

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2015.39.12.945>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

혼합비율 및 압력 변화가 바이오매스 합성가스의 점화지연 시간에 미치는 영향

심태영* · 강기중* · Xingcai Lu** · 최경민** · 김덕줄*

* 부산대학교 기계공학부 , ** 상해교통대학교 기계공학부 내연기관 연구실

Effects of Fuel Composition and Pressure on Autoignition Delay of Biomass Syngas

Tae Young Shim*, Ki Joong Kang*, Xingcai Lu**, Gyung Min Choi** and Duck Jool Kim*

* School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.,

** School of Mechanical and Power Engineering, Institute of Internal Combustion Engine, Shanghai Jiao Tong Univ.

(Received July 27, 2015 ; Revised September 8, 2015 ; Accepted September 29, 2015)

Key Words: Ignition Delay(점화지연), Biomass Syngas(바이오매스 합성가스), Homogeneous Charge Compression Ignition(균일예혼합압축착화)

초록: 본 연구에서는 바이오매스 합성가스를 모사하여 합성가스의 주요성분에 따른 자착화 특성을 실험 및 수치적으로 고찰하였으며, 온도, 혼합물의 조성, 압력의 변화가 자착화 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 충격파관(Shock Tube)을 이용하여 모사 합성가스의 점화지연 시간을 측정하였고, 수치해석은 실험 결과 검증과 연소과정 중 중간화학종 분석을 위해 상용프로그램인 CHEMKIN-PRO를 사용하였다. 모든 온도 조건에서 혼합물 내의 수소의 몰 비율이 증가함에 따라 점화지연 시간이 감소하는 현상을 확인할 수 있었다. 1150K 이상의 온도 조건에서 압력이 증가함에 따라 점화지연 시간이 감소하는 현상을 확인할 수 있었다. 하지만 1150K 이하의 온도 조건에서는 압력이 증가함에 따라 점화지연 시간이 증가하는 현상을 확인할 수 있었다.

Abstract: The autoignition characteristics of biosyngas were investigated both numerically and experimentally. The effects of the temperature, gas composition, and pressure on the autoignition characteristics were evaluated. A shock tube was employed to measure the ignition delay times of the biosyngas. The numerical study on the ignition delay time was performed using the CHEMKIN-PRO software to validate the experimental results and predict the chemical species in the combustion process. The results revealed that the ignition delay time increased with an increase in the hydrogen fraction in the mixture. Under most temperature conditions, the ignition delay time decreased with a pressure increase. However, the ignition delay time increased with an increase in pressure under relatively low temperature conditions.

- 기호설명 -

P : 압력
T : 온도
 γ : 비열비
w : 몰 질량
S : 점화지연 민감도

τ : 점화지연 시간
k : 반응속도 상수

하첨자

1 : 충격파 생성 전 Driven Section 영역
2 : 충격파 생성 전 Driver Section 영역
3 : 반사된 충격파가 통과한 영역
+ : A-factor 2배
- : A-factor 0.5배

† Corresponding Author, choigm@pusan.ac.kr

1. 서론

최근 전 세계적으로 지구 온난화 및 대기오염 등의 환경문제로 인해 EURO 6, Tier 4와 같은 환경규제가 강화되어져 가고 있다. 이에, 전 세계적으로 내연기관의 효율 향상 및 오염물질 배출 저감 방법에 대한 관심이 높아지고 있으며 많은 연구가 수행되고 있다.

최근 기존의 가솔린엔진(SI)과 디젤엔진(CI)의 장점을 결합한 형태의 엔진인 균일예혼합압축착화(Homogeneous Charge Compression Ignition, HCCI)엔진에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. HCCI엔진은 CI엔진처럼 압축열을 이용하여 점화하는 방식을 사용하기 때문에 SI엔진에 비해 높은 효율을 기대할 수 있다. 또한 균일한 예혼합기 형성을 통해 연소 시 국소 고온부를 차단하여 CI엔진의 문제점인 질소산화물 및 입자상물질 발생을 줄일 수 있다는 장점을 가진다.^(1,2) 하지만 HCCI엔진의 운전영역은 저부하와 고부하에서 제한된다. 저부하에서는 낮은 연소온도로 인하여 일산화탄소와 탄화수소가 과다 배출되고 고부하에서는 급속연소와 연소압력 과다상승으로 엔진 손상 및 소음이 유발된다. 따라서, HCCI방식을 발전용 엔진과 같은 중부하, 정속엔진에 사용하기 위해 연료조성 조절 및 압력과 당량비 조절을 통하여 점화지연을 제어하는 연소제어기법에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. Song, J. 등의 저온 연소 조건에서 n-heptane과 n-butanol 혼합연료의 혼합비율에 따른 점화지연특성에 대한 연구에서는 n-heptane의 함량이 증가할수록 저온에서 점

