

선박용 소각로 이젝터의 배출온도 변화에 따른 유동과 배기특성

문중권* · 김태한** · 이도형***

*부경대학교 대학원 기계공학과, **동의공업대 자동차과, ***부경대학교 기계공학부

The Stream and Exhaust Gas Characteristics for Variation of Exhaust Gas Temperature of Marine Incinerator Ejector

JOUNG-KWEON MOON*, TAE-HAN KIM** AND DO-HYUNG LEE***

*School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

**Dept. of Automobile, Dong-eui Institute of Technology, Pusan 614-715, Korea

***School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

KEY WORDS: Incinerator ejector 소각로 이젝터, Vacuum pressure 부압, Secondary air 2차 공기, Exhaust gas temperature control system 배기가스 온도조절시스템, NOx 질소산화물

ABSTRACT: An experimental study was performed to investigate the optimal ejector and operating condition of vessel incinerator. Exhaust gas temperature and secondary air which makes vacuum pressure at ejector throat regions were considered as an important factor. According to the measurement of pressure, temperature and nitrogen oxides between non combustion and combustion, we found the stream and exhaust gas characteristics of incinerator. This results can give us the exhaust gas temperature control system, air pollutant reduction method and the optimum ejector design.

1. 서 론

선박용 소각로는 선박 운항 중에 생기는 각종 폐기물을 연소시켜서 배기가스의 원활한 배출과 배기가스의 유해한 성분을 최소화시켜야 하는 두 가지 과제를 가지고 있다. 그러나 현재 육상용 소각로에 대한 연구(Nasserzadeh et al., 1991; Vic et al., 1990; Barr et al., 1989; Albert et al., 1991)는 다양하게 이루어지고 있으나 선박용 소각로에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

선박용 소각로는 제한된 공간에 설치되므로 이젝터 확대부의 길이가 변형된 형태로 시공되거나 현장경험에 의존하는 사례가 많아 제작에서 설치 및 운전에서 이르기까지 시간적, 경제적인 손실이 많이 발생해 왔다. 이를 해결하기 위해서는 소각로에서 연소가스의 원활한 배출을 돕고 배기가스를 적당한 온도로 낮추어 배출시키는 중요한 역할을 하는 소각로 출구부의 이젝터 형상에 대한 연구와 열적 유동특성 및 유해 배기물질 저감을 위한 소각로 운전제어시스템에 대한 연구가 상호 병행되어야 한다.

본 연구는 이젝터 입구부의 공기량 변화, 연소기 출구부의 온도변화 등의 운전조건에 따른 최적의 이젝터 형상을 정립하여 이를 데이터 베이스화 함으로써, 이의 개선을 통한 최적 운전조건 선정과 운전조건에 따른 연소제어시스템의 개발에 관한 기초자료를 얻고자 함을 목적으로 한다. 이렇게 함으로써 배출 규제가 강화되고 있는 유해배기가스 성분인 CO와 NOx성분을 줄이는 차세대 환경소각로의 개발과 더불어 상용프로그램을 이용한 시뮬레이션모델을 개발할 경우, 다양한 형상에 대

한 폭넓은 자료를 제공할 수 있으리라 생각한다.

2. 실험장치와 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 실험장치의 개략도이다. 고온의 연소가스를 발생시키는 연소기 하부 ⑤에서 프로판 가스가 공급되며 1차 연소용 공기는 3마력의 블로워 ①을 통해 연소기의 측면에서 공급되며 이 두 가지의 연소물질을 점화원(토오치)으로 착화시켜서 반응을 일으킨다. 이때, 1차 공기의 압력맥동을 최소화하기 위해 서지탱크 ④를 설치하였으며 1차 공기량은 U자관 마노메타 ②를 통해서 확인하였다. 또한 본 연소기의 연결부는 폭이 72.5mm인 상당히 좁은 통로이므로 연소시 발생하는 화염은 통로의 좁은 영역의 분위기에서 화염의 길이가 상승되어지므로 이를 축소시키면서 동시에 화염의 안정성을 기여하기 위하여 다공성 내화벽돌을 설치하였다. 또한 좁은 공간에서의 소각로의 실제 연소분위기를 조성하기 위해 다공성 고체철판을 설치하여 연소의 안정성과 고열의 복사열을 회수하여 높은 소각로의 출구온도와 상응할 수 있도록 하였다. 또한 이젝터 출구부에 균일한 유동장이 형성될 수 있도록 정류망(300mesh×2)을 사용하였다. 더불어 드라이빙 에어(driving air)의 역할을 하는 2차 공기는 이젝터 밑부분의 4방향에서 5마력의 루츠블로워 ③을 통해 공급되도록 하여 균일한 배출 효과를 꾀하도록 하였다. 또한 압력맥동의 최소화 및 유량가시화는 위의 1차 연소용 공기의 경우와 동일하다.

