

발전용 대형 디젤 엔진의 천연가스-디젤/부생유(Hi-sene) 혼합연소 시 엔진 성능변화에 미치는 영향

조정근 · 박상준 · 송순호*[†]

연세대학교 기계공학과 대학원, *연세대학교 기계공학과

(2015년 8월 6일 접수, 2015년 12월 21일 수정, 2015년 12월 17일 채택)

A Effects of Natural Gas-Diesel/Hi-sene Dual Fuel Operation on Performance of a Heavy-Duty Diesel engine for Power Generation

Jungkeun Cho, Sangjun Park, Soonho Song*[†]

The Graduate school, Dept. of Mechanical engineering, Yonsei University,

*Dept. of Mechanical engineering, Yonsei University

요 약

본 연구에서는 1.5MW급의 발전용 디젤 엔진을 대상으로 상용 프로그램인 GT-Power를 이용하여 천연가스와 디젤 혼합연소 엔진 모델을 구축하였으며 이를 통해 기존의 디젤 연소를 하는 경우와 천연가스-디젤 혼합연소를 하는 경우의 엔진 성능 변화를 부하율(50%, 75%, 100%)에 따라 비교하였다. 또한 도서지역에서 실제로 사용되고 있는 부생유를 적용하는 경우의 영향에 대한 연구를 진행하였다. 그 결과 엔진의 운전 조건 변화 없이 천연가스를 디젤과 60% 혼합비로 연소하는 경우 최대 32%의 BSFC 증가를 보였으며 천연가스와 부생유를 혼합연소 하는 경우에도 디젤을 혼합 연소하는 경우와 크게 다르지 않은 결과를 보였다. 이러한 BSFC 증가의 원인을 연료의 불완전 연소율 증가로 제시하고 이에 대한 최적화를 진행했으며 그 결과 60% 혼소율 조건에서 약 2%의 개선효과를 보였다.

주요어 : 디젤, 부생유, 혼합 연소, 엔진, 천연가스, 수치해석

Abstract - This study is a numerical study using commercial simulation program GT-Power on 1.5MW diesel engine for power generation. Performance comparison has done for diesel operation with dual fuel operation for different engine load(50%, 75%, 100%) using the target engine model with additional gas injection system. Effect of using Hi-sene, which is actually being used in island area, instead of diesel was also studied. As a result, under 60% natural gas with diesel condition, BSFC was increased by 32% without modifying system. There was almost no change for natural gas/Hi-sene condition compared with natural gas/diesel condition. Decrease of burned fuel fraction was the main reason of these phenomena. After optimizing system, BSFC was improved by 2%

Key words : Diesel, Hi-sene, Dual fuel, Engine, Natural gas, Numerical Analysis

1. 서론

최근 엔진 분야에서 가장 크게 관심을 받고 있는 분

야는 연비와 배출물질의 저감이라고 할 수 있다. 이와 같은 관심으로 다양한 대체연료를 사용하는 엔진에 대한 활발한 연구가 진행되고 있지만 아직까지 기존의 화석연료를 사용하는 엔진을 대체할 수 있는 경제성과 효율을 갖춘 친환경 엔진에 대한 개발은 아직 더 많은 노력과 시간이 필요할 것으로 보인다. 이와 더불어

[†]To whom corresponding should be addressed.

Dept. of Mechanical engineering, Yonsei University
Tel : 02-2123-2811 E-mail : soonhosong@yonsei.ac.kr

멀지 않은 시점에 바닥을 드러낼 것으로 예상되었던 화석연료가 시추기술과 탐사기술의 발전 등 기술의 진보로 인해 상당기간 지속 가능할 것으로 보이면서 환경오염의 주범으로 지속적으로 지적받고 있는 화석연료에 대한 의존도는 쉽게 낮아지지 않을 것으로 보인다.

이에 기존의 화석연료를 사용하는 엔진에 대해 새로운 기술을 도입하여 최대한의 연료 효율을 유지하면서 배출물질을 저감하기 위한 다양한 연구와 개발이 이루어지고 있는 실정이다. 대부분의 이와 같은 연구들은 최근 시행된 EURO6 규제와 같은 강력한 배기 규제가 적용되고 있는 자동차 엔진 분야에서 경쟁적으로 이루어지고 있다. 하지만 이에 비해 발전용 대형 엔진에 대한 연구는 비교적 부족한 실정이다. 발전용 대형 엔진의 경우 자동차 엔진에 비해 그 수는 적지만 용량이 크고 연간 운전시간이 자동차 엔진에 비해서 월등히 높기 때문에 해당 분야에 대한 심도 있는 연구가 필요할 것으로 보인다.

뿐만 아니라 기존의 발전용 엔진에 대해 경제적으로도 개선이 필요하다. 대한민국에서는 2010년도 기준, 총 63개의 도서지역에서 72MW의 발전설비가 운영되고 있으며 이 대부분은 디젤 엔진을 이용한 발전기를 통해 전기 에너지를 생산하고 있다.[1] 이러한 디젤 엔진 발전기를 사용하는 도서지역의 경우 2011년 4월 보일러 등유 제도가 폐지됨에 따라 발전비용의 증가를 피할 수 없게 되었다.