화지연이 짧아진다고 보고되었고,⁽³⁾ Yang, Z. 등은 디젤엔진에서 수소를 6% 첨가하였을 때 열방출율이 높아지고, NOx 배출은 증가하고, PM은 감소한다고 보고하였다.⁽⁴⁾

한편 화석연료의 고갈문제가 대두됨에 따라 대체연료에 대한 많은 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽⁵⁻⁷⁾ 대체연료는 기존의 내연기관 구조에 큰 변경 없이 적용이 가능하며 상용화까지 기간이 짧다는 장점을 가지고 있다.

바이오매스 합성가스(H₂/CO/CH₄)는 나무, 볏짚 등의 섬유소 식물체의 가스화 과정과 음식물 쓰레기, 축산 폐기물과 같은 유기성 폐기물의 발효 과정을 통해 얻을 수 있는 친환경 연료이다.⁽⁸⁾ 지구상에서 1년간 생산되는 바이오매스는 석유의 매장량과 거의 동일하므로 적절하게 사용한다면 화석연료와 같은 고갈의 염려가 없다는 장점을 가지고 있다. 바이오매스 합성가스의 경우 수소(H₂)와 일산화탄소(CO)가 대부분이어서 연소효율과 배기가스 배출성능이 뛰어난 것으로 알려져 있으나, 주성분인 수소의 경우 앞서 언급한 바와 같이 다른 일반 탄화수소 계열의 연료에 비해 연소속도가 빠르며 착화특성이 상이하어 연료 혼합물에서 수소의 비율이 변화함에 따라 합성가스의 착화특성에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.^(4,9,10) 때문에 HCCI엔진에서 바이오매스 합성가스의 사용을 위해서는 기초착화특성에 대한 연구가 필수적이다.

따라서 본 연구에서는 친환경 대체에너지원으로 관심이 모아지고 있는 바이오매스 합성가스를 HCCI엔진의 연료로 사용하기 위한 기초연구로써 바이오매스 합성가스를 모사한 합성가스의 혼합비율 변화

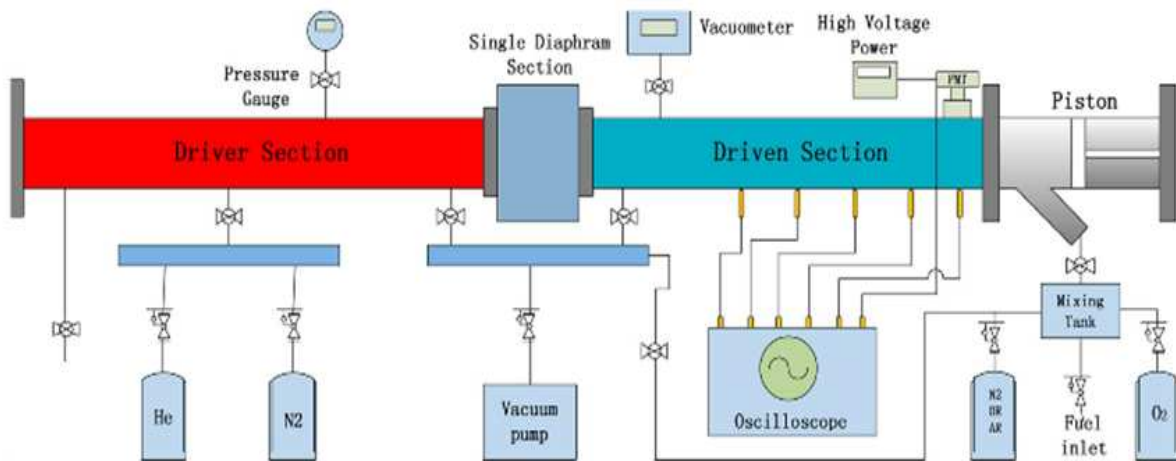


Fig. 1 Schematic of shock tube system

와 압력 변화가 점화지연에 미치는 영향에 대해 실험 및 수치적으로 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 충격파관(Shock Tube)

충격파관은 설정된 온도와 압력으로 예혼합된 연료/산소/희석기체 혼합기에 대해 압축 및 폭발 행정을 이상적으로 모사할 수 있는 장치이다.