본 연구의 기초실험에서 유속 및 온도 측정은 3축 이송대를 통해 이젝터의 중심에서 반경방향으로의 거리에 따른 축방향에서 측정된 데이터 값이 등방성의 값을 가짐을 확인하였다(문 등, 1999).

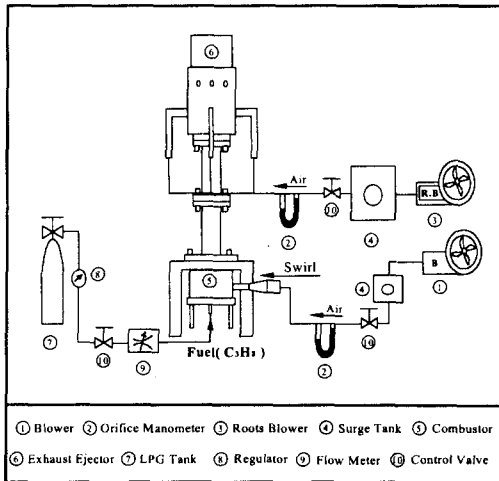


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

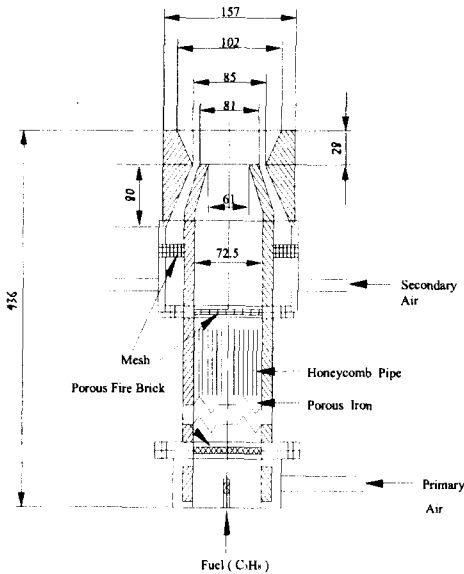


Fig. 2 Details of test section

따라서 본 실험은 이젝터의 중심축에서 한쪽의 반경방향에 대한 축방향 측정만을 행하였다. 또한 실험상 반경방향을 R이라고 하고, 기류방향 즉, 축방향을 Z라 하였다.

Fig. 2는 소각로 이젝터의 상세도이다. 연소는 이젝터의 하단부에 위치한 연소기에서 이루어지고 드라이빙 에어 역할을 하는 2차 공기는 test section하류의 4방향에서 유입하여 이젝터의 목(throat)에서 높은 속도로 분출되어 연소가스와 혼합되어 하류방향으로 나아간다. 이젝터의 바깥쪽 경사각은 19° 이고 안쪽 경사각은 24° 이다. 때문에 반경방향의 측정은 축방향의 이

젝터 경사각에 따라서 조금씩 커지는 측정방식을 채택하였다. 단면은 반경방향(R)과 축방향(Z)으로 나뉘어지며 반경방향으로 2mm씩 최대 50mm까지 측정하였으며 축방향으로 0~100mm까지 측정하였다. 또한 연료 노즐은 연료분사의 균일성을 위해서 노즐 구멍이 8개인 0.5mm의 노즐을 사용하였고 노즐 분사각은 45° 를 이루는데, 이는 연소시의 공기와 연료의 혼합을 촉진시킨다.

