

디젤기관의 NOx 저감방법 및 NOx 측정에 관한 연구

· 남 정 길*, 김 준 효*, 최 주 열**

A Study on the Method of NOx Reduction and NOx Measurement for the Diesel Engines

· Jeong-Gil Nam*, Joon-Hyo Kim*, Joo-Yeol Choi**

* 목포해양대학교 기관시스템공학부

Abstract: According to the NOx level requirement of annex VI to IMO(International Maritime Organization) MARPOL 73/78, this regulation shall apply to each diesel engine with a power output of more than 130 kW which is installed on a ship constructed and undergoes a major conversion on or after 1 January 2000. It is inevitable to adopt IMO standard for marine engines. Therefore, most of diesel engines which are being currently built should be tested and surveyed in accordance with the NOx technical code.

In this study, various technics of NOx reduction methods were investigated for the diesel engines and the methods of NOx measuring were introduced by the new and simplified field detecting equipment. These results can be utilized for the basic design and development of diesel engine for NOx reduction.

Key words: NOx Reduction Methods(질소산화물 저감방법), IMO(국제해사기구), NOx Technical Code(질소산화물 기술코드), Field Detecting Equipment(현장 검출장비) Methods of NOx Measuring(질소산화물 측정방법),

1. 서 론

디젤기관의 역사는 지금으로부터 약 104년의 짧은 역사를 가지고 있지만 오늘날 교통수단의 동력원으로써 큰 몫을 차지하고 있다. 또한 짧은 역사 속에서도 사용자들의 요구조건을 충족시키기 위해서 개발을 거듭하여 오늘에 이르렀다. 초기에는 내구성이 요구되다가 고출력·고효율의 기관이 요구되어 기관 제조사에서는 고출력·고효율의 기관을 개발하는데 박차를 가하여 왔으나, 오늘날에 와서는 전세계적으로 친환경 기관이 요구되고 있다.^[1] 기관이 아무리 잘 개발되었다 할

지라도 요구되는 NVH (Noise, Vibration, Harshness) 및 Emission (NOx, SOx, HC, CO, PM 등) 규제치를 만족하지 못하면 전혀 상품성이 없는 고철 덩어리에 불과한 것이 현실이다. 이 규제치 중에서도 기관의 고출력화에 따른 연소실의 고온·고압 조건하에서 생성되기 쉬운 Thermal NOx를 줄이는 방법이 디젤기관 개발의 초점이 되고 있다.^[2]

이러한 NOx에 대한 연구배경으로써는 2000년 1월 1일 이후에 건조되는 선박에 탑재되거나 엔진의 주요 개조가 이루어지는 출력이 130 kW 이상의 선박용 디젤기관(단, 비상시에만 사용되는 비상 디젤기관 및 구명정 기관은 제외)의 NOx 배출량은 기관의 회전수에 따라 아래 표1 에서와 같은 규제를 받게 되어 있다.^{[3] [6]}

* 목포해양대학교 기관공학부 조교수
** 목포해양대학교 기관공학부 조교수
*** 목포해양대학교 기관공학부 교수

Table 1 Maximum allowable limits of NOx-IMO MARPOL 73/78 annex VI

	Engine rpm	허용 NOx 배출량 (g/kWh)	비고
1	$N \leq 130$	17.0	
2	$130 \leq N \leq 2,000$	$45.0 \times N^{-0.2}$	17.0~9.8
3	$N \geq 2,000$	9.8	

또한, 상기 규제치를 만족하지 못한 디젤기관에는 배기가스 후처리장치를 별도로 설치해야 한다. 그리고 이러한 NOx 배출 규제치는 동협약 발효후 5년 주기로 상향 조정하기로 되어 있다.

특히, 총톤수 400톤 이상의 선박에서는 최초검사, 최초검사후 5년 이내에 정기검사, 정기검사동안에 1회의 중간검사를 받아야 하므로 ISO8178 규정에서 인증하는 이동식 NOx 측정 시스템이 절실히 요구되고 있다.

