

소각기의 배기가스 유로에 이젝터를 적용한 시스템의 성능 분석

윤상국[†] · 장호길¹

(원고접수일 : 2011년 7월 28일, 원고수정일 : 2011년 8월 18일, 심사완료일 : 2011년 9월 9일)

Performance Analysis on the Ejector System in Flue-gas Discharge Channel of Marine Incinerator

Sang-Kook Yun[†] · Ho-Gil Chang¹

요약 : 선박용 소각기는 각종 폐기물의 연소로 인한 해양환경 오염 우려로 국제해사기구에 의한 기준이 점점 강화되어지고 있다. 본 연구는 배기가스의 온도를 낮추고 연소실의 연소가스가 원활하게 배출되도록 배기가스의 배출 유로를 3개로 하고, 배기통로 내에 보조 이젝터를 설치한 시스템의 성능 향상에 대하여 Ansys를 사용하여 유동 해석을 수행하였다. 해석결과, 배기가스 유로의 다채널화에 의하여 배기가스 온도가 국제해사기구 기준보다 낮게 유지되었으며, 통로에 설치한 보조 이젝터가 배기가스 배출에 매우 효과적인 장치인 것으로 분석되었다.

주제어 : 소각기, 주 이젝터, 보조 이젝터, 배기 통로, 배기가스 온도

Abstract: The International Maritime Organization(IMO) could try to adopt more severe amendment to prevent any air pollution from various waste materials by marine incinerator. This study is to analyse the performance improvement through Ansys CFD about new invented system which has three flue-gas discharge channels and sub-ejector installed in the discharge channel in order to evacuate flue-gas well from the combustion chamber. The results showed that the discharge temperature of flue-gas was below the regulated value of IMO by the multi-channels, and the sub-ejector system installed in the discharge channel was highly effective one to improve the flue-gas discharge ability.

Key words: Incinerator, Main ejector, Sub-ejector, Discharge channel, Flue-gas temperature

1. 서 론

선박의 소각기는 운항 중 선박에서 발생하는 각종 고형 폐기물, 폐오일 등을 경유나 정제 폐유를 사용하여 소각시켜 배출하는 장치이다. 이 소각기는 특성상 연소실 내부에서 불완전 연소의 발생 가능성이 높아 다이옥신 등 대기오염의 우려가 야기되고 있는 실정으로, 국제해사기구(IMO)에서는 해양오염을 방지하기 위하여 기준을 점점 강화하고 있다. 연소가스의 유해성분 배출을 억제하기 위한 국제해사기구 조건을 보면 연소실 온도는 850~1200℃, 연소로 예열온도 650℃ 이상, 그리고 연소

로 배출구 2.5m 이내에서 배기온도 350℃ 이하 등을 규정하고 있다[1]. 그러므로 소각기의 이러한 조건의 만족과 함께 연소실 연소가스가 원활하게 방출되는 연소실 구조 개선 등을 위한 연구가 지속적으로 필요하다고 하겠다.

연소실에서 발생하는 연소가스의 배출은 이젝터에 다량의 공기를 분사시킴으로써 연소실에 부압이 형성되어 배출되게 하고 있다. 이젝터에 공급되는 다량의 공기는 먼저 선원의 안전을 위하여 소각기 표면을 60℃ 이하로 냉각한 후, 이젝터로 방출되면서 연소실의 연소가스를 흡입하는 것이다.

[†] 교신저자(한국해양대학교 기계에너지시스템공학부, E-mail:skyun@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4363)

¹ 선보공업(주) 신제품 개발팀

한편, 소각기 연소가스 배출 유로의 설계는 연소가스의 완전연소를 유도하기 위하여 연소실 체류시간을 1.5~2초 이상으로 설계하는 것이 바람직하나, 선박 공간의 제약 등으로 체류시간 보다는 배출온도 등의 규정을 기준하여 설계하고 있다[2-3].

