



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

급속압축팽창장치를 이용한 가솔린-
바이오디젤 혼합연료의 자발점화 특성에 관한
연구

A Study on the Autoignition Characteristics of
Gasoline/biodiesel Blended Fuel Using a Rapid Compression
Expansion Machine

울 산 대 학 교 대 학 원

기 계 공 학 과

좌 경 훈

급속압축팽창장치를 이용한 가솔린-
바이오디젤 혼합연료의 자발점화 특성에 관한
연구

지도교수 임옥택

이 논문을 공학석사학위 논문으로 제출함

2018년 6월

울산대학교 대학원

기계공학과

좌경훈

좌경훈의공학석사학위논문을인준함

심사위원 박규열(인) 

심사위원 전종업(인) 

심사위원 임옥택(인) 

울산대학교대학원

2018년6월

국문 요약

급속압축팽창장치를 이용한 가솔린- 바이오디젤 혼합연료의 자발점화 특성에 관한 연구

울산대학교 일반 대학원
기계공학과
좌 경 훈

화석 연료를 사용하는 내연기관은 석유 자원의 고갈과 함께 연소 생성물로 인한 지구온난화 및 대기 환경오염이라는 2개의 문제를 야기한다. 따라서 연구자들에게 있어 연비를 높이면서 유해한 배기 가스를 줄이는 것은 중요한 관심사였다. 그 중 가솔린 압축 착화(Gasoline Compression Ignition) 방식은 높은 효율을 가지면서 배기가스 배출을 줄일 수 있다. 그러나 가솔린의 높은 옥탄가로 인한 자발점화 내성 특성 때문에, 저부하 운전에서의 낮은 흡기 온도에서는 연소가 제대로 이루어지지 않는 문제가 있다.

본 연구에서는 가솔린 바이오 디젤 혼합 연료를 사용하여 낮은 흡기 온도에서의 GCI 방식의 문제를 개선하고 급속압축팽창장치(RCEM)을 이용해 가솔린 바이오 디젤 혼합 연료의 자발 점화(autoignition) 특성을 분석하였다.

가솔린 바이오디젤 혼합연료는 가솔린 부피 대비 바이오디젤을 20% 혼합해 사용하였으며, 연료 분사 시기 및 압축비(Compression ratio, CR)에 따른 자발점화 특성을 분석하였다.

첫 번째, 분사시기에 따른 가솔린 바이오디젤 혼합연료의 자발점화 특성을 알아보았으며 압축비는 12로 고정한 후 분사시기를 -49° CA ATDC(After Top Dead Center)부터 시작시키며 실험하였다. -10° CA ATDC까지는 분사시기를 시작시킬수록 혼합연료의 자발점화 시간이 짧아졌으며 IMEP(Indicated Mean Effective Pressure)가 증가하였으나 상사점(Top Dead Center, TDC)근처에서 분사하는 경우 자발점화 시간 및 IMEP의 변화는 미비하였다.

두 번째, 압축비에 따른 가솔린 바이오디젤 혼합연료의 자발점화 특성을 알아보기 위하여 압축비는 10, 14, 16에서 실험하였으며 이 때 분사 시기는 -33° CA ATDC, -20° CA ATDC, -10° CA ATDC, -0° CA ATDC로 고정하였다. 모든 압축비 조건에서 분사시기를 시작시킬수록 자발점화 시간은 짧아지는 경향을 보였으나 IMEP를 계산할 경우 CR10과 CR16에서는 특정 분사시기에서만 높은 IMEP를 얻었으며 압축비 12와 14에서 -20° CA ATDC 에서 -10° CA ATDC의 가장 넓은 크랭크각도 범위에서 가장 좋은 IMEP 결과를 얻었다.

목 차

국문 요약.....	i
목 차.....	iii
그림 목차.....	v
표 목차.....	vii
제 1 장 서론.....	8
1.1 연구배경.....	8
1.2 연구동향.....	10
제 2 장 연구 방법.....	11
2.1 연구 목적.....	11
2.2 압축 착화 엔진 연소 이론 및 계산 방법.....	12
2.2.1 연소특성.....	12
2.2.2 연소모델.....	12
2.2.3 점화지연(Ignition delay) 계산방법.....	14
2.2.4 도시평균유효압력(Indicated Mean Effective Pressure).....	15
제 3 장 실험 장치 및 실험방법.....	18
3.1 급속압축팽창장치(RCEM).....	18
3.2 데이터 수집 장치.....	21
3.3 사용 연료.....	22
3.4 실험방법.....	25
제 4 장 실험 결과.....	27
4.1 분사 시기에 따른 가솔린 바이오디젤 혼합연료의 연소 특성.....	27
4.1.1 압력특성.....	27
4.1.2 자발점화특성-Heat release rate.....	29

4.1.3	연소특성-IMEP	35
4.2	압축비에 따른 가솔린 바이오디젤 혼합연료의 연소 특성.....	37
4.2.1	압력특성	37
4.2.2	자발점화특성-Heat release rate.....	39
4.2.3	연소특성-IMEP	42
제 5 장	결론	46
참고문헌(References)	48
Appendix	52
Abstract	65

그림 목차

Figure 2 -1 Typical CI engine heat-release-rate diagram[21].....	14
Figure 2 -2 Definition of Ignition delay.....	15
Figure 2 -3 Geometry of cylinder, piston, connecting rod, and crankshaft[21].....	16
Figure 2 -4 pressure – volume diagram.....	17
Figure 3 -1 Schematic diagram of RCEM.....	19
Figure 3 -2 Picture of RCEM.....	19
Figure 3 -3 Example of injection timing control.....	25
Figure 4 -1 In Cylinder Pressure (CR=12).....	27
Figure 4 -2 Heat release rate.....	29
Figure 4 -3 In Cylinder Pressure & Heat release rate(Inj=-49°CA ATDC) ...	30
Figure 4 -4 In Cylinder Pressure & Heat release rate(Inj=-41°CA ATDC) ...	30
Figure 4 -5 In Cylinder Pressure & Heat release rate(Inj=-33°CA ATDC) ...	31
Figure 4 -6 In Cylinder Pressure & Heat release rate(Inj=-28°CA ATDC) ...	31
Figure 4 -7 In Cylinder Pressure & Heat release rate(Inj=-20°CA ATDC) ...	32
Figure 4 -8 In Cylinder Pressure & Heat release rate(Inj=-15°CA ATDC) ...	32
Figure 4 -9 In Cylinder Pressure & Heat release rate(Inj=-10°CA ATDC) ...	33
Figure 4 -10 In Cylinder Pressure & Heat release rate(Inj=-0°CA ATDC) ...	33
Figure 4 -11 Ignition delay[ms].....	34

Figure 4 -12 In Cylinder Pressure & Volume diagram	36
Figure 4 -13 In Cylinder Pressure (CR=10).....	38
Figure 4 -14 In Cylinder Pressure (CR=14).....	38
Figure 4 -15 In Cylinder Pressure (CR=16).....	39
Figure 4 -16 Heat release rate at CR=10	40
Figure 4 -17 Heat release rate at CR=12	41
Figure 4 -18 Heat release rate at CR=14	41
Figure 4 -19 Heat release rate at CR=16	42
Figure 4 -20 In Cylinder Pressure & Volume diagram at CR=10	43
Figure 4 -21 In Cylinder Pressure & Volume diagram at CR=12	44
Figure 4 -22 In Cylinder Pressure & Volume diagram at CR=14	44
Figure 4 -23 In Cylinder Pressure & Volume diagram at CR=16	45

표 목차

Table 3 -1 Specifications of RCEM.....	20
Table 3 -2 Specifications of Pressure sensor.....	20
Table 3 -3 Specifications of displacement sensor.....	21
Table 3 -4 Specifications of gasoline and biodiesel[23].....	23
Table 3 -5 Specifications of gasoline-biodiesel blends [19].	24
Table 3 -6 Experimental conditions	26
Table 4 -1 Max Pressure at CR=12	28
Table 4 -2 Ignition Delay.....	34
Table 4 -3 Ignition Delay at CR=12	35
Table 4 -4 Max Pressure at CR = 10, 14, 16.....	37
Table 4 -5 Ignition Delay at CR=10, 14, 16.....	40
Table 4 -6 IMEP at CR=10, 12, 14, 16.....	43

제 1 장 서론

1.1 연구배경

자동차 동력기관에 가장 많은 비율을 차지하는 가솔린 · 디젤 엔진은 화석연료를 에너지원으로 사용하기 때문에 자원고갈 및 환경 문제가 항상 중요한 문제였다. 효율을 높이고 배기가스를 줄이기 위한 연구가 엔진, 동력전달장치, 소재 등의 분야에서 이루어지고 있다.

압축 착화(CI, Compression ignition)엔진 혹은 디젤엔진의 경우 효율은 높지만 입자상물질(PM, Particulate matter) 및 질소산화물(NOx)과 같은 연소생성물을 배출한다[1-2]. PM-NOx 상반관계(trade-off)[3]로 인해 NOx를 저감하기 위한 연소 자체 개량 방식은 PM을 증가시킨다. 따라서 디젤엔진 차량에는 디젤 미립자 필터(DPF,) Lean-NOx 트랩(LNT,) 및 선택적 촉매 환원 장치(SCR)와 같은 후처리 장치가 필요하다. 이러한 배기가스 제어 장치 및 기술은 복잡할 뿐만 아니라 제조 비용을 증가시킨다[4]. 따라서 엔진에서의 배기가스 감소를 위한 청정 연소 개념을 연구할 필요가 있다.

엔진 분야에서는 디젤엔진과 같이 높은 효율을 얻으면서도 가솔린 엔진처럼 적은 배기가스 배출을 위한 연소방법으로 HCCI(Homogeneous charge compression ignition) 방식, PCCI(Premixed charge compression ignition)방식, 그리고 GCI(Gasoline compression ignition) 방식 등 다양한 연소 방식들이 연구되었다. HCCI 방식의 경우 연소제어가 어려우며, PCCI의 경우 낮은 연소 온도와 이로 인한 불완전 연소 생성물인 탄화수소(HC), 일산화탄소(CO) 배출량이 많은 단점이 있다[5-10]. 이로 인해 가솔린 압축 착화(GCI) 방식은

높은 열효율 및 적은 배기가스 배출 특성으로 인해 가장 유망한 청정 연소 방법으로 관심 받고 있다[11-17]. 하지만 GCI 방식은 가솔린의 높은 옥탄가로 인한 자발 점화 내성 특성 때문에, 저부하 운전에서의 낮은 흡기 온도에서는 연소가 제대로 이루어지지 않는 문제가 있다[10,12,18].

위와 같은 문제를 해결하기 위해서 가솔린에 소량의 바이오 디젤을 첨가함으로써 자발 점화 특성을 향상시키고 높은 열효율을 유지하면서 NO_x 및 PM 배출을 낮추면서 흡기 온도 요건을 낮출 수 있음을 확인했다[19]. 또한 바이오 디젤은 신재생 연료이기 때문에 혼합연료를 준비하는 데 활용하면 온실가스 및 기타 오염 물질의 배출을 줄일 수 있다.

그러나 압축 착화 엔진에서 연소의 시작을 결정하고 연소과정을 이해하기 위해서 필요한 가솔린-바이오 디젤 혼합 연료의 점화 특성에 관한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 혼합 연료의 점화 지연(Ignition delay) 특성을 집중적으로 조사하였다.

1.2 연구동향

GCI엔진은 압축 착화 엔진에서의 높은 효율을 가능케하는 연소 개념으로 많은 연구자들이 지속적으로 연구하고 있다. 위스콘신-메디슨 대학의 Loeper et al. [21]은 전체 엔진 작동에 대한 조건들의 효과를 확인했다. 조건에는 흡기 온도, 흡기 압력, 분사 시기 및 지속 시간, 분사 압력 및 엔진 속도가 있다. 연구 결과는 낮은 질소산화물 배출과 적절한 연소 안정성을 유지하기 위해 조건들이 효율적으로 조작될 수 있음을 보여주었다.

가솔린의 이용은 질소산화물과 입자상 물질의 배출을 줄여주지만 자발 점화에 대한 높은 저항을 해결해야만 한다. 최근 연구들을 보면, 중간 범위의 세탄가와 높은 휘발성을 가지는 연료들은 저온 연소(LTC, low-temperature combustion)를 위해 유리한데, 이와 같은 특성을 가지도록 하는 방법의 하나는 가솔린과 바이오 디젤을 혼합하는 것이다[10]. Adams et al. [10]는 가솔린-바이오 디젤 혼합연료가 GCI 연소에 미치는 영향을 5 % 및 10 %의 바이오 디젤 혼합비를 사용하여 연구했다. 이 연구는 바이오 디젤과 가솔린을 혼합하여 저부하 조건에서 GCI 엔진의 필요한 흡기 온도를 낮추는 것에 중점을 두었다.

연료의 점화특성이 점화 지연(Ignition delay)에 큰 영향을 주기 때문에 엔진 효율 및 작동의 원활함, 실화(misfire), 소음 및 시동의 용이성과 같은 압축 착화 엔진 작동 특성을 결정하는데 매우 중요하다. 하지만 가솔린 바이오 디젤 혼합연료의 점화지연 특성에 대한 연구는 아직까지 많이 이루어지지 않았다.

제 2 장 연구 방법

2.1 연구 목적

본 연구에서는 급속압축팽창장치를 이용하여 분사 시기 및 압축비에 따른 가솔린 바이오디젤 혼합 연료의 자발 점화 특성을 연구한다. 이를 위해 점화 지연과 도시평균유효압력을 계산하여 실험 조건에 따른 각 조건들의 영향을 확인하고자 한다.

- ① 분사 시기에 따른 $p-\theta$ (압력-크랭크 각도) 실험 데이터를 비교 분석하고 이를 이용하여 Heat-release rate을 계산하여 GCI 엔진 연소과정에 미치는 영향을 이해한다.
- ② 분사 시기에 따른 $p-\theta$ (압력-크랭크 각도) 데이터를 이용하여 실린더 내 체적 및 도시평균유효압력(Indicated Mean Effective Pressure, IMEP)을 계산해 GCI 엔진 연소과정에 미치는 영향을 이해한다.
- ③ 압축비에 따른 $p-\theta$ (압력-크랭크 각도) 실험 데이터를 비교 분석하고 이를 이용하여 Heat-release rate을 계산하여 GCI 엔진 연소과정에 미치는 영향을 이해한다.
- ④ 압축비에 따른 $p-\theta$ (압력-크랭크 각도) 데이터를 이용하여 실린더 내 체적 및 도시평균유효압력(Indicated Mean Effective Pressure, IMEP)을 계산해 GCI 엔진 연소과정에 미치는 영향을 이해한다.
- ⑤ 실험 조건에 따른 가솔린-바이오 디젤 혼합 연료를 이용한 GCI 엔진 연소에서 결과를 비교한다.

2.2 압축 착화 엔진 연소 이론 및 계산 방법

2.2.1 연소특성

압축 착화 엔진 혹은 스파크 점화 엔진과 같은 왕복엔진의 경우 연료의 점화 질은 매우 중요하다. 압축 착화 엔진에서 일어나는 연소과정은 연료가 분사 후 증발과 동시에 고온 고압의 실린더 내부 공기와 섞이고, 이 때 온도와 압력이 연료의 점화온도 보다 높을 때 혼합기의 자발점인 점화점들이 몇 도의 크랭크 각도 지연 뒤에 발생한다. 연료 분사는 설계된 양만큼 실린더 내부로 분사될 때까지 계속되며 분사 초기에 발생한 점화점들이 이 후 분사되는 연료의 증발시간을 줄여주면서 점화 지연 시간을 단축시켜 연소가 급격하게 일어나도록 한다. 이러한 연료주입 시작과 연소 시작 사이의 시간간격을 점화지연(Ignition delay)[21]라 하며 짧은 점화지연이 압축 착화 엔진 연소에 요구된다.

2.2.2 연소모델

압축 착화 연소과정은 연료의 특성, 엔진 연소실의 설계와 연료 분사 시스템 및 엔진 작동 조건에 영향을 받기 때문에 비정상적이고 해석하기가 어렵다. 이를 위해 사용되는 방법이 연소실 내를 촬영함으로써 연소과정을 해석하는 방법과 크랭크 각도에 따른 실린더 내부의 압력을 측정하는 방법이 있다. 본 논문에 사용된 RCEM의 경우 가시화 장치가 없기 때문에, 실린더 내부의 압력을 측정함으로써 연소과정을 확인하고자 한다.

압축 착화 연소 모델은 서로 다른 물리적 및 화학적 과정에 의해 제어되는 모델로 실린더 내부 압력으로부터 계산된 Heat-release rate 개념을 통해

이해할 수 있다. 이것은 연소 과정 동안 방출되는 연료의 화학적 에너지의 비율로 정의하며 크랭크 각도에 따른 실린더 압력으로 계산된다[21].

$$HRR = \frac{dQ_n}{dt} = \left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right)p\left(\frac{dV}{dt}\right) + \frac{1}{\gamma-1}V\frac{dp}{dt} \quad (2-1)$$

$\frac{dQ_n}{dt}$ = net heat release rate

p = in - cylinder pressure

V = in - cylinder Volume

γ = the ratio of specific heats

Figure 2-1과 같이 Heat-release rate의 그래프를 통해 압축 착화 엔진의 연소를 4가지 과정으로 구분할 수 있다.

