

# 천연가스/디젤 RCCI 엔진의 연소 특성에 관한 수치적 연구

함윤영\*, 장효정  
우석대학교 기계자동차공학과

## Numerical Study on the Combustion Characteristics of CNG/Diesel RCCI Engine

Yun-Young Ham\*, Xiaojing Zhang  
Department of Mechanical & Automotive Engineering, Woosuk University

**요약** 최근 디젤엔진의 열효율을 높이면서 NO<sub>x</sub>와 PM을 효과적으로 저감시키기 위해 이중 연료를 사용하는 RCCI 엔진이 개발되어왔다. 본 연구에서는 저반응성 연료로는 천연가스를 사용하고 고반응성 연료로는 디젤을 사용하는 RCCI 엔진에서 디젤연료의 이단 분사 시기와 천연가스 대체율이 연소 성능 및 배출가스에 미치는 영향을 수치해석을 통하여 조사하였다. 디젤 이단 분사 시 첫 번째 분사 시기가 진각 되면 연소가 느려지면서 연소온도가 낮아져 NO<sub>x</sub>가 감소한다. 대략 -87°CA ATDC의 분사시기가 연소 성능 및 배출가스를 고려할 때 최적 분사시기라고 판단된다. 두 번째 분사 시기가 진각되면 NO<sub>x</sub>와 soot는 감소하지만 HC와 CO는 증가한다. 최적의 두 번째 분사 시기는 -38°CA ATDC로 판단된다. 천연가스 대체율이 증가할수록 최고 압력이 감소하고 열발생율은 늦어진다. 또한 연소온도의 감소로 NO<sub>x</sub>가 감소하며 디젤량이 상대적으로 적기 때문에 soot도 감소한다. 열효율과 연료소비율, 그리고 NO<sub>x</sub>와 soot의 EURO 6 배출가스 규제 만족을 위해서는 천연가스 대체율이 86% 조건에서 최적인 것으로 판단된다. 천연가스/디젤 RCCI 연소 방식은 기존 디젤 연소 방식보다 열효율이 높고 NO<sub>x</sub> 및 soot가 크게 감소됨을 확인할 수 있었다.

**Abstract** Recently, a dual fuel RCCI engine has been developed to effectively reduce the NO<sub>x</sub> and PM while at the same time increasing the thermal efficiency of the diesel engine. In this study, the effect of the two-stage injection timing of the diesel fuel and the CNG substitution rate on the combustion performance and exhaust gas condition in an RCCI engine was investigated numerically. The RCCI engine uses natural gas as the low-reactivity fuel and diesel as the high-reactivity fuel. In the case of diesel two-stage injection, the combustion slows down, and the combustion temperature is lowered with the advancement of the first injection timing, which further results in NO<sub>x</sub> decrease. An injection timing of approximately -87°CA ATDC is deemed optimal considering the combustion performance and exhaust gas condition. As the second injection timing is advanced, the NO<sub>x</sub> and soot decrease, but the HC and CO increase. In addition, the optimal second injection timing is determined to be -38°CA ATDC. As the CNG substitution rate increases, the peak pressure decreases, and the heat release rate is delayed. Also, NO<sub>x</sub> is reduced due to the reduction of combustion temperature. And, the soot is also reduced because the amount of diesel is relatively small. From the results of the study, a CNG substitution rate of less than 86% is considered optimal and meets the requirements of thermal efficiency, fuel consumption rate, and the EURO 6 emission gas regulation of NO<sub>x</sub> and soot. Moreover, it was confirmed that the CNG/diesel RCCI combustion method has a higher thermal efficiency than the conventional diesel combustion method and significantly reduces the NO<sub>x</sub> and soot.

**Keywords** : CNG Substitution Rate, Injection Timing, Low Temperature Combustion, Reactivity Controlled Compression Ignition, Two-Stage Injection

\*Corresponding Author : Yun-Young Ham(Woosuk Univ.)

email: yyham@woosuk.ac.kr

Received September 9, 2021

Accepted January 7, 2022

Revised November 9, 2021

Published January 31, 2022

## 1. 서론

디젤 엔진은 가솔린 엔진에 비해 열효율과 연비가 우수하지만 NO<sub>x</sub>와 PM(Particulate Matters)이 많이 발생되고 이들은 서로 상충(trade-off)관계가 있어 동시에 저감하기가 어려운 점이 있다. NO<sub>x</sub>와 PM을 저감하기 위해 SCR, DPF와 같은 다양한 후처리장치들이 개발되어 적용되고 있지만 시스템 비용이 고가이기 때문에 연소기술 개선을 통해 효과적으로 동시 저감하려는 노력이 경주되고 있다.