본 실험에서 이젝터에서 드라이빙 에어 역할을 하는 2차 공기의 유량변화에 따른 배출효과를 알아보기 위하여, 1차 공기는 일정하게 하고 2차 공기의 유량을 15.92, 17.65 및 19.35 l/sec로 변화시켜 압력, 온도, 산소 및 질소산화물의 배출을 측정하였다. 또한 연소기 출구의 배출온도 변화에 따른 이젝터 출구에서의 배출특성을 알아보기 위하여 연료유량을 변화시켜 실제 소각로 출구온도에 근접하는 연소기 출구온도를 880, 1030 및 1180K로 정하였다. 이 실험 조건을 정리한 것이 Table 1 이다.

Table 1 Experimental conditions

Case	Fuel (l/ sec)	Air(l/ sec)		T(K)	ϕ
		primary	secondary		
A	0.1	13.2	19.35	880	0.18
B	0.165	13.2	19.35	1030	0.29
C	0.185	13.2	19.35	1180	0.33

3. 실험결과 및 고찰

3.1 압력 분포

유동장내 압력분포를 구하기 위해 수냉식 압력프로브를 경사마노메타에 연결하고 다른 한쪽은 대기 상태로 두어 유동장과 대기압과의 차이를 측정하였다.

Fig. 3은 비연소시 2차 공기유량을 변화시켰을 때 Z=5mm단면에서 대기와의 상대압을 측정된 것이다. 유량이 증가할수록 부압이 커짐을 알 수 있다.

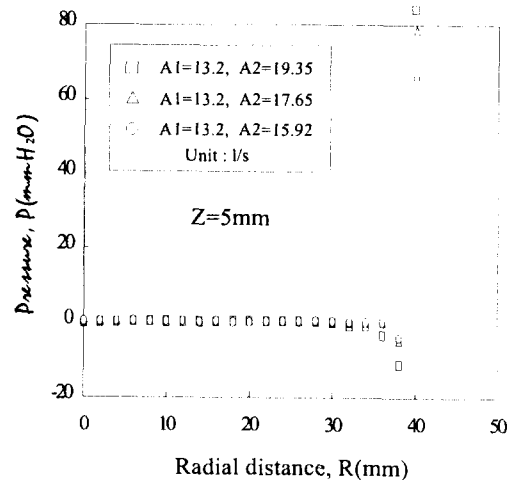


Fig. 3 Pressure distributions of radial direction changing secondary air flow

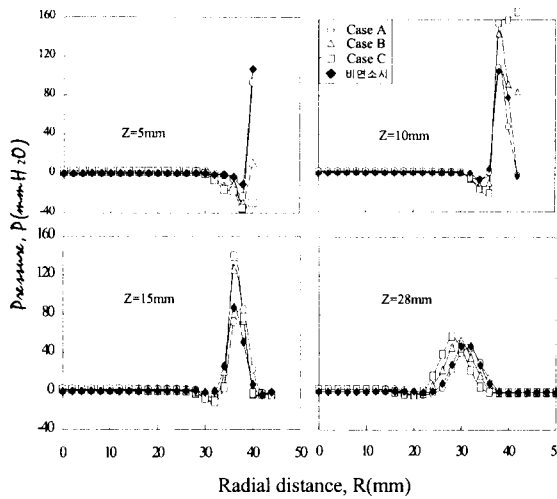


Fig. 4 Pressure distributions of radial direction with combustion

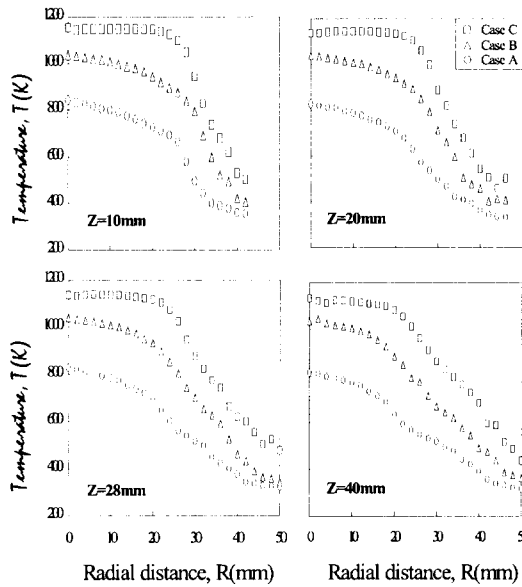


Fig. 5 Temperature distributions of radial direction with combustion (only primary air)