이러한 환경적, 경제적인 문제를 해결하기 위해서 풍력, 태양열 등의 신재생에너지를 이용하는 방법과 연료전지를 통한 발전 등 다양한 대안이 제시되었지만 그 효율과 초기 투자비용 등의 문제로 현실적인 대안이 되지는 못하고 있다. 이에 기존의 디젤 엔진 발전기를 천연가스/디젤 혼소 엔진으로 개조하여 디젤에

비해 저렴한 천연가스를 디젤과 혼합연소 하는 방안이 제시되었다.[2,3] 기존의 연구 결과에 따르면 천연가스를 디젤과 혼합연소 하는 경우 NO_x와 Soot과 같은 주요 배출물질의 배출량을 감소시킬 수 있다.[4] 이에 반해 연료 소모율의 경우에는 디젤만을 연소하는 경우보다 증가하는 경향을 나타낸다.[5-7] 하지만 이러한 연료소모율의 증가보다 천연가스의 낮은 원가로 경제성을 함께 고려했을 때 이득을 취할 수 있다.[8,9]

따라서 본 연구에서는 1-D 상용 엔진 해석 프로그램인 GT-Power를 이용해 1.5MW급 발전용 디젤 엔진과 혼합 연소를 위한 가스 분사장치를 모델링하고 엔진의 부하율에 따라 천연가스/디젤 혼합연소가 엔진 성능에 미치는 영향에 대해 연구했다. 이를 위해 실제 대상 엔진의 실험 데이터를 기반으로 구축한 디젤 엔진 모델의 수치해석 결과와 천연가스를 혼합연소 하는 경우의 결과를 비교 및 분석했다. 또한 최근 도서 지역에서 디젤 대신 사용되고 있는 부생유(Hi-sene)을 수치해석에 실제로 적용하여 천연가스/부생유 혼합연소 시 엔진 성능에 미치는 영향을 천연가스/디젤 혼합연소 시와 비교 및 분석하였다. 이와 더불어 천연가스와의 혼합 연소 시의 연소 특성을 고려하여 엔진 운전 조건을 최적화하여 개선 가능성에 대해 제시하였다.

2. 대상 엔진 및 수치해석 방법

2-1. 대상 엔진

연구에 사용된 대상 엔진은 실제로 화력발전에서 사용되고 있는 1.5MW급 발전용 디젤 엔진이다. 해당 엔진에 대한 주요 제원은 Table 1에 나타나 있다. 엔진의 운전 속도는 720RPM으로 고정되어 있으며 본 연구에서는 50%, 75%, 100%의 부하율에 대해서 엔

Table 1. Target engine specification

Engine Specific Sheet	
Engine Speed	720 RPM
Brake Power	1679 kW @100% Load
Displacement vol. per cylinder	19.6 L
Number of cylinder	8 EA
Bore	280mm
Stroke	320mm
Compression ratio	13.3:1
Firing order	1-2-4-6-8-7-5-3

진 모델을 검증했다. 대상 엔진은 과급기를 사용하는 8기통 직렬 엔진이며 압축비는 13.3:1로 낮은 압축비를 가지고 있다.

2-2. 엔진 모델링 및 검증

앞서 설명한 대상 엔진에 대해 1-D 상용 엔진 해석 프로그램인 GT-Power를 이용해 검증용 디젤 엔진 모델을 구축했다. 대상 엔진 모델은 최대한 실제 엔진의 데이터를 반영하였으며 실린더 내부의 연소 해석에는 경계조건에서 압력과 온도, 공연비 등의 변수를 입력값으로 하여 연소를 main unburned zone, spray unburned zone, spray burned zone의 3개의 열역학적 영역으로 나누어 연소를 해석하는 DIpulse 모델을 적용하였다.

이와 같이 구축된 엔진의 모델은 Fig. 1에 나타나

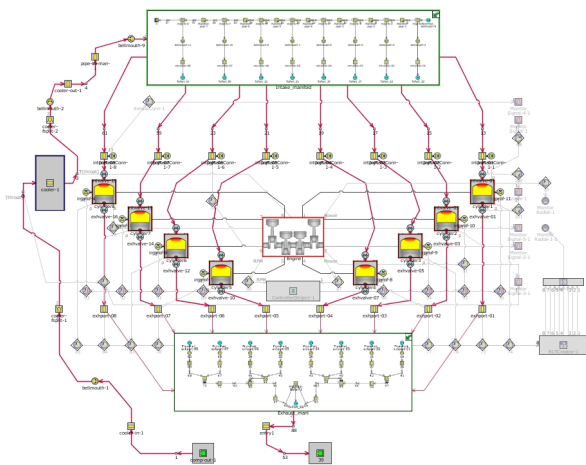


Fig. 1. Engine model for numerical analysis.

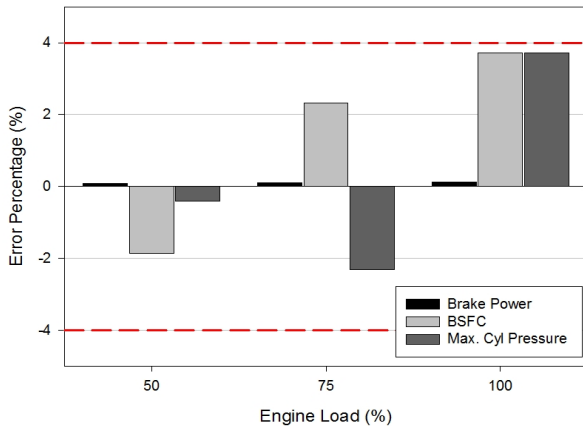


Fig. 2. Model validation on each engine load.

있다. 엔진의 운전 속도와 부하율이 일정한 정상상태에서 해석을 진행하였기 때문에 터보차저에 대한 부분은 생략하고 압축기 후단부터 터빈 전단까지를 전체 시스템으로 구성했다. 또한 천연가스와 혼합연소를 진행하더라도 일정한 출력을 유지해야하는 발전기용 엔진의 특성을 고려하여 연료량 제어기 모듈을 통해 엔진의 출력을 일정하게 유지하도록 모델링했다. 이와 같은 모델을 통해 해석한 결과를 실제 엔진 실험 데이터와 비교한 결과 다음 Fig. 2에 나타나 있는 바와 같이 4% 이내의 오차율을 보였다.

