

## 선박용 디젤기관의 열화성능 예측에 관한 연구

정찬호<sup>1</sup> · 노범석<sup>2</sup> · 이지웅<sup>3</sup> · 최재성<sup>†</sup>

(원고접수일 : 2012년 10월 11일, 원고수정일 : 2013년 1월 2일, 심사완료일 : 2013년 1월 2일)

### Predictions of the deteriorating performance for the marine diesel engines

Chan-ho Jung<sup>1</sup> · Beom-seuk Rho<sup>2</sup> · Ji-woong Lee<sup>3</sup> · Jae-sung Choi<sup>†</sup>

**요약:** 최근 고유가 시대를 경험한 이후 에너지 수급에 대한 불안감이 증대됨과 동시에 지구온난화, 대기오염문제 등과 관련하여 대체에너지의 개발과 고효율 친환경 기술개발에 대한 요구가 강화되고 있다. 특히, IMO(국제해사기구)의 MEPC에서는 부속서 6을 CO<sub>2</sub>의 규제법으로 하고자 하는 논의가 진행 중이다. 한편, 선박의 에너지효율을 향상시키고자 하는 다양한 기술들은 대부분 주로 새로운 기술의 개발과 신조선에의 적용에만 관심이 집중되고 있다. 그러나 선박기관은 일반적으로 장시간의 운항으로 그 성능은 점점 저하되고 운전조건 또한 변화되기 때문에 운항중인 기존선의 운항조건에 최적화된 기관의 운전관리야말로 친환경 및 고효율화 대책에 실질적이면서 매우 유익한 대책이 될 수 있다.

본 논문은 선박엔진의 성능저하정도를 정량적으로 예측하고자 하는 내용으로 엔진의 성능을 저하시키는 주요 인자들과 급기효율저하, 블로바이 가스증가 및 연료분사상태의 악화로 인한 연소악화 등이 엔진성능에 미치는 영향을 예측, 검토하였다.

**주제어:** 선박용 디젤기관, 엔진성능, 열화성능, 성능예측, 연료절감

**Abstract:** The higher energy efficiency for ship and the lower pollution for global environment are required strictly. However the performance of marine diesel engine is gradually deteriorated with time. And also the operation condition is varied with sea conditions. Hence the optimization for operating condition of marine engines is needed for energy saving and environment kindly.

In this paper, it was attempted to investigate the influence of aging for marine diesel engine. The deterioration of engine performance is assessed by the calculation results of the simulation program for two-stroke marine diesel engine developed by author which was reported before. And three parameters for deterioration of engine performance were considered such as lower efficiency of turbocharger by fouling, increase of blow-by gas due to wear of cylinder liner and getting worse of combustion by poor injection. By the results, it was shown that the influence of engine performance by aging was relatively not so small - 10.4 bar low in Pmax and 3.2% decrease in Pmi.

**Keywords:** Marine diesel engine, Engine performance, Deterioration, Prediction, Fuel saving

† 교신저자: (606-080) 부산광역시 영도구 태종로 727

한국해양대학교 기관공학과, E-mail: jschoi@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4262

1 (주)ABB 코리아, E-mail: chan-ho.jeong@kr.abb.com, Tel: 051-264-1680

2 한국해양수산연수원, E-mail: bsro@seaman.or.kr, Tel: 051-620-5779

3 한국해양수산연수원, E-mail: jiwoong@seaman.or.kr, Tel: 051-620-5814

## 1. 서론

최근 고유가 시대를 경험한 이후 에너지 수급에 대한 불안감이 증대됨과 동시에 지구온난화, 대기 오염문제 등과 관련하여 대체에너지의 개발과 고효율 친환경 기술개발에 대한 요구가 증가 또는 강화되고 있다. 특히, IMO(국제해사기구)의 MEPC에서는 부속서 6을 CO<sub>2</sub>의 규제법으로 하고자 하는 논의가 진행 중이다. 즉, 신조되는 선박에는 EEDI를 적용하여 선박의 인도 및 취항을 금지시키고자 하는 강력한 규제를 적용하기로 하였으며, 운항중인 선박에 대하여는 SEEMP를 작성하여 이를 실행하도록 하고, EEOI를 적용하여 지속적으로 에너지 효율을 개선해 나가도록 규제하는 방향으로 진행되고 있다. EEDI와 SEEMP는 2013년 1월 1일부터 강제적으로 적용되며, 현재 세부적인 기술수준이 논의되고 있다. 이러한 움직임에 대하여 해운 선사, 조선소, 엔진메이커들은 적극적인 노력을 기울이고 있으나, 자신들의 노력을 가시화하기 위해서는 이를 평가하는 것 또한 중요한 문제가 될 것이다.

