

# Diesel Surrogate 상세 반응 기구를 이용한 HCCI 엔진의 연소 특성에 관한 수치해석 연구

이원준\* · 이승로\*\* · 이창연\*\*\*

## A Numerical Study of Combustion Characteristics for HCCI Engine with Detailed Diesel Surrogate Chemical Mechanism

Wonjun Lee, Seungro Lee and Chang-Eon Lee

### ABSTRACT

Homogeneous charge compression ignition(HCCI) is the best concept able to provide low NOx and PM in diesel engine emissions. This new alternative combustion process is mainly controlled by chemical kinetics in comparison with the conventional combustion in internal combustion engine. In this paper, combustion characteristics of HCCI engine with suggested diesel surrogate(heptane/toluene mixture fuel) reaction mechanism were numerically investigated by heptane/toluene mixture ratio and EGR ratio. As results, the ignition timing became faster with increasing of heptane, and an initial oxidation and the ignition timing of the mixture fuel were affected by heptane and toluene, respectively.

**Key Words** : HCCI, Heptane, Toluene, Diesel surrogate, Combustion characteristics

### 기 호 설 명

$L_C$  = connecting rod length

$L_A$  = crank arm radius

$V_C$  = clearance volume

$D$  = cylinder bore diameter

$C$  = compression ratio

$V_d$  = displacement volume

$P_m$  = motored cylinder pressure

$T_r$  = working-fluid temperature

$V_r$  = working-fluid volume

$P_r$  = working-fluid pressure

$\bar{S}_p$  = piston speed(=  $2L_A\omega$ )

$\omega$  = average cylinder gas velocity

$P$  = instantaneous cylinder pressure

## 1. 서론

세계적으로 대기오염 규제의 강화로 인해 자동차의 유해가스를 줄이기 위한 많은 노력들이 이루어지고 있다. 그 중 균질 예혼합 압축착화(HCCI) 연소 방식은 현재 디젤 엔진에서 발생하는 NOx와 PM을 획기적으로 줄일 수 있는 기술로 많은 연구가 이루어지고 있다[1,2]. 하지만 현재 균질 예혼합 연소 방식은 특별한 점화 장치 없이 연료의 화학적인 특성만으로 점화가 이루어지기 때문에, 점화시기의 조절 및 좁은 운전 영역에 대한 과제가 남아 있다. 이 문제를 해결하기 위해서는 연료의 화학적 특성에 대

한 연구가 필요하지만, 현재 디젤 연료의 수치 해석 연구를 위한 반응 기구가 체계적으로 확립되어 있지 않은 실정이다. 이에 대한 방안으로 디젤 대용 연료에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있으며, 그 중 디젤과 세탄가가 같은 헵탄과 방향족 탄화수소인 톨루엔을 혼합한 반응기구가 주목 받고 있다[3,4]. 하지만 현재 개발된 디젤 대용 연료의 반응 기구는 정확성에 대한 검증이 다소 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 본 연구자에 의해 제안[5]되어진 새로운 디젤 대용 연료의 반응 기구를 활용하여, 실험 결과[6]와 비교를 통해 반응기구의 정확성을 검증하고, 이를 바탕으로, 헵탄/톨루엔 두 디젤 대용연료의 혼합율에 따른 HCCI 엔진의 연소특성 및 EGR 룰에 관한 특성을 검토하고자 한다.

\* 인하대학교 기계공학과 대학원

\*\* 인하대학교 기계공학과

† 연락처자, chelee@inha.ac.kr

## 2. 디젤 대용 연료의 연소특성

본 연구에서는 디젤 연료의 연소 특성을 모사하기 위한 디젤 대용 연료로 헵탄/톨루엔 혼합 연료를 사용하였다. 일반적으로 디젤 연료는 37%의 알케인계 탄화수소, 34%의 나프텐계 탄화수소와 29%의 방향족 탄화수소로 구성되어 있다. 헵탄은 디젤연료의 알케인계 탄화수소를 대표하는 연료로 디젤과 세탄가가 56으로 같고, 2단계 점화 특성이 잘 나타나기 때문에 디젤 대용 연료로 매우 적합하다고 알려져 있다. 그리고 톨루엔은 디젤 연료중의 방향족 탄화수소를 대표하는 연료로, 디젤 연료의 방향족 탄화수소는 9~14개의 탄소 원자들로 구성되어 있다. 그러나 분자구조가 단순한 벤젠의 경우 디젤 대용 연료로 적합하지 않으며, 분자구조가 복잡한 톨루엔이 디젤 대용 연료로 적합하다고 알려져 있다[7].