Fig. 1은 본 연구에 사용된 충격파관 구동 시스템을 상세히 나타낸 그림이다.⁽¹¹⁾ 고온에서 예혼합 압축착화 연구를 위해 사용된 본 실험장치는 Driver Section과 Driven Section 두 부분으로 이루어져 있다. Driver Section에 높은 압력이 형성되면 판막(Diaphragm)이 파괴되면서 충격파를 생성하게 된다. 이 때 생성된 충격파가 Driven Section으로 전파되고, 예혼합된 연료가 충격파에 의해 압축되어 자착화를 일으키게 된다. Driven Section 오른쪽에 위치한 피스톤은 연료 주입을 위한 개폐장치로 사용된다. 본 실험에 사용된 충격파관에 대한 자세한 제원을 Table 1에 나타내었다.

2.2 실험방법 및 실험조건

2.2.1 실험방법

본 연구에서는 바이오매스 합성가스의 주 구성 성분인 수소(H₂), 일산화탄소(CO), 메탄(CH₄)을 연료로 사용하였다. 혼합물 내 메탄의 농도를 5 mol.%로 고정된 상태에서 수소와 일산화탄소의 비율을 변화시키며 실험이 진행되었으며 판막(Diaphragm)을 여러 겹 중첩시켜가며 압력 변화를 조절하였다. 먼저 Driver Section과 Driven Section의 사이에 판막을 넣은 다음 두 Section을 진공펌프를 이용하여 진공상태로 만든다. 두 Section이

충분히 진공상태가 되었다고 판단되면 Driven Section에 연료를 주입한다. 연료 주입이 완료되면 Driver Section에 Driver Gas로 헬륨(He)를 주입한다. Driver Section이 원하는 압력에 도달하게 되면 판막이 파괴되면서 충격파가 생성되고, 이 때 생성된 충격파가 Driven Section의 혼합물을 압축하여 자착화를 일으키게 한다. Driven Section의 압력 변화는 압력 변환기(PCB 113B26)를 사용하여 측정하였으며, OH 라디칼은 광전자 증배관(Photomultiplier)을 사용하여 측정하였다.

압축 온도는 Driver Section과 Driven Section의 압력비를 통하여 조절되며, 다음과 같은 충격파 방정식을 통해 계산되어진다.⁽¹²⁾

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{2\gamma_1 M^2 - (\gamma_1 - 1)}{\gamma_1 + 1} \left[1 - \frac{(\gamma_2 - 1)(M^2 - 1) \sqrt{(\gamma_1 w_2 T_1) / (\gamma_2 w_1 T_2)}}{M(\gamma_1 + 1)} \right]^{2\gamma_2 / (1 - \gamma_2)} \quad (1)$$

$$\frac{P_3}{P_1} = \frac{[2\gamma_1 M^2 - (\gamma_1 - 1)] [(3\gamma_1 - 1)M^2 - 2(\gamma_1 - 1)]}{(\gamma_1 + 1) [(\gamma_1 - 1)M^2 + 2]} \quad (2)$$

$$\frac{P_3}{P_1} = \frac{[2(\gamma_1 - 1)M^2 + (3 - \gamma_1)] [(3\gamma_1 - 1)M^2 - 2(\gamma_1 - 1)]}{(\gamma_1 + 1)^2 M^2} \quad (3)$$

2.2.2 실험조건

본 연구에서는 바이오매스 합성가스의 점화특성에 큰 영향을 미치는 수소와 일산화탄소의 각각의 영향을 보기위해 임의로 합성가스의 조성을 변화시켰다. 본 연구에서 사용된 혼합물의 조성은 Table 2에 나타내었다. 압력을 5~15bar로 조절하여 점화지연의 변화를 관찰하였다.

점화지연 시간은 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 정의하였다. 점화지연시간은 반사되어 나온 충격파가 측정되는 시점으로부터 시간에 대한 OH 라디칼의 생성량이 최대가 되는 시점까지의 소요된 시간으로 정의하였으며, OH 라디칼을 - 신호로 수신하였다.^(11,13,14)

3. 수치해석방법

해석프로그램으로는 상용프로그램인 CHEMKIN-PRO를 사용하였으며 피스톤이 상사점에 도달했을 때의 압력과 온도를 초기조건으로 하는 정적

Table 1 Specifications of the shock tube

Description	
Driver Section	6m
Driven Section	5m
Inner diameter	90mm
Diaphragm	Polyethylene Tephthalate (PET)
Pressure Transducer	PCB 113B26
Interval of Transducer	333mm
OH signal	Photomultiplier