Fig. 4는 연소시의 1, 2차 공기를 모두 공급했을 때의 각 단면에서의 압력분포도이다. 부압이 가장 크게 나타나는 Z=5mm 단면에서는 R=38mm부근에서 약 30~40mmH₂O, Z=10mm 단면에서는 최대 30mm H₂O의 부압이 나타나며, 비연소시에 비하여 부압의 범위가 높게 나타난다. 또한, 출구온도가 높을수록 부압이 커짐을 알 수 있다. 이는 온도가 높아짐에 따라 연소가스의 밀도가 낮아 가벼워짐에 따라서 2차 공기의 영향을 많이 받아 부압이 크게 나타나고 있는 것으로 생각된다.

3.2 온도 분포

유동장내 온도분포를 측정하기 위해 이젝터 출구부에 100 μ m Pt와 Pt/Rh 13% 열전대를 사용하였으며 디지털 데이터 레코드를 통해서 온도로 변환시켜 측정하였다(문 등, 1999).

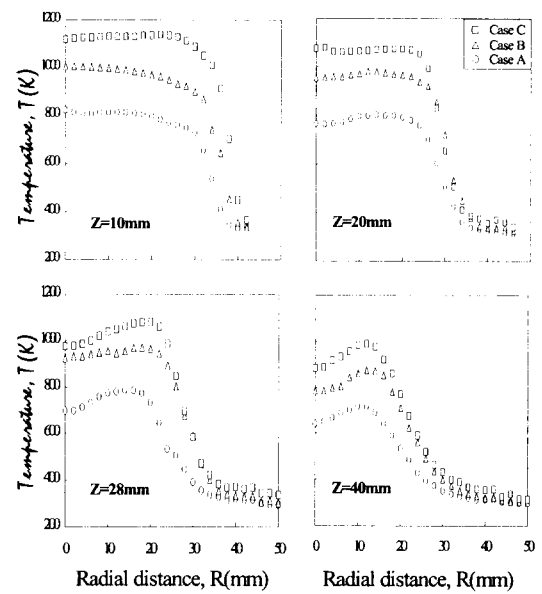


Fig. 6 Temperature distributions of radial direction combustion (primary and secondary air)

Fig. 5는 연료량의 변화에 따라 연소용 1차 공기만 공급했을 때의 온도분포도를 나타낸다. 이것은 2차 공기유입에 따른 이젝터 출구부의 온도변화를 비교하기 위하여 측정된 것이다. 반경방향 R=0~30mm까지 비교적 일정한 분포를 하고 있고 하류로 갈수록 경계층의 온도구배가 완만해 짐을 알 수 있다.

Fig. 6은 연료량의 변화에 따라 1, 2차 공기를 모두 공급했을 때의 온도분포도이다. 축방향 하류로 갈수록 연소기출구 배기가스와 2차 공기의 경계 영역부근의 온도구배가 완만해지고 Z=28 mm 단면부터는 축중앙부의 온도가 980K 이하로 낮아지며 2차 공기로 인한 냉각작용으로 하류에서는 온도가 800K까지 떨어짐을 알 수 있다. 특히 Fig. 5와 대응시켜서 보면, 하류로 갈수록 2차 공기의 영향이 커짐을 알 수 있고 또한 전반적인 온도분포형상이 크게 변하고 있다.

3.3 연소 배출물 분포

연소시 유동장내 NO_x분포를 측정하기 위해 이젝터 출구부에서 직경이 1mm인 수냉식 스텐레스 프로브를 사용하였으며, 이때 채취된 샘플가스는 NO_x분석기 (NOA-7000 SERIES)를 이용하여 측정하였다.

