

하이브리드 굴삭기용 엔진의 효율 향상 방안에 관한 연구

박민제 · 민경덕*

서울대학교 기계항공공학부

Study on the Improvement Methods of Engine Efficiency in Hybrid Excavator

Minje Park · Kyoungdoug Min*

Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Korea
 (Received 30 November 2015 / Revised 11 February 2016 / Accepted 31 March 2016)

Abstract : In this paper, a study based on engine operating conditions versus hybrid excavator engines was conducted about the engine performance and fuel consumption via the 1-D engine simulation model. First of all, engine operating points with performance and emission were determined by driving patterns. The 1-D HFEM(High Frequency Engine Model) was developed for deep insight into engine combustion and the energy conversion phenomena. In accordance with changing operating points, especially High Idle and Rated output conditions, engine parameters and systems such as turbocharger(Waste Gate Turbocharger and Variable Geometry Turbocharger) injection strategies and EGR(Exhaust Gas Recirculation) should be considered. Therefore, various configurations and parametric analysis with optimization methods in hybrid excavator were simulated and optimized by NLPQL(Non-linear Programming by Quadratic Lagrangian algorithm) in 1-D HFEM. As a result, the fuel consumption with the developed hybrid electric excavator engine could be significantly decreased and bsfc(Brake Specific Fuel Consumption) was also reduced about 5 % to 7 % without any performance degradation.

Key words : Hybrid excavator(하이브리드 굴삭기), Bsfc(제동연료소비율), Fuel consumption(연료소모량), Variable geometry turbocharger(가변 형상 흡입공기 공급장치), Exhaust gas recirculation(배기가스 재순환 장치)

Nomenclature

A : area, m²
 $bsfc$: brake specific fuel consumption, g/kwh
 C : coefficient
 d : diameter, mm²
 D : duration, s or crank angle
 EGR : exhaust gas recirculation
 $HFEM$: high frequency engine model
 Inj : injection, mg/cyc
 ρ : gas density, kg/m³

Φ : power of the local viscosity forces
 λ : thermal conduction, W/mK
 h : thermal exchange coefficient, W/m²K
 SFR : static flow rate, mg/cyc
 U : isentropic velocity, m/s
 T : temperature, K
 P : pressure, bar

Subscripts

no : needle opening
 nc : needle closure
 d : discharge

*Corresponding author, E-mail: kadmin@snu.ac.kr

R : reference
 e : effective
 is : isentropic

1. 서론

배기 및 연비 규제는 갈수록 엄격해지고 있으며, 이를 극복하기 위한 대안으로, 전기시스템과의 조화가 이루어진 하이브리드 파워트레인에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 승용차 시장에서는 이미 양산화 되었을 뿐 아니라, 이에 적합한 엔진 개발, 시스템 개발 최적화 등 상당 부분 연구가 이루어졌다. 하지만 건설기계 분야에서는 하이브리드 시스템에 관한 연구가 자동차 시장에 비해서 많이 주목받지 못하였다. 그러나 최근 들어 건설기계 분야에도 Tier 4 final과 같은 엄격한 배기 규제가 실시됨에 따라 하이브리드 시스템 및 엔진 효율 개선 등의 기술을 건설기계 장비에 적용하고자 하는 연구가 진행되기 시작하였고, 먼저 굴삭기와 트랙터의 연비 향상과 배기저감을 위해 하이브리드 시스템을 적용하고자 하는 선행연구가 진행되었다.¹⁻⁴⁾

특히 굴삭기의 경우 건설기계에서 차지하는 분야가 크며, 기술개발을 통해 국가적 차원의 에너지 저감 효과 또한 크다고 할 수 있다. 이에 굴삭기의 에너지 흐름과 구동 방식 등을 분석하여 굴삭기의 종류별, 파트 별 하이브리드화 하는 작업이 필수적이다.

하이브리드 굴삭기의 경우 기존 굴삭기에 비해 추가적인 전기장치로 인하여 시스템의 에너지 흐름과 공급원이 조금 달라진 것이 특징이라고 할 수 있다. 하이브리드 굴삭기는 크게 엔진 컨트롤 유닛, 차량컨트롤 유닛, 하이브리드 시스템 컨트롤 유닛, 디젤 엔진, 파워 어시스트 모터/제네레이터, 인버터/컨버터, 배터리/울트라 캐패시터, 그리고 다양한 유압 시스템으로 구성되어 있다.

하이브리드 시스템을 적용하게 되면, 크게 연비와 작업 성능 부분을 개선할 수 있다. 엔진의 경우 기존의 굴삭기보다 엔진이 효율적인 운전영역에서 작동하게 할 수 있을 뿐 아니라, 고부하 영역에서도 모터의 파워 보조로 인하여 엔진의 다운사이징을 가능하게 할 수 있다. 또한, 효율이 낮은 유압액츄에이터를 전기 모터 및 전자 시스템으로 바꿈에 따라,

봄 에너지 및 선회 운동 시 발생하는 에너지를 회생하여, 굴삭 및 동력에너지로 활용할 수 있다. 이렇게 회생된 에너지와 보조전동기의 추가동력을 활용하면 작업 성능 또한 향상시킬 수 있다는 장점을 가진다.

