

시뮬레이션 프로그램에 의한 소형 선박용 저열손실 디젤엔진의 성능평가

백문열^{†*}, 이교승^{*}, 강신형^{**}

경기공업대학 자동차과^{*}
건양대학교 기계공학과^{**}

Numerical Prediction of Low Heat Rejection Diesel Engine Performance for Small Size Vessel

Moon Yeal Baek^{†*}, Kyo Seung Lee^{*} and Shin Hyung Kang^{**}

Kyonggi Institute of Technology^{*}
Konyang University^{**}

Abstract

It is known that over 60% of engine power is dissipated into circumstance, cooling water and cooling oil without any conversion into useful work. Following the first law of thermodynamics, it is possible that heat loss to cooling water can be converted into mechanical work through crankshaft. But in case that the engine is operating without any cooling effect, the serious problem unsolved so far is the engine durability. In this study, LHR(Low Heat Rejection) engine was introduced as one of the promising engine and several useful qualitative and quantitative data were drawn.

※Keywords: LHR engine(저열손실 엔진), Cycle Simulation(사이클 시뮬레이션), Diesel Engine(디젤엔진), Comprehensive Heat Transfer Model(포괄적 열전달 모델)

1. 서론

엔진의 연소효율은 30-40% 정도로 공급된 에너지의 상당부분이 동력발생을 위한 유용한 일로

접수일: 2004년 10월 5일, 승인일: 2004년 11월 15일

† 주저자, E-mail: mybaek@kinst.ac.kr

Tel: 031-4964-776

바뀌지 못한 채 소산되는데, 최대부하 상태에서는 배출가스와 공기, 냉각오일 및 냉각수로의 열전달 형태로 그리고 부분부하 상태에서는 대부분이 냉각수로의 열전달 형태로 바뀌게 된다(Heywood 1988). 열역학 제1법칙에 의하면 냉각수로 방출된 열량을 크랭크축을 통한 유용한 일로의 변화가 가능하나, 과거 수십 년 동안에는 여러 가지 문제로 인하여 실제 적용이 거의 불가능하였다. 그 중 가

장 큰 문제점은 적절한 열전달 없이 엔진을 운전할 경우, 연소실을 구성하고 있는 금속물질의 표면온도가 금속의 녹는점 이상 상승하기 때문에 엔진 전체가 망실되는 경우가 발생한다. 그러나 이와 같은 문제는 세라믹 물질의 엔진적용과 함께 감소하게 되었으며, 최근에는 저열손실 (LHR, Low Heat Rejection) 엔진이 관심의 대상으로 부상하게 되었다. 저열손실 엔진은 단열엔진 (adiabatic engine)이라 불리어 지기도 하는데, 실린더 냉각 열손실의 감소는 연소실 내부의 온도상승을 촉발하고, 비정상적인 연소노킹(knocking)은 연소실 온도가 상승함에 따라 빈번히 발생하므로 LHR 엔진의 개념을 HCSI 엔진(Homogeneous Charged Spark Ignition Engine)보다는 디젤엔진의 적용량이 보다 바람직하다고 할 수 있다.

LHR 디젤엔진의 주요 개념은 연소가스로부터 연소실 벽면으로 전달되는 대류열전달을 감소시키는 것이었으나 확산 연소기간(diffusion combustion period) 동안 발생하는 soot에 의한 복사열전달 역시 중요한 변수이다. 세라믹 재질의 엔진 적용에 관한 연구는 지난 10년간 많은 발전을 거듭해 왔으며 평균 피스톤 온도와 실린더 헤드 온도가 1100°C이상 되는 LHR 디젤엔진도 가능하게 되었다(Assanis 1985). Table 1에는 엔진 구성 금속물질, 세라믹물질 및 quartz의 주요 물성치를 나타내었다. 세라믹 재질을 사용하는 엔진의 경우, 세라믹 재질로 헤드의 화염접촉면과 피스톤 크라운의 코팅을 하게 된다. 본 연구에서는 헤드와 피스톤에 zirconia로 코팅한 LHR 디젤엔진과 실린더라이너가 quartz로 만들어진 LHR 디젤엔진의 열전달 및 성능을 연소실이 cast-iron으로 만들어진 기본 엔진(baseline engine)과 비교하였다.

2. 엔진 시뮬레이션

본 연구에서 수행된 엔진성능 및 열전달특성 해석은 University of Michigan, ARC (Automotive Research Center)와 이교승이 공동 개발한 자연 흡기식 디 디젤엔진(Naturally Aspirated DI Diesel Engine)용 프로그램을 수정 보완하여 사용하였으며, 엔진속도는 1500rpm이다.

