

선박용 발전기관의 배기배출물에 관한 실험적 연구

조권희* · 이진욱** · 이상득**

An Experimental Study on Exhaust Gas Emissions of Marine Generating Diesel Engine

Kwon-Hae Cho* · Jin-Uk Lee** · Sang-Deuk Lee**

Abstract : The internal combustion engine has been widely used as power source, such as vehicles, industrial machine, power plant, military and marine engine, etc.. Especially, diesel engine has come to occupy most of engines for marine use, due to high thermal efficiency, durability, reliability and high output. But, the exhaust gas emissions of diesel engine came to be considered the major pollutional source, like the destruction of ozone layer, global warming, acid rain and photochemical smog, etc. Therefore, IMO adopted the regulations for the prevention of air pollution from ships as MARPOL 73/78 Annex VI in September, 1997 and this convention will be effectuated on May 19, 2005. But the restriction for NOx is applied to each diesel engine with a power output of more than 130kW which is installed on a ship constructed, which undergoes a major conversion on or after 1 January 2000. In this study, the generation mechanism was investigated for various exhaust gas emissions in diesel engine. And the emission characteristics of exhaust gas was understood for generating diesel engine.

Key words : Exhaust Gas Emissions(배기배출물), Pollutional Source(오염원), Environmental Protection(환경보호), NOx Technical Code(NOx 배출에 관한 기술코드)

1. 서 론

1860년 프랑스의 Lenor가 최초 상업적인 엔진으로서 가스기관을 개발한 이후, 내연기관은 차량용, 산업기계용, 발전용, 군사용 및 선박용등 광범위한 분야에서 동력기계로서 사용되고 있다. 특히 디젤기관은 1897년 독일인 Rudolf Diesel에 의해

디젤기관 1호기의 시운전이 성공한 이래, 끊임없는 연구와 기술개발의 결과로 타기관에 비해 높은 열효율과 내구성, 신뢰성 및 고출력을 확보하여 선박용 원동기의 대부분을 차지하기에 이르렀다.

1973년과 1979년 두 차례의 유류파동은 한정된 에너지의 절약과 엔진 효율의 극대화를 위한 여러 가지 신기술의 개발을 촉진하여 선박용 디젤기관

* 책임저자(한국해양대학교 기관시스템공학부), E-mail : khcho@mail.hhu.ac.kr

** 한국해양대학교 운항훈련원

은 저질자사유의 사용이 가능해졌고, 낮은 연료 소비율로 인해 연료의 경제성도 확보하였다. 그러나 1980년대 들어 프레온(CFCs)과 할론(Halon)에 의한 오존층의 파괴, CO₂(탄산가스), VOCs(휘발성 유기 화합물), CFCs, 메탄, NO_x(질소산화물) 등에 의한 지구온난화 문제, SO_x(황산화물)와 NO_x에 의한 산성비의 산림과 호수의 파괴문제, NO_x와 HC(탄화수소)에 의한 광화학 스모그(smog) 형성 등의 환경문제가 새로운 시대의 문제로서 등장하면서, 디젤기관은 에너지의 효율적 이용, 비용절감과 더불어 환경보호라는 관점에서 배기가스의 유해물질 절감대책이 시급히 해결해야 될 중요한 과제로 부각하게 되었다.

한편, 지구환경오염 방지에 대한 관심이 고조됨에 따라, 해상에서는 1954년 해양오염방지협약(MARPOL 73/78로 집약)을 채택, 해상에서의 기름에 의한 오염의 국제적 규제를 실시하고, 육상에서는 대기오염규제가 국가적 또는 국지적으로 고정 및 이동 오염배출원에 대해 일찍부터 실시되고 있으며, 그 규제정도를 더욱 강화하고 있는 추세이다. 이와 같이 세계각국과 국제전문기구들이 환경보호 입법활동을 통해 대기오염규제를 강화하자 국제해사기구(IMO)에서도 1988년 9월 제26차 해양환경보호위원회(MEPC, Marine Environment Protection Committee)에서 Norway의 선박에 의한 대기오염문제의 제기에 이어, 1990년과 1991년의 MEPC 30차, 31차 회의에서 선박으로부터의 대기오염방지를 위한 IMO총회 결의 초안 작성 및 승인을 거쳐, 91년 11월 IMO 제17차 총회에서 이에 대한 결의문을 총회 결의 A.719(17)로 채택하였으며 1997년 9월 26일 지금까지 논의의 대상에서 제외되었던 「선박으로부터 대기오염방지를 위한 협약」을 제40차 MEPC에서 승인하고 제3차 MARPOL 당사국회의에서 채택하였다. 대기오염방지협약은 조기발효를 위하여 별도의 협약으로 제정하지않고 기존의 해양오염방지협약인 MARPOL 73/78의 새로운 부속서(Annex VI)로 채택하여 2005년 5월 19일 발효될 예정이다. 그런데 NO_x 규제에 대해서는 2000년 1월 1일 이후 선박에 탑재되는 출력 130kW이상의 디젤엔진이나, 주요한 개조가 이루어지는 출력

130kW 이상의 디젤엔진에 대해 NO_x 규제안이 적용되고 있다.