유해배출량 감소, 열효율 향상 및 비용 개선이라는 포괄적인 요구를 충족시키기 위해 저온 연소 전략(Low Temperature Combustion)이 개발되어 왔다. 특히 최근에 이중 연료(dual fuel)를 사용하는 반응성 제어 압축착화(RCCI : Reactivity Controlled Compression Ignition) 기술은 다른 저온 연소 전략인 HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition)나 PCCI(Premixed Charge Compression Ignition)보다 높은 열효율을 달성하는 동시에 NO<sub>x</sub>와 PM의 배출 문제를 더 넓은 운전영역에서 해결할 수 있는 것으로 알려져 있다[1]. RCCI 연소방식은 서로 다른 반응성을 가진 두 개의 연료를 사용하는데 흡기과정 중 흡기 포트로부터 저반응성 연료와 공기를 공급하여 실린더 내에 혼합기를 형성하며, 고반응성 연료를 압축과정 중에 직접 분사하여 서로 다른 연료의 반응도로 성층연소시킴으로써 연소 성능을 최적화하는 기술이다[2].

RCCI 연소 방식은 예혼합 연소의 비율을 효과적으로 증가시키고, 확산 연소를 줄일 수 있으며, 국소 농후 가스와 고온 영역의 생성을 피해 NO<sub>x</sub>와 soot 배출을 줄일 수 있다. 또한 실린더에서 성층 연소를 달성할 수 있으며, 두 연료의 혼합비를 조절함으로써 연소 과정을 제어할 수 있고 열발생율을 제어하여 최대 압력 상승률(PPRR : Peak Pressure Rise Rate)이 너무 커지는 것을 방지하여 노킹이 발생하는 것을 효과적으로 방지할 수 있다[3].

최근 몇 년간, 연구자들은 RCCI 연소 엔진의 제어 방법 및 최적화 계획을 탐구해 왔다. Neely는 소형 디젤 엔진을 사용하여 저부하 및 고부하 조건에서 분사 시기 및 다단분사가 연소 및 배출가스에 미치는 영향을 연구하였다. 그 결과 여러 번의 분사를 통해 CO와 NO<sub>x</sub>를 줄일 수 있으며 연료 소비율을 낮출 수 있었다[4]. Reitz는 천연 가스/디젤 이중 연료를 사용하여 대형 디젤 엔진의 RCCI 연소 모드를 연구하였다. 결과에 따르면 연료

분사시기의 진각이 적절하면 NO<sub>x</sub> 및 HC 배출량이 감소하고 고부하에서 이단 분사를 사용하여 압력 상승률과 소음을 효과적으로 줄일 수 있었다[5].

천연가스는 자원이 풍부하며 비용적인 측면에서도 유리하며 탄화수소 비율이 낮아 연소 시 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)와 PM을 덜 발생시켜 향후 지속 가능성이 높은 연료이다[6,7]. 따라서 천연 가스/디젤 이중 연료 RCCI 엔진의 연료 분사 전략을 연구하는 것은 중요한 의미를 지닌다.

본 연구에서는 저반응성 연료로는 천연가스를 사용하고 고반응성 연료로는 디젤을 사용하는 RCCI 엔진에서 디젤연료의 이단 분사시기와 천연가스 대체율이 연소 성능 및 배출가스에 미치는 영향을 수치해석을 통하여 살펴보고자 하였다. 그리고 천연가스/디젤 RCCI 연소방식과 기존 디젤 연소방식의 성능 및 배출가스 결과를 비교하고자 하였다.

## 2. 수치 해석

### 2.1 모델 설정

시뮬레이션 대상 엔진은 2.44L Caterpillar (SCOTE) 단기통엔진이며 엔진 및 인젝터의 주요 제원은 Table 1과 같다[5]. 시뮬레이션 시간을 단축하기 위하여 Fig. 1과 같이 1/6 섹터에 해당하는 연소실을 수치해석에 사용하였다.

이중 연료 RCCI 엔진 해석을 위해 ANSYS FORTE 프로그램을 사용하였으며 고반응성 연료인 디젤을 대체할 연료로는 n-헵탄(C<sub>7</sub>H<sub>16</sub>)을, 저반응성 연료인 천연가스를 대체할 연료는 메탄(CH<sub>4</sub>)을 사용하였다. 난류는 RNG(Re-Normalization) k-ε 모델[8]을, 분사된 연료

Table 1. Engine specifications

Caterpillar 3401E SCOTE	
Displacement[L]	2.44
Bore×Stroke[mm]	137.2×165.1
Connecting Rod Length[mm]	261.6
Compression Ratio	16.1:1
Swirl Ratio	0.7
IVC[deg ATDC]	-143
EVO[deg ATDC]	130
Common Rail Diesel Fuel Injector	
Number of Holes	6
Hole Diameter[μm]	250
Included Spray Angle[deg]	145

액적의 분열은 KH-RT(Kelvin-Helmholtz Rayleigh-Taylor) 모델로 모사하였으며, 분무 입자의 충돌과 증발은 O'Rourke의 모델[9]과 Ra의 모델[10]을 사용하였다. 배출가스와 관련해서는 NO<sub>x</sub> 단순화 모델[11]과 PM의 대부분을 차지하는 soot 계산에 two-step 모델[12]을 사용하였다. 천연가스/디젤 RCCI 엔진 연소과정의 상세 화학반응 (detailed chemistry) 계산을 위해서 CHEMKIN-PRO[13]를 사용하였다.