Fig. 7은 Z=28mm에서 1차 공기만 공급했을 때의 NO, NO₂, NO_x 및 O₂분포도이다. 이것은 2차 공기유입에 따른 이젝터 출구부에서의 배출물 변화를 알아보기 위해서 측정된 것이다. 당량비가 높을수록 NO_x, 특히 NO의 분포가 많아지며, O₂의 분포는 상당히 다른 형상을 띠고 있다.

Fig. 8은 Z=28mm에서 1, 2차 공기를 모두 공급했을 때의 NO, NO₂, NO_x 및 O₂분포도이다. Fig. 7과 비교하여 드라이빙에어 역할을 하는 2차 공기로 인해 배출물 전반에서 감소를 보이며 특히 NO가 많이 감소하였음을 알 수 있다.

선박용 소각로 이젝터의 배출온도 변화에 따른 유동과 배기특성

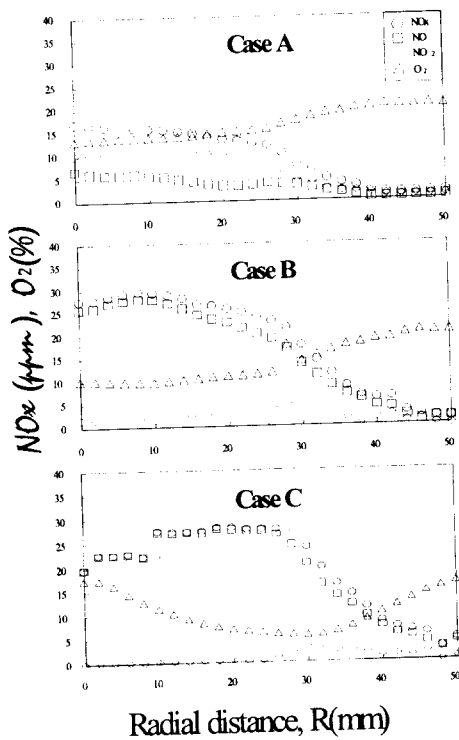


Fig. 7 Emission distributions at Z=28mm with combustion (only primary air)

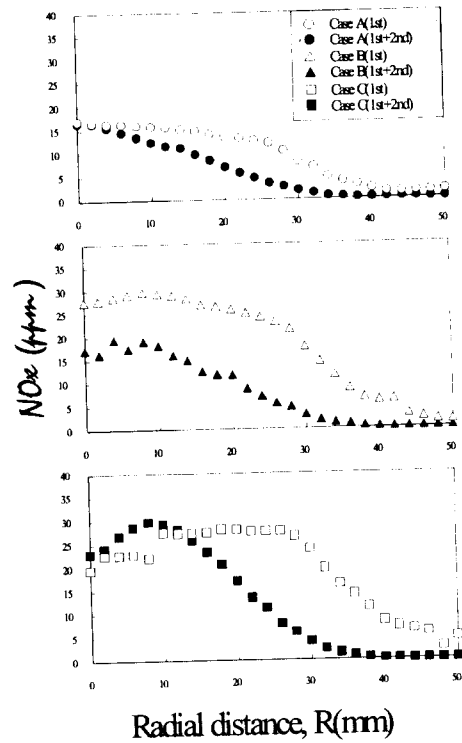


Fig. 9 NOx distributions at Z=28mm with combustion (primary and secondary air)

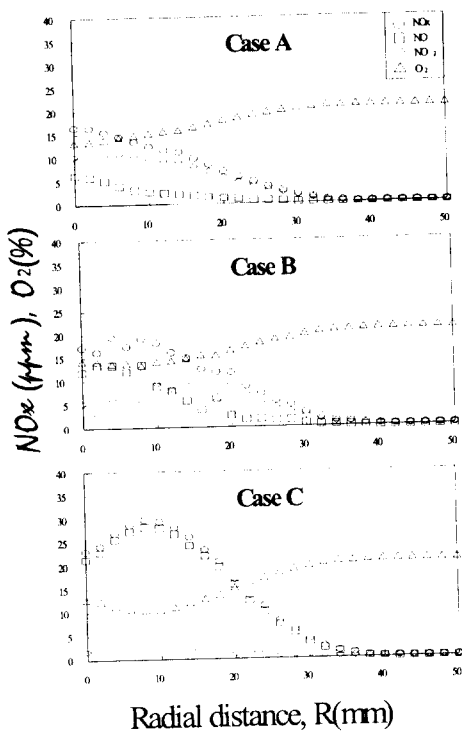


Fig. 8 Emission distributions at Z=28mm with combustion (primary and secondary air)

