

선박 주 추진기관으로 사용가능한 대형 디젤엔진의 배기가스 특성 분석

이형민[†] · 박랑은¹

(원고접수일 : 2012년 3월 28일, 원고수정일: 2012년 5월 1일, 심사완료일 : 2012년 5월 8일)

Exhaust Emission Characteristics from Heavy-duty Diesel Engine applicable to Prime Propulsion Engine for Marine Vessels

Hyungmin Lee[†] · Rangeun Park¹

요약: 본 논문은 선박의 주 추진기관으로 사용가능한 육상 운송수단에 탑재되어있는 대형 디젤엔진에서 배출되는 입자상 물질과 질소산화물의 배출특성을 ESC mode에 적용시켜 분석하는데 초점을 두었다. 입자상 물질은 엔진의 고부하 영역에서 다량으로 배출되는 특성을 확인 할 수 있었으며 질소산화물의 경우 배기가스 온도 측정형태와 동일한 경향으로 배출되었다. 매연여과장치를 부착하여 입자상 물질의 배출특성을 분석한 결과 mode별 1/100~1/1,000배까지 저감되었다. 그러나 급격한 엔진 부하 변동 시 저감 효과는 떨어졌으며 고속-고부하 영역에서는 매연여과장치내부의 온도상승으로 일부 재생현상이 발생하여 입자상 물질의 배출 증가 결과를 초래하는 현상이 발생하였다. 시험엔진에서 배출되는 입자상 물질의 입경분포를 분석한 결과 대부분 100nm 이하의 크기를 가지는 나노 입자가 배출되었으며 매연여과장치를 부착 및 탈착하여 측정된 결과 배출수준에는 차이가 있지만 입자상 물질의 입경분포는 비슷한 경향으로 분석되었다.

주제어: ESC(European Steady-State Cycle), 입자상 물질, 질소산화물, 매연여과장치, 입경분포

Abstract: The objective of this work presented here was focused on analysis of particulate matter and nitrogen oxide characteristics in ESC test mode from heavy-duty diesel engine installed on-road vehicles applicable to prime propulsion engine for marine vessels. The authors confirmed that a large quantity particulate matter were emitted in high power density condition, nitrogen oxide characteristics were dependent on exhaust gas temperature. Particulate matters were reduced by 1/100~1/1,000 times in post DPF with test modes but filtration efficiency was decreased in the engine power fluctuation. In the case of the high speed and power condition, the exhaust level of particulate matters was increased according to increment of temperature of gas flowing into DPF. The orders of magnitude for particle concentration levels from the analysis of size distribution of particulate matters of test engine was different. Both emitting nano-sized particles below 100nm regardless of DPF and non-DPF

Key words: ESC (European Steady-State Cycle), Particulate matters, Nitrogen oxides, DPF (Diesel Particulate Filter), Size distribution

1. 서 론

군함을 포함한 선박은 출·입항을 제외하고 항해 시 엔진의 운전조건은 정속상태라고 하고 과연이

아니다. 최근 항해중인 선박에 대한 배기가스 규제가 점차적으로 엄격해지고 있다. 대기환경오염의 주범으로 인식되고 있는 자동차의 경우 여러 가지

[†] 교신저자(해군사관학교 함정추진체계학과, E-mail:hmsj1226@korea.ac.kr, Tel: 055-549-1443)

¹ 해군사관학교 함정추진체계학과

시험법을 통하여 규제를 적용하고 있으며 이러한 규제에 대응하기 위해 다양한 기술개발이 이루어지고 있다.

항해중인 선박의 경우 직접적인 배기가스 배출량 측정이 제한되기 때문에 오염물질 기여도 조사(emission inventory) 방법론을 통하여 입자상 물질, 질소산화물 등의 유해물질 배출량을 예측하고 있다[1,2].

IMO(International Maritime Organization, 국제해사기구)는 선박의 질소산화물 배출량 기준을 단계적으로 발효하였으며 2016년 이후에는 2005년 발효된 Tier I 기준과 비교했을 때 80%를 저감시켜야 한다[3].

선박용 엔진은 육상 운송수단(자동차, 대형 트럭 등)에 탑재되는 엔진보다 배기량 및 크기면에서 비교 우위에 있기 때문에 엔진 대상 시험이 쉽지 않은 실정이다. 그러나 대형 트럭에 탑재되는 엔진의 경우 소형 선박의 주 추진기관으로 사용이 가능하며 중·대형 선박의 경우 보조장치 기관의 기능을 수행할 수 있다.