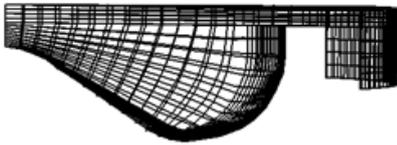


Fig. 1. The 60-degree RCCI sector-mesh used

### 2.2 해석 조건

시뮬레이션은 1300rpm, 9bar IMEP, EGR 0%, 당량비(Equivalence ratio) 0.35인 조건에서 수행하였다. Table 2는 본 해석에서의 엔진작동조건이다. 여기서 CNG/diesel은 이중 연료 RCCI 연소방식의 해석조건이고, Diesel은 기존 디젤 연소방식의 해석조건이다.

흡입 및 배기과정의 영향을 고려하지 않고, 해석은 흡기밸브 닫힘 시기부터 배기밸브 열림 시기까지 진행하였다. 흡기밸브 닫힘 시기에서의 실린더 압력과 온도는 동일하게 설정하였다.

천연가스/디젤 RCCI 엔진의 천연 가스와 디젤 간 상대적 질량 관계를 결정하기 위해 총 연료 에너지(FE)는 다음과 같이 정의된다.

$$FE = m_D LHV_D + m_{CNG} LHV_{CN} \quad (1)$$

여기서  $m_{CNG}$ 와  $m_D$ 는 천연가스와 디젤의 질량이고,  $LHV_{CNG}$ 와  $LHV_D$ 는 천연가스와 디젤의 저위발열량(kJ/kg)이다.

천연가스 대체율( $R_{CNG}$ )은 천연가스와 디젤의 총 연료 에너지 대비 천연가스의 연료에너지 비율로 정의된다.

$$R_{CNG} = \frac{m_{CNG} LHV_{CNG}}{FE} \quad (2)$$

천연가스와 디젤 연료의 총 에너지는 4359 J로 동일하며, 이중에서 천연가스 대체율 68%~92%의 에너지

비율만큼의 천연가스 질량이 흡입과정 동안 공기와 예혼합되어 압축되기 시작한다. 그리고 나머지 에너지비율만큼 디젤 연료 질량이 압축과정 중에 공급되는 것으로 계산을 수행하였다.

Table 2. Engine operating conditions

Design parameter	CNG-diesel	Diesel
IMEP[bar]	9	9
RPM	1300	1300
Pressure at IVC[bar]	2	2
Temperature at IVC[bar]	279	279
Total fuel energy[J]	4359	4359
1st injection timing [°CA ATDC]	-97 ~ -67 (2nd -38)	-14.5
2st injection timing [°CA ATDC]	-48 ~ -18 (1st -87)	-
CNG substitution rate[%]	68% ~ 92%	0
EGR[%]	0	0

### 2.3 모델 검증

본 연구에서는 Nieman 등[5]의 연구 결과와 비교를 통하여 연소해석의 타당성을 검증하고자 하였다. 시뮬레이션은 1300rpm, IMEP 9bar 조건에서 수행하였다. 천연 가스 대체율은 86%, 예혼합 당량비는 0.35, 디젤연료는 2단 분사되며, 1차 분사는 분사 시기 -87°CA(Crank Angle) ATDC에서 40% 질량비로 공급된다. 2차 분사는 분사 시기 -38° ATDC에서 나머지 60%의 디젤을 분사한다. Fig. 2는 상기 조건에서 계산한 실린더 압력과 Nieman 등의 시뮬레이션 결과, 그리고 가솔린/디젤 실험결과를 비교한 것이다. 해석 모델이 이중 연료 RCCI 엔진의 연소 과정을 비교적 정확하게 반영할 수 있음을 알 수 있다.

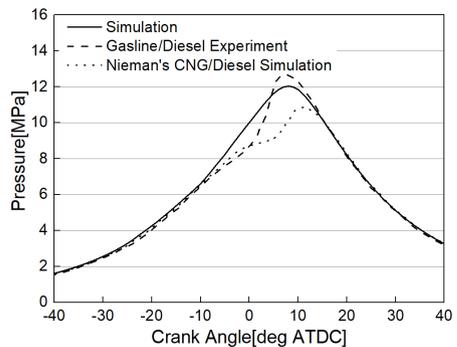


Fig. 2. Comparison of measured and simulated cylinder pressure for dual fuel RCCI operation

### 3. 계산 결과 분석

#### 3.1 첫 번째 분사시기의 영향

천연가스 대체율이 86%인 조건에서 디젤 이단 분사 시 두 번째 분사시기를  $-38^\circ$  ATDC로 유지하고 첫 번째 분사시기를  $-97, -87, -77, -67^\circ$  ATDC로 변화시켰을 때 그 효과를 살펴보았다.