2. 본 론

요즘 산성비의 주 원인이 NOx이고, 지구 온난화의 주범이 CO₂ 라는 사실은 일반화되어 있는 사실이다. 이러한 대기 오염원으로는 크게 이동(선박, 자동차, 항공기 등)오염원과 고정(공장, 가정용 보일러, 소각로 등)오염원으로 나눌 수 있다. 이동오염원의 주 오염체로써는 디젤기관, 가솔린기관, 보일러 등이 있을 수 있으며 이중에서도 특히 박용 디젤기관에서 배출되는 NOx량은 국내에서 발생하는 NOx 총량의 18.6%로 '97년도에 조사된 바가 있다.^[7] 디젤기관의 NOx 저감 방법을 보면 크게 전처리기술과 후처리기술로 나눌 수가 있다. 전처리기술로써는 EGR, 에멀전 연료의 사용, HAM, AGR, 연소실 및 분사계 개선, 내부 EGR 등이 있다. 또한 후처리기술로써는 SCR, 플라즈마/촉매 시스템 등이 있으며, 기타 방법으로는 VVT(Variable Valve Timing), Miller Cycle 등이 있다.

따라서, 본 연구에서는 현재 상용화되고 있는 NOx 저감 방법중에서 대표적인 몇 가지 방법을 비교·검토하였다. 또한 ISO8178 규정에서 인증한 이동식 NOx 측정 시스템을 구축하였으며, 본 시스템을 활용하여 본교 내연기관 실험실에 장착된 트랙터용 직접분사식 디젤기관 및 실습선의 주기관에 대한 NOx를 측정하였다.

2-1. 현재 상용화되고 있는 NOx 저감기술

1) EGR(Exhaust Gas Recirculation)

주로 차량용으로 많이 사용되고 있으며, 원리는 배기가스를 흡기구쪽으로 재순환 시키므로써, 대기중으로 직접 배출되는 배기가스를 줄일 뿐만 아니라 연소 공기중의 질소와 산소량을 줄임으로써 연소실 온도를 내려서 Thermal NOx를 줄여 주는 역할을 한다. 그러나 기타 에미션인 HC, CO, PM 등이 상대적으로 상승하고 엔진의 출력 및 내구성이 저하되는 부작용이 있으며, 저질유를 사용하는 선박기관용으로써는 부적합하다. 그러나 최근에는 PM 포집장치를 활용하여 선박용 EGR 시스템 개발을 시도하고 있다.

2) 에멀전(Emulsion)

서로 혼합이 안되는 두 종류의 액체에 외력을 이용하여 교반하면 한쪽이 미립화되어 다른쪽의 액체중에 분산된다.이 과정을 유화라 하고, 이 분산계를 에멀전이라 한다. 물과 기름 같이 혼합되지 않는 두 액상의 한쪽을 다른 상에 분산시키면 두 액상의 계면 면적은 증대하나, 열역학적으로는 불안정한 계로 된다. 안정된 에멀전을 얻으려면 액상 계면에 흡착해서 조밀한 흡착 막을 형성하여 계면의 자유 에너지를 저하시켜 계를 안정화시키는 것으로써 기름과 물과의 계면장력을 낮추어 액적화를 이루는 계면활성제를 사용할 수가 있다. 에멀전 형태는 기름이 분산질인 수중 유적형(Oil in water type) 과 물이 분산질인 유중 수적형(Water in oil type)이 있으나 미세 폭발이나 질소산화물의 생성억제 등의 효과가 높아 유화안정성, 유동성, 부식성 및 연소성(착화성)이 좋은 유중 수적형이 디젤기관 에멀전유로 주로 사용된다. 에멀전 연료의 특징은 미세 폭발과 착화 지연에 의한 후연소의 촉진으로 물 분사와는 달리 NOx 이외에 Soot까지 동시에 저감하고 부분적으로는 연비가 향상된다는 결과가 보고되고 있다.^[11] 그러나 결점으로써는 정지했다가 재사용시 기름과 물이 분리되어 다시 혼합하여야 하는 단점이 있다.

최근에 연구되고 있는 혼합방법으로써는 초음파 변환기를 이용하는 Mixing 법과 Inline 법의 단점인 물과 기름의 경계층이 생기는 점과 캐비티의 발생수가 적은 점을 보완한 In-line mixing 방법이 주로 연구되고 있다.

3) HAM(Humid Air Motor)

최근에 MAN B&W사에서 개발한 기술로써 NOx를 줄이기 위해서 연료를 먼저 분사하고 시간차로 물을 분사하여 연소실 온도를 낮추는 방법으로써 에멀전 연료를 사용하는 방법과 비교해서 물의 비율을 50% 이상 분사할 수 있다는 점, 물과 기름이 분리될 염려가 없다는 점 그리고 바다에 있는 해수를 활용하여 물이 제공될 수 있다는 장점을 가지고 있어서 향후에 많은 사용이 기대된다.