따라서 많은 건설기계 제조사들은 이런 하이브리드 시스템을 도입하여, 건설기계에 적용, 엄격한 배기규제를 극복하려 하고 있다.⁵⁾ 그 예로, Kobelco에서는 전기유압시스템이 들어간 직렬형 하이브리드 굴삭기를 개발하였다.⁶⁻⁹⁾ 이 시스템은 제네레이터를 통하여 모든 엔진의 파워를 전기 에너지로 변환하는 시스템을 갖추고 있다. 3개의 전기 모터와 유압 펌프가 조합을 이루고 있으며, 유압 모터와 실린더를 구동하기 위해, 전기 에너지를 유압 구동 파워로 변환하여 이용한다. Komatsu는 보다 구조가 간단한 하이브리드 시스템을 적용하여, 개발 및 양산화 하였는데, 단순히 선회 운동에 적용되는 유압 모터를 전동기로 교체하여 사용하였다.¹⁰⁻¹²⁾ 엔진의 동력을 활용하기 위한 울트라 캐패시터 팩과 제네레이터 또한 추가되었는데, 이를 통하여 선회 전동기의 동력과 추가적인 전기 파워 보조를 구현할 수 있다.

이렇게 여러 제조사에서 다양한 하이브리드 굴삭기 시스템이 개발됨에 따라, 많은 선행 연구자들은 이를 제어하고자 하는 알고리즘 개발, 최적화에 많은 연구를 진행하였다. 일부 연구자는 컴파운드 타입의 하이브리드 굴삭기 시스템에 대한 시스템 구성과 제어 전략에 관한 연구를 진행하였다.⁵⁾ 또한 다른 연구자는 슈퍼바이저 컨트롤 알고리즘을 제안한 바 있다. 이 알고리즘은 크게 두 가지 파트로 나뉘지는데, 제어를 통한 최적 파워 분배와 엔진 속도 제어기에 관한 알고리즘으로 나뉜다. 이러한 알고리즘 적용을 통해 서모스렛 컨트롤러 대비 약 2% ~ 3%의 연비 개선 효과가 있음을 제안하였다. Lin 등¹¹⁾은 하이브리드 굴삭기의 시스템에 dynamic-workpoint 제어 전략을 소개하였다.

기존의 여러 연구에서 알 수 있듯이, 이전의 많은 연구자들은 하이브리드 굴삭기의 최적 제어 알고리즘 개발 및 시스템 디자인 최적화 전략에 관한 연구를 진행하였다. 이러한 경향은 승용차에 비해 유압 시스템 등의 많은 components 등이 존재하여 시스템

최적화가 가장 연비를 향상시킬 수 있는 부분으로 고려하고 있기 때문이다. 하지만, 이에 반해 가장 중요한 에너지 요소라고 볼 수 있는 엔진에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 굴삭기의 경우 기존의 연비 규제 등이 미비하였을 뿐 아니라, 건설기계용 장비라는 특수성 때문에 연소 및 엔진의 효율에 대하여 크게 고려하지 않았다. 굴삭기의 경우 굴삭작업이 가장 중요하기에 엔진 자체의 좋은 효율보다는 굴삭에 필요한 힘과 성능을 항상 유지할 수 있도록 엔진을 설계해왔다. 그러나 앞서 언급했던 것처럼, 엄격한 규제, 유가상승, 제품 경쟁력 등 고효율 건설기계 장비에 대한 고객의 요구 증가와 사업 환경의 변화를 고려할 때 엔진 효율 개선은 불가피한 항목이라고 할 수 있다. 뿐만 아니라 하이브리드 시스템이 최적화되기 위해서는 주 동력원으로 제공되는 엔진의 효율 향상 없이는 최고의 결과를 뽑아 낼 수 없다고 할 수 있다. 따라서 기존에 미흡했던 굴삭기 엔진의 효율 향상이라는 목적과 함께 하이브리드 굴삭기 시스템의 특성을 고려하여, 이에 부합하는 연구를 진행하는 것이 중요하다고 볼 수 있다.