Fig. 3은 실린더 압력 및 열발생을 선도를 나타낸다. 첫 번째 분사 시기가 진각 되면서 최대 압력이 점차 낮아짐을 볼 수 있고, 연소 시작지점은 거의 동일하지만 연소 기간이 길어지는 추세를 보이는데 이는 더 긴 착화 지연 시간으로 인해 충분한 혼합이 이루어져 연소가 느려지기 때문이다.

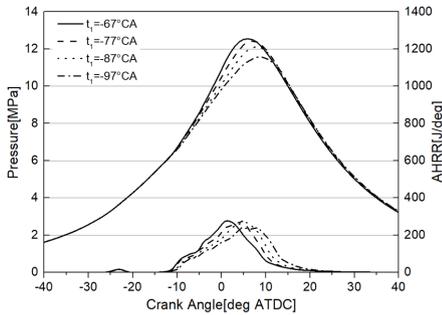


Fig. 3. Cylinder pressure and heat release rate as a function of 1st injection timing for two-stage injection

Fig. 4는 디젤 스프레이 축과 일치하는 절단 평면에 표시한 온도 분포 그림이다. 착화는 피스톤 보울 내부에서 시작되며 점차 스퀴시 영역과 중앙 영역으로 확대되는 것을 알 수 있다. 첫 번째 분사시기가 진각 될수록 연소가 느려지고 전체적인 온도가 다소 낮아지는 경향이 있다. Fig. 5는 연소성능 및 배출가스에 미치는 영향에 대한 것이다. 첫 번째 분사시기가 진각 되면 최대압력상승률(PPRR)은 감소하며 50% 열방출 각도(50%@Heat release, CA)가 지각되어 연소가 다소 느려지을 알 수 있다. 최대 열효율과 최소 연료소비율(ISFC)은  $-87^\circ$  ATDC에서 나타난다. NOx는 분사시기가 진각 될수록 감소하는데 이는 더 긴 점화지연기간으로 인해 충분한 혼합이 이루어져 연소가 느려지면서 연소온도가 낮아지기 때문이다. EURO 6 배출가스 규제치(NOx : 0.4 g/kw-h)를 만족하기 위해서는  $-87^\circ$  ATDC 이전으로 진각이 필요한 것으로 보인다. soot는 분사시기가 진각 될수록 증가하지만 EURO 6 배출가스 규제치(PM : 0.01

g/kw-h)보다 매우 낮은 0.001g/kw-h 이하의 값을 갖는다. HC는 분사시기가 진각 될수록 감소 추세를 보이나 배출량 자체가 6~12g/kw-h로 매우 높은 수준이다. CO는 먼저 감소했다가 다시 증가하는 추세를 보였다. 이단 분사 시 첫 번째 분사시기는 대략  $-87^\circ$  ATDC의 분사시기가 연소성능, 배출가스 및 최대압력상승률을 고려하였을 때 가장 최적화된 분사시기라고 판단된다.

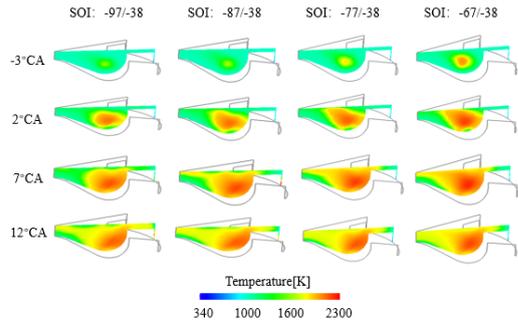


Fig. 4. Temperature cloud maps of different 1st injection timing

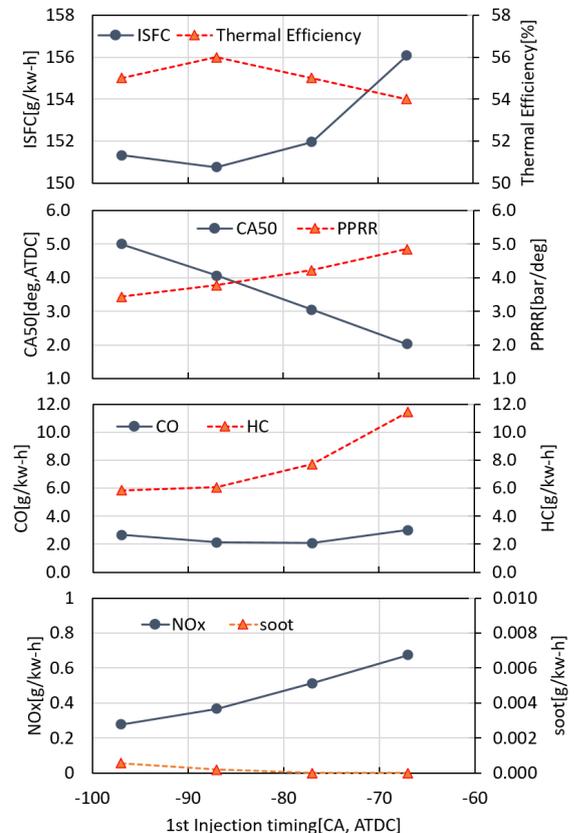


Fig. 5. Emission and performance trends as a function of 1st injection timing

### 3.2 두 번째 분사시기의 영향

이단 분사 시 첫 번째 분사시기는  $-87^\circ$  ATDC 로 고정하고 두 번째 분사시기를  $-48, -38, -28, -18^\circ$  ATDC 로 변화시켰을 때 압력, 열발생율, 연소성능 및 배출가스 등에 미치는 영향을 살펴보았다.

