舶用 디젤엔진과 大氣汚染
Marine Diesel Engine and Air Pollution

전효중
H-J Jeon
• 한국해양대학교 명예교수
• 본 학회 고문

김정렬
J-R Kim
• 한국해양대학교 기관시스템공학부

1. 머리말

이미 필자는 이 문제에 관하여 학회가 주관하는 세미나[1]와 학회지[2]에 발표한 적이 있으며, 본인외에도 많은분이 학회가 주최하는 세미나[3], 또는 논문과 기고문[4]~[10]에서 이문제를 논의한 일이 있으므로 본고에서는 이미 발표된 내용과의 중복을 피하면서 선박용 엔진의 배기가스를 규제하게 된 배경과 기준 및 규제가 적용되기 시작한 2000년 1월 이후 새로이 논의되기 시작한 문제들을 소개하고자 한다.

지금까지 박용 디젤엔진의 개발과제는 주로 연료의 경제성, 엔진의 신뢰성과 이용성의 향상에 주력하여 왔으며, 배기가스문제는 별로 관심을 기울이지 않은 것이 사실이다. 다만, 2산화탄소만은 예외적으로 엔진의 연료소비 저감과 연계되어 간접적으로 저감노력이 이루어져 왔다. 이제는 환경단체의 압력이나 새로이 제정된 규정에 의하여 선박용 엔진에 부가된 제한조치로 인하여 문제의 초점은 완전히 변화를 보이게 되었다.

일반적으로 모든 내연기관의 주된 오염물질은 배기가스를 통하여 배출되는 NOx(질소 산화물), SOx(유황산화물), HC(탄화수소), CO(일산화탄소), PM(particulate matter : 고형물질) 등이다.

다행하게도 디젤엔진은 모든 열기관중에서 가장 낮은 CO_2배출율을 가지고 있을 뿐만아니라 과잉산소를 가지고 작동하기 때문에 외부점화 기관에 비하여 낮은 HC와 CO를 배출하게 된다.

SOx는 전적으로 연료유 중의 유황함량에 의해 좌우되며, 연소과정에서 조절할 수 없는 것이다. 따라서 엔진 제작자나 엔진 관리자가 SOx배출을 낮추기 위해서 할 수 있는 일이 아무것도 없는 실정이다. 예를 들어 연료중에 3%의 유황이 포함되어 있을 경우(현재 거래되고 있는 선박용 연료의 평균치) 연료 1000[kgf]를 연소할 때마다 64[kgf]의 SOx를 배출하게 된다. 0.5%의 유황을 포함하는 저유황유의 경우에는 단지 11[kgf/ton]의 SOx를 배출할 뿐이다.

그래서 현 단계에서선박용 디젤엔진에서는 NOx와 PM이 중요한 관심사로 남아 있다. 여기서 이 문제를 살펴 보기전에 선박용 디젤 엔진의 NOx규제 배경을 살펴보고자 한다.

디젤엔진의 연소과정에서 NOx가 생성되는 근원은 질소와 산소이다. 또한 이들의 혼합물은 엔진

으로 흡입되는 공기의 99%를 점유하고 있다.

산소는 엔진 운전시 연소과정중 공연비에 있어 과잉상태로 소비되고 있다.

질소는 연소과정에서 대부분이 반응하지 않고 남게 되지만 소량은 산화하여 여러 가지 형태의 질소산화물이 형성된다. 생성된 질소산화물(NOx)에는 NO와 NO_2 등이 포함되는데 그 양은 화염 또는 연소의 온도와 관계가 있고, 만약 연료중에 유기질소가 존재할 경우 그 양에도 관계한다. 또한 질소와 과잉산소가 디젤엔진 연소과정의 고온에 노출되는 시간에도 관계한다. 바꾸어 말하면 연소온도가 높을수록(가령 실린더 최고압력, 압축비, 연료분사율 등이 높을 때), 이 온도와 접촉하는 시간이 길수록 NOx 생성양도 증가한다. 일반적으로 저속디젤엔진이 고속 디젤엔진보다 많은 NOx를 생성하는 경향이 있는 것은 이 때문이다.

종래 선박은 대기오염원이 되기 어렵다는 인식이 있었으나, 근년에 행한 조사에 의하면 선박도 지구환경에 큰 영향을 미치고 있다는 것이 밝혀지고 있다. 이에 따라 IMO가 주축이 되어 선박으로부터 배출되는 물질의 삭감을 검토하게 되었고, 여러 가지 규제를 하기에 이른 것이다. 전세계적으로 선박으로부터 배출되는 NOx 양은 연간 약 10 Mton으로 추산하고 있으며, 이것은 미국에서 배출되는 NOx의 50%, 또는 화석연료로부터 배출되는 총 NOx의 약 14%에 해당한다.

NOx는 잘 알려져 있는 바와 같이 지구 온난화를 조장하고 있으며 광화학적 스모그와 산성비를 만든다. 선박에 기인하는 배기가스는 육상의 공기오염에 적지않은 영향을 미치고 있으며, 특히 해상교통이 복잡한 연안이나 해협에서는 그 영향이 현저하다. 오존파괴효과는 CO_2의 약 20배에 달한다고 하며, 이러한 것들이 바로 IMO로 하여금 NOx규제를 추진하게 된 근본요인으로 되고 있다.

NOx에 대해서는 1997년 9월 26일 IMO가 개최한 해양오염방지 조약국 회의에서 해양오염방지조약(MARPOL73/78)에『선박으로부터의 대기오염방지』에 관한 신부속서Ⅵ를 추가하기 위한 의정서가 채택되고, 또한 동시에『박용디젤엔진으로부터의 NOx 배출에 관한 Technical Code』가 채택되었다.

이것에 의하면 동 의정서가 발효할 경우에는 동 부속서Ⅵ 3장 규정13에 규정되어 있는 선박에 탑재하는 박용 디젤엔진에 적용하게 된다. 이들은 조약발효가 늦어지는 경우라도 발효일에 불구하고 박용 디젤엔진에 대해서는 이들 요건이 소급 적용됨을 포함하고 있다.

협약의 발효조건으로서 MARPOL 협약당사국 15개국 이상이 비준을 수락하고, 수락한 국가의 선복량 합계가 전세계 선복량 합계의 50% 이상이 된 날로부터 12개월 후에 발효한다. 다만, 동 협약이 2002년 12월 31일까지 발효되지 않을 경우 2003년에 개최되는 해양오염방지 조약국 회의(MEPC)에서 조기발효를 강구하도록 결의안으로 채택하고 있다.

2000년 1월 1일 조약이 발효되지 않았음에도 불구하고 엔진 제작회사나 선박회사가 서둘러 이 규정에 적합한 엔진을 탑재하고있는 배경이 바로 여기에 있다. 2000년 1월 1일 이후 1년 이상이 경과한 현 시점에서 발생하고 있는 제반사항들을 소개하기 전에 규제내용에 대해 간략하게 검토하고자 한다.

