

디젤엔진의 NO_x 배출 특성에 관한 연구

남 정 길[†] · 최 주 열^{*}

(원고접수일 : 2002년 1월 24일, 심사완료일 : 2003년 3월 25일)

A Study for NO_x Discharge Characteristics of Diesel Engines

Jeong-Gil Nam[†] · Joo-Yeol Choi^{*}

Key words : NO_x Reduction Methods(질소산화물 저감방법), NO_x Concentrations(질소산화물 농도값), NO_x Technical Code(질소산화물 기술코드), Portable NO_x Measuring System(이동식 질소산화물 측정장치)

Abstract

According to the NO_x regulations of annex VI to IMO MARPOL 73/78, all diesel engines with a power output of more than 130 kW should be delivered so as to comply with the IMO speed dependent NO_x limit. It is inevitable to adopt this regulations for marine engines. Therefore, most of diesel engines which are being currently built should be designed and tested in accordance with the NO_x technical code. In this study, NO_x concentrations of 4 type engines were measured with portable NO_x measuring system recommended by ISO-8178.

As the results, NO_x concentrations of each engine by variation of engine speed and engine load were visualized. Also, these results can be utilized for the basic design and development of diesel engine for NO_x reduction.

1. 서 론

디젤엔진의 역사는 짧지만 사용자들의 요구조건을 충족시키기 위해서 개발을 거듭하여 오늘에 이르렀다. 초기에는 내구성이 우선적으로 요구되다가 점차 고효율·고효율의 엔진이 요구되었으나, 최근에 와서는 전세계적으로 친환경 엔진이 요구되고 있다.⁽¹⁾ 특히, 2000년 1월 1일 이후에 건조

되는 선박에 탑재되거나 엔진의 주요 개조가 이루어지는 출력이 130 kW 이상의 선박용 디젤엔진(단, 비상시에만 사용되는 비상 디젤엔진 및 구명정 엔진은 제외)의 NO_x에 대한 규제치는 엔진의 회전수에 따라 일정한 배출량 이하로 규제를 받게 되어 있다.⁽²⁾⁻⁽⁴⁾ 엔진 제조사에서는 엔진 생산시 엔진 웨일리별로 NO_x를 측정하여 규제치에 합격한 엔진에 대해서만 NO_x 적합증서를 발부하여,

[†] 책임저자(목포해양대학교 기관공학부 조교수), E-mail:jgnam@mail.mmu.ac.kr, T:(061)240-7098

^{*} 목포해양대학교 기관공학부 교수

생산엔진에 대한 NOx 규제치를 관리하고 있다. 그러나 제조된 엔진이 선박에 탑재된 후에 선박에 대한 정기검사나 임시검사시 NOx를 측정하는 방법이 아직까지는 국내에 개발되어 있지 않아, 이동식 NOx 측정시스템 구축이 절실히 요구되고 있다. 또한, NOx 저감의 필요성 때문에 NOx 저감 기술 및 대책에 대한 많은 연구뿐만 아니라⁽⁵⁾⁻⁽¹²⁾, 운항중인 선박에 탑재된 디젤엔진의 NOx 측정결과들도 보고되고 있다.⁽¹³⁾

따라서 본 연구에서는 운항중인 선박에서 NOx 배출량을 정확하게 측정할 수 있는 ISO8178 규정에서 인증한 NOx 측정시스템을 구축하였다. 또한, 구축된 NOx 측정시스템을 활용하여 산업용 디젤엔진, 실습선 박용디젤엔진, 어선용 디젤엔진 및 가스터빈엔진에 대한 NOx 농도측정 값을 비교·검토하여 현재 사용되고 있는 엔진들의 NOx 배출 경향을 파악하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 NOx 측정 시스템 구축

1) 실험장치의 개략도

Fig. 1은 실험장치의 개략도를 나타내고 있다.