한편, 선박의 에너지효율을 향상시키고자 하는 다양한 기술들은 대부분 주로 새로운 기술의 개발과 신조선에의 적용에만 관심이 집중되고 있다. 그러나 선박기관은 일반적으로 장시간의 운항으로 그 성능은 점점 저하되고 운전조건 또한 변화되기 때문에 운항중인 기존선의 운항조건에 최적화된 기관의 운전관리야말로 친환경 및 고효율화 대책에 실질적이면서 매우 유익한 대책이 될 수 있다. 장기간의 운전으로 성능이 악화된 선박기관의 현재의 운전 상태를 정확히 파악하고 분석, 평가하여 이를 바탕으로 성능을 향상시킬 수 있는 방안을 구체적으로 제시하기 위해서는 그 효과를 정량적으로 판단할 필요가 있다. 그러나 기술상의 문제들로 인하여 출력성능과 배기성능을 정확하게 계측하여 파악하는 것은 아직도 어려운 문제이다. 그러므로 운항중인 선박의 각종 운전 데이터를 활용하여 실제 운항중인 선박엔진의 현재 성능을 정도 높게 파악할 수 있는 예측기법을 활용하는 것이 바람직한 방법이 될 수 있다. 따라서 실선에서의 운항 상태에 따른 성능을 예측할 수 있는 기법의

개발이 필요하다고 생각한다.

본 논문은 선박엔진의 성능저하정도를 정량적으로 예측하고자 하는 내용으로 엔진의 성능을 저하시키는 주요 인자들의 영향을 고찰한 결과를 보고하고자 한다. 엔진의 성능예측은 필자들이 개발한 시뮬레이션 프로그램을 이용하였으며, 이에 관한 자세한 내용은 전보[1]-[3]에서 언급하였다. 엔진성능을 악화시키는 인자들은 많으나 여기에서는 과급기효율저하, 블로바이 가스증가 및 연료분사상태의 악화로 인한 연소상태악화 등이 엔진성능에 미치는 영향을 예측, 검토하였으며, 그 결과를 보고한다[4].

## 2. 대상기관 및 예측결과

계산결과의 신뢰성을 확인하기 위하여 계산결과의 비교가 가능한 엔진을 대상기관으로 선정하였다. 즉, 엔진메이커에서 이용하고 있는 성능 예측 프로그램 TOPCODE[5]의 계산결과와 비교하였다. 계산 대상 기관의 사양은 Table 1에 보인다. 대상기관은 TCS를 채용하고 있는 기관으로 정격이 조정(derating)되어 있다.

Table 2는 계산결과와의 비교를 나타낸 것으로 대체적으로 매우 양호한 결과를 나타내고 있다. 최고 압력 등 연소 사이클에 있어서의 약간의 차이는 연소실벽의 온도와 열발생을 패턴의 차이 등에 의한 것으로 실제에 접근한 데이터를 이용하면 더욱 좋은 일치를 보일 것으로 판단된다. 따라서 시뮬레이션 프로그램의 계산결과를 신뢰할 수 있다고 판단된다. 계산결과에 있어서 과급기효율은 계산결과로부터 요구되는 과급기의 효율을 의미한다.

Table 1: Specification of test engine

Engine Model	5S60MCE
Bore / Stroke	600 / 2292 mm
kW / rpm (1 cyl.)	1530kW / 102rpm
Compression ratio	16.8
Pmi	13.9 bar
SFOC	163.3 g/kWh

**Table 2:** Comparison for calculation results between TOPCODE's and Author's

Case	Air mass [kg/cy]	Ps [bar]	Pcomp [bar]	Pmax [bar]	Tmax [K]	TC-EF [%]	Pmi [bar]
TOP-CODE	1.487	2.80	122.6	131.0	1741	64.0	13.89
Author's	1.485	2.80	122.8	130.1	1775	62.5	13.54

