2.3 은 (a)충돌면의 반경이 0 mm(충돌면이 없는 경우)일 때 액적분포 형상, (b)는 벡터분포 형상, (c)는 증발연료의 분포를 나타낸다. 분사액적은 반경방향으로 퍼짐이 극히 제한된 가운데 아랫방향으로만 진행한다.



Fig. 2.3 Scatter, vector, vapor at no pip

2.2.2 충돌에 의한 액적분무특성

Collection @ kmou

Fig. 2.4는 노즐과 충돌면의 사이거리가 3 mm일 때의 액적분포형상을 나타 낸다. 충돌면의 반경이 1.5 mm인 경우인 (c)에서는 모든 분사 액적이 충돌면 에 충돌한 후에 반경방향으로만 퍼져나간다. 충돌면의 반경이 0.2 mm인 (b) 의 경우는 분사액적의 일부는 충돌면에 충돌한 후에 반경 방향으로 진행하고 일부는 충돌 없이 아래로 내려오는데 이들이 상호작용하여 반경 방향과 깊이 방향으로 액적이 넓게 분포된다.



Fig. 2.4 Spray distribution in the case of 3mm distance

Fig. 2.5에서 (a)의 경우 충돌면의 반경이 0.2 mm일 때를 나타내며 노즐과 충돌면의 사이거리가 3 mm일 때 보다 깊이 방향으로 액적이 조금 더 발달 하였다. Fig. 2.5에서 충돌면의 반경이 증가함에 따라 액적들의 깊이방향 거리 가 감소하고 있으며, Fig. 2.5의 (c)가 되어서는 충돌면에 충돌한 후 액적들이 완전히 반경방향으로만 퍼져나가고 있다.



Fig. 2.5 Spray distribution in the case of 5mm distance

Fig. 2.6은 노즐과 충돌면의 사이거리가 7 mm일 때 액적분포형상을 나타낸 다. 충돌면의 반경이 0.2, 0.5 mm일 경우 Fig. 2.5 Fig. 2.6에서 비슷한 액적 분포 형상을 띄고 있지만, Fig. 2.5 Fig. 2.6의 (c)는 노즐과 충돌면 사이의 거리가 5 mm에서 7 mm로 증가한 액적분포 형상을 나타내고 있으며, 5 mm 일 때 반경방향으로만 퍼져나가던 액적들이 거리가 증가함으로써 액적들이 깊 이방향으로도 분포되고 있다. 액적분포의 균일성을 살펴보면, 노즐과 충돌면의 거리가 짧은 3 mm인 경우 충돌후의 액적이 균일하게 분포된다. 충돌면의 거 리가 증가하면 액적밀집영역이 형성되면서 불균일한 액적분포를 나타낸다.



Fig. 2.6 Spray distribution in the case of 7mm distance

Fig. 2.7에서 Fig. 2.15는 액적분포에 관한 해석 결과를 충돌거리에 따라 나 타내었다.



Fig. 2.7 Spray distribution at pip diameter 0.1mm according to impaction distance



Fig. 2.8 Spray distribution at pip diameter 0.2mm according to impaction distance



Fig. 2.9 Spray distribution at pip diameter 0.3mm according to impaction distance



Fig. 2.10 Spray distribution at pip diameter 0.4mm according to impaction distance



Fig. 2.11 Spray distribution at pip diameter 0.5mm according to impaction distance



Fig. 2.12 Spray distribution at pip diameter 1.0mm according to impaction distance



Fig. 2.13 Spray distribution at pip diameter 1.5mm according to impaction distance



Fig. 2.14 Spray distribution at pip diameter 2.0mm according to impaction distance



Fig. 2.15 Spray distribution at pip diameter 2.5mm according to impaction distance

Fig. 2.7에서 Fig. 2.15까지 다음과 같이 종합할 수 있다.

