

## 가스엔진과 디젤엔진의 혼합 EGR시스템이 배기배출물에 미치는 영향

유동훈† · 西田修身\* · 임재근\*\*

(원고접수일 : 2009년 4월 29일, 원고수정일 : 2009년 6월 27일, 심사완료일 : 2009년 9월 18일)

### Effects on Exhaust Gas Emission in Combined EGR System of Gas Engine and Diesel Engine

Dong-Hoon Yoo† · Osami Nishida\* · Jae-Keun Lim\*\*

**Abstract :** EGR is applied in order to lower temperature of combustion chamber by using the specific heat of carbon dioxide in engine exhaust gas. However, the problem of EGR system in diesel engine is high PM concentration. Combined EGR system can be reduced it by mixing exhaust gas of gas engine into the intake air of diesel engine. This experimental study was designed for EGR system for both engines use. The results of EGR experimental study by using diesel engine and gas engine are as follows.

- 1) The pressure of combustion and rate of heat release decreased.
- 2) The specific fuel consumption increased. But, up to middle load, it little increased.
- 3) NO concentration has decreased up to 50% in almost all combustion area.
- 4) The variation of the PM concentration at low load is not so seen. But at high load, PM increased rapidly when concentration of oxygen is decreased and most of it caused the increasing of Dry Soot.

**Key words :** Combine system(콤바인 시스템), EGR(배기가스 재순환), NO<sub>x</sub>(질소산화물), PM(미립자)

#### 1. 서 론

1960년대에 LNG선박이 등장한 이후, 세계적인 천연가스 수요에 발맞춰 LNG선의 건조량은 지속적으로 증가하고 있는 추세이다. 또한 LNG선의 진화는 대형화, 효율화로 전개되고 있으며, 최근에는 LNG BOG (Boiled Off Gas)를 냉각, 재액

화시켜 LNG화물창에 재순환하는 기술<sup>[1],[2]</sup>이 적용된 선박도 출현하게 됨에 따라, 선박의 주기관으로 터빈을 대신하여 연비와 출력이 우수한 디젤기관을 채택하는 선박 또한 출현하게 되었다. Fig. 1은 연도별로 LNG선박 건조량을 나타낸 것이다.

그런데 선박디젤엔진 사용에 의한 배기가스 즉, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, PM(Particulate Matter)는 인간

† 교신저자(고베대학교 해사과학연구과, E-mail:chief023@kunsan.ac.kr, Tel: +82-78-432-6292)

\* 고베대학교 해사과학연구과

\*\* 군산대학교 동력기계시스템공학전공

에게 신체적, 재산적으로 악영향을 주고 있으며, 이와 같은 배기배출물은 SCR(Selective Catalytic Reduction), EGR(Exhaust Gas Recirculation), 에멀전연료(Emulsified fuel)의 사용, 해수전해 스크리버 사용방법<sup>[3]</sup> 등 여러 가지 방법을 통하여 저감방법이 연구되어지고 있다.

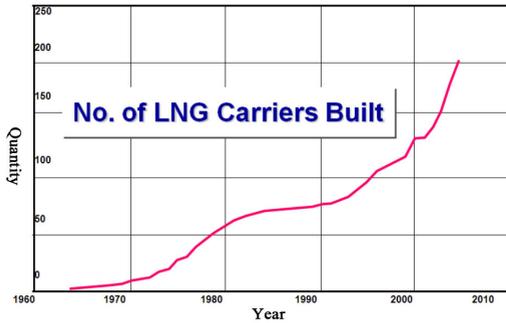


Fig. 1 No. of LNG carriers built as of August 2004<sup>[4]</sup>

본 연구에서는 가스엔진 발전기로, 디젤엔진을 주추진기관으로 가정하여 검토하였다. 디젤엔진의 EGR에서는 배기가스 중에 기관오염의 원인이 되는 미연소 미립자를 포함하고 있기 때문에 적용에 신중을 기해야 한다.

