

건설기계 엔진룸 열설계 및 해석 기술

Thermal Design and Numerical Analysis for Under-Hood Engine Compartment of Construction Equipment

김우영 · 배충식

Wooyeong Kim and Choongsik Bae

1. 서 론

건설기계란 굴착, 파쇄, 적재, 운반 등의 작업을 수행하며 토목공사나 건축공사에 쓰이는 기계의 총칭이다. 건설기계는 도로 수송용 자동차와 작동 환경이 매우 상이하고, 구조상 주행부 및 조종실과 더불어 작업 수행을 위한 기계장치가 탑재되어 차체 설계의 지향점 역시 자동차와 큰 차이점을 보인다. 중·소형 건설기계의 경우 동력 생산을 담당하는 엔진을 거치하기 위해 조종실 하부 또는 근접한 공간을 엔진룸으로 사용하여, 구조상 엔진의 발열과 소음이 작업자에게 쉽게 노출된다. 또한 작업 기계 구동을 위한 추가적인 유압장치 설치가 필요하여 엔진룸이 협소하고 복잡해지는 문제가 있으며, 운행 시 저속으로 이동하고 작업 시 주로 정차하는 특성상 주행풍에 의한 엔진룸 냉각이 거의 불가능하다는 단점이 존재한다.¹⁾

상기 건설기계가 가지는 구조적 난제에 의한 성능 저하 및 고장 문제를 해결하기 위해서는 가장 주요한 열 방출원인 엔진의 발열 에너지 흐름을 분석하고, 엔진룸 유로 분석 및 열교환기 개선이 필수적이다. 이를 위해 본 연구에서는 대상 엔진의 연소 과정과 이에 의한 발열 및 열전달을 1차원 모델링하였고, 주요 엔진 운전점에서의 열발생률 및 열전달 해석을 진행하였다.

2. 대상 건설기계 및 대상 엔진

본 연구에서는 건설기계 중 4톤급 지게차를 대상 건설기계로 선정하였고, 대상 엔진은 그림 1과 같이

Table 1 Engine specification

항목	제원
타입	직렬 4기통 수냉식
배기량	3769 cc
정격 출력	85.0 kW at 2600 rpm
정격 토크	360 Nm at 1500 rpm



Fig. 1 3.8L diesel engine

3.5~5톤급 지게차에 탑재되는 직렬 4기통 3.8L 디젤 엔진을 선정하였다. 대상 엔진의 제원은 표 1과 같다.

3. 엔진 발열 모델링 및 에너지 유동 해석

3.1 엔진 1D 모델링

본 연구에서는 대상 엔진의 발열 및 에너지 유동 해석을 위해 Ricardo 사 WAVE를 이용하여 1차원 엔진 모델을 구축하였다.

엔진 연소실 내에 분사된 연료의 연소로 발생한 에너지의 일부는 엔진 피스톤을 구동하는 기계적 에너지로 사용되며, 그 외 배기 에너지와 연소실 주변 부품으로 전달되는 열에너지로 사용된다. 이러한 열에너지는 크게 피스톤, 실린더 라이너, 엔진 헤드, 흡·배기 밸브와 피스톤 운동에 의한 마찰열로 전달된 뒤, 상기 부품 주변에 흐르는 냉각수와 엔진오일로 전달되어 최종적인 열평형(Heat balance)이 형성된다.²⁾ 발열 해석의 주요 파라미터인 엔진 온도는 흡기 온도, 배기 재순환 (EGR; Exhaust gas recirculation) 온도, 구동계 마찰 등에 영향을 주며, 엔진의 구동 효율 및 내구성에 영향을 미치기 때문에 방열 설계시 이를 반드시 고려하여야 한다. 또한 지게차의 경우 다른 건설기계와 달리 중·저부하부터 전부하(100% engine load)에 이르기까지 넓은 폭의 운전 영역을 사용하는 특징이 있어, 다수의 운전점(Operation point)에서 발열이 어떻게 발생하는지를 평가하는 것이 필요하다.

엔진 모델의 정확도를 평가하기 위해 대상 엔진의 성능 시험 측정값을 동일 운전 조건에서의 모델링 결과와 비교한 결과, 그림 2와 같이 1.5% 이내의 오차를 보이는 것을 확인하였다.

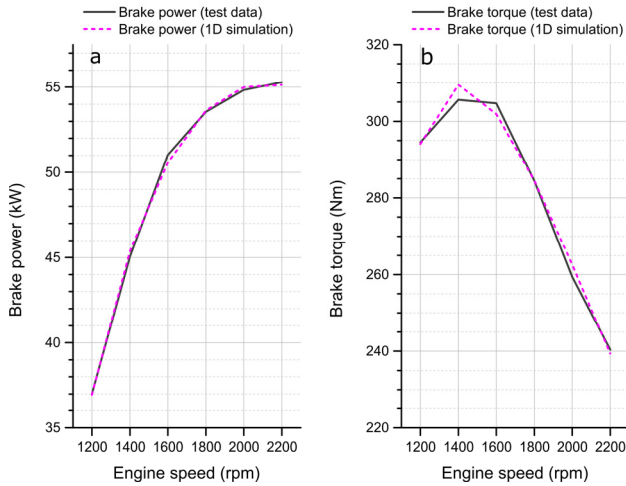


Fig. 2 Validation of 1D engine model by brake power (a) and brake torque (b) of engine test data

3.2 엔진 발열 에너지 흐름 해석

WAVE 1차원 엔진 시뮬레이션을 통해 30~100%의 엔진 부하 조건과 1200~2200 rpm 엔진 속도 조건에서 열평형을 분석하였으며, 그 결과는 그림 3과 같다.