하이브리드 시스템에 적합한 엔진에 관한 연구를 진행하기 위해서는 우선적으로 엔진의 작동점에 관한 분석이 이루어져야 한다. 굴삭기 엔진의 경우 작동차와는 다르게 droop curve라는 선을 따라 엔진이 작동하게 되며, 하이브리드 시스템을 적용하게 되면, 보다 낮은 엔진속도에서 높은 토크를 유지하면서 작동할 수 있다. 또한 엔진의 작동영역 역시 기존의 승용차와는 상당히 다른데, 승용차가 다양한 엔진 작동영역을 가지는데 반해, 굴삭기의 경우 정격 출력 영역과 high idle 조건에서의 운전이 약 70% 이상을 차지한다. 이는 굴삭기라는 기계의 특성상 주로 작동하는 일이 굴삭 업무에 집중되어 있기 때문이다. 따라서 엔진의 주 운전 영역에서의 엔진효율을 개선한다면, 상당한 연비 향상 효과를 가져올 수 있다.

다음으로 효율을 개선하기 위한 전략을 수립하여야 한다. 이에 많은 승용차 업체들이 엔진 자체의 효율을 향상시키기 위하여 연구를 진행하고 있다. 저마찰 엔진 개발, 배기열 회수 시스템, 가변식 전동펌프, 과급기 효율 개선 및 슈퍼차저 개발, 다운사이징

전략 뿐만 아니라, 최근에는 하이브리드에 적합한 하이브리드용 엔진을 개발하는 등 하이브리드 시스템을 고려한 엔진 효율 향상 개발이 활발한 실정이다.

이러한 기술 동향을 고려하여 선진 건설기계 회사들은 최신 연소기술 개발, 후처리 시스템, 엔진 효율 개선 기술 등을 적용하고 있는 추세다. 대표적인 기술이 저연소 기술 개발, EGR 전략, 터보차저의 기술 향상을 꼽을 수 있다. 이는 연비 개선과 배기저감을 동시에 확보하고자 하는 회사들의 목표를 보여 준다.

본 논문에서는 이러한 경향을 고려, 시스템 개발 및 최적화에 앞서 엔진 자체의 성능 및 효율, 즉 bsfc를 개선하는 연구를 진행하였다. 하이브리드 굴삭기용 엔진의 성능 분석과 효율 개선을 위하여 1-D 엔진 시뮬레이션 모델을 개발하였으며, 개발된 모델을 활용하여, 특정 영역인 high idle 영역과 정격 출력 영역의 연소 특성 및 bsfc를 분석하였다. 개발된 1-D 시뮬레이션에 엔진의 성능과 배기 저감을 위하여, EGR 모델과 VGT 모델을 추가로 적용하였으며, 이에 대한 성능을 평가하였다. 다음으로 최적화 기법을 통해 ECU 파라미터를 선정하고, 최종적으로 주 작동영역에서 엔진의 bsfc를 향상시키고자 성능을 동등수준으로 유지시키면서 연료를 저감시켜 bsfc를 개선하는 방법을 통해 bsfc 향상도를 평가하였으며, 엔진 모델을 제외한 하이브리드 굴삭기의 유압 및 시스템 제어 등 타 모델과의 연계성 및 영향은 고려하지 않았다.

2. 하이브리드 굴삭기의 작동영역 선정

건설기계 중 특히 굴삭기의 경우, 몇몇의 주요 운전 영역이 있으며, 일반적인 작업 주기는 20초 정도이다. 또한 굴삭기의 특성상 출력과 성능이 급격하고 주기적으로 변한다. Fig. 1을 통하여 일반적인 굴삭기의 엔진 작동영역을 확인할 수 있다. 그림에서도 알 수 있듯이, 자동차에 탑재된 엔진의 다양한 운전영역과는 확연히 다른 특성을 보여준다.

굴삭기의 작동 주기는 Fig. 2를 통하여 나타내었다. 이를 통하여 굴삭기 엔진의 주 작동영역이 정격 출력 구간과 high idle 구간임을 알 수 있다.