규정의 내용은 이미 단편적으로 소개된적이 있으나, 이 규정과 관련이 있는 엔진 제작자나 엔진관리자에게조차 아직 전체 윤곽이 파악되지 않은 점과 일반적으로 이들 규정의 원문이 이해가 어려운 영문으로 기록된 점 등을 감안하여 여기에 그 요점을 간략하게 소개하고자 한다.

2. NOx배출에관한IMO규제내용

MARPOL 조약 부속서Ⅵ에 의한 NOx규제의 내용은 대략 다음과 같다.

(1) 검사

총톤수400톤이상의 모든 선박 및 고정식 또는 부양식굴삭리그 또는 플랫폼은 다음에 정하는 검

사를 받아야 한다.

(a) 선박의 취항전 또는 국제대기오염방지 증서가 최초로 발급되기 전에 행해지는 최초의 검사
(b) 주관청이 정하는 5년을 넘지않은 간격 으로 행해지는 정기검사
(c) 국제대기오염방지증서의 유효기간내에 최소한 1회 행해지는 중간검사

(2) 국제대기오염방지증서의 발급

다음 선박에 대해서는 검사 완료후에 국제대기오염방지증서를 발급한다.

(a) 1997년 의정서의 다른 체약국 관할하에 있는 항구, 또는 항외의 계류시설로 항해 하는 총톤수400톤이상의 모든 선박.
(b) 다른 체약국의 주권하, 또는 관할하에 있는 해역으로 항해하는 프랫폼 및 굴삭 리 그 또한 1997년의 의정서가 효력을 발생하기 이전에 건조된 선박에 대해서는 1997년의 의정서가 효력을 발생한 이후의 최초의 정기입거시까지 이 규칙의 (1)에 따라 국제대기오염방지증서를 발급한다. 다만, 1997년의 의정서가 효력을 발생한 후 3년 을 넘지않도록 한다. 증서는 주관청 또는 주관청으로부터 정당하게 권한을 부여받은 자 또는 단체가 발급한다. 주관청은 모든 경우에 있어서 증서에 대해 모든 책임을 진다.

(3) NOx배출규제의 내용(규칙 제13)

(a) 이 규칙은 다음과 같은 것에 적용한다.
① 2000년 1월 1일이후에 건조되는 선박에 탑재되는 출력 130[kW]를 넘는 디젤엔진
② 2000년 1월 1일이후에 주요한 개조가 행해지는 출력 130[kW]를 넘는 디젤엔진
(b) 이규칙은 다음과 같은 것에는 적용하지 아니한다.
① 긴급용의 디젤엔진, 구명용보트, 기타 긴급사태시에만 사용하고자 하는 장치 또는 설비
② 주관청 정부의 주권하 또는 관할하의 수역만을 항해하는 선박에 탑재되는 엔진으로서 주관청이 정하는 대체 NOx규 제방법에 의하는 것.
(c) (a)의 규정에도 불구하고 주관청은 관할 하에 있는 항구 또는 항외의 계류시설간만 을 항해하는 선박에 한하여 이 의정서가 효력을 발생하기전에 건조된 선박 또는 주요한 개조를 행한 선박에 탑재되는 디젤 엔진에 대하여 이 규칙의 적용을 제외하는 것을 인정할 수 있다.
(d) 『주요한 개조』란 엔진의 다음과 같은 개조를 말한다.
① 2000년 1월 1일이후에 제작된 새 엔진 과의 교환
② 엔진에 대한 실질적인 변경으로서 NOx Technical Code에 정의된 것
③ 엔진의최대연속출력의10%이상의 증가
(e) 이규칙이 적용되는 박용 디젤엔진의 운전은 NOx의 배출(NO_2 총중량으로 계산 한값)이 다음의 제한치 내에 있는 경우에 한한다.
① 17.0×10^{-3} [kgf/kWh] : 엔진의 회전수 가 130rpm 미만의 경우
② $45.0 \times 10^{-3} \times n^{-0.2}$ [kgf/kWh] : 엔진의 회전수가130 이상 2000rpm 미만의 경우, 여기서 n : 엔진회전수(rpm)이다
③ 9.8×10^{-3}[kgf/kWh] : 엔진의 회전수 가 2000rpm 이상의 경우 시험의 수순 및 계측방법은 Test cycle 및 가중계수를 고려하여 NOx Technical Code에 따른다.
(f) 앞의(e)에도 불구하고 다음의 조건중 적어도 한가지가 충족되는 경우에는 디젤엔진의 운전을 승인 받을 수 있다.
① 선박으로부터의 NOx배출량을 적어도 (e)에 정한 제한치까지 낮추기 위하여 NOx Technical Code에 따라 주관청이 승인하는 배출가스 세척장치가 엔진에 갖추어져 있을 것

② 선박으로부터의 NOx배출물을 적어도 (e)에서 정한 제한치까지 저감하기 위하여 주관청이 승인하는 여타의 동등한 방법이 채택되어 있을 것

3. NOx Technical Code

1997년 9월 26일에 개최된 MARPOL 73/78의 협약국 회의에서는 결의2에 의하여『박용 디젤엔진으로부터의NOx배출에관한Technical Code』를 채택하였다.

MARPOL 73/78의 부속서Ⅵ－선박으로부터 대기오염방지를 위한 규정－의 규정에 따라 부속서가 발효한 후에는 동부속서 제13규칙이 적용되는 박용디젤엔진은 이 코드의 규정에 적합해야 한다. 이 코드의 목적은 엔진제작자, 선박소유자 및 주관청이 모든 해당 박용디젤엔진이 MARPOL 73/78에 대한 부속서Ⅵ의 제13규칙에서 말하고 있는 NOx 배출제한치에 적합함을 확인할 수 있도록 하기 위해 행하는 시험, 검사 및 인증에 있어 준수해야 할 수순을 규정하는 것이다.

船上에서 사용되는 박용 디젤엔진의 실제NOx 배출의 가중 평균치를 정확하게 정한다는 것은 어려우며, 이것은 NOx배출의 허용치에 적합함을 확인하는 수단으로서 간단하고도 실제적인 기술로 인식되고 있다. 주관청은 정확한 시험이 적절하게 제어된 조건으로 행할수 있는 시험대上에서 추진용 및 보기용 디젤엔진의 배출특성을 평가하도록 노력해야 할 것이다.

초기단계에 있어서 부속서Ⅵ의 제13규칙에 적합하다는 것을 확립하는 것이 이 코드의 본질적인 목적인데, 이어서 그 다음에 船上에서 수행하는 시험에서는 범위나 정밀도에있어서 피할 수 없는 제한이 따른다. 이 船上 시험의 목적은 배출특성을 추정하여 엔진이 제작자의 사양에 따라 탑재되고 또한 부가된 조정이나 개조가 초기 시험시 확립된 배출특성 및 제작자의 증명으로부터 벗어나 있지 않음을 확인하는 것이다.

3. 1 검사와 인증 방법

(1) 코드가 적용되는 모든 박용 디젤엔진에대해 다음과 같은 검사를 행한다.

(a) 엔진이 설계되고 조립된 상태에서 NOx 배출규제치에 적합함을 확인하기 위한 예비검사.
이 검사로 적합함이 확인될 경우 에는 주관청은 엔진 국제대기오염방지(EIAPP) 증서를 발급한다.