1. Ignition delay period
2. Premixed combustion
3. Mixing-controlled combustion phase
4. Late combustion phase

Ignition delay period는 연료 분사 시작과 연소 시작 사이의 기간으로 $p(\theta)$ 데이터의 분석 또는 광학적 분석방법으로 판단할 수 있다.

Premixed combustion은 점화 지연 기간 동안 자발 점화 한계 내에서 공기와 혼합된 연료가 이후 급격하게 연소하며 발생하며 높은 Heat release rate 특성을 보인다.

Mixing-controlled combustion phase는 이전 premixed combustion보다 낮은 Heat release rate 최고점에 도달 후 감소한다.

Late combustion phase에서의 열방출은 팽창 행정에서도 계속되는데, 아직 타지 않은 연료에 의해 나타나며 이를 통해 보다 완전한 연소 및 낮은 배기 가스 결과를 얻을 수 있다.

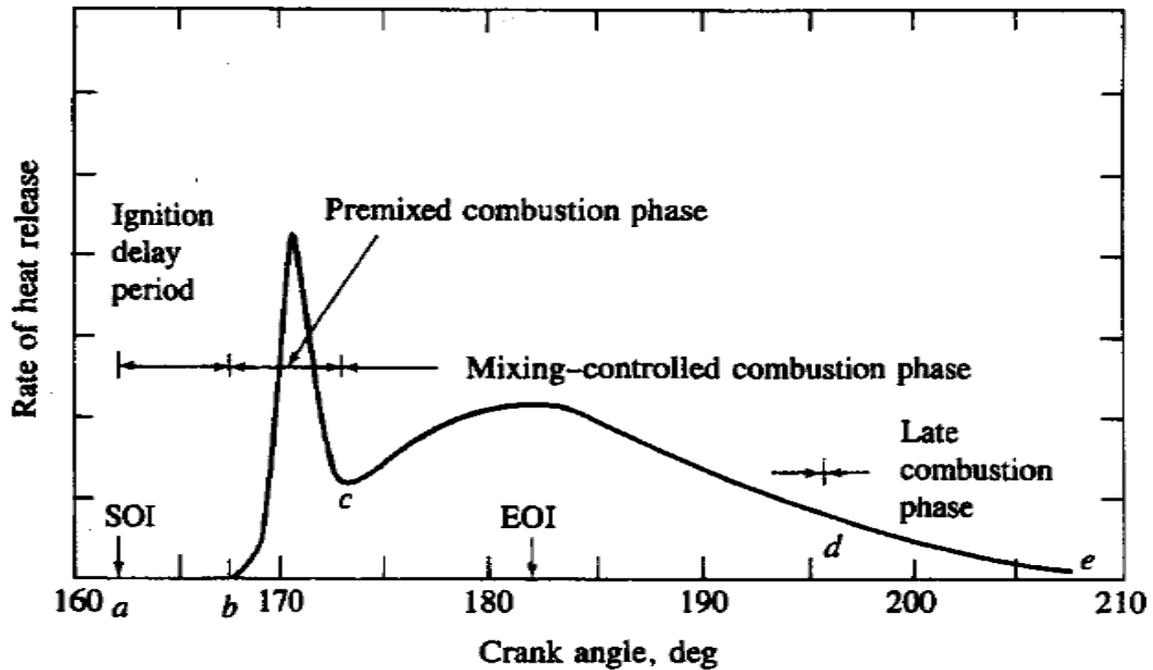


Figure 2-1 Typical CI engine heat-release-rate diagram[21]

2.2.3 점화지연(Ignition delay) 계산방법

연소실 내부로의 연료 분사 시작과 연소 시작 사이의 기간은 $p-\theta$ (압력-크랭크 각도) 그래프의 기울기 변화 또는 Heat-release rate 그래프의 기울기 변화로부터 가장 잘 확인할 수 있으며, 연료의 점화 특성 연구를 위한 점화지연은 정적연소기(Constant Volume Combustion Chamber) 혹은 RCEM을 통해 보다 쉽게 측정할 수 있다.

먼저 $p-\theta$ 그래프에서는 연료가 분사 후 증발하면서 주위의 열을 흡수하게 되고 이로 인해 압력이 감소하게 되는데 이러한 압력 감소 이후의 압력이 다시

회복되는 점을 연소가 시작되는 것으로 정의할 수 있다. 하지만 CVCC와 달리 RCEM의 경우 분사가 압축 행정 중에 일어나는 경우 이러한 압력 감소를 관찰하기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 HRR의 그래프 변화를 관찰하는 것이 더 용이하며 HRR의 그래프 변화와 $p-\theta$ 그래프에서의 압력 변화를 고려해 HRR이 20J/deg[24] 이상이 되는 곳을 연소가 시작되는 것으로 정의하였다.

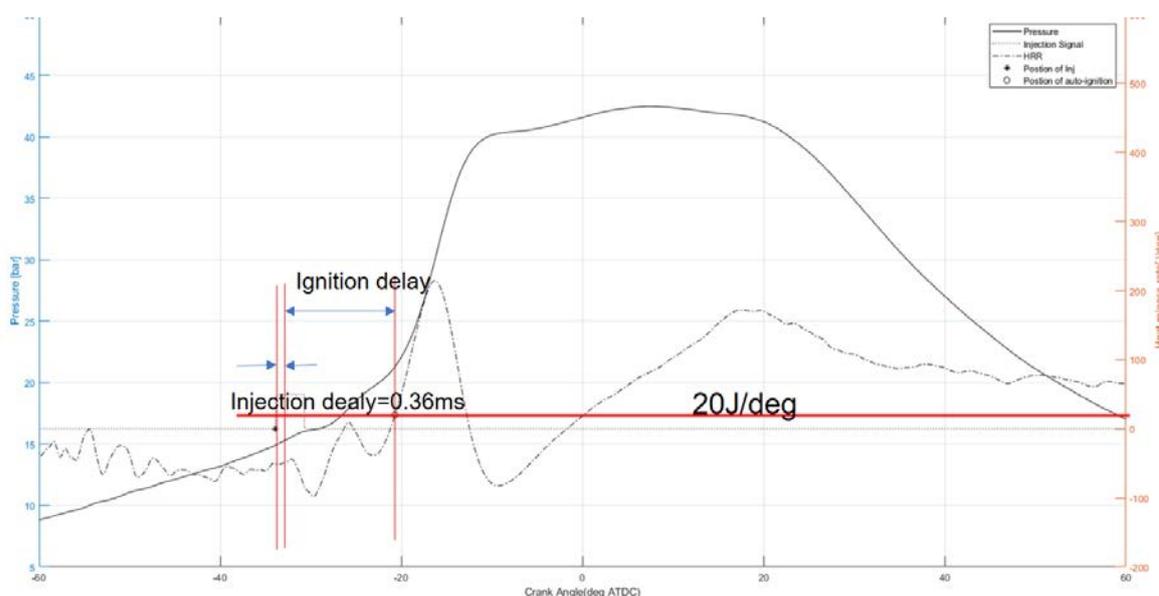


Figure 2-2 Definition of Ignition delay

2.2.4 도시평균유효압력(Indicated Mean Effective Pressure)

평균유효압력은 엔진의 성능을 평가하는데 유용한 지표 중 하나로써, 한 사이클의 $p-V$ 그래프에서의 면적을 행정체적(Swept volume)으로 나눈 값으로 계산된다[21]. 그 식은 식 2-2와 같다. 식에 사용된 데이터는 압력센서를 이용하여 얻은 실린더 내부 압력과 변위센서를 이용하여 얻은 피스톤 위치 데이터를 이용하여 수치적으로 계산하였다.

본 연구에서는 분사전략 제시를 위한 평가지표로서 사용하였다.

$$\text{IMEP} = \frac{\oint p dV}{V_d} [\text{bar}] \quad (2-2)$$

$\oint p dV = \text{Indicated work}$

$V_d = \text{swept volume}$

이 때 실린더 내 체적은 Figure 2-1과 같이 크랭크 각도에 따라 제2코사인 법칙에 의해 계산한 s 를 식 2-3에 의해 적용해 계산한다. RCEM의 특성 상 간극체적(Clearance volume)은 압축비에 따라 변경된다.

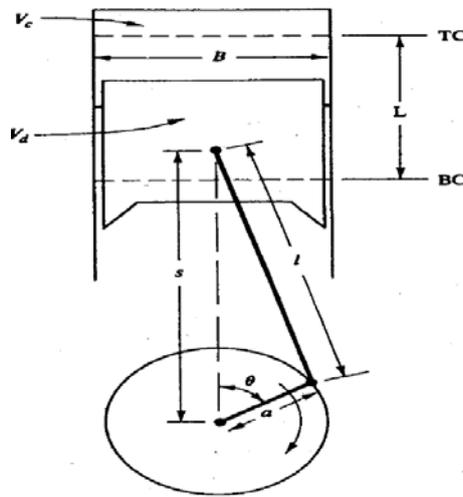


Figure 2 -3 Geometry of cylinder, piston, connecting rod, and crankshaft[21]

$$V = V_c + \frac{\pi B^2}{4} (l + a - s) \quad (2-3)$$

$V = \text{In cylinder volume}$

$V_c = \text{clearance volume}$

본 연구에서는 RCEM이 모터에 의해 구동됨에 따라 하사점(Bottom Dead Center, BDC)에서 -90° CA ATDC 까지는 클러치에 의해 차단되었던 모터의 동력이 순간적으로 전달되어 생기는 진동으로 인해 압력 데이터 측정 시

노이즈가 많이 들어가게 되어 Figure 2-3과 같이 -80° CA ATDC에서 80° CA ATDC 까지의 p-V 그래프의 면적만을 사다리꼴 수치적분법(Trapezoidal numerical integration)을 계산해 구하였다.

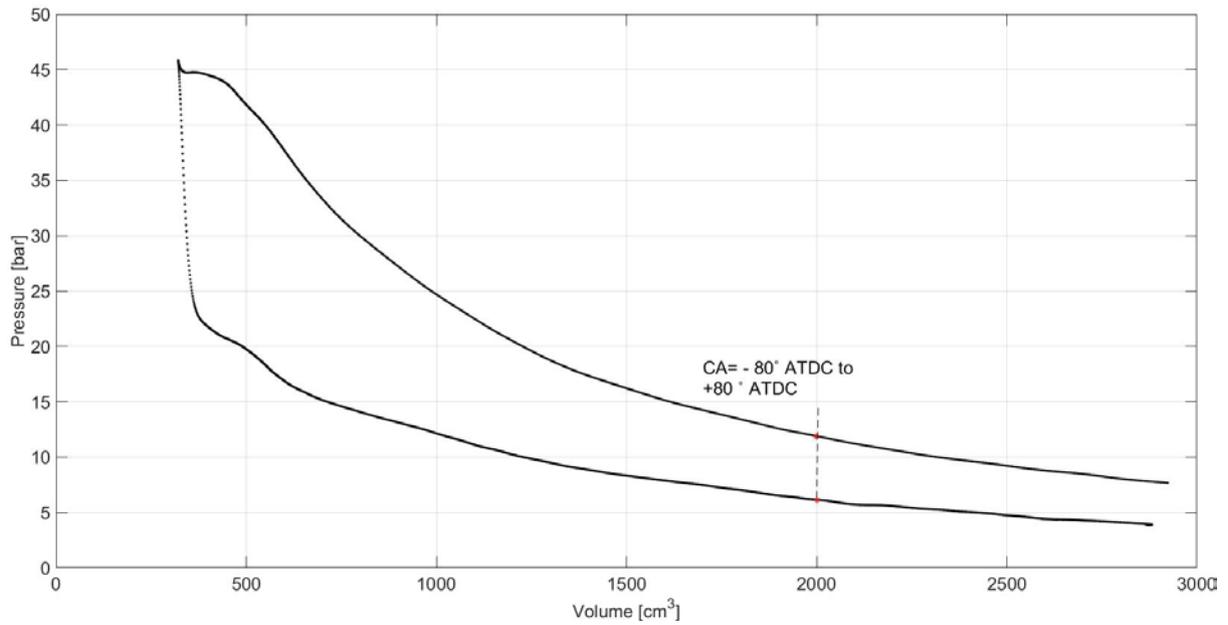


Figure 2-4 pressure - volume diagram

제 3 장 실험 장치 및 실험방법

3.1 급속압축팽창장치(RCEM)

본 연구에서는 가솔린-바이오디젤 혼합 연료의 점화지연 특성을 연구하기 위한 연소 실험을 위해 급속압축팽창장치(RCEM)를 사용하였다. RCEM은 엔진과 달리 사이클 변동이 매우 적으면서도 실제 엔진과 같이 피스톤 운동을 통한 고온 고압 분위기를 얻을 수 있어 정적 연소실(CVCC)의 단점을 보완할 수 있다. RCEM은 1 사이클만을 수행하기 때문에 잔류 가스 및 윤활유의 영향을 무시할 수 있고 동일 크랭크 위치에서 실험의 재현성이 뛰어나 뿐만 아니라 압축비, 혼합기 온도 및 실린더 벽 온도 등의 실험 조건에 변경이 자유로워 기초적인 엔진 연소 연구에 적합하다. 본 연구에 사용된 RCEM은 압축비 및 실린더 벽 온도를 변경할 수 있으며, 1사이클 동안 압력을 직접 측정할 수 있다.

RCEM은 Figure 3-1과 같이 전체 작동 및 제어에 필요한 추가 장비와 함께 설치되었으며 실제 설치 사진은 Figure 3-2와 같다. RCEM의 사양은 Table 3-1과 같다. 실린더 내 초기 온도는 실린더 벽면의 원형 밴드 히터와 흡입 라인의 예열기를 통해 273K~383K 범위에서 온도를 조절할 수 있다. RCEM 구동을 위한 전기 모터는 실험 시작 전에 제어판에 의해 구동되며 시작 신호가 발생하면 커넥팅 로드와 전동 클러치를 통해 움직이기 시작하고 압축 및 팽창 사이클이 한번 발생한다. 실린더 내의 압력은 전하 증폭기(Kistler 5018)에 연결된 압전 압력 센서(Kistler 6053C60)를 사용하여 측정하였으며 사양은 Table 3-2와 같다.

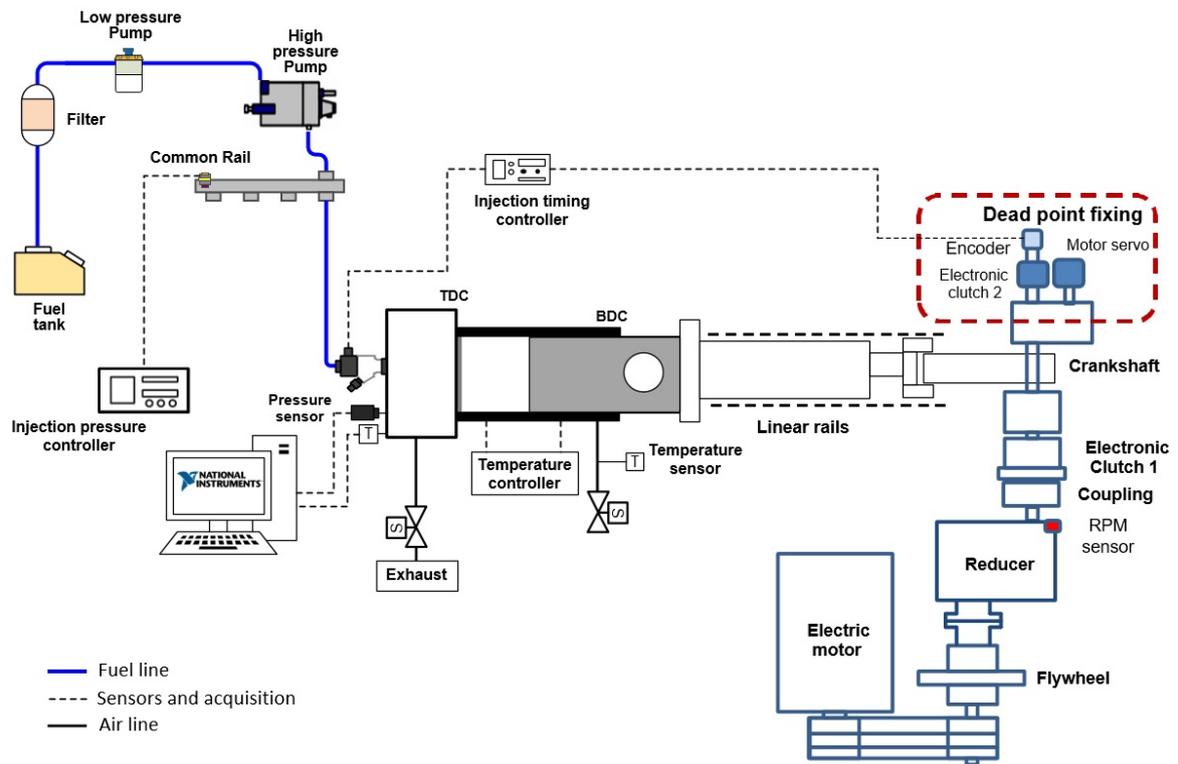


Figure 3 -1 Schematic diagram of RCEM.