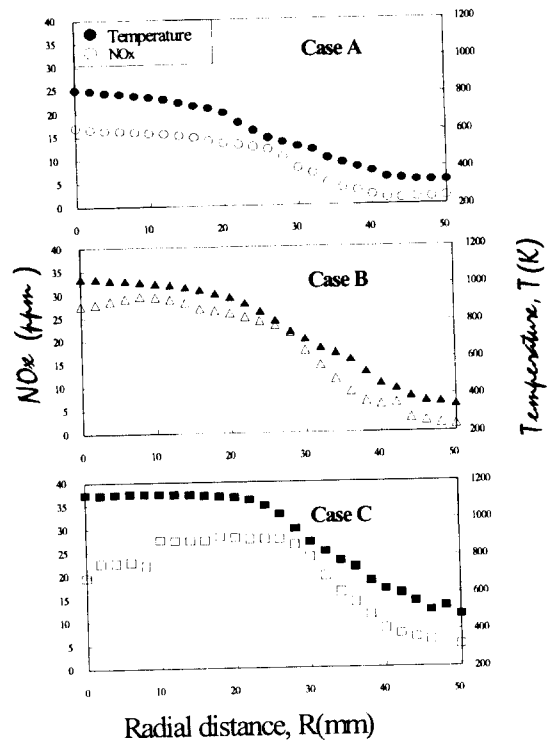


Fig. 10 NOx and temperature comparison at Z=28mm with combustion (only primary air)

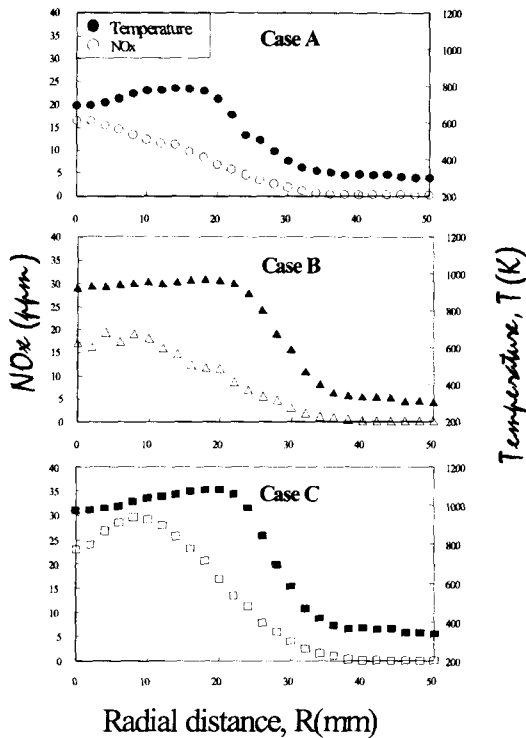


Fig. 11 NOx and temperature comparison at Z=28mm with combustion (primary and secondary air)

Fig. 9는 NOx와 유입공기의 상관관계를 알아보기 위하여 Z=28mm에서의 NOx분포도를 나타낸 것이다. 1차 공기만 공급했을 때보다 2차 공기를 함께 공급했을 때가 훨씬 NOx저감이 두드러짐을 알 수 있다. 이런 경향은 실험조건인 각Case의 모든 경우에서 나타남을 알 수 있다. 한편, NOx와 온도의 상관관계를 알아보기 위하여 Fig. 10에 Z=28mm에서 1차 연소용 공기만 공급했을 때, 그리고 Fig. 11에서는 2차 공기를 공급했을 때의 NOx와 온도 분포도를 나타낸 것이다. 두 그림 모두 당량비가 클수록 즉, 온도가 높을수록 NOx범위가 넓음을 볼 수 있다. 그러나 2차 공기를 공급한 경우(Fig. 11)에는 1차 공기만 공급했을 때(Fig. 10)보다 전역에서 온도 감소가 나타나고 아울러 NOx의 감소가 있는 즉, thermal NOx임을 알 수 있다.