Table 2 Composition of mixtures

Composition of mixtures with H ₂ /CO mole fraction change									
Mixture	Equivalence ratio	P(bar)	H ₂ (%)	CO(%)	CH ₄ (%)	N ₂ (%)	O ₂ (%)	Ar(%)	
H ₂ 5% CO 40%	0.5	10	0.1515	1.2121	0.1515	1.5152	1.9697	95	
H ₂ 10% CO 35%	0.5	10	0.3030	1.0606	0.1515	1.5152	1.9697	95	
H ₂ 20% CO 25%	0.5	10	0.6061	0.7576	0.1515	1.5152	1.9697	95	
H ₂ 30% CO 15%	0.5	10	0.9091	0.4545	0.1515	1.5152	1.9697	95	
H ₂ 40% CO 5%	0.5	10	1.2121	0.1515	0.1515	1.5152	1.9697	95	

Composition of mixtures with pressure change									
Mixture	Equivalence ratio	P(bar)	H ₂ (%)	CO(%)	CH ₄ (%)	N ₂ (%)	O ₂ (%)	Ar(%)	
H ₂ 20% CO 25%	1.0	5	1.5094	1.8868	0.3774	3.7736	2.4528	90	
H ₂ 20% CO 25%	1.0	10	1.5094	1.8868	0.3774	3.7736	2.4528	90	
H ₂ 20% CO 25%	1.0	15	1.5094	1.8868	0.3774	3.7736	2.4528	90	

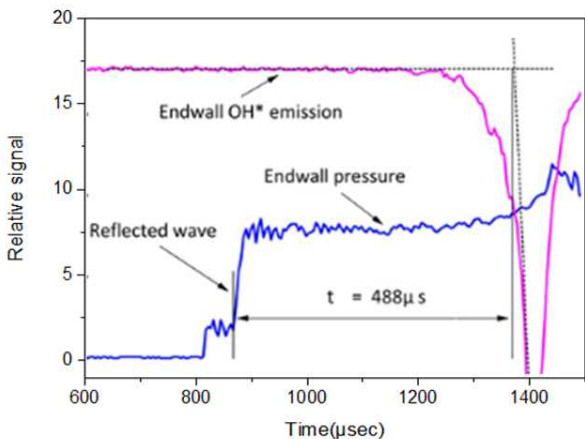


Fig. 2 Definition of ignition delay time

연소 반응 모듈을 적용하였다.⁽¹⁵⁾ 모사 합성가스 (H₂/CO/CH₄)에 대한 화학반응모델은 Wang, H. 등이 개발한 111개의 화학종과 784개의 화학반응으로 이루어진 USC Mech 2.0 모델을 사용하였다.⁽¹⁶⁾

4. 결과 및 토의

4.1 혼합비율 변화에 따른 점화 지연 관찰

Fig. 3은 바이오매스 합성가스의 혼합 비율 변화에 따른 점화 지연 시간을 나타낸 그래프이다. 당량비 0.5, 압축압력 10bar, 압축온도를 1050-1700K로 조절하였으며, 메탄의 비율을 5%로 고정된 상태에서 수소와 일산화탄소의 비율을 변화시키며 실험

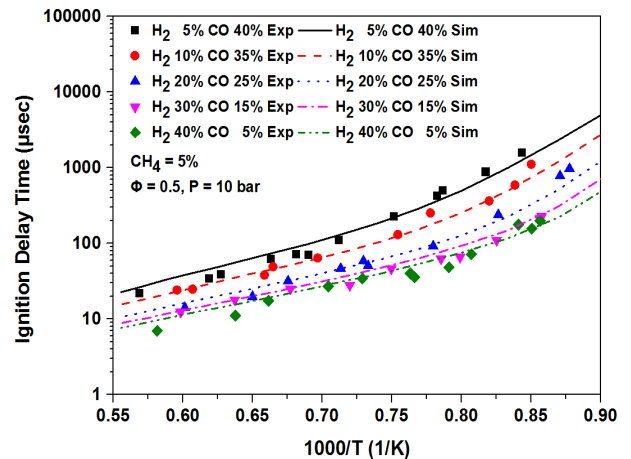


Fig. 3 Ignition delay time with different blending ratios and temperature conditions at $\phi=0.5$, $P=10\text{bar}$ condition

한 결과는 USC Mech 2.0 모델을 이용한 수치 해석 결과와 동일한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 온도가 증가함에 따라 점화 지연 시간이 감소함을 확인하였으며, 고온에서 상대적으로 반응성이 높은 수소비율이 증가함에 따라 점화 지연 시간이 감소함을 확인하였다.