Table 1 Properties of selected metallic alloy, ceramics and quartz

Property	Metal Alloy	Ceramics	Quartz
	cast-iron Aluminium Nimonic	silicon nitride silicon carbide zirconia	
Allowable Temp. (°C)	500	1300	1000
	200	1400	
	800	1000	
Strength (MPa)	250~300	300~800	50
	150	350~550	
	700~1100	200~1000	
Thermal Conductivity (W/mK)	40~55	8~35	1.4
	155	20~60	
	12	2.2~3.8	
Specific Heat (J/kgK)	480	710	970
	915	650~1100	
	461	400~700	
Thermal Expansion Coefficient (10 ⁻⁶ /K)	10~12	3.0~3.5	0.6
	21	3.4~4.4	
	13	8.0~11.4	
Young's Modulus (GPa)	80~120	160~300	70
	71	330~430	
	200	160~210	

2.1 엔진 시뮬레이션의 구성

엔진 시뮬레이션의 해석대상은 연소실과 흡·배기 매니폴드로 구성되며 설계변수와 운전조건의 변화에 따른 연소상태의 예측이 그 주된 목적이다. 엔진연소는 열역학적 해석과 열전달 해석이 동시에 이루어져야 하므로 질량유동과 에너지전달이 명확히 정의되어야 한다. 전체 프로그램은 질량보존식과 에너지보존식을 가스교환과정, 연소모델, 난류모델, 열전달모델 그리고 마찰모델에 적용하여 반복계산에 의해 미분방정식을 해결하는 방식이다. Fig. 1에는 본 연구에서 사용된 프로그램의 흐름도를 도시하였다.

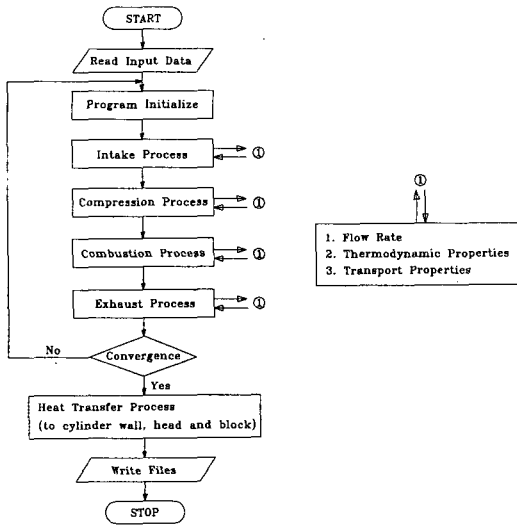


Fig. 1 Flowchart of engine cycle simulation

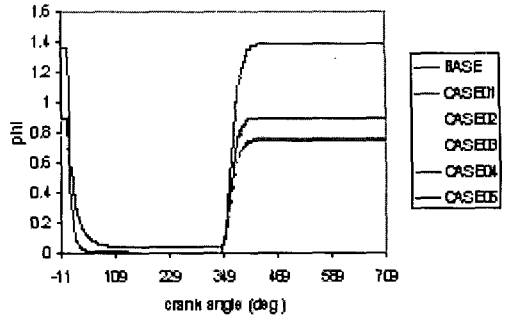


Fig. 2 In-cylinder mean equivalence ratio vs. crank angle

2.2 해석모델

해석대상은 기본엔진과 5개의 LHR 디젤엔진 모델로 분류되며, 상세한 제원은 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Specification of simulation models

Model	description
baseline	DI, NA, 6-cylinder, watercooling, displacement : 7500 CC 118(B) X 115(S) mm 17.5 (CR) Max. Torque : 475 Nm @1500 rpm Max. Power : 123 kW @2200 rpm
case01	Head & Piston : 0.5mm zirconia coating Liner : cast-iron
case02	Head & Piston : 1.0mm zirconia coating Liner : cast-iron
case03	Head & Piston : cast-iron Liner : quartz
case04	Head & Piston : 0.5mm zirconia coating Liner : quartz
case05	Head & Piston : quartz Liner : quartz

3. 결과

Fig. 2에는 한 사이클 동안의 평균 당량비(ϕ) 변화를 도시하였다.