하이브리드 굴삭기의 경우 기존의 유압시스템 기

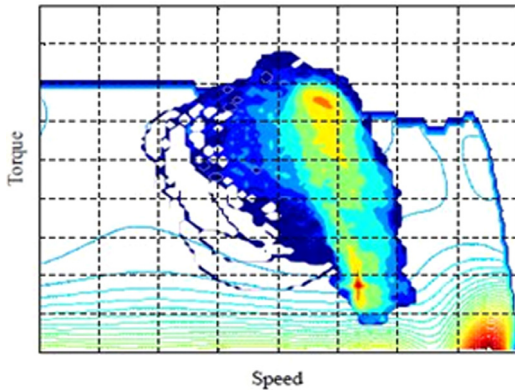


Fig. 1 Operating points and area of the excavator engine

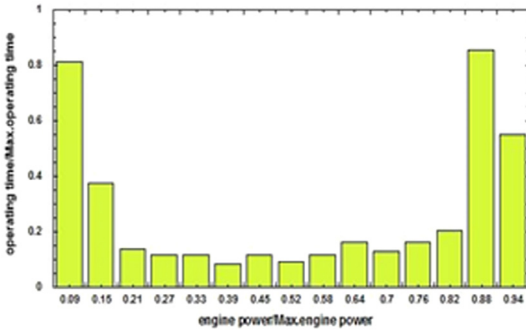


Fig. 2 Engine operating portion in working conditions

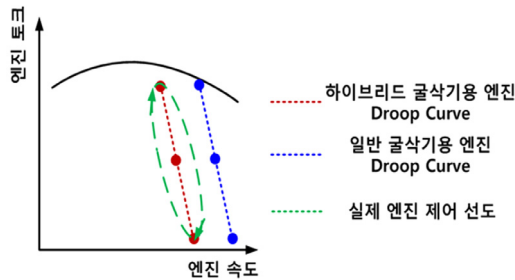


Fig. 3 Excavator engine characteristics with droop curve

반 굴삭기보다 효율이 좋은 영역에서 작동이 되며, 모터의 동력보조로 인하여 보다 낮은 엔진속도와 높은 토크 영역으로 전환하는 것이 가능하다. 이에 따라 하이브리드 굴삭기의 경우 정격출력 영역과 high idle 영역의 rpm 영역대가 Fig. 3과 같이 변화하는 것을 알 수 있다.

따라서 이러한 하이브리드 굴삭기의 특성과 엔진 주 작동영역 분석을 통하여, 크게 두개의 작동영역을 선정하였으며, 이는 high idle과 정격출력 영역이다.

선정된 영역은 시뮬레이션 모델의 검증 영역으로 활용되었으며, bsfc 개선도 또한 이 영역에서 평가하였다.

3. 하이브리드 굴삭기용 1-D 엔진 모델 개발

하이브리드 굴삭기용 엔진 모델을 개발하기 위하여 상용 프로그램인 AMESim을 이용하여 엔진 모델을 개발하였다. AMESim은 열관리 시스템, 유압 시스템 개발에 많이 활용되고 있으며, MATLAB/Simulink와도 동시에 시뮬레이션이 가능하다.

1-D 시뮬레이션 엔진 모델을 개발하기 위하여, 다양한 submodel이 활용되었으며, 크게 인젝터 모델, 밸브 액추에이션 모델, 터보차저, 연소 모델 등이 있다. 본 논문에서 구성된 모델은 Fig. 4와 같으며, 엔진 사양은 Table 1과 같다.

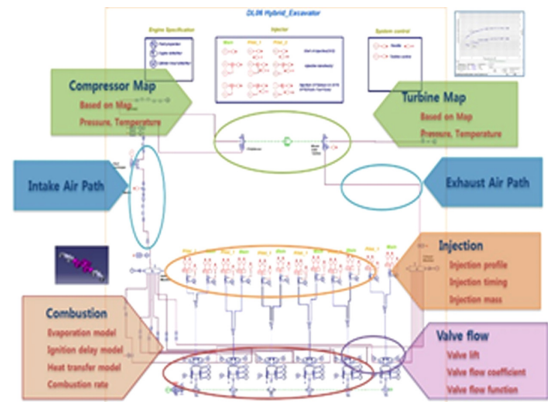


Fig. 4 Hybrid excavator 1-D engine simulation model

Table 1 Engine specifications

Type	L6 DI Diesel engine
Volume (cc)	5,890
Bore (mm) × Stroke (mm)	100 × 125
Compression ratio	17.4
EGR loop	No
Intake type	Turbocharger (WGT)

3.1 과급기 모델

디젤엔진에서의 과급기는 엔진의 성능과 효율에 상당히 중요한 역할을 한다. 충전효율을 상승시키고, 엔진의 다운사이징을 가능하게 할 수 있다. 이에 많은 제조사에서는 과급기를 적용하고, 과급기 자

체의 효율과 성능 개선에 많은 연구를 진행하고 있다. 과급기의 종류 또한 여러 가지가 있으며, 그 종류에 따라 성능이 다르다. 굴삭기의 경우 엔진의 작동영역이 승용차에 비해 단순하기 때문에 보다 단순한 유형의 과급기를 선호해 왔다. 하지만 최근 들어 배기규제가 강화됨에 따라, 성능 개선을 위해 과급기의 적합성에 대한 연구가 진행되었고, 이에 따라 WGT(Waste Gate Turbocharger)와 VGT(Variable Geometry Turbocharger)가 굴삭기에 적용되고 있다. 뿐만 아니라 과급기 자체의 성능과 효율을 올리고자 하는 설계 차원의 연구 또한 활발하다.

본 논문에서는 제조사로부터 데이터를 제공 받아 과급기 모델을 적용하였다. 먼저 기존의 모델에 적용되었던 WGT 모델을 개발하여, 엔진 모델에 적용한 후 기초 성능을 평가하였다. 다음으로 신형 엔진에 적용되고 있는 VGT 모델을 제조사로부터 취득, 적용하여 주 운전영역에서 엔진 효율을 향상시키는 데 활용하였다.