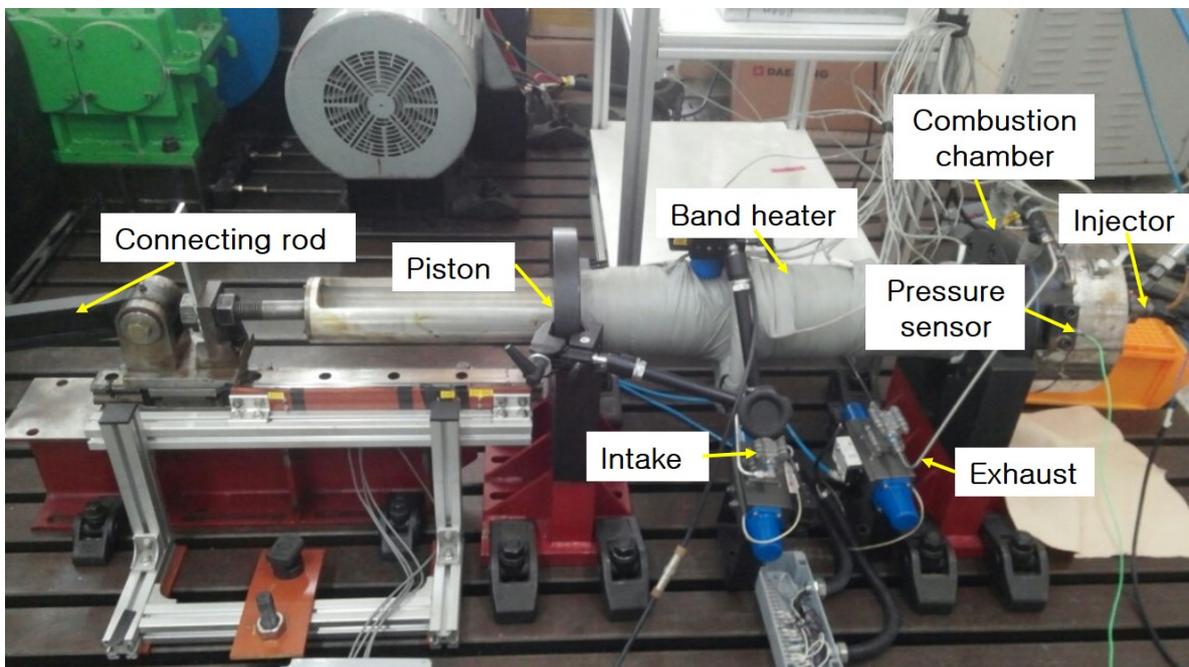


Figure 3 -2 Picture of RCEM.

Table 3 -1 Specifications of RCEM.

Bore [mm]	100
Stroke [mm]	450
Connecting Rod length [mm]	900
Maximum speed [RPM]	300
Compression Ratio	10-23.5

Table 3 -2 Specifications of Pressure sensor.

Measuring range [bar]	0...250
Calibrated sub-ranges [bar]	0...50, 0...100, 0...150, 0...250
Overload [bar]	300
Sensitivity [pC/bar]	≈ -20
Natural frequency, nominal [kHz]	≈ 160
Linearity in all ranges (at 23°C) [%/FSO]	≤ ±0,3
Acceleration sensitivity	
axial [bar/g]	< 0,0002
Radial [bar/g]	< 0,0005
Operating temperature range [°C]	-20...350
Temperature min./max [°C]	-50...400
Connector [°C]	200

3.2 데이터 수집 장치

분사 시기 제어 및 압력 데이터 취득을 위해 LabVIEW 소프트웨어를 이용하였다. 다기능 DAQ(model NI PXI-6251) 및 I/O DAQ 디바이스(model NI PXI-7813R)를 National Instruments사의 컴퓨터 (NI PXI-8106)에 설치하였다. 다기능 DAQ는 실린더 내 압력 데이터를 수집하는 데 사용되었으며, I/O DQA 디바이스는 분사 시기 변경을 위한 인젝터 제어에 사용되었다.

연료 분사 시스템은 연료 공급 시스템의 압력을 최대 1600bar까지 제어하기 위해 커먼 레일 제어기(Zenobalti ZB-1100)가 사용되었다. 인젝터는 NI 컴퓨터의 신호를 받아 Zenobalti ZB-5000를 통해 구동 시켰다. LabVIEW 소프트웨어를 통해 전압 값을 측정하였다. 피스톤의 위치를 측정하기 위해 광학 변위센서(KL3-W200)를 이용하였으며 사양은 Table 3-3과 같다.

Table 3-3 Specifications of displacement sensor.

Model type	KL3-W200
Operating range	±350mm
Sampling range	100µs(10kHz)
Resolution	5µm

다기능 DAQ 및 LabView 소프트웨어를 통해 취득한 압력, 분사, 변위 전압 신호 데이터는 MATLAB R2017b를 통해 계산하였으며 Code는 Appendix에 수록하였다.

3.3 사용 연료

바이오 연료는 미국 의회의 2007년 에너지자립 및 안보법(EISA 2007)에 의해 주목 받기 시작하여 바이오 연료 사용량을 2022년 까지 360억 갤런으로 확대하는 것을 목표로 하고 있다[22]. 이 법에서는 재래식 바이오 연료와 개량 바이오 연료로 두 가지의 재생연료를 정의하였다. 재래식 바이오 연료는 옥수수 전분으로부터 파생된 것으로 정의한다. 개량 바이오 연료는 기존 배출물 기준보다 최소 50% 적은 전 과정 온실가스(life cycle greenhouse gas)를 배출하며 옥수수 전분을 기반으로 하지 않는 재생연료를 정의한다. 이 때 바이오 디젤은 식물성 기름 또는 동물성 지방으로부터 생산된 디젤엔진용 연료를 말하며 개량 바이오 연료로 분류된다. 연료의 주요 특성에는 점화특성, 휘발성, 에너지 밀도가 있다. 자동차 엔진과 같은 왕복엔진의 경우 연료의 점화 질은 매우 중요하다. 스파크 점화(SI, Spark Ignition) 엔진과 압축 착화 엔진은 연소 방식이 다르므로 점화 특성에 대해서 다른 관점으로 고려 된다. 가솔린을 사용하는 SI 엔진의 경우 엔진 노킹을 예방하는 것이 중요하며 옥탄가를 통해 표시한다. 보다 높은 옥탄가의 연료가 노킹 저항성이 높다. 디젤을 사용하는 CI 엔진의 경우 고온 고압의 분위기에 분사된 연료는 증발과 동시에 실린더 내부 공기와 섞이고 혼합물의 자발점화를 통해 연소가 시작된다. 분무 시작과 연소 시작 사이에는 점화 지연이 생기며, 짧은 점화 지연이 CI 엔진에 요구된다[21]. 세탄가를 통해 연료의 자발점화 정도를 표시한다. 높은 세탄가의 연료가 상대적으로 짧은 점화지연을 가진다. 또한 CI 엔진에서는 점화 지연 시간 동안에 다량의 가연성 혼합물의 생성을 억제하는 휘발성이 적은 연료가 좋다.

본 실험에서는 가솔린에 바이오디젤을 혼합함으로써 GCI엔진에서의 저부하 운전 문제를 해결하고 가솔린-바이오디젤 혼합연료가 실린더 내에 직접 분사될 때, 바이오디젤 첨가가 자발 점화 특성에 미치는 영향을 조사했다.

실험에 사용된 가솔린 및 바이오디젤과 혼합물의 특성은 각각 Table 3-4, Table 3-5와 같다.

Table 3-4 Specifications of gasoline and biodiesel[23].

	Gasoline	Biodiesel
Formula	$C_nH_{1.87n}$	C18 to C19
Molecular weight	114.15	300 (approx.)
Composition (weight %)		
Carbon	85-88	78
Hydrogen	12-15	11
Oxygen	0	11
Sulfur	-	0.001-0.00024
Density (kg/L, at 15° C)	0.73	0.87
Specific gravity	0.73	0.87
Boiling point (°C)	25-230	315-350
Viscosity (mPa s at 20°C)	0.626	3-6
Lower heating value (MJ/kg)	43.8	
Latent heat of vaporization (kJ/kg)	289	-
Cetane number	-	48-65
Octane number	86-94	-
Auto ignition (°C)	257	225

Table 3-5 Specifications of gasoline-biodiesel blends [19].

	Unit	Test method	GB20
Heating value	MJ/kg	ASTM D240:2009	43.6
Lubricity	mm	ISO 12156-1:2012	236
Cloud point	°C	ISO 3015:2008	-16
Density (15°C)	kg/m ³	ISO 12185:2003	757.1

혼합 연료는 실험 직전에 준비되었으며, 80vol%의 가솔린과 20vol%의 바이오디젤을 혼합한 GB20를 사용하였다.

3.4 실험방법

본 연구에서는 가솔린 바이오디젤 혼합연료의 자발점화 특성을 조사하기 위해 급속압축팽창장치를 이용하여 분사시기와 압축비를 가변 시키며 실험을 하였다. 자세한 실험 조건은 Table 3-6과 같다.

첫번째, 점화시기에 따른 가솔린 바이오디젤의 자발점화 특성을 확인하기 위하여 LabVIEW 소프트웨어를 이용하여 점화시기를 압축비 12에서 각각 분사시기를 -49° , -41° , -33° , -28° , -20° , -15° , -10° , 0° CA ATDC(crank angle after top dead center) 로 변경하면서 실험하였다. 분사 시기는 로터리 엔코더(EP50 S8-1024)를 크랭크 샤프트에 부착해 얻은 전압 신호가 5V가 될 때를 기준으로 하여 Figure 3-3과 같이 변경하였다.

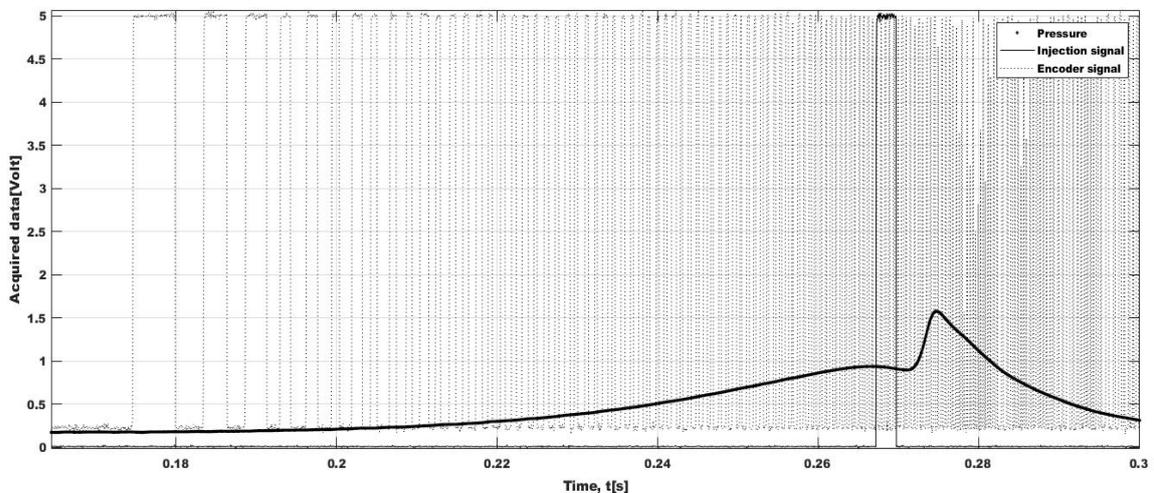


Figure 3-3 Example of injection timing control

둘째, 압축비에 따른 가솔린 바이오 디젤의 자발점화 특성을 확인하기 위하여 압축비를 10, 14, 16으로 변경하여 실험하였다. 압축비의 변경은 크랭크 샤프트를 기준으로 하여 RCEM의 실린더 위치를 변경함으로써 변경시켰다. 분사시기는 첫번째 실험결과를 토대로 -33° , -20° , -10° , 0° CA ATDC에서 실험하였다.

Table 3 -6 Experimental conditions

Fuel	GB20
Intake gas temperature [K]	323-383
Injection pressure P_{inj} [bar]	800
Injector specification [mm]	7 holes hole diameter 0.090
Equivalence crank speed [rpm]	200
Compression ratio	10,12,14,16
Injection Timing [$^{\circ}$ CA ATDC]	-49, -41, -33, -28, -20, -15, -10, 0
Premixed gas reactants	Air
Equivalence ratio	0.3
Ambient gas temperature at start of injection T_{inj} [K]	720-850

제 4 장 실험 결과

4.1 분사 시기에 따른 가솔린 바이오디젤 혼합연료의 연소 특성

4.1.1 압력특성

분사 시기에 따른 가솔린 바이오디젤 혼합연료의 연소 특성을 알아보기 위하여 크랭크각도에 따른 RCEM 실린더 내부의 압력 그래프를 비교하였다. 분사 시기는 각각 -49° , -41° , -33° , -28° , -20° , -15° , -10° , 0° CA ATDC 로 변경하였으며 압축비 CR=12에서 실험하였으며 측정 결과는 Figure 4-1과 같이 도시하였다.

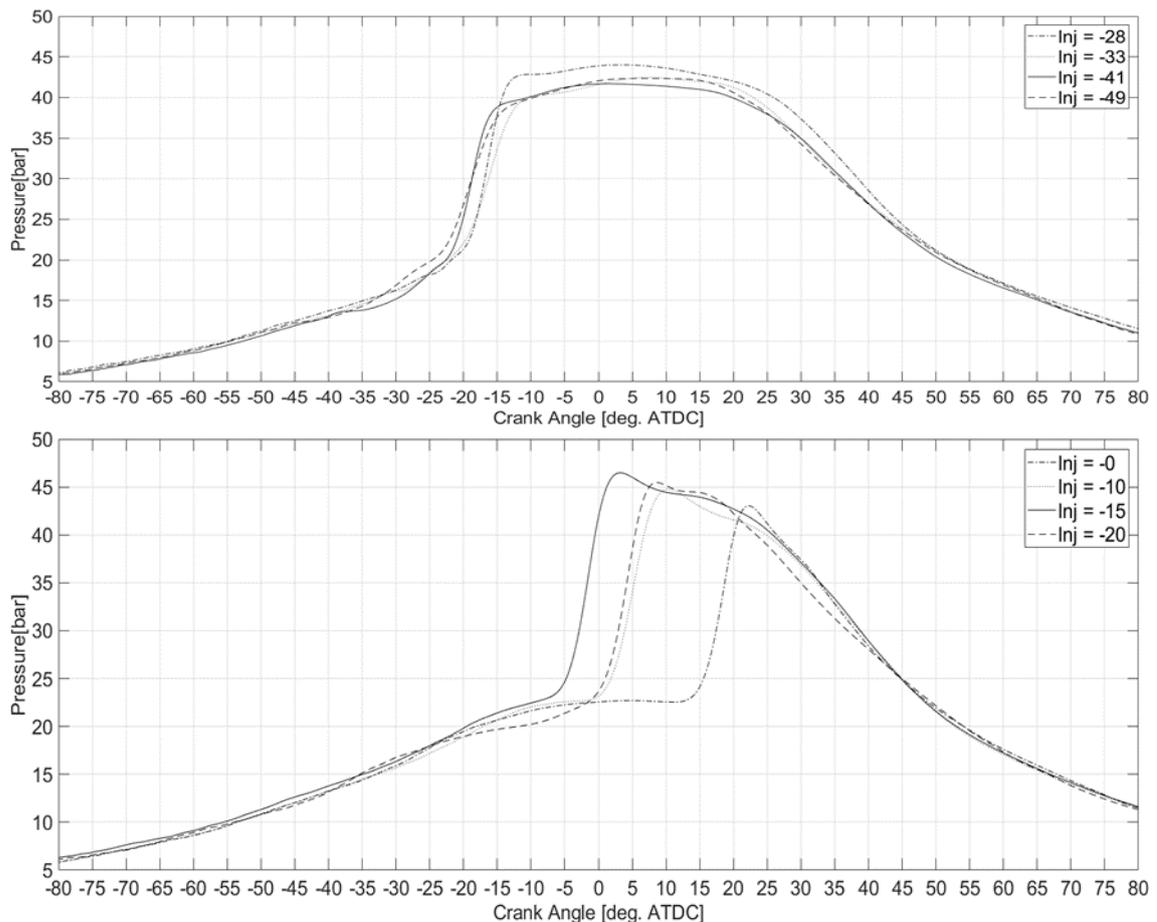


Figure 4 -1 In Cylinder Pressure (CR=12)

최대 압력은 분사시기를 -49° CA ATDC에서 -15° CA ATDC까지 지각(delay)시킬수록 증가하였으나 그 이후에는 감소하는 경향을 보였다. 그 이유는 TDC근처에서 분사할 경우 점화 지연으로 인해 TDC 이후에서 연소가 일어나기 때문으로 생각된다. 각 분사 시기에서의 최대 압력의 평균값은 Table 4-1과 같다.