### 3. 디젤엔진의 성능열화인자들의 영향

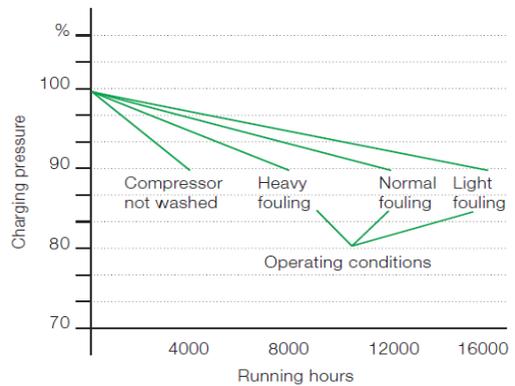
앞에서 언급한 바와 같이 엔진은 운전시간의 경과에 따라 그 성능이 저하되어 간다. 엔진성능의 저하에는 많은 인자가 관계하고 있지만 대표적인 인자로 과급기의 효율저하로 인한 공급공기량 감소 및 연료분사계통의 열화와 이들의 상승작용에 의한 연소상태의 악화를 예견할 수 있으며, 실린더-피스톤부위의 마모에 의한 블로 바이 가스량 증가를 생각할 수 있다. 본 연구에서는 이들 각 인자들이 각각 엔진성능에 미치는 영향을 정량적으로 파악하고자 하였다. 즉 과급기 종합효율, 실린더 라이너 마모량 및 연소특성지수를 변경하여 검토하였다. Table 3에 위의 각 인자들의 영향을 조사한 계산결과를 종합적으로 나타내었다.

#### 3.1 과급기 성능의 열화

기관실내부의 유증기와 먼지 등이 포함된 흡입 공기는 압축기내부의 공기통로인 임펠러와 디퓨저 블레이드 등의 표면에 부착되어 공기저항을 증가시키고 압축기의 효율을 저하시킨다. 또한 연소 과

정 중에 발생한 단단하고 부식성이 있는 연소잔류물들이 배기가스와 함께 터빈에 유입하여 노즐링, 터빈 블레이드 등의 벽면에 퇴적되어 터빈효율을 저하시킨다. 주기적인 청소에 의하여 이들을 제거하고 있지만 장시간의 운전 중에 과급기는 서서히 효율이 저하하게 된다. 가스유로의 오염에 의한 과급기의 효율저하는 배기온도의 상승, 급기압력의 저하, 공급공기량의 감소로 이어져 엔진의 성능을 저하시킨다. 특히 과급기의 효율저하는 전 부하에서 보다는 부분부하에서 그 영향이 크다.

Figure 1은 운전시간경과에 따른 급기압력 감소의 예를 나타낸 것이다[6]. 그림으로부터 정상적인 경우에도 운전시간이 12,000시간 경과하면 10%의 급기압력이 감소함을 나타내고 있다.



**Figure 1:** Example : Reduction in charging pressure with time [6]

**Table 3:** Prediction results of each parameter by aging.

Case	Air mass [kg/cyl]	Ps [bar]	Pcomp [bar]	Pmax [bar]	Tmax [K]	TC-EFF [%]	Pmi [bar]	Remark
Standard	1.485	2.80	122.8	130.1	1775	62.5	13.54	CM:1.0
Cal - 1	1.413	2.70	117.9	126.7	1812	60.3	13.48	$\eta_{TC}$ : -2.0%
Cal - 2	1.462	2.73	118.3	126.6	1802	62.4	13.28	Wear: 0.1mm
Cal - 3	1.499	2.83	123.9	126.2	1742	62.5	13.40	CM:1.2
Cal - 4	1.411	2.67	115.4	119.7	1802	60.5	13.10	all above

CM : Index of ROHR,  $\eta_{TC}$  : Turbo-charger efficiency, Wear : Liner wear

본 연구에서는 과급기의 종합효율( $\eta_{TC}$ ) 2%의 감소가 엔진의 성능에 미치는 영향을 예측하였다.  $\eta_{TC}$  2%의 감소는 급기압력 0.1bar의 저하를 초래하였다. Table 3의 Cal-1은 과급기종합효율이 약 2%감소하여 급기압력이 0.1bar 감소하였을 때의 계산결과로 공급공기량이 4.8%감소하고 있다. 지시평균유효압력의 악화는 크지 않지만 이는 연소조건을 동일한 것으로 간주하였기 때문으로 판단된다.

### 3.2 가스누설에 의한 성능의 열화

실린더 라이너와 피스톤 링의 마모에 의한 가스 blow-by는 압축행정과 팽창행정에서 일어나는데, 압축과정에서의 가스누설은 소정의 압축비를 얻을 수 없게 하고, 팽창과정에서의 가스누설은 출력의 감소를 초래한다.