Fig. 2.12인 충돌면의 직경이 1 mm를 기준으로 나눌 수 있으며 충돌면의 직 경이 1 mm 이하인 경우에는 액적들이 반경방향과 직경방향으로 적절하게 분 포되었지만 충돌면의 직경이 1 mm 이상인 경우에는 반경방향으로 퍼짐이 많 았으며 깊이방향으로는 퍼짐이 적었다. 하지만 Fig. 2.13에서 (e)를 보면 충돌 면의 직경이 큰 경우에도 충돌거리가 크다면 반경방향과 깊이방향으로 적절한 퍼짐이 발생하였다.





Fig.2.16은 충돌면의 거리가 노즐에서 3 mm인 경우에 충돌면의 반경이 0.1 mm인 경우부터 2.5 mm인 경우까지의 반경방향과 깊이방향의 최대 액적 진 행거리를 나타낸다. 충돌면의 반경이 0 mm(충돌면이 없는 경우)인 경우 깊이 방향 진행거리가 50 mm이며, 반경방향 진행거리가 10 mm로 대부분 깊이방 향으로 분포된다. 충돌면 반경이 0.1 mm에서 깊이방향 진행거리는 40 mm로 줄어들고 반경방향 진행거리는 20 mm로 증가된다. 충돌면 반경이 0.2 mm가 되면 깊이방향 진행거리는 40 mm로 유지되면서 반경방향 진행거리는 28 mm로 크게 증가된다. 충돌반경이 더욱 증가하게 되면 깊이 방향의 진행거리 가 크게 줄어들고 반경방향의 진행거리도 줄어드는 경향을 나타낸다. 충돌면 이 적당히 마련되면 깊이방향과 반경방향의 액적이 교차하면서 유동의 활성화 와 함께 액적분산이 크게 증가하는 특성을 나타낸다. 충돌거리 3 mm일 때는 충돌반경 0.2 mm가 최적인 것으로 판단된다.



Fig. 2.16 Maximum distance of droplets at distance 3mm
Fig. 2.17은 충돌면의 거리가 노즐에서 5 mm일 경우이며, Fig. 2.18은 충돌 면의 거리가 7 mm일 경우를 나타낸다. Fig. 2.17, 18에서 충돌면의 반경이 0 mm인 경우부터 2.5 mm인 경우까지의 반경방향과 깊이방향의 최대 액적 진행거리를 나타내고 있으며, 충돌면의 반경이 0 mm에서 1.0 mm까지는 반 경방향으로의 액적분포가 20 mm이상, 깊이방향으로의 액적분포가 25 mm이 상으로 충돌면의 반경이 1.5 mm에서 2.5 mm일 경우보다 비교적 양호하다. Fig. 2.17에서 충돌면의 반경 1.5, 2.0, 2.5 mm일 때 반경방향으로 액적분포 는 잘 발달되었지만 깊이방향으로의 액적분포는 미비한 수준이다. 충돌면의 반경이 1.0, 1.5 mm일 때 거리가 증가함으로써 깊이방향으로의 액적분포가 증가하였다. 노즐에서 충돌면의 사이거리가 5 mm일 때 액적최대발달위치를 보면 충돌면의 반경이 0.4 mm가 반경방향과 깊이방향으로 많이 발달 된 것 으로 보아 가장 적절하다는 것을 알 수 있고, 충돌면에서 노즐 사이의 거리가 7 mm일 때는 충돌면의 반경이 0.5 mm가 가장 발달되었다.







Fig. 2.18 Maximum distance of droplets at distance 7mm

2.2.3 충돌에 의한 유동특성

Collection @ kmou

Fig. 2.19는 노즐과 충돌면의 사이거리가 3 mm일 때 기체의 속도벡터 분포 형상을 나타낸다. 충돌면의 반경이 0.2 mm인 (a)의 경우 충돌면이 없는 경우 와 비교할 때 반경방향으로 유동이 증가하였다. 충돌면의 반경이 0.5 mm인 (b)에서 유동이 더욱 반경방향으로 증가되었으며 충돌면의 반경이 1.5 mm인 (c)에서는 아랫방향으로의 유동은 거의 없으며 반경방향으로 강한 유동이 발 생함을 알 수 있다. Fig. 2.20과 Fig. 2.21은 노즐과 충돌면의 사이거리가 5 mm, 7 mm인 경우이며 상기에 설명한 Fig. 2.19와 유사하게 반경의 증가와 함께 유동이 반경방향으로 증가되는 경향을 나타낸다.