Table 4 -1 Max Pressure at CR=12

Injection Timing [$^{\circ}$ CA ATDC]	Max Pressure [bar]
-49	41.9
-41	42.2
-33	43.3
-28	44.2
-20	45.0
-15	46.2
-10	44.7
-0	43.2

4.1.2 자발점화특성-Heat release rate

분사시기에 따른 가솔린 바이오디젤 혼합연료의 연소 특성을 알아보기 위하여 분사시기 조건에서 크랭크 각도에 따른 Heat release rate을 Figure 4-2~10과 같이 도시하였으며 이를 이용해 자발점화점을 계산하였다.

2.2.2에서 언급된 압축 착화 연소 모델을 확인해보면 CR=12의 경우 0°CA ATDC를 제외한 분사시기에서 자발 점화 이후 급격한 HRR 상승하는 구간인 Premixed combustion과 이후 Mixing-controlled phase 및 Late combustion까지 잘 따르고 있음을 확인했다. 다만 0°CA ATDC의 경우 Premixed combustion 구간 이후에 Mixing-controlled phase 및 Late combustion 구간이 매우 짧아 배기특성 측면에서는 나쁠 것이라 판단된다.

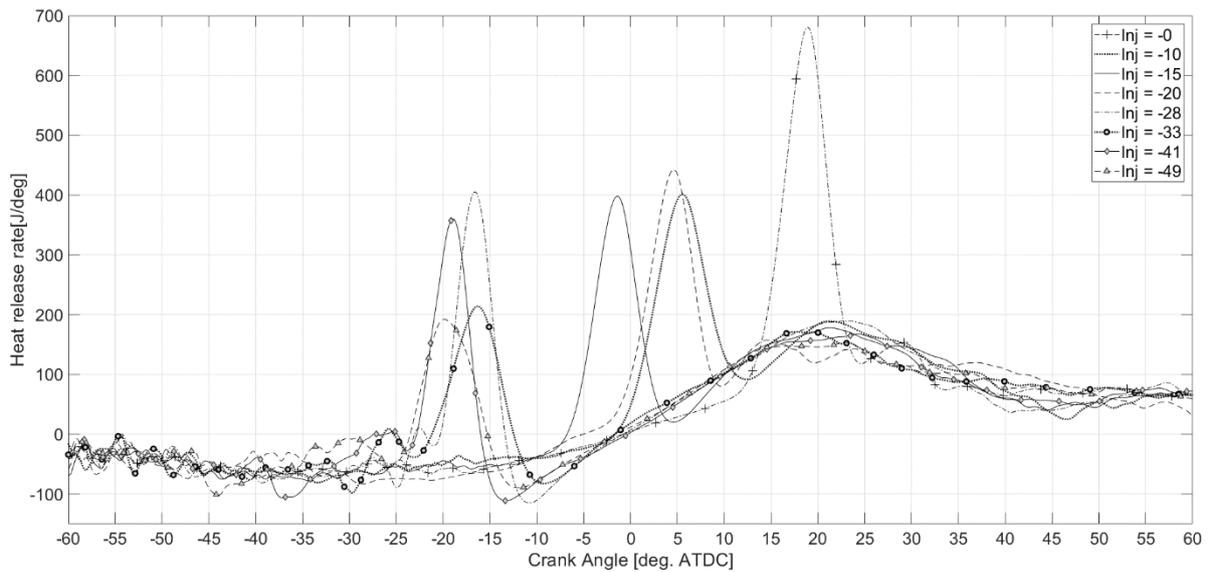


Figure 4 -2 Heat release rate

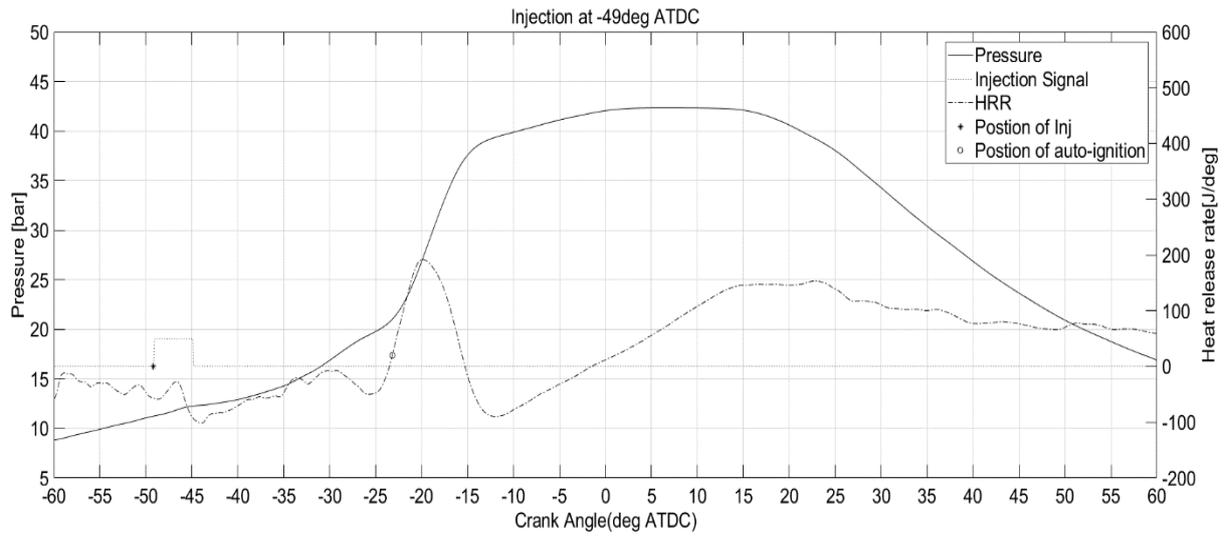


Figure 4-3 In Cylinder Pressure & Heat release rate(Inj=-49°CA ATDC)

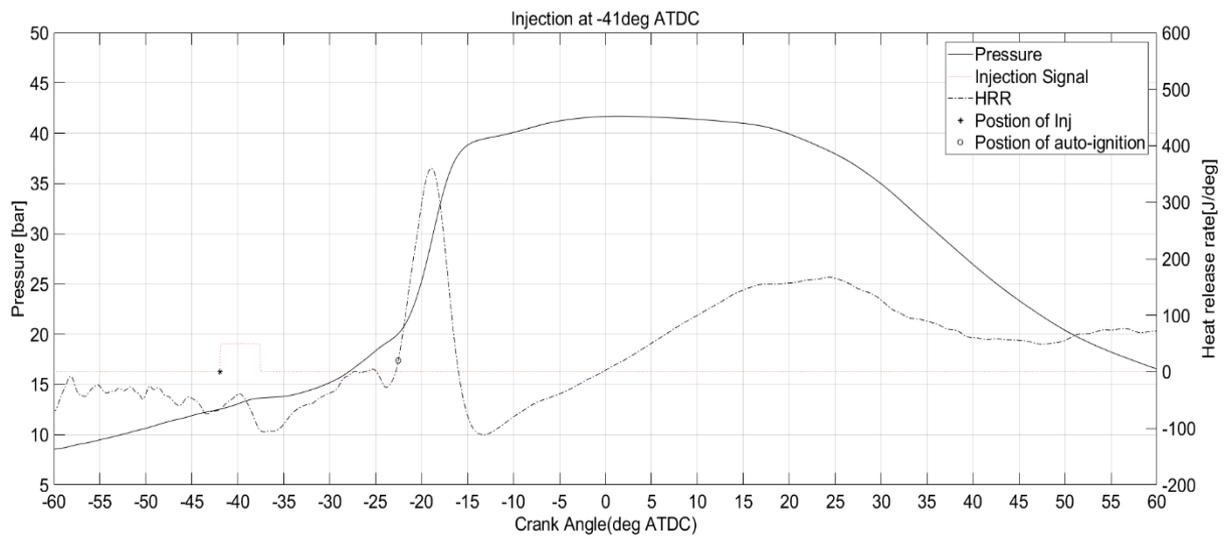


Figure 4-4 In Cylinder Pressure & Heat release rate(Inj=-41°CA ATDC)

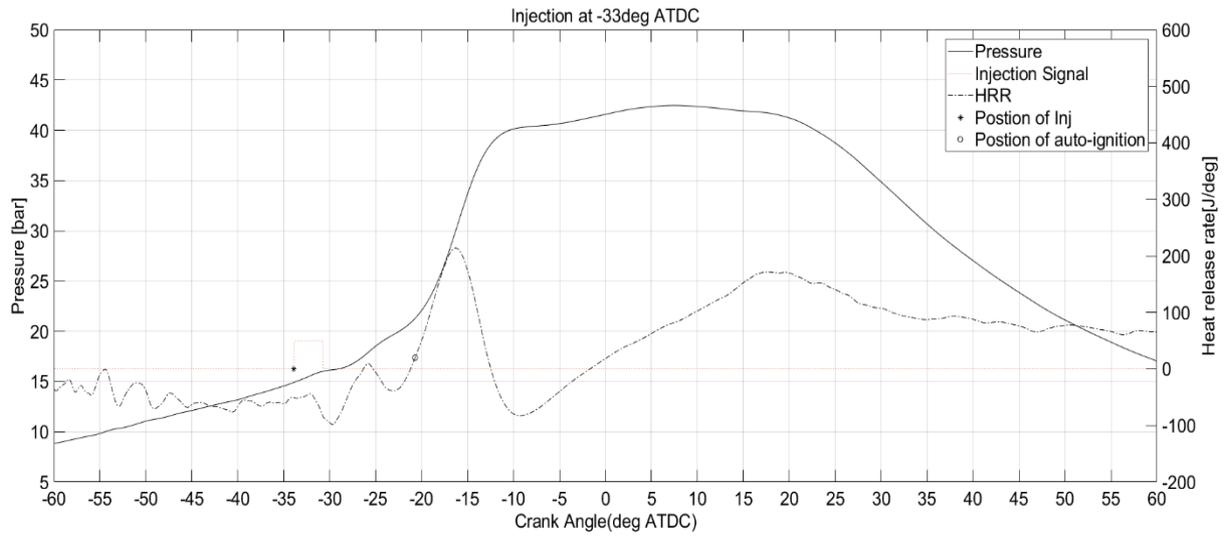


Figure 4-5 In Cylinder Pressure & Heat release rate(Inj=-33°CA ATDC)

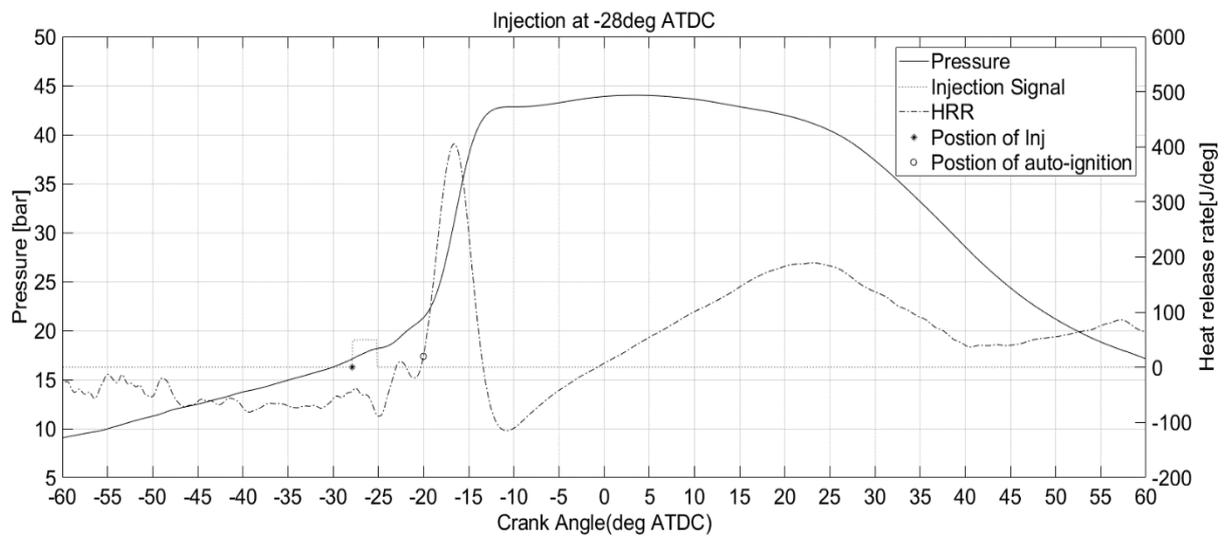


Figure 4-6 In Cylinder Pressure & Heat release rate(Inj=-28°CA ATDC)

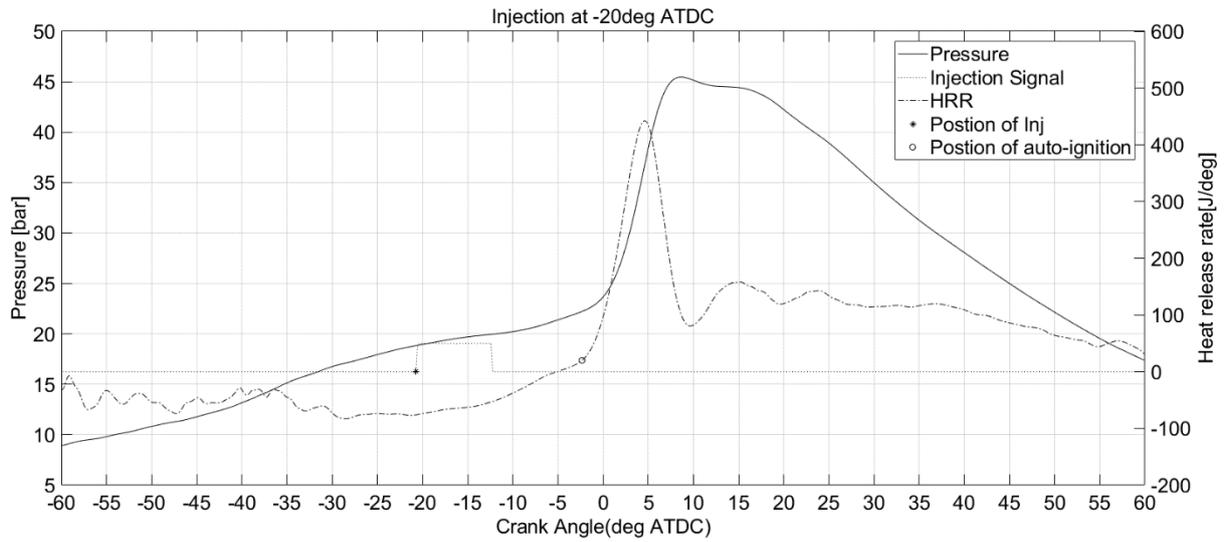


Figure 4-7 In Cylinder Pressure & Heat release rate (Inj = -20°CA ATDC)

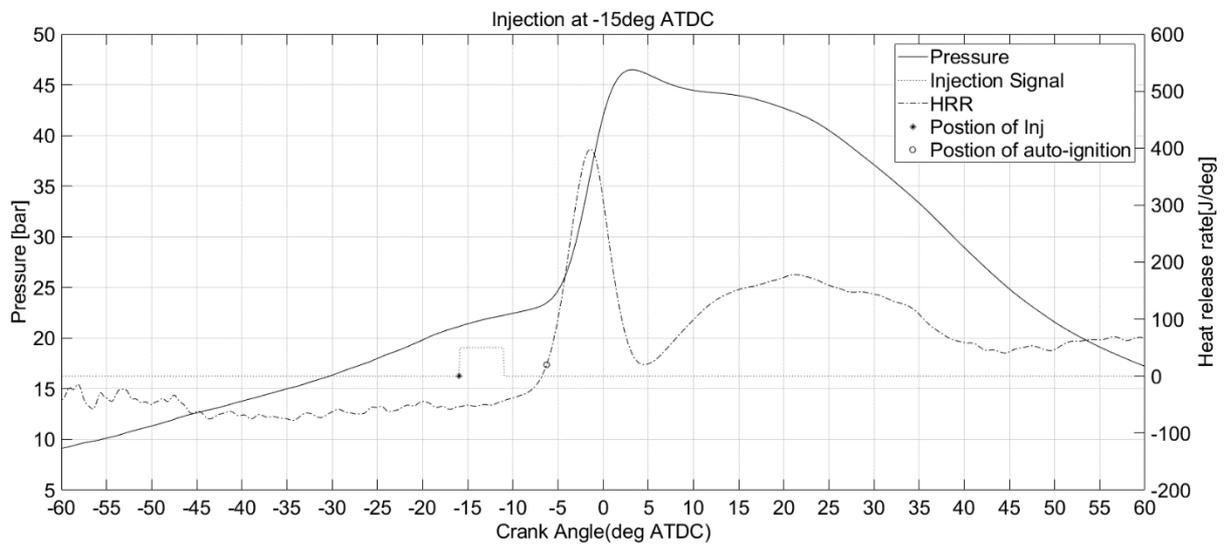


Figure 4-8 In Cylinder Pressure & Heat release rate (Inj = -15°CA ATDC)