4) AGR(Air Gas Recirculation)

TC(Turbo-charger) 또는 TCI(Turbo-charger intercooler) 기관에 사용되는 NOx 저감 기술로써 새로운 공기가 터보차저를 지나서 고온·고압화된 공기를 부분적으로 필요한 구간에서 연소실로 보내지 않고 다시 에어클리너와 터보차저 사이로 바이패스 시키는 방법으로 현재 자동차에만 적용되고 있는 새로운 기술이나, NA(Natural aspiration) 기관에서는 적용할 수 없는 단점을 가지고 있다. 이러한 기술은 향후에 박용기관에도 적용성 검토를 해볼 가치가 있다고 사료된다.

5) 내부(Internal) EGR

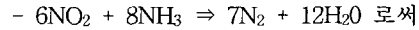
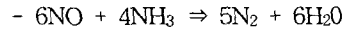
흡·배기 밸브의 타이밍을 이용하여 연소가스의 일부를 대기로 방출하지 않고 실린더내에 잔류시키는 방법으로, 기존 EGR 시스템과 비교해서 기관의 외각 치수를 키우지 않아도 되는 점과 각 기통별로 일정한 량의 잔류가스를 남길수 있다는 장점이 있다. 그러나 체적효율이 저하되는 단점을 가지고 있어서 근래에 까지 국내에서도 연구 단계에 있어 왔다.^[8]

최근에는 이러한 내부 EGR의 일종으로 2단 배기 밸브캠을 이용하여 배기밸브의 주 캠으로는 배기역할을 하고, 보조 캠으로는 흡기밸브가 열려 있는 동안에 배기밸브를 조금 열어서 배기관으로 나가고 있던 배기 압력파가 흡기밸브를 통해서 역류하여 들어가 실린더내에 잔류가스를 남게 하는 방법으로, 2000년도 중반부터 일본 히노사에서 상품화하여 자동차용으로 적용하고 있다고 소개된 바가 있다.^{[9][10]}

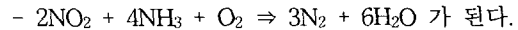
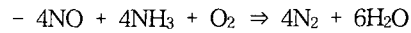
6) SCR(Selective Catalytic Reduction)

주로 선박용으로 많이 사용되고 있으며, 중요

환원공식은



배기 가스에 환원제인 NH₃(Ammonia gas)를 혼합시킨 후 선택적촉매반응기(SCR)에 통과시킴으로써 배기 가스중에 포함되어 있는 질소산화물의 90% 이상을 무해한 순수 질소(N₂)와 물(H₂O)로 화학 분리시켜 연도로 증발 시키는 것이 기본 원리이다. 즉,



이러한 화학반응은 1,123 K (850 °C) 이상의 고온에서만 자연적으로 일어날 수 있으나 엔진의 배기가스 온도는 이보다 훨씬 낮은 550°C 정도이다. 따라서, 낮은 온도에서도 이러한 반응을 쉽게 유도하기 위하여 촉매(Catalyst)를 이용하여 배기 가스중의 NOx에 한하여만 촉매반응을 선택적으로 일으키도록 하여 NOx만을 제거하는 장치이다. 이러한 SCR 시스템은 이미 상용화되어 일부 국적 선사에서도 SCR 시스템을 선박에 적용하여 활용중에 있으나, 아직까지 국외(HALDOR TOPSOE사, ABB사, SIEMENS사 등)에서도 SCR 시스템에 대한 제어시스템의 최적화 작업이 진행중에 있다.

2-2. NOx 측정 시스템 구축

1) NOx 분석기 및 시험엔진

본 연구에서는 NOx 저감장치 개발의 첫 단계로써 현 양산 엔진에서 발생하는 NOx량을 정확하게 측정하기 위하여 ISO8178 인증을 획득한 이동식 NOx & O₂ Analyzer(EXSA-240C) 장비를 구입하였으며, 압력 센서류, A/D Board, 노트북 등을 조합하여 NOx 측정 시스템을 구축하였다. 또한, 이 장비의 정확성을 평가하기 위하여 본교 내연기관 실험실에 설치되어 있는 트랙터용 3기통 직접분사식 소형 디젤기관(3D100)을 대상으로 NOx를 측정 하였다. 또한, 본교 실습선인 새유달호의 주기관에 대한 NOx를 측정하여 비교·분석하였다. 본교 내연기관 실험실에 설치되어 있는 실험기관의 제원은 표2 와 같다.