2-3. 천연가스 혼합 연소 시스템

천연가스를 혼합 연소하기 위해 이와 같이 구축한 엔진 모델에 천연가스 분사 시스템을 추가해 천연가스/디젤 혼합연소 엔진을 모델링 하였다. 흡기 포트에 천연가스 인젝터를 추가했으며 인젝터는 디젤 인젝터와 같은 고압 분사 인젝터가 아닌 단위 시간당 유량을 제어하는 개념으로 추가되었다. 천연가스는 순수한 메탄(CH₄) 가스로 가정하였다.

$$Mixing\ Ratio = \frac{m_{NG}}{m_{Diesel} + m_{NG}} \times 100\% \quad (1)$$

연료의 혼합비는 위의 수식(1)과 같이 각 연료의 발열량 차이를 무시하고 질량 비율로 결정했다. 이 때 Mixing Ratio는 혼합 연료에서 천연가스의 질량 비율을 나타내며 *m*은 단위 시간당 연료의 질량(g/s)을 나타낸다. 이와 같은 방식으로 순수한 디젤을 연소하는 0%에서 혼합비 60%까지 부하별로 7개 조건에서 해석을 수행했다. 혼합연소 엔진 모델 내에서 천연가스의 양을 디젤의 양에 대한 종속변수로 설정하고 엔진의 출력을 기존 디젤 연소 시와 동등하게 고정하도록 제어하여 해석을 진행했다.

2-4. 부생유(Hi-sene) 적용과 비교

정부에서 2012년 말 등유형 부생유를 도서지역 발전용 엔진에 사용을 허용하면서 현재 도서지역에서는 디젤 대신 등유형 부생유가 사용되고 있다. 부생유는 석유화학제품을 생산하는 중 부수적으로 발생하는 저급유로 디젤과 비슷한 밀도와 발열량을 가지면서 디젤보다 저렴하다는 장점을 지니고 있다. 디젤과 부생유의 밀도 및 발열량의 차이는 아래의 Table 2에 나타나 있다.

Table 2. Diesel/Hi-sene comparison

	Diesel	Hi-sene
Density (g/L)	830	800
LHV (MJ/kg)	43.25	42.7

부생유는 발열량이 디젤에 비해 다소 작고 밀도가 디젤에 비해 조금 낮은 특성을 지니고 있다. 하지만 디젤에 비해 황 성분을 다량 포함하고 있기 때문에 SOx 배출물이 발생할 수 있다는 단점이 있다. 따라서 이에 대한 정량적인 연구가 필요할 것으로 보인다. 이와 같은 부생유의 열역학적 물성을 고려하여 GT-Power에서 적용할 수 있는 연료 데이터를 작성해 혼합연소 엔진 모델에 반영했다.

3. 수치해석 결과

3-1. 혼합연소에 따른 기초 엔진 성능

본 연구의 최종적인 목표는 각 부하율 조건에서 천연가스-디젤/부생유 혼합연소 시 나타나는 엔진의 성능 변화에 대해 예측하고 엔진 변수의 최적화를 통해 혼합연소의 효율을 극대화하는 방안을 모색하는 것이다. 이를 위해 이전의 연구에서 엔진에 사용되는 총 에너지를 일정하게 유지하여 혼합 비율 40%까지 혼합 연소를 수치해석을 통해 연구를 진행한 바 있다. 그 결과 연료의 혼합 비율이 증가함에 따라 엔진 출력이 감소하는 결과를 보였다.[10] 이와 같은 연구 결과를 바탕으로 본 연구에서는 실제 발전용 엔진의 운전 조건을 최대한 반영하여 엔진의 출력을 일정하게 고정하고 부하에 따른 엔진의 연소 특성의 변화를 확인하고 그 원인을 분석했다. 또한 이에 따른 엔진의 실제 운전 성능을 정량적으로 파악하였다.

본 연구에서는 엔진 부하율 50%, 75%, 100%에서 디젤 100% 운전 조건에서부터 천연가스 60% 조건까지 해석을 진행했다. 연료 분사량 제어를 통해서 엔진의 출력을 각 부하율에서의 출력으로 고정을 시키고 해석을 진행하여 모든 조건에서 엔진의 출력을 나타내는 지표인 Brake Power는 오차율 0.2% 이내로 유지되었다. 이에 따라 엔진의 성능 해석을 위해 단위 출력 당 연료 소모량(Brake Specific Fuel Consumption : BSFC)을 비교했다. 그 결과 모든 부하율 조건에서 천연가스의 혼합 비율이 높아짐에 따라 연료 소모량이 증가하는 경향을 보였다. 특히 부하율이 낮은