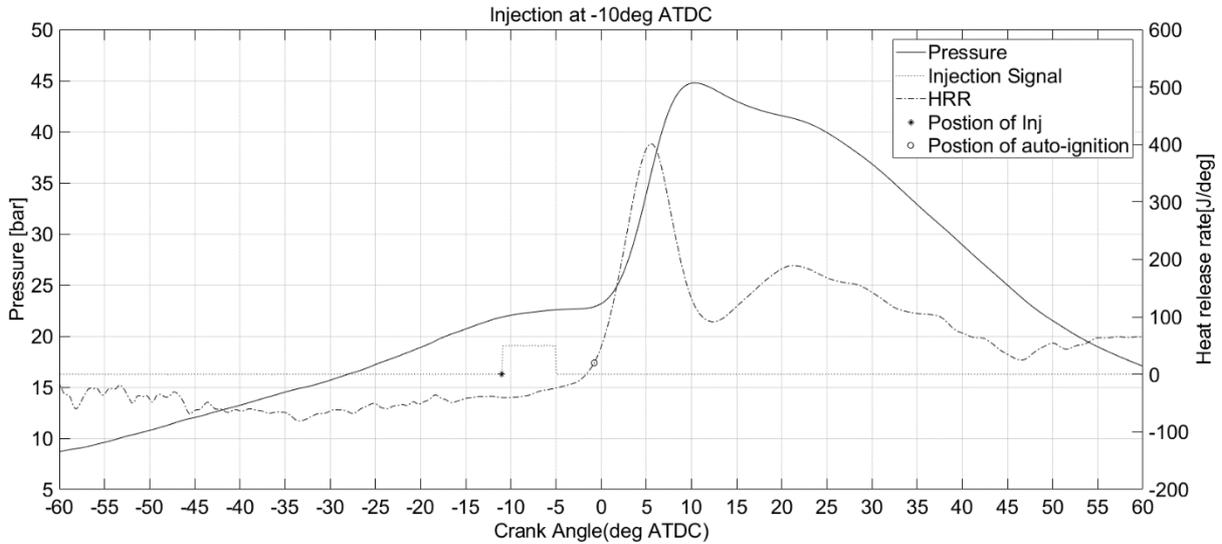


Figure 4-9 In Cylinder Pressure & Heat release rate(Inj=-10°CA ATDC)

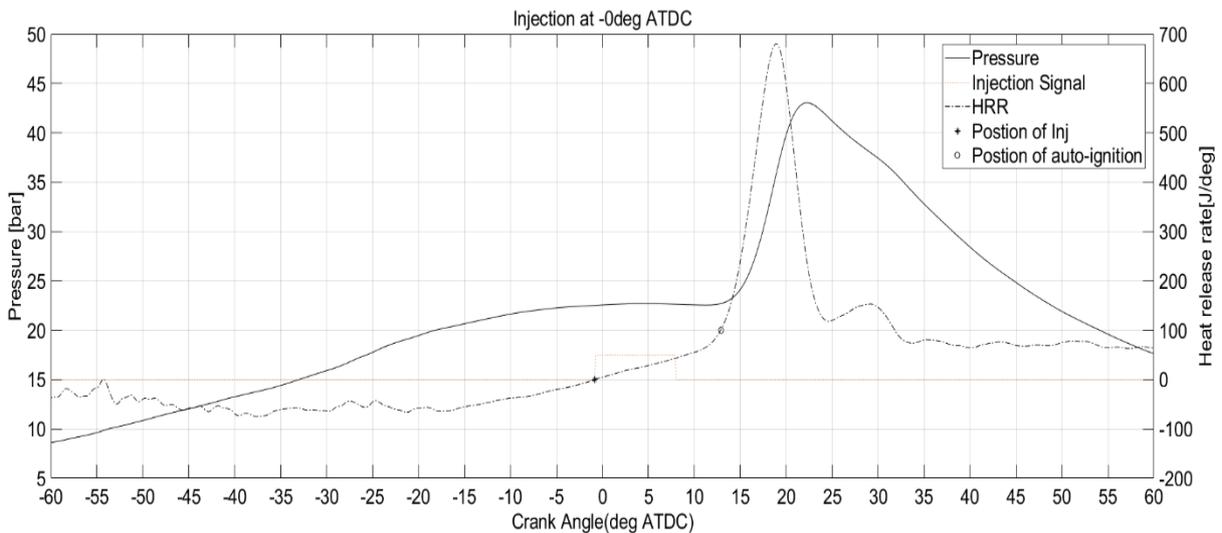


Figure 4-10 In Cylinder Pressure & Heat release rate(Inj=0°CA ATDC)

분사 시기를 -49° CA ATDC에서 -10° CA ATDC까지는 지각시킬수록 점화지연(Ignition delay)이 짧아지는 경향을 보였으나 그 이후에는 오히려 점화지연이 길어진 것을 확인 할 수 있었다. 각 분사 시기에서의 점화지연의 평균값은 Table 4-2와 같으며 최대값, 최솟값 및 평균값을 도시하기 위해 box-whisker plot을 이용하였으며 Figure 4-11과 같다.

Table 4 -2 Ignition Delay

Injection Timing [° CA ATDC]	Ignition Delay [ms]
-49	16.4
-41	11.8
-33	8.53
-28	6.41
-20	5.34
-15	4.10
-10	3.50
-0	3.52

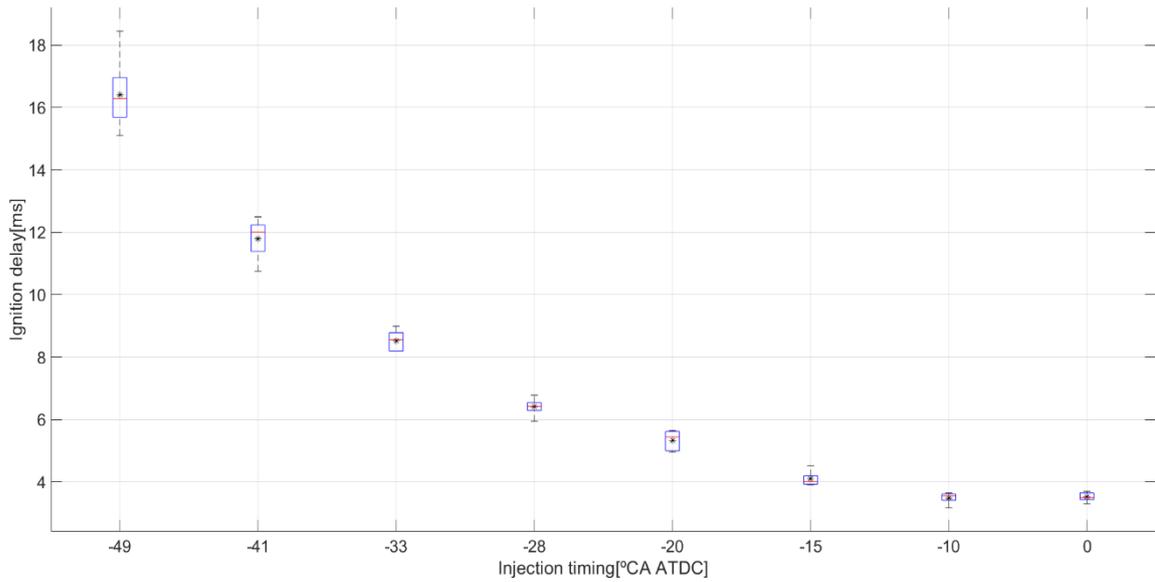


Figure 4 -11 Ignition delay [ms]

4.1.3 연소특성-IMEP

분사 시기를 지각시킬 수록 점화지연이 짧아지긴 하지만 최적 분사 시기를 결정하기 위해 $p-V$ diagram을 이용해 IMEP를 계산해보았다.

분사 시기가 -49° CA ATDC에서 -28° CA ATDC까지는 $p-V$ diagram가 비슷한 모양을 가지며 압축행정에서 TDC 이전에 압력이 상승한 반면 -20° CA ATDC에서 -10° CA ATDC까지는 TDC에서의 급격한 압력 상승을 동반하였다.

분사 시기를 -49° CA ATDC에서 -20° CA ATDC까지 지각시킬수록 IMEP가 증가하였으며, -20° CA ATDC부터 -10° CA ATDC까지는 IMEP 변화가 거의 없었으며 이후 감소하는 경향을 보였다. 각 분사 시기에서의 IMEP 평균값은 Table 4-3과 같다.

Table 4-3 Ignition Delay at CR=12

Injection Timing [$^\circ$ CA ATDC]	IMEP [bar]
-49	4.73
-41	4.75
-33	5.02
-28	5.20
-20	5.76
-15	5.77
-10	5.77
-0	5.36

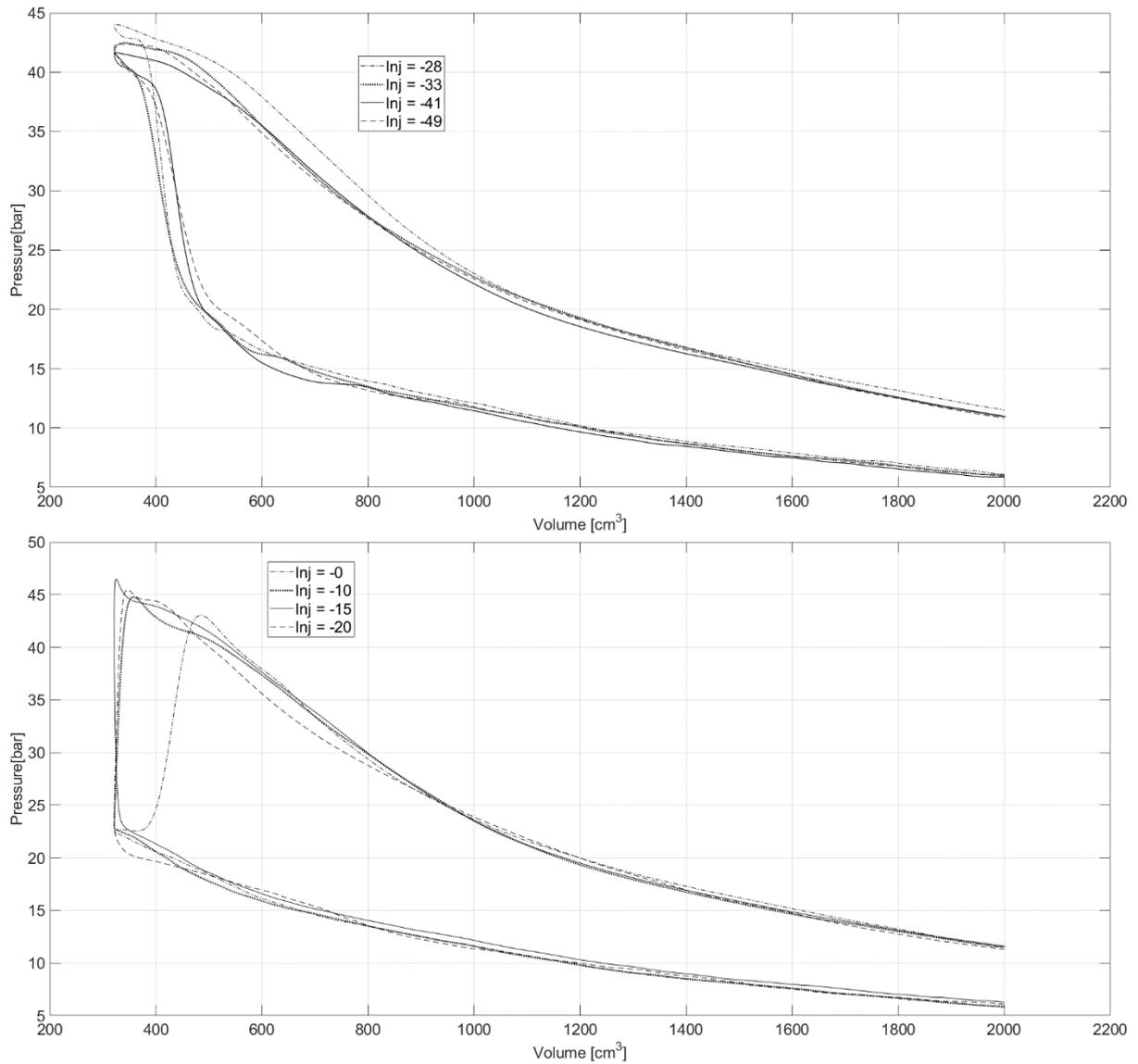


Figure 4-12 In Cylinder Pressure & Volume diagram

압력특성, Heat release rate 및 IMEP 결과를 고려할 때 CR=12에서 GB20의 최적 분사시기는 -20° CA ATDC에서 -10° CA ATDC로 결정할 수 있다.

4.2 압축비에 따른 가솔린 바이오디젤 혼합연료의 연소 특성

앞 절에서 분사시기에 따른 가솔린 바이오디젤 혼합연료의 압력, 자발점화 및 연소특성에 대해서 정리한 결과 분사시기에 따른 효과를 명확히 보여주는 -33° CA ATDC, -20° CA ATDC, -10° CA ATDC, -0° CA ATDC로 고정한 후 압축비를 10, 14, 16으로 바꿔서 실험하였다. 단 CR=10에서는 -10° CA ATDC 이후 실화(misfire)가 발생하여 -33° CA ATDC, -20° CA ATDC, -15° CA ATDC로 실험하였다. 이 때 실화 조건은 모터링(motoring) 데이터의 최대 압력을 기준으로 하였다.

4.2.1 압력특성

최대 압력은 CR=10의 경우 -33° CA ATDC에서 나타났으며 이후 감소하는 경향을 보였다. 또한 -15° CA ATDC 이후에는 최대 압력이 20bar이하로 감소하여 모터링 데이터 18bar와 차이가 적어 실화(Misfire)가 발생함을 확인하였다. CR=14, 16의 경우 -33° CA ATDC에서 -10° CA ATDC 까지는 분사시기를 지각시킬수록 최대압력이 증가하였으나 그 이후에는 감소하는 경향을 보였다. 각 분사 시기에서의 최대 압력의 평균값은 Table 4-4과 같다.

Table 4-4 Max Pressure at CR = 10, 14, 16

Injection Timing [$^\circ$ CA ATDC]	Max Pressure[bar] at CR10	Max Pressure[bar] at CR14	Max Pressure[bar] at CR16
33	31.3	49.6	52.7
-20	25.9	50.7	55.3
-15	20.3	-	-
-10	Misfire	51.6	57.1
0	Misfire	50.2	55.3

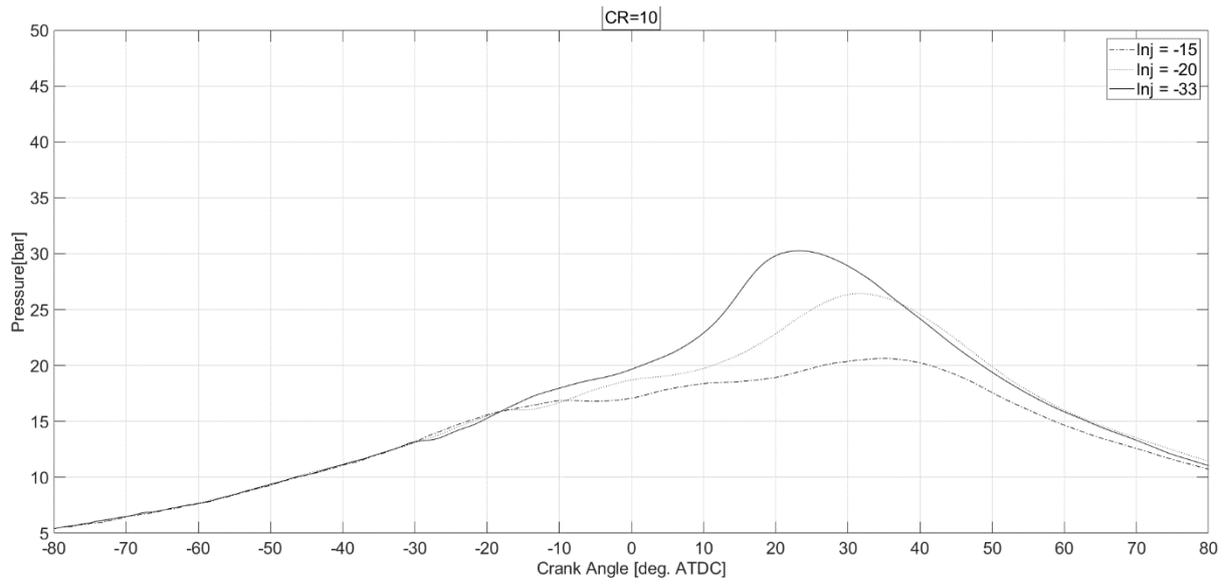


Figure 4-13 In Cylinder Pressure (CR=10)