본 논문은 육상운송수단에 탑재되고 있는 대형 디젤엔진에서 배출되는 입자상 물질 및 질소산화물 배출특성을 정속운전조건에서 분석하였다. 정속운전조건에서 배출되는 입자상 물질 및 질소산화물의 특성을 분석하기 위해서 유럽의 대형디젤엔진 배출가스 인증 시험법(heavy-duty diesel engine emission standard certification)인 ESC test cycle을 적용하였다[4].

입자상 물질의 개수와 질소산화물측정은 희석터널(dilution tunnel)에서 이루어졌으며 매연여과장치를 탈·부착하여 정화율을 분석하였다. 또한, 고속 입자상 물질 분석기를 이용하여 입자상 물질의 입경분포의 특성을 분석하였다.

2. 시험 장치 및 방법

2.1 엔진 시험장치

Figure 1은 차량용 대형 디젤엔진의 정속운전조건에서 나노 크기의 입자상 물질 및 질소산화물의 배출특성을 분석하기 위한 시험장치의 구성도이다. 시

험장치의 주요 구성은 12리터급 디젤엔진(Table 1), 고속 입자상 물질 입경분포 분석장치(Differential Mobility Spectrometer, DMS500), 매연여과장치(DPF, Diesel Particulate Filter) 및 희석터널 등으로 구성되어 있으며 입자상 물질의 수량 측정은 UN-GRPE PMP(Particulate Measurement Programme)에서 제시하고 있는 시스템으로 구성하여 이루어졌다[5].

Figure 2는 입자상 물질의 수량을 측정하기 위해 설치된 입자 수량 측정 시스템 및 측정 위치를 나타낸 것이다. 입자 수량 측정 시스템은 150°C로 설정되어 있고 회전형 디스크(rotating disc)로 구성되어 있는 1차 희석장치(1st diluter), 샘플링된 배기 가스를 약 7배까지 희석시키는 2차 희석장치(2nd diluter) 및 입자 수량을 측정하는 CPC(Condensation Particle Counter, 응축 입자 개수 수량 측정 장치)로 구성되어 있다. 시험연료는 황함량이 10ppm 이하인 디젤연료를 사용하였다.

Table 1: Test engine specifications

Engine type	6 cylinders V type
Displacement	11,946 cc
Rated power	290 kW @ 1800 rpm
Max. net torque	1850 Nm @ 1080 rpm
Max. permitted speed	2,300 rpm
Bore × Stroke (mm)	130 × 150
Charging method	Exhaust gas

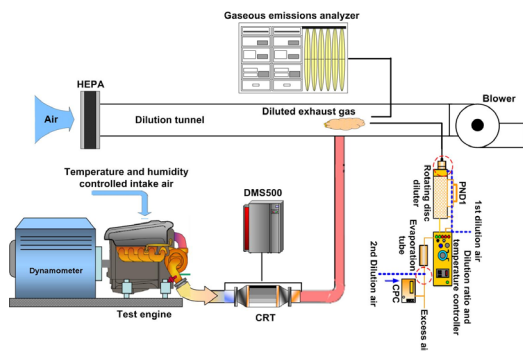


Figure 1: Schematic diagram of heavy-duty diesel engine experimental system

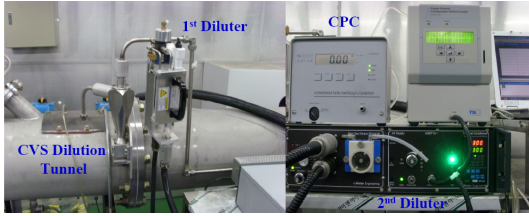


Figure 2: Particle number measurement system

2.2 엔진 시험 mode

디젤엔진의 정속운전 조건에서 배기가스 배출특성을 분석하기 위해서 총 13개의 mode를 선정하였다. 선박용 디젤기관의 시험법과는 차이는 있지만 고속-고부하 조건에서 배출되는 배기가스 특성을 분석하기 위해 대형 디젤엔진이 탑재되는 차량용