디젤기관의 NOx 저감방법 및 NOx 측정에 관한 연구

Table 2 Specification of the testing engine

Items	Specipication
1 Engine Model	3D100
2 Engine type	3-Cylinder 4-Cycle Diesel Engine
3 Max. Output	47/2600(PS/RPM)
4 Bore x Stroke	100 x 110 (mm)
5 Compress. Ratio	17.6
6 Swept Volume	864 (cc)
7 Injection Timing	17 ± 1°
8 Fuel consumption rate	Max. 175 (g/ps · h)

주어야 한다. 측정에는 순시 농도 측정과 평균 농도 측정으로 구분되며, 측정 농도 값이 그림 2의 (a)에서 처럼 NOx 분석기 화면에 나타난다. 그리고 평균 농도 측정시 설정된 시간이 경과하면 NOx, O₂ 및 Corr. NOx 의 평균 농도 값이 그림 2의 (c)에서 처럼 자동으로 출력된다.

2) 실험장치의 개략도

그림 1은 실험장치의 개략도를 나타내고 있다. 실험장치의 NOx를 측정하기 위한 프로브 ⑤의 위치는 그림 2의 (d)에서와 같이 베기메니홀드 출구측의 수평구간에 설치하였다.

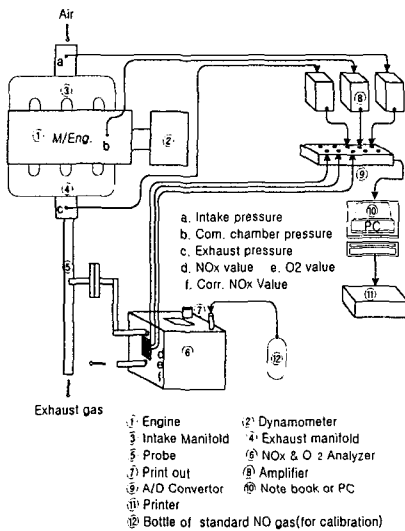
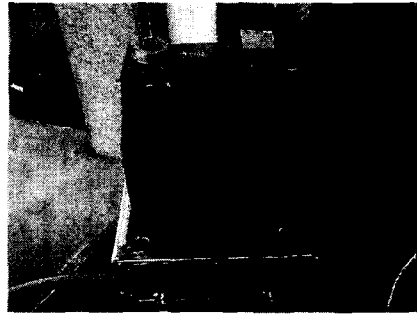


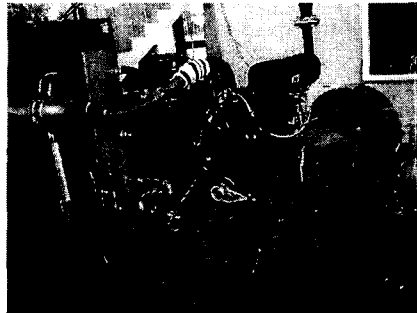
Fig. 1 Schematic diagram of testing apparatus

3) NOx 측정방법

그림 2의 (a), (b), (c), (d) 는 NOx 측정을 위하여 구축된 실험장비 및 실험기관의 사진이며, (e) 는 실습선 주기관의 NOx 측정 위치를 보여주는 사진이다. NOx 측정전에 주의할 사항으로는 반드시 표준 NO gas(1890 ppm, 1950 ppm)와 O₂ gas를 보정하여 주어야 하며, 유량계가 약 200 ml/min. 가 되도록 Needle Valve를 조정해