3.2 인젝터 모델

디젤 엔진의 경우 커먼레일의 고압 시스템과 더불어 직접 분사 방식을 사용하기 때문에 이에 적합한 모델링이 필요하다. 인젝터 모델은 연료의 유량을 실린더 헤드의 상부로 전달하고, 이렇게 분사된 연료는 연소모델을 통하여 실린더 내부 유동 및 거동을 분석하게 한다.

정확한 연료 분사를 모사하기 위해 몇몇 가정과 다양한 submodels을 활용하여 구성하였다. 연료 분사량은 분사압력, 분사시간 등의 함수로 나타낼 수 있으며, 이를 기반으로 인젝터 프로파일을 구성한다. 하지만, 데이터 취득의 한계로 인하여 본 논문에서는 Trapezoidal injection method를 이용하여 인젝터의 분사 프로파일을 구현하였다. 이 모델에서는 입력 값으로 분사 시간과 SFR(Static Flow Rate)을 사용하였으며, 다음과 같은 수식을 기반으로 프로파일과 실제 분사량을 구현할 수 있다.

$$Inj_{mass} = SFR \left(Inj_{duration} - \frac{1}{2} D_{no} + \frac{1}{2} D_{nc} \right) \quad (1)$$

$$SFR = \frac{2 \cdot Inj_{mass}}{2 \cdot Inj_{duration} - D_{no} + D_{nc}} \quad (2)$$

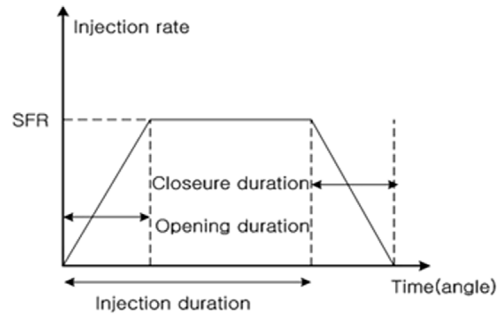


Fig. 5 Trapezoidal Injection method

D_{no} 는 니들이 열리는 데 걸리는 시간이며, D_{nc} 는 니들이 닫히는 동안의 시간을 말한다.

각 작동점에서의 분사량을 기준으로 SFR을 구하였으며, 실제 적용된 인젝터 사양을 기반으로 적합한 인젝터 프로파일을 구현하였다.

본 논문에서는 두 개의 파일럿 분사와 한 개의 메인 분사가 가능하도록 모델링 하였으며, 인젝터 사양은 제조사로부터 취득하여 적용하였다.

3.3 밸브 액추에이션 모델

흡/배기 밸브의 움직임을 모사하는 밸브 모델은 실린더 내부로 유입되는 흡기 공기 유량을 조절할 뿐만 아니라 배기가스의 유량을 조절함으로써 잔류 가스의 양을 조절하는 역할도 동시에 함에 따라 정확한 연소를 모사하는데 중요한 부분이라 할 수 있다. 흡기밸브가 열린 시점부터 닫히는 시점까지 실린더 내부로 공기가 유입되게 되고, 이 구간동안에 밸브리프트와 유효면적 계산을 통하여 공기량이 결정되게 된다. 밸브를 지나는 공기 유량을 선정하기 위하여, 밸브 유효면적을 이용한 수식을 사용하여 계산하였다.¹³⁾

$$\dot{m} = A_{eff} \cdot \rho_{is} \cdot U_{is} = C_D \cdot A_R \cdot \rho_{is} \cdot U_{is} \quad (3)$$

$$U_{is} = \sqrt{RT_o} \left\{ \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[1 - P_r \frac{\gamma-1}{\gamma} \right] \right\}^{0.5} \quad (4)$$

$$A_R = \pi \cdot d_{ref} \cdot Valvelift \quad (5)$$

3.3 연소 모델

연소 모델은 유입된 연료로부터 열 발생량을 계

산한 후 에너지 보존법칙을 통해 연소실 내의 압력과 온도를 구하는 과정을 수행한다. 본 논문에서는 현상학적 모델인 Barba 모델을 활용하여 연소실 내의 온도와 압력 등을 계산하였다. 현상학적 모델은 크게 증발모델, 점화지연 모델, 열전달 모델, 연소율 모델 등이 있다. 다만분사의 특성을 반영할 수 있으며, 예혼합 과정과 확산화염의 특징이 반영되었다. 점화지연의 경우 Arrhenius ignition delay 모델을 활용하였으며, 증발 모델의 경우 간단히 d^2 -law를 따르며, 연소율의 경우 예혼합 부분과 확산화염이 생성되는 부분으로 나누어서 계산한다.