(b) 엔진이 탑재된 후 취항전에 船上에서 행하는 엔진의 첫 번째 검사.
이 검사는 예비검사후에 엔진의 개조라든지 조절이 행해진 경우도 포함하며 엔진이 선박에 거치된 상태에서 NOx배출제한치 에 적합함을 확인한다. 이 검사는 선박의 첫 번째 검사의 일부로서 행해지므로 선박 의 첫 번째 국제대기오염방지(IAPP)증서 가 발급된다.

(c) 선박검사의 일부로서 행해지는 정기검사 및 중간검사.
이 검사는 엔진이 계속하여 코드의 요건에 완전히 적합함을 확인하기 위한 것이다.

(d) 엔진의 실질적인 개조가 수행되었을 경우에는 그 때마다 개조된 엔진이 NOx 배출 제한치에 적합하다는 것을 확인하기 위하여 엔진의 첫 번째 검사가 船上에서 행해진다.

(2) 검사 및 인증의 요건에 적합하기 위하여 선택 가능한 다섯가지 수법이 본 코드에 규정되어 있다.

엔진 제작자, 조선소 또는 선주는 그 엔진의 NOx배출치를 계측, 계산 또는 시험하기 위한 몇가지 방법 중에서 선택할 수가 있으며, 시험방법은 다음과 같다.

(a) 예비검사로서 행하는 시험대에서의 시험

(b) 시험검사와 첫 번째검사를 결합한 船上 종합시험.
예비 인증을 받지 않는 엔진에 대한 시험 으로서 시험대에서의 모든 시험 요건을 만족해

야 한다.

(c) 엔진 파라미터 검토

예비 인증을 받은 엔진, 또는 전회의 검사 후에 미리 지정된 엔진의 부품 또는 조정 가능부분에 개조 또는 조정이 행해진 엔진 에 대하여 첫 번째 검사, 정기검사 및 중 간검사에서 적합성의 확인을 행하기 위한 방법으로서 Technical File에서 정해진 범위로부터 벗어나지 않음을 검증한다.

(d) 船上에서의 간이계측

예비인증을 받은 엔진의 첫 번째 검사 또는 정기검사 및 중간검사에서 적합성의 확인을 수행하기 위한 방법

(3) 아래 서류를 선박에비치할 필요가있다.

(a) EIAPP증서(예비인증을 행한 경우)

(b) IAPP증서

(c) 엔진 Technical File

주관청 또는 그 대행기관이 엔진 검사를 수행할 수 있도록 Technical File에 최소 한 다음 정보를 포함해야 한다.

① NOx배출에 영향을 미치는 엔진의 구성부품, 설정치 및 운전 데이터의 특성.

② 모든 허용조정범위와 엔진 구성부품 대체품 범위의 특정사항

③ 엔진의 정격 회전속도 및 정격출력을 포함하는 모든 관련 엔진 성능의 기록.

④ 船上 검증을 위한 검사시 행하는 NOx 배출규제치에 적합함을 검증하기 위한 船上에서의 NOx 검증방법의 시스템.

⑤ 엔진인증시험에 있어서의 시험 보고서 사본.

⑥ 당해 엔진이 엔진 그룹 또는 엔진 패밀리에 속하고 있는 경우에는 당해 엔진에 대한 지정 및 제한.

⑦ 교환부품이 그 사양에 따라 사용될 경우 엔진의 NOx 배출제한치에 적합한 교환부품의 사양

(d) 엔진 파라미터 기록부

엔진의 조정 또는 개조가 행해진 경우의 기록.

3.2 NOx의 배출 기준

(1) 박용 디젤엔진의 NOx배출 허용한도는 그림 1과 같다.

(2) NOx배출한도를 만족하고 있음을 확인하기 위하여 다음 표와 같은 Test cycle에 따라서 시험하고 해당하는 가중계수를 이용하여 평가한다.

3.3 시리즈로 제조되는 엔진의 승인

NOx 배출 제한치의 적합성에 관하여 모든 엔진에 대해 시험을 실시한다는 사태를 피하기 위해 엔진 패밀리(Engine Family), 또는 엔진 그룹(Engine Group)중 어느 하나의 인증개념을 적용

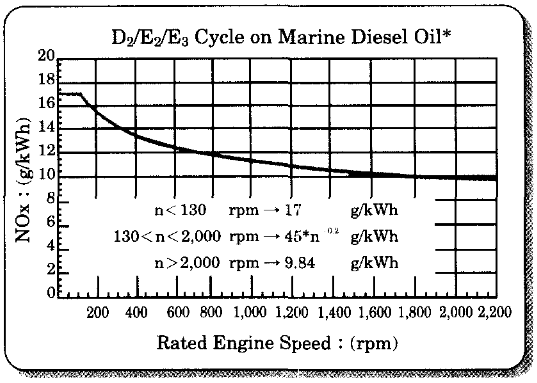

그림1. 박용디젤 엔진의 NOx배출 허용한도

표 1. 『정회전주추진엔진』(디젤엔진발전 기 및 가변피치 프로펠러 장치를 포함)용 Test cycle

E2 Test cycle	속도(%)	100	100	100	100
	출력(%)	100	75	50	25
	가중계수	0.2	0.5	0.15	0.15

표 2. 『프로펠러법칙에 따르는 주추진기관 및 보조기관』용 Test cycle

E3 Test cycle	속도(%)	100	91	80	63
	출력(%)	100	75	50	25
	가중계수	0.2	0.5	0.15	0.15

표 3. 『보조기관』용 Test cycle

D2 Test cycle	속도(%)	100	100	100	100	100
	출력(%)	100	75	50	25	10
	가중계수	0.05	0.25	0.3	0.3	0.1

표 4. 『속도와출력이변화하는보조기관』용 Test cycle

C1 Test cycle	속도	정 격							아이들링
	토크 (%)	100	75	50	10	100	75	50	0
	가중계수	0.15	0.15	0.15	0.1	0.1	0.1	0.1	0.15

해도 좋도록 되어 있다.

엔진의 패밀리 개념은 설계상 유사한 NOx배출 특성을 갖는 것이 확인되고 제작된 그대로의 상태로 사용되고 선내 거치시에 NOx의 배출에 나쁜 영향을 미칠 가능성이 있는 조정, 또는 개조를 필요로 하지 않은 것이다.

한편, 엔진의 그룹 개념은 유사한 NOx배출특성을 갖는 것이 확인된 것이지만 선내에 거치, 또는 취항후에 약간의 조정 및 개조를 필요로 하는 엔진으로서 통상 주추진용의 대출력 엔진이다.

3.4 NOx 계측 순서

NOx Technical Code 제5장에서는 종합적이고도 상세한 NOx 계측방법이 규정되어 있다. 이 부분은 엔진 제작자나 특별히 이 문제를 전문적으로 다루는 사람 외에는 직접 관련이 없으므로 생략하며 다른 문헌을 참고바란다[3].