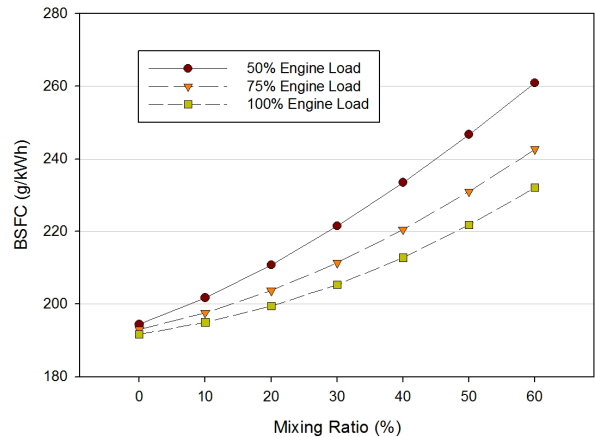


Fig. 3. BSFC change according to mixing ratio

구간에서 연료 소모량 증가가 두드러졌다. 50% 부하율 구간에서는 천연가스 혼합 비율 60% 조건에서는 단위 출력 당 연료 소모량이 32% 증가하여 대상 조건들 중 가장 크게 증가하였다. 이는 엔진의 열효율이 크게 감소하였다는 것을 의미한다. 실제로 이와 같이 단위 출력 당 연료 소모량이 증가한다면 천연가스와 의 혼소에 따른 배출물질 저감이나 경제적인 이득 등과 같은 혼합 연소의 장점을 전혀 취할 수 없게 된다. 따라서 천연가스-디젤 혼합 연소에 따른 실린더 내 연소 특성의 변화를 파악하고 이에 따른 개선 방안을 찾는 것이 필요하다.

3-2. 혼합연소에 따른 실린더 내 연소 특성 변화

앞서 설명한 바와 같이 기존의 디젤 연소 운전 조건 하에서 천연가스와 디젤을 혼합 연소하는 경우 엔진의 열효율은 급격하게 감소하게 된다. 이러한 열효율의 감소의 원인 분석을 위해 본 연구에서는 엔진 크랭크 각도에 따른 실린더 내부 압력의 변화와 연소 연료 분율 등의 파악을 통해 엔진 열효율 감소의 원인에 대한 분석을 진행했다.

Fig. 4는 각 부하율과 연료 혼합 비율에서 실린더 내부에 주입된 연료가 연소 된 정도에 대해 파악한 내용이다. 모든 엔진 부하율 조건에 대해 디젤만을 연소하는 경우에는 분사된 연료의 전량이 연소되고 있는

것을 확인 할 수 있다. 이에 반해 천연가스를 혼합하는 경우 점차적으로 연소되지 못하는 연료의 양이 늘

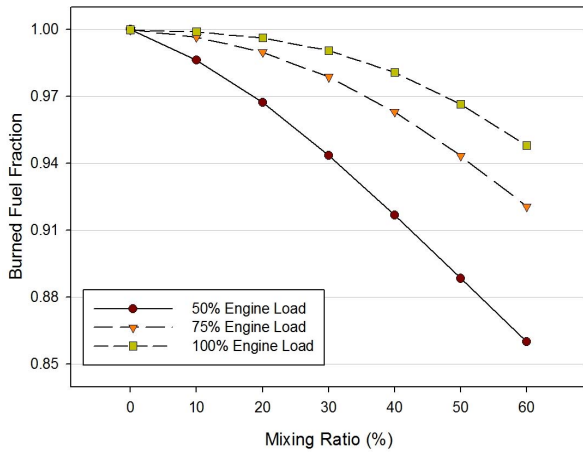


Fig. 4. Burned fuel fraction variation according to mixing ratio

어나고 있는 것을 확인할 수 있다. 모든 부하율 조건에서 천연가스의 혼합 비율이 높아짐에 따라 미연소 연료분이 증가하는 것을 확인 할 수 있는데 특히 저부하 구간에서 그 정도가 크게 나타났다. 이와 같은 현상은 디젤 연소와 혼합 연소의 연소 과정 차이에서 그 원인을 찾을 수 있다. 디젤 연소의 경우 분사된 디젤이 압축되어있는 실린더 내부에 분사되어 연료 자체가 착화되어 연소가 진행된다. 이에 반해 천연가스-디젤 혼합 연소는 디젤의 자발화와 이로 인한 천연가스 인화와 후에 따르는 화염의 전파의 단계를 거치게 된다.[11] 이로 인해 완전 연소에 필요로 하는 시간이 길어지게 되고 연소되지 않는 연료가 남게 된다. 이와 같은 현상은 실린더 내의 압력 변화를 통해서도 확인할 수 있다. Fig. 5의 압력 선도를 보면 천연가스 혼합 비율이 증가함에 따라 연소 시에 압력이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 연소가 활발해지는 시점이