현재 소각기 구조는 크게 2가지로 1개의 원통형 연소실로 이루어진 구조와 1개의 연소실 및 2개의 배출통로로 구성된 제품이 있으나 이 모두 기술의 개선이 요구되고 있다[4-5]. 1개의 연소실을 갖는 소각기는 이젝터용 공기를 흡입하는 송풍기가 연도에 설치됨으로 배기가스 성분으로 인한 부식과 배출되는 연소가스의 온도 조절에 어려운 단점을 갖는다. 또 다른 방식은 연소가스 배출통로가 1, 2차 통로로 형성된 2개 통로식으로, 연소 후 연소가스가 제1 통로에 가설된 추가 버너의 연소를 통하여 완전연소를 형성할 수 있고, 연소가스 체류 시간이 증가하여 연소가스 온도가 저하되면서 다이옥신 등의 생성이 감소하는 장점이 있으나, 규격이 크고 국외 기술에 의존하여 제작되고 있는 단점을 갖는다[5].

본 연구에서는 이러한 단점을 보완하고 연소가스의 원활한 배출과 배출가스 온도가 낮게 유지되는 성능의 향상을 위하여 2가지의 기술을 고안하였다. 그 기술은 연소가스의 배출 통로를 3개로 구성하는 것과, 연소가스 배출 유로에 추가 보조 이젝터를 설치하는 것이다. 이의 성능 분석은 CFD 상용 프로그램인 Ansys를 이용하여 이젝터의 공기 유량, 온도 등의 변화에 따른 흡입 기체의 배출속도, 유동장, 온도 변화 등을 수행하였다. Ansys에 의한 유동 및 열 해석은 기본 산정식인 연속방정식, 유체 운동방정식 그리고 에너지 방정식이 적용되어 이루어지며, 해석 오차를 줄이기 위하여 검사체적(Control volume)의 Mesh수를 최대한 크게 하였다.

이러한 고성능 소각기의 개발은 국제해사기구의 조건에 만족할 뿐만 아니라 향후 강화되는 규정에도 능동적으로 대처하게 될 것이며, 선박용 소각기의 국내 고유 기술을 확보하는 의미를 갖는다.

2. 고안 소각기의 구조

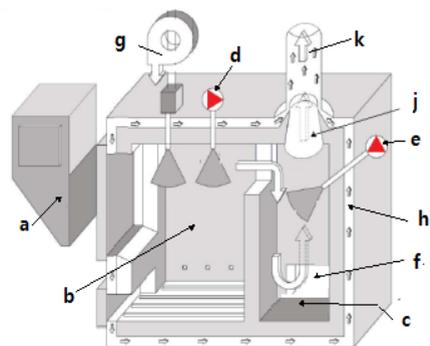
2.1 기존 소각기 연소가스 배출 구조

Figure 1은 전형적인 2통로 방식 소각기의 구조를 보여준다. 투입구(a)를 통하여 투입된 폐기물은

주연소실(b)에 설치된 1차 버너(d)에 의하여 연소된 후, 제2차 연소실 역할을 하는 제1차 배출통로(c)의 제2 버너(e)에 의하여 추가 연소된다. 연소가스는 뒤쪽에 가설된 제2 통로(f)를 거친 후 이젝터(j)를 통하여 연도(k)로 배출된다. 공기 송풍기(g)로부터 유입된 공기는 소각기 내외벽 사이(h)를 흐르면서 소각기 표면 온도를 낮추고, 이젝터(j)를 거쳐 연도(k)로 배출되면서 연소가스를 흡입하게 된다.