디젤 대용 연료인 헵탄/톨루엔 혼합 연료의 산화 과정은 헵탄의 1차 산화 과정에 의해 반응이 시작되며, 이때 발생하는 OH 라디칼과 산소원자에 의해 톨루엔의 탈 수소화 반응이 일어난다. 여기서 다량의 OH 라디칼과 산소 원자가 소모되고, 이로 인해 헵탄의 1차 산화에 필요한 OH 라디칼과 산소원자의 부족으로 반응이 지연된다. 따라서 혼합연료의 2차 산화 과정은 헵탄의 산화 과정에 비해 다소 지연되어 진다. 디젤 대용 연료의 연소 특성에 대한 이해를 돕기 위해 아래에 헵탄과 톨루엔의 반응 특성에 대해서도 간략히 기술하겠다.

### 2.1. 헵탄의 반응 특성

Fig. 1은 헵탄의 HCCI 연소과정에서 crank angle degree(이하 CAD)에 따른 온도 변화를 나타낸 것이다. 그림과 같이 헵탄은 1차 산화과정인 냉염(Cool Flame)과 2차 산화과정인 열염(Hot Flame)으로 구분되는 2단계 발화 특성을 가지고 있다. 냉염은 700~900 K에서 발생하며, 이때 생성된 중간 생성물은 2

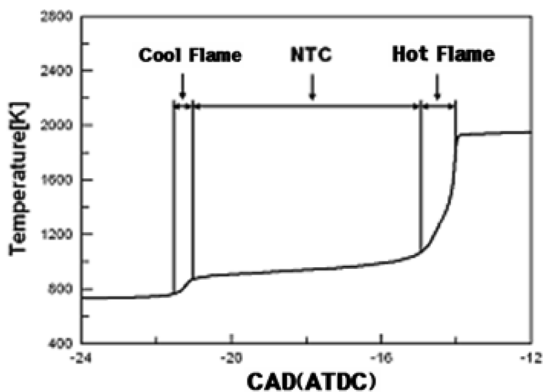
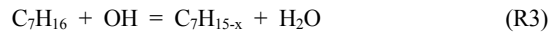
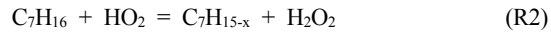
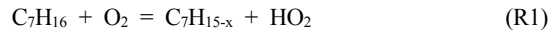
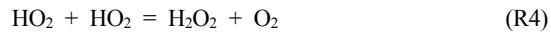


Fig. 1. Combustion characteristics of heptane.

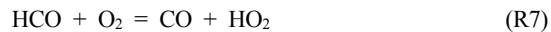
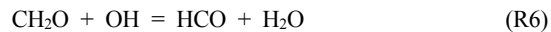
차 발화 시점에 큰 영향을 미치게 된다. 1차와 2차 발화사이에는 온도가 증가함에도 불구하고 반응이 억제 되는 NTC(Negative Temperature Coefficient) 현상이 나타나며, 이로 인해 1차와 2차 발화 구간이 뚜렷하게 구분된다. 즉, 헵탄의 1차 산화과정은 (R1)~(R3)의 탈 수소화 반응에 의해 시작되며, 이때 생성된  $H_2O_2$ 와  $HO_2$  라디칼은 2차 산화 반응의 OH 라디칼의 형성에 가장 큰 영향을 미친다. (R1)~(R3) 반응식의  $C_7H_{15-x}$ 는 이성질체인  $C_7H_{15-1} \sim C_7H_{15-4}$ 을 총칭한다.



탈 수소화 반응에서 생성된  $HO_2$ 는 (R4)반응에 의해  $H_2O_2$ 를 생성하며, (R2)반응에서 생성된  $H_2O_2$ 와 함께 (R5)반응에 의해 OH 라디칼을 생성한다.