본 연구에서는 국내규정을 통해 곧 발효될 운항선의 NO_x 규제에 대비하여, 박용디젤엔진의 배기배출물 생성기구를 조사·연구하고, 한국해양대학의 실습선 한나라호(3630톤, 4000마력, 200rpm)를 이용하여 발전기관에 대해서 부하와 운전시간에 따른 배기배출물의 배출특성을 파악하여 발전용 디젤엔진의 NO_x 저감방법에 대한 연구자료로 이용하고자 한다.

2. 선박용 발전기관의 배기배출물 생성 기구

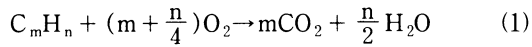
2.1 생성기구

기본적인 디젤엔진의 연소원리는 공기중의 산소(O₂)가 연료속의 탄소(C), 수소(H) 및 유황(S)과 반응하여 이산화탄소(CO₂), 물(H₂O)과 아황산가스(SO₂)를 생성한다. 그리고 공기중의 질소(N₂)는 냉각제로서 엔진을 통과하며, 배기가스 중에 부가적으로 생성되는 대기오염물질은 질소산화물(NO_x), 미연탄화수소(HC), 일산화탄소(CO), 입자상 물질(particulate matters, PM) 등이 있다. 연료유와 소량의 윤활유가 기관내에서 연소되어 열에너지를 발생시키고, 원동장치를 통해 열에너지를 기계적에너지로 전환시키며 NO_x, SO_x, HC, PM 등의 유해성 물질을 배출한다. 다시 말하면 탄화수소계 연료 C_mH_n을 과잉공기와 반응시켰을 때, 완전연소하는 경우 O₂, N₂, CO₂, H₂O만 생성되지만 실제로는 완전연소가 일어나지 않고, 고온의 연소가스에 의해 열해리현상(Thermal dissociation)을 일으킨다. 즉 완전가스 성분인 CO₂, H₂O, O₂가 해리를 일으키고 이 해리에 의해 생성된 H₂, O₂가 다시 해리를 일으킨 상태에서 정지한다. 즉 연소 초기에는 연소실내 가스온도가 낮아서 주 연소기간의 급격한 연소형태와는 다르기 때문에 다른 형태의 반응을 일으킨다. 연소가스가 1000K 이하에서는 CO₂, H₂O, O₂, N₂, CO, H₂만 생성되고 1000K~3000K의 범위에서는 CO₂, H₂O, O₂, N₂, CO, H₂, H, O, OH, NO, (N, Ar)등의 성분을 고려

할 수 있는데 이들 생성물 외에도 중간 생성물과 다른 미량 생성물도 생성하지만 무시할 수 있을 만큼 소량이라 할 수 있다.

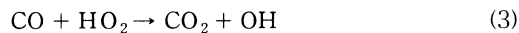
2.1.1 CO₂

탄화수소계 연료중의 탄소와 공기중의 산소가 화.합하여 연소함으로써 배기중에 CO₂가 생성되는데, 그 반응은 식 (1)과 같으며, CO₂ 배출량은 연료의 연소효율에 따라 다르게 나타난다. 즉, 연소된 연료가 많을수록 CO₂ 배출량은 많아지므로 이 배출물은 연소한 연료의 정해진 양에 대하여 최대로 증가되어야 하는데, 이것은 연소가 가능한 범위 내에서 완전히 이루어진다는 것을 의미한다.



그리고 연소과정에서 생성된 CO중에서, CO 생성율에 비하여 비교적 작은 비율로 CO의 일부가 CO₂로 산화되며, 탄화수소 화염에 있어서는 비교적 큰 OH농도를 가지고 있으므로, 그의 산화반응은 식(2)와 같으나, 충분히 낮은 온도(<1300K-1기압)와 높은 연소가스의 냉각을

($-dT/dt > 3.4 \times 10^5 T^2 \exp[-19790/T] K/sec$)에서는 식(3)의 반응율은 매우 느리다. 저온에서는 (3)의 반응도 고려된다.



2.1.2 CO

탄화수소계 연료의 불완전연소로 인해 연소의 중간 단계에서 생성되는 화합물로서 디젤 연소의 경우 CO의 생성량은 공기 과잉율과 연소온도 그리고 연소실 내부의 연료와 공기의 균질성과의 함수관계에 있다. 즉, 당량비가 1이상인 연료과농 연소인 경우, 특히 연소가스의 온도가 2000K 이상이 되어 평형상태가 되면 많은 CO가 생성된다. 연소가 완결될 때 CO₂로 되려는 CO의 산화가 CO와 다른 산화물사이의 재결합 반응을 통하여 일어나는데, 만약 이 재결합반응이 산소의 부족이나 낮은 가스온도의 영향으로 완성되지 못하면, CO는 산화되지 않고 남게된다. 직접분사식 디젤엔진에

서는 분무연소의 초기단계 동안에 농후화염 영역과 희박화염 영역 사이의 경계에서 CO가 생성된다고 믿어지는데, 그 이유는 그 때 국부적인 온도가 충분히 높지 않아서, 산화반응이 거의 일어나지 않기 때문이다. 또 희박화염에서 중간생성물로 생성된 CO는 산소농도와 가스농도가 충분하기 때문에 즉시 산화되나, 분무의 중심과 실린더벽 근처에서는, 국부적인 산소농도와 연료-공기의 혼합상태 및 국부적인 가스온도가 CO를 완전히 산화시킬수 있는 상태가 아니므로, CO는 더욱 많이 생성된다. 부하의 증가나 연료-공기 비율의 증가는 가스온도를 증가시켜 더욱 적은 CO 배출물을 생성한다. 이것은 Perez, Marshall등에 의해 관찰되었는데, 어느 한계를 넘어서 연료-공기 비율을 증가시키면, 온도가 증가함에도 불구하고, 낮은 산화물 농도와 짧은 반응시간 때문에, CO 제거반응이 줄어들어 CO 배출량이 많아진다.