본 실험에서는 디젤엔진에 비해 입자상 물질을 거의 포함하고 있지 않는 가스엔진의 배기가스를 대기와 혼합하여 디젤엔진의 흡기에 재순환하는 방법을 통하여 NOx의 총배출량을 저감하는 혼합 EGR System을 고안하였고, 그 특성과 적용성을 검토하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

Fig. 2는 실험장치의 구성을 나타낸다. 가스엔진의 배기가스는 배기도중 두 부분으로 분기되도록 하여 디젤엔진으로 흡입되는 가스의 양을 밸브로 1차 조절하였다. EGR가스의 맥동을 완화, 배제시키기 위하여 가스엔진의 배기부, 디젤엔진의 흡기부에 각각 서지 탱크를 설치하였고, 대기와 가스엔진의 배기가스를 산소농도비율로 2차 조절한 혼합

기가스를 디젤엔진의 흡기측에 공급하여 양기관이 사용되는 혼합 EGR시스템을 구성하였다. 또한 확실한 EGR가스에 의한 기관 거동을 파악하기 위하여 과급기의 사용은 배제하였다.

모든 배기가스 분석기기의 가스 도입부에는 응축수 여과용 드레인 포트를 설치하여 수증기로부터의 영향을 최소화 하였다. 또한 디젤엔진에서는 압전 센서와 A/D변환보드를 사용하여 압력신도를 채취하여 연소실 내의 압력과 열발생율을 계산·분석하였고, 각 기관에는 수동력계와 연료유량계를 설치하여 부하와 연료소비량을 측정하였다. Table 1은 가스엔진과 디젤엔진의 주요제원이고, 사용연료의 특성은 Table 2에 표시하였다.

### 2.2 실험방법

연료는 LNG선박의 천연가스에 대응하고, PM 배출량이 적은 도시가스를 사용하여 가스엔진을 구동하였고, 디젤엔진의 연료로 Bunker-A를 사용하였다. 디젤엔진의 회전수와 부하를 변화시켜 디젤엔진의 연소특성과 배기가스 농도의 변화를 측정하였다. 가스엔진은 실제의 선박기관시스템에서 발전기로 사용될 것을 가정하여 정부하, 정회전수의 조건에서 실험하였고, 디젤엔진은 주추진기관으로 가정하여 부하와 회전수를 변화시키며 실험하였다. 가스엔진은 회전수를 900rpm, 기관부하를 50%로 고정시켰고, 디젤엔진은 회전수를 2000rpm, 2200rpm, 부하를 연속출력에 대하여 25%, 50%, 75%로 변화시켜 실험하였다.

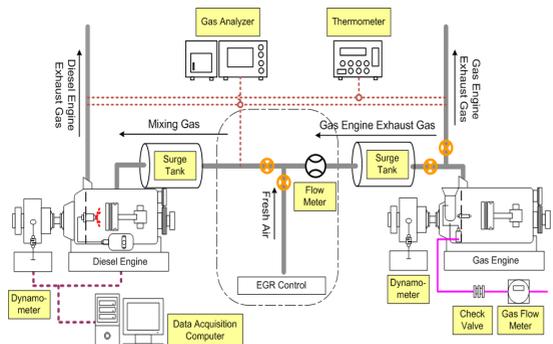


Fig. 2 EGR system in combined engines

**Table 1 Engine specification**

Engine type	Gas Engine (NRG 600G)	Diesel Engine (NF 19SK)
Bore×stroke	120×170mm	109.8×105.4mm
Swept volume	1992cm <sup>3</sup>	988cm <sup>3</sup>
Maximum Power	11.93kW/ 1100rpm	13.97kW/ 2400rpm
Rated power	10.07kW /900rpm	11.76kW/ 2200rpm
Combustion system	Spark ignition	Direct injection
Compression ratio	8:1	16.3:1
Ignition/Injection timing	BTDC 21°	BTDC 19±0.1°
Fuel	Natural gas	Marine diesel oil

**Table 2(a) Fuel oil composition for diesel engine**

Item	Composition
Density(15°C)	0.8615 g/cm <sup>3</sup>
Flash point	72 °C
Kinematic viscosity(50°C)	2.374 mm <sup>2</sup> /sec(cSt)
Pour point	-25 °C
Residual carbon	0.55 mass%
S	0.08 mass%
N	0.038 mass%
H <sub>2</sub> O	0.01 vol%
Ash powder	<0.001 mass%
Low heating value	42.6 MJ/kg

**Table 2(b) Fuel oil composition for gas engine**

Item	Composition(Weight%)
Methane	78 %
Ethane	11 %
Propane	7 %
Butane	4 %
Gravity	0.638 Air:1
Flash Point	630~730 °C
heating value	45 MJ/m <sup>3</sup> N

최초의 실험은 재순환하지 않고, 각 엔진의 단독 운전 상태에서 엔진의 배기가스 성분을 측정하였고, 그 후 양 기관을 사용한 혼합 EGR시스템에서 디젤기관 측의 배기가스를 측정하였다. 또한 가스 엔진 배기측 혼합가스, 즉 디젤엔진의 흡기(EGR 가스)는 혼합가스중의 산소농도를 중심으로 21%,

19%, 17%, 15%의 4가지 조건에서 실험하였고, 산소농도는 가스혼합부의 밸브를 사용하여 조절하였으며 산소측정기를 이용하여 계측·확인하였다.