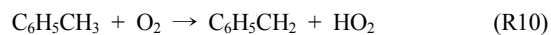
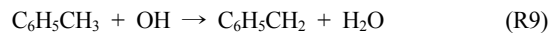


2차 산화과정인 열염은 주로 (R6)~(R8)의 산화 반응에 의해 일어난다. 즉, 1차 산화 반응에서 생성된  $CH_2O$ 와 OH가 결합해 HCO를 형성하고, 이후 산소와 결합해 CO를 생성한다. 그리고 CO는 OH와 결합해  $CO_2$ 를 생성한다.



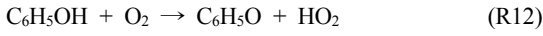
### 2.2. 톨루엔의 반응 특성

톨루엔은 방향족 탄화수소로 헵탄에 비해 반응의 시작점이 다소 늦다. 톨루엔은 1,000 K 근방의 온도에서 OH,  $O_2$ 에 의해 (R9), (R10)의 탈수소화 반응이 개시되며, 이때 안정한 중간 화합물인  $C_6H_5CH_2$ 를 생성한다. 이 반응에 다량의 OH,  $O_2$ 가 소모되기 때문에 헵탄/톨루엔 혼합연료의 2차 산화 반응이 지연된다.



이후 (R11), (R12) 등의 주요 산화 과정을 거쳐

CH<sub>2</sub>O 라디칼이 생성되며, 이하의 산화과정은 헵탄의 2차 산화 과정과 동일하다.



### 3. 수치해석 방법 및 반응 기구

#### 3.1. 수치해석 방법

모사 계산은 Sandia National Lab.에서 개발한 CHEMKIN-PACKAGE의 SENKIN모형을 수정하여 수행하였다[8]. 정적 연소 모델인 SENKIN모형을 대상으로 하여 시간변화 즉 크랭크 각도에 따른 실린더 내부의 체적변화를 고려하여, 엔진 연소장을 모사하였으며, 본 계산에 사용된 식은 다음과 같다.

$$\frac{d(V/V_c)}{dt} = \Omega \left( \frac{C-1}{2} \right) \sin\theta \left[ 1 + \frac{\cos\theta}{\sqrt{R^2 - \sin^2\theta}} \right] \quad (1)$$

$$R = \frac{L_C}{L_A} \quad (2)$$

$$C = \frac{V_{s,max} + V_c}{V_c} \quad (3)$$

$$V_{s,max} = \frac{\pi}{2} D^2 L_A \quad (4)$$

열전달 모델은 Woschni correlation을 사용하였다[9].

$$w = \left[ C_1 \bar{S}_p + C_2 \frac{V_d T_r}{P_r V_r} (P - P_m) \right] \quad (5)$$

모사 계산에 사용된 상세한 엔진 제원은 Table 1과 같다. 이때 압축비는 16.7로 고정하였으며, 엔진스피드는 1,000 RPM, 당량비는 0.5, 초기온도는 380 K로 계산을 수행하였다.

#### 3.2. 반응 기구

본 계산에 사용된 반응 기구는, 기존에 Andrae와 Hernandez에 의해 제안된 디젤 대응 반응기구를 바탕으로 이를 수정하여 사용하였다[7,10]. 기존의 Andrae의 반응 기구는 iso-octane, n-heptane skeletal mechanism과 Alzueta benzene, Sivaramakrishnan toluene의 반응 기구를 조합한 137 화학종과 633 반응식으로 구성되어 있다[10]. 한편 Hernandez의 반응 기구는 Lawrence Livermore National Laboratory(이하 LLNL)

**Table 1.** Specifications of the engine

Description		Specification
Compression ratio		16.7
Bore		127mm
Stroke		154mm
Connecting rod length		255mm
Intake valve	Open	367CAD ATC
	Close	581CAD ATC
Exhaust valve	Open	121CAD ATC
	Close	349CAD ATC

n-heptane detailed version2, LLNL toluene과 Andrae surrogate 반응 기구를 조합한 644 화학종과 2,796 반응식으로 구성되어 있다[7].