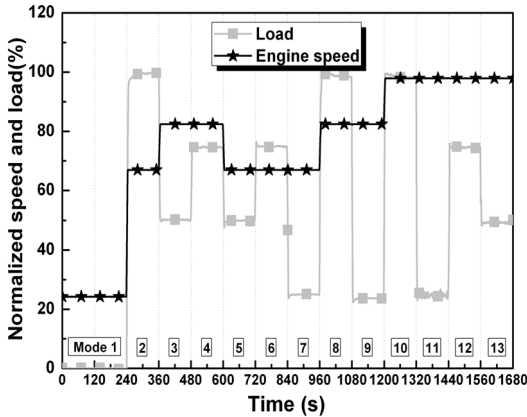


Figure 3: Real time ESC test mode

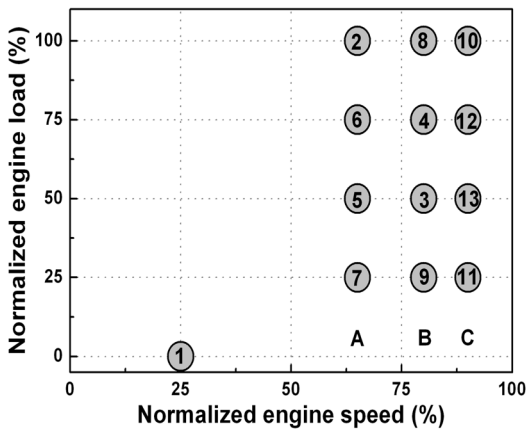


Figure 4: ESC Standard test mode

배기가스 시험법을 적용하였다. 본 논문에서 적용된 시험법은 차량에 탑재되는 대형 디젤엔진의 배기가스 규제 시험 mode중 정속운전 시험법인 ESC(European Steady-State Cycle)이다.

Figure 3은 시험엔진에 적용된 ESC mode를 실시간으로 나타낸 것이고 Figure 4는 13개의 해당되는 mode를 엔진 회전수와 엔진부하로 나타낸 것이다.

3. 시험결과 및 고찰

Figure 5는 ESC mode의 연속 운전조건에서 배출되는 입자상 물질을 실시간 측정된 결과이다. 입자상 물질은 매연여과장치를 부착한 상태와 탈거한 상태에서 측정되었으며 측정된 결과를 이용하여 매연여과장치의 정화율을 도출하였다.

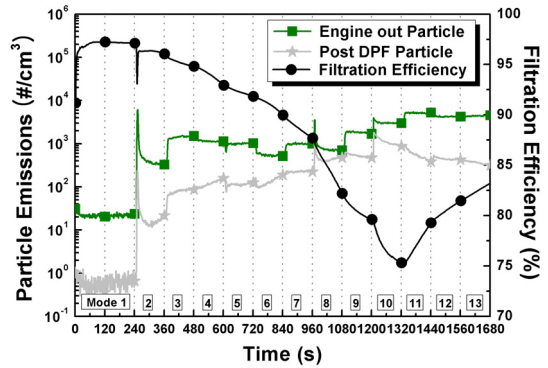


Figure 5: Real time particle emission characteristics in ESC mode test

Mode 1(아이들 상태)에서 입자상 물질의 배출량은 많지 않으며 mode 10, 11, 12, 13에서 배출량이 많은 것을 알 수 있다. 이는 고속-고부하 및 고속-저부하 조건에서 다량의 연료 분사량에 의한 것으로 분석되며 특히 mode 1에서 mode 2(중속-고부하)로 운전될 때 입자상 물질의 급격한 상승현상(spike) 현상을 볼 수 있는데 이는 엔진이 아이들 상태에서 급격한 부하 변동과 rpm 변동으로 인한 현상으로 분석된다.

이후 mode 2에서 정속조건상태에서는 입자상 물질이 일정하게 배출되는 결과를 볼 수 있다. 매연여과장치 부착 및 탈거 상태에서 측정된 결과 배

출 특성은 동일한 경향성을 보였지만 매연여과장치를 부착한 상태에서는 각 mode별 입자상 물질의 배출 수준이 저감되는 것을 확인할 수 있다.

매연여과장치의 정화율은 엔진의 운전조건이 급격히 변하는 mode 2 진입단계에서 떨어졌다가 mode 2의 정속상태에서는 정화율이 다시 회복되는 것을 알 수 있으나 엔진운전조건이 고부하 영역으로 갈수록 정화율은 떨어진다.

특히, mode 10 영역에서 정화율이 최소가 되는 것을 확인할 수 있는데 고속-고부하 영역에서 매연여과장치내에 포집되어 있던 입자상 물질이 순간적으로 재생되어 배출되었기 때문이라고 판단된다. 운전영역별 매연여과장치의 정화율을 분석한 결과 약 75%~ 97% 정도이다.