일반적인 경우, NA 엔진은 $0.2 \leq \phi_{NA} \leq 0.7$ 그리고 과급엔진은 $0.16 \leq \phi_{TC} \leq 0.50$ 이며 따라서 case05를 제외한 모든 경우에서 만족스러운 결과를 보이고 있다. Case05의 결과는 Table 3의 체적효율 결과와 비교해보면 원인을 분석할 수 있다. 체적효율은 세라믹 재질의 코팅이나 quartz의 삽입에 따라 감소하게 되는데 연소실을 모두 quartz로 만든 case05는 연소실 표면온도가 급격히 상승하여 결과적으로 연소실 온도 역시 상승하는 효과를 가져와 공기의 유입을 방해하므로 체적효율의 급격한 감소를 가져온다. Fig. 3에는 한 사이클 동안의 평균 연소실 온도를 나타내었다. Baseline 엔진에서 case 05까지 점차 온도가 상승함을 알 수 있고 따라서 Table 4에 나타난 배기가스의 온도 역시 타당함을 확인할 수 있는데, Table 4에는 최적화된 코팅두께(헤드와 피스톤에 0.3mm zirconia 코팅)에 대한 결과도 함께 나타내었다. Fig. 4에는 한 사이클 동안의 평균 연소실 압력을 도시하였다.

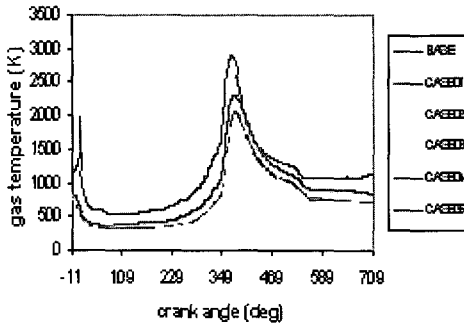


Fig. 3 In-cylinder mean gas temperature vs. crank angle

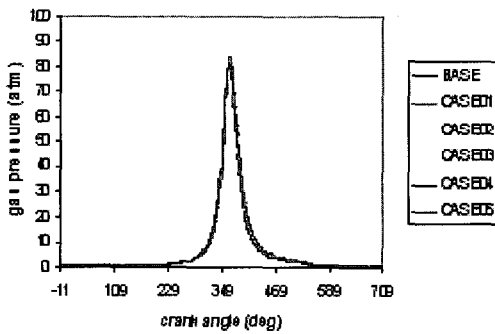


Fig. 4 In-cylinder mean gas pressure vs. crank angle

Table 3 Volumetric efficiency

Model	V.E.(%)
baseline	88.9
0.3mm coating	87.8
case01	86.8
case02	84.5
case03	74.4
case04	73
case05	46.3

Table 4 Exhaust gas temperature

Model	E.G.T. (°C)
baseline	502.8
0.3mm coating	520.8
case01	539.2
case02	581.5
case03	670.4
case04	692.4
case05	833.6

전체적으로는 거의 유사한 분포를 보이거나 최고 압력의 경우 case02, 01, baseline, 04, 03 그리고 05의 순서로 감소한다.

이는 Fig. 2와 3에서 보여준 순서와는 다른 값이며 따라서 이 결과는 bmep, 즉 연소실 온도 및 압력과 관계있는 엔진성능 역시 다른 특성을 보이리라 예측할 수 있다.

Fig. 5와 6에는 한 사이클 동안의 연소실 내부의 열전달 계수와 연소실 벽면으로의 열전달량을 각각 나타내었다.

Case05를 제외하고는 유사한 형태를 보이며 baseline에서 case04까지 점차 증가하는 모습을 보인다. Case05의 경우 흡입과정 초기에 보다 복잡한 유동 메커니즘으로 인하여 열전달 계수 역시 선형적인 증가를 하지 못하고 불규칙적인 변화를 보인다. 이는 Table 3에 나타난 체적효율의 감소와도 같은 원인이다. Table 3에는 최적화된 코팅 두께(헤드와 피스톤에 0.3mm zirconia 코팅)에 대한 결과도 함께 나타내었다.

연소실 벽면으로의 열전달 역시 case05를 제외하고는 유사한 형태를 보인다. 그러나 크기 면에서는 case01, baseline, 02, 04, 03, 05의 순서로 증가하며 case05의 경우 연소가 활발한 연소 및 팽창구간을 제외하고는 오히려 연소실 벽면에서 연소가스로 열이 전달되는 특이한 현상이 발생한다.