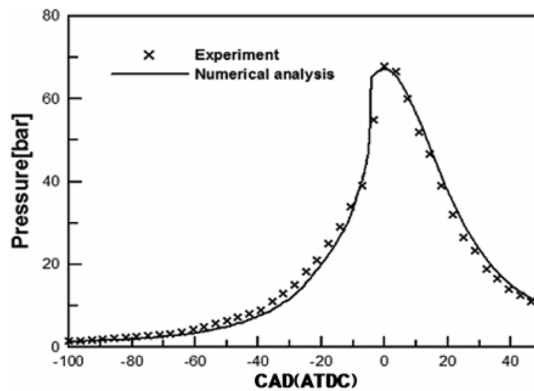
본 계산에서 사용된 반응 기구는 LLNL n-heptane detailed version3 mechanism, Alzueta benzene mechanism, Sivaramakrishnan toluene mechanism, Andrae surrogate mechanism, San Diego's NOx mechanism 을 조합한 것으로 754 화학종과 3,310 반응식으로 구성되어 있다[5].

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1. 혼합연료의 연소 특성

Fig. 2는 기존 실험[7]과 동일한 조건에서 모사 계산을 수행하여 실험 결과와 비교한 것이다. 실험은 헵탄 35%와 톨루엔 65%의 혼합 연료를 사용하여 HCCI 모사 엔진에서 실험한 결과이며, 그 결과가 모사 계산과 매우 비슷한 것을 알 수 있다. 이것은 본 연구에 사용된 모사 계산의 모델링과 반응기구의 정확성이 매우 높음을 보여준다.

Fig. 3은 헵탄/톨루엔 혼합연료의 혼합비에 따른 점화시기를 보여주는 것으로, 계산은 당량비 0.5, 엔진 회전수는 1,000 RPM으로 고정하여 수행하였다.



**Fig. 2.** Comparison of experimental and modeling results.

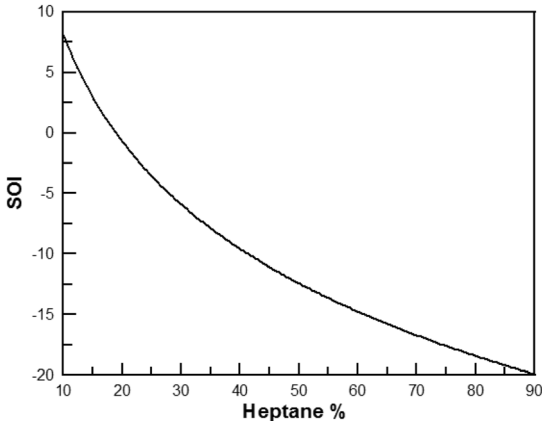


Fig. 3. Ignition timing with mixture ratio.

그림에서 보듯이, 헵탄의 비율이 작아지고 톨루엔의 비율이 높아질수록 점화시기가 늦어지는 것을 확인할 수 있다. 이것은 톨루엔의 탈수소화 반응에 의해 다량의 O<sub>2</sub>와 OH 라디칼이 소모되어 헵탄의 1차 산화 반응기간이 길어지기 때문이다. 앞에서 언급한 바와 같이 혼합연료의 연소는 헵탄에 의해 지배되어 지는데, 최초 헵탄의 1차 산화 반응에 의해 혼합연료의 전체 반응이 시작되며 이때 약간의 온도가 증가되는데 이로 인해 톨루엔의 탈 수소화 반응이 시작된다. 톨루엔은 헵탄에 비해 다소 높은 1,000 K 근방의 온도에서 반응이 시작되기 때문에 800 K 부근에서 1차 산화반응이 이루어지는 헵탄에 비해 시작시점은 늦지만 헵탄보다 반응성이 크기 때문에 주변의 OH 라디칼과 산소 원자와 먼저 반응해 헵탄의 1차 산화 반응을 억제시키며, 이로 인해 2차 산화반응의 시작점 즉 점화시기가 지연되는 것이다.

Fig. 4는 헵탄과 톨루엔의 혼합비별 크랭크 앵글에 따른 온도 변화를 나타낸 그림이다. 헵탄의 비율이 증가할수록 2차 산화 반응 즉 점화시기가 빨라짐

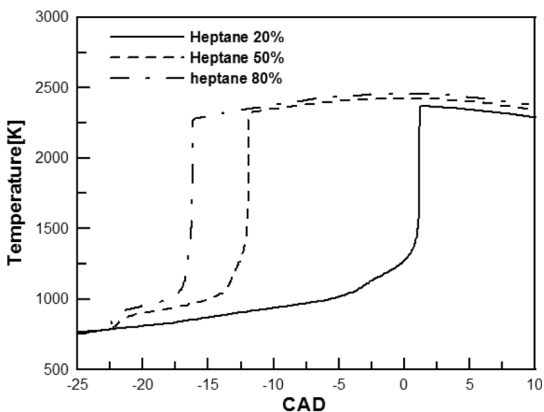


Fig. 4. Temperature with mixture ratio(heptane 20%, 50%, 80%).