Fig. 4는 압축온도 1200K에서 혼합연료 내 수소 비율의 증가에 따른 점화 지연 시간을 그래프로 나타낸 것이다. 수소 비율 증가에 따른 점화 지연 시간은 비선형적으로 변화함을 확인할 수 있다. 혼합물 내 수소의 비율이 10% 이하인 조건에서는 수소의 비율이 증가함에 따라 점화 지연

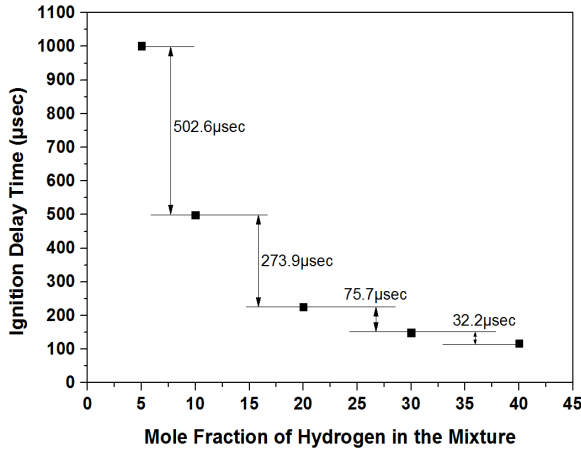


Fig. 4 Ignition delay time with changing the mole fraction of hydrogen in the blend fuel at $\phi=0.5$, $T=1200K$ and $P=10bar$ condition

시간이 급격히 감소함을 확인할 수 있다. 혼합물 내 수소의 비율이 계속해서 증가함에 따라 점화지연 시간은 감소하지만 그 변화폭은 작음을 확인할 수 있다.

4.2 압력 변화에 따른 점화지연 관찰

Fig. 5는 바이오매스 합성가스의 압력 변화에 따른 점화지연 시간을 나타낸 그래프이다. 혼합물의 조성이 수소 20%, 일산화탄소 25%, 메탄 5%이고, 당량비가 1.0, 1050-1700K범위의 압축온도 조건에서 실험한 결과를 나타내고 있다. 압력 변화에 따른 점화지연 실험 결과 역시 수치해석 결과와 동일한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 1150K 이상의 온도 조건에서는 압력이 증가할수록 점화지연 시간이 감소하는 현상을 확인할 수 있다. 하지만 1150K 이하의 온도 조건에서는 압력이 증가할수록 점화지연 시간이 증가하는 현상을 확인할 수 있다.

Hu, E. 등의 선행연구와 Burke, U. 등의 선행연구에서 단일연료로 메탄을 사용하였을 때 1050-1700K범위의 압축온도 조건에서 압력변화에 따른 역전현상은 관찰되지 않았다.^(17,18) Kéromnès, A. 등의 선행연구에서 단일연료로 수소를 사용하였을 때 동일한 압축온도 조건에서 압력변화에 따른 역전현상이 관찰되었다.⁽¹⁰⁾ Zhang, Y. 등의 선행연구에서 수소와 메탄의 혼합연료가 사용되었고, 혼합물 내의 수소 농도가 80% 이상일 때 압력변화에 따른 역전현상이 관찰되었다.⁽¹⁹⁾ 이러한 선행연구 결과를 통해 본 연구에서 관찰된 역전현상 또한 수소의 영향으로 판단된다.

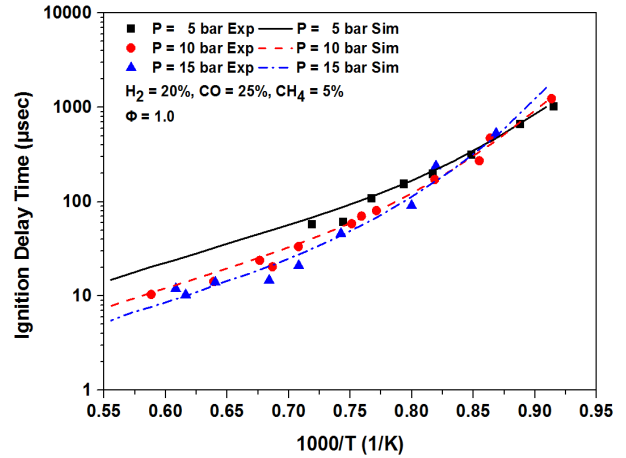


Fig. 5 Ignition delay time with different pressure and temperature conditions at H_2 20% CO 25% CH_4 5%, $\phi=1.0$ condition

4.3 민감도 분석

바이오매스 합성가스의 점화지연에 가장 민감한 반응을 알아보기 위해 민감도 분석을 수행하였다. 점화지연에 관한 민감도는 다음 식으로 정의 되어 진다.⁽²⁰⁾

$$S = \frac{\ln(\tau_+/\tau_-)}{\ln(k_+/k_-)} = \frac{\ln(\tau_+/\tau_-)}{\ln(2/0.5)} \quad (4)$$

τ_+ 는 A-factor를 2배 하였을 때의 점화지연 시간을 나타내며, τ_- 는 A-factor를 0.5배 하였을 때의 점화지연 시간을 나타낸다. 양의 값을 가지는 민감도 계수는 점화지연 시간을 증가시키는 반응이라는 것을 의미하며, 음의 값을 가지는 민감도 계수는 점화지연 시간을 감소시키는 반응이라는 것을 의미한다.