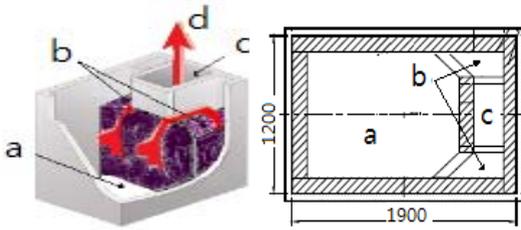
2.2 고안 연소가스 배출통로 구조

Figure 2는 본 고안에 따른 3통로 방식 연소가스 배출 구조를 보여준다. 소각기 버너에 의하여 폐기물이 연소실(a)에서 연소되고 발생된 연소가스는 내화벽돌로 제작된 두 개의 배출구(b) 상부로 분할되어 흐른 후, 중앙배출로(c)의 하부에서 혼합되어 연도(d)로 배출된다. 이는 기존의 무통로 방식이나 2개 통로 방식과 달리 첫 배출 통로가 두개로 연소로의 구석(Corner)부에 구성된다. 이는 각 코너부에 생성된 연소가스가 바로 배출되는 구조로 기존 소각기 보다 더 연소가스의 원활한 배출과 함께 체류시간이 증가되는 장점을 갖게 된다. Ansys를 이용한 연소가스 배출 해석은 연소실을 제외한 3개의 통로부에 대하여 수행하였다. 해석의 대상이 되는 소각기 용량은 70,000 kcal/h, 내부 규격은 1.9mL × 1.2mW × 1.9mH이다.



(a) Wastes disposal (b) 1st combustion chamber, (c) 2nd combustion chamber(1st flue-gas discharge channel), (d) 1st burner, (e) 2nd burner, (f) Air blower, (g) Air channel for incinerator body cooling, (h) Ejector, (k) Chimney

Figure 1: Typical structure of two flue-gas discharge channels type of marine incinerator.

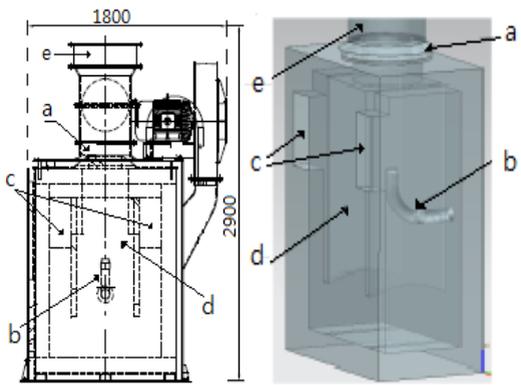


(a) Combustion chamber, (b) 1st twin discharge channels, (c) 2nd discharge channel, (d) Ejector and chimney

Figure 2: The structure of flue-gas discharge channels of new incinerator.

2.3 고안 이젝터의 구조

Figure 3은 본 고안의 연소가스 배출 유로의 도면과 모형도이다. 본 연구의 이젝터는 기존의 이젝터(a)에 더하여, 제 3의 배출유로(d)에 보조 이젝터(b)를 가설하여 연소실의 연소가스가 원활하게 흡입되고 연소실은 부압이 용이하게 형성되도록 고안하였다. 제2 보조 이젝터의 직경은 80mm, 두께는 0.5T로 하였으며, 이젝터 해석은 연소실을 제외한 연소가스출구(c)부터 연도(e)까지 수행하였다.



(a) Main ejector, (b) 2nd sub-ejector, (c) Twin flue-gas discharge channel, (d) 3rd flue-gas discharge channel, (e) Chimney