은 물론 1차 산화시기도 빨라지는 것을 알 수 있다. 더욱이 헵탄이 20%인 경우 1차 산화 반응이 보이지 않으며 헵탄의 양이 증가할수록 1차 산화 반응에 의한 온도증가량이 증가하여 2차 산화 반응을 진각시킨다. 즉 점화시기를 결정짓는 가장 중요한 인자는 온도로 보여지며, 이 온도는 1차 산화반응에 큰 영향을 받는다. 이렇게 헵탄/톨루엔 혼합연료는 혼합비에 따라 점화시기가 변하게 되며, 이로 인해 HCCI 엔진의 점화시기의 조절이 가능하다.

Fig. 5는 헵탄의 1차 산화 반응의 주요 생성물로 2차 산화반응에 가장 큰 영향을 미치는 OH 라디칼 생성에 가장 큰 영향을 미치는 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 라디칼을 표시한 것이다. 헵탄의 비율에 따라, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 생성시기에서 큰 차이를 보이는데 이것은 1차 산화시점을 나타내며 소멸시점은 2차 산화 시점을 나타낸다. 즉 앞에서 말한바와 같이 톨루엔의 비율이 증가할수록 헵탄의 산화에 의해 생성되는 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>의 양이 줄어들며 생성되는 시간 또한 매우 길어지게 된다. 이것은 1차 산화와 2차 산화시점의 차이의 주된 원인이 되며, 생성량에서도 큰 차이를 보이는데 이것은 1차 산화시점에서의 온도 증가에 큰 영향을 미친다. 더욱이 헵탄의 비율이 각각 50%와 80%일 때를 비교해 보면 생성 시점의 차이는 거의 없지만 소멸 시점에서 매우 큰 차이가 생기는 것을 확인할 수 있다. 이것은 앞에서 언급한바와 같이 톨루엔의 탈수소 반응에 의해 다량의 OH 라디칼과 O<sub>2</sub> 분자가 소모되어 헵탄의 1차 산화반응에 필요한 OH라디칼과 O<sub>2</sub>분자가 부족하여 1차 산화 반응 시간이 길어지게 되는 것이며, 이것은 결국 2차 산화 반응이 늦어지게 되는 주요 원인이 되는 것이다. 이 두 가지 원인에 의해 혼합연료의 혼합비에 따라 점화 시기가 변하며, 이 점을 이용하여 HCCI 엔진의 점화시기를 조절할 수 있다.

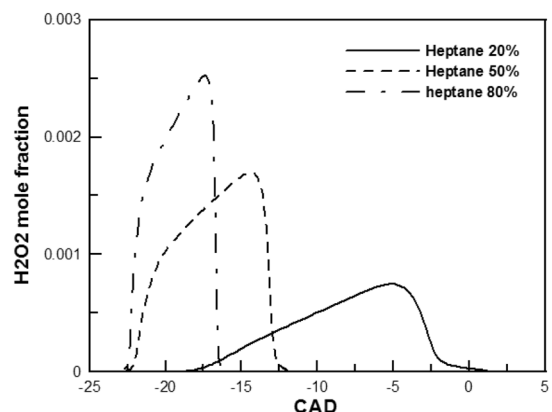


Fig. 5. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> radical mole fraction with mixture ratio (heptane 20%, 50%, 80%).

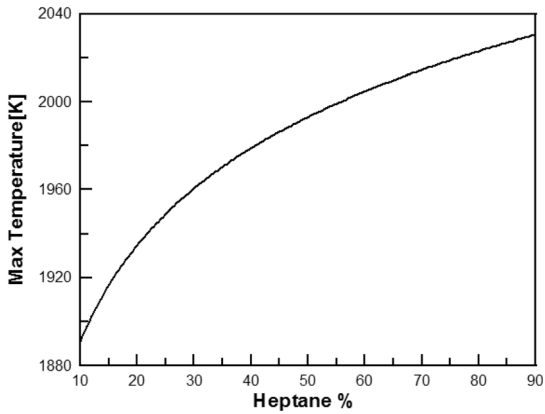


Fig. 6. Max temperature with mixture ratio.