4.3.1 혼합비율 변화에 따른 민감도 분석

Fig. 6은 바이오매스 합성가스의 조성변화에 따른 민감도 분석 결과를 나타내고 있다. 민감도 분석을 통해 점화지연 민감도에 가장 큰 영향을 주는 16가지의 화학반응을 선정하였다. 점화지연에 민감한 화학 반응들은 대부분 혼합물의 초기 연쇄반응인 것을 확인할 수 있다. R31과 R33 반응은 일산화탄소의 연소에 관련된 반응으로 다른 반응들과 비교해 볼 때 작은 민감도 값을 가짐을 확인할 수 있다. 즉, 혼합물에서 수소와 메탄의 화학반응들이 상대적으로 점화지연에 대한 큰 민감도를 가짐을 확인할 수 있다. 수소 30%, 일산화탄소 15%, 메탄 5% 조건에서는 혼합물 내의

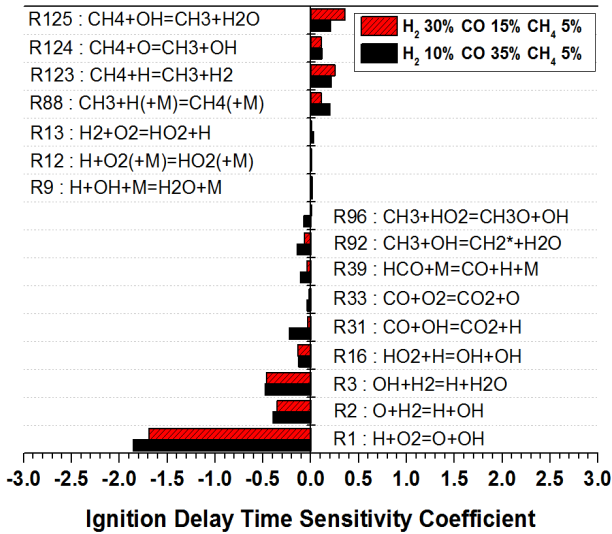


Fig. 6 Ignition delay time sensitivity analysis for various different blending ratios condition at T=1200K

수소의 비율이 큰 만큼 수소와 관련된 화학반응들이 큰 영향을 미치는 것으로 예상되며, 수소의 초기 연쇄반응인 R1, R2, R3반응이 지배적으로 점화지연에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 반면, 수소 10%, 일산화탄소 35%, 메탄 5% 조건에서는 혼합물 내의 수소의 비율이 메탄과 비교해 보았을 때 크게 차이가 나지 않는다. 때문에 수소의 초기 연쇄반응인 R1, R2, R3반응뿐만 아니라 메탄의 초기 화학반응인 R123, R124, R125반응 또한 점화지연에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

4.3.2 압력 변화에 따른 민감도 분석

Fig. 7은 바이오매스 합성가스의 압력 변화에 따른 민감도 분석 결과를 나타내고 있다. 본 민감도 분석 조건에서도 일산화탄소의 화학반응 R31, R33은 수소와 메탄의 화학반응들에 비해 작은 민감도 값을 가짐을 확인할 수 있다. 혼합물의 조성이 수소 20%, 일산화탄소 25%, 메탄 5% 이므로 수소와 관련된 화학반응들이 큰 영향을 미치는 것으로 예상되며, 수소의 초기 연쇄반응인 R1, R2, R3반응이 지배적으로 점화지연에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 1200K에서 압력이 증가함에 따라 가장 큰 민감도를 가지는 R1반응의 값이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 반면, Fig. 8을 통해 알 수 있듯이 1050K 조건에서는 수소의 초기 연쇄반응인 R1, R2, R3반응의 민감