MAN B&W Diesel 사에서는 446개의 실린더 라이너를 운전시간 1000시간 경과했을 때의 마모량 통계를 보고하였다[7]. Figure 2는 그 결과를 나타낸 것이다. 446개의 전체 평균 마모량은 0.088 mm/1000h이며, 그 중 짙은 색깔의 막대는 허용치 0.1 mm/1000h 이상의 마모를 보인 88개의 실린더 라이너를 나타낸다. 전체 446개 실린더 라이너 중 약 18%가 허용치이상의 마모량을 보이는데, 이는 피스톤 링의 절손, 링에 의한 스커핑(Scuffing), 연료에 포함된 미립자에 의한 긁힘(cat fines) 등의 원인으로 보고 있다.

라이너의 마모는 운전시간의 경과에 따라 증가하지만 본 연구에서는 마모량(실린더 라이너의 직

경 증가분)이 0.1 mm일 때의 Blow-by 가스량을 예측하고 이에 의한 성능의 저하정도를 계산하였다. 여기서 마모량 0.1mm는 가스가 누설하는 실린더 라이너와 피스톤간의 간격을 의미하는 것으로, 실제 마모량을 의미하는 것은 아니다. 따라서 Blow-by 가스량 계산을 위한 입력 데이터로서의 마모량 값의 결정은 주의를 요한다.

Table 3의 Cal-2는 실린더 라이너의 마모량이 0.1mm인 경우를 가정한 계산결과이다. 과급기 종합효율이 동일하게 유지된다고 할 때 급기압력은 0.07bar 저하하였으며, 이때 Blow-by 가스량은 급기량의 약 1.6%로 계산되었으며 평균유효압력도 2% 정도 감소하였다.

### 3.3 연소성능의 열화

끝으로 검토된 엔진의 성능열화 요소는 연소상태의 악화에 의한 성능저하이다. 장시간 운전으로 인한 분사계통의 마모, 분사압력의 변화, 연소퇴적물에 의한 노즐 막힘 등의 이유로 분사상태가 불량하게 되며, 이는 연소상태의 악화를 초래하여 열발생율이 변화하게 된다.

디젤엔진의 연소과정은 비교적 급격연소를 하는 예혼합연소가 지배적인 것으로 생각되는 초기 연소 부분과 이를 뒤이어 비교적 완만한 확산연소가 지배적인 것으로 생각되는 부분의 2단계 연소를 하는 것이 일반적이므로, 본 연구에서는 대상 엔진의 실린더 내부 연소 특성을 나타내는 열발생율을 Double Wiebe 함수로 근사하여 나타내고[8], 연소 특성지수(CM)를 이용하여 그 영향을 파악하였다.

비교대상이 되는 엔진의 기준 CM은 1.0 이었으며, 연소상태의 악화에 의한 열발생율의 변화정도를 1.2로 증가시켜 그 영향을 고찰하였다. Figure 3은 두 경우의 열발생율 변화를 나타낸 그림이다. 연소특성지수의 변화로 열발생율이 최대가 되는 시기가 늦어지고 최대값 또한 낮아졌음을 확인할 수 있다.

Table 3의 Cal-3은 이러한 연소상태의 악화를 가정하여 연소특성지수를 1.0에서 1.2로 변경시킨 경우의 계산결과이다. 연소속도의 늦음으로 배기에 너지가 증가하기 때문에 과급기 종합효율이 동일한 경우이면 급기압력은 0.03bar 정도 증가하였다.

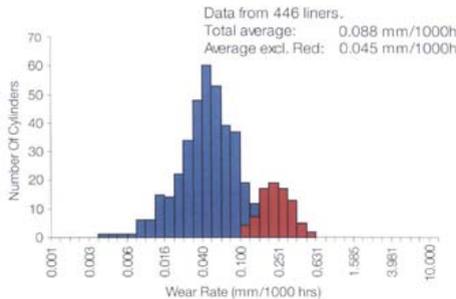


Figure 2: Cylinder liner wear rate-Oros combustion chamber[7]

그러나 평균유효압력은 1.0% 감소하였다.

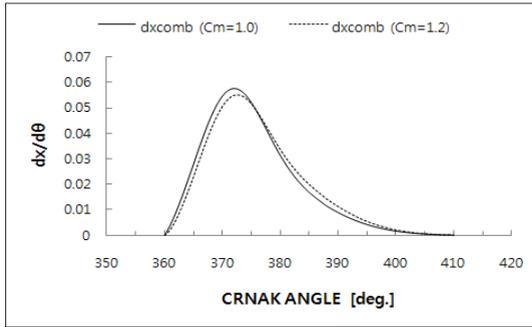


Figure 3: Comparison of the pattern according to Index of ROHR

### 3.4 열화인자들의 종합적 영향

이상으로 엔진성능에 영향을 주는 세 가지 요소의 열화 및 마모 등을 가정하여, 각각의 열화 현상으로 인한 엔진 성능의 변화를 예측하였다. 그러나 실제 엔진에서는 일반적으로 이러한 현상들이 동시에 일어난다고 판단된다.