3.4 열전달 모델

열전달 모델은 실린더 내부에서 발생한 열과 벽면과의 온도차이로 발생하는 열전달 양을 계산하는 모델이다. 외부와의 열전달은 크게 세 부분으로 나누어지며, 실린더 헤드, 라이너, 피스톤이 이에 해당한다. 연소실 내부의 화염전파와 유동으로 인하여 reynolds 수가 바뀌게 되고, 이로 인하여 열전달 계수에 영향을 준다. 본 논문에서는 복사와 대류 열전달을 모두 고려하는 Annand 열전달 모델을 적용하였으며, 경계 온도는 제조사로부터 값을 받아 기입하였다.

4. 시뮬레이션 모델 검증

위에서 제시한 다양한 submodel을 기반으로 하이브리드 굴삭기용 1-D 엔진 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 모델의 신뢰성을 확보하기 위하여, 앞에서 언급한 두 운전조건에서 검증을 시행하였다. 그래프 및 테이블에서 언급할 ref는 검증의 기준이 될 시험데이터를 의미하며, Table 1에 언급한 엔진의 데이터로, 제조사로부터 제공받아 활용하였다.

위의 결과에서 알 수 있듯이, 다양한 성능지수가 주 운전영역에 대하여, 실험 결과와 유사함을 알 수 있다. 일부 값들의 오차로 인하여 정확한 실린더 내 압을 모사할 수는 없으나, 다양한 연소특성을 반영하는 계수(점화지연, 난류강도 등)를 조절하여 실제 압력곡선과 유사하게 모사하였다. 이를 통하여 엔진의 성능을 평가할 수 있는 기초 모델을 개발하였으며, 이를 활용한 성능 향상도 평가는 다음 장에서 확인 할 수 있다.

Table 2 Simulation results at rated power condition

	Intake pressure	Intake temp	Intake mass flow	IMEP
Ref.	1.00	1.00	1.00	1.00
Sim.	1.02	0.99	1.03	1.04
Error(%)	2.14	0.12	3.04	4.45

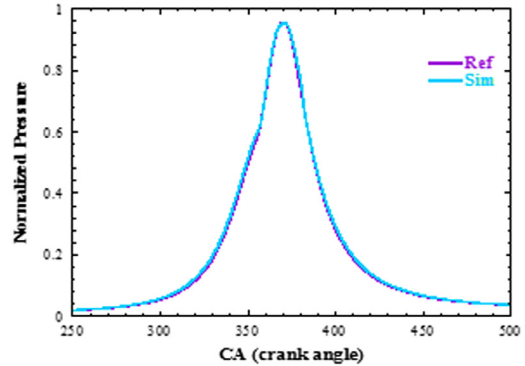


Fig. 6 Simulation result of In-cylinder pressure at rated output condition

Table 3 Simulation results at high idle condition

	Intake pressure	Intake temp	Intake mass flow	IMEP
Ref.	1.00	1.00	1.00	1.00
Sim.	1.02	1.00	0.98	0.98
Error(%)	2.42	0.03	2.50	1.83

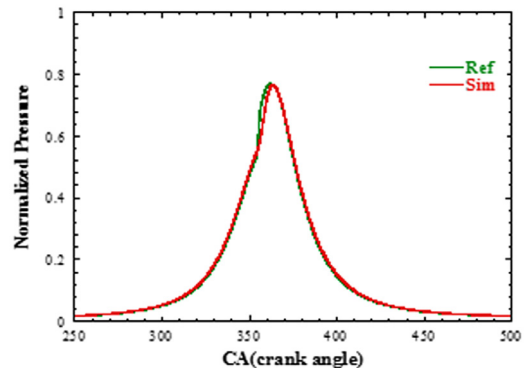


Fig. 7 Simulation result of In-cylinder pressure at high idle condition

5. 개선 시스템 적용 및 최적화 기법을 통한 bsfc 향상도 분석

하이브리드 굴삭기 엔진의 효율을 극대화하기 위해서는 다양한 전략이 필요하다. 시스템 차원에서

는 다양한 구성 요소들의 변경 및 설계 변경이 있을 수 있다. 또한 기존 굴삭기에 비해 엔진 작동점이 변경되었기 때문에 이에 적합한 ECU 인자를 선정하는 것도 중요하다. 따라서 본 논문에서는 기존의 Tier 3에 적용되었던 WGT 대신 신형 VGT를 적용하고, 강화되는 배기 규제를 위하여 EGR을 추가 모델링 하였다. 다음으로 추가된 시스템과 이에 적합한 ECU 인자를 도출하기 위하여, Parmatetric analysis를 진행하고, 최적화 기법을 활용하여 최종 인자를 선정하였다. 최적화 기법에는 많은 방법이 있는데, 이 중에서 유전알고리즘¹⁴⁾과 NLPQL(Non-linear Programming by Quadratic Lagrangian algorithm)을 고려하였다. 다음으로 계산시간 및 수렴도를 반영하여 최종적으로 NLPQL을 활용하여 최적 인자를 도출하였다.