Fig. 6에서 볼 수 있듯이 첫 번째 분사시기에 비해 두 번째 분사시기가 압력 및 열발생율의 변화에 더 민감함을 알 수 있다. 두 번째 분사시기가  $-28^\circ$  ATDC에서  $-48^\circ$  ATDC까지 진각 될수록 압력이 점차 감소하고, 착화지연기간이 길어지면서 연소가 시작되는 지점이 늦게 발생되는 경향을 보인다.  $-18^\circ$  ATDC의 경우는 분사시기가 늦어 종래의 디젤연소와 같이 짧은 착화지연과 함께 뚜렷한 예혼합연소 현상을 보인다. 즉, 두 번째 분사시기가 너무 지각되면 RCCI 연소특성을 갖기 어렵다는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 Fig. 7의  $-18^\circ$  ATDC 경우의 온도 분포에서도 확인할 수 있다. 두 번째 분사시기가 진각 될수록 충분한 혼합시간으로 인해 착화가 늦어지며 연소실 온도도 상대적으로 낮게 형성되는 것을 알 수 있다. Fig. 8은 연소성능 및 배출가스에 미치는 영향에 대한 것이다. 두 번째 분사시기가 진각 될수록 연소실 온도가 낮아지는 추세에 따라  $\text{NO}_x$  배출량이 감소한다. 반대로 soot는 증가하는 경향을 보이지만  $0.003\text{g/kw-h}$  이하의 낮은 값을 보인다.  $-18^\circ$  ATDC의 경우를 제외하고 HC와 CO는 두 번째 분사시기가 진각 될수록 증가하는 것을 알 수 있다. 열효율과 연료소비율은  $-28^\circ$  ATDC에서 가장 성능이 우수한 것으로 보이나 EURO 6 배출가스 규제 대응을 위한  $\text{NO}_x$ 와 soot 저감 효과를 함께 고려하면  $-38^\circ$  ATDC 부근에서 최적인 것으로 판단된다.

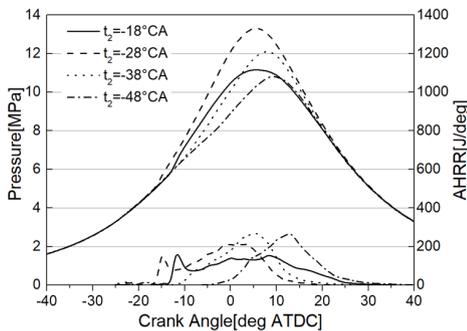


Fig. 6. Cylinder pressure and heat release rate as a function of 2nd injection timing for two-stage injection