3.5 船上에 있어서 NOx배출규제의 적합 확인 순서

(1) 船上에 있어서의 적합 확인방법

예비 인증된 엔진을 선내에 탑재한 후, 모든 선박용 엔진은 확인 검사를 船上에서 행하여 NOx배출 제한치에 계속해서 적합함을 확인해야 한다. 이 확인은 다음중 어느 한 가지 방법을 이용하여 행해야 한다.

(a) 엔진 파라미터 점검방법으로서 엔진부 품, 설정, 운전치가 Technical File에서 정 해진 값으로부터 벗어나 있지 않은지 여부 를 검증한다.

(b) 간이 계측방법

(c) 직접 계측 및 모니터링법

(2) 엔진 파라미터 점검법

(a) 다음과 같은 상태에 있는 엔진은 엔진파라미터 점검법에 적당하다.

① 시험대상의 시험에서 받은 예비증서 (EIAPP증서)를 가지고 있는 엔진 및 첫 번째 검사에 의하여 증서(IAPP증서)를 가지고 있는 엔진.

② 전회에 검사를 받은 후 지정된 엔진부 품이나 조정가능 개소에 대해 개조 또는 조정이 이루어진 엔진.

(b) 설정치나 엔진운전치의 검토를 포함하 는 엔진부품의 점검은 엔진의 조정 또는 개조가 전혀 없거나 또는 약간 있다고 해 도 적용되는 NOx배출 규제치에 적합함을 검증할 목적으로 엔진의 배기가스 특성을 추정하는 간편한 방법으로서 이용된다.

(c) 직접 계측 또는 모니터링법은 엔진이 제 작자 시방서에 근거하여 바르게 조정되고 부속서 Ⅵ의 제13규칙에 적합하다는 주관청에 의한 초기 인증에 합치하는 조정상태가 유지되고 있음을 확인하는 사전 준비된 수 단을 부여하는 것이다.

(d) 후처리장치가 장비된 엔진에 대해서는 파라미터 점검의 일부로서 후처리장치의 동작을 점검할 필요가 있다.

(3) 엔진 파라미터 점검법 순서

(a) 다른 검사에 더하여 서류심사가 행해지 는데 이것은 엔진 파라미터를 포함하는 기 록부의 조사와 엔진 파라미터가 Technical File에서 한정하고 있는 범위내에 들어가 있는지 여부를 확인하는 것을 포함한다.

(b) 필요에 따라 서류심사에 더하여 엔진부품과 조정가능한 부분의 현장 검사를 실시한다. 서류심사의 결과를 참조하면서 엔진의 조정가능한 부분이 Technical File에서 규정하고 있는 허용범위 내에 들어가 있는지 여부를 확인한다.

(4) 엔진 파라미터 점검법에 필요한 서류

(a) 모든 박용 디젤엔진은 배기가스 성상에 영향을 주고 또한 제한치를 만족하고 있음을 확인하기 위하여 점검하여야할 엔진부품, 설정치, 운전치에 대하여 확정하고 3.1(3)에서 요구하는 Technical File을 갖추어야 한다.

(b) 엔진 파라미터 점검법에 근거한 검사를 요구받고 있는 디젤엔진을 장비한 선박의 선주 또는 책임자는 船上에서의 NOx검증 방법에 관하여 다음 서류를 선박에 비치하여야 한다.

① 엔진부품, 설정치에 관한 모든 변경점을 기록한 엔진 파라미터 기록부

② 엔진 제조자로부터 제출되어 주관청으 로부터 승인된 엔진의 지정부품 및 설정 에 대한 엔진 파라미터 표, 또는 엔진의 부하특성에 관한 서류.

③ 엔진의 지정부품에 변경이 가하여진 경우는 그 부품변경에 관한 기술서류

(5) 엔진 파라미터 기록부

엔진의 조정, 부품의 교환이나 개조를 포함하는 지정된 엔진 파라미터에 영향을 미치는 변경에 관한 기술은 엔진 파라미터 기록부에 날짜순으로 기록되어야 한다. 이들 기재는 엔진의 NOx레벨을 평가하기 위하여 필요한 다른 적용 가능한 자료로서 보완되어야 한다.

(6) 船上에서 변경했을 때 NOx에 영향을 미치는 파라미터

개개의 엔진 고유의 설계에 따라 NOx에 영향을 미치는 개조나 조정은 서로 다를 가능성이 있으며, 또한 이것이 보통이다. 이들은 아래의 엔진 파라미터를 포함한다.

(a) 분사 타이밍
(b) 분사 노즐
(c) 분사펌프
(d) 연료 캠
(e) 공동 분사방식에 있어서의 분사압력
(f) 연소실
(g) 압축비
(h) 과급기 형식 및 구조
(i) 공기 냉각기, 공기 예열기
(j) 밸브 개폐 시기
(k) NOx저감장치 "물분사"
(l) NOx저감장치 "유화연료"(FWE)
(m) NOx저감장치 "배기가스 재순환"(EGR)
(n) NOx저감장치 "선택접촉환원법을 이용한 탈초장치"(SCR)
(o) 주관청이 지정하는 기타의 파라미터

(7) 간이 계측법

(a) 간이 시험 및 계측법은 필요시에 실시되는 船上에서의 확인시험과 정기검사와 중 간검사에만 적용된다. 시험대에서 실시되는 모든 최초의 엔진 시험은 DM급의 박용 디젤 연료유를 사용하고 시험대에서의 시험과 동등한 방법에 따라 실시되어야 한다. 선박은 기본적으로 기온이나 습도 등 기후여건이 다른 지역을 항해하는 수가 많은데 이들은 NOx 배출양에 영향을 미치므로 주위의 온도와 습도에 대한 수정을 행할 필요가 있다.

(b) 船上에서의 확인시험, 정기검사 및 중 간검사에서 의미있는 결과를 얻기 위해서 는 해당 Test cycle에 따라 최저 필요조 건으로서 NOx는 O_2 또는 CO_2 및 CO와 함께 배출가스 농도를 동시에 측정할 필요 있다.

(c) 엔진 토크와 회전수도 측정되어야 하지 만 수순을 간략하게 하기 위해 船上 확인 시험을 이용한다. 엔진에 관계하는 파라미 터 측정용 계측기에 대한 허용오차는 시험 대에서 행하는 시험법에서 허용되는 허용 오차와는 다르다. 만약 토크를 직접 측정하기 곤란할

경우에는 축 출력을 엔진 제작자가 추천하고 또한 주관청이 인정하는 다른 방법으로 추정하여도 된다.

(d) 실제에 있어서는 엔진이 일단 선박에 탑재되어 버리면 연료 소비량 측정이 곤란한 경우를 종종 볼 수 있다. 船上에서의 수순을 간략화하기 위하여 시험대에서 실시한 예비 인증시험의 연료 소비량 측정결 과를 용인할 수 있다. 이러한 경우 특히 중질유 운전에 관해서는 추정오차를 고려 한 추정을 행한다.
계산에 이용되는 연료유량은 시험중에 뽑아낸 연료시료에 의해 결정되는 연료의 조성에 관계하므로 시험대에서 사용된 연료유량의 측정은 시험대와 시험 연료간의 실발열량의 차이에 따라 보정되어야 한다. 최종 배출물에 관한 이와같은 오차의 결과는 계산되고 배출양 측정결과와 함께 보고되어야 한다.