5.1 EGR & VGT 모델

5.1.1 EGR 모델 적용

EGR은 질소산화물을 줄일 수 있는 시스템으로 엄격해진 배기 규제에 대응하기 위한 중요한 요소 중의 하나이다. EGR 모델은 배기부터 흡기까지의 유로를 구성하기 위한 파이프모델, 열교환기 모델로 구성되며, 재순환 되는 배기가스의 조건에 따라 High Pressure(HP)-EGR과 Low Pressure(LP)-EGR로 구분된다. 본 논문에서는 제조사의 도움을 받아 EGR 시스템을 구축하기 위한 열교환기 사양, 유로 정보등을 취득하여 모델링 하였으며, HP-EGR 시스템을 적용하였다.

5.1.2 VGT 모델 적용

기존에 적용된 WGT 대신 다양한 운전영역에서 과급 효과를 개선하기 위하여 VGT를 적용하였다. 이 역시 제조사의 도움을 받아 터빈과 컴프레서의 작동을 위한 맵을 취득하였으며, EGR 시스템을 고려하여, VGT 대상을 선정하였다. 이를 통해 기존 모델에 EGR과 더불어 VGT 모델을 변경 및 추가하여 최적화에 활용하였다.

5.2 NLPQL을 이용한 bsfc 개선도 평가

시뮬레이션 모델 검증을 통해 개발된 하이브리드 굴삭기용 1-D 엔진 모델에 성능과 배기개선을 위해

EGR과 VGT 시스템을 도입하였다. 뿐만 아니라 기존 굴삭기 대비 운전영역이 변경되었기 때문에 이에 적합한 인자의 도출이 필요하다.

본 논문에서는 최적 인자를 선정하기 위하여 NLPQL 기법을 사용하였는데, 이는 비선형화된 문제를 풀기에 적합하며, 시간이 적게 걸리면서도 정확도 있는 결과를 도출하기 때문이다. 하이브리드 굴삭기 엔진모델의 최적화를 위하여 목적함수로 bsfc를 선정하였다.

$$bsfc = f(Inj_{timing}, Inj_{mass}, EGR, VGT, \dots) \quad (6)$$

목적함수를 기반으로 다양한 인자들의 경계조건을 선정한 후, 최적화를 진행하여 결과를 도출하였다. EGR의 경우 각 운전조건을 고려하여 경계조건을 변경하여 최적화를 수행하였다. 이를 통해 도출된 시뮬레이션 결과는 다음과 같으며, ref는 Table 1에 언급한 기초모델(EGR/VGT 미적용 모델)의 데이터이다.

bsfc 개선의 기준을 선정하기 위하여, 개선된 성능에 대하여 연료량을 저감하면서 IMEP를 기존의 모델과 동일하게 설정하였다. VGT의 개선과 다양한 인자들로 인하여 성능은 향상되었지만, 동등 수준의 성능을 유지하면서 bsfc를 최소화 할 수 있도록 시뮬레이션 하였다. 이로 인하여 bsfc 저감을 도출하였는데, 가장 큰 영향인자로는 VGT시스템의 개선을 들 수 있다. 기존의 WGT에 비하여 터빈의 효율이 크게 개선되었고, 이에 따라 IMEP가 크게 향상되었으며, 최적화를 진행하지 않아도 동등 성능 기준, 약 4% ~ 5% 정도의 bsfc 개선 효과를 도출하였다. 뿐만 아니라 이를 하이브리드 시스템의 적용으로 인한 운전점 변화에 대한 ECU 인자들의 최적화가 이루어져 있지 않아 bsfc의 저감을 추가적으로

Table 4 Optimization results at rated output condition

	IMEP	BMEP	bsfc	Fuel consumption
Ref.	1.00	1.00	1.00	1.00
Sim.	1.00	1.00	0.91	0.91

Table 5 Optimization results at high idle condition

	IMEP	BMEP	bsfc	Fuel consumption
Ref.	1.00	1.00	1.00	1.00
Sim.	1.00	1.00	0.93	0.93

이룰 수 있었다. 인젝터의 기계적 delay를 개선하여 duration을 줄임에 따라 성능에 좋은 영향을 끼쳤다. 추가로 운전조건에 적합하면서 가장 좋은 효율을 고려하여 vane의 개도량을 선정하였고, 분사시기는 약 1CA 정도 변경되었다. 터보차저의 효율을 모두 고려하고, 이에 적합한 파라미터를 도출함에 따라, 흡기 유량이 크게 증가하였고, 최종적으로 bsfc 개선을 도출할 수 있었다. 하지만 특정 두 개의 운전영역에서 시뮬레이션을 수행하였기 때문에 실제 연비 향상도를 평가하기에는 다소 무리가 있으며, 조건에 따라 변경될 수 있는 마찰 손실 및 벽면 열전달 시의 경계 온도 등의 요소들은 반영할 수 없어 정확한 bsfc 개선 도출이라고 하기에는 무리가 있다.