배기가스의 측정·분석은 가스엔진의 배기관, EGR혼합가스의 서지탱크 입구 및 디젤엔진 배기관에서 각각 측정하였다. 배기가스 중의 NOppm는 화학발광법 계측기(Horiba, PG-250)로 측정하였고, 흡기량, 사용연료분석, 연료소비량으로부터 연소계산하여 배기가스량을 구하고, 배기가스 분석으로 NO를 질량농도로 환산하였다. 또한 PM은 배기가스 20L를 10L/min의 유속으로 필터 채집하여 2시간 건조 후 무게를 측정하고, 디클로로메탄 15mL에 12시간 담가, DS(Dry Soot)와 가용성 유기성분(Soluble Organic Fraction, SOF)을 분리한 후, DS만의 무게를 측정하여 DS와 SOF의 양을 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 연소특성

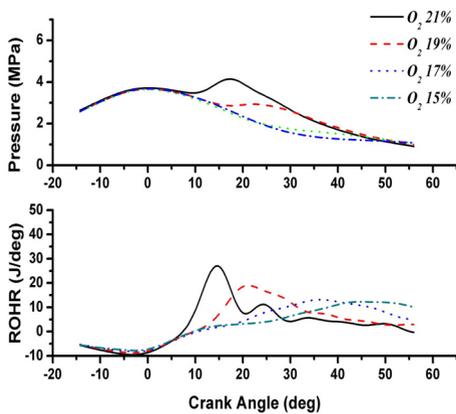
Table 3은 가스엔진의 단독운전시의 가스엔진의 배기가스 조성을 표시하였고, Table 4는 양 기관의 동시운전시 대기와 혼합되어진 디젤엔진 흡입기(EGR가스)성분을 표시하였는데, 엔진 연소상태에 가장 크게 영향을 미치는 산소와 이산화탄소의 실제 비율을 산소율에 따라 나타내었다.

**Table 3 Exhaust gas concentration of gas engine**

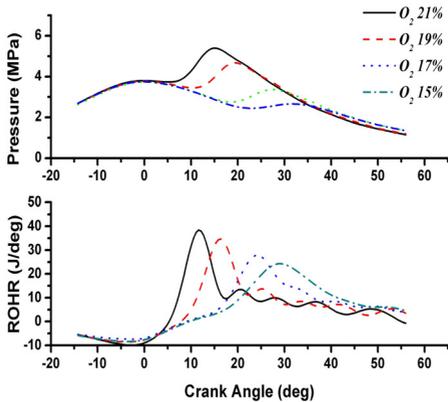
Item	Exhaust gas
CO <sub>2</sub> / CO	7.32/5.5 %
NO	7.2 g/kWh
O <sub>2</sub>	0.53 %
THC (CH <sub>4</sub> base)	0.3 %

**Table 4 O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> concentration of intake gas**

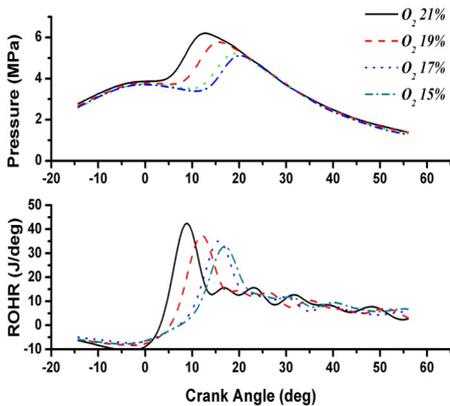
EGR Rate (oxygen,%)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)
19	0.56	18.98
17	1.14	17.01
15	1.54	15.03



(a) Load 25%



(b) Load 50%



(c) Load 75%

Fig. 3 Cylinder pressure and heat release at 2200rpm

EGR가스가 혼합된 디젤엔진 흡기의 온도는 37℃~42℃로 거의 일정한 상태로 운전되었기 때문에 디젤흡기온도로 인한 연소거동의 변화는 극히 희박할 것으로 생각된다. 디젤엔진에서 압력센서로부터 취득한 압력선도로 열발생율을 계산하였고, 2200RPM에서 25%, 50%, 75%의 부하조건상의 압력과 열발생율을 Fig 3(a), (b), (c)에 표시하였다. 산소농도의 감소(EGR율의 증가)에 따라 최고압력과 열발생율은 저하하였는데, 특히 Fig. 3(a)에서 볼 수 있듯이 25%부하, 15%산소 EGR에서는 착화·연소불량을 확인할 수 있다. 李<sup>[5],[6]</sup> 등의 연구에서도 밝혔듯이 산소비율 14%이하에서는 엔진의 회전수와 부하에 대응하여 안정된 운전이 불가능 하다.