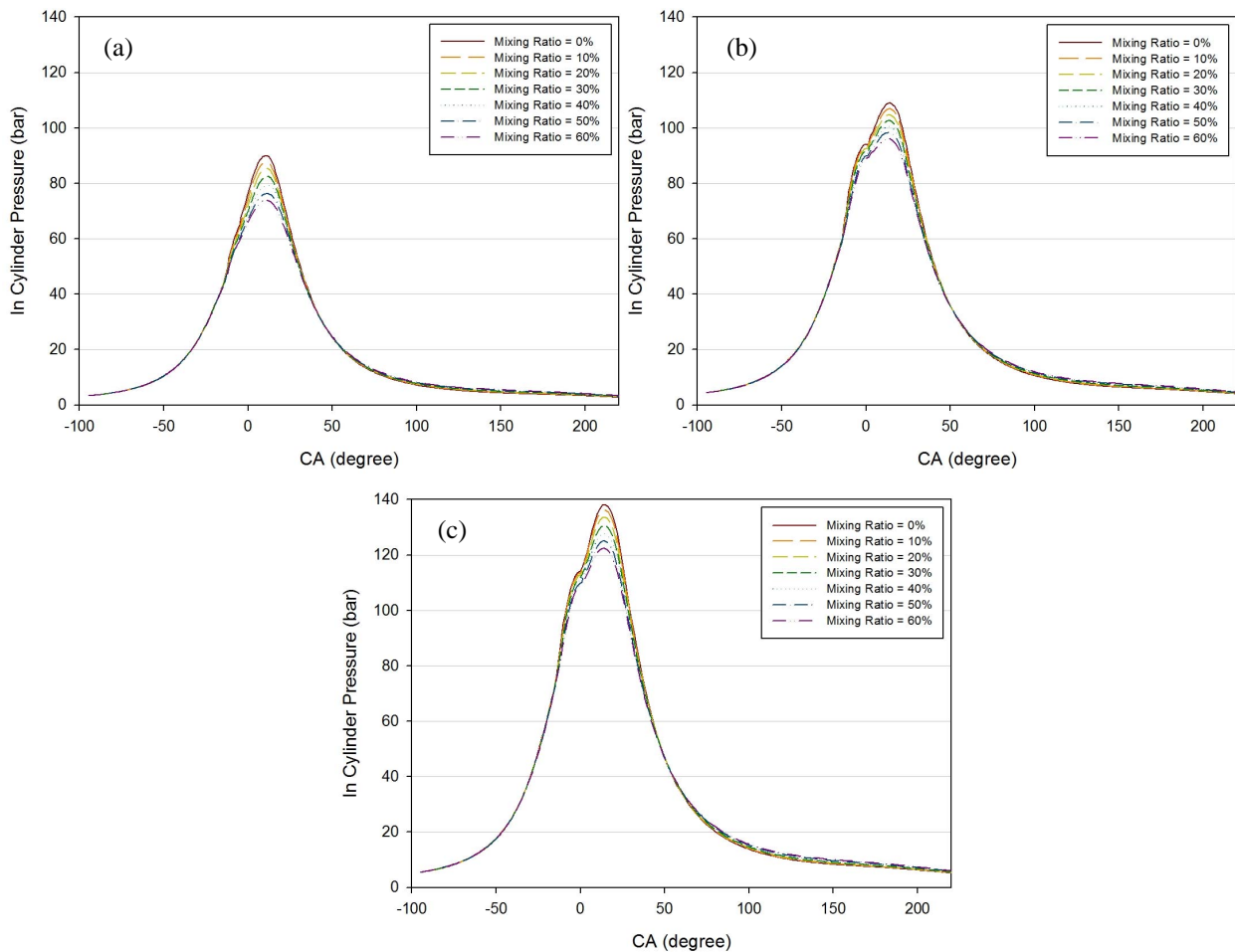


Fig. 5. Cylinder pressure profile variation according to mixing ratio (a)50%Load, (b)75%Load, (c)100%Load

기존 디젤 엔진에 비해 지각되면서 나타나는 영향으로 볼 수 있다.

Fig. 6에 나타나 있는 연료가 50% 연소되는 시점을 비교해보면 그 시점이 천연가스 혼합비율이 증가함에 따라 지각되고 있는 것을 확인 할 수 있다.

이러한 연소 특성의 변화로 인해 천연가스의 혼합비율이 높아질수록 연소가 지연되어 미연소 연료의 비율이 높아지게 되며 이는 자연스럽게 엔진 열효율의 감소로 이어지게 된다. 혼합연소 엔진에서 디젤의 연소는 스파크 점화 엔진에서의 스파크와 같은 역할을 하게 된다. 따라서 기존의 디젤 연소와 같은 분사 시기에서는 지나치게 점화시기가 늦춰지는 효과가 나타나게 된다. 따라서 천연가스-디젤 혼합연소에서는 디젤의 연료 분사시기를 조절할 필요가 있다.

또한 천연가스를 연소시키는 경우의 최적 공연비와 디젤을 연소하는데 필요한 최적의 공연비는 다른 값을 가진다.[12] 이에 따라 디젤 운전에서 최적화되는 공기의 양과 천연가스 연소에 최적화되는 공기의 양이 달라진다. 또한 흡기 포트에 천연가스를 분사하는 혼합연소 엔진의 특성으로 인해 체적효율이 감소하여 실린더로 유입되는 절대적인 공기량이 감소하게 되고 천연가스와 공기가 함께 압축됨에 따라 비열이 증가하게 된다.[3,13] 이로 인해 디젤 연소가 기존 디젤 엔진과 전혀 다른 실린더 내부 환경에서 일어나게 된다.

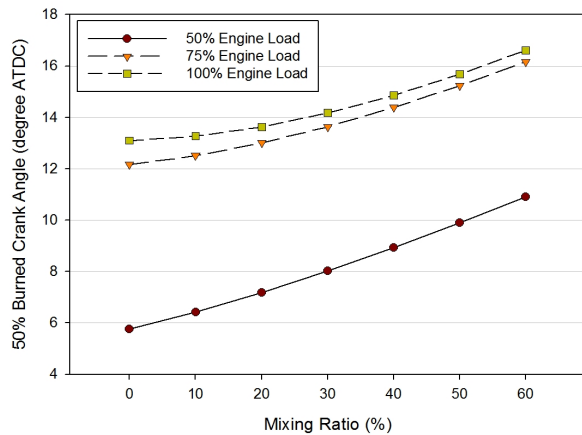


Fig. 6. 50% Burned fuel crank angle according to mixing ratio

따라서 본 연구에서는 연료분사의 최적화와 함께 천연가스-디젤 혼합연소에 적합한 과급압력을 제시하고자 한다.