Figure 3: The side view of 2nd sub-ejector

3. 고안 소각기 성능 해석

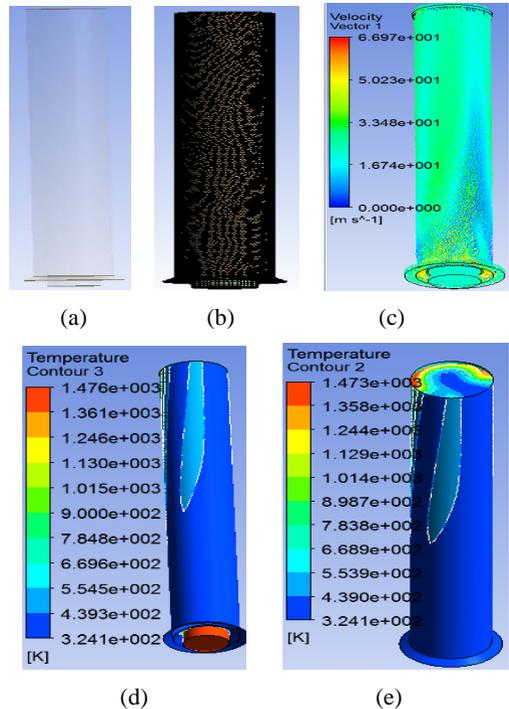
3.1 연소가스 유동 해석

3.1.1 기존 무통로식 연소 배기가스 유동 해석
기존 무통로식은 연소가스의 배출 유로가 없이

연소가스가 바로 연소실 상부의 연도(Chimney)로 배출되는 시스템이다. 해석에 적용한 경계조건은 Table 1과 같으며, 연도의 길이는 2.5m로 하였다. Figure 4는 CFD해석결과로 최대유속은 Figure 4(c)의 이젝터 노즐 목부에서 66.9m/s, 연도 입구에서의 연소가스 온도를 1,200℃로 할 때 2.5m 상부 연도에서의 배출가스 온도는 최대 421℃로 얻어졌다. 이 값은 국제 해사기구의 규정인 350℃를 상회하는 것으로, 무통로 방식 소각기는 연소가스 온도의

Table 1: Boundary conditions for CFD analysis.

Number	Description
Ejector air flowrate	2.7831 kg/s, 50℃
Flowrate of flue-gas	0.3703 kg/s
Temperature of flue-gas	1,200℃



(a) Ejector and Chimney Modelling, (b) Mesh, (c) Flow stream of flue-gas, (d) Temperature contour, (e) Flue-gas temperature at 2.5m of discharge chimney

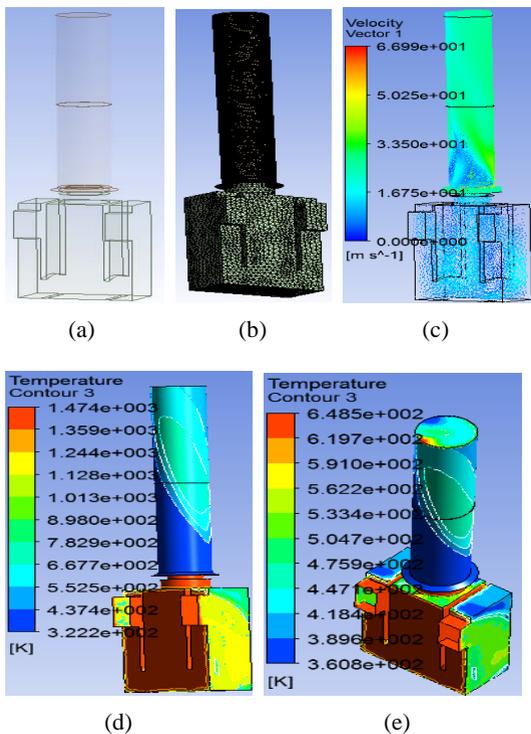
Figure 4: CFD analysis for no discharge channel system in incinerator.

냉각이 용이하지 않음을 알 수 있다.

3.1.2 3개 통로식 배기가스 유동 해석

먼저 본 고안 기술의 하나인 3통로식의 효과를 분석하기 위하여, 연소가스의 배출 유로가 3개 그리고 보조 이젝터가 없이 기존의 주 이젝터만 설치된 경우에 대하여 유동해석을 수행하였다. 해석 대상인 검사체적 범위는 연소실을 제외한 배출통로와 연도에 대하여 유동해석을 수행하였으며, 그 결과는 Figure 5와 같다. 해석에 적용한 경계조건은 Table 1과 동일하며, 연소실 출구에서의 연소가스 온도를 1,200℃, 벽체는 내화벽돌로 설치되므로 완전단열로 간주하였다.