(e) 통상 배기가스 측정은 ISO8217(1996)의 DM급 선박용 디젤연료를 사용하여 실시한다. 그러나 선주가 받아들이기 어려운 부담을 피하기 위하여 확인시험이나 재검사시 측정에서는 엔진 제작자의 추천과 주 관청의 승인에 따라 ISO8217(1996)의 RM 급의 중질연료유의 사용이 허용된다. 이와 같은 경우에는 연료유中의 질소분과 연료 의 착화성은 엔진의 NOx배출에 영향을 미친다.

(f) 3.4에서 설명한 배출가스채취의 일반적인 필요조건은船上 측정에도 적용된다.

(g) 허용차

① 船上에서본장의 간이계측법을 적용할 때에 발생하는 오차 때문에 확인시험과 정기검사와 중간검사에 한하여 해당 한계치의 10% 여유가 인정된다.

② 엔진의 NOx배출물은 연료의 착화성과 연료중의 질소성분에 의해 바뀐다. 만약 연소 행정중의 NOx생성에 있어서 착화 성의 영향 및 엔진 효율에 의존하는 연료 중의 질소성분의 변환율에 대해 충분한 정보가 없을 경우 RM급 연료ISO8217 (1996)를 사용한 船上 시험에서는 10% 여유가 인정된다. 다만, 이러한 여유는 船上에서 행하는 예비 인증시험에서는 인정되지 않는다. 사용된 연료유는 그 조성을 탄소, 수소, 질소, 유황 및 ISO8217(1996)에 표시된 범위에서 연료 사양을 명확히 하기 위하여 필요한 여타의 성분에 대해 분석해야 한다.

③ 船上 간이계측법에서 ISO8217(1996)에 의한 RM급 중질연료의 사용에 의한 양쪽의 합계 여유는 해당 제한치의 15%를 초과해서는 안된다.

4. 질소산화물(NOx)의 저감기술

선박용 연료유中에 포함되는 질소의 함량은 평균하여 0.2~0.3%정도이나 일반적으로 중질유일수록 그 함량은 증가한다. 이들 연료유 중의 질소는 연소를 거치면서 대부분이 NOx(Fuel NOx)로 변하며, 배출량은 1~2g/kWh이다. 한편 실린더내에서 열역학적으로 질소와 산소가 합성되어 생성되는 NOx (Thermal NOx)는 기종, 사이클 제원 등에 따라 크게 변하는데 대체로 10~25g/kWh가

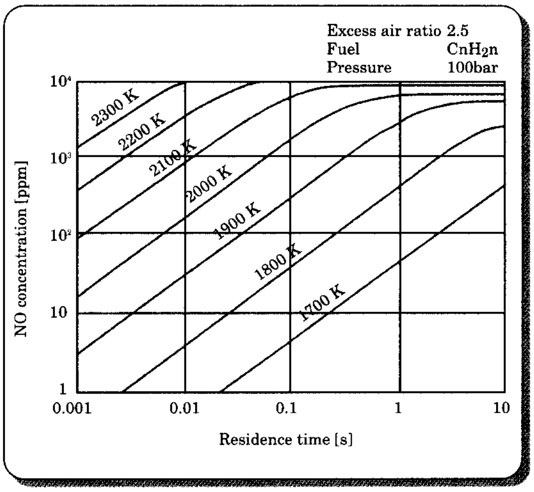

그림 2 예혼합 화염중에서의 NO생성율

배출된다.

그림2는 현재의 엔진 공기 과잉율과 압력하에서 예혼합연소에 있어서의 Thermal NOx 생성상황을 구한 것이다[11]. 현재의 엔진 실린더내에 있어서의 개략적 최고 가스온도는 1700K전후로 볼 수 있으며 고온으로 유지되는 시간도 0.1초를 넘지 않으므로 그림2에서 NOx생성은 앞서 소개한 배출량의 1/100에 미달한다. 그러나 현실의 엔진에서는 확산연소가 행하여지고 있으며 실린더내에 부분적으로 존재하는 고온부분에서 다량의 NOx가 생성한다.

그림3은 노르웨이가 IMO BCH21에 제출한 보고서[12]에 의한 것인데, 현재의 엔진들에 NOx 저감기술을 실시하기 이전 상태에서의 NOx 배출상황을 보이는 것이다. 앞서 소개한 바와 같이 대구경 엔진일수록 회전수가 낮고 가스가 고온으로 유지되는 시간이 길기 때문에 NOx배출량은 많게 된다.

또한 열효율 향상을 위해 실린더내 최고압력을 높게 설정한 엔진일수록 가스온도가 상승하여 NOx 배출량은 많게 된다. 동일 기종이라도 사용회전수를 낮추어 정격조정(De-rating) 비율을 높여 가면 NOx 배출량은 증가하게 된다.

디젤엔진의 NOx저감의 일반적 기법에 관해서

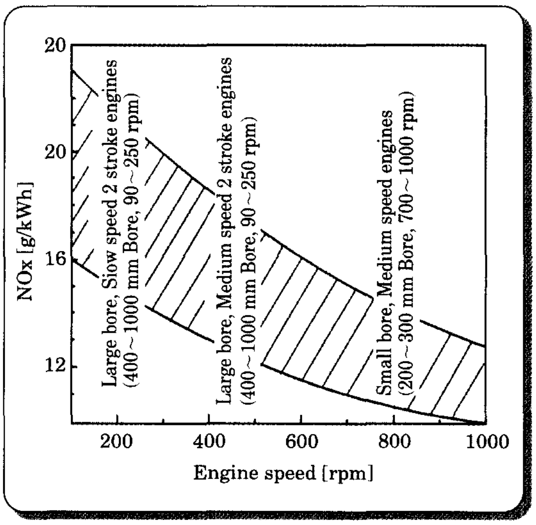

그림3 최적 연료소비 상태에서 대형 디젤엔진의 NOx배출량

는 이미 소개된 것이 많으므로 여기서는 생략하고, 1차 목표인 30%삭감을 위하여 주요 엔진 제작자가 실시한 기법과 앞으로 50%, 90%로 삭감 비율을 높여 갈 경우에 실제로 등장할 것으로 예상되는 기법을 중심으로 소개하고자 한다.

4. 1 허용치17g/kWh(현상태대비30%저감)

2000년 1월 1일 이전의상태에서 대형 엔진의 경우 (200rpm 미만) 배출 허용치는17 g/kWh 미만이다. 이것은 대체로 30%삭감을 의미한다. 대부분의 엔진 제작자는 특별한 장치를 이용하지 않고 주로 연료계통의 최적화 수단으로 대응하고 있다.

지금까지는 연료소비율을 연료계통 최적화의 가장 중요한 설계기준으로 취하였으나, 현재는 [연료소비율+NOx배출량]으로 변경하고 있다. 이로 인하여 기종에 따라서는 연료소비율의 악화를 동반하는 기종도 나타나고 있다.