CO 농도는 과잉연료를 전혀 포함하지 않는 이론혼합기에서조차도 1800K이상의 온도에서는 CO 농도가 0.1% 이상이 된다. 이와같이 희박혼합기 영역이라도 고온의 경우에는 CO₂가 CO와 해리반응을 일으키므로 CO는 영으로 되지 않는다. 1500K 이하에서는 미미한 정도로 된다. 이로부터 $\Phi \leq 1$ 인 희박혼합기를 완전연소시켜 저온에서 배출시키면 CO는 거의 배출되지 않음을 알 수 있다. 그러나 실제로는 총합당량비 1.0 이하인 희박연소에 있어서도 CO가 배출되고 특히 왕복식 내연기관에 있어서는 $\Phi = 0.9$ 정도에도 상당히 많은 CO가 배출된다. 그 이유로는 ① 혼합이 균등하지 않아서 국소적으로 연료과농의 가스피가 배출되고 ② 급냉에 의해 반응이 동결되어 고온에서의 평형조성을 유지한 가스가 배출되기 때문이다. 일반적으로 선박디젤기관으로부터의 CO 배출은 높은 공기과잉율과 비교적 충분한 연소과정으로 인해 높지 않지만, 정비불량이나 저부하 운전시에는 불완전 연소가 되므로 CO의 배출량이 높게 된다. 따라서 선박으로부터의 CO 배출량을 저감시키는 방법에는 주기적인 기관의 정비나 희박연소 방법 등을 들 수가 있지만 희박연소방법은 NO_x 생성을 촉진시키게 되므로 좋은 해결책이 될 수는 없다.

2.1.3 HC

디젤 배기 가스 중의 미연 HC는 원래의 연료분자나 분해된 연료분자, 또 재결합된 중간화합물로 구성되는데, 이들 HC중의 약간은 윤활유의 불완전 연소에 의해서도 소량 생성되고 미연 HC는 연료분사계통의 결함으로부터 생길수도 있는데, 이들 중 일부분은 쉽게 극복될 수도 있으나, 다른 일부는 엔진이 넓은 속도범위에 걸쳐 운전되므로 피할 수 없는 것도 있다. 미연 HC 배출물을 생성시키는 연료분사계통의 특징 중에는 연료의 2차분사와 상당한 양의 연료를 가지고 있는 노즐 주머니(sac)가 있다. 그리고 연료분부의 지나친 관통은 많은 미연 HC 배출량을 가져올 수 있다. 또 제 1번 피스톤링의 상부틈이 크면, 많은 미연 HC 배출물에 영향을 주는데 연료의 비등점이 낮으면 낮을수록 더 많은 미연 HC배출물을 발생시키는 경향이 있다. 또한, 미연 HC의 생성원인과 저감대책은 CO의 경우와 거의 같으며 양자의 배출경향이 비슷한 경우가 많아, 한쪽을 감소시키면 다른 쪽은 그에 비례해서 감소된다.

2.1.4 SO_x¹⁾²⁾

연료 중에 포함된 유황은 엔진의 연소실에서 연소과정 중에 산화되어 SO_x를 형성하는데 주로 SO₂(93%)와 SO₃(7%)이다. 디젤엔진의 SO_x 배출은 연료유의 유황함유량을 낮추거나 배기가스 탈황기술을 사용함으로써 억제할 수 있다. 여러 가지 다루기 어려운 흡수제들 [(Ca(OH)₂, CaCO₃, Na₂CO₃]을 사용하는 배기가스 탈황방법은 선박에서의 사용이 어렵다고 보여지며, 선박에서는 Scrubber내에서 배기가스를 해수 세척하는 방법이 사용된다. 이 방법은 SO_x 감소는 물론 NO_x 또한 10-20% 정도 감소된다. 그리고 세척수에 의한 2차 오염문제에 대하여서는, 해양중의 유황분은 대략 10¹⁵ 톤을 넘으며, 화석연료 전 매장량 중의 총유황량은 대략 10¹¹톤으로서, 화석연료중의 유황분의 10,000배가 해수중에 있기 때문에 선박에서 배기를 세척하여 바다에 버리더라도 별 문제가 없다고 말하고 있다. 대기오염방지법에서도 제한적인 투기규제를 하였다.