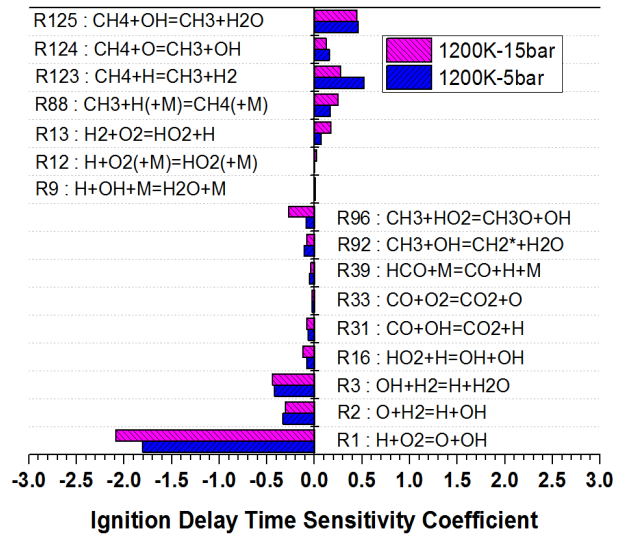


Fig. 7 Ignition delay time sensitivity analysis for various pressure condition at T=1200K, H₂ 20% CO 25% CH₄ 5%, $\phi=1.0$ condition

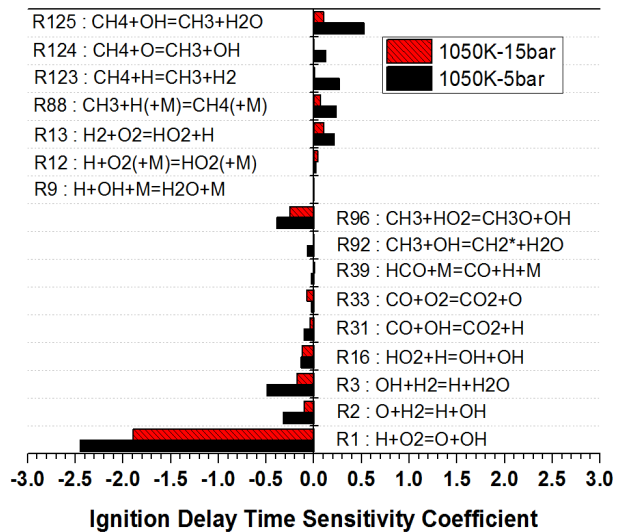


Fig. 8 Ignition delay time sensitivity analysis for various pressure condition at T=1050K, H₂ 20% CO 25% CH₄ 5%, $\phi=1.0$ condition

도가 압력이 증가함에 따라 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig.5에서 확인할 수 있었던 상대적인 저온부에서의 점화지연 시간 역전현상과 일치함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 충격파관을 이용한 실험과 수치 해석을 통해 바이오매스 합성가스의 연소특성 변화를 분석하였다. 바이오매스 합성가스의 주 성분인 수소, 일산화탄소, 메탄을 혼합한 연료를 사

용하여 다양한 연료 조성과 압력 조건에서 실험과 수치해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 혼합연료 내의 수소 비율이 증가함에 따라 점화지연 시간이 감소함을 관찰할 수 있었다. 이는 혼합물 내의 수소의 비율이 증가함에 따라 수소와 관련된 연쇄반응인 $R1(H+O_2=O+OH)$, $R2(O+H_2=H+OH)$, $R3(OH+H_2=H+OH)$ 가 지배적인 영향을 미치는 반면 상대적으로 메탄과 관련된 화학반응인 $R123(CH_4+H=CH_3+H_2)$, $R124(CH_4+O=CH_3+OH)$, $R125(CH_4+OH=CH_3+H_2O)$ 의 영향이 약해지기 때문으로 판단된다.

(2) 1150K 이상의 온도 조건에서는 압력이 증가함에 따라 점화지연 시간이 감소하는 현상을 관찰할 수 있었다. 하지만 1150K 이하의 온도 조건에서는 압력이 증가함에 따라 수소의 초기 연쇄반응의 역전현상에 의해 점화지연 시간이 증가하였다.

후 기

본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KEREP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No.20144010200780)입니다.

참고문헌 (References)

(1) Lu, X., Hna, D. and Huang, Z., 2011, Goldenberg, A. A. and Bezerghi, A., 1985, "Fuel Design and Management for the Control of Advanced Compression-Ignition Combustion Modes," *Progress in Energy and Combustions Science*, Vol. 37, pp.741~783.

(2) Yao, M., Zheng, Z. and Liu, H., 2009, "Progress and Recent Trends in Homogeneous Charge Compression Ignitio(HCCI) Engines," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 35, pp.398~437.

(3) Song, J., Kang, K., Yang, Z., Lu, X., Choi, G. and Kim, D., 2013, "The Investigation on the Ignition Delay of n-Heptane/n-Butanol Blend Fuel Using a Rapid Compression Machine at Low Temperature Combustion Regime," *J. Korean Soc. Combust.*, Vol. 18, pp.32~41.