Figure 6은 모드별 입자상 물질의 평균 배출량 및 CoV(Coefficient of Variation)를 나타낸 것이다. 입자상 물질의 배출량은 mode 10에서 가장 높게 배출되는 특성을 나타냈으며 엔진의 부하가 높더라도 엔진 회전수가 비교적 저속인 mode에서는 상대적으로 적은 배출 특성을 보였다.

시험결과에서 확인할 수 있듯이 동일한 엔진 회전수에서 엔진 부하가 높다면 연료 분사량이 증가한다는 의미이기 때문에 입자상 물질의 배출수준도 높아진다는 것을 확인할 수 있다. ESC mode에 대한 CoV는 2%~14% 정도이다.

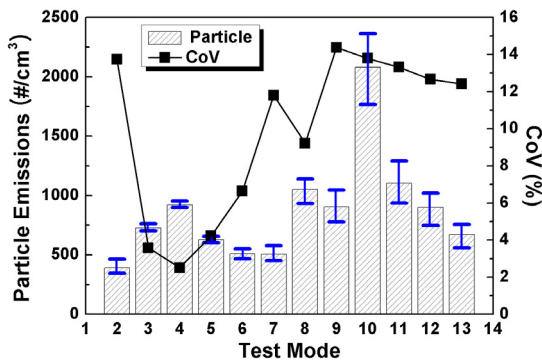


Figure 6: Particle emission at each mode

Figure 7은 시험모드 연속 운전시 디젤엔진에서 배출되는 질소산화물(NOx) 배출량을 실시간 측정 한 결과이다. 엔진에서 질소산화물 생성 원인은 여

러 가지가 있지만 질소산화물 생성에 결정적인 역할을 하는 부분은 운전영역에서 결정되는 연소온도에 지배를 받는 thermal NOx가 가장 큰 비중을 차지한다.

질소산화물 특성 분석 시험에서 연소온도를 직접적으로 측정할 수 없었지만 각 운전영역별 배기가스 온도로 질소산화물 배출특성의 경향성을 분석하였다. 시험결과에서 알 수 있듯이 배기가스 온도의 변화와 동일한 경향으로 질소산화물이 배출된다는 것을 알 수 있다.

엔진이 아이들 상태에서 mode 2로 급격한 엔진 부하와 rpm이 상승할 때 다량의 연료분사와 함께 연소온도는 급격히 상승할 것이며 연소온도의 지배를 받는 질소산화물의 배출량이 급격히 증가한다는 것은 시험결과로부터 확인이 가능하다. 디젤 차량에서 배출되는 질소산화물을 저감시키기 위하여 다양한 기술들이 적용되고 있으며 특히, SCR(Selective Catalytic Reduction, 선택적 촉매 환원장치)의 경우 질소산화물을 저감시키는 기술로 각광을 받고 있다.

IMO(International Maritime Organization)는 단계적으로 디젤엔진을 주 추진기관으로 사용하는 항해중인 선박에서 배출되는 질소산화물을 규제하는 법을 발효하였으며 이에 각국에서는 강화되는 질소산화물 배출규제에 능동적으로 대응하기 위하여 역량을 아끼지 않고 있다. Table 2는 단계적으로 적용되는 선박에 대한 질소산화물 규제를 나타낸 것이며 단계별 배출량의 단위는 g/kWh이다.

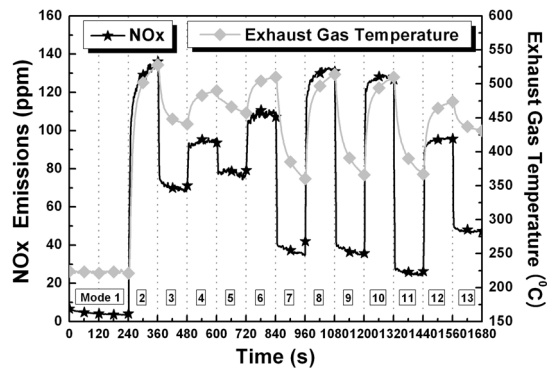


Figure 7: Real time NOx emission characteristics

Table 2: IMO NOx regulations for ships

Contents	Tier I	Tier II	Tier III
n<130rpm	17.0	14.4	3.4
130 ≤ n < 2000rpm	45.0n ^(-0.2)	44.0n ^(-0.23)	9.0n ^(-0.2)
n ≥ 2000rpm	9.8	7.7	2.0
Effective date	2005.5.19	2011.1.1	2016.1.1
Applicable Technology	Engine Control	Engine Control	Aftertreatment including SCR