Fig. 2.19 Vector distribution in the case of 3mm distance



Fig. 2.21 Vector distribution in the case of 7mm distance

Fig. 2.22에서 Fig. 2.30은 액적의 속도 성분에 관한 해석 결과를 충돌거리에 따라 나타내었다.



Fig. 2.22 Vector distribution at pip diameter 0.1mm according to impaction distance

- 29 -



Fig. 2.23 Vector distribution at pip diameter 0.2mm according to impaction distance



Fig. 2.24 Vector distribution at pip diameter 0.3mm according to impaction distance



Fig. 2.25 Vector distribution at pip diameter 0.4mm according to impaction distance



Fig. 2.26 Vector distribution at pip diameter 0.5mm according to impaction distance



Fig. 2.27 Vector distribution at pip diameter 1.0mm according to impaction distance



Fig. 2.28 Vector distribution at pip diameter 1.5mm according to impaction distance



Fig. 2.29 Vector distribution at pip diameter 2.0mm according to impaction distance



Fig. 2.30 Vector distribution at pip diameter 2.5mm according to impaction distance

2.2.4 충돌에 의한 증발연료의 분포특성

Fig. 2.31, Fig. 2.32, Fig. 2.33에서 증발연료의 질량분율 값(FVMF : Fuel Volume Mass Fraction)은 1E-06에서 0.003까지 50단계로 나타내었으며 Fig. 2.31은 노즐에서 충돌면의 사이거리가 3 mm일 때 충돌면의 반경 증가에 따른 분포를 나타내었다. Fig. 2.31에서 충돌면의 반경이 0.2 mm인 (a)의 경우 연료분포가 반경방향으로는 깊이방향으로 갈수록 넓어지고 있으며, 깊이 방향으로도 깊이 분포한다. 충돌면의 반경이 0.5 mm인 (b)의 경우 0.2 mm 보다 깊이방향의 길이는 비슷한지만 충돌한 후 비교적 빠르게 반경방향의 분 포가 발달하였다. 충돌면의 반경이 1.5 mm인 (c)에서는 깊이방향으로 많이 발달되지 못하고 반경방향으로 발달하였다. Fig. 2.32, Fig. 2.33은 노즐에서 충돌면의 사이거리가 5 mm, 7 mm일 때 연료 분포 형상을 나타낸다. 충돌면 의 반경이 0.5 mm에서 충돌면의 거리가 짧은 3 mm이고 반경이 0.2 mm인 경우와 유사한 형태를 나타낸다.



Fig. 2.31 Contour distribution in the case of 3mm distance



Fig. 2.33 Contour distribution in the case of 7mm distance

Fig. 2.35에서 Fig. 2.43은 증발연료에 관한 해석 결과를 충돌거리에 따라 나 타내었다.



Fig. 2.34 Contour distribution at pip diameter 0.1mm according to impaction distance





Fig. 2.35 Contour distribution at pip diameter 0.2mm according to impaction distance



Fig. 2.36 Contour distribution at pip diameter 0.3mm according to impaction distance



Fig. 2.37 Contour distribution at pip diameter 0.4mm according to impaction distance



Fig. 2.38 Contour distribution at pip diameter 0.5mm according to impaction distance





Fig. 2.39 Contour distribution at pip diameter 1.0mm according to impaction distance



Fig. 2.40 Contour distribution at pip diameter 1.5mm according to impaction distance



Fig. 2.41 Contour distribution at pip diameter 2.0mm according to impaction distance





Fig. 2.42 Contour distribution at pip diameter 2.5mm according to impaction distance

2.3 요약

충돌면의 크기와 위치변화가 액적분포에 미치는 영향을 분석한 본 논문을 요 약하면 다음과 같다.