4. 결 론

선박용 소각로 이젝터의 유동과 배기 특성을 규명하여 원활한 배기가스 배출과 유해 물질 저감을 목적으로 압력, 온도, 산소 및 질소산화물 측정과 분석을 한 결과, 다음과 같은 결론들을 얻었다.

(1) 압력 분포를 살펴보면 연소시 이젝터의 배출 시작단면에서 압력이 가장 크게 나타났다. 이는 출구 온도가 높을수록 연소가스의 밀도가 낮아져 2차 공기의 영향을 많이 받아 부압이 크게 형성됨을 알 수 있어, 배기가스의 원활한 배출을 도모하는 것으로 생각된다.

(2) 온도 분포에 관해서는 1차 연소용 공기와 드라이빙 에어

역할을 하는 2차 공기를 모두 공급했을 때의 온도분포는 당량비의 증가에 따라 2차 공기에 의한 냉각효과, 즉 온도차가 커짐을 알 수 있어 2차 공기는 배기가스의 온도 및 이의 원활한 배출을 돕고 있음을 보여준다.

(3) 연소 배출물에 관해서는 연소시 2차 공기를 공급했을 때가 훨씬 NOx의 양이 줄어들음을 알 수 있었으며 NOx 및 온도의 상관관계를 보면 당량비가 클수록 즉, 온도가 높을수록 NOx 생성이 많아지는 thermal NOx가 지배적임을 알 수 있었다.

이상과 같이 선박용 소각로 이젝터의 배출특성을 소각로에서 배출되는 온도 변화에 대하여 고찰하여 보았으나, 최적의 이젝터 설계를 위해서는 이젝터 형상 변화 및 2차 공기의 주입량의 변화 등에 관한 지속적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- 문중권, 김태한, 이도형(1999). "소각로 이젝터의 배출온도 변동에 따른 유동특성", 한국동력기계공학회 '99춘계학술대회는 문집, pp 84~89.
- 문중권, 김태한, 이도형(1999). "소각로 이젝터의 배출온도 변동에 따른 배기특성", 한국동력기계공학회 '99춘계학술대회는 문집, pp 34~39.
- 문중권 외 3명(1999). "중앙분공형 보염기후류에 안정된 난류 확산화염의 구조에 관한 연구(II)", 한국동력기계학회지 제3권 제3호, pp 29~35.
- Albert C. Frost, John E. Sawyer and Jerry C. Summers(1991). "Kinetics and Transport Parameters for the Fixed Bed Catalytic Incineration of Volatile Organic Compounds", Environ. Sci. Technol., Vol. 25, No. 12, pp 2065~2070.
- Barr, P. V., Brimacombe, J. K and Watkinson, A. P.(1989). "A Heat-Transfer Model for the Rotary Kiln : Part I. Pilot Kiln Trials", Metallurgical Trans. B, Vol. 20B, pp 403~419.
- Frank M. White 지, 조강래 외 2명 공역(1995). "유체역학(제3판)", 최중당, pp 410~431.
- Nasserzadeh, J. Swithenbank and B. Jones(1991). "Three-dimensional modeling of a municipal solid waste incinerator", Journal of the Institute of Energy, pp 166~175.
- Vic A. Cundy, Arthur M. Sterling and T. W. Lester(1991). "A study of Conditions at the Exit of a Full Scale Industrial Incinerator", Environ. Sci. Technol., Vol. 25, No. 2, pp 223~232.
- 水谷幸夫 著, 李度衡 外 1名 共譯(1992). "燃燒工學(第2版)", 東明社, pp 93~320.

2000년 1월 11일 원고 접수

2000년 4월 14일 수정본 채택