2.1.5 입자상물질 (particulate matters)

디젤엔진으로부터 배출되는 미립자들은 엔진의 형식과 운전조건에 따라 다르며, 액체미립자와 고체미립자로 나눌 수 있는데, 고체미립자의 대부분은 그을음(soot)이다. 액체미립자는 냉각상태의 시동, 무부하 운전 및 저부하 상태에서 배출되는 하얀색이나 파란색을 띤 연무의 증기로 나타나며, 이들의 대부분은 연소하지 않고 배출되는 연료와 약간의 윤활유로 구성되고, 부하가 증가하여 연소가스의 온도가 상승하였을 경우나 실린더 벽의 온도가 상승하였을 경우에 그것이 없어지며, 그을음은 특히 최대부하에서 불완전 연소과정의 생성물로 방출된다. 또한 미립자는 인체의 호흡기 질환을 유발시킬 뿐만 아니라. 연소되지 않은 윤활유나 연료유와 혼합되어 배기 보일러에 축적할 경우 배기 계통의 배압 형성이나 보일러 내부의 화재를 일으킬 잠재성을 지니고 있다. 이러한 미립자의 저감 대책에 있어서는 정제된 양질의 연료유를 사용하는 방법, 미립자의 생성을 억제하는 연료 첨가제를 사용하는 방법, 연료 분사압력을 증가시켜 공기와 연료의 혼합을 양호하게 하는 방법, 그리고 실린더유 공급량을 최대한 줄이는 방법 등이 있다. 그러나 이러한 저감 대책들은 또 다른 생성물질을 조장하든지 혹은 다른 불리한 결과를 초래할 수도 있으므로 적절한 타협이 요구된다.

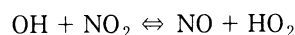
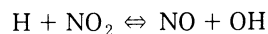
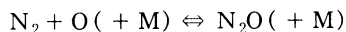
한편 현재의 PM규제는 중량분포를 기준으로 하고 있지만 인체 유해성을 보면 중량비율은 미미하나 입자수량 면에서는 대부분을 차지하고 있는 nm 크기의 입자가 μm 크기의 입자에 비해 인체에 유해도가 크다. 따라서 2010년 경에는 수량규제가 디젤엔진의 중요한 관심대상이 될 것이다. 현재는 국내에서는 PM₁₀(직경이 10μm)을 규제하고 있으나 미국은 PM_{2.5}를 규제하고 있다.³⁾

2.1.6 NO_x

선박용 디젤기관의 유해배기가스 중에서 그을음과 미립자는 현존기술로 충분히 여과가 가능하며, HC와 CO는 거의 완전연소에 가깝기 때문에 역시 큰 문제가 되지는 않고 CO₂에 대하여서는 열효율이 높기 때문에 다른 화석연료기관에 비하여 유리하다. 따라서, 현재 문제가 되는 것은 SO_x

와 NO_x인데 전자는 인간의 활동으로 대기중에 방출되는 전체량의 4%, 후자는 7%정도가 선박용 디젤기관에 의한다고 한다. 질소산화물은 대기 중의 질소와 산소의 화학반응으로 생성되는 물질로서 그 종류로는 NO, NO₂, NO₃, N₂O, N₂O₃, N₂O₄, N₂O₅, N₂O₆ 등⁴⁾이 있으나 대기오염에 중요한 영향을 미치는 것은 NO, NO₂, N₂O가 있다. 한편 디젤엔진에서 배출되는 질소산화물은 주로 NO와 NO₂로 우리가 질소산화물이라고 할 때에는 NO와 NO₂를 뜻하며 NO_x라고 표기한다. NO_x의 생성을 지배하는 것으로 온도, 산소의 국부농도 및 연소의 지속시간이 있다.

디젤기관의 NO_x는 고온 연소과정 동안에 공기 중의 N₂나 연료중에 함유된 질소분(N)이 O₂나 O₂의 혼합물로부터 해리(dissociation)에 의하여 생긴 산소원자와 고온 반응하여 모든 연료의 분무영역에서 다양한 농도로 생성된다. 이와 같이 디젤기관에서 생성 배출되는 NO_x는 높은 열효율을 위한 고온 사이클과 저속회전, 고압축비 등의 채용, 연료와 공기의 혼합과 연소과정이 지극히 복잡한 디젤연소의 특성 등으로 인해 다른 열기관에 비해 생성정도가 높은 편이다. NO_x는 NO, NO₂ 등으로 이루어지며, 기관에서 배출되는 성분비 NO₂/NO는 S.I.엔진이 2% (당량비 0.85에서), NO₂/NO_x가 C.I.엔진에서 10~30%정도이다.⁵⁾ 다시 말해 NO₂와 N₂O양은 NO에 비교하여 상대적으로 매우 적어서 NO₂와 N₂O양은 보통 저부하에서 NO량의 30%정도이지만 부하의 증가와 함께 5% 이하로 감소한다. 따라서 NO₂와 N₂O양은 NO 양에 비해 미량이므로 무시하거나 연소실 화염 확산에 따라 NO로 전환되므로 중간생성물로 생각할 수 있다. N₂O 중간생성물 및 NO₂를 통한 NO 생성반응식은 다음과 같다.



이와 같이 화염대(flame zone)에서 형성된 NO는 아래와 같은 반응으로 NO₂로 빠르게 전환된다.