(1) 분사시기 지연

연료 분사시기를 늦추어서 화염온도를 낮추고 동시에 고온으로 유지되는 시간을 단축하여 NOx 발생을 억제하는 방법이다. 다만, 연료소비율 악화를 완화하기 위하여 급기압력의 상승 등 사이클 제원의 최적화도 동시에 행한다.

기종간에 차이는 있으나 20% NOx를 삭감할 경우 연료소비율의 악화는 1~3%이고, 다음에 설명하는 유화유보다도 NOx저감에 따른 연료소비율의 악화는 약간 더 크다.

(2) 다공 분무

디젤엔진의 연소는 확산연소인데 예혼합 연소와 같이 균일한 연소를 바랄 수는 없으나 개개의 분무를 한없이 미세화하여 연소실내에 적정하게 배치하면 분무내의 고온부분은 한없이 단시간내에 주위 가스로 확산하여 온도가 내려가고 NOx 생성도 그림2에 보이는 값에 접근할 것이다.

분사 구멍수를 10개에서 117개까지 증가시킨 예비시험 결과에 의하면 기존의 실린더 카버를 사용하였기 때문에 적정한 연료 밸브배치로는 되어 있

지 않으나 연료소비율의 악화없이 30%의 NOx삭감과 50%이상의 매연삭감이 달성되었다고 한다[11].

연료 밸브수의 증대는 유지보수관리면에서 가능한 한 억제되어야 하지만 분사, 스월, 연소실 형상의 최적화로 허용할 수 있는 수로 억제하는 것이 가능하다고 한다.

(3) 연료밸브 사양변경

연료밸브의 사양과 구조 변경에 의하여NOx억제가 가능하다고 한다. 예를 들면 MAN B&W의 경우 "Low NOx Atomizer"라 하여 분무 구멍 수를 늘리고 방향을 바꾸어 분무화염끼리 접근시켜서 저 산소영역을 증가시키며 연소온도를 저하시켜 NOx생성을 낮춘다고 한다.

또한 이미 앞서 소개한 바와 같이[2] Mini-sack Atomizer와 Slide Atomizer 등을 개발하여 사용함으로서 밸브 개폐시 Atomizer선단의 무용 공간을 반감 또는 완전히 없게 하여 NOx와 PM(입자상 물질)을 저감한다고 한다. 동시에 연료 차단이 좋게 되므로 특히 저부하에서의 연소가 개선되며 이론적으로는 3~5%의 연료저감이 기대된다고 한다.

한편 WNSD의 RTA엔진의 경우는 압축비의 증가, VIT(Variable Injection Timing) 설정의 최적화, 분사시기 지연, 배기밸브 개폐시기 지연(Late Exhaust Valve Closing : LEC) 등에 의해 대처한다고 한다.

중, 고속 4행정 디젤엔진의 경우 종래의 엔진 상태 그대로 1차 규제(30%삭감 기준)에 대해서는 대처할 수 있는 경우가 많으며 문제가 될 경우도 앞서 대형 엔진에서 적용한 고압축비 채용, 2단분사, 분사기간의 단축, 연소실형상 최적화 등의 방법을 채용하여 해결 가능할 것이다.

4. 2허용치5g/kWh(현상태 대비50%삭감)

현재의 규제치는 5년마다 재검토하도록 되어 있으며 다음 연도는 2002년으로 되어 있다. 1차 규제치의 비준이 완료되지 않은 현시점에서 속단할 수는 없으나 일반적추세로는 2단계 실시를 예상하여야 할 것이다.

이 레벨에서는 물 첨가를 가장 유력한 수단으로 보는데는 異論의 여지가 없다. 실제로 일부 NOx나 매연 배출에 대하여 민감한 선종(쿠르즈선, 페리 등)이나 그러한 해역에 취항하는 선박에서는 상당수가 물분사를 실시하고 있는 형편이다. 또한 스웨덴 등은 배기배출량에 따라 항만 사용료등을 차등적용하여 규제에 나서고 있는 형편이다.

연료에 물을 첨가하여 사용하는 기술은 이미 그 유효성이 입증된 기술이지만 방법의 우열에 대해서는 첨예한 대립을 보이고 있으며, 특히 최근에 디젤엔진 제작자로서 양대 산맥을 이루고 있는 MAN B&W 와 WNSD가 각기 다른 방법의 우수성을 강조함으로써 상반된 견해를 보이고 있다[18].

(1) 직접 물분사법 (Direct Water Injection : DWI)

이 방법은 현재 WNSD가 채용하고있는 방법으로서 실적도 많다. 이 방법에서는 물과 기름을 각기 별도의 노즐을 이용하여 실린더내에 직접 분사시키고 있으며, 약 50~60%까지 NOx생성을 감소할 수 있다고 한다.

물분사에 필요한 압력은 200~400bar이며 고압물 펌프를 거쳐 여과기와 압력 맥동의 평준화를 거친 후 적정 분사압력을 부여하기 위하여 압력 조절밸브를 거처 분사밸브로 들어간다. 분사량은 분사기간으로 조절되며 분사시기는 연료분사에 앞서 실시하여 적극적으로 연소온도의 강하에 기여하도록 한다.

이 방법에 대한 장점을 WNSD은 다음과 같이 열거하고 있다.

① 이 방법은 엔진부품에 전혀 악영향이 없 으며 물 분사 시스템은 연료측과는 완전히 분리되어 있고, 따라서 물이 공급되지 않 아도 엔진 조종에는 전혀 지장이 없다. 또 한, 연료 분사 시스템은 표준형 엔진의 것 을 사용할 수 있다.

② 설비비와 운전비가 저렴하다. 설비비는 대략 20~25$/kW이다.

③ DWI의 성능은 중유(HFO) 운전의 경우 NOx는 통상 5~7g/kWh이고 박용 디젤 유 (MDO)의 경우는 4~6g/kWh라 한다.

이 방법과 유사한 것으로 층상 물 공급법이 있다. 동일 연료 분사밸브에서 연료와 물을 층상으로 분사하는 방법으로서 효과는 물과 연료유를 별도의 분사 노즐을 통하여 공급하는 것과 같다.

(2) 유화유(Fuel Water Emulsion : FWE)의 사용

연료유中에 미세한 물방울을 분산시켜 화염온도를 낮추어서 NOx생성을 50%정도까지 억제할 수 있다고 한다. 이를 위하여 연료에 약 50%의 물을 첨가하여야 하며 다량의 물이 필요하다. 물첨가에 의한 저위발열량의 저하는 3%에 달하지만 분무 모멘트의 증가에 따른 연소개선 등이 있기 때문에 연소악화는 2%이거나 거의 없다고 한다.

물과 연료유는 간단히 유화될 수 있으므로 유화유 제조장치의 투자는 크지 않다고 한다. 또한 분사량의 증대에 따른 연료펌프, 연료밸브, 캠축 등의 용량확대가 필요하게 되는데 신조 엔진의 경우 가격증가는 크지 않다고 한다. 그러나 기존선의 경우에는 개조공사가 크고 비용이 많이 든다.