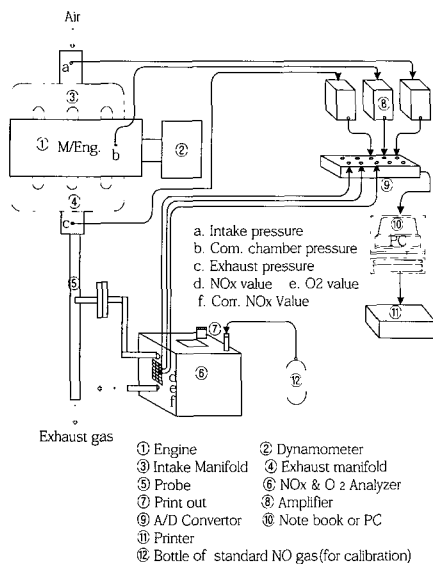


Fig. 1 Schematic diagram of testing apparatus.

NOx 농도를 측정하기 위한 프로브 위치는 ⑤와 같이 배기관 출구측(출구측으로부터 0.5 m 이상 되거나 배기파이프 직경의 3배 이상, 배기가스 온도가 70 ℃이상, 가능하면 엔진에 가까운쪽)의 수평구간에 설치하였다.

2) NOx 농도 측정방법

본 측정장비의 NOx 농도 측정전에 주의할 사항으로는 반드시 표준 NO gas(1890 ppm, 1950 ppm) 및 O₂ gas로 보정하여 주어야 하며, 유량계가 약 200 ml/min. 가 되도록 Needle Valve를 조정해 주어야 한다. 측정방법에는 순시농도 측정과 평균농도 측정으로 구분되는데, 본 연구에서는 1분간 평균농도 측정방법으로 측정하였다. NOx 측정은 IMO에서 요구하는 엔진측정 모우드로 하였으며, 모우드는 Table 1과 같다.

Table 1 Test cycles and weighting factors to be applied.

Test cycle	Items					
1 E2 Mode	Speed(%)	100	100	100	100	Constant speed main propulsion engine (VPP)
	Power(%)	100	75	50	25	
	Weighting Factor	0.2	0.5	0.15	0.15	
2 E3 Mode	Speed(%)	100	91	80	63	Propeller law operated main engine (FPP)
	Power(%)	100	75	50	25	
	Weighting Factor	0.2	0.5	0.15	0.15	

3) NOx & O2 분석기

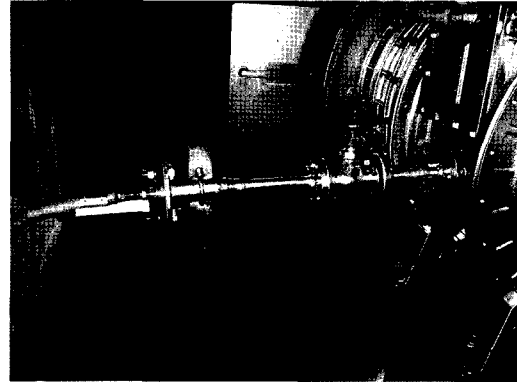
본 연구에서는 운항중인 선박에서의 NOx 농도를 정확하게 측정하기 위하여 ISO8178 인증을 획득한 이동식 NOx & O₂ Analyzer (EXSA-240C)장비를 사용하였으며, 제원은 Table 2와 같다.

Table 2 Specification of portable NOx & O₂ analyzer.

Items	Specification	Remarks
1 Principle	NOx : Hot CLD O ₂ : Galvanic cell	
2 Measuring range	NOx : 0~2,500 ppm O ₂ : 0 ~ 25 %	
3 Operating temperature	5 ~ 45 °C	
4 Response time	T ₉₀ , 30 sec	
5 Linearity	NOx : ± 2 % FS O ₂ : ± 2 % FS	
6 Noise	± 1 % FS	
7 Repeatability	± 0.5 % FS	
8 Interference	Less than 3% of NOx reading by 10% CO ₂	
9 Calibration gas	Can by NO standard gas (1ℓ, 7 atoms)	
10 Dimensions (mm)	300 x 311 x 200	W,H,D
11 Weight	Approx. 11 kg/24 lb	
12 Analog output	0 ~ 1 V FS	
13 Power consumption	250 VA (incl. Heated Line)	
14 Power	100~240 V AC±10% 50/60 Hz±5%	
15 Maker	HORIBA	

2.2 각종 엔진들의 NOx 농도 측정위치

Fig. 2는 각종 엔진들의 NOx 측정을 위한 프로브 위치를 보여주고 있다. (a)는 산업용 소형디젤엔진, (b)는 실습선 박용디젤엔진, (c)는 어선용 디젤엔진 및 (d)는 가스터빈엔진의 NOx 농도 측정시 사진들이다.