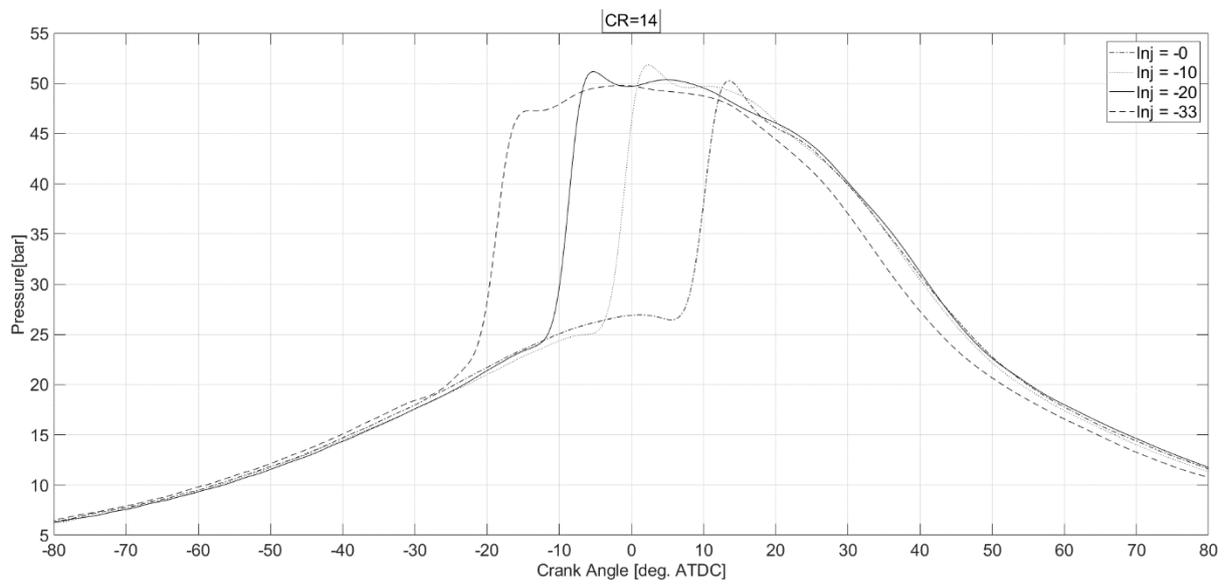


Figure 4-14 In Cylinder Pressure (CR=14)

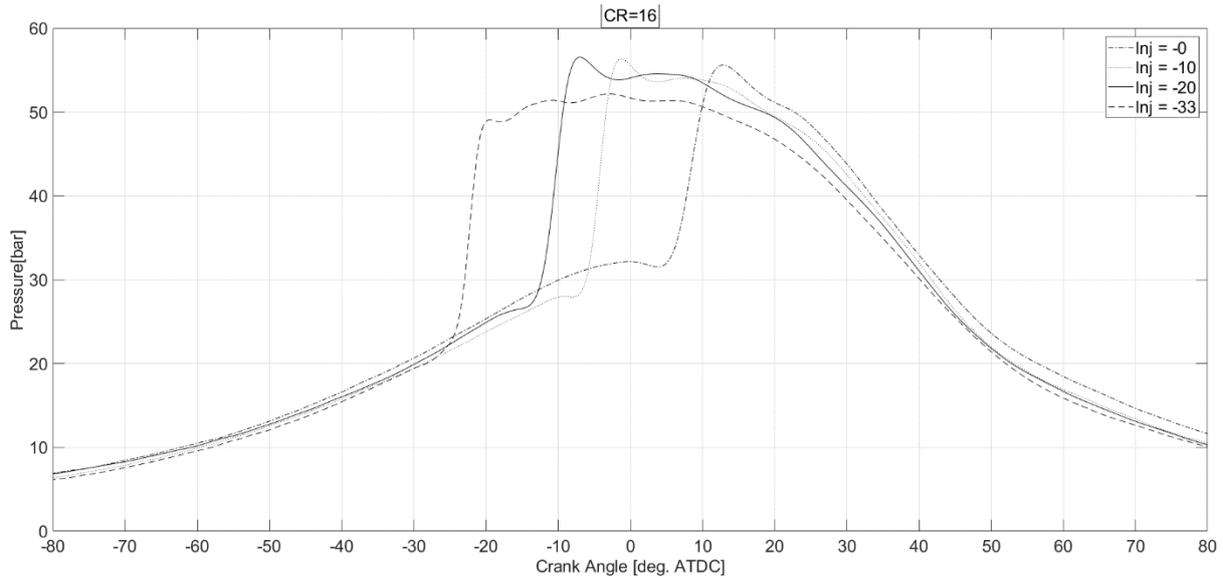


Figure 4-15 In Cylinder Pressure (CR=16)

4.2.2 자발점화특성-Heat release rate

앞 절과 달리 CR=14,16에서는 0° CA ATDC까지 분사 시기를 지각시켜도 점화지연은 계속 짧아지는 경향을 보였으며 CR=10에서는 -15° CA ATDC까지 짧아지다 이후 실화가 발생하였다.

같은 분사 시기에서 압축비가 증가할수록 점화지연은 짧아졌다. 이를 통해 CR=10에서 -15° CA ATDC 이후에는 연료의 점화지연으로 인해 연료가 자발점화 할 수 있는 충분한 압력 및 온도 조건에 도달하지 못하고 팽창행정으로 넘어가면서 실화가 발생했다 판단된다.

2.2.2에서 언급된 압축 착화 연소 모델을 확인해보면 CR=10의 경우 자발 점화 이후 HRR이 급격히 증가하는 구간이 없어 Premixed combustion까지 가지 못하고 연소가 충분히 잘 이루어지지 못했다 판단된다. 그 외 CR=12, 14, 16의 경우 자발점화 이후 Premixed combustion, Mixing-controlled phase 및 Late combustion까지 잘 따르고 있음을 확인했다.

Table 4-5 Ignition Delay at CR=10, 14, 16

Injection Timing [° CA ATDC]	Ignition delay[ms] at CR10	Ignition delay[ms] at CR14	Ignition delay[ms] at CR16
-33	15.5	6.19	5.00
-20	7.3	3.96	2.72
-15	6.0	-	-
-10	Misfire	2.84	1.76
0	Misfire	2.32	1.41

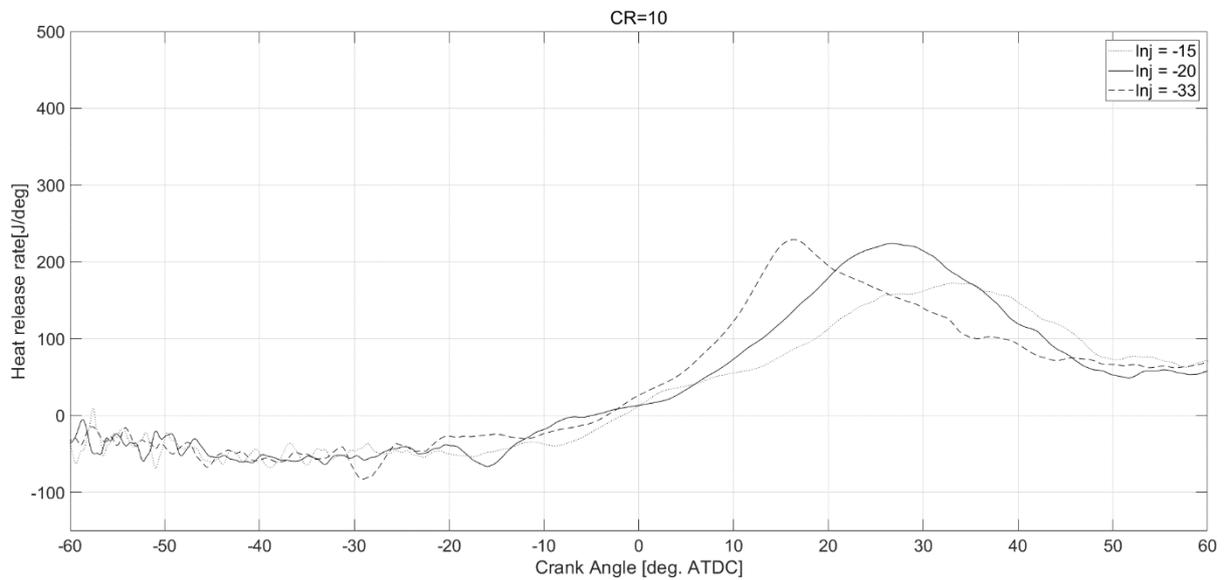


Figure 4-16 Heat release rate at CR=10

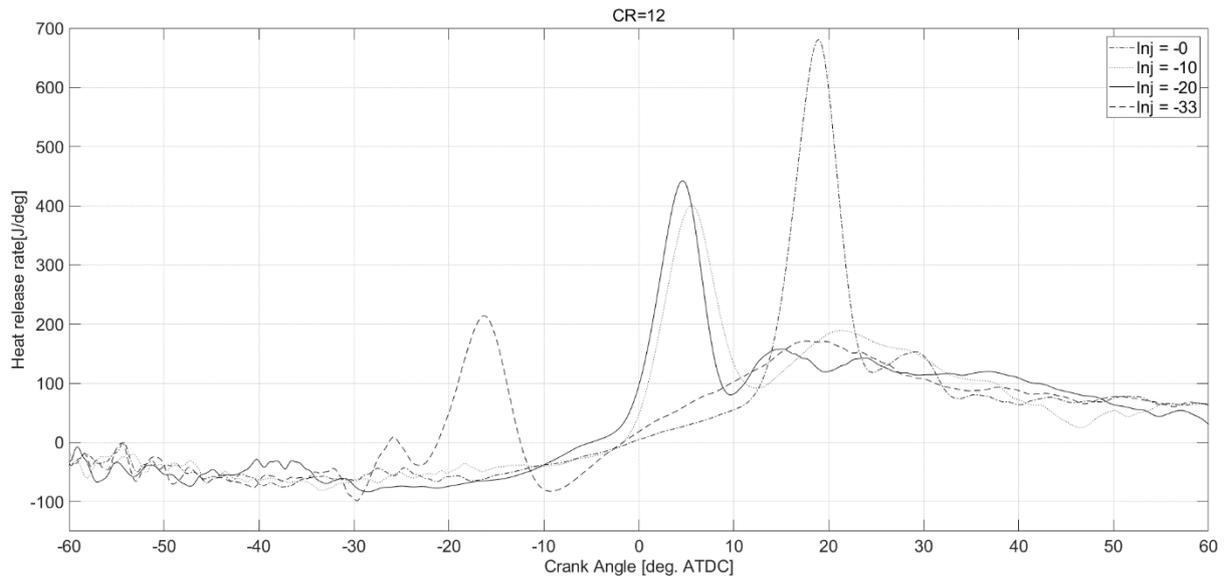


Figure 4 -17 Heat release rate at CR=12

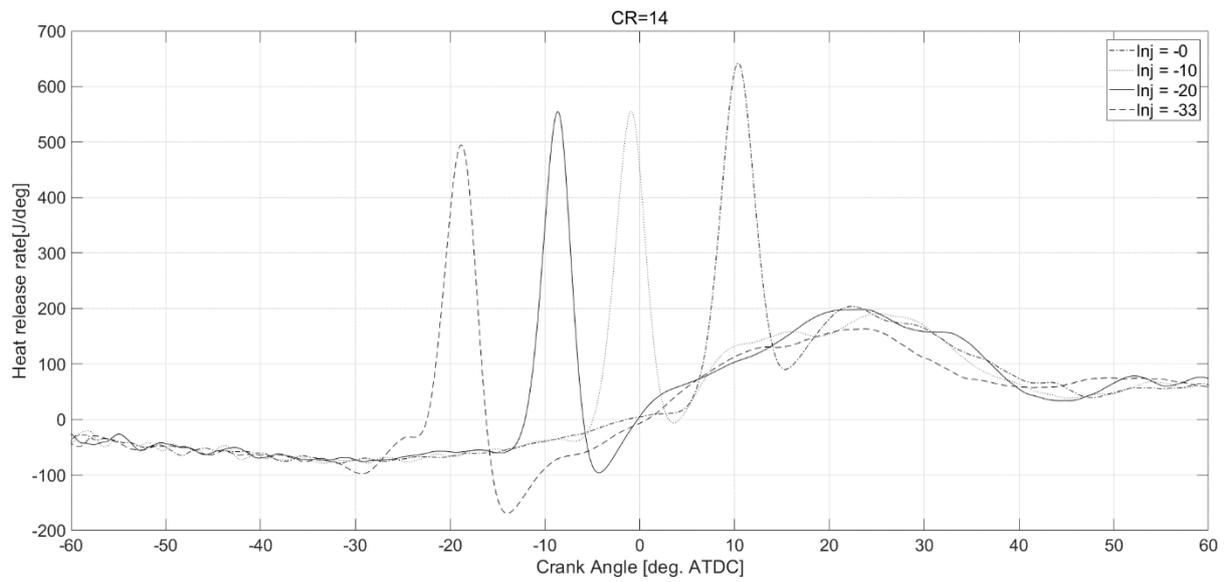


Figure 4 -18 Heat release rate at CR=14

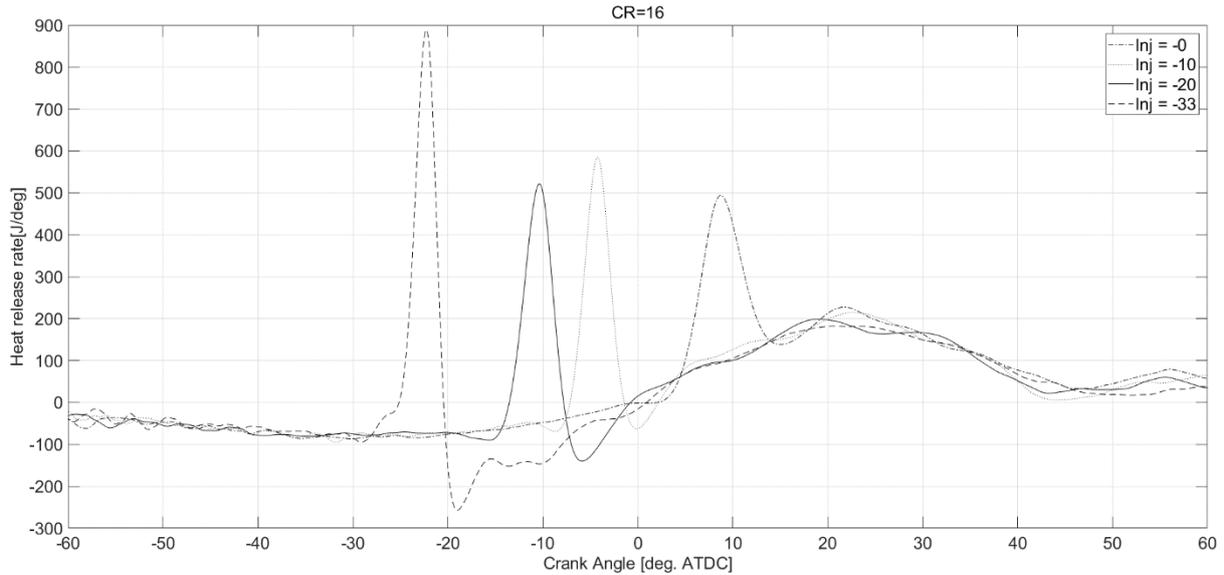


Figure 4-19 Heat release rate at CR=16

4.2.3 연소특성-IMEP

4.1.2와 같이 다른 압축비에서도 분사 시기를 지각시킬수록 점화지연이 짧아지는 경향을 보였으며 최적 분사 시기를 결정하기 위해 p-V diagram을 이용해 IMEP를 계산해보았다.

압축비 10에서 분사시기에 따른 p-V diagram을 비교해보면 -33°CA ATDC에서 TDC이후에 압력이 가장 급격하게 상승하였으며, 분사시기를 지각시킬수록 점점 더 압력이 완만하게 증가하는 경향을 보였다. IMEP의 경우는 -33°CA ATDC에서 최대값을 얻은 후 감소했다.

압축비 14에서 p-V diagram을 비교해보면 -20°CA ATDC, -10 °CA ATDC 분사 시기에서, TDC에서의 급격한 압력상승을 확인할 수 있으며 그보다 진각(advance)시킨 -33°CA ATDC 분사 시기에서는 TDC 이전에서 급격한 압력상승이 일어난다. TDC 근처에서 압축행정 및 팽창행정에서의 동일 체적 일때 압력 값의 차이가 작다. 이는 TDC 이전에 급격한 압력상승이 압축행정에

들어가는 소요일을 증가시켜 다른 분사 시기에서와 달리 IMEP가 5bar이하로 떨어짐을 보였다.

압축비 16에서 p-V diagram을 비교해보면 -10°CA ATDC의 경우 TDC에서의 급격한 압력상승을 확인할 수 있으며 그보다 진각시킨 -33°CA ATDC와 -20°CA ATDC에서는 TDC이전의 급격한 압력상승이 일어나고 압축행정에서 최대 압력 결과를 초래해 압축행정에서의 소요일을 증가시키면서 IMEP가 다른 분사시기에 비해 낮았다. 0°CA ATDC의 경우 TDC이후에 빠른 압력상승을 동반하였으며 최대 IMEP를 얻었다. 각 분사 시기에서의 IMEP 평균값은 Table 4-6과 같다.

