

대형 컨테이너선의 배기가스 역류 개선 방안 연구

양지만^{1,†}·계상경¹·윤점진²·노현석³·조대환⁴·최주열⁴
현대삼호중공업(주) 종합설계부¹
현대삼호중공업(주) 구조설계부²
현대삼호중공업(주) 기장설계부³
목포해양대학교 기관시스템공학부⁴

Prevention of Exhaust Gas Back Flow in Large Container Carriers

Jiman Yang^{1,†}·Sangkyoung Gyea¹·Jeomjin Yun²·Hyeonseok Noh³·Daehwan Cho⁴·Jooyol Cho⁴
Design Coordination Dep't, Hyundai Samho Heavy Industries Co., Ltd.¹
Structure Design Dep't, Hyundai Samho Heavy Industries Co., Ltd.²
Machinery Outfitting Design Dep't, Hyundai Samho Heavy Industries Co., Ltd.³
Division of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University⁴

Abstract

Prevention of exhaust gas back flow becomes a great interest to shipyards and shipowners in large container carriers because exhaust gas pollutes cargoes, flows back into the deck house and the engine room area through fresh air intakes and fan rooms, gives harmful damages to the crew's health and also gives thermal damages to electric equipments on the navigation deck. The phenomena of exhaust gas back flow has been studied with the analysis of sea trial records and wind tunnel tests and the height of the exhaust gas pipe, the front area of the deck house, the inflow speed and the position of the radar mast platform has been confirmed as the principal factors of exhaust gas back flow phenomena. The simple empirical formula to estimate exhaust gas back flow phenomena and the design guidances of exhaust gas related structures on deck has been introduced. In future, parametric studies for the exhaust gas back flow factors will be carried out with the CFD analysis. The results of this study will be the guide for development of the prevention method of exhaust gas back flow phenomena for large container carriers.

Keywords : Exhaust gas(배기가스), Funnel design criteria(연돌 설계 기준), Wind tunnel test(풍동 시험)

1. 서론

최근 컨테이너선이 대형화됨에 따라 8,000TEU~10,000TEU 급의 컨테이너선이 각 선사의 간선 운항 주력 선종을 이루고 있으며 최대 18,000TEU급 컨테이너선까지 출현하였다. 거주구(deck house)와 연돌(funnel)을 별도로 배치하는 트윈 아일랜드(twin island) 형식을 주로 사용하는 13,000TEU급 이상의 초대형 컨테이너선을 제외한 대부분의 컨테이너선은 탱커선/벌크선 등과 달리 거주구와 연돌이 일체형으로 연돌의 배기가스가 거주구나 컨테이너 적재구역으로 역류해 올 가능성을 가지고 있으며, 특히 일체형 형식을 사용하는 최대급인 8,000TEU~10,000TEU급의 컨테이너선은 기항 항만에 따른 선박의 크기 제한 및 운항높이(air draft)의 제한으로 인하여 연돌 배기관 높이를 충분하게 확보하지 못하여 이러한 배기가스의 역류 현상에 취약한 상황이다.

이러한 연돌 배기가스의 역류 현상은 고온의 배기가스로 인하여 거주구 상부에 설치된 항해장비의 손상을 초래하고, 그을음

(soot) 및 이산화황이나 질소산화물 같은 유독 물질을 포함하고 있어 거주구 내로 유입 시 승선원의 건강 및 삶의 질을 크게 저하시키고, 화물탑재구역으로 유입 시에는 탑재 화물의 오염에 따른 경제적 손실을 야기한다(Shin, et al., 2011).

본 연구에서는 실선 시운전 및 풍동 모형시험 결과의 분석을 통하여 그 동안 주로 제원 상의 제한 및 구조적인 관점에서 설계자의 경험에 의하여 결정된 연돌의 설계 인자들에 대한 배기가스 역류 현상을 완화할 수 있는 설계 기준을 제시하고자 하였다.

2. 연돌 설계 인자의 분석

일반적으로 컨테이너선 연돌 배기가스의 역류 현상은 상갑판(upper deck) 상에 컨테이너가 없는 밸러스트(ballast) 흘수 조건인 경우에 가장 강하게 나타나며, 실제 운항 조건인 상갑판 상에 컨테이너가 적재되어 있는 경우에는 현격하게 줄어드는 것으로 알려져 있다. 그럼에도 불구하고 해운 시황의 장기 침체로 인하

여 상갑판에 매우 적은 수량의 컨테이너를 적재하고 운항하는 경우도 빈번하게 발생하고 있으며, 조선소에서의 시운전은 항상 상갑판 상에 컨테이너가 없는 밸러스트 흘수 조건에서 이루어지므로 본 연구에서는 상갑판 상에 컨테이너가 없는 밸러스트 흘수 조건부터 검토를 시작하였다.