Fig. 6은 혼합연료의 조성에 따른 엔진 연소실내 최고 온도를 표시한 것이다. 헵탄의 조성이 증가할수록 온도가 증가하는 경향을 보이는데 이는 각 연료의 발열량의 차이에 의한 것으로 사료된다. 실린더 내 최고 온도는 배출가스 중 NO<sub>x</sub>의 생성과 매우 민감한 부분으로, HCCI 엔진 연소의 경우 저온 연소를 바탕으로 저 NO<sub>x</sub>가 큰 장점 중에 하나이기 때문에 온도 증가에 매우 민감하지만 헵탄의 비율이 90%인 경우에서도 NO<sub>x</sub>가 거의 생성되지 않는 것을 확인 하였다.

#### 4.2. EGR률에 따른 연소 특성

EGR률에 따른 디젤 연소특성을 해석하기 위해, 헵탄 65%, 톨루엔 35%의 혼합연료를 대상으로 계산을 수행하였다. 계산시에 당량비는 0.3, 초기온도는 초기온도 값이 변수인 Fig. 8을 제외하고 380 K으로 고정하여 수행하였으며, 엔진 회전수는 900RPM으로 고정하였다.

Fig. 7은 EGR률에 따른 화염온도와 NO의 배출량을 나타낸 것이다. EGR률이 증가함에 따라 화염온도는 감소하는 것을 보이며 NO 역시 온도와 같은 경향을 보인다. 이런 결과는 EGR 가스의 CO<sub>2</sub>의 영향에 의한 온도 감소가 주된 원인으로 이로 인해 NO의 생성량 역시 감소하는 것을 알 수 있다. 특히 EGR률이 10%까지는 NO의 양이 급격히 감소하며 그 이후에는 감소율이 작아지는 것을 알 수 있다. NO의 경우 온도의 영향을 가장 많이 받는데 EGR률이 10%일 때의 화염온도는 1,800 K인데 이 사실로부터 1,800 K 이상에서 온도가 증가하면 NO의 발생량이 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 즉 화염온도를 1,800 K 이하로 제어하는 경우 NO의 발생량을 크게 줄일 수 있으며, 특히 EGR률을 10% 이상으로 제어할 경우 NO 생성량을 더욱 크게 저감할 수 있다.

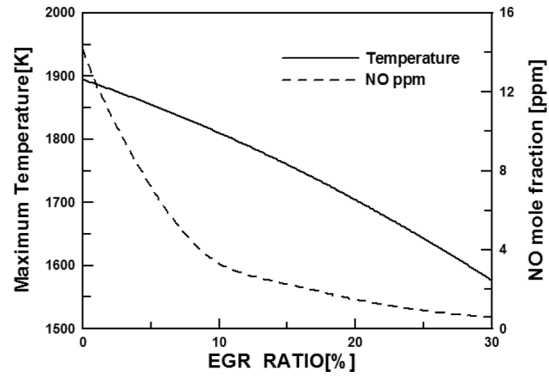


Fig. 7. Maximum temperature and NO mole fraction according to EGR ratio.

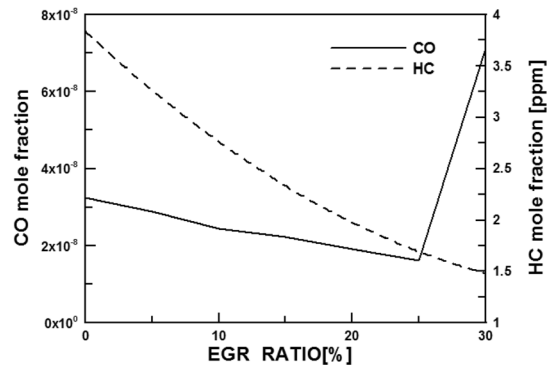


Fig. 8. CO and HC mole fraction with EGR ratio.