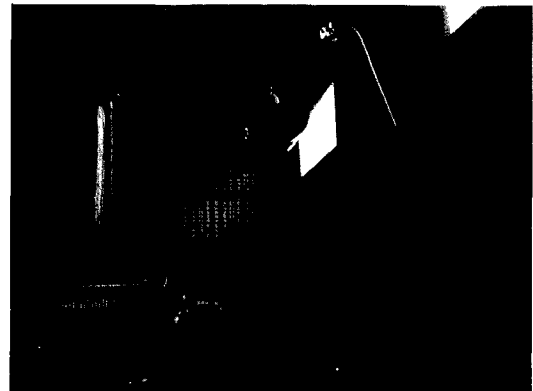
(b) Measuring point of the main engine for training ship



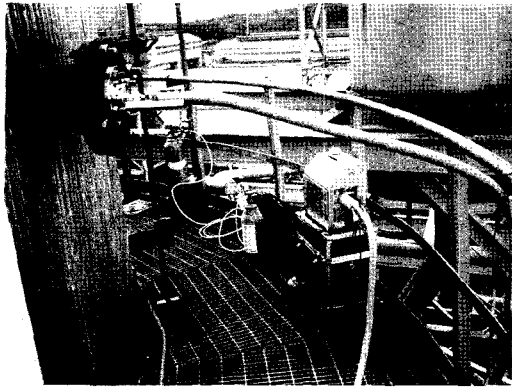
(c-1) Diesel engine of fishing vessel



(a) Measuring point of the testing engine in the laboratory



(c-2) Measuring point of the diesel engine for fishing vessel



(d-1) Measuring point of gas turbine engine for steam power generation



(d-2) Chimney of steam power generation

Fig. 2 Photographs of 4 type engines for measurement.

3. 결과 및 고찰

3.1 실험실의 산업용 디젤엔진에 대한 NOx 측정

산업용 디젤엔진의 제원은 Table 3과 같으며, 본 엔진의 NOx 농도 측정결과는 Fig. 3과 같다. Fig. 3에 나타낸바와 같이 측정방법으로는 1,200 rpm 에서부터 Rated rpm 인 2,600 rpm 까지 200 rpm 씩 올라가면서 무부하, 25% 부하, 50% 부하 및 95% 부하에 대해서 NOx 농도 값을 측

정하였다. NO Std. 가스의 Calibration 값은 1,910 ppm 이며, 저속구간(1,200~1,600 rpm) 이면서 50% 이상의 부하에서 측정된 NOx 농도 값이 NO Std. 가스의 Calibration 값을 훨씬 상회하므로 측정된 NOx 농도 값의 정확도가 다소 떨어진다. 따라서, NOx 농도 값의 경향만을 보기 위해서 95% 부하에서도 NOx 농도를 측정을 하였다. 무부하 상태에서는 NOx 농도 값이 약 250 ppm 이하 수준으로 양호했으나, 엔진 회전수를 1,200 rpm으로 고정한 후 부하를 변경하면서 측정된 결과 NOx 농도 값이 25% 부하시에 1,689 ppm, 50% 부하시에 2,248 ppm 그리고 95% 부하시에 2,274 ppm 으로 무부하시와 비교해서 NOx 농도 값이 급격히 상승하였다. 따라서 NOx 농도 값은 엔진의 회전수보다도 부하변동에 훨씬 많은 영향을 받음을 알 수 있었다. 본 실험엔진은 직접분사식 디젤엔진으로서 박용 디젤엔진의 NOx 규제치를 훨씬 상회하는 수준이었다.

Table 3 Specification of the testing engine in the laboratory.

Items	Specification
1 Engine Model	3D100
2 Engine type	3-Cylinder 4-Stroke Diesel Engine
3 Max. Output	47/2,600(PS/RPM)
4 Bore x Stroke	100 x 110 (mm)
5 Compress. Ratio	17.6
6 Swept Volume	864 (cc)
7 Injection Timing	BTDC 17 ± 1°
8 Fuel consumption rate	Max. 175 (g/ps · h)

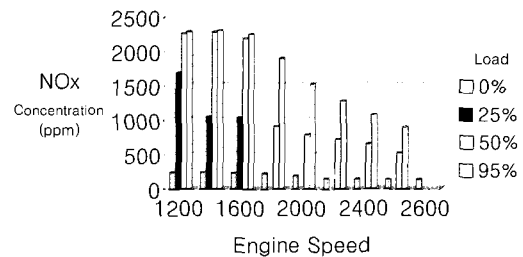


Fig. 3 Results of NOx concentration for the testing engine.