Table 4 -6 IMEP at CR=10, 12, 14, 16

Injection Timing [$^{\circ}$ CA ATDC]	IMEP [bar] at CR10	IMEP [bar] at CR12	IMEP [bar] at CR14	IMEP [bar] at CR16
-33	4.64	5.02	4.66	4.35
-20	4.12	5.76	6.24	5.30
-15	2.93	5.77	-	-
-10	Misfire	5.77	6.07	5.93
0	Misfire	5.36	5.56	6.12

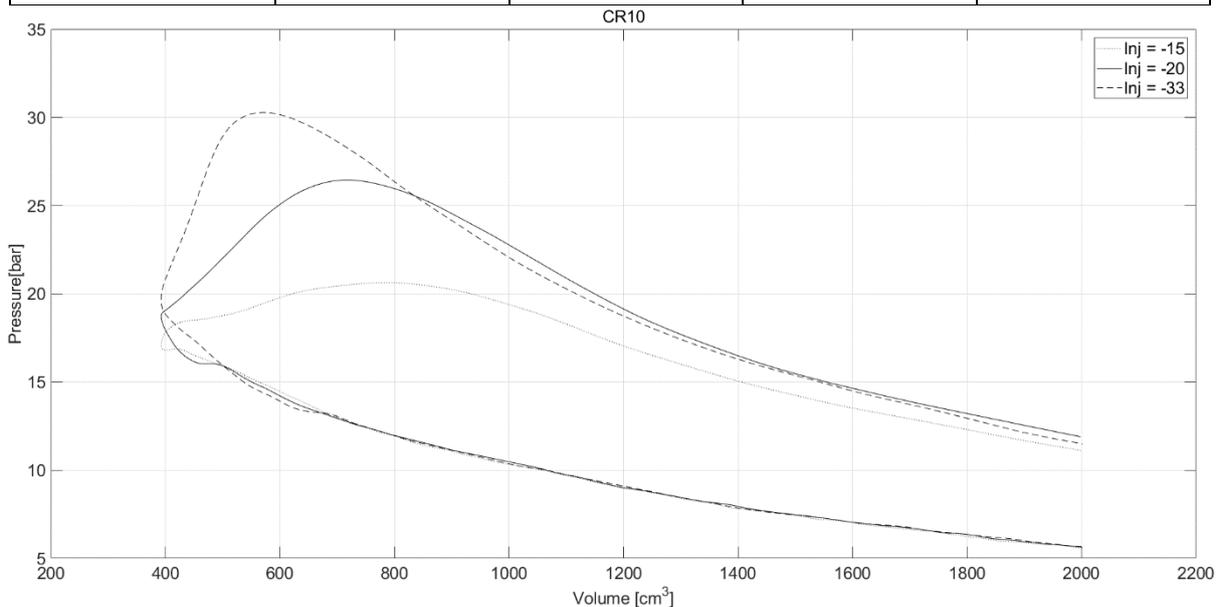


Figure 4 -20 In Cylinder Pressure & Volume diagram at CR=10

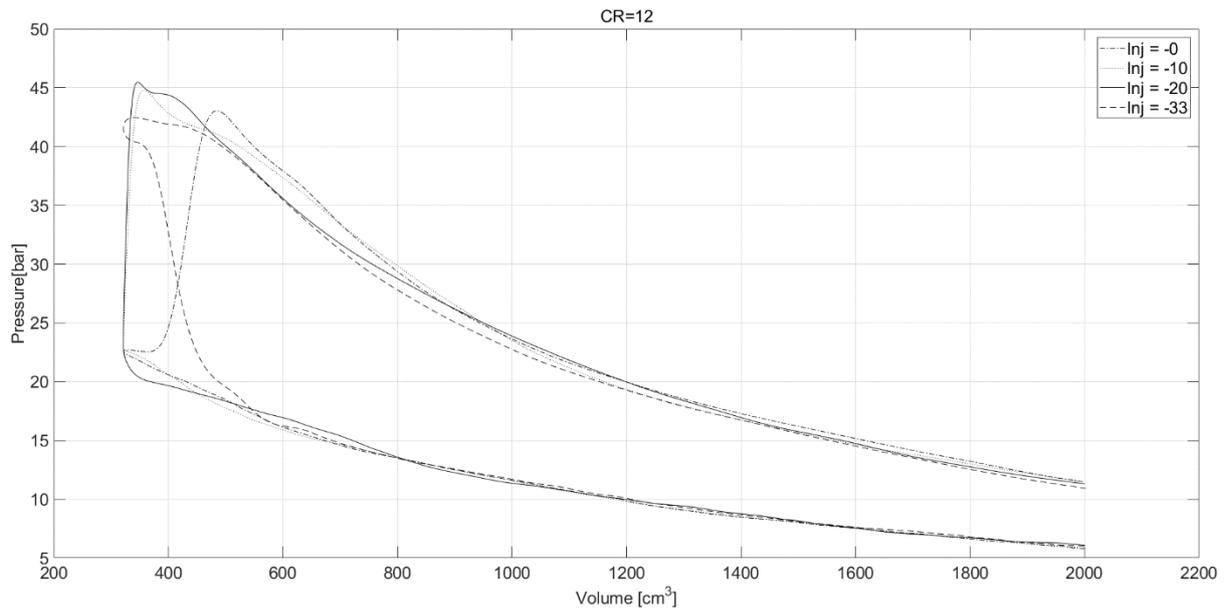


Figure 4 -21 In Cylinder Pressure & Volume diagram at CR=12

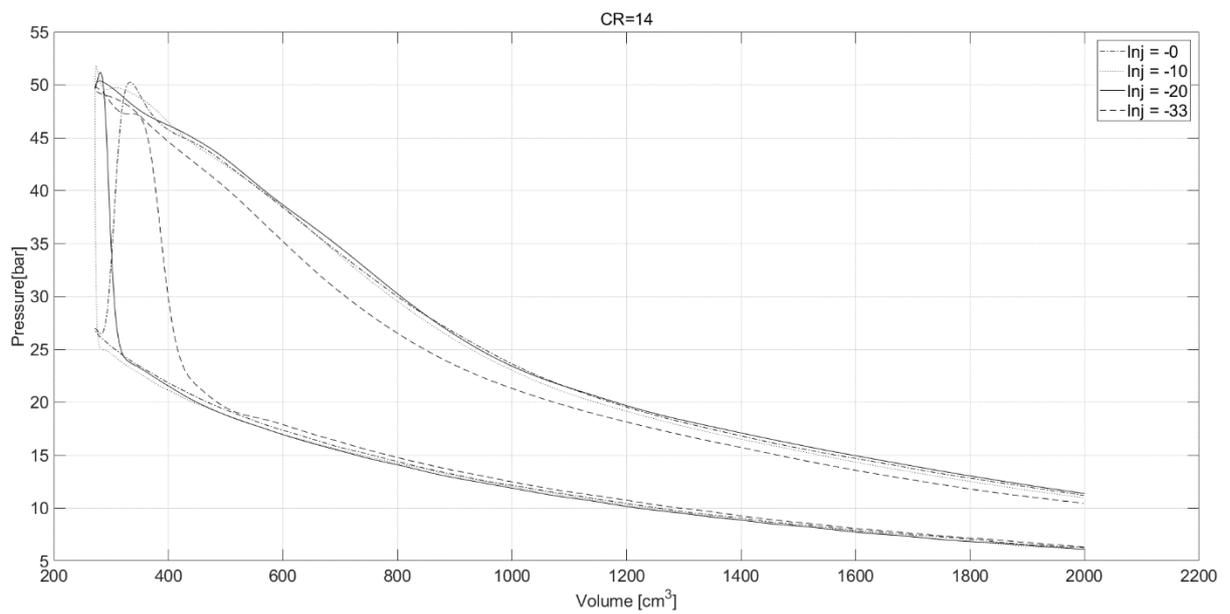


Figure 4 -22 In Cylinder Pressure & Volume diagram at CR=14

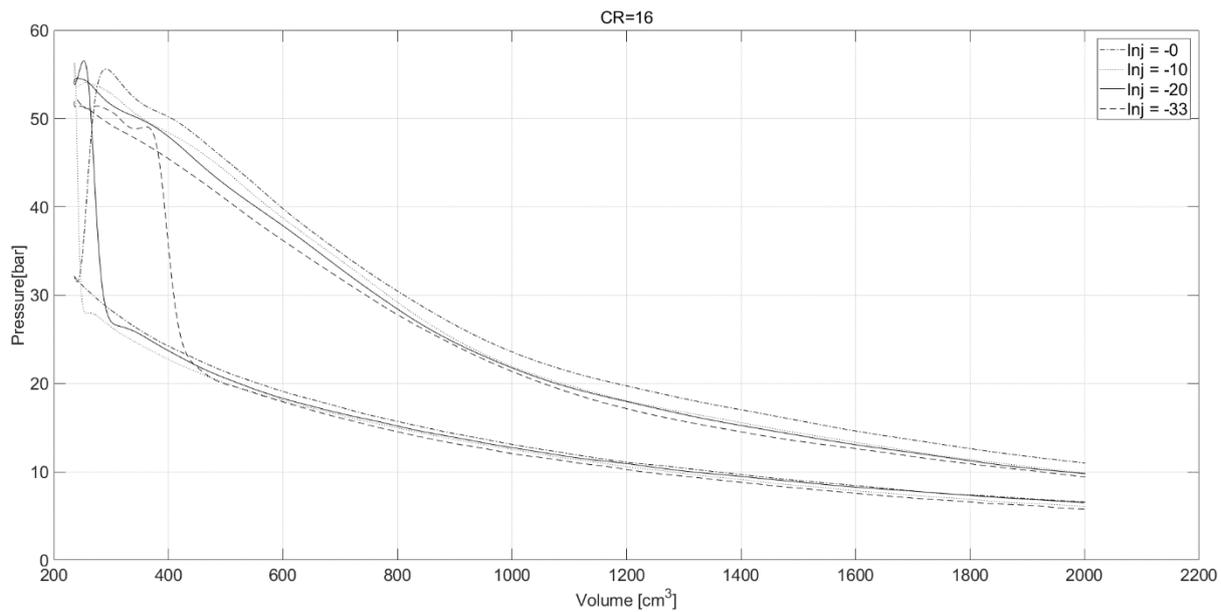


Figure 4 -23 In Cylinder Pressure & Volume diagram at CR=16

제 5 장 결론

본 연구에서는 압축비와 연료의 분사시기를 가변 시켰을 때 가솔린 바이오디젤의 자발점화특성을 파악하고자 급속압축팽창장치를 이용한 엔진모사실험을 실시하였다. 이를 위해 각 조건에서의 p-V diagram과 Ignition delay 및 IMEP를 계산하였다.

1) 분사시기 변화

분사시기에 따른 가솔린 바이오디젤 혼합연료의 자발점화 특성을 알아보기 위하여 각 분사시기 조건에서 크랭크각도에 따른 압력 그래프를 나타내고 Heat release rate과 Ignition delay 및 IMEP를 계산하였다. 이때 압축비는 12이며 분사시기는 -49° , -41° , -33° , -28° , -20° , -15° , -10° , 0° CA ATDC로 가변 시켰다.

최대 압력은 -49° CA ATDC에서 -15° CA ATDC 까지는 지각(delay)시킬수록 증가하였으나 그 이후에는 감소하는 경향을 보였다.

점화 지연(Ignition delay)은 분사 시기를 -49° CA ATDC에서 -10° CA ATDC까지는 지각시킬수록 짧아지는 경향을 보였으나 그 이후에는 오히려 길어졌다.

분사 시기가 -49° CA ATDC에서 -28° CA ATDC까지는 p-V diagram가 비슷한 모양을 가지며 압축행정에서 TDC이전에 압력이 상승한 반면 -20° CA ATDC에서 -10° CA ATDC까지는 TDC에서 급격히 압력이 상승하였다. 분사 시기를 -49° CA ATDC에서 -20° CA ATDC까지는 지각시킬수록 IMEP가 증가하였으며, -20° CA ATDC부터 -10° CA ATDC까지는 IMEP 변화가 거의 없었으며 이후 감소하는 경향을 보였다.

2) 압축비 변화

앞 절의 실험 결과를 바탕으로 분사 시기는 -33° CA ATDC, -20° CA ATDC, -10° CA ATDC, -0° CA ATDC로 고정한 후 압축비를 10, 14, 16으로 바꿔서 실험하였다. 동일 압축비에서 분사시기를 변경하였을 때 모두 실화가 일어나기 전까지 점화 지연(Ignition delay)은 짧아지는 경향을 보였으나 IMEP를 계산할 경우 CR10과 CR16에서는 특정 분사시기에서만 높은 IMEP를 얻어 가솔린 바이오디젤의 혼합연료의 운전조건으로는 적절하지 않다고 판단된다. 압축비 12와 14에서 -20° CA ATDC 에서 -10° CA ATDC의 가장 넓은 크랭크각도 범위에서 가장 좋은 IMEP 결과를 얻었다.

위와 같은 실험을 통하여 각 파라미터들이 가솔린 바이오디젤 혼합연료의 어떤 영향을 미치고 이들이 복합적으로 상호작용하여 어느 조건에서 가장 좋은 연소성능을 보이는가에 대하여 확인할 수 있는 기초적인 데이터를 제공하였다고 판단된다.

참고문헌(References)

1. Bae C, Kim J. “Alternative fuels for internal combustion engines.” Proc Combust Inst 2017; 36:3389-413.
2. Tesfa B, Mishra R, Zhang C, Gu F, Ball AD. “Combustion and performance characteristics of CI (compression ignition) engine running with biodiesel.” Energy 2013; 51:101-15.
3. Stephen R. Turns, “An Introduction to combustion concepts and applications”: MacGraww-Hill,1996
4. Lee J, Chu S, Min K, Kim M, Jung H, Kim H, Chi Y. “Classification of diesel and gasoline dual-fuel combustion modes by the analysis of heat release rate shapes in a compression ignition engine.” Fuel 2017; 209:587-597.
5. Zhong S, Wyszynski ML, Megaritis A, Yap D, Xu H. “Experimental investigation into HCCI combustion using gasoline and diesel blended fuels.” SAE Int J Engines 2005.
6. Leermakers CAJ, Van den Berge B, Luijten CCM, Somers LMT, de Goey LPH, Albrecht BA. “Gasoline-diesel dual fuel: effect of injection timing and fuel balance” SAE Pap. 2011.

7. Prikhodko VY, Curran SJ, Barone TL, Lewis SA, Storey JM, Cho K.
“Emission characteristics of a diesel engine operating with in-cylinder gasoline and diesel fuel blending.” SAE Int; 2010. p. 946–55. 2266.
8. Curran S, Prikhodko V, Cho K, Sluder C, Parks J, Wagner R, et al. “In-cylinder fuel blending of gasoline/diesel for improved efficiency and lowest possible emissions on a multi-cylinder light-duty diesel engine.” SAE Tech Pap. 2010. p. 1–20.
9. Benajes J, Broatch A, Garcia A, Monico Muñoz L. “An experimental investigation of diesel-gasoline blends effects in a direct-injection compression-ignition engine operating in PCCI conditions.” SAE Tech Pap. 2. 2013.
10. Adams CA, Loeper P, Krieger R, Andrie MJ, Foster DE. “Effects of biodiesel-gasoline blends on gasoline direct-injection compression ignition (GCI) combustion.” Fuel 2013; 111:784–90.
11. Cracknell R, Ariztegui Cortijo J, Dubois T, Engelen B, Manuelli P, Pellegrini L, et al. “Modelling a gasoline compression ignition (GCI) engine concept.” SAE Int; 2014.
12. Rose KD, Ariztegui J, Cracknell RF, Dubois T, Hamje HDC, Pellegrini L, et al. “Exploring a gasoline compression ignition (GCI) engine concept.” SAE Int J Fuels Lubr 2014:1–54

13. Lu X, Qian Y, Yang Z, Han D, Ji J, Zhou X, et al. "Experimental study on compound HCCI (homogenous charge compression ignition) combustion fueled with gasoline and diesel blends." *Energy* 2014; 64:707–18.
14. Han D, Ickes AM, Bohac SV, Huang Z, Assanis DN. "HC and CO emissions of premixed low-temperature combustion fueled by blends of diesel and gasoline." *Fuel* 2012; 99:13–9.
15. Feng Z, Zhan C, Tang C, Yang K, Huang Z. "Experimental investigation on spray and atomization characteristics of diesel/gasoline/ethanol blends in high pressure common rail injection system." *Energy* 2016; 112:549–61.
16. Kodavasal J, Kolodziej CP, Ciatti SA. "Effects of injection parameters, boost, and swirl ratio on gasoline compression ignition operation at idle and low-load conditions." *Int J Engine Res* 2016:1–13.
17. Sim J, Elwardany A, Jaasim M. "Numerical simulations of hollow-cone injection and gasoline compression ignition combustion with naphtha." *Fuels* 2017; 138:1–11.
18. Dec J, Yang Y and Dronniou N. "Boosted HCCI-controlling pressure-rise rates for performance improvements using partial fuel stratification with conventional gasoline." *SAE Int J Engines* 2011; 4: 1169–1189.