이 방법을 이용하여 중속 4행정 엔진의 NOx저감과 매연배출을 줄여서 연기가 보이지 않게 하고 있는 엔진(Invisible Smoke Engine : IS Engine)을 제공하고 있는 MAN B&W의 주장에 의하면 이 FWE의 장점으로서[15],[16],[17]

① 설계변경이 최소한으로 되며 연료 공급 장치만 일부 변경한다.
② 신뢰성을 해치지 않는다
③ 물을 30%까지 혼합하여도 연료소비율에 영향을 미치지 않는다.
④ 다른 NOx 저감법과는 달리 실질적으로 연기를 줄이는데 기여한다.
⑤ 물소비율이 적다(10%의 물을 혼합하면 10% NOx가 저감한다).
⑥ 투자비가 저렴하다.

등으로 요약하고 있다. 한편 새로운 IS모델에서는 보조 블로워를 설치하고 모든 부하범위에서 15%의 FWE로 운전을 계속하되 부하가 20%이하로 되면 백색 연기를 피하기 위하여 물 함량을 필요에 따라 감한다.

한편 DWI 방법을 채택하고 있는 측이 FWE(유화유)법에 대한 비평을 종합하면,

① 안정적으로 사용가능한 최대 물/연료비 는 약 20~30% 정도이므로 NOx 저감효과도 이 정도에 지나지 않는다는 것이다.
② 기관출력을 유지하기 위해서는 연료분사 장치를 크게 하여야 한다.
③ 유화안정성, 분사기기의 신뢰성(캐비테이 션의 위험성), 무수 운전 모드에서의 엔진 성능이 저하한다.

등으로 요약할 수 있다.

FWE 방법을 채택하고 있는 측이 DWI법에 대한 비평을 요약하면[12],

① 제2의 분사 시스템에 의해 물을 500bar 정도의매우고압으로 분사 시켜야 한다.
② 이결과로 NOx를 감소시키는 효과를 얻 고 있으나 설계를 크게 변경해야 한다.
③ 연료소비율을 증대하며 NOx를 40~50% 감소할 경우 연료소비율은 4~5g/kWh 증가한다.
④ 매연발생을 증대시킨다.

등이다.

(3) 급기 가습법

급기중의 수증기도 화염온도를 낮추는 효과가 있으며 NOx 생성을 억제하는데, 그림4에 가습의 효과를 보이고 있다. 박용엔진은 과급도가 높고 중간냉각을 하고있으므로 급기의 상대습도는 거의 100%에 달하고 있는 경우가 많다. 급기를 가습하기 위해서는 통상 운전시보다 급기온도를 높여서 물을 첨가해야 한다.

단시간 내에 물방울을 증기로 변환시키기 위해서는 이에 상응한 대책이 필요하다. 급기온도를 40°C에서 60°C로 높여서 수증기를 포화시키면 25%정도의 NOx삭감이 가능하다. 이 방법은 엔진의 개조가 필요없다는 것과 NOx삭감에 따른 연료소비율 악화가 적다는 것이 매우 매력적이기는 하지만, 물의 효과는 FWE의 1/3정도이며 다량의 물이 필요하다.

이 방법을 개발하고 있는 스웨덴의 Munters Euroform[14],[20]에 의하면 이 방법에 의하여 NOx를 70%까지 감축할 수 있다고 주장하고있으며 실선에서 시범을 보인적도 있다. 이 방법은 HAM (Humid Air Motor)시스템이라 부르고 있으며 급기 가열 열원으로는 엔진 냉각수와 배기열을 이용하고 있다. 또한 급기 중간냉각기는 HAM작동기간중 폐쇄하거나 바이패스시킨다.

연소가 원활하고 연소온도는 보다 균일하게 되므로 소위 말하는 열점이 없으므로 NOx 생성을 감축한다고 한다. 또한 연료소비나 다른 배출 가스 성분에는 거의 영향을 미치지 않는다고 한다. 다량으로 필요한 물은 해수를 이용하며 증발과 증류작용에 의하고 사용된 해수는 배출하며 계속해서 새로운 해수를 사용하므로 염분이나 무기질이 문제로 되는 일은 없으며 따라서 물이 운전 경비에 영향을 미치는 일은 없다고 한다.

실제 엔진에서 행한 실험결과에 의하면 NOx를 75%까지 감축할 수 있었다고 하며 여타의 배기가스 성분에 아무런 악영향이 없었고 엔진도 깨끗하였다고 한다.

이 방법의 문제점은 대용량의 열교환기가 필요한 점과 초기투자가 비싼 점 등으로 보인다. 그 외에도 NOx저감효과가 낮은 점(20%의 물로 10%저감), 급기온도가 낮아지면 물이 충분히 증발하지 않고 실린더 내에서 실린더 벽에 충돌하여 윤활유 유막 훼손 등의 부정적 영향도 지적되고 있다.

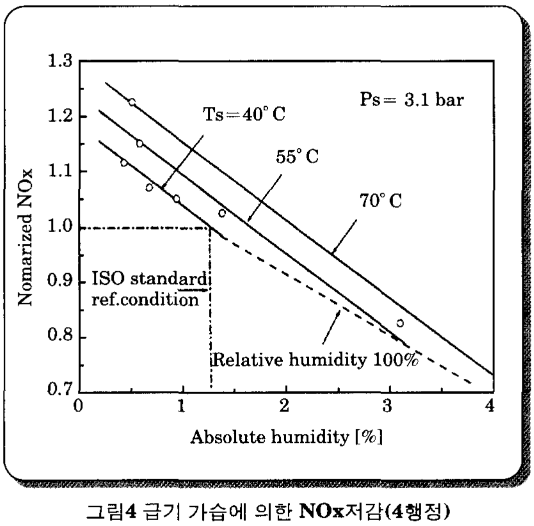

그림4 급기 가습에 의한 **NOx**저감(**4**행정)

4.3 허용치 2g/kWh (현상태 대비 80~90%저감)

이 레벨로 되면 SCR탈초장치, EGR, 메타놀, LNG 등 새로운 연료로의 전환을 필요로 하며 대규모의 설비나 기본장비가 필요하게 된다.

외항선의 대부분은 저속 2행정 엔진을 추진장치로 이용하고 있는데 이들 엔진은 과급기의 배기가스 온도가 낮고 현재의 SCR (Selective Catalytic Reduction)장치로서는 산성 황산의 석출, 탈초효과 저하 등의 문제가 있으며 과급기의 후편에 설치할 수가 없다. 따라서 현재 채용하고 있는 예에서는 어느 경우나 과급기의 앞쪽에 SCR장치를 설치해야 되는데 이 경우에는 SCR 열용량이 크기 때문에 과급기의 부하 추종성능이 극단적으로 악화하는 등 기술적인 문제를 안고 있다.

이 문제에 관한 그 동안 발표된 연구결과를 보면 과급기 앞쪽에 방출밸브 등을 설치하여 배기의 일부를 방출함으로써 헌팅 현상을 제거할 수 있어 좋은 결과를 얻고 있다는 발표가 있다. 유황분이 있거나 온도가 낮아도 유효한 탈초효율이 높은 실용적 촉매가 개발된다면 가장 바람직한 해결책이 될 것이다.