2.1 시운전 결과의 분석

Fig. 1은 현대삼호중공업(주)에서 최근에 건조된 컨테이너선의 시운전시의 배기가스 역류 현상 관측 여부를 나타낸 것이다. 배기가스 역류 현상에 대한 거주구 높이 및 연돌 배기관 위치의 영향을 분석하기 위하여 거주구 높이에 대한 배기관 위치 값의 비와 관측 결과를 함께 표시하였다.

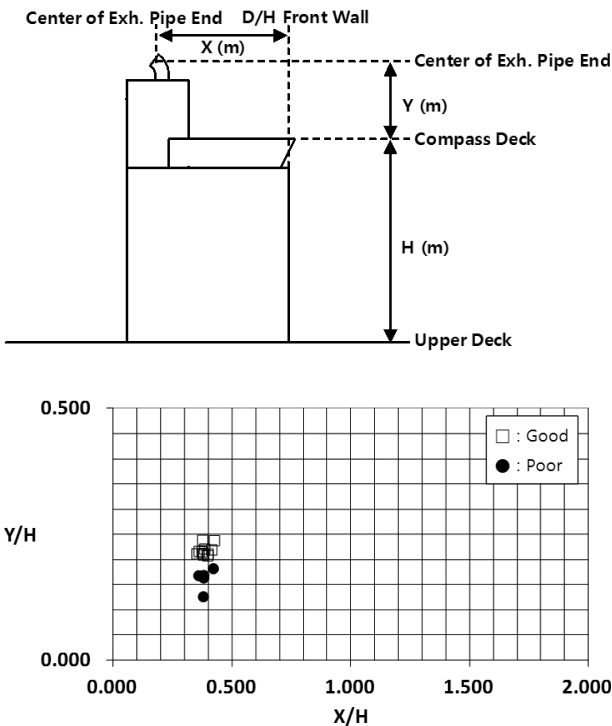


Fig. 1 Sea trial observation results of exhaust gas back flow

Fig. 1을 살펴보면 거의 비슷한 거주구의 길이방향 위치 비율 (X/H)을 가지더라도 연돌 배기관의 높이 비율(Y/H)에 따라 연돌 배기가스의 역류 현상이 관측되는 경우와 그렇지 않은 경우로 나뉘고 있다. 이로부터 연돌 배기관의 높이가 배기가스 역류현상의 가장 주요한 인자임을 추측할 수 있다. 이는 연돌 배기관의 높이가 배기관으로부터 배출되는 배기가스를 거주구 전면부로부터 생성된 와류 유동의 바깥으로 내보낼 만큼 충분히 높아야 함을 나타낸다. 그렇지 못한 경우에는 거주구 전면부로부터 생성되는 와류 유동과 배기관으로부터 배출되는 배기가스가 혼합되어 거주구의 후방으로 확산 및 역류되는 현상이 강하게 나타날 것이다.

2.2 풍동 모형시험 결과의 분석

앞서의 건조된 선박의 시운전 결과 분석에서 연돌 배기관의 높이가 배기가스 역류현상의 가장 주요한 인자일 것으로 추측됨에 따라 그에 대한 확인 및 그 외의 배기가스 역류현상에 영향을 주는 인자들의 확인을 위해 풍동 모형시험을 실시하였다. 풍동 모형시험은 전북대학교 대형풍동실험센터에서 수행되었으며, 사용된 풍동시설의 모습 및 주요제원은 Fig. 2 및 Table 1과 같다. 풍동모형실험은 현대삼호중공업(주)에서 건조된 10,000TEU급 컨테이너선을 대상으로 1/100의 모형선을 사용하여 수행되었으며 주요제원은 Table 2와 같다.