Figure 8은 13개 모드 시험 전체에 대한 입자상 물질의 입경분포 결과를 나타낸 것이다. 배출되는 입자상 물질의 특성은 핵화모드(일반적으로 휘발성 유기물질로 구성)와 축적모드(일반적으로 탄소 및 금속화합물로 구성)가 동시에 배출되는 특성을 보이고 있으나 100nm 크기 이하의 축적모드 입자들이 대부분을 차지하는 것을 알 수 있으며 매연연과장치를 부착 후 측정된 결과 입자 크기별로 1/100~1/1,000배까지 저감되는 결과를 확인하였다.

입경 분포 특성 분석 결과 50nm~100nm 크기의 입자상 물질이 가장 많이 배출되었으며 이는 Figure 6에서 확인할 수 있듯이 mode 10의 고속-고부하 조건에서 입자상 물질이 가장 높게 배출되었기 때문이라고 생각된다. 특히, mode 10에서 포집된 입자들이 매연연과장치내부에서 일부 재생되었기 때문에 매연연과장치 후단부에서도 높게 배출되었다고 판단된다.

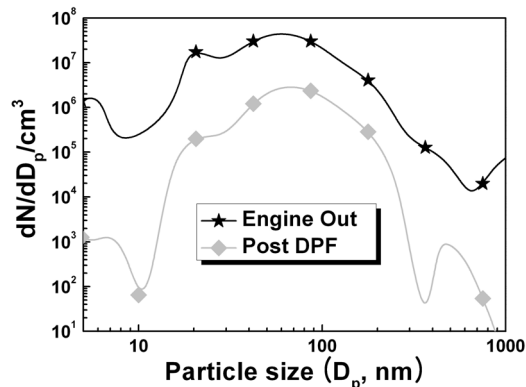


Figure 8: Particle size distribution at ESC mode

Figure 9은 ESC mode 중 고속-고부하 운전영역인 mode 10 조건에서 측정된 나노 크기의 입자상 물질을 FESEM(Field Emission Scanning Microscopy, Figure 10)을 이용하여 분석한 결과이다. 여지필터로 포집된 입자상 물질을 FESEM을 이용하여 분석한 결과 하나의 입자가 덩어리화 되어 포집되었음을 알 수 있다.

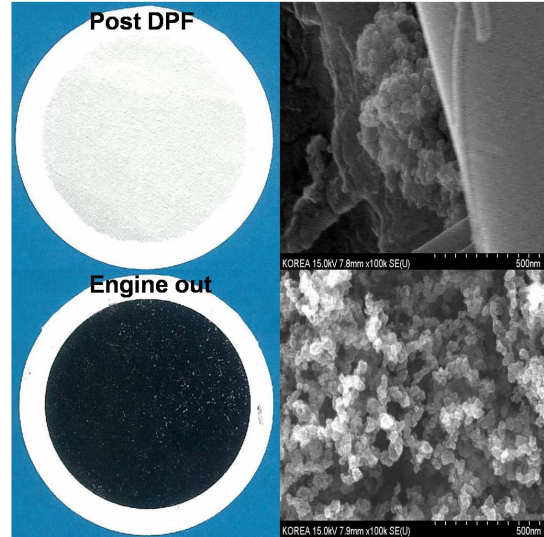


Figure 9: Field emission scanning electron micrographs of nanoparticles from test engine in mode 10

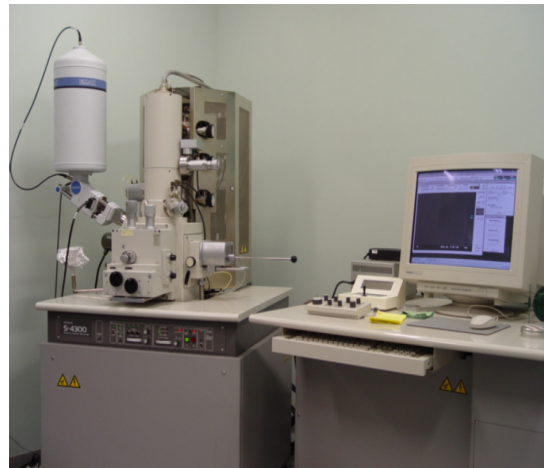


Figure 10: Field emission scanning electron microscopy

매연여과장치를 부착후 여지필터에 포집된 입자상 물질의 수준은 매연여과장치를 부착하지 않은 조건보다 입자의 덩어리화가 현저히 낮다는 것을 분석결과를 통해 확연히 구분할 수 있다.