Table 3의 Cal-4는 위의 변화가 동시에 발생하였다고 가정한 경우의 계산결과이다. 이 결과에 의하면 Pmax는 10.4bar 낮아지고 Pmi는 3.2% 저하함을 알 수 있으며, 엔진성능의 열화정도가 작지 않다는 것을 알 수 있다. 대상기관의 경우 성능의 저하정도는 연료소비율이 5.3g/kWh 증가하고 연료소비량은 10.0 ton/day 증가하는 것으로 계산되었다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 엔진 성능과 관련된 주요 인자들을 선택하여 그 열화 상태를 가정함으로써 엔진의 열화성능을 예측할 수 있는 방법을 개발하고, 각각의 인자가 기관성능에 미치는 영향을 예측하고 그 결과를 고찰하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(가) 과급기종합효율이 약 2% 감소하여 급기압력이 0.1bar 감소하였을 때 공급공기량이 4.8% 감소를 나타냈다. 지시평균유효압력의 악화는 크지 않지만 이는 연소조건을 동일한 것으로 간주하였기 때문이다.

(나) 실린더 라이너의 마모량이 0.1mm인 경우를

가정한 계산결과, 과급기 종합효율이 동일하게 유지된다고 할 때 급기압력은 0.07bar 저하하였으며, 이때 blow-by 가스량은 약 1.6%로 계산되었으며 평균유효압력도 2% 정도 저하하였다.

(다) 연소상태의 악화를 가정하여 연소특성지수를 1.0에서 1.2로 변경시킨 경우, 연소속도의 늦음으로 배기에너지가 증가하기 때문에 과급기 종합효율이 동일한 경우이면 급기압력은 0.03bar 정도 증가하였다. 그러나 평균유효압력은 1.0% 감소하였다.

(바) 각각의 성능관련 열화인자들의 변화가 동시에 발생하였다고 가정한 경우, Pmax는 10.4bar 낮아지고 Pmi는 3.2% 저하하여 그 영향이 적지 않음을 알았다. 대상엔진의 경우 연료소비율이 5.3g/kWh 증가하고 연료소비량은 1.0ton/day 증가하였다.

이상의 연구결과는 성능악화의 정도를 가정하여 나타낸 것이지만 운전시간의 경과에 따른 성능의 악화정도를 정량적으로 평가할 수 있는 실선의 운전 자료를 확보하면 더욱 신뢰할 수 있는 정량적인 예측결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 엔진 열화 요소에 대한 지속적인 실측 데이터의 축적이 중요하다고 판단된다.

## 참고문헌

- [1] J. S. Choi, K. H. Cho, and J. G. Nam, "An investigation on the performance improvement of marine diesel engines for existing ship," Proceedings of Advanced Maritime Engineering Conference (AMEC2008) and the 3rd Pan Asian Association of Maritime Engineering Societies (PAAMES) Forum, pp. 923-927, 2008.
- [2] J. S. Choi, C. H. Jung, K. H. Cho, J. W. Lee, T. B. Ha, and H. S. Kim, "Performance simulation of Two-stroke marine diesel engines for existing ship," Proceedings of 8th International Symposium on Marine Engineering 2009, no. 194, 2009.
- [3] J. S. Choi, C. H. Jeong, K. H. Cho, J. W.

Lee, T. B. Ha, and H. S. Kim, "Development of simulation program of Two-stroke marine diesel engines," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 34, no. 1, pp. 62-68, 2010 (in Korean).

- [4] C. H. Jeong, "Prediction of performance including gas flow system for Two-stroke marine diesel engines," Master's Thesis, Depart. of Marine Engineering, Korea Maritime University, Korea, 2010 (in Korean).
- [5] MAN B&W Diesel A/S, Process Development, Meeting of Licensees - Copenhagen 2006, no. 7, 2006.
- [6] Johan Schiemann, Operating Turbochargers, ABB Turbocharging Technical Information, 1992.
- [7] MAN B&W Diesel A/S, Cylinder Condition, meeting of licensees - Copenhagen 2006, no. 9, 2006.
- [8] J. I. Ramos, Internal Combustion Engine Modeling, Hemisphere Publishing Corporation. pp. 116, 1989.