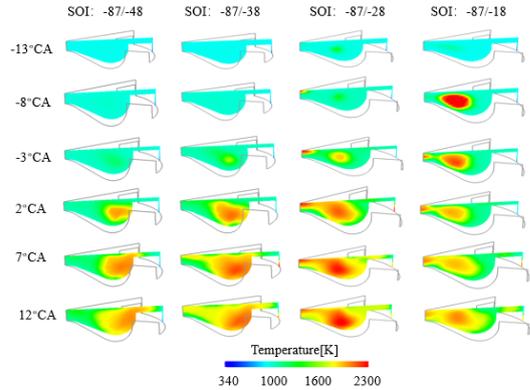


Fig. 7. Temperature cloud maps of different 2nd injection timing

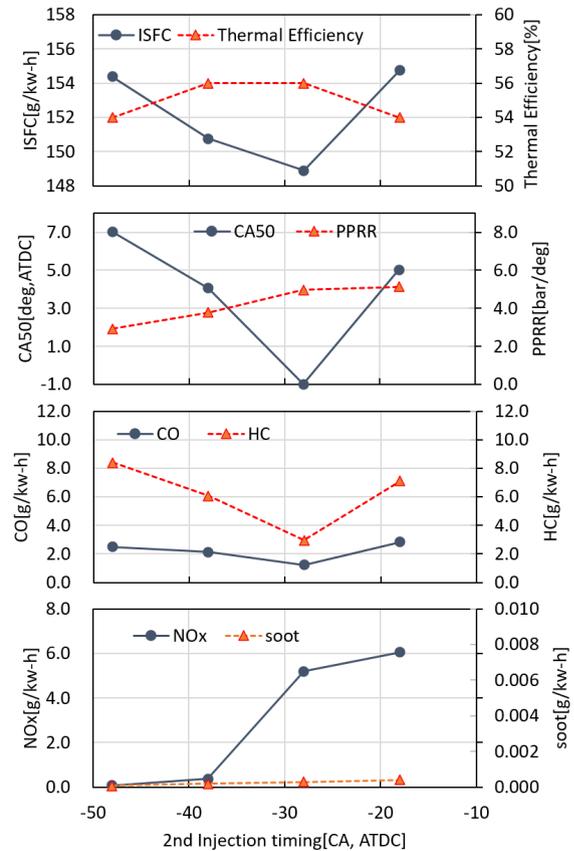


Fig. 8. Emission and performance trends as a function of 2nd injection timing

### 3.3 천연가스 대체율의 영향

천연가스 대체율의 효과를 살펴보기 위해 다른 조건들은 동일하게 유지하고, 첫 번째와 두 번째 분사시기를 각각  $-87^\circ, -38^\circ$  ATDC인 조건에서 천연가스 대체율을

68%, 74%, 80%, 92%로 변경하였다.

Fig. 9에서 보듯이 천연가스 대체율이 증가할수록 최고 압력이 감소하고 열발생율은 지각됨을 알 수 있다. 특히 92%인 경우는 모터링 압력만 관찰되어 실화(misfire)가 발생했음을 보이며 이는 천연가스 대체율에 한계지점이 있음을 나타낸다. 68%의 낮은 천연가스 대체율은 고반응성의 디젤 연료가 상대적으로 많아 매우 급격한 열발생율을 나타낸다. 천연가스 대체율이 증가하면 실린더로 분사되는 디젤의 양이 감소하고, 천연가스 연소에 의해 형성되는 느린 열방출이 지배적이며, 그에 따라 연소 지속시간이 늘어났다.

Fig. 10에서 천연가스 대체율이 증가하면 연소가 늦게 시작하며 실린더 내 온도가 감소하는 추세를 보인다는 것을 직관적으로 알 수 있다. 68%의 경우 연소초기에 피스톤 보울 벽면 근처에서 예혼합연소가 발생하고 그 이후 확산연소로 진행되는 기존 디젤 연소 특성을 보이는 것을 볼 수 있다.

Fig. 11은 연소성능 및 배출가스에 미치는 영향에 대한 것이다. 열효율과 연료소비율은 80% 조건에서 가장 성능이 우수한 것으로 보인다. 천연가스 대체율이 증가할수록 50% 열방출 각도(50%@Heat release, CA)가 지연되는 결과에서 보듯이 연소가 느리게 진행됨을 알 수 있다. 또한 최대압력상승율은 감소한다. 천연가스 대체율이 증가하게 되면 연소온도의 감소로 NOx가 감소하는 경향을 보이며 디젤량이 상대적으로 적기 때문에 soot 또한 감소한다. 즉, 천연가스 대체율을 증가시키면 NOx와 soot의 배출을 동시에 효과적으로 줄일 수 있음을 보여준다. 한편 HC와 CO는 천연가스 대체율이 80%까지는 큰 변화가 없지만 그 이상 증가하게 되면 배출이 늘어나게 된다. 열효율과 연료소비율, 그리고 NOx와 soot의 EURO 6 배출가스 규제 만족을 위해서는 천연가스 대체율이 86% 조건에서 최적인 것으로 판단된다.

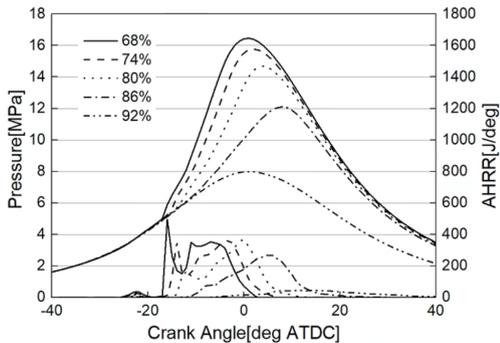


Fig. 9. Cylinder pressure and heat release rate as a function of CNG substitution rate