착화지연 현상은 EGR율의 증가에 따라 지연 폭이 증가하고 후연소기간이 증가 하였다. 일반적으로 단독엔진 EGR 시스템에서는 CO<sub>2</sub>증가에 의존하여 연소온도의 변화가 NO<sub>x</sub>발생량을 감소시키지만, 본 실험의 경우, CO<sub>2</sub>농도의 증가보다는 O<sub>2</sub>농도의 감소에 따른 효과가 크다고 판단된다. 착화지연기간이 길게 되고 초기 열발생율이 감소하고 있는 것도 낮은 산소 농도에 따른 화학적 지연, 즉 연소속도의 저하가 원인이라고 생각된다.

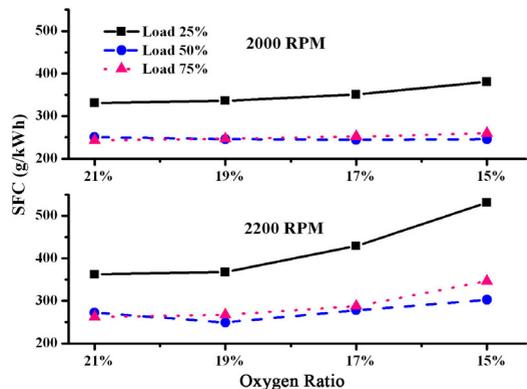


Fig. 4 Specific fuel consumption

Fig. 4에 연료소비율을 표시하였다. 중·고부하 영역에서는 거의 일정하지만, 저부하 영역에서는 EGR율의 증가와 함께 연료소비율 또한 증가하는 경향을 보였고, 산소농도 19%이하에서는 연소불

량이 발생했다고 판단된다. 따라서 Combine EGR System에서는 저부하 영역에서의 EGR을 피하고 중부하 이상의 영역에서의 이용이 불가피하다고 생각되어진다. 또한 2000RPM의 경우는 2200RPM의 경우보다 연료소비율의 경사도가 약간 적게 증가하는 결과를 얻었다.

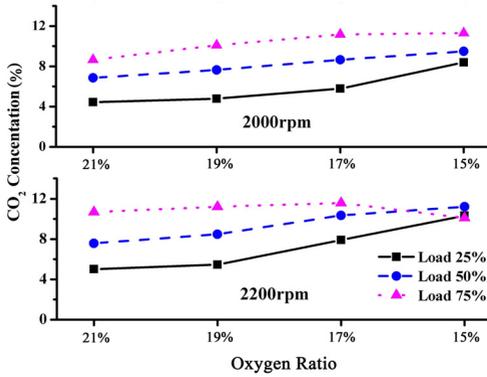


Fig. 5 CO<sub>2</sub> concentration

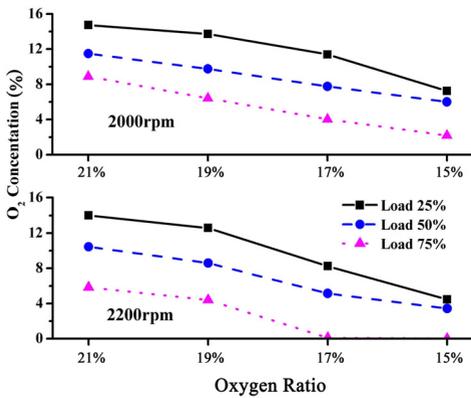


Fig. 6 Residual oxygen concentration

3.2 배기가스 특성

Fig. 5는 최종적으로 배출되는 디젤엔진의 배기가스 중 CO<sub>2</sub>의 농도를 표시하였는데, EGR율의 증가에 따라 CO<sub>2</sub>의 발생량은 증가하는 경향이 있다. 가스엔진에서 발생한 CO<sub>2</sub>와 디젤엔진에서 생성된 CO<sub>2</sub>량이 가산되었으며, 가스엔진에서의 미연 소된 CO가스가 높은 압력과 온도장을 갖는 디젤엔진의 연소실에서 재연소 되었다고 생각된다. 또한