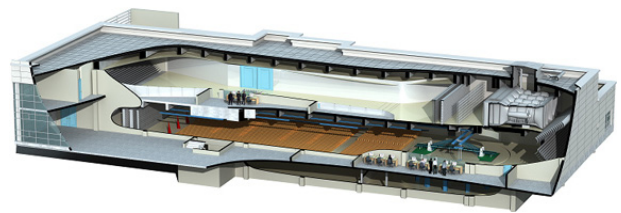


Fig. 2 Image view of Chonbuk national university wind tunnel center

Table 1 Principal particulars of wind tunnel

Test Section	20m(L)×5m(B)×2.5m(H)
Wind Speed	0.5 ~ 24m/s
Max. Model Weight	1ton

Table 2 Principal particulars of 10,000TEU class container carrier

Dimensions	334m(L)×45.6m(B)×27.3m(D)
Max. Air Draft	63.5m above baseline

먼저 배기관의 연장효과를 검토하여 보았다. Table 3의 배기관 연장 시험의 결과를 살펴보면 배기관을 1.46m(상갑판에서 배기관 끝단까지의 길이)의 약 4.4%에 해당) 연장한 Case 2의 경우 밸러스트 흘수 조건에서 Case 1 보다 브리지윙(bridge wing) 및 기관실 공기 유입구 위치에서의 이산화황(SO₂) 계측 값이 4~10% 정도 감소함을 확인 할 수 있었다.

Table 3 Effect of exhaust gas pipe extension (ballast draft condition, Vs = 25kts, Vw = 30kts, head wind)

Case	Exhaust Pipe Height		SO ₂ Concentration			
	H (m)	Y (m)	Bridge Wing (ppm)	Bridge Wing (%)	E/R Air Intake (ppm)	E/R Air Intake (%)
Case 1	28.1	5.03	2.17	100	2.76	100
Case 2	28.1	6.49	1.95	90	2.66	96

다음으로 배기가스 역류 유동의 근본 원인이라 할 수 있는 거주구의 영향을 살펴보았으며, 더불어 컨테이너 적재에 따른 영향도 함께 조사하였다. 배기가스의 역류 유동은 거주구 등의 상갑판 상부 구조물이 상갑판 상의 공기흐름을 가로막아 그로 인하여 발생하는 와류 유동 및 음압력에 기인한 것으로 상갑판 상에 컨테이너가 적재되어 유동의 흐름이 부드러워 지는 경우 그 현상이 현저히 감소함을 볼 수 있다.

Fig. 3 및 Table 4는 거주구의 면적에 따른 배기가스 역류 현상을 나타낸 것이다. Case 3은 Case 2에 비해 거주구의 면적이 22% 감소함에 따라 밸러스트 흡수 조건에서 브리지윙에서의 이산화황 계측 값은 큰 변화가 없으나 기관실 공기 유입구 위치에서의 이산화황 계측 값은 24% 정도 감소함을 확인 할 수 있었다. 브리지윙에서의 이산화황 계측 값이 Case2 보다 다소 증가한 현상에 대해서는 배기가스 역류현상에 대한 다른 인자의 영향으로 생각되며 뒷부분에서 별도로 논의토록 하겠다.

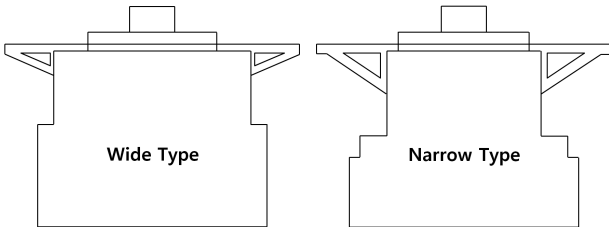


Fig. 3 Comparison of deck house front area

Table 4 Effect of deck house front area (ballast draft condition, Vs = 25kts, Vw = 30kts, head wind)

Case	Exhaust Pipe Height Y (m)	D/H Front Area (m ²)	SO ² Concentration			
			Bridge Wing		E/R Air Intake	
			(ppm)	(%)	(ppm)	(%)
Case 2	6.49	911	1.95	100	2.66	100
Case 3	6.49	711	2.05	105	2.03	76

Table 5 및 Fig. 4~6에는 컨테이너 적재 상태에 따른 배기가스 역류 현상의 변화를 나타내었다. Table 5에서 보는 바와 같이 컨테이너가 4단 정도만 적재되어도 브리지윙 및 기관실 공기 유입의 위치에서의 배기가스의 유입량이 41~54% 정도 현저히 감소하는 것으로 나타났다. 이는 Fig. 4~6의 배기가스 역류 현상

Table 5 Effect of container loading on upper deck (Vs = 25kts, Vw = 30kts, head wind)

Case	Container Loading Condition	SO ² Concentration			
		Bridge Wing		E/R Air Intake	
		(ppm)	(%)	(ppm)	(%)
Case 1	Empty	2.17	100	2.76	100
Case 4	Half (4Tier)	1.29	59	1.22	44
Case 5	Full Load	1.34	62	1.28	46

가시화 관측 사진에서도 잘 나타난다. 이로부터 컨테이너 화물을 충분히 적재한 경우에는 이러한 배기가스의 역류 현상이 거의 나타나지 않을 것을 예상 할 수 있다.