4. 엔진 변수 최적화

4-1. 최적화 대상 변수 선정 및 변수 최적화

앞서 설명한 바와 같이 엔진의 운전 조건을 천연가스-디젤 혼합연소에 적합하도록 수정하기 위해 디젤 연료 분사 시기(Start of Injection : SOI)와 공기 과급압력(Charged Air Pressure)을 최적화 대상이 되는 주요 변수를 선정했다. 이를 위해 GT-Power에서 제공하는 DOE(Design Of Experiment)기법을 활용해 각 변수가 엔진의 효율에 미치는 영향에 대해 파악하고 이러한 변수들에 대한 부하별 최적화를 진행했다. 또한 이러한 최적화를 통해 얻어지는 엔진 효율의 증가를 부하율 별로 정량적으로 평가했다.

본 연구에서는 실험계획법에 사용되는 다양한 샘플링 방법 중 Full Factorial 방식을 사용하여 변수를 샘플링 했다. Full Factorial 방식은 선정된 변수에 대해서 정해진 범위의 값을 일정한 간격으로 나누어 조건을 도출하는 샘플링 방식이다. 이를 통해 다른 샘플링 방식에 비해 정교하게 반응표면을 도출하는 것이 가능하다는 장점이 있다. 이러한 샘플링 방식을 통해

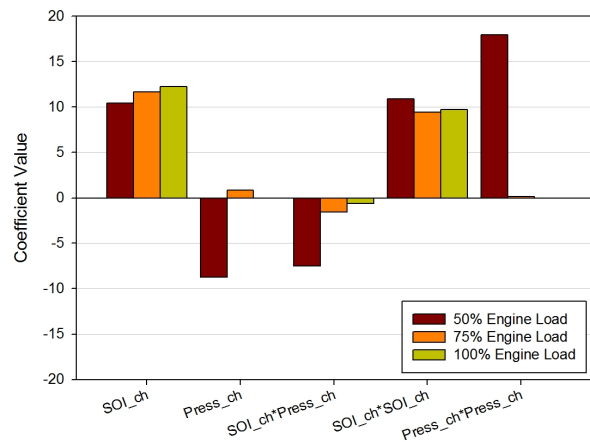


Fig. 7. Coefficient values for each parameter

Table 3. DOE setting with Full factorial method

	Min	Max	Level
SOI change (degree)	-15	+15	16
Charged Air Pressure change (bar)	-0.6	+0.6	13

Table 3에 나타나 있는 바와 같이 해석 조건을 설정했다. 각 엔진 부하율 조건에서 혼소율은 60%인 경우로 고정하였다. 이 때 기존 디젤엔진 운전 시의 연료 분사 시기와 과급 압력을 기준 값인 0으로 설정하고 이 값과의 차이를 변수로 설정하였다.

이와 같은 조건들에 대한 해석을 통해 각각의 변수가 엔진의 성능에 미치는 영향에 대해 분석하였으며 이를 통한 최적 운전 점을 선정했다. 각 엔진 부하율에 따른 각 변수가 엔진 성능에 미치는 영향에 대한

계수는 Fig.7에 나타나 있다.

이와 같은 연료 분사시기와 과급압의 변화에 따른 엔진 성능의 변화는 위의 Fig. 8에서 좀 더 자세히 확인할 수 있다. 각 부하율에서 전체적인 경향성은 연료 분사시기를 기준에 비해 약 10°가량 진각 시키고 과급압을 조금 낮췄을 때 기준에 비해 더 좋은 엔진 효율을 보였다. 엔진 부하율 50% 조건에서는 과급 압력을 약 0.3bar 낮춘 경우 가장 좋은 효율을 보였으며 엔진 부하율 75% 조건과 100% 조건에서는 본 연구