2200rpm에서 부하 75%인 경우에는 EGR산소농도 15%의 CO<sub>2</sub>가 산소 17%보다 저하된 것을 볼 수 있는데, 이것은 Fig. 6의 디젤배기가스중의 산소농도에서 알 수 있듯이 산소농도 15%의 경우는 17%의 경우보다 극심한 산소부족현상으로, 모든 연료의 연소반응이 CO<sub>2</sub>생성까지 도달하지 못한 것으로 추정된다. 배기가스중의 산소농도는 EGR율이 증가함에 따라 감소하며, 2200rpm에서 부하 75%의 경우에 EGR산소율 17% 이하에서 거의 소비되었다. 이와 같은 산소부족현상은 최고압력, 열발생율의 저하, PM의 증가로 이어진다. 그러므로 디젤엔진과 가스엔진을 사용한 혼합 EGR System에서의 적당한 산소농도분포는 20%~17%이며, 17%이하의 영역에 접어들지 않도록 주의할 필요가 있다고 판단된다.

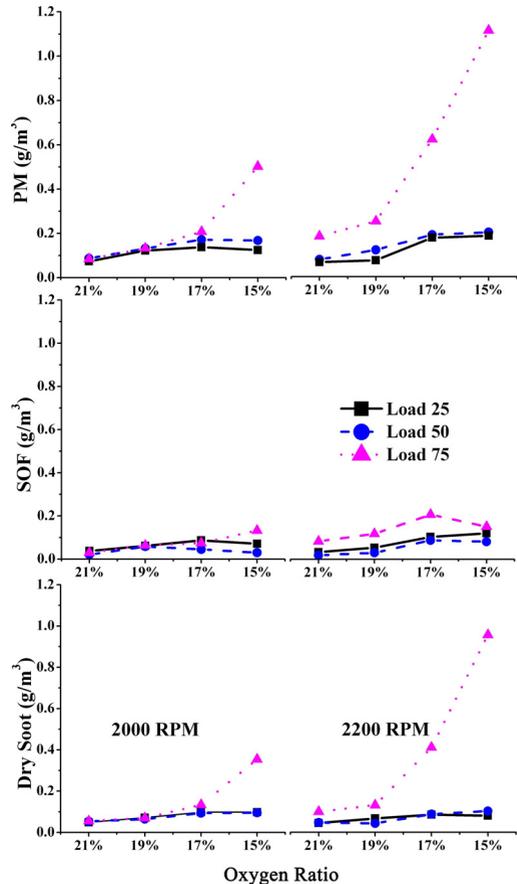


Fig. 7 PM concentration

Fig. 7은 배기가스중의 PM질량농도를 표시하였다. EGR율이 높을수록 PM의 농도는 증가하고 부하 75%의 경우 산소 17%부터 급격한 상승을 보이며, PM의 증가성분을 지배하는 인자는 DS(Dry Soot)인 것을 알 수 있다. 기상석출계(氣相析出系)의 생성과정을 따르는 PM에 관하여는 DS의 생성이 산소농도에 의존하며, 산소농도의 저하에 따른 탄화수소의 연소반응이 방해를 받아 생성량이 증가되었다고 생각된다.

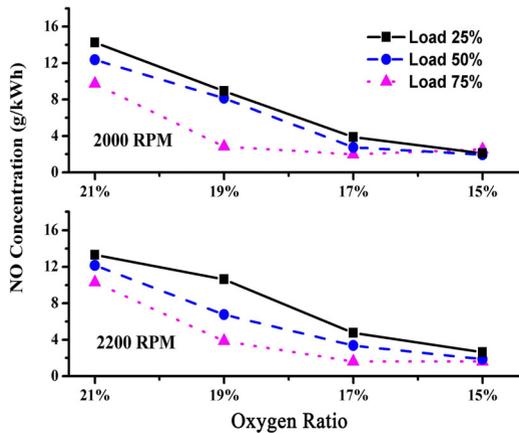


Fig. 8 NO concentration

Table 5 NO reduction ratio at 2200rpm

O <sub>2</sub> Ratio	G/E (g/kWh)	D/E (g/kWh)	D/E&G/E (g/kWh)	Reduction Rate(%)
19%	2.22/7.2	25%	9.73	53.73
		50%	12.35	32.89
		75%	14.25	35.52
17%	2.25/7.2	25%	9.73	59.13
		50%	12.35	60.61
		75%	14.25	58.83
15%	2.28/7.2	25%	9.73	55.86
		50%	12.35	64.49
		75%	14.25	67.27

※G/E는 (EGR 가스중의 NO양)/(가스엔진의 NO 총 배출량)을 나타낸다.