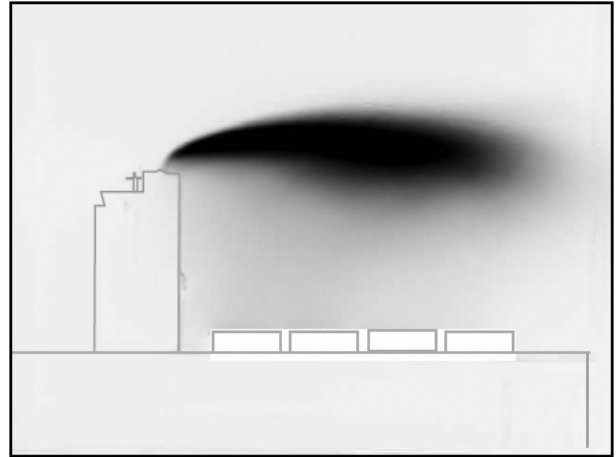


Fig. 4 Smoke visualization result (case 1)

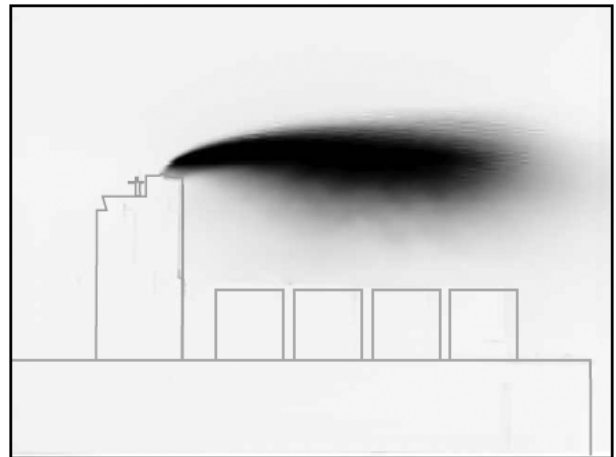


Fig. 5 Smoke visualization result (case 4)

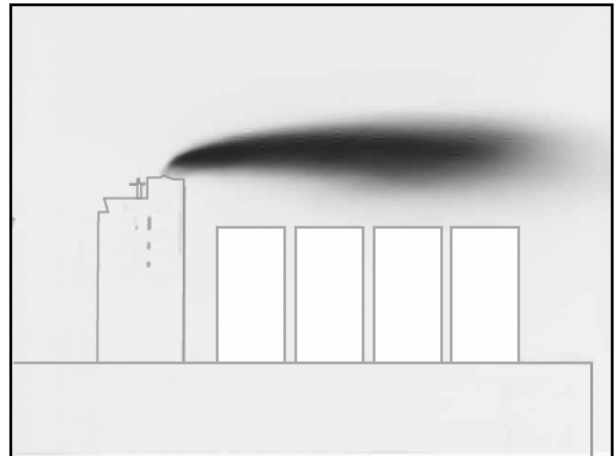


Fig. 6 Smoke visualization result (case 5)

다음으로 배기가스 역류현상에 대한 풍속 및 선속의 영향을 살펴 보았다. Table 6을 살펴보면 유입유동의 속도(풍속+선속)가 증가할수록 브리징 및 기관실 공기 유입구에서의 배기가스 계측 값이 증가하며 이는 유입유동의 속도가 증가할수록 거주구 뒤쪽의 와류유동 발생이 증가하여 배기가스가 활발히 혼합되고 확산되는 것에 기인하는 것으로 추정된다.