(4) Yang, Z., Chu, C., Wang, L. and Huang Y., 2015, "Effects of H₂ Addition on Combustion and

Exhaust Emissions in a Diesel Engine," *Fuel*, Vol. 139, pp.190~197.

(5) Zhang, Y., Jiang, X., Wei, L., Zhang, J., Tang, C. and Huang, Z., 2012, "Experimental and Modeling Study on Auto-Ignition Characteristics of Methane/Hydrogen Blends Under Engine Relevant Pressure," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, pp.19168~19176

(6) Guo, H. and Neill, W. S., 2013, "The Effect of Addition on Combustion and Emission Characteristics of an n-Heptane Fuelled HCCI Engine," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, pp.11429~11437.

(7) Yang, Z., Qian, T., Yang, X., Wang, Y., Wang, Y., Huang, Z. and Lu, X., 2013, "Autoignition of n-Butanol/n-Heptane Blend Fuels in a Rapid Compression Machine Under Low-to-Medium Temperature Ranges," *Energy and Fuels*, Vol. 27, pp.7800~7808.

(8) Mckendry, P., 2002, "Energy Production from Biomass (Part 2): Conversion Technologies," *Bioresource Technology*, Vol. 83, pp.47~54.

(9) Aggarwal, S. K., Awomolo, O. and Akber, K., 2011, "Ignition Characteristics of Heptane-Hydrogen and Heptane-Methane Fuel Blends at Elevated Pressures," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, pp.15392~15402.

(10) Kéromnès, A., Metcalfe, W. K., Heufer, K. A., Donohoe, N., Das, A. K., Sung, C. J., Herzler, J., Naumann, C., Griebel, P., Mathieu, O., Krejci, M. C., Petersen, E. L., Pitz, W. J. and Curran, H. J., 2013, "An Experimental and Detailed Chemical Kinetic Modeling Study of Hydrogen and Syngas Mixture Oxidation at Elevated Pressures," *Combustion and Flame*, Vol. 160, pp.995~1011.

(11) Geng, Z., Xu, L., Li, H., Wang, J., Huang, Z. and Lu, X., "Shock Tube Measurements and Modeling Study on the Ignition Delay Times of n-Butanol/Dimethyl Ether Mixtures," *Energy and fuels*, Vol. 28, pp.4206~4215.

(12) Anderson, J. D., 1990, "Modern Compressible Flow," McGraw-Hill, New York.

(13) Gauthier, B. M, Davidson, D. F. and Hanson, R. K., 2004, "Shock Tube Determination of Ignition

- Delay Times in Full-Blend and Surrogate Fuel Mixtures," *Combustion and Flame*, Vol. 139, pp.300~311.
- (14) Rickard M. J. A., Hall, J. M. and Petersen, E. L., 2005, "Effect of Silane Addition on Acetylene Ignition Behind Reflected Shock Waves," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30, pp.1915~1923.
- (15) Reaction Design. <http://www.reactiondesign.com/products/chemkin/>
- (16) Wang, H., You, X., Joshi, A. V., Davis, S. G., Laskin, A., Egolfopoulos, F. and Law, C. K., 2007, USC Mech Version II. High-Temperature Combustion Reaction Model of H₂/CO/C₁-C₄ Compounds. http://ignis.usc.edu/USC_Mech_II.htm.
- (17) Hu, E., Li, X., Meng, X., Chen, Y., Cheng, Y., Xie, Y., Huang, Z., 2015, "Laminar Flame Speeds and Ignition Delay Times of Methane-Air Mixtures at Elevated Temperatures and Pressures," *Fuel*, Vol. 158, pp.1~10.
- (18) Burke, U., Somers, K. P., O'Toole, P., Zinner, C. M., Marquet, N., Bourque, G., Petersen, E. L., Metcalfe, W. K., Serinyel, Z. and Curran, H. J., 2015, "An Ignition Delay and Kinetic Modeling Study of Methane, Dimethylether, and Their Mixtures at High Pressures," *Combustion and Flame*, Vol. 162, pp.315~330.
- (19) Zhang, Y., Huang, Z., Wei, L., Zhang, J. and Law, C. K., 2012, "Experimental and Modeling Study on Ignition Delays of Lean Mixtures of Methane, Hydrogen, Oxygen, and Argon at Elevated Pressures," *Combustion and Flame*, Vol. 159, pp.918~931
- (20) Darcy, D., Nakamura, H., Tobin, C. J., Mehl, M., Metcalfe, W. K., Pitz, W. J., Westbrook, C. K. and Curran, H. J., 2014, "A High-Pressure Rapid Compression Machine Study of N-Propylbenzene Ignition," *Combustion and Flame*, Vol. 161, pp.65~74.