- 충돌면이 없는 경우 분사된 액적은 반경방향으로 퍼지지 못하고 깊이 방향 으로만 진행된다.

- 액적의 분포를 위해선 반경방향과 깊이방향으로의 적절한 발달이 요구된 다.

- 충돌면의 크기가 증가하면 액적분포 방향이 반경방향으로 이동한다.

- 충돌거리가 증가하면 반경방향으로의 액적분포는 감소하고 깊이방향으로는 증가한다.

- 액적분포의 균일성을 살펴보면, 노즐과 충돌면의 거리가 짧은 3 mm인 경 우 충돌 후의 액적이 균일하게 분포되지만, 충돌면의 거리가 증가하면 액적밀 집영역이 형성 되면서 불균일한 액적분포를 나타낸다.

이상의 결과를 종합하면 적절한 분무형태는 꽉찬 원뿔형태이며 넓은 영역에 균일한 액적분포를 나타내는 충돌면의 거리가 3 mm이며 반경이 0.2 mm인 경우가 최적인 것으로 판단된다.



제 3 장 충돌면 직경 및 거리에 따른 실험적 고찰

3.1 실험장치 및 실험조건

3.1.1 실험장치

촬영은 상온 및 대기압 상태이며 물은 Pump로 노즐까지 직경 10 mm의 관 을 통해 0.8 MPa의 압력으로 노즐에 공급된다. Figure유량은 Flow Controler를 통해 조절된다. Fig. 3.1은 실험장치로 충돌면을 고정부에 고정 시키고 실험장치 상단에서 물이 분사된다. Fig. 3.2는 카메라이고 Vision research사의 v310를 사용하였다. Fig. 3.3은 카메라 렌즈로 Nikon 사의 렌 즈를 사용하였다. Fig. 3.4는 Fig. 3.1에 설치되는 충돌면으로 충돌면의 직경 이 좌측에서부터 2, 3, 4 mm이다. Fig. 3.5와 Fig. 3.6은 고속촬영이 가능하 도록 도와주는 광원, 광원의 세기를 조절해주는 장치이다. Fig. 3.7은 실험장 치 전체의 개략도를 나타낸 것이다. 지면에서 카메라 렌즈까지의 높이는 94 cm이고 고속카메라에서 노즐까지의 거리는 240 cm로 촬영하였다.







Fig. 3.1 Experimental apparatus





Fig. 3.2 Camera



Fig. 3.3 Lens





Fig. 3.5 Light source





Fig. 3.6 Light intensity controler



Fig. 3.7 Schematic diagram of experimental apparatus



3.1.2 실험조건 및 방법

Fig. 3.8은 노즐의 위치, 노즐과 충돌면사이의 충돌거리, 충돌면의 직경을 나 타내었다. 가장 상단에는 분사공이 2 mm인 노즐이 위치해 있다. Distance는 노즐에서 충돌면까지의 거리를 나타내고 Pip diameter는 충돌면의 직경을 나 타낸다. Fig. 3.9의 분무직경은 노즐상단에서 Y축으로 6.3 mm후의 X축 방향 의 거리로 정의, Spray angle은 삼각함수로 계산한 값으로 정의한다. 본 실 험에서 유량은 100%인 1000 mL를 기준으로 75%(750 mL), 50%(500 mL), 25%(250 mL)이다. Table 1은 충돌거리와 충돌면의 직경에 따라 25%, 50%, 75%일 때를 수행하였다.