Table 6 Effect of wind and ship speed (ballast draft condition, head wind)

Case	Ship Speed (kts)	Wind Speed (kts)	SO ² Concentration			
			Bridge Wing		E/R Air Intake	
			(ppm)	(%)	(ppm)	(%)
Case 1	25	30	2.17	100	2.76	100
Case 6	17	10	1.90	88	1.52	55

저속운항이나 정박 중 선미로부터의 역풍상태에서는 배기열로 인하여 배기관 앞쪽의 항해장비에 심각한 손상을 야기할 수 있으므로 통상적으로 배기관에 굽힘(bending) 각을 적용하여 역풍상태에서의 항해장비 손상을 방지하곤 한다. 그러나 운항 높이를 동일하게 유지한 채로 굽힘 각이 증가하면 배기관 끝단 배기가스 토출부의 평균 높이가 낮아져 배기가스의 역류현상이 악화되는 경향이 있다. Fig. 7은 배기관 굽힘 각에 따른 형상을, Table 7은 배기관 굽힘 각에 따른 이산화황의 계측 값을 나타낸 것이며, 본 실험 결과에서는 30도의 굽힘 각의 경우가 배기가스 역류현상이 가장 작게 나타나는 것으로 계측되었다. 평균 높이가 상대적으로 낮은 30도의 굽힘 각을 가지는 배기관의 배기가스 역류현상이 수

Table 7 Effect of stack bending angle (ballast draft condition, Vs = 25kts, Vw = 30kts, head wind)

Case	Stack Bending Angle (Deg.)	SO ² Concentration			
		Bridge Wing		E/R Air Intake	
		(ppm)	(%)	(ppm)	(%)
Case 7	0	2.16	100	2.09	100
Case 8	15	2.19	101	2.15	103
Case 3	30	2.05	95	2.03	97
Case 9	45	2.44	113	2.24	107
Case 10	90	2.60	120	2.24	107

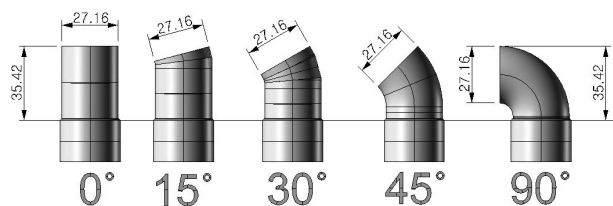


Fig. 7 Various bending angle of exhaust gas stack

직관이나 15도의 굽힘 각을 가지는 배기관보다 작게 나타나는 현상은 30도의 굽힘 각을 가지는 경우가 거주구 상부 유동에 보다 부드럽게 혼합되어 전체적인 난류의 강도를 증가시키지 않는 것에 기인하는 것으로 추정된다.

마지막으로 거주구의 면적이 감소했음에도 브리징에서의 배기가스 계측 값이 증가한 현상에 대한 원인을 검토하여 보았다. 앞서의 Case 3 뿐만 아니라 Table 8에서 보듯이 거주구 형상의 영향이 거의 없을 것으로 예상되는 컨테이너 적재 시의 실험조건에서 배기관의 길이가 연장되고 거주구 면적이 감소한 실험 Case가 오히려 14~25% 정도 배기가스 계측 값이 크게 나타났다.

Table 8 Effect of radar mast platform on exhaust gas back flow (Vs = 25kts, Vw = 30kts, head wind)

Case	Exh. Pipe Height Y (m)	D/H Front Area (m ²)	Radar Plat. Height H (m)	SO ² Concentration			
				Bridge Wing		E/R Air Intake	
				(ppm)	(%)	(ppm)	(%)
Container Loading : Half (4Tier)							
Case 4	5.03	911	2.98	1.29	100	1.22	100
Case 11	6.49	711	4.74	1.54	119	1.52	125
Container Loading : Full							
Case 5	5.03	911	2.98	1.34	100	1.28	100
Case 12	6.49	711	4.74	1.53	114	1.52	119

시험에 사용된 두 개의 풍동시험용 모형선에서 배기관 길이 및 거주구 면적 이외의 배기가스 역류 유동 현상에 영향을 줄만한 구조물을 조사한 결과 배기관 길이 연장에 따른 레이더(radar) 장비 위치의 상향 조정으로 레이더 마스트 플랫폼(radar mast platform) 또한 위치가 1.76m 상향되어 있음을 확인하였다. 이로 인하여 레이더 마스트 플랫폼이 거주구 전방에서 생성되는 난류 유동의 경계층(boundary layer) 밖에 위치함에 따라 플랫폼에서 추가적으로 난류유동이 생성되어 경계층의 두께가 증가하고 와류 유동 또한 증가한 것으로 추정된다. 배기관 및 레이더 마스트 플랫폼의 형상은 Fig. 8에 비교하여 나타내었다.