$NO + HO_2 \rightarrow NO_2 + OH$ 뒤이어 다음의 반응에 의해 $NO_2 \rightarrow NO$ 로의 변환이 일어난다. $NO_2 + O \rightarrow NO + O_2$ 이 과정에서 냉각공기의 혼합으로 인해 화염내에 형성된 NO₂가 동결되면, 이 반응이 성립되지 못해 NO₂ 양이 증가한다. 즉 저부하로 운전중인 디젤엔진에서 볼 수 있다. NO는 연소 과정중 N₂의 산화에 의해 생성되는 초기산화물의 90%이상을 차지하며, 다시 팽창과 배기과정을 지나면서 NO₂와 N₂O를 생성하는데 각각 NO 양의 5%와 1%정도이다. 또한, NO₂는 NO 농도가 100ppm이상이고, O₂가 충분하며 온도가 1100℃ 이상인 상태의 연소실에서 직접 생성이 가능하고, 또 대기로 방출된 NO가 공기 또는 산소와 접촉하여 적각색의 NO₂로 산화되기도 하며, 자외선에 의하여 NO가 NO₂로 광산화되기도 하여, 대기중에는 NO와 NO₂가 혼재한다.

3. 실험장치 및 실험방법

본 연구의 실험에 사용된 선박은 실습선 [한나라]호로 발전기관은 SSangyong MAN B&W 5T 23 LH-4E로 실린더 직경 225mm, 행정 300mm 발전기 부하 480kW를 담당하는 725PS, 경유 또는 A중유를 사용하는 디젤기관이다. Table 1에 사용연료유의 사양을, Table 2에 발전기관의 사양을 나타낸다.

3.1 실험장치

발전기에 대한 배기가스분석을 위해 과급기출구직후, 배기가스 온도 측정 보스(boss)에 배기가스를 뿜 수 있는 한 균등하게 흡입할 수 있도록 120도 마다 6개의 흡입공을 설치한 동체 샘플링 튜브를 연결하고, 끝가지관을 붙여 프로브(probe)를 압입하여 계측기에 이르도록 했다. 또한 시료 채취 라인을 청결하게 하기 위하여 드레인 밸브를 이용하여 샘플링 전에 불순물을 제거하였으며, 채취된 배기가스는 정전위전해방식인 Testo 350 계측기로 측정되었다. 이 정전위 전해법 계측기에서는 배기가스 중에 포함되어 있는 수분 불순물들을 전처리 장치의 필터 및 샘플링 호스내에서 드레인

시키고, O₂, CO, CO₂, NO, NO₂, SO₂를 계측한다. 측정된 각 배기가스 성분중에 O₂ 와 CO₂는 백분율(%)로, CO, NO, NO₂, SO₂는 농도(ppm)단위로 표시하였다. Testo 350 계측기의 성능을 Table 3에 나타내고 있다.

Table 1 Characteristics of marine fuel oil

| | Fuel oil | |
|------------------|-------------|-------------|
| | G/E | M/E |
| specification | Gas oil | LRFO(B oil) |
| S.G at 15/4℃ | 0.8423 | 0.9225 |
| viscosity | 2.52cSt/40℃ | 43cSt/50℃ |
| flash point | 62.4℃ | 93.5℃ |
| sulfur | 0.87% | 2.64% |
| water & sediment | trace | 0.05% |

Table 2 Specifications of G/E

| | Generator engine |
|------------------------|--|
| model | SSHI MAN B&W 5T23LH-4E |
| output × speed | 725bhp × 720rpm |
| bore | 225mm |
| stroke | 300mm |
| firing order | 1-2-4-5-3 |
| fuel | gas oil or marine diesel oil |
| injection timing | 5.5~7.0 BTDC(기준5.5) +2.5 -1.5 |
| MEP at MCR | 15.2 kg/cm ² |
| Pmax at MCR | 117 kg/cm ² |
| mean piston spd at MCR | 7.2 m/s |
| SFOC | 147g/bhp/hr+3% at 100% load |
| type | vertical, single acting, 4 cycle, direct injection water cooled, turbo charged diesel engine |
| exh. gas | 4700 kg/hr at MCR gas temperature: 275~350℃ after T/C |

Table 3 Particular of Detectors

| CPE(Controlled potential electrolysis) 정전위전해법 | | | |
|--|---|-----------------------|---------------|
| | measuring method | Range | Accuracy |
| NO | electro chemical cell | 0~3000ppm | ±5% of m.v. |
| NO ₂ | electro chemical cell | 0~500ppm | ±10ppm |
| CO ₂ | digital calculation from O ₂ | 0~CO ₂ max | |
| CO | | 0~10000 ppm | ±20ppm |
| O ₂ | electro chemical cell | 0~21% | ±0.2 vol % |
| SO ₂ | electro chemical cell | 0~5000ppm | ±20ppm |
| T | | -40~1200℃ | ±0.5% of m.v. |

3.2 실험방법

발전기관은 shop test record를 참조하여 D2 test mode에서 10%부하시험을 생략하고 무부하와 85% 시험을 추가하였으며, 엔진 분해정비 후 운전시간, 1700시간과 2700시간에서 측정하였다. 주기관(SSHI MAN B&W 4000PSx200rpm)은 E3 모드를 사용하여 데이터를 취득하였으며 본 논문에서는 동일 백분율 부하에서의 배출경향을 발전기관과 비교하는데 사용하였다.