해석결과 최대유속은 노즐 목에서 무통로식과 동일하게 66.9m/s, 2.5m 상부 연도에서의 온도는



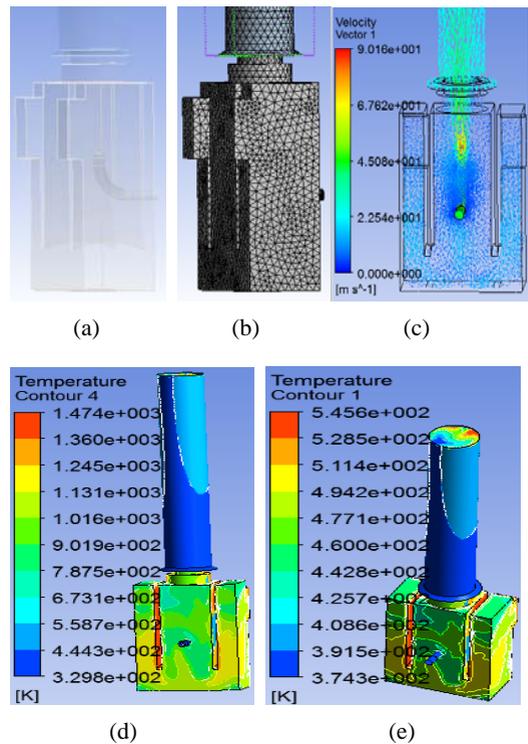
(a) Discharge channel modelling, (b) Mesh, (c) Flow stream of flue-gas, (d) Temperature contour, (e) Flue-gas temperature at 2.5m of discharge chimney

Figure 5: CFD analysis for three discharge channel system in incinerator.

최대 375℃로 늘어났다. 이는 무통로식 보다 연소가스 냉각이 용이하게 이루어지고 있으나, 국제해사기구의 규정인 350℃를 약간 상회하는 값을 나타내고 있다.

3.1.3 3통로 및 보조 이젝터식 유동 해석

본 고안인 연소가스의 배출 유로가 3개 그리고 이젝터가 2개 설치된 시스템의 대표적 유동해석은 Figure 6과 같다. 해석에 적용한 경계조건은 Table 2와 같다. 해석결과 최대유속은 보조 이젝터 부에서 90.1m/s, 2.5m 상부 연도에서의 온도는 최대 272℃로 늘어났다. 이는 연소가스 냉각이 원활하게 이루어지고 있음을 보여주며, 기존 대비 유속은 134%, 온도는 국제해사기구의 규정인 350℃ 보다



(a) Discharge channel and ejectors ,modelling, (b) Mesh, (c) Flow stream of flue-gas through main and sub-ejectors, (d) Temperature contour, (e) Flue-gas temperature at 2.5m of discharge chimney

Figure 6: CFD analysis for three discharge channel and two ejector system in incinerator.

78℃나 낮은 값을 나타내고 있다.

그러므로 3개의 연소가스 배출통로, 2개의 이젝터 시스템의 적용으로 선박용 소각로의 성능이 월등히 개선됨을 알 수 있다.

Table 2: Boundary conditions for CFD analysis.

Number	Description
Main ejector	2.5831 kg/s, 50℃
Sub-ejector	0.2 kg/s, 50℃
Flowrate of flue-gas	0.3703 kg/s
Temperature of flue-gas	1,200℃

3.2 고안 시스템의 성능변화

3.2.1 연소가스 온도에 따른 배기가스 온도변화

Figure 7은 소각기 연소실에서 배출되는 연소가스 온도가 900℃부터 1,200℃까지 변화될 때, 3통로식, 3통로 2개 이젝터식의 연도 2.5m 지점에서의 배기가스 온도를 나타낸다. 추가 이젝터가 없는 3통로식 경우는 배기가스 온도가 307℃부터 393℃로, 연소실 온도가 1200℃인 경우 IMO 규정온도인 350℃를 상회하고 있다. 반면, 보조 이젝터가 설치된 경우는 227℃~272℃가 되었다. 이는 고온의 연소가스가 배기통로 내부에 설치된 보조 이젝터의 찬공기와 사전 혼합되어 냉각되어지는 것에 기인한 것으로 판단되며, 보조 이젝터가 연소가스 온도 저하에 매우 효과적임을 보여준다.