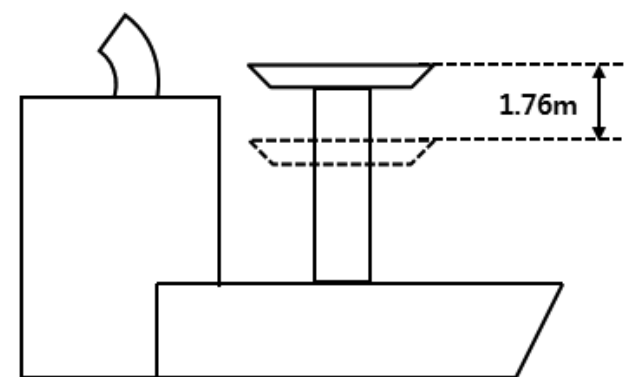


Fig. 8 Comparison of radar mast platform

3. 설계기준의 정립

앞서 분석된 연돌 배기가스의 역류 현상에 영향을 주는 주요 인자들로부터 배기가스 역류 현상의 정도를 연돌 및 거주구 설계 시에 쉽게 예측할 수 있는 경험식을 도출해 보기로 하였다. 우선 Fig. 1의 실선 시운전 결과로부터 배기관의 높이가 일정 수준 이상이면 역류 현상이 감소한다는 점에 착안하여 배기관 높이의 하한 한계선을 Fig. 9와 같이 정의하였다.

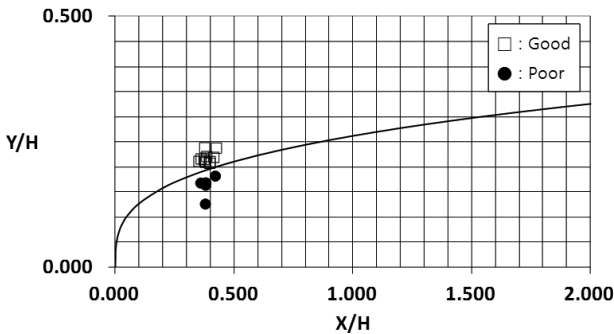


Fig. 9 Lower limiting line of exhaust gas pipe

다음으로 거주구의 면적 또한 배기가스의 역류 현상에 영향을 미치므로 하한 한계선에 대한 배기관 높이의 비를 거주구의 면적으로 나눈 값이 일정한 기준 값 이상을 충족하도록 배기가스 역류 현상 판별 경험식을 아래의 식(1)과 같이 정립하였다.

$$(F_{Funnel}) = \frac{(Y/H)/(Y/H)_{Limit}}{Area_{Deckhouse}} > (Criteria) \quad (1)$$

위에서 정립한 배기가스 역류 현상 판별 경험식을 바탕으로 다음과 같이 설계 지침을 수립하여 향후 설계되는 선박에 적용키로 하였다.

- (1) 거주구의 경우 단면적을 최소화하기 위하여 되도록 폭을 최소로 설계하여 식(1)을 만족시키도록 한다.
- (2) 배기관의 경우 운항 높이 제한까지 가능한 최대 높이로 설계하여 식(1)을 만족시키고, 이를 가능토록 레이더 장비는 반드시 접이식(tilting type)/조절식(telescopic type)을 사용한다.
- (3) 배기관의 굽힘 각도는 항해장비 손상 방지를 위하여 30도를 적용한다.
- (4) 레이더 마스트 플랫폼의 높이는 연돌 덮개의 높이보다 낮게 설계한다.
- (5) 실내공기흡입구(fresh air intake)는 반드시 거주구의 전방부에 배치한다.

4. 결론

컨테이너선의 대형화에 따른 배기가스 역류 현상을 개선하기 위한 연구를 수행하였다. 시운전 결과의 분석 및 풍동 모형시험을 통하여 배기가스 역류 현상에 영향을 주는 인자들로서 배기관의 높이, 거주구의 단면적 및 레이더 마스트 플랫폼 위치 등을 확인하였고, 그에 따라 배기가스 역류 현상을 개선하기 위한 설계 지침을 수립하였다.

향후 수치해석 기법을 이용하여 앞서 파악된 배기가스 역류 현상에 영향을 주는 인자들에 대한 매개변수(parametric) 연구를 수행하여 각 인자들의 영향을 보다 세밀하게 파악할 계획이며, 본 연구의 결과는 대형 컨테이너선의 배기가스 역류 방지를 위한 설계 기준 정립을 위한 기초 자료가 될 것으로 기대된다.

참고 문헌

Shin, H.J., Park, S.M., Kim, J.H., 2011. CFD Interpretation of Gas Flow around Ship's Funnel and Optimum Design Criterion. *Special Issue of the Society of Naval Architects of Korea*, pp.63-69.