Fig. 8은 NO의 발생량을 나타내었다. EGR율의 증가에 따라 NO발생량은 감소하였는데, 특히 고부하 영역에서의 감소량은 현저하였고, 산소농도

15%의 조건에서는 실측치가 150ppm이하로서 대폭 감소하였다. Table 5는 디젤엔진 흡입 산소비에 따른 NO저감율을 표시하였다. NO저감율(%)은 각각의 엔진의 단독운전(G/E, D/E)상태에서의 NO농도의 합과 혼합 EGR System(G/E & D/E)에서의 NO농도 합의 비로 계산되었다. 이것은 산소농도의 감소와 CO<sub>2</sub>에 따른 연소실 연소온도의 저하가 착화지연기간을 증가시키고 고온의 반응시간을 단축시켜 Thermal NO<sub>x</sub>의 생성을 제어하였다고 생각되며, 혼합 EGR System이 NO<sub>x</sub>저감에 효과적인 것을 보여준다.

#### 4. 결론

LNG선박에 적용 가능한 가스엔진과 디젤엔진의 동시에 사용하는 혼합 EGR System을 고안·설치하고, 엔진 성능특성과 배기배출물 특성을 분석한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. EGR율을 증가할수록 연소실압력, 열발생율은 감소하였고, 연료소비율은 EGR율의 증가에 따라 증가하지만 중부하 이상에서는 증가폭이 작아졌다.
2. 시스템상의 전체 NO 발생량은 거의 모든 영역에서 50%이상의 저감율을 나타내었다.
3. EGR율의 증가에 따라 디젤엔진 배기측 CO<sub>2</sub> 배출량은 거의 직선적으로 증가하였다.
4. 저부하, 중부하시 흡기산소량 변화에 따른 PM농도는 디젤엔진 단독운전과 비교하여 거의 변화가 없었지만, 고부하시의 PM농도는 산소량의 감소에 따라 급격히 증가하였는데, Dry Soot의 증가가 대부분을 차지하였다.

#### 참고문헌

[1] 糸山直之, “LNG船-その革命と多変化,” 船と海のサイエンス, Vol. 33, pp. 28-35, 2005.  
 [2] 青木陽一, “LNG 運送の新しい展開,” 船と海のサイエンス, Vol. 33, pp. 36-41, 2005.  
 [3] 西田修身, “船舶ディーゼル機関から排出される NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>及びPMの海水電気分解スクラバー

- 法による處理装置の性能實驗,” 海と安全, 秋号, pp. 40-43, 2005.
- [4] 糸山直之, LNG海上運送の現在と未來, 三菱商事, 2004.
- [5] 李鐵, 木戸伸吾, 小川英之, “超高EGR・低酸素ディーゼル燃焼の燃料性状依存性,” 日本機械學會論文B編, Vol. 72, No. 719, pp. 1857-1862, 2006.
- [6] 李鐵, 泉洋行, 首藤登志夫, 小川英之, 大量“EGR・低溫ディーゼル燃焼における未規制有害物質排出特性及び排氣触媒による淨化効果,” 日本機械學會論文時集B編, Vol. 73, No. 728, pp. 1129-1134, 2006.

## 저 자 소 개



### 유동훈(柳東勳)

1977년 8월생. 2003년 군산대학교 기관공학과 졸업. 2006년 동대학교 대학원 기관공학전공 졸업(공학석사). 현재 일본 고베대학교 해사과학연구과 박사과정 중.



### 西田修身(Nishida Osami)

1944년 3월생. 1968년 고베상선대학 졸업. 1975년~2007년 고베대학교 해사과학부 교수. 2003년~2005년 해사과학부장. 2005년~2007년 고베대학교 부총장. 2005년~2006년 일본마린엔지니어링학회 회장. 2007~ 현재 고베대학교 명예교수.



### 임재근(林載根)

1950년 4월생. 1972년 한국해양대학교 기관학과 졸업. 1983년 조선대학교 기계공학과 졸업(공학석사). 1993년 동대학교 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 군산대학교 동력기계시스템공학전공 교수.