Fig. 3.8 Definition 2



Fig. 3.9 Nozzle used in scrubber spray shape



반경(mm) 거리(mm)	2	3	4
5	case1	case5	case9
10	case2	case6	case10
15	case3	case7	case11
20	case4	case8	case12

Table 3: Calculation condition 2





3.2 상용노즐의 유량에 따른 분무형상

Fig. 3.10은 스크러버에서 사용되는 상용노즐의 분무형상을 나타낸다. Fig. 3.10의 (a)는 유량 100%, (b)는 75%, (c)는 50%, (d)는 25%이다. 유량이 감 소할수록 분무직경 및 분무각도가 감소함을 보였으며 유량이 100%일 때 분무 직경은 6.3 cm, 분사공에서 기준점까지의 거리를 높이(=2.5 cm)라고 하면 분 무각도는 51.54°로 계산되었다. 따라서 스크러버 속에서 유량을 낮추어도 높 은 효율을 가지기 위해서는 (a)의 분무각도 약 50 ~ 55°와 분무형상을 유지하 여야 한다. 따라서 유량이 낮을 경우에 충돌거리 및 충돌면의 직경을 달리하 여 효율을 유지하고자 한다.







(d) 25%

Fig. 3.10 Commercial nozzle



3.3 충돌면의 거리에 따른 충돌분무특성

3.3.1 충돌면의 직경 4 mm

Fig. 3.11은 유량 75%에서 충돌면의 직경이 4 mm일 때, Fig. 3.12는 유량 50%, Fig. 3.13은 유량 25%에서 (a)는 충돌거리가 1 mm, (b)는 5 mm, (c) 는 10 mm일, (d)는 15 mm, (e)는 20mm일 때를 나타낸다. 유량 75%인 Fig. 3.11에서는 충돌거리에 관계없이 대부분이 가로방향으로만 액적이 발달 하였고 깊이 방향으로의 퍼짐은 매우 미비하였다. 유량 50%인 Fig. 3.12에서 는 유량 75%에서 비슷하게 가로방향으로만 액적이 발달 되었고 깊이방향으로 는 미비하였다. 유량이 가장 낮은 25%인 Fig. 3.13에서 가로방향으로의 발달 이 감소하였고 깊이방향으로의 발달에 시작되었다.

유량 50%를 기준으로 유량이 높을 때 충돌면의 직경이 큰 것은 액적이 가로 방향으로만 발달되기 때문에 충돌면의 직경이 작은 것이 좋다고 판단되며 앞 서 이상적인 분무형상과는 일치하지 않았다. 유량이 낮은 유량 25%에서는 충 돌면의 직경이 큰 것을 이용해야 비교적 이상적인 분무에 근접해 지고 있는 것을 알 수 있다.

1945





(a) Distance 1 mm





(e) Distance 20 mm

Fig. 3.11 Spray shape according to distance 1




(e) Distance 20 mm

Fig. 3.12 Spray shape according to distance 2



(a) Distance 1 mm



(b) Distance 5 mm



(d) Distance 15 mm



(d) Distance 20 mm

Fig. 3.13 Spray shape according to distance 3

3.3.2 충돌면의 직경 3mm

Fig. 3.14는 유량 75%에서 충돌면의 직경이 4 mm일 때, Fig. 3.15는 유량 50%, Fig. 3.16은 유량 25%에서 (a)는 충돌거리가 1 mm, (b)는 5 mm, (c) 는 10 mm일, (d)는 15 mm, (e)는 20mm일 때를 나타낸다. Fig. 3.14에서 (a)는 완전하게 가로방향으로 진행만 되었으며 세로방향으로의 퍼짐은 매우 미비하다. 하지만 Fig. 3.14의 (b) ~ (e)에서 충돌거리가 증가함에 따라 비교 적 깊이방향으로 퍼짐이 발생하였다. Fig. 3.15에서 (a)는 액적들이 깊이방향 으로 발달하는 것이 아니라 대부분이 가로방향으로 발달하고 있다. (b), (c)에 서 볼 수 있듯이 충돌거리가 증가하면서 가로방향의 액적들이 깊이방향으로 발달되고 있는 것을 확인할 수 있다. (d)와 (e)를 보면 충돌 후에 충돌면 근처 에 막이 생긴 것을 확인할 수 있다. 막이 형성되면 막 아래로는 액적이 분포 하지 않았다. 따라서 막이 생성되는 것은 좋은 분무라고 할 수 없다. Fig. 3.16은 Fig. 3.15보다 비교적 깊이방향으로 분무형상이 발달 되고 가로방향으 로 액적의 진행은 감소되었다. Fig. 3.16의 (a)에서는 미세액적들이 가로방향 과 깊이방향으로 적절하게 퍼지는 것을 확인할 수 있지만 (b),(c),(d),(e)에서는 비교적 충돌면 근처에서 수막이 형성되며 분무가 진행 중이다. 충돌면의 직경 이 클 경우에는 충돌거리를 증가시켜 액적들이 대부분이 깊이방향으로 퍼질 수 있도록 하는 것이 이상적이라고 생각된다.