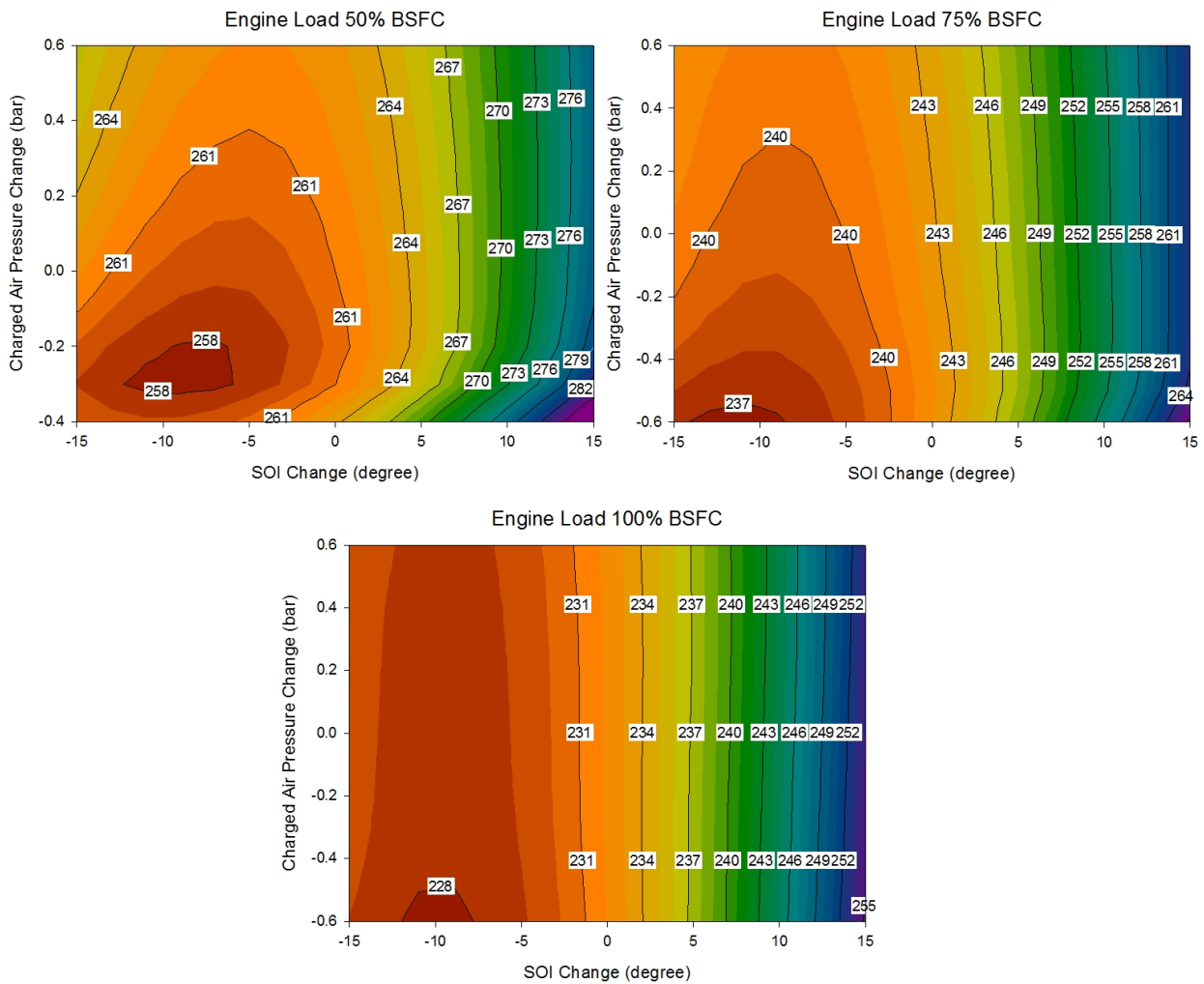


Fig. 8. Effect of SOI change and charged air pressure change on BSFC

Table 4. Optimized BSFC for each engine load

Engine Load	50%	75%	100%
Before Optimization (g/kWh)	260.94	242.71	232.15
After Optimization (g/kWh)	257.57	236.65	227.79
Improved Percentage (%)	-1.29	-2.50	-1.88

에서 설정한 범위에서는 명확하게 최적화 된 구간을 확인하지는 못했다. 다만 본 연구에서 해석한 조건인 기존 과급압보다 0.6bar 낮은 조건보다 더 낮은 과급 압 조건에서 최적의 효율을 보일 것으로 판단된다. 따라서 더 넓은 운전 조건 변화를 통한 추가적인 최적화 작업이 필요할 것으로 판단된다.

이러한 엔진 효율에 대한 연료 분사시기와 과급압의 영향을 통해 앞서 설명한 혼합 연소 시의 연소 특성의 변화를 해당 변수의 조건 변화를 통해 충분히 반영되고 있다고 판단할 수 있다. 위의 결과를 통해 연료 분사시기의 진각을 통해 혼합 연소로 인해 길어지는 연소시간을 충분히 확보할 수 있다는 것을 확인할 수 있었으며 과급압 조절을 통해 보다 효율적인 공연비 조건을 형성함에 따라 엔진의 효율이 기존에 비해 향상된 것을 확인할 수 있었다.

5. 부생유(Hi-sene) 적용에 따른 효과

5-1. 부생유 적용에 따른 엔진 성능의 변화

본 연구에서는 최대한 실제 발전소 엔진의 운전조건에 가까운 조건에서의 엔진 성능을 확인하기 위해 디젤을 사용한 경우에 대한 분석과 함께 부생유를 사용한 경우에 대해서도 엔진의 성능을 분석하였다. 우선 혼합 연소를 하지 않은 경우에 동일 출력을 낼 때 단위 출력 당 연료 소모량은 모든 부하율 조건에서 부생유를 사용하는 경우 디젤을 사용하는 경우보다 1% 가량 더 높은 경향성을 보였다. 이러한 차이는 부생유의 저위 발열량이 디젤에 비해 약간 낮기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 9의 결과와 Table 2의 값을 함께 보았을 때 부생유의 저위발열량이 디젤에 비해 1% 정도

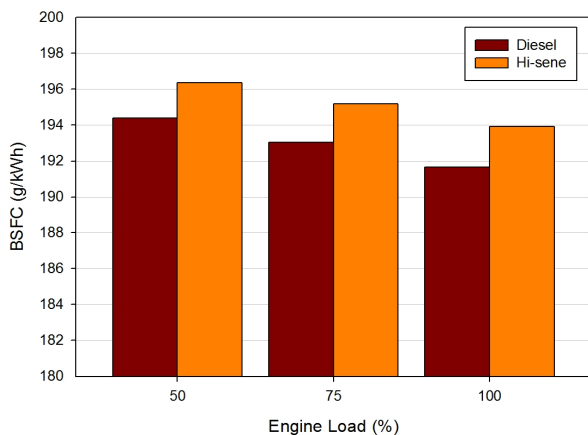


Fig. 9. BSFC comparison between diesel and Hi-sene

낮은 것을 감안하면 이와 같은 단위 출력 당 연료 소모량의 감소를 설명할 수 있다.

또한 부생유를 사용해 앞서 최적화를 진행한 조건에서 혼합 연소한 경우에도 디젤과 천연가스를 혼합 연소한 경우와 크게 차이를 보이지 않는 것을 확인할 수 있었으며 오히려 차이가 더욱 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 혼합 연소 시에 엔진의 성능 부분에 있어서는 디젤과 부생유의 차이를 고려할 필요는 없을 것으로 보인다.