(a) Portable NOx & O₂ Analyzer



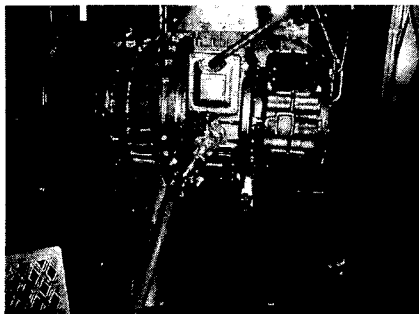
(b) Apparatus of testing engine



(c) Print out of measuring value



(d) Installed probe on the exhaust pipe



(e) Measuring point for main engine of training ship

Fig. 2 Photographs of experimental apparatus and main engine

2-3. NOx 측정

1) 실험실 엔진에 대한 NOx 측정

1200 rpm 에서부터 Rated rpm 인 2600 rpm 까지 200 rpm 씩 올려가면서 무부하, 25% 부하, 50% 부하 및 95% 부하에 대해서 측정한 결과 NOx 값이 그림 3과 같이 나타났다. 무부하 상태에서는 NOx 값이 약 250 ppm 이하 수준으로 양호했으나, 기관 회전수를 1200 rpm으로 고정후 부하를 변경하면서 측정한 결과 25% 부하시에 1689 ppm, 50% 부하시에 2248 ppm 그리고 95% 부하시에 2274 ppm으로 무부하시와 비교해서 NOx 농도 값이 급격히 상승하였다. 본 실험기관은 트랙터용 직접분사식 소형 디젤기관으로써 박용 디젤기관의 NOx 규제치를 훨씬 상회하는 수준이었으나, 표1 의 박용 디젤기관 규제치 경향대로 고속으로 가면서 줄어드는 양상을 나타내고 있다.

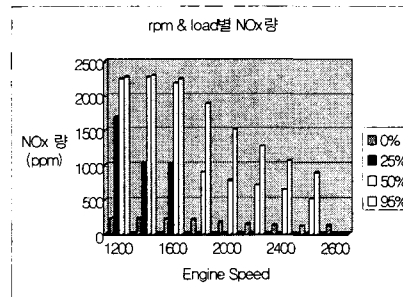


Fig. 3 Measured NOx values of 3D100 engine by speed and load

2) 실습선 주기관에 대한 NOx 측정

실습선 주기관의 제원은 표4 와 같으며, 주기관의 측정결과는 그림 4 ~그림 7과 같다. 그림 4에서는 S/B시, 항해중 그리고 엔진속도를 Full(207 rpm), Half(167 rpm), Slow(124 rpm), D/Slow(99 rpm)로 변경하면서 2분 간격으로 측정한 NOx 평균값이다. 그래프에서 보는 바와 같이 S/B 초기에는 NOx값이 약 1350 ppm까지 올라 갔다가 차츰 안정되어 항해중에는 Full Speed(207 rpm)에서도 약 1050 ppm을 유지하였다. 그리고 엔진속도를 Full→Half→Slow→D/Slow→Slow→Half→Full로 조정하면서 반복하여 NOx를 측정하였다. 그림 5는 S/B→ 항해중→엔진속도 조절의 전과정에 대한 NOx값을 나타내고 있다. 또한, 그림 6과 그림 7은 NOx를 측정하면서 동시에 측정되는 O₂(%) 값과 Corr. NOx(ppm) 값을 나타내고 있다.

Table 4 Specification for Main engine of Training ship

Items	Specification
1 Engine Model	8S26MC
2 Engine type	2-Stroke, 8-Cylinders Single Acting, Crosshead Type, T/C Diesel Engine
3 Engine Rating	- MCR : 3,970BHP at 250rpm - CSR : 3,573BHP at 241.4rpm
4 Bore x Stroke	260 x 980 (mm)
5 Swept Volume	52,005 (cc)
6 MEP at MCR	16.8 bar
7 Piston speed at MCR	8.17 m/sec
8 Max. cylinder pressure	170 bar