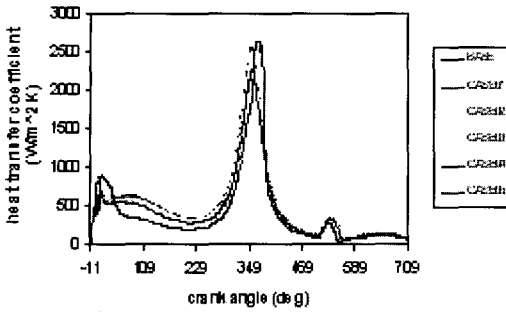


Fig. 5 In-cylinder mean gas heat transfer coefficient vs. crank angle

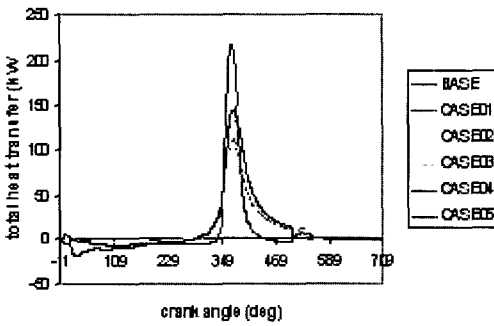


Fig. 6 Total heat transfer to wall vs. crank angle

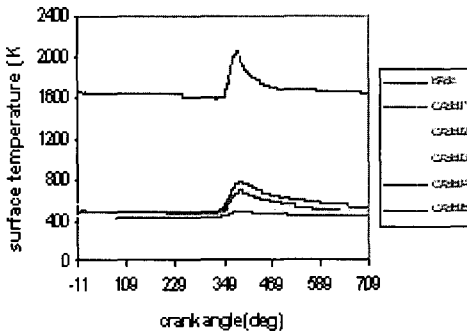


Fig. 7 Mean piston surface temperature vs. crank angle

Case05의 경우는 성능분석에서 일단 제외하도록 하는데, 이는 quartz의 경우 지속적으로 운전할 수 있는 안전온도가 1000°C 근처이며 순간 최고 허용온도는 1200~1300°C이다. 따라서 case05는 시뮬레이션으로만 가능한 엔진이기 때문이다.

전체 열손실의 감소가 모두 동력증가를 가져왔다면, case02, 03이 모두 baseline 엔진보다 큰 값의 bmep나 디젤일(diesel work)을 나타내야 할 것이다. 그러나 열전달 감소가 유용한 일로 전환하지 못한 채 배기가스로 방출되기 때문에 오히려 baseline 엔진에 비해 성능이 낮아짐을 알 수 있다.

결과적으로 본 연구의 결과, 주어진 엔진속도 1500rpm에서의 엔진출력은 Baseline 엔진을 수정하여 zirconia를 헤드와 피스톤 표면에 각각 0.3 mm 코팅한 경우가 최고의 출력을 보였다.

Table 5 BMEP and diesel work

Model	BMEP(atm)	Diesel work (kW/cycle)
baseline	11.82	5.758
0.3mm coating	11.88	5.800
case01	11.85	5.764
case02	11.79	5.696
case03	11.03	4.996
case04	11.05	5.000
case05	8.52	2.864

4. 결론

본 연구에서는 엔진 헤드와 피스톤에 zirconia로 코팅한 소형 선박용 LHR 디젤엔진과 실린더 라이너가 quartz로 만들어진 LHR 디젤엔진의 열전달 및 성능을 연소실이 cast-iron으로 만들어진 기본 엔진과 비교하여, LHR 엔진의 설계 및 개발 가능성을 타진하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 체적효율은 세라믹 재질의 코팅이나 quartz의 삽입에 따라 감소하게 되는데, 연소실 표면온도가 상승하여 결과적으로 연소실 온도 역시 상승하는 효과를 가져와 공기의 유입을 방해하므로 체적효율의 감소를 가져온다.

(2) 세라믹 재질의 코팅이나 quartz의 삽입에 따라 연소실 평균온도는 점차로 증가하게 된다.

(3) 세라믹 재질의 코팅이나 quartz의 삽입으로 인해, 경우에 따라 연소 및 팽창구간을 제외하고는 오히려 연소실 벽면에서 연소가스로 열이 전달되는 특이한 현상이 발생한다.

(4) 엔진 연소실 내부에 세라믹 재질의 코팅이나 quartz의 삽입했을 경우, 전체 열손실의 감소가 모두 동력증가를 가져오게 된다면, baseline 엔진보다 큰 값의 bmep나 디젤일(diesel work)을 나타내야 할 것이다. 그러나 열전달 감소가 유용한 일로 전환하지 못한 채 배기가스로 방출되기 때문에 오히려 base line 엔진에 비해 성능이 낮아짐을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 2004 경기공업대학 교육인적자원부 특성화 재정지원사업에서 일부 연구비를 지원받았습니다.

참 고 문 헌

- Assanis, D., 1985, A Computational Simulation of the Turbocharged Turbocompounded Diesel Engine System for Studies of Low Heat Rejection Engine Performance, Ph.D. Thesis, MIT.
- Heywood, J.B., 1988, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill.



< 백 문 열 >



< 이 교 승 >



< 강 신 형 >