- 100% × 480 kW × 720 rpm
- 85% × 384 kW × 720 rpm
- 75% × 360 kW × 720 rpm
- 50% × 240 kW × 720 rpm
- 25% × 120 kW × 720 rpm
- 0% × 0 kW × 720 rpm

데이터는 스피드의 매칭이 끝나고 일정시간의 안정기간을 가진 후에 얻어지는 값을 취하였다. Table 4는 IMO 규정 시험 모드를 보여준다.⁶⁾

발전기관의 배기배출물 측정을 위해서는 운전 부하 82%에서 작동되는 우선차단(preferance trip)을 방지하기 위해 먼저 우선차단 회로를 무효화시켜야하고, 75% 이상의 부하를 걸기 위해서는 선수

스러스터(bow thruster)를 시동하고, 100%부하를 얻기위해서는 선수 스러스터를 계속 작동하여야만 한다.

Table 4 Test cycles in the Technical Code

| | | | | | | | | | | |
|---------------|----|------|------|------|------|-----|-----|-----|------|------|
| % rated speed | | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 91 | 80 | 63 |
| % rated load | | 100 | 75 | 50 | 25 | 10 | 100 | 75 | 50 | 25 |
| Weight factor | D2 | 0.05 | 0.25 | 0.30 | 0.30 | 0.1 | - | - | - | - |
| | E2 | 0.20 | 0.50 | 0.15 | 0.15 | - | - | - | - | - |
| | E3 | - | - | - | - | - | 0.2 | 0.5 | 0.15 | 0.15 |

본 계측기의 sampling hose는 온도가 조절되는 가열용 hose는 아니지만 NO_x code에서 규정한 70°C 이상을 50%이상의 부하에서는 만족했다. 그리고 본선의 발전기는 최대정격 용량이 480kW로 bow thruster 등 대용량 부하를 필요로 하는 입출항 부하에 맞게 설계되어있어, 실제적으로 하절기에는 전부하의 37%인 180kW, 동절기에는 25%인 120kW 정도의 지속적인 저부하 운전을 하고 있다. 이와 같은 저부하 운전은 양질의 경유를 사용하고 있음에도 불구하고 여러 가지 결함을 보이는데, 대표적인 것으로 연소가스의 역류에 의한 흡배기 밸브봉의 탄화물의 퇴적·성장이다. 이로 인해 소기의 유리가 협소해져서 공기부족을 초래함에 따라 배기가스 온도 상승, 압축압력저하 등 정상운전이 불가능해 3000시간을 기준으로 정기적인 분해·소제작업을 하고 있다. 이에 따라 운전시간 1700시간대와 2700시간대의 배기배출물 상태를 파악하였다.