(e) Distance 20 mm

Fig. 3.14 Spray shape according to distance 4





(e) Distance 20 mm

Fig. 3.15 Spray shape according to distance 5





(e) Distance 20 mm

Fig. 3.16 Spray shape according to distance 6



3.3.3 충돌면의 직경 2mm

Fig. 3.17은 유량 75%에서 충돌면의 직경이 4 mm일 때, Fig. 3.18은 유량 50%, Fig. 3.19는 유량 25%에서 (a)는 충돌거리가 1 mm, (b)는 5 mm, (c) 는 10 mm일, (d)는 15 mm, (e)는 20mm일 때를 나타낸다. 유량 75%인 Fig. 3.17에서 충돌거리가 10 mm인 (c)에서 유량 50%에서와 마찬가지로 그 이상의 충돌거리인 15 mm, 20mm에서는 분무형상이 나빠졌다. 유량에 관계 없이 충돌거리가 1 mm인 경우가 가장 높은 분무직경을 보여주었지만 충돌거리가 1 mm에서 수막이 형성된 것이 관찰되었다. 유량 50%인 Fig. 3.18에서 (a), (b), (c), (d), (e)는 모든 경우에 있어서 액적들이 원뿔모양을 형성하면서 퍼지고 있음이 확인되었다. 유량 25%에서 충돌면의 직경이 2 mm인 경우에 막이 형성되어 분무가 형성되는데 이 안은 빈 공간으로 관찰되었다. 따라서 수막이 형성되지 않은 충돌면의 직경 2 mm 충돌 거리가 5mm가 가장 합리 적이다. Fig. 3.19에서 (a)는 충돌 후 다시 모이는 현상을 관찰할 수 있는데 이는 충돌거리가 너무 짧고 유량이 너무 낮아 발생하는 현상으로 표면장력의 영향이라고 생각된다.





(e) Distance 20 mm

Fig. 3.17 Spray shape according to distance 7





(e) Distance 20 mm

Fig. 3.18 Spray shape according to distance 8



(a) Distnace 1 mm



(b) Distance 5 mm



(c) Distance 10 mm



(d) Distance 15 mm



(e) Distance 20 mm

Fig. 3.19 Spray shape according to distance 9



3.4 충돌면의 직경 및 충돌거리에 따른 분무각도

상용노즐에서 유량 100%일 때 분무직경은 약 6 cm, 분무각도는 51.54°로 측 정 되었다. 이는 삼각함수를 이용하여 분무직경에 따른 분무각도를 계산한 값 이다. 이를 계산 하여 그래프로 나타낸 것이 Fig. 3.20은 충돌거리에 따른 분 무각도이다. (a)는 유량 25%, (b)는 유량 50%, (c)는 유량 75%일 때를 나타 낸다. (a), (b), (c)에서 검은색은 상용노즐에서 유량 100%일 때 분무각도를 나타낸다. 유량이 25%인 (a)에서 충돌면의 직경이 2 mm인 경우에 각도는 5 mm일 때 가장 높은 각도를 보였지만 전체적으로 상용 노즐보다 분무각도가 부족함을 보여준다. 충돌면의 직경이 3 mm인 경우는 충돌거리가 증가함에 따라 분무각도 값은 감소하였다. 충돌거리가 5, 10 mm에서 상용노즐과 비슷 한 분무각도를 보여주었다. 그 이상의 충돌거리에서는 상용노즐보다 부족한 분무각도를 보여준다. 충돌면의 직경이 4 mm에서는 충돌거리가 증가함에 따 라 분무각도 값은 감소량이 미비하였으며 모든 충돌거리에서 상용노즐보다 우 수한 각도를 보여주었다. 하지만 이는 직경방향으로만 퍼져 큰 분무각도를 나 타내었기 때문에 액적분포면적에 있어서 부적합함을 보여준다. 유량이 50%, 75%인 (b),(c)에서 충돌면의 직경이 3, 4 mm일 때 모든 충돌거리에 있어서 상용노즐의 분무각도 보다 높은 값을 보여준다. 이는 앞서 언급한 것처럼 직 경방향으로만 퍼졌기 때문에 부적합하다.