3.2 실습선 주기관에 대한 NOx 측정

실습선 메인 엔진의 제원은 Table. 4와 같으며, 메인 엔진의 NOx 농도 측정결과는 Fig. 4 ~ Fig. 6과 같다. 메인 엔진의 연료상태는 시동시부터 S/B시를 거쳐서 약 55분이 경과 할때까지는 MDO를 계속해서 사용하다가, 그 이후 부터는 HFO(380 cst)로 Bunker Change를 하였다. Fig. 4에는 S/B시, 항해중 그리고 엔진속도를 Full(207 rpm), Half(167 rpm), Slow(124 rpm), D/Slow(99 rpm)로 변경하면서 2분 간격으로 1분씩 측정된 NOx 농도 값을 각각의 그래프로 나타내고 있다. Fig. 4 에서 보는바와 같이 MDO를 사용하는 S/B시 및 Run/On 초기에는 NOx 농도 값이 Full Speed(207 rpm)에서 약 1,350 ppm까지 올라 갔으나, HFO 로 Bunker Change 하고 나서부터는 Full Speed에서도 약 1,050 ppm을 유지하였다. 이 결과로 볼 때 MDO 보다는 오히려 조악한 HFO 를 연료로 사용할때가 NOx 농도 값이 훨씬 유리함을 알 수 있다. 그리고 엔진속도를 "Full→Half→Slow→D/Slow→Slow→Half→Full"로 조정하면서 반복하여 NOx 농도를 측정된 결과에서 보듯이, 부하 변동에 따른 NOx 농도 변화 값을 한눈에 볼 수 있다. Fig. 5는 S/B→항해중→엔진속도변동시의 전 과정에 대한 NOx 평균농도 값을 하나의 그래프로 나타내고 있다. 또한, Fig. 6은 NOx 평균농도 값을 측정하면서 동시에 측정되는 O₂(%) 농도 값을 나타내고 있다.

Table 4 Specification of the main engine for 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 Mean Piston speed at MCR	8.17 m/sec
8 Max. Cylinder pressure	170 bar

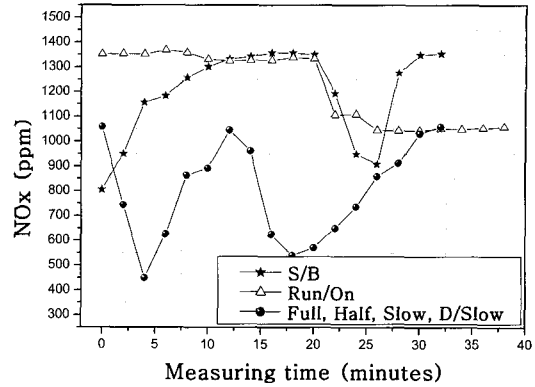


Fig. 4 NOx concentration of the main engine for training ship.

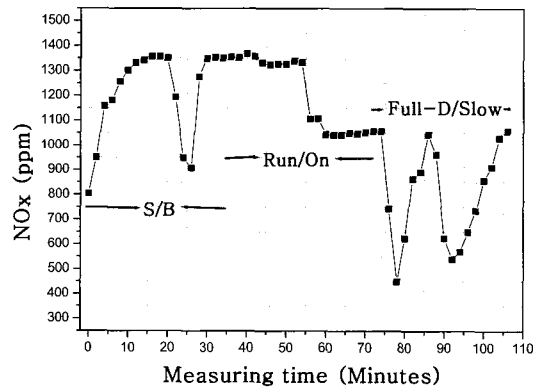


Fig. 5 NOx concentration of the main engine.