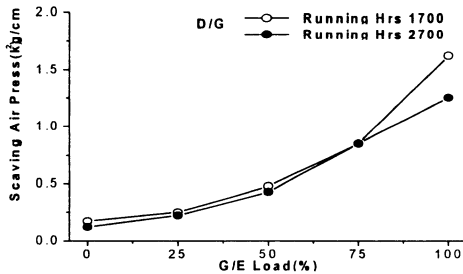


Fig. 1 Change of Scavenging Air Press vs Load

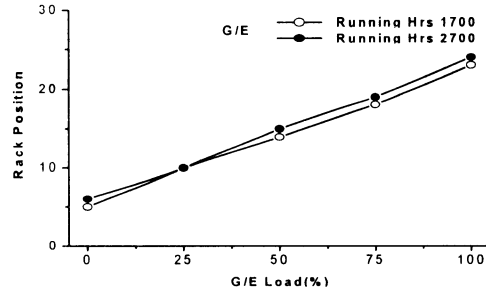


Fig. 2 Change of Rack Position vs Load

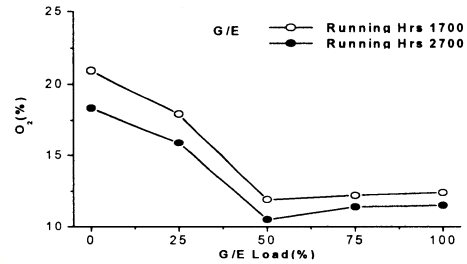


Fig. 3 Change of O₂ concentration in the Exh. Gases vs Load

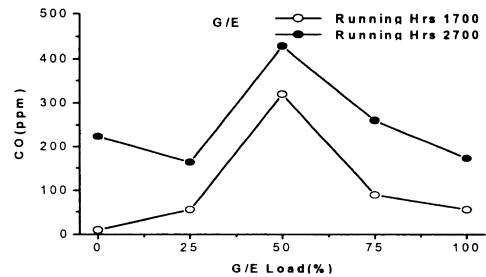


Fig. 4 Change of CO concentration in the Exh. Gases vs Load

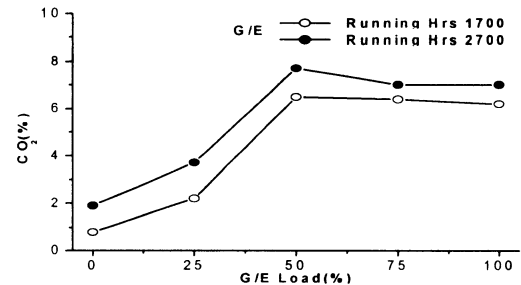


Fig. 5 Change of CO₂ concentration in the Exh. Gases vs Load

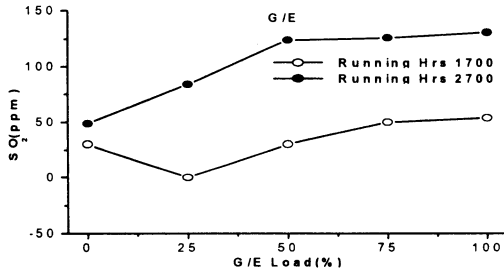


Fig. 6 Change of SO₂ concentration in the Exh. Gases vs Load

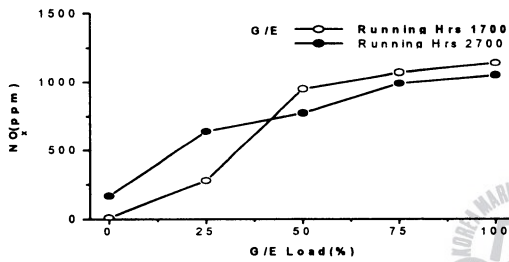


Fig. 7 Change of NO_x concentration in the Exh. Gases vs Load

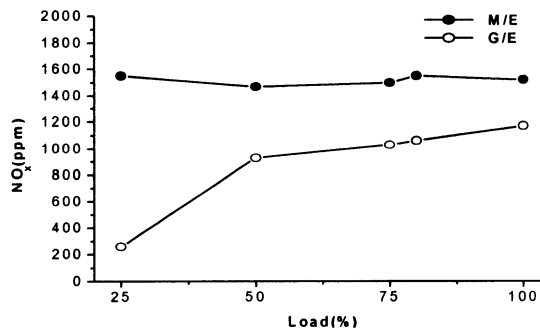


Fig. 8 Comparison of NO_x Variation of M/E & G/E vs Load

4. 실험결과 및 고찰

4.1 부하와 운전시간의 경우

Fig.1에서 Fig.7은 발전기관을 부하와 운전시간으로 비교하여 나타낸 배기배출물의 두 운전시간

에서의 변동을 나타내었다.

Fig.1과 Fig.2는 1700시간과 2700시간에서의 소기압력과 연료랙의 부하에 따른 변동을 보여주고 있다. 운전시간이 적은 1700시간에서 동부하 대비 소기압력은 높게 나타나고, 연료 랙은 덜 들어가는 것으로 나타난다. Fig.3의 O₂ 경우까지 소기의 영향이 일관성을 보이고 있는데, 이것은 운전시간을 더해감에 따라 흡기계통이 탄화물의 퇴적에 따라 조여지고 있음을 보여주며 1700시간대에서 보다 양호한 연소가 이루어지고 있음을 알 수 있다. Fig.3에서 O₂는 50%부하까지는 직선적인 감소를 보이며 그 후에는 미소한 증가를 보이고 있으나 농도가 11~12%(주기관은 14.5%)에 머무르고 있다. CO, CO₂, SO₂는 Fig. 4, 5, 6에서 보듯이 2700시간에서 높게 나타나는데, O₂와 같이 50%부하에서 특이성을 보이고 있다. 이것은 보통 과급기(Turbocharger)를 엔진의 상용부하영역에 최적으로 매칭시킨 결과로 보여진다. 보조블로워를 장착하지 않은 본 엔진에서는 50%대에서 최저의 공기과잉율을 보이면서 가장 불완전한 연소를 보여주고 있다. 이것은 장차 발전기 엔진의 용량 선택에 있어 참고할 만한 사항이라 하겠다.

주기관의 경우, 부하증가에 따라 CO는 감소하고 CO₂는 증가하는 경향을 보여주었는데, 발전기관의 경우에 CO는 25% 부하에서 50% 부하까지 급격히 증가했다가 75% 부하까지 급격히 떨어지고 있다. Fig.3에서 O₂의 농도가 25% 부하에서 급격히 하강하는 경향과 일치하고 있어 O₂ 부족에 따른 결과로 보인다. SO₂는 부하증가와 함께 높은 수치를 보이고 있는데, 분사량의 증가에 따른 것이라 생각된다.

Fig. 7은 부하에 따른 NO_x치를 보여주고 있다. NO_x는 25% 부하까지는 1700시간대에서 낮고, 50%부하부터는 높게 나타난다. 50%부하 이상에서 보여지는 2700시간대의 낮은 NO_x 배출은 공기량의 저하에 따른 것으로 보여진다. 대부분의 MAN B&W 주기관에서는 보조블로워의 작동이 중지되고 과급기에 의한 공기공급이 이루어지는 50% 부하대에서만 NO_x 발생의 주인자로 공기량이 작용하는데 비해 본 발전기에서는 50% 부하 이상에서도 Fig.1에서 보듯이 산소량의 감소가

NOx 발생에 영향을 미치고 있다. 85%의 부하에서는 75~100%의 중간성질을 띠고 있어, 실제 측정에서는 85% 부하에서의 측정을 고려하지 않은 D2 모드(100/75/50/25/ 10% 출력에서의 측정)의 측정으로 충분할 것 같다.