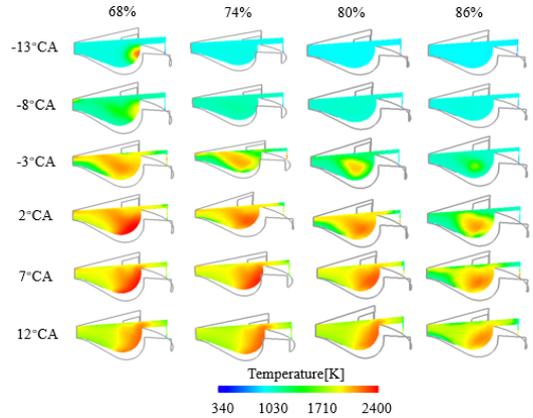


Fig. 10. Temperature cloud maps as a function of CNG substitution rate

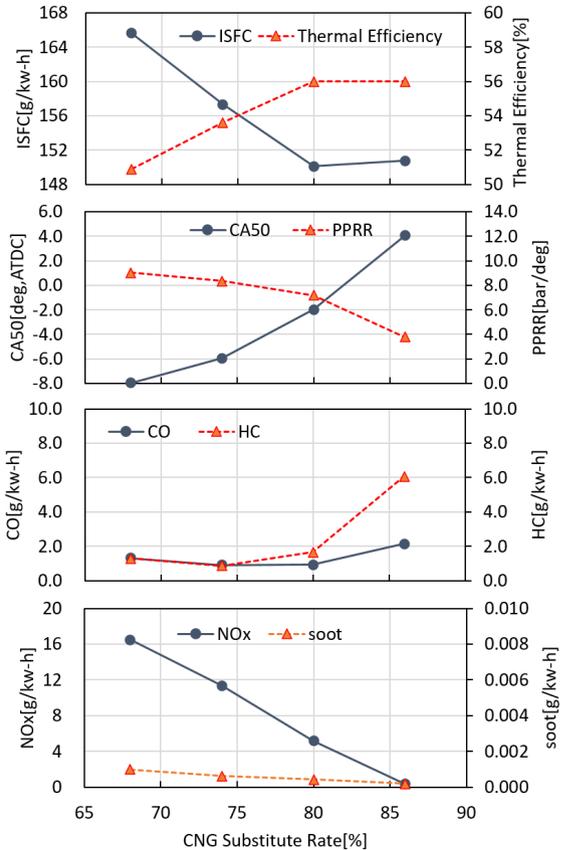


Fig. 11. Emission and performance trends as a function of CNG substitution rate

### 3.4 RCCI 연소와 기존 디젤 연소의 비교

RCCI 연소방식과 기존 디젤 연소방식의 연소성능 비교를 위해 압축 시작지점에서의 온도와 압력, 그리고 투

입된 총 연료에너지를 같게 하였다. RCCI 연소방식에서 디젤연료의 1차 분사 시기는  $-87^{\circ}$ ATDC, 2차 분사 시기는  $-38^{\circ}$  ATDC 조건이다. 기존 디젤연소방식에서의 연료 분사시기는  $-14.5^{\circ}$  ATDC인데 50% 열방출 각도 (50%@Heat release, CA)가 RCCI 연소방식과 동일하고 최대 열효율이 발생하는 분사시기이다.

Fig. 12에서 보듯이 천연가스/디젤의 RCCI 연소방식이 최고압력은 다소 높게 나타나며, 최대 열발생율은 연소후반에 나타나고 연소기간은 약간 짧아지는 것을 알 수 있다. Table 3는 종합적인 연소성능을 비교한 데이터이다. RCCI 연소방식은 기존 디젤 연소방식보다 연료소비율은 16.4% 낮고, 열효율은 9.5%가 높다. 또한 NOx와 soot 배출량은 기존 디젤연소방식보다 크게 감소함을 알 수 있다.

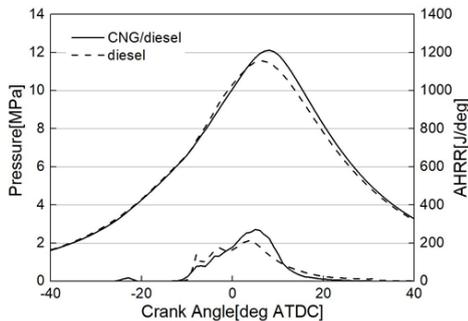


Fig. 12. Comparison of cylinder pressure and heat release rate between CNG/diesel RCCI and diesel combustion

Table 3. Comparison of CNG/diesel RCCI and diesel combustion performance

Results	RCCI	Diesel
IMEP[bar]	9.05	8.34
NOx[g/ikw-hr]	0.36	14.26
soot[g/ikw-hr]	1.89E-4	1.51E-2
HC[g/ikw-hr]	6.05	0.35
CO[g/ikw-hr]	2.12	6.79
PPRR[bar/deg]	3.78	4.42
CA50[°CA ATDC]	4.06	4.02
Combustion duration 10-90[°CA ATDC]	17.00	22.98
Thermal Efficiency[%]	56	46.5
ISFC[g/kw-hr]	150.76	180.39