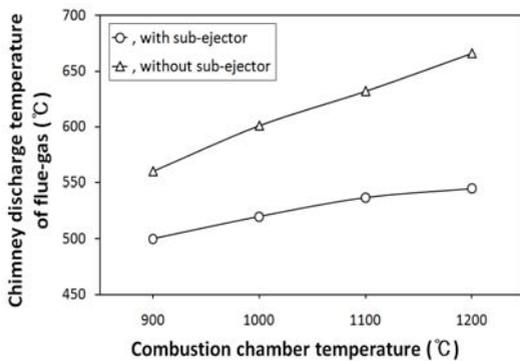


Figure 7: Flue-gas temperature change at 2.5m chimney versus combustion chamber temperature.

3.2.2 이젝터 유량 변화에 따른 배기통로입구 속도

Figure 8은 주 이젝터와 보조 이젝터의 전체 유량이 변화될 때 연소실 출구 즉, 배기통로 입구에서의 연소가스가 흡입되는 유속(V_i)를 나타낸다. 기준 공기유량은 소각기 설계유량인 2.7831kg/s이며, 이젝터 전체 공기유량이 90%~120%로 변화될 때 연소실 배기흡입유속(V_i)은 12.2m/s에서 15.8m/s로 변화되어 이젝터 유량이 증가하면 원활한 배기가 이루어짐을 알 수 있으나, 유량이 110% 이상 증가에서는 유속의 증가가 둔화됨을 알 수 있다. 이는 이젝터 노즐의 유속이 공기가 갖는 엔탈피 차의 제공근에 비례하기 때문이며, 이젝터 노즐의 유속의 변화와 함께 연소실 배기흡입유속도 변화하게 된다. 한편, 이젝터 전체 공기유량의 증가는 공기송풍기의 용량 증가와 동력의 소요가 증가하는 단점을 갖게 된다.

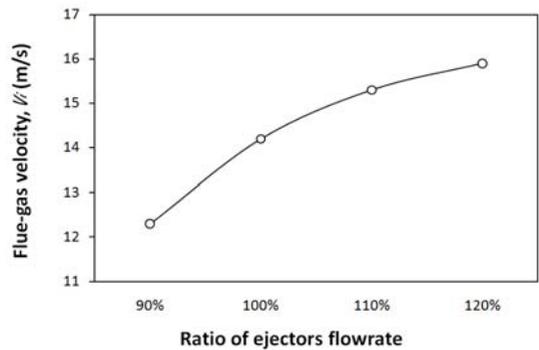


Figure 8: Flue-gas velocity at the combustion chamber exit versus ejectors flowrate variation.

3.2.3 보조 이젝터의 유량변화에 따른 배기속도

Figure 9는 배기 통로 내부에 위치한 보조 이젝터의 유량이 변화될 때 연소실 출구 즉, 배기통로 입구에서의 연소가스가 흡입되는 유속의 변화를 나타낸다. 100% 값으로 기준한 보조 이젝터의 공기유량은 설계유량인 0.27518kg/s이며, 보조 이젝터의 유량이 증가하는 만큼 주 이젝터의 유량이 총유량 2.7831kg/s에서 감소하는 것으로 하였다. 보조 이젝터 공기유량이 100%~130%로 변화될 때, 연소실 배기흡입유속은 14.2m/s에서 20.2m/s로 변

화되어 보조 이젝터 유량이 증가할수록 원활한 배기가 이루어짐을 알 수 있다. 즉, 통로 내부의 보조 이젝터의 연소실 연소가스의 배출에 큰 영향인자가 되며, 배출성능을 크게 향상시키는 것을 알 수 있다. 즉, 보조 이젝터의 유량을 늘리거나, 연소가스 배출 통로에 설치되는 보조 이젝터의 개수가 증가하면 연소가스 배출 성능이 향상되는 것을 알 수 있다.