따라서 Fig. 3.20에서 유량 25%인 (a)는 충돌면의 직경이 3 mm인 경우 충돌 거리는 5 mm, 10 mm로 판단된다. (b)에서는 충돌면의 직경이 2 mm인 경 우 충돌거리는 1 mm, (c)에서는 충돌면의 직경이 2 mm인 경우 충돌거리는 5 mm로 판단된다.



(b) Flow rate 50%





3.5 충돌면 직경 및 충돌거리에 따른 액적분포부피

Fig. 3.21은 분무직경을 이용해 원뿔의 부피를 계산해 보았다. (a)는 유량 25%, (b)는 유량 50%, (c)는 유량 75%일 때를 나타낸다.(a), (b), (c)에서 검 은색은 유량 100%일 때 상용노즐의 부피를 나타낸다. 유량 50%이상에서 충 돌면의 직경 4 mm인 경우는 액적이 직경방향으로만 분포하여 부피 값이 크 게 계산된다. 그 값은 상용노즐에서 가지는 부피가 10인 것에 비해 너무 높아 생략하였다. 앞서 분무각도와 유사한 경향을 보여준다. (b), (c)의 유량 50%이 상에서 충돌면의 직경이 3 mm이상에서는 상용노즐의 분무부피보다 높았지만 대부분이 직경방향으로 펴지고 깊이로의 발달은 일어나지 않았다.

따라서 유량 25%에서는 충돌면의 직경이 3 mm일 때 충돌거리 5 ~ 10 mm, 유량 50%에서 충돌면의 직경이 2 mm일 때 충돌거리가 1 mm, 유량 75%에 서는 충돌면의 직경이 2 mm일 때 충돌거리가 5 mm인 경우가 좋다고 생각 된다.



(a) Flow rate 25%



(c) Flow rate 75%

Fig. 3.21 Volume according to distance

제 4 장 결론

본 논문에서는 선박의 출력에 따라 배기가스에 포함된 유해물질의 양이 달라 지므로 이를 집진하기 위한 세정수의 유량 조절을 통해 좀 더 효율적인 집진 시스템을 만들고자 하였다. 우선 포트란을 이용하여 수치적 연구를 진행하였 고 이를 통해 충돌분무에서 적절한 분무형상을 선정하였다. 그런 다음 실험을 통해 유량 100%에서 상용노즐의 분무형상을 획득한 후 낮은 유량에서도 상용 노즐의 분무형상을 획득하기 위한 적절한 충돌면의 직경과 충돌거리를 선정하 였다.

충돌모델과 실험을 결과를 종합하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 상용노즐의 형상을 이용한 충돌모델을 고안하여 최적의 액적의 분무형상을
판단하였다.

충돌면의 직경이 클수록 깊이방향으로의 액적은 미비해지고 반경방향으로
의 퍼짐이 발달하게 된다.

 적절한 액적의 분포 형태는 반경방향과 깊이방향으로 적절하게 발달된 원 뿔형태이다.

4. 상용노즐에서 유량이 감소하게 되면 분무직경의 값이 감소하여 원하는 분 무형상을 가질 수 없다.

 충돌 거리와 충돌면의 직경을 달리하면 분무형상 및 분무각도에 변화를 줄 수 있다.