4.2 주기와 발전기관의 부하에 따른 비교

주기관의 주 사용연료인 B오일의 배출특성과 발전기관의 주 사용연료인 경유의 배출특성을 비교하여 Table 5에 나타내었다.

Table 5 Exhaust gas emissions of M/E and G/E

| 주기관과 발전기관의 비교 | |
|-----------------|--|
| O ₂ | 발전기관이 25%까지는 높으나 50%이상에서는 주기관이 높다. 과급 용량 및 공기과잉율은 주기관이 높았다. |
| CO | 주기관은 부하증가에 따라 하강하였으나, 발전기관은 50%대에서의 산소부족에 의한 CO의 특이증가(300-400ppm)가 있었다. 그 밖의 부하에서는 주·발전기관 모두 근사치(100 - 200ppm)를 보였다. |
| CO ₂ | 주기관은 부하증가에 따라 직선 증가경향을, 발전기관은 50%부하까지 직선 증가하다가 그 이후는 약간 하강하는 배출특성을 보였다. 발전기관의 수치가 1.5 배정도 높았다. |
| SO ₂ | 사용연료유의 유황함유량에 따라 뚜렷하게 차이를 보임. M/E이 500-600ppm정도, G/E은 50-100ppm정도 |
| NO _x | 부하의 증가에 따라 증가함. 단 M/E은 50%에서 가장 낮은 수치를 보임. Fig. 8 참조 |

4.3 측정상의 문제점

고정피치 프로펠러를 갖는 주기관의 경우에 테스트모드는 NOx 기술코드에 명기된 E3 즉 출력 중심모드로 운항선의 출력을 정확히 파악하는 것이 어려운 반면, 발전기관을 측정할 경우에는,

- (1) 대부분의 상선에서, 발전기 부하의 80~85%에 우선차단(preferance trip) 시스템을 채택하여, stand-by 발전기가 준비되어 있지 않는 한 주 배전반에서 필요부하를 차단하게 되고 그 이상으로 더 진행될 경우, 과부하 방지를 위해 ACB가 차단하게 되어 있어 100%부하를 걸기

가 힘들게 되어있다.

- (2) 일관성 및 재현성이 문제가 된다. 본 발전기의 실험은 경유 배출물에 대한 실험이었으나 주기관의 실험에서는 잔사 저질유의 사용에 따른 유해배출물의 유입과 응결에 의한 계측기의 잦은 손상과 계측기와 각종 센서들의 일련의 교정 과정 등 정밀 측정을 저해하는 요소가 많았다.
- (3) 연료소비량을 비롯하여 그 밖의 데이터를 정확하게 얻기 위해서는 관련 기기들의 정비와 재교정(recalibration)이 선행되어야하며, 사용연료성상에 대해서는 연료 수급시에 공급업자에 의해 질소분의 함유량이 제공되지 않으므로 정밀 분석을 따로 의뢰하여야만 한다.

5. 결 론

선박용 증속 4행정 발전기관의 배기배출물 특성을 파악하기 위하여 그들의 생성기구를 조사·연구하고, 실제 선박을 이용하여 발전기관의 부하와 운전시간의 조건변화에서 얻어진 계측결과를 비교분석한 결과 경우 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 연속적인 저부하 운전으로 운전시간이 더해짐에 따라 동부하에서 소기압은 떨어지고, 연료분사량은 증가하였다.
2. 산소농도는 50% 부하까지는 직선감소하고, 이후 100% 부하까지 약간 증가하였다.
3. CO는 50% 부하에서 최대치를 나타내고, 부하가 증가함에 따라 급격히 감소하였다.
3. CO₂는 50% 부하에서 최대치를 나타냈지만, 부하의 증가에도 불구하고 50% 부하치와 비슷한(약간 감소) 값을 나타내었다.
4. NOx는 부하의 증가와 더불어 상승하였으나 운전시간에 따라 50% 부하를 경계로 공기과잉율에 따른 배출량의 차이가 나타났다.
5. 주기관과 발전기관의 NOx 배출특성은 부하의 증가와 함께 배출량의 증가를 보이지만, 주기관의 경우, 50% 부하에서 보조블로워가 꺼지면서 공급 공기량의 감소에 따라 NOx 발생량이 최소치를 나타내었다.

참고문헌

- [1] Goran Hellen, "Environmental considerations concerning medium speed engines in marine applications" 1992 SNAME annual meeting paper
- [2] 全孝重, "船舶用 디젤機關의 環境問題", 韓國 船用機關學會 제20권 제3호 pp. 193 (1996.08)
- [3] 정용일, 자동차와 환경, AutoEnv.org, 2차 보완판, p.10, 2004
- [4] 조광명, "대기오염", 청문각, 1990, 김병희의 4, "성문 이화학사전", 교육출판사, 1994
- [5] J.B. Heywood, "Internal combustion engine fundamentals", pp. 577-578.
- [6] MARPOL 73/78, Annex VI(Regulations for the prevention of air pollution from ships), Technical code on control of emission of nitrogen oxides from marine diesel engines, pp. 21-22