하지만 디젤의 경우 탈황과정을 통해 황 성분이 거의 없는 반면에 부생유에는 디젤에 비해 많은 양의 황 성분이 포함되어 있어 인체에 유해한 SOx 성분이 배출 물질로 나타날 수 있다. 본 연구에서는 이에 대한 정량적인 연구를 진행하지는 않았지만 추후 디젤을 사용하는 경우와 부생유를 사용하는 경우의 SOx, PM, NOx 등 배출물질에 대한 심도 깊은 연구가 필요할 것으로 보인다.

5. 결론

본 연구에서는 실제 운전 조건을 고려하여 발전용 디젤 엔진에서 천연가스-디젤 혼합 연소 시 나타나는 엔진의 성능 변화와 그 원인을 파악하고 엔진 변수의 최적화를 통해 나타나는 엔진의 성능 향상에 대한 연구를 상용프로그램 GT-Power를 이용해 진행하였으며 실제 조건과 같이 부생유를 적용하여 디젤 연소와 그 특징을 비교하였다. 이와 같은 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 디젤 엔진에서 동등한 출력을 유지한 상태로 천연가스와 디젤을 혼합 연소하는 경우 BSFC 값이 증가하는 경향을 보였다.
- (2) 이와 같은 엔진 효율의 감소는 천연가스와 디젤의 혼합 연소에 따른 연소 특성의 변화에 따른 것으로 판단된다. 혼합 연소의 특성 상 연소에 요하는 시간이 기존 디젤 연소에 비해 길어져 미연소 연료가 늘어나게 되어 단위 출력 당 연료 소비량을 증가시키는 것으로 판단된다.
- (3) 연료 분사 시기와 과급 압력에 대해서 실험계획법을 사용하여 해당 변수가 엔진의 효율에 미치는 영향에 대해 분석하였으며 그 결과를 토대로 각 엔진 부하율에 따라 해당 변수를 최적화했다. 그 결과 연료 분사 시기는 기존에 비해 일

정량 진각 시켜 엔진 효율의 상승을 도모할 수 있었으며 과급압은 기존 디젤 운전 조건에서보다 약간 감소시켰을 때 최적의 효율을 내는 것을 알 수 있었다.

- (4) 실제 도서지역 발전소에서 사용하는 연료의 특성을 반영하기 위해 부생유를 연소하는 경우의 엔진 성능을 디젤 연소 시와 비교하였으며 부생유를 연소하는 경우 저위발열량의 차이만큼 단위출력 당 연료 소모량이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 천연가스와 혼합 연소를 하는 경우에는 그 차이가 줄어들어 천연가스-디젤 혼소 시와 거의 같은 결과를 보였다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행 한 연구 과제입니다. (No. 20131010176B)

참고문헌

1. JeongKeun Lee, JungKeuk Park, Kwang-beom Hur. "Evaluation Study of Generator Using Dual Fuel Engine in Korean Islands", KOSCO SYMPOSIUM, **2011**, **19-30**
2. Mattarelli, E., Rinaldini, C. A. and Golovitchev, V. I., "CFD-3D analysis of a light duty Dual Fuel (Diesel/Natural Gas) combustion engine", Energy Procedia, **2014**, **45**, **929-937**
3. Liu, Z. and Karim, GA., "Simulation of combustion processes in gas-fuelled diesel engines", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering, **1997**, **211(A)**, **159 - 169**
4. A.M.L.M Wagemakers and C.A.J. Leermakers, "Review on the Effect of Dual-Fuel Operation, Using Diesel and Gaseous Fuels, on Emissions and Performance", SAE, **2012**, **2012-01-0869**
5. Changup Kim, Seungmook Oh. "A Study on the Characteristics of Dual Fuel Engine Fueled by Natural Gas and Diesel", KIGAS, **2013**, **17(6)**, **20-26**
6. Cheenkachorn, K., Poornpipatpong, C. and Ho, C. G., "Performance and emissions of a heavy-duty diesel engine fuelled with diesel and LNG(liquid natural gas)", Energy, **2013**, **53**, **52-57**
7. Seokhwan Lee, Jinwook Lee, Seongjoon Heo, Sungshik Yoon, Yunhyun Roh. "Characteristics of Electronically Controlled 13L LNG-Diesel Dual Fuel Engine", KIGAS, **2007**, **11(4)**, **54-58**
8. Han, J. O., Chae, J. M., Lee, J. S. and Hong, S. H. "Economical Evaluation of a LNG Dual Fuel Vehicle Converted from 12L Class Diesel Engine", Journal of Energy Engineering, **2010**, **19(4)**, **246-250**
9. Jeong Ok Han, Jung Min Chae, Jung Sung Lee, Sung Ho Hong, "Economical Evaluation of a LNG Dual Fuel Vehicle Converted from 12L Class Diesel Engine", Journal of Energy Engineering, **2010**, **19(4)**, **246-250**
10. Jungkeun Cho, Sangjun Park, Soonho Song, Kwang-beom Hur. "A Numerical Study on Performance of a Heavy-Duty Diesel engine for Power Generation under Natural Gas-Diesel Dual Fuel Operation", KIGAS, **2015**, **19(2)**, **29-36**
11. Bilcan, A., LeCorre, O., Tazerout, M., Ramesh, A. et al. "Characterization of the LPG-Diesel Dual Fuel Combustion," SAE Technical Paper, **2001**, **2001-28-0036**
12. Young Min Kim, Jang Hee Lee, Chun Hee Lee, Dong Sung Shin, Ik Jae Chung. "Combustion Characteristics of the CNG Engine at Various Air Fuel Ratios", KSAE, **1999**, **7(2)**, **77-87**
13. Heywood, J. B., *Internal combustion engine fundamentals*, McGraw-Hill, New York, 1988