#### 4. 결론

본 연구에서는 천연가스/디젤 RCCI 엔진을 대상으로 수치해석을 통해 고반응성 연료인 디젤연료의 분사시기

와 천연가스 대체율이 연소성능 및 배출가스에 미치는 영향을 파악하고, 천연가스/디젤 RCCI 연소방식과 기존 디젤 연소방식의 연소성능을 비교하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 디젤 이단 분사 시 동일한 두 번째 분사시기에서 첫 번째 분사 시기가 진각 되면 연소가 느려지면서 연소온도가 낮아져 NOx가 감소한다. 대략  $-87^{\circ}$  ATDC의 분사시기가 연소 성능 및 배출가스를 고려할 때 최적의 분사시기로 판단된다.
- 2) 디젤 이단 분사 시 첫 번째 분사시기에 비해 두 번째 분사시기 변화가 압력 및 열발생율의 변화에 더 큰 영향을 미친다. 두 번째 분사 시기가 진각 되면 NOx와 soot는 감소하지만 HC와 CO는 증가한다. 최적의 두 번째 분사 시기는  $-38^{\circ}$  ATDC로 판단된다.
- 3) 천연가스 대체율이 증가할수록 최고 압력이 감소하고 열발생율은 지각된다. 또한 연소온도의 감소로 NOx가 감소하며 디젤량이 상대적으로 적기 때문에 soot도 감소한다. 열효율과 연료소비율, 그리고 NOx와 soot의 EURO 6 배출가스 규제 만족을 위해서는 천연가스 대체율이 86% 조건에서 최적의 것으로 판단된다.
- 4) 천연가스/디젤 RCCI 연소 방식은 기존 디젤 연소 방식보다 열효율이 높고 NOx 및 soot가 급격히 감소됨을 확인할 수 있었다.

#### References

- [1] J. E. Dec, "Advanced compression-ignition engines-understanding the in-cylinder processes", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.32, No.2, pp.2727-2742, 2009.
- [2] R. D. Reitz, G. Duraisamy, "Review of high efficiency and clean reactivity controlled compression ignition(RCCI) combustion in internal combustion engines", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol.46, pp.12-71, 2015.
- [3] S. L. Kokjohn, R. M. Hanson, Splitter D A, R. D. Reitz, "Fuel reactivity controlled compression ignition (RCCI): a pathway to controlled high-efficiency clean combustion", *International Journal of Engine Research*, Vol.12, No.3, pp.209-226, 2011.
- [4] G. D. Neely, S. Sasaki, J. A. Leet, "Experimental Investigation of PCCI-DI Combustion on Emissions in a Light-Duty Diesel Engine", *SAE Technical Paper* 2004-01-0121, 2004.
- [5] D. E. Nieman, A. B. Dempsey, R. D. Reitz,

"Heavy-Duty RCCI Operation Using Natural Gas and Diesel", *SAE International Journal of Engines* 2012-01-0379, 2012.

- [6] Q. Tang, J. Fu, J. Liu, F. Zhou, Z. Yuan, "Performance improvement of liquefied natural gas (LNG) engine through intake air supply". *Applied Thermal Engineering*, Vol.103, pp.1351-1361, 2016.
- [7] J. Shu, J. Fu, J. Liu, L. Zhang, Z. Zhao, "Experimental and computational study on the effects of injection timing on thermodynamics, combustion and emission characteristics of a natural gas (NG)-diesel dual fuel engine at low speed and low load". *Energy Conversion and Management*, Vol.160, pp.426-438, 2018.
- [8] Z. Han, R. D. Reitz, "Turbulence Modeling of Internal Combustion Engines Using RNG k-e Models", *Combustion Science and Technology*, Vol.106, pp.267-295, 1995.
- [9] P. O'Rourke, A. Amsden, "A Spray/Wall Interaction Submodel for the KIVA-3 Wall Film Model", *SAE Technical Paper* 2000-01-0271, 2000.
- [10] Y. Ra, R. D. Reitz, "The application of a multicomponent droplet vaporization model to gasoline direct injection engines", *International Journal of Engine Research*, Vol.4, pp.193-218, 2003.
- [11] Y. Sun, R. D. Reitz, "Modeling diesel engine NOx and soot reduction with optimized two-stage combustion", *SAE Technical Paper* 2006-01-0027, 2006.
- [12] A. B. Dempsey, P. Seiler, K. Svensson, "Evaluation of the Two-Step Hiroyasu Soot Model over a Broad Range of Diesel Combustion Systems", *SAE International Journal of Engines* 2018-01-0242, 2018.
- [13] R. J. Kee, F. M. Rupley, J. A. Miller, "Chemkin-II: A Fortran chemical kinetics package for the analysis of gas phase chemical kinetics", *Sandia Report SAND* pp.89-8009, 1989.

장 효 정(Xiaojing Zhang)

[정회원]



- 2010년 9월 : Langfang Normal University, School of Chemistry and Material Science(학사)
- 2014년 9월 : University of Science and Technology Beijing, School of Civil and Resource Engineering(공학석사)

• 2019년 9월 ~ 현재 : 우석대학교 기계자동차공학과 박사과정

<관심분야>

내연기관, 열유체공학

함 윤 영(Yun-Young Ham)

[정회원]



- 1988년 8월 : 연세대학교 연세대학원 기계공학과 (기계공학석사)
- 1996년 8월 : 연세대학교 연세대학원 기계공학과 (기계공학박사)
- 1989년 11월 ~ 2001년 1월 : 대우자동차 기술연구소 책임연구원
- 2001년 3월 ~ 현재 : 우석대학교 기계자동차공학과 교수

<관심분야>

엔진제어, 친환경자동차