SCR의 또 다른 문제는 고가의 설치비, 운전 경비 및 큰 설치 공간등이며 그외에도 촉매로 사용되는 암모니아의 안전성 등이 있다. 발표된 자료[13]에 의하면 예를 들어 10MW의 디젤엔진에 필요한 총 설치비는 400,000$에 달하고 연간 4,000시간 운전한다고 하면 촉매 요소의 비용은 120,000$에 달한다. 이 외에도 유지보수와 때때로 행하여야 하는 촉매 교체비용 등을 별도로 고려하여야 한다. SCR 장치는 비교적 무거워서 1,600kgf/MW이고, 소요 공간은 대략 3.1m³/MW라 한다. 여기에는 요소촉매 저장탱크, 계량장치, 펌프장치 및 분사장치 등은 포함되어 있지 않은 것이다.

한편으로는 보다 고성능의 컴팩트한 SCR을 개발하고 촉매인 요소를 대량으로 생산하게 되면 이보다는 값싸고 가볍고 작은 SCR장치의 개발이 가능할 것이라 한다. 유황성분이 적은 연료나 유황이 전혀 없는 연료가 촉매의 급속한 오염을 피할 수 있어 바람직하기는 하지만, SCR에 유입하는 가스 온도가 충분히 높은 한 유황의 함량에 특별한 제한이 있는 것은 아니다.

이상의 SCR에 관한 사항을 요약하면

① NOx의 감축을 90%이상 달성할 수 있다.
② 오늘날 SCR의 가격은 엔진 출력에 대하여 75,000$/MW이고, 촉매 가격은 총 가격의 10%정도이다.
③ 운전경비는 3$/MWh이다.
④ 유지보수경비(이 중 절반이 촉매 교체비 용)는 2$/MWh이다.
⑤ 촉매 반응용기의 크기는 절연피복을 포함하여 2~5m^3/MW이며, 배기중의 NOx 농 도에는 크게 영향을 받지 않는다.
⑥ SCR장치에 의해 발생하는 배압은15~25 mbar이다.
⑦ 반응장치는 소음기를 겸하도록 만들 수 있으며 25dBA이상의 소음 효과를 얻을 수 있다.
⑧ 소요되는 요소의 양은 40%농도로 하여 30 l /MWh이다.
⑨ 만약 SCR을 일시적으로만 사용할 경우에 는 엔진을 시동하기 전에 촉매를 가열하기 위해서는 반드시 버너가 필요하다. 그렇지 않을 경우 유화암모니아에 의해 촉매는 막히게 된다.

새로운 연료원에 대한 논의는 다른 곳에서 많이 언급되고 있으므로 여기서는 생략한다.

5. 맺는 말

지금까지 박용 디젤엔진을 중심으로 배기가스, 특히 NOx배출의 규제 배경과 구체적으로 채택되고 있는 저감 기술에 대해 2000년 1월 1일 이후의 경향을 중심으로 하여 설명하였다.

많은 사람들이 지구환경의 보존을 위해서는 선박의 배기가스도 엄격한 배출 제한을 받아야 한다는 점에 대해서 인식을 함께 하고 있으며, 이것은 현재 규제 대상에서 제외되고 있는 CO_2에 대해서도 언젠가는 규제될 수 밖에 없다고 생각하고 있다. 만약 현 단계에서 CO_2까지도 규제하게 된다면 배출율에서 가장 낮은 박용 디젤엔진이 설 자리를 잃게 된다. 그 뿐만 아니라 이것은 선박으로부터 디젤엔진을 축출하는 계기가 되고, 보다 깨끗한 추진수단에 의존할 수 밖에 없을 것으로 생각하고 있다.

한 걸음 물러서서 비록 CO_2의 배출을 전면 금지하지 않더라도 현재의 육상과 같은 수준으로 규제를 받는다면 LNG나 메타놀 등으로 전환할 수 밖에 없을 것이며, 그 시기를 대체로 2030년 정도로 보는 견해가 많다는 것을 소개하고 본고를 끝내고자 한다.

참고문헌

[1] 한국박용기관학회 창립20주년 기념 국제학술 강연회 초록집, 한국해양대학교 50주년 기념회관, 1996년 7월 26일.

[2] 전효중, 대형 박용 엔진의 동향과 앞으로의 전망, 한국박용기관학회지, 제23권 제2호, 1999년 3월, pp.111~123.

[3] 선박대기오염에 관한 워크샵, 한국박용학회 주관, 1999년8월20일, 한국해양대학교 50주년 기념회관.

[4] 안숙헌 외2인,박용디젤기관의NOx,COx 배출특성과 NOx 측정방법에 관한 실험연구, 한국박용기관학회지, 제23권 제1 호, 1999년 1월, pp.19~24.

[5] 박태인, 김기형, 선박용 디젤기관의 에말존 연료의 이용기술 전망, 한국박용기관학회지, 제22권 제6호,1998년 11월, pp. 729~743.

[6] 유승남, 이돈출, 제22차 CIMAC대회 전체 개요, 한국박용기관학회지, 제22권 제5호, 1998년 9월, pp.577~587.

[7] 배병열, 남정길, 최재성, 디젤기관의 연소실내 NO 생성농도 예측에 관한 연구, 한국박용기관학회지, 제23권 제4호, 1999년 7월, pp.543~551.

[8] 임재근, 조상곤, 선박용 디젤기관에 있어서 스크라버형 배기재순환 시스템의 배 기배출물 특성에 관한

연구, 한국박용기 관학회지,제24권 제2호,2000년 3월, pp. 207~212.
[9] 정경열, 류길수, 질소산화 제거기술, 한국박용기관학회지, 제25권 제1호, 2001년 1월, pp.57~64.
[10] 이돈출, 제6차 박용기관국제심포지엄을 다녀와서 (ISME TOKYO 2000),한국박 용기관학회지,제25권제1호, 2001년 1월, pp. 65~71.
[11] 遠藤裕久, 船用ディーゼル 機關排氣ガス大氣汚染物質の削減, 關西造船協會,らん, 第18號, 1993. 1, pp.23~27.
[12] Prevention of Air Pollution from Ships Including Fuel Oil Quality, Report of Correspondence Group on Air Pollution from Ships Submitted by Norway
[13] MER, MAN B&W Diesel says direct water injection doesn' t work, 2000, April. pp.20~21.
[14] MER, Counting the cost of SCR systems, 2000, May, p.18.
[15] MER, De-Noxing with water works but where to inject?, 2000, May, pp. 18~19.
[16] MER, The invisible smoke engine, 2000, October, pp.17~19.
[17] Marine Engineer, Latest smokeless engine concept developed by MAN B&W, TheMarine Engineer, November, 2000, pp.11~12.
[18] Richard O.Aichele, Technology cutting stack emissions, Professional Mariner, April/May, 2000, pp.58~63.
[19] MER, NOx reduction only part of the pollutant challenge, 2000, May, pp. 16~17.
[20] Anthony Paul Roskilly, Marine Engineering : Design and Operation for Environmental Sustainability, J. of JIME, Vol.36, No.2, pp.12~23.