디젤기관의 NOx 저감방법 및 NOx 측정에 관한 연구

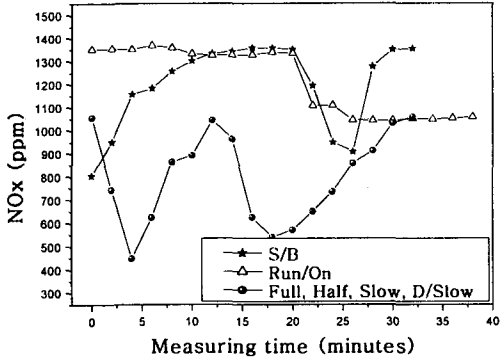


Fig. 4 Measured NOx values for main engine

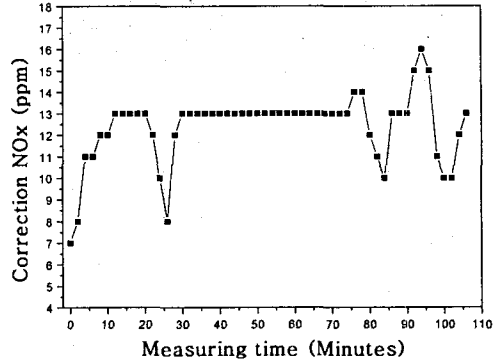


Fig. 7 Measured correction NOx values for main engine

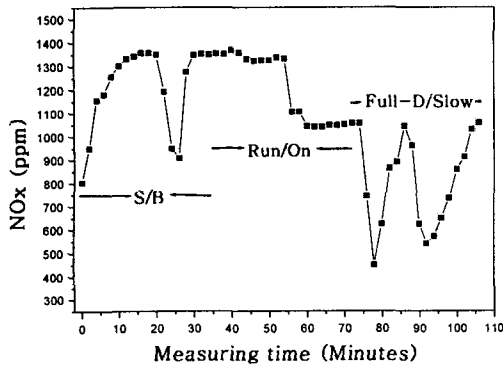


Fig. 5 Measured NOx values for main engine

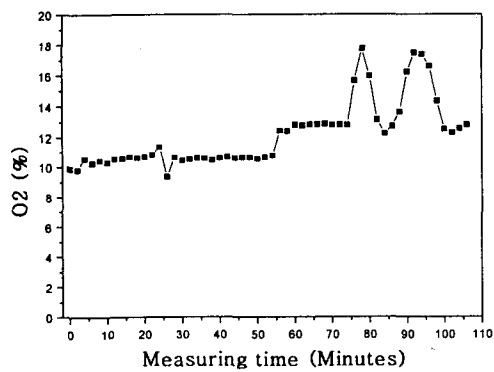


Fig. 6 Measured O2 values for main engine

3. 결론

NOx 저감 방법으로 많은 기술들이 연구되고 있지만 현재 상품화되어 있는 기술로는 크게 자동차용과 선박용으로 구분되고 있다. 자동차용으로서는 EGR 시스템이 주로 사용되고 있으며, 선박용으로서는 SCR 시스템이 많이 사용되고 있다. 또한, EGR 시스템을 선박에 활용하기 위해서 스크러버형 EGR 시스템이 연구되고 있고, NOx 뿐만 아니라 Soot 까지도 저감되는 에멀전 연료 사용이 연구중에 있다. 날이 갈수록 더욱더 엄격해지는 Emission 규제치를 만족시키기 위해서는 현재 사용하고 있는 EGR 시스템이나 SCR 시스템에 내부 EGR 시스템을 병용한다든지, 또는 SCR 시스템의 촉매인 NH₃ 나 Urea를 개선하는 방향으로 노력해야 할 것이다.

따라서 본 연구에서는 계속적으로 NOx 저감 방법을 연구하기 위하여 NOx 측정 시스템을 구축하였으며, 트랙터 기관을 대상으로 NOx를 측정하여 NOx 측정 시스템의 정확성을 확인하였다. 그리고 본교 실습선의 주기관을 대상으로 NOx값을 측정하여 현 수준을 파악하였다. 아직까지는 선박으로부터의 대기오염방지 규제가 국내법으로 적용되고 있지 않지만, 추세로 보아 조만간에 적용될 것이 분명하므로 선박 건조사에서는 이러한 점을 고려하여 설계 초기부터 NOx 측정 위치를 고려할 필요가 있다. 또한, 향후 정책입안의 자료로 활용하기 위해서는 좀더 다양한 선박(상선, 여객선, 어선 등)에서 좀더 많은 NOx 측정 데이터가 필요하리라 사료된다.

참고문헌

1. H. Heisler, "Advanced Engine technology", 1997.
2. 최재성, "EGR 시스템을 갖춘 디젤기관의 성능 예측 프로그램 개발", 한국기계연구원 연구 보고서, 1996. 10.
3. 김종현, "IMO 대기오염방지 협약의 내용" 선박 대기오염에 관한 국내외 동향, pp. 39 ~50, 1999. 5
4. 손진록, "선박의 대기오염물질 배출규제 및 대책" 한국박용기관학회지, 제25권제 3호, 2001. 5
5. S. N. Yoo, J. R. Son, Successful Test and Certification in compliance with IMO NOx Regulation-2-Stroke, Low-Speed, Crosshead Engine" 선박대기오염에 관한 국내외 동향, pp. 39~50, 1999. 5
6. MAN B&W technical report, "Emission Control for Two Stroke Low-Speed Diesel Engines"
7. 김대식, 엄명도 "선박엔진의 NOx 배출량산정" 한국박용기관학회지, 제24권 제 24호, pp. 49~53, 2000.
8. 남정길, 최재성, "디젤기관의 내장형 EGR시스템 적용 가능성에 관한 연구" 한국박용기관학회지, 제23권 제3호, 1999. 5
9. Masajikumo 外 3人, "Development of New EGR System", 自動車技術, Vol. 54, No. 9, pp. 86~93, 2000.
10. 일본 Engine Technology, Vol. 2, No.5, pp. 86~93, 2000.