이를 종합하면 분무형상을 Fig. 3.22와 같이 액적들이 반경방향과 깊이방향 으로 적절하게 퍼진 원뿔형상이 이상적이라고 판단하였고 실험을 통해 유량 100%에서 상용노즐의 분무형상과 비교하여 같은 분무직경을 가진 경우를 Fig. 3.23에 나타내었다. (b)는 유량 75%에서 충돌면의 직경 2 mm 충돌거리 5 mm, (c)는 유량 50%에서 충돌면의 직경 2 mm 충돌거리 1 mm, (c)는 유 량 25%에서 충돌면의 직경 3 mm 충돌거리 5 mm가 최적인 것으로 판단된 다.





Fig. 3.22 Optimized spray shape



(d) Flow rate 25%

Fig. 3.23 Optimized spray shape according to flow rate

참고문헌

[1] J. N. Armor, "Catalytic reduction of nitrogen oxides with methane in the presence of excess oxygen : A review," Catalysis Today, vol. 26, pp. 147–157, 1995.

[2] K. A. Bethke, M. C. Kung, B. Yang, M. Shah, D. Alt, C. Li, and H. H. Kung, "Metal oxide catalysts for lean NOx reduction," Catalysis Today, vol. 26, pp. 169–183, 1995

[3] 김성윤 "선박 디젤엔진용 Urea-SCR 시스템의 성능개선을 위한 최적화 연구" 공학박사 학위논문 부산:한국해양대학교 2016.

[4] Jeong-Gil Nam, Joo-Yeol Choi. "A Study for NOx Discharge Characteristics of Diesel Engines." Journal of the Korean Society of Marine Engineering, 27.3 (2003.5): 373-380.

[5] J. S. Choi, S. D. Lee, K. W. Lee, K. W. Chun, Y. W. Nam, S. H. Yoon, J. H. Choi, "Real Time Measurement of Exhaust Emissions from Main Engine using Training Ship." Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety Vol. 19, No. 5, pp. 531-537, October 31, 2013

[6] S.W. Ko, K.C. Ro, H.S. Ryou. "NUMERICAL STUDY ON THE OPTIMAL DESIGN OF SPRAY SYSTEM IN PACKED BED SCRUBBER." Journal of Computational Fluids Engineering, 12.1 (2007.3): 28–34.

[7] S. M. Lee, K. H. Park. "Study of inner structure of in-line scrubbers." Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 42, No. 1 pp. 1~9, 2018

[8] J. W. Park, K. H. Park. "Effect of guide angle of swirl-type scrubber on flow characteristics of exhaust gas." Journal of the Korean Society of Marine Engineering,



Vol. 41, No. 9 pp. 767~772, 2017

[9] C. H. Kim, J. H. Kim, K. H. Park "Spray Characteristics Depending Upon Impaction Land Surface Angle Variations." Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers, 6.6 (1998.11): 63–71.

[10] D. K. Lim, K. H. Park "The Effect of Impinging Land Size on Diesel Spray Behavior in OSKA Type Combustion Chamber." Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers, 9.4 (2001.7): 18–26.

[11] D. S. Park, M. H. Kim, K. H. Park "Effects on Diesel Spray for Variation of Ambient Pressure and Impingement Land Position" Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers 5.3(1997. 5) : 95–105

[12]A.P. Watkins, and D.M. Wang, "A new model for diesel spray impaction on walls and comparison with experiment", Proc. COMODIA 90 Int. Symp. on Diagnostics and modelling of Combustion in I.C. Engines, kyoto (1990), p243

[13] W.S. Chang, D.J. Kim, K. Park. "Analysis of New DI Diesel Combustion Chamber System using New Spray Wall Impaction Model." Journal of Computational Fluids Engineering, 2.1 (1997.4): 54–65.

[14] El Watkil, M. M., Uyehara, O. A. and Myers, P. S., "Atomization of multi fuel sprays", ICLASS-82, No. 9.3 (1982), pp.237-244.

[15]Sejinnozzle,<u>http://www.sejinnozzle.co.kr</u>/sub.asp?maincod=453&sub_sequence=533&sub_s ubsequence=534,accessed November 24, 2017