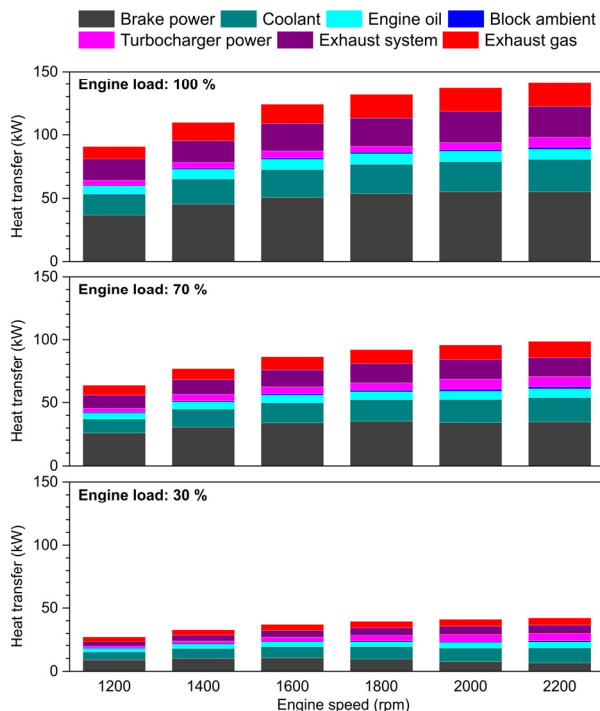


Fig. 3 Simulation results of engine heat balance for selected operation points

엔진 연소에 의한 전체 에너지 중 동력(Brake power)으로 전달되는 비율(제동열효율, Brake thermal efficiency)은 전부하 조건에서 약 40%에 달하며, 부하가 낮아질수록, 그리고 엔진 속도가 증가할수록 동력 전달 비율이 감소하는 것을 확인하였다. 동력 전달에 쓰이고 남은 에너지는 이후 냉각수(Coolant)와 엔진 오일(Engine oil)을 통해 약 17~27% 손실되며, 엔진 블록(Block ambient)을 통해 약 1~4% 손실됨을 알 수 있었다. 엔진 연소에 의한 발생하는 배기로 손실되는 에너지는 전체의 약 24~51%에 달하며, 이 중 배기 에너지에 의한 손실은 약 11~13%임을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 4톤급 지게차의 대상 엔진인 3.8L 디젤 엔진을 1차원 모델링하여 엔진 운전 시 발생하는 열에너지 유동을 분석하였다. 주요 운전점에서 발열 에너지 흐름을 해석한 결과, 엔진 배기와 냉각수를 통한 발열 에너지 유동이 가장 주요한 것을 확인하였다.

결론적으로 엔진룸 열관리를 위해 배기 매니폴드에서 후처리 촉매를 아우르는 배기 시스템 주변 의 방열 성능 개선이 필요하며, 향후 3차원 전산유동해석(CFD)을 이용해 엔진룸 내 컴포넌트 배치 및 최적 설계를 진행할 것이다. 또한 수냉식 열교환기 배치를 통해 냉각수의 열교환 성능을 향상시킨다면 냉각팬의 부하를 감소시켜 효과적으로 엔진 소음을 저감할 수 있을 것으로 예상된다.

참고 문헌

- 1) V. Dangmali, P. R. Dhamangaonkar, A. Atnurkar, "CFD simulation of under hood engine compartment for forklift truck", SAE Technical Paper. No. 2013-01-2861, 2013.
- 2) J. B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill Education, 2018.

[저자 소개]



김우영

E-mail : wykim92@kaist.ac.kr

Tel : 042-350-3063

2016년 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과 석사 졸업. 2016년~현재 한국과학기술원 박사과정. 엔진 연소기술, 플라즈마 점화 기술, 가시화 및 광학 계측법

연구에 종사. 한국자동차공학회 회원, 공학석사

[저자 소개]



배충식

E-mail : csbae@kaist.ac.kr

Tel : 042-350-3063

1994년 Imperial College Mechanical Engineering, Thermofluids 박사 졸업. 1998년~현재 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과 교수. 2012년~현재 연소기술

연구센터(CERC) 소장. 2018~현재 한국액체미립화학회 회장. 2018~현재 한국자동차공학회 부회장. 세계자동차학회 석학 회원 (SAE Fellow). 내연기관, 연소, 레이저 계측, 연료 액체 미립화, 열유체 실험 연구에 종사. 영국물리학회, 한국자동차공학회, 한국기계학회, 한국연소학회, 한국항공우주학회, 등의 회원, 공학박사