Fig. 8은 EGR률에 따른 CO와 HC의 생성량을 나타낸 것이다. CO의 경우 EGR률이 증가할수록 감소하다가 EGR률이 25%가 되는 지점에서 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 EGR 가스에 포함된 H<sub>2</sub>O에 의해 OH 라디칼의 생성량이 증가하여 CO가 CO<sub>2</sub>로 산화하는 반응이 증가하여 EGR률이 25%이 하인 지점에서 CO의 발생량이 감소하나 25% 이후에서는 화염온도가 낮아져 불완전 연소가 급격히 증가하여 CO의 생성량이 급증하는 것으로 사료된다. 하지만 대부분의 실험 결과에서는 EGR률이 증가하면 CO가 증가하는데 이것은 EGR 쿨러로 인하여 배출가스에 포함되어 있는 H<sub>2</sub>O가 응축되어 엔진내로 들어가지 않기 때문이다. 그리고 HC의 경우 EGR률이 증가할수록 감소되는 것을 알 수 있으며 그 양은 EGR률이 증가함에 따라 꾸준히 감소하는 것을 확인 하였다. 이것은 EGR률이 증가할수록 엔진내로 들어가는 혼합가스의 연료의 양이 감소하기 때문으로 사료된다.

Fig. 9는 EGR 20%를 기준으로 초기 온도의 변화에 따른 최고 온도와 NO의 생성량을 나타낸 그림이다. EGR의 경우 쿨링의 정도에 따라 온도에 영향을 미치며, 온도가 높아질수록 NO의 생성량에 큰 영향

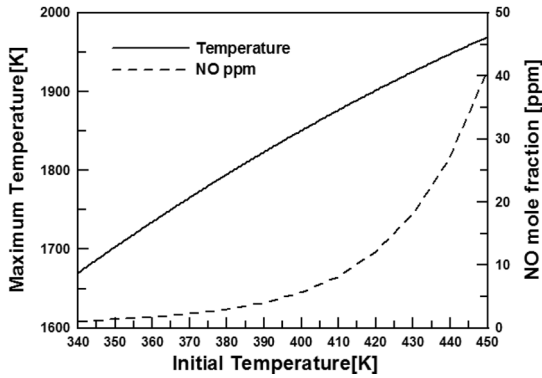


Fig. 9. Maximum temperature and NO mole fraction according to initial temperature.

을 미치는 것을 알 수 있다. 특히 초기온도가 390 K 이상일 경우 화염 온도가 1,800 K 이상이 되어 NO의 생성량이 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 물론 기존의 디젤 엔진에 비해서는 매우 작은 양이지만, 초기 온도의 경우 점화시기에도 큰 영향을 미치기 때문에 EGR가스의 쿨링은 필수적이며 EGR가스를 포함한 혼합기 온도의 조절은 매우 중요한 인자이다. 그리고 초기 온도 증가량에 비해 화염온도의 증가량이 다소 작은 양이지만 이후 화염온도가 더욱 증가하면 NO의 생성량은 매우 크게 증가하기 때문에 초기 온도를 일정 이하로 낮추어야 한다.

Fig. 10은 EGR률 20%일 때 초기 온도에 따른 최고 압력과 점화시기를 나타낸 그림이다. 점화 시기는 총 열발생률이 10%가 되는 지점으로 계산하였다. 헵탄의 경우 저온 산화 과정에서 전체 열 발생률의 5%정도의 열을 발생시키기 때문에 10%지점을 2차 산화 반응 시점 즉 점화시기로 결정하였다. 최고 압력을 보면 초기온도가 증가할수록 그 값이 작아지는 것을 확인 할 수 있는데 이것은 초기 온도의 증가로 인해 연소가스의 온도가 더 빠르게 증가하여 점화시기가 빨라지기 때문으로 사료된다. 이것

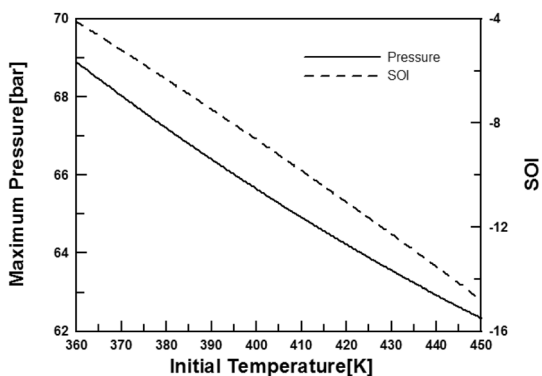


Fig. 10. Maximum temperature and start of ignition according to initial temperature.