그렇지만 앞에서 말했듯이, 두 개의 작동영역이 굴삭기의 운전영역 중 많은 비중을 차지하기 때문에 충분히 연비 향상 효과를 가져다 줄 것으로 판단되며, 향후 제어를 비롯한 과도 특성을 모사할 수 있는 모델과 연동하여 연비 평가를 수행할 예정이며, 엔진 제어전략, 시스템 제어전략을 수반하여 실제 하이브리드 굴삭기에 탑재하여 평가할 예정이다.

6. 결 론

- 1) 하이브리드 굴삭기의 엔진 성능 평가 및 분석을 위한 하이브리드 굴삭기용 1-D 시뮬레이션 모델을 검증 및 개발하였다.
- 2) 기존의 굴삭기와 하이브리드 시스템 적용 시의 굴삭기의 운전특성을 분석한 후, 모델 검증 및 성능 최적화를 고려한 운전영역을 선정하였다.
- 3) 하이브리드 굴삭기의 성능 개선 및 배기저감을 위하여 시스템에 적합한 배기재순환 시스템과 가변 형상 과급장치를 선정, 이를 개발된 1-D 시뮬레이션 모델에 적용하였다.
- 4) 하이브리드 굴삭기의 연비 향상도를 평가하기 위하여 최적화 방법 중의 하나인 NLPQL을 사용하여 최적 파라미터를 도출한 후 bsfc 개선도를 평가하였다.
- 5) 최적화 결과, 터빈의 효율향상과 분사전략 수정 등으로 인하여 bsfc 및 연료소모량 저감을 도출하였다.
- 6) 향후 이 모델을 활용하면, 시스템 모델링과 연계

하여 전체 에너지 흐름과 연비 평가를 할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 산업원천 기술개발 사업의 일환으로 수행하였으며, 서울대학교 정밀기계 연구소 및 두산인프라코어의 지원으로 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- 1) S. Kim and S. Sul, "Control of Rubber Tyred Gantry Crane with Energy Storage Based on Supercapacitor Bank," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.21, No.5, pp.1420-1427, 2006.
- 2) J. M. Miller, "Hybrid Electric Vehicle Propulsion System Architectures of the E-Cvt Type," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.21, No.3, pp.756-767, 2006.
- 3) D. Wang, S. Pan and X. Lin, "Design of Energy Storage Unit for Hybrid Excavator Power Management," IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008.
- 4) T. Kwon, S. Lee, S. Sul, C. Park, N. Kim, B. Kang and M. Hong, "Power Control Algorithm for Hybrid Excavator with Supercapacitor," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.46, No.4, pp.1447-1455, 2010.
- 5) K. Jin, T. Park and H. Lee, "A Control Method to Suppress the Swing Vibration of a Hybrid Excavator Using Sliding Mode Approach," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Vol.226, No.5, pp.1237-1253, 2012.
- 6) M. Kagoshima, T. Sora and M. Komiyama, "20044743 Development of Hybrid Power Train Control System for Excavator," Transactoins-Society of Automotive Enigneers of Japan, Vol.35, No.4, pp.95-100, 2004.
- 7) A. Tsutsui, T. Nanjyo and T. Yoshimatsu, "Development of the Electro Hydraulic Actuator System on Hybrid Excavator," Paper Presented

- at the Proceedings of the Society of Automotive Engineers of Japan Annual Congress, 2003.
- 8) M. Kagoshima, M. Komiyama, T. Nanjo and A. Tsutsui, "Development of New Hybrid Excavator," Kobelco Technology Review, No.27, pp.39-42, 2007.
 - 9) T. Nanjo, E. Takao, K. Imanishi, O. Kazuhiro and A. Tsutsui, "Simulation and Evaluation Technique for Power System and Related Energy Saving on Hydraulic Excavator," Kobelco Technology Review, No.27, pp.28-34, 2007.
 - 10) S. Yoo, S. An, C. Park and N. Kim, "Design and Control of Hybrid Electric Power System for a Hydraulically Actuated Excavator," SAE 2009-01-2927, 2009.
 - 11) T. Lin, W. Qingfeng, B. Hu and W. Gong, "Development of Hybrid Powered Hydraulic Construction Machinery," Automation in Construction, Vol.19, No.1, pp.11-19, 2010.
 - 12) H. Lee, S. Sul, S. Kwak and S. Kim, "System Configuration and Control Strategy for Compound Type Hybrid Excavator with Ultra Capacitor," International Power Electronics Conference, 2010.
 - 13) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill International Editions, Columbus, 1998.
 - 14) M. Kim, P. Liechty and D. Reitz, "Optimization of Heavy-Duty Diesel Engine Operating Parameters Using Micro-Genetic Algorithms," Transactions of KSAE, Vol.13, No.2, pp.101-107, 2005.