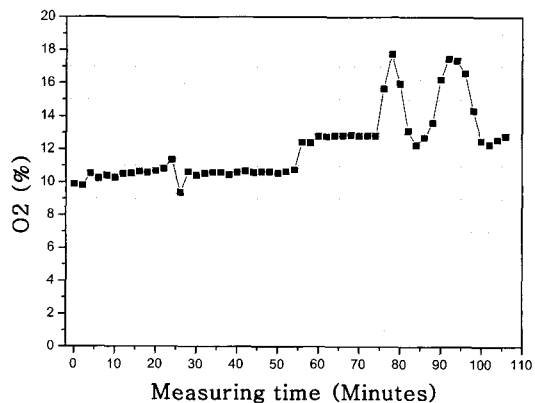


Fig. 6 O₂ concentration of the main engine.

3.3 어선용 보우드윈 박용 디젤엔진에 대한 NOx 측정

어선용 박용 디젤엔진의 제원은 Table 5와 같으며, 본 엔진의 NOx 농도측정 결과는 Table 6과 같다. 측정 방법으로는 다이نام오 상태에서 정속도 주추진기관 모우드인 E2 모우드로 NOx 농도값을 측정하였다. NOx 농도측정 결과 E2 모우드에서는 Full speed 상태에서 엔진부하를 100%, 75%, 50% 및 25%로 낮게 하면서 NOx 농도측정 결과 Table 6에서 보인바와 같이 선형적으로 줄어들음을 알 수 있었다. 또한 Full load 상태에서 엔진속도를 100%, 91%, 80% 및 63%로 줄이면서 NOx 농도측정 결과 NOx 농도 값이 거의 선형적으로 커짐을 알 수 있었다.

3-4 화력발전소 가스터어빈 엔진에 대한 NOx 측정

화력발전소 가스터어빈 엔진의 NOx 농도측정

Table 5 Specification of the main engine for a fishing vessel.

Items	Specification
1 Engine Model	8M26SR
2 Engine type	Diesel Engine, 4-Stroke, Direct Injection, 8 in VeeCylinders, Crosshead Type, TCI
3 Max. output	600/1,800 (PS/rpm)
4 Bore x Stroke	150 x 150 (mm)
5 Swept Volume	21,195 (cc)
6 Idle speed	650 rpm
7 Compression ratio	14/1

Table 6 Test results of NOx concentration for the main engine.

Speed (%)		Load (%)				Remarks
		100	75	50	25	
E2 & E3 Mode	100	652 E2, E3	540 E2	464 E2	377 E2	E2 & E3 Mode
	91	704	E3	-	-	
	80	817	-	E3	-	
	63	890	-	-	E3	

결과는 Table 7과 같으며, 가스터어빈 엔진의 제원은 Table 8과 같다. 가스터어빈 엔진을 사용하는 화력발전소의 NOx 농도 규제치는 2005년까지는 250 ppm으로 되어 있으며, 본 엔진은 물과 저유황중유(LSWR)를 동시에 분사하는 시스템으로 되어 있다. NOx 농도측정 방법으로는 엔진 운전조건을 Full Speed 상태로 운전하면서, 표준가스 농도를 3가지로 바꿔가면서 Full load 상태에서 NOx 평균농도 값을 측정해 보았다. Table 8에서 보는바와 같이 표준가스 농도에 따라서 NOx 농도측정 값에 다소 차이가 있음을 알 수 있었다. 운전 여건상 NO 표준가스 농도를 1,910 ppm으로 고정하고, 부하를 90%로 줄인 상태에서 NOx 농도 값을 측정한 결과 예상했던대로 100% 부하시보다 약 15 ppm 줄어들음을 알 수 있었다. 박용 디젤 기관과 비교해서 가스터어빈 엔진의 NOx 농도 측정값이 훨씬 낮은 이유는 물과 저유황중유(LSWR)를 동시에 분사하는 연료에 있다고 생각된다.

Table 7 Test results of NOx concentration for gas turbine engine.

Standard gas	100 % load	90 % load	Remarks
1 1,796 ppm	176 ppm	-	100 % speed
2 875 ppm	132 ppm	-	
3 1,910 ppm	160 ppm	145 ppm	

Table 8 Specification of gas turbine engine for steam power generation.