은 초기온도가 증가할수록 점화시기가 빨라지는 것을 통해 확인 할 수 있는데 점화시기가 빨라짐에 따라 최고 압력이 낮아지므로 엔진의 출력이 저하될 수 있기에 이점을 고려하여야 한다.

## 5. 결론

본 연구는 HCCI디젤 엔진 해석을 위한 디젤 대용 연료인 헵탄/톨루엔 혼합연료의 연소 특성을 살펴보기 위하여, 제안된 헵탄/톨루엔 디젤대용연료의 반응기구를 이용하여 혼합연료의 혼합률 및 EGR률에 따른 연소 특성을 규명하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 헵탄/톨루엔 혼합연료는 헵탄의 양이 증가할수록 점화시기가 빨라지는데, 이것은 헵탄의 1차 산화 반응에 의한 온도증가 때문이다.
- 2) 헵탄/톨루엔 혼합연료의 연소는 헵탄의 산화과정에 의해 시작되어지며, 이후 톨루엔의 영향을 받아 2차시기 즉 점화시기가 결정되어 진다.
- 3) HCCI 엔진에서 EGR률을 증가시키면 화염 온도가 낮아져 NO의 발생량을 줄이지만, EGR률이 25% 이상에서는 CO의 발생량이 급격히 증가한다.
- 4) CO의 경우 EGR률이 높은 조건에서는 화염온도가 1,600 K 이하로 내려면 발생량이 급격히 증가하지만, 이것은 초기온도를 높이는 방법으로 해결할 수 있을 것으로 사료된다.

## 후기

본 연구는 산업자원부 지정 인하대학교 자동차동력계부품 지역혁신센터의 지원에 의한 것입니다.

## 참고문헌

- [1] Igor Orlandini, Andre Kulzer, Frank Weberbauer, Martin Rauscher, "Simulation of Self Ignition in HCCI and Partial HCCI Engines Using a Reduced Order Model", SAE paper No. 2005-01-02159, 2005
- [2] Yong Sun, Rolf D. Reitz, "Modeling Diesel Engine NOx and Soot Reduction with Optimized Two-Stage Combustion", SAE paper, No. 2006-01-0027, 2006
- [3] F.maroteaux, L. Noel., "Development of a Reduced N-heptane Oxidation Mechanism for HCCI Combustion Medeling", Combustion and Flame, Vol. 146, No. 1-2, pp. 246-267, 2006
- [4] Zhaolei Zheng, Mingfa Yao, "Numerical Study on

- the Chemical Reaction Kinetics of N-heptane for HCCI Combustion Process”, *Fuel*, Vol. 85, No. 17-18, pp. 2605-2615, 2006
- [5] Wonjun Lee, Seungro Lee, Chang-Eon Lee, “A Study on the Detailed Diesel Surrogate Chemical Mechanism for Annalysis of HCCI Engine”, *Transaction of KSAE*, in press, 2011
- [6] Johan Andrae, David Johansson, Pehr Bjornbom, Per Risberg, Gaautam Kalghatgi, “CO-oxidation in the Auto-ignition of Primary Reference Fuels and N-heptane/Toluene Blends”, *Combustion and Flame*, Vol. 140, No. 4, pp. 267-286, 2005
- [7] J.J.Hernandez, J. Sanz-Argent, J.Benajes, S.Molina, “Selection of a Diesel Fuel Surrogate for the Prediction of Auto-ignition under HCCI Engine Conditions”, *Fuel*, Vol. 87, No. 6, pp. 655-665, 2008
- [8] Kee, Robert J., Fran M. Rupley, James A. Miller, *CHEMKIN-II: A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas-Phase Chemical Kinetics*, SAND89-8009, Sandia National Laboratories, Livermore, California, 1989
- [9] Heywood, John B., *Internal Combustion Engine Fundamentals.*, pp. 678-680, McGraw-Hill Inc, 1988
- [10] J.C.G. Andraee, T.Brinck, G.T.Kalghatgi, “HCCI Experiments with Toluene Reference Fuels Modeled by a Semidetailed Chemical Kinetic model”, *Combustion and Flame*, Vol. 155, No. 4, pp. 696-712, 2008

---

접수일 : 2010. 12. 27  
심사완료일 : 2011. 06. 11