DMS500 고속 PM 분석기에 의해 분석된 입자상 물질의 입경분포 결과를 살펴보면 다양한 크기의 나노 입자가 배출됨을 확인할 수 있으나 여지필터에 포집된 입자상 물질 분석결과는 각 입자간 응집되어 하나의 덩어리화를 이루고 있음을 알 수 있다.

이는 배출가스가 CVS(Constant Volume Sampler, 배기가스 시료 채취장치) 터널에서 희석되면서 작은 입자가 급격한 냉각작용으로 응집되어 덩어리화로 나타난 현상으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 육상운송수단에 탑재되는 대형 디젤엔진에서 배출되는 입자상 물질 및 질소산화물의 배출특성을 ESC test cycle이용하여 분석하였으며 엔진 시험결과로부터 도출된 결과를 정리하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 시험엔진으로부터 배출된 입자상 물질은 고속-고부하 영역인 mode 10에서 다량으로 배출되었으며 입경분포 분석결과 100nm 이하의 크기를 가지는 입자들이 가장 큰 비중을 차지한다. 입자상 물질의 입경분포 특성은 시험결과에서 확인 할 수 있듯이 핵화모드와 축적모드가 동시에 배출되는 전형적인 2-mode(bimodal) 형태로 나타났으나 핵화모드($d_p < 50nm$)입자보다는 축적모드($50nm < d_p < 100nm$)입자의 배출 수준이 높다.

각 mode별 입자상 물질의 배출특성을 분석한 결과 고속-고부하 조건에서 가장 크게 배출되었으나 엔진 부하가 동일한 경우 엔진회전수가 높을수록 엔진회전수가 동일 할 경우 엔진부하가 높을수록 배출수준은 증가한다. 그러나 mode 3, 9, 11, 13의 경우에 엔진회전수가 동일하다 하더라도 엔진부하가 낮은 운전조건에서 입자상 물질의 배출수준이 낮은 경향으로 평가되었다. 또한 매연여과장치를 부착하여 입자상 물질의 배출특성을 분석한 결과 mode별 1/100~1/1,000배까지 저감되었다.

2. 질소산화물의 배출특성은 전형적으로 배기가스 온도 특성과 일치하는 경향으로 나타났다. 특

히, 고부하 영역으로 급격히 운전되는 구간에서 질소산화물의 배출수준은 증가하며 이는 연소온도에 지배를 받는 질소산화물의 전형적인 배출특성이라고 해석할 수 있다.

후 기

본 논문은 해군해양연구소의 2012년도 국고 연구비 지원을 받아 연구되었음.

참고문헌

- [1] U.S. EPA, Current Methodologies in Preparing Mobile Source Port-Related Emission Inventories, Final Report, 2009.
- [2] Entec UK Limited, Ship Emissions Inventory, Final Report, 2007.
- [3] IMO Resolution MEPC.176(58), Revised MARPOL ANNEX VI.
- [4] Delphi, Worldwide Emissions Standards for Heavy-duty and off-road Vehicles, 2009.
- [5] J. Andersson and D. Clarke, UN-GRPE PMP Phase 3: Inter-Laboratory Correlation Exercise: Updated Framework and Laboratory Guide for Heavy Duty(HD) Engine Testing, A Document for the UK Department for Transport, 2008.

저 자 소 개



이형민(李炯敏)

1997년 해군사관학교 해양학과(이학사)
 2001년 구축함 기관장교 근무
 2002년 상륙함 기관장교 근무
 2005년 고려대학교 기계공학과(공학석사)
 2006년 연안초계함 기관장교 근무
 2009년 고려대학교 기계공학과(공학박사)

現 해군사관학교 함정추진체계학과 교수



박랑은(朴稷恩)

2006년 한국해양대학교 기계소재공학과(공학사)
 2007년 구축함 기관장교 근무
 2010년 연세대학교 전기공학과(공학석사)
 2011년 군수지원함 기관장교 근무, 現 해군사관학교 함정추진체계학 교관