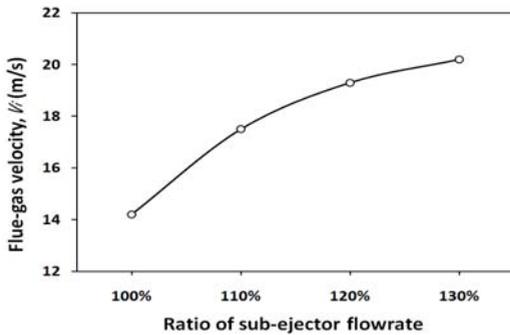


Figure 9: Flue-gas velocity at the combustion chamber exit versus sub-ejector flowrate variation.

4. 결 론

선박용 소각기의 배기가스의 온도를 낮추고 연소실 배기가 원활하게 배출되도록 성능을 개선하고자 본 연구는 연소배기가스의 배출 통로를 3개로 하고 배기통로 내에 보조 이젝터를 설치한 시스템을 고안하여 유동 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 연소배기가스 3통로식은 2.5m 상부 연도에서의 온도가 최대 375℃로, 이는 기존의 무통로식 보다 연소가스 냉각이 용이하게 이루어지나 국제해사기구의 규정인 350℃를 약간 상회하는 값을 갖는다.

2) 본 연구의 연소가스의 배출 유로가 3개, 이젝터가 2개 설치된 시스템은 기존 소각기에 비하여 유속은 134%, 온도는 국제해사기구의 규정인 350℃보다 78℃나 낮은 값을 나타낸다. 그러므로 3개의 연소가스 배출통로, 2개의 이젝터 시스템의 적용으로 기존의 선박용 소각로의 성능을 월등히 개선시킬 수 있다.

3) 보조 이젝터의 유량은 연소실 연소가스의 배출에 큰 영향인자이며, 유량 증가는 배출성능을 크게 향상시킨다. 즉, 보조 이젝터의 유량을 늘리거나, 연소가스 배출 통로에 보조 이젝터를 많이 설치할수록 연소가스 배출 성능이 향상된다.

후 기

본 연구는 한국산업단지공단의 생산기술사업화 지원 사업으로 수행된 연구결과임.

참고문헌

- [1] IMO Resolution MEPC 76(40), Annex 8., "Standard Specification for Shipboard Incinerator".
- [2] Z. Prelec, et. al., "Technical and environmental aspects of shipboard incinerators design", Pomorski zbornik vol. 43, no.1, pp. 207-217, 2005.
- [3] Bond, D. H., "Ocean incineration of hazardous wastes: An update," Environ. Sci. Technol., vol. 19, no. 6, pp. 486-487, 1985.
- [4] HMMCO, Hydai-ATLAS Incinerator Catalog.
- [5] TEMTEC, TEMTEC Incinerators Catalog.

저 자 소 개



윤상국(尹相國)

1977년 성균관대학교 화학공학과 (공학사), 1982년 연세대학교 대학원 화학공학과(공학석사), 1989년 영국 Southampton대학교 초저온공학과(공학박사), 1983년 - 1992년 한국가스공사 연구개발원(실장), 1993년 - 현재 한국해양대학교 기계에너지시스템공학부 (교수). 관심분야: 냉동공학, 열전달, 초저온공학



장호길(張濤吉)

1989년 부경대학교 기계공학과 (공학사), 1982년 - 1984년 대우조선(주), 1989년 - 1992년 대한스위스화학(주), 1992년 - 2000년 (주)경농, 2000년 - 현재 선보공업(주)(부장). 관심분야: 기계공학, 조선공학