Items	Specification
1 Engine Model	Gas turbine engine(501D5)
2 Engine type	4 stage reaction
3 Raeted rpm	3,600rpm
4 Power	104,000 (MW)
5 Inlet pressure	14 (kg/cm ²)
6 Inlet temperature	1,132 (°C)
7 Exhaust gas temperature	509 (°C)
8 Governor type	Electro-hydraulic governor control
9 Used fuel	LSWR

4. 결 론

본 연구에서 수행한 NOx 농도측정 결과로 엔진 속도와 부하변동에 대한 NOx 농도 값(ppm)의 변화를 가시적으로 나타낸 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, NOx 농도 값은 엔진의 회전수보다도 부하변동에 훨씬 많은 영향을 받으며, 저속 고부하시에 NOx 농도 값이 가장 큼을 알 수 있었다.

둘째, 선박의 경우 엔진 시동시에 사용한 MDO보다는, Bunker Change 하여 오히려 조악한 HFO(380 cst)를 연료로 사용할 때가 NOx 농도 값이 훨씬 유리함을 알 수 있었다.

셋째, 선박엔진의 연료와는 다르게 물과 저유황중유(LSWR)를 동시에 분사하는 가스터어빈엔진의 NOx 농도 값은 Full Speed & Full Load 상태에서 약 160 ppm 수준임을 알았다.

향후에는 본 시스템에 엔진출력, 배기 배출량, 연료 소모량, 대기조건 및 가중치 등을 감안하여 IMO에서 규제하는 NOx 농도값(g/kW·h)을 정확하게 측정할 수 있는 시스템을 구축하고자 한다. 또한, 아직까지는 선박으로부터의 대기오염방지규제가 국내법으로 적용되고 있지 않지만, 추세로 보아 조만간에 적용될 것이 분명하므로 조선소에서는 이러한 점을 고려하여 선박설계 초기부터 NOx 측정위치 및 프로브용 플랜지사양을 고려할 필요가 있다고 사료된다.

참고문헌

[1] H. Heisler, "Advanced Engine technology", 1997.
 [2] 김종현, "IMO 대기오염방지 협약의 내용", 선박 대기오염에 관한 국내외 동향, pp.39~50, 1999.

[3] 손진록, "선박의 대기오염물질 배출규제 및 대책", 한국박용기관학회지, 제25권 제3호, pp. 57~70, 2001.
 [4] 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] 정경열, 류길수, "질소산화물 제거기술", 한국박용기관학회지, 제25권 제1호, pp. 57~64, 2001.
 [6] 김대식, 엄명도 "선박엔진의 NOx 배출량산정", 한국박용기관학회지, 제24권 제24호, pp. 49~53, 2000.
 [7] 박권하, "박용디젤기관의 질소산화물 저감기술", 한국박용기관학회지, 제25권 제5호, pp. 42~71, 2001.
 [8] 배명환, "박용 디젤기관의 배기규제 및 배기 배출물 저감 대책," 한국박용기관학회지, 제25권 제3호, pp. 41~55, 2001.
 [9] Myung-whan BAE, Jung-ho Ha, Kazuo TSUCHIYA, "The Characteristics of Wear in Diesel Engines with Scrubber EGR System", F2000A120, pp. 1~7, 2000.
 [10] 남정길, 최재성, "디젤기관의 내장형 EGR시스템 적용 가능성에 관한 연구", 한국박용기관학회지, 제23권 제3호, 1999.
 [11] Masajikumo 外 3人, "Development of New EGR System", 自動車技術, Vol. 54, No. 9, pp. 86~93, 2000.
 [12] 일본 Engine Technology, Vol. 2, No.5, pp. 86~93, 2000.
 [13] Satoru Yanase 外 3人, "Investigation about Measurement of Exhaust Emissions from Marine Diesel Engines", Research Institute, pp. 59~64, 1995.

저 자 소 개

**남정길 (南廷吉)**

1962년 3월생. 1985년 한국해양대학교 기관공학과 졸업. 1991년 동 대학원 기관공학과 졸업(공학석사). 1999년 동 대학원 기관공학과 졸업(공학박사). 1992년~1999년 현대자동차 중앙연구소(디젤엔진설계팀). 2000년~현재 목포해양대학교 기관시스템공학부 조교수.

**최주열 (崔珠烈)**

1952년 12월생. 1975년 한국해양대학교 기관공학과 졸업. 1982년 조선대학교 기계공학과 졸업(공학석사). 1992년 조선대학교 기계공학과 졸업(공학박사). 1990년~1991년 Purdue University 객원교수. 1980년~현재 목포해양대학교 기관시스템공학부 교수.