19. Putrasari Y and Lim O. "A study on combustion and emission of GCI engines fueled with gasoline-biodiesel blends." *Fuel* 2017; 189: 141-154.
20. Loeper P, Ra Y, Adams C, Foster D, Ghandhi J, Andrie M, et al. "Experimental investigation of light-medium load operating sensitivity in a gasoline compression ignition (GCI) light-duty diesel engine." SAE Technical Paper 2013-01-0896.
21. Heywood JB. *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill; 1988.
22. U.S. Government Printing Office, "Energy Independence and Security Act of 2007." Public Law 110-140.
23. Park SH, Yoon SH and Lee CS. "Bioethanol and gasoline premixing effect on combustion and emission characteristics in biodiesel dual-fuel combustion engine." *Appl Energy* 2014; 135: 286-298.
24. Taku TSUJIMURA, Keita MITSUSHIMA, Ryuichi HATA, Yoshiroh TOKUNAGA, Jiro SENDA and Hajime FUJIMOTO, "Study on characteristics of auto-ignition and combustion in hydrogen jet with a rapid compression and expansion." *Journal of Environment and Engineering* Vol 4, No. 2, 2009

Appendix

```
file_forCheck='Data.xlsx'
[num_forCheck]=xlsread(file_forCheck);

columnA=num_forCheck(:,1); %column A :time[s]
columnB=num_forCheck(:,2); %column B :dis[V]
columnD=num_forCheck(:,4)/25; %column D :Pressure[bar]->P[Volt]
columnF=num_forCheck(:,6); %column F :inj[V]
columnG=num_forCheck(:,7); %column G :PS0[V]
columnH=num_forCheck(:,8); %column H :PS50[V]
columnI=num_forCheck(:,9); %column I :PS100[V]
columnJ=num_forCheck(:,10); %column J :enc[V]

t=columnA;          %column A :time[s]
dis_Volt=columnB;  %column B :dis[V]
P_Volt=columnD;    %column D :Pressure[Volt]
inj_Volt=columnF;  %column F :inj[V]
PS0_Volt=columnG;  %column G :PS0[V]
PS50_Volt=columnH; %column H :PS50[V]
PS100_Volt=columnI; %column I :PS100[V]
enc_Volt=columnJ;  %column J :enc[V]

M_dis=max(dis_Volt);
m_dis=min(dis_Volt);
Bet_Mm=M_dis-m_dis;
q=350/Bet_Mm;

Ddis=diff(dis_Volt);
Dt=diff(t);
Gdis=Ddis./Dt;

ans_Gdis=find(abs(Gdis)>0.9*10^4);

if length(ans_Gdis)==2

    sp_No1_2=ans_Gdis(1);
    fp_No1_2=ans_Gdis(2)+ 1;

    t_baseSensor=t(sp_No1_2:fp_No1_2);
    dis_Volt_baseSensor=dis_Volt(sp_No1_2:fp_No1_2);
    P_Volt_baseSensor=P_Volt(sp_No1_2:fp_No1_2);
    inj_baseSensor=inj_Volt(sp_No1_2:fp_No1_2);
    PS0_baseSensor=PS0_Volt(sp_No1_2:fp_No1_2);
    PS50_baseSensor=PS50_Volt(sp_No1_2:fp_No1_2);
    PS100_baseSensor=PS100_Volt(sp_No1_2:fp_No1_2);
    enc_baseSensor=enc_Volt(sp_No1_2:fp_No1_2);
```

```

f_No1_2=fit(t_baseSensor,dis_Volt_baseSensor*q,'fourier8');
CF_dis_mm=f_No1_2(t_baseSensor);
dCF_dis1=diff(CF_dis_mm);
ans_if1=find(dCF_dis1>=0);

t_if1=t_baseSensor(ans_if1(1):length(CF_dis_mm));
dis_Volt_if1=dis_Volt_baseSensor(ans_if1(1):length(CF_dis_mm));
dis_if1=CF_dis_mm(ans_if1(1):length(CF_dis_mm));
P_Volt_if1=P_Volt_baseSensor(ans_if1(1):length(CF_dis_mm));
inj_if1=inj_baseSensor(ans_if1(1):length(CF_dis_mm));
PS0_if1=PS0_baseSensor(ans_if1(1):length(CF_dis_mm));
PS50_if1=PS50_baseSensor(ans_if1(1):length(CF_dis_mm));
PS100_if1=PS100_baseSensor(ans_if1(1):length(CF_dis_mm));
enc_if1=enc_baseSensor(ans_if1(1):length(CF_dis_mm));

```

```

dCF_dis2=diff(dis_if1);
ans_if2=find(dCF_dis2<=0);

```

```

t_aSlip=t_if1(ans_if2(1):length(dis_if1));
dis_Volt_aSlip=dis_Volt_if1(ans_if2(1):length(dis_if1));
dis_aSlip=dis_if1(ans_if2(1):length(dis_if1));
P_Volt_aSlip=P_Volt_if1(ans_if2(1):length(dis_if1));
inj_aSlip=inj_if1(ans_if2(1):length(dis_if1));
PS0_aSlip=PS0_if1(ans_if2(1):length(dis_if1));
PS50_aSlip=PS50_if1(ans_if2(1):length(dis_if1));
PS100_aSlip=PS100_if1(ans_if2(1):length(dis_if1));
enc_aSlip=enc_if1(ans_if2(1):length(dis_if1));

```

else if length(ans_Gdis)==4

```

sp_No1_2=ans_Gdis(3);
fp_No1_2=ans_Gdis(4)+ 1;

```

```

t_aSlip=t(sp_No1_2:fp_No1_2);
dis_Volt_aSlip=dis_Volt(sp_No1_2:fp_No1_2);

```

```

f_fit=fit(t_aSlip,dis_Volt_aSlip*q,'fourier8');
dis_aSlip=f_fit(t_aSlip);

```

```

P_Volt_aSlip=P_Volt(sp_No1_2:fp_No1_2);
inj_aSlip=inj_Volt(sp_No1_2:fp_No1_2);
PS0_aSlip=PS0_Volt(sp_No1_2:fp_No1_2);
PS50_aSlip=PS50_Volt(sp_No1_2:fp_No1_2);
PS100_aSlip=PS100_Volt(sp_No1_2:fp_No1_2);
enc_aSlip=enc_Volt(sp_No1_2:fp_No1_2);

```

else


```

ans_TDC_O=find(min(T_Ori)==T_Ori);
T_Ori_dividing=[-T_Ori(1:ans_TDC_O-1);T_Ori(ans_TDC_O:length(T_Ori))];
ans_TDC_f=find(min(T_fit)==T_fit);
Fun_T_s=fit(t_aSlip,T_Ori_dividing,'fourier8');
T_fit_dividing=Fun_T_s(t_aSlip);

figure
plot(t_aSlip,T_Ori_dividing,'r.')
hold on
plot(t_aSlip,T_fit_dividing,'b-')
hold on
plot(t_aSlip,T_fit_dividing_test,'g.')
grid on

%% Volume Calculate & P-V Diagram

CR=12;           %Compression Ratio
Bore=100         % [mm]
%L=connecting rod±æÀ
%R=crank shaft

L_Vc=2*R/(CR-1)

V_c=(pi*(Bore^2)/4)*L_Vc;

for i=1:length(x_Ori)
    lnS_ori(i,1)=L^2-(R^2*(sin(T_Ori_dividing(i,1)*pi/180)^2));
    lnS_fit(i,1)=L^2-(R^2*(sin(T_fit_dividing(i,1)*pi/180)^2));

    s_ori(i,1)=R*cos(T_Ori_dividing(i,1)*pi/180)+ sqrt(lnS_ori(i,1));
    s_fit(i,1)=R*cos(T_fit_dividing(i,1)*pi/180)+ sqrt(lnS_fit(i,1));

    Volume_ori(i,1)=(V_c+ ((pi*Bore^2)/4)*(L+ R-s_ori(i)))*10^-3;           %mm^3->(*10^-
3)cm^3
    Volume_test(i,1)=(V_c+ ((pi*Bore^2)/4)*(L+ R-s_fit(i,1)))*10^-3;           %mm^3-
>(*10^-3)cm^3
end
Fun_V_s=fit(t_aSlip,Volume_ori,'fourier8');
Volume_fit=Fun_V_s(t_aSlip);

figure
plot(Volume_ori,'r')
hold on
plot(Volume_fit,'b')
grid on
title(' Volume')

%% Pressure Fitting

```

```

Fun_P_S=fit(t_aSlip,P_Volt_aSlip,'smoothingspline','SmoothingParam',0.999999999)
P_final_aSlip=Fun_P_S(t_aSlip); figure
plot(T_fit_dividing,P_Volt_aSlip,'r.')
hold on
plot(T_fit_dividing,P_final_aSlip,'b-')
grid on
hold on
plot(T_fit_dividing,inj_aSlip/2,'k')
axis tight

```

```

gamma=1.35
V_m3=Volume_test*10^-6;
dV_m3=diff(V_m3);
dt=diff(t_aSlip);
P_pa=P_final_aSlip*25*10^5;
dP_pa=diff(P_pa);
dP_bar=diff(P_Volt_aSlip)*25*10^5;
dT=diff(T_fit_dividing);

```

```

P_bar_aSlip=P_Volt_aSlip*25;
for j=1:length(t_aSlip)-1
    net_hrr_Js_original(j,1)=(gamma/(gamma-
1))*(((P_bar_aSlip(j)+ P_bar_aSlip(j+ 1))*10^5/2))*dV_m3(j)/dt(j)+ (1/(gamma-
1))*((V_m3(j)+ V_m3(j+ 1))/2)*(dP_bar(j)/dt(j));

```

```

    net_hrr_Js(j,1)=(gamma/(gamma-
1))*(((P_pa(j)+ P_pa(j+ 1))/2))*dV_m3(j)/dt(j)+ (1/(gamma-
1))*((V_m3(j+ 1)+ V_m3(j))/2)*(dP_pa(j)/dt(j));
    net_hrr_Jdeg(j,1)=(gamma/(gamma-
1))*(((P_pa(j)+ P_pa(j+ 1))/2))*dV_m3(j)/dT(j)+ (1/(gamma-
1))*((V_m3(j+ 1)+ V_m3(j))/2)*(dP_pa(j)/dT(j));

```

```

    t_hrr(j,1)=(t_aSlip(j)+ t_aSlip(j+ 1))/2;
T_hrr(j,1)=(T_fit_dividing(j)+ T_fit_dividing(j+ 1))/2end

```

```

figure
subplot(4,1,1)
plot(t_hrr,net_hrr_Js_original)
grid on
subplot(4,1,2)
plot(t_hrr,net_hrr_Js)
grid on
subplot(4,1,3)
plot(T_hrr,net_hrr_Jdeg)
grid on

```

```

%% 1 injection timing
format long
figure
subplot(2,1,1)
plot(t_aSlip,inj_aSlip)
title('injection signal')
dinj=diff(inj_aSlip);
dt_cut=diff(t_aSlip);
grad_inj=dinj./dt_cut;

subplot(2,1,2)
plot(grad_inj)
title('Gradient of Inj signal')

ans_inj=find(grad_inj>=5*10^4);
t_inj=t_aSlip(ans_inj);

if length(ans_inj)>1
    fprintf('Please check the injection timing')
else
    fprintf('time=%fs',t_inj)
end

injection_delay=0.36

t_inj_real=t_inj+ injection_delay*10^-3
fitHRR2=fit(T_hrr,net_hrr_Jdeg,'gauss8');
HRR_Jdeg2=fitHRR2(T_hrr);

Fun_HRR_Sp=fit(T_hrr,net_hrr_Jdeg,'smoothingspline')

T_hrr_continue=[T_hrr(1):0.005:T_hrr(length(T_hrr))];
HRR_fit_Sp=Fun_HRR_Sp(T_hrr_continue);
HRR_fit_spline=spline(T_hrr,net_hrr_Jdeg,T_hrr_continue);
pt_max_HRR=find(max(net_hrr_Jdeg(ans_inj:length(net_hrr_Jdeg)))==net_hrr_Jdeg);
pt_max_P=find(max(P_final_aSlip)==P_final_aSlip);

cut_HRR_forFind_Slope=net_hrr_Jdeg(ans_inj:pt_max_HRR);
cut_T_hrr_fFS=T_hrr(ans_inj:pt_max_HRR);
cut_P_forFind_Slope=P_final_aSlip(ans_inj:pt_max_P);
cut_T_fFS=T_fit_dividing(ans_inj:pt_max_P);

cut_t_fFS=t_aSlip(ans_inj:pt_max_P);

d_fFS_HRR=diff(cut_HRR_forFind_Slope);
d_fFS_T_hrr=diff(cut_T_hrr_fFS);
d_fFS_P=diff(cut_P_forFind_Slope);
d_fFS_T=diff(cut_T_fFS);

```

```

d_fFS_t=diff(cut_t_fFS);
grad_fFS_HRR=d_fFS_HRR./d_fFS_T_hrr;
grad_fFS_PT=d_fFS_P./d_fFS_T;
grad_fFS_Pt=d_fFS_P./d_fFS_t;

for j=1:length(cut_T_hrr_fFS)-1
    T_dhrr(j,1)=(cut_T_hrr_fFS(j)+ cut_T_hrr_fFS(j+ 1))/2;%T_fit_dividing(j+ 1,1);%
end
for j=1:length(cut_T_fFS)-1
    T_d_fFS(j,1)=(cut_T_fFS(j)+ cut_T_fFS(j+ 1))/2;
    t_d_fFS(j,1)=(cut_t_fFS(j)+ cut_t_fFS(j+ 1))/2;
end

pt_LocalMaximumValue_HRR=find(grad_fFS_HRR==max(grad_fFS_HRR));
pt_LMV_P=find(grad_fFS_PT==max(grad_fFS_PT));
for i=1:length(T_fit_dividing)
    line(i,1)=20;
end
figure
subplot(2,2,1)
plot(T_hrr,net_hrr_Jdeg,'r.')
hold on
plot(T_fit_dividing,P_final_aSlip*25*10,'b.')
hold on
plot(T_fit_dividing,inj_aSlip*10,'k')
title('HRR[J/deg]->i P[10^-1kPa]-ÆÄ')
hold on
plot(T_fit_dividing,line,'g-')
axis( [-80 80 -600 600] )
grid on
subplot(2,2,3)
plot(cut_T_hrr_fFS,cut_HRR_forFind_Slope,'r.')
hold on
plot(cut_T_fFS,cut_P_forFind_Slope*25*10,'b.')
hold on
plot(cut_T_hrr_fFS(pt_LocalMaximumValue_HRR),cut_HRR_forFind_Slope(pt_LocalMaximumValue_HRR),'ko');
hold on
plot(cut_T_fFS(pt_LMV_P),cut_P_forFind_Slope(pt_LMV_P)*25*10,'go')
grid on
subplot(2,2,2)
plot(cut_T_hrr_fFS,cut_HRR_forFind_Slope,'r.')
grid on
title('HRR[J/deg]')

subplot(2,2,4)
plot(cut_T_fFS,cut_P_forFind_Slope*25,'b.')
title('P[bar]')
grid on

figure

```

```

subplot(1,2,1)
plot(T_dhrr,grad_fFS_HRR,'k. ');
hold on
plot(cut_T_hrr_fFS,cut_HRR_forFind_Slope,'r. ')
grid on

subplot(1,2,2)
plot(T_d_fFS,grad_fFS_PT*25,'k. ');

hold on
plot(cut_T_fFS,cut_P_forFind_Slope*25,'b. ')
grid on

%% Ver20-4_Step1³;

cutting_ans=find(T_hrr_continue>-55 & T_hrr_continue<-50);
Ch_net_hrr_Jdeg=HRR_fit_Sp;
for i=1:cutting_ans(1);
    Ch_net_hrr_Jdeg(i,1)=0;
end
ans_combustion=find(net_hrr_Jdeg>=20);
ans_combustion_inC=find(Ch_net_hrr_Jdeg>=20);
Theta_combustion1=T_hrr_continue(ans_combustion_inC(1)-1);
Theta_combustion2=T_hrr_continue(ans_combustion_inC(1));
C_hrr1=HRR_fit_Sp(ans_combustion_inC(1)-1);
C_hrr2=HRR_fit_Sp(ans_combustion_inC(1));
%ans_combustion=find(HRR_fit_Sp==20)
Con1=abs(20-C_hrr1);
Con2=abs(20-C_hrr2);
if Con1<Con2
    position_inC=ans_combustion_inC(1)-1
    T_combustion_inC=Theta_combustion1
    %t_combustion_inC=t_hrr(position_inC)
else
    position_inC=ans_combustion_inC(1)
    T_combustion_inC=Theta_combustion2
    %t_combustion=t_hrr(position_inC)
end
C_hrr=HRR_fit_Sp(position_inC);

T_fit_Sp=fit(t_hrr,T_hrr,'smoothingspline','SmoothingParam',1)
t_hrr_continue=[t_hrr(1):0.00001:t_hrr(length(T_hrr))];
T_HRR_continue2=T_fit_Sp(t_hrr_continue);

ans_ThetaAtC=find(T_HRR_continue2>=T_combustion_inC);

t_combustion=t_hrr_continue(ans_ThetaAtC(1));
T_combustion=T_HRR_continue2(ans_ThetaAtC(1));

peak_hrr=max(net_hrr_Jdeg(1:length(net_hrr_Jdeg),1));

```

```

peak_pt=find(net_hrr_Jdeg==peak_hrr);

figure
subplot(3,1,1)
plot(t_aSlip,inj_aSlip)
hold on
plot(t_inj,ans_inj*0,'ro')
subplot(3,1,2)
plot(t_hrr,net_hrr_Jdeg,'k.')
hold on
plot(t_combustion,20,'bo')
hold on
plot(t_hrr(ans_combustion),net_hrr_Jdeg(ans_combustion),'ro')
title('s_combustion \u00b0C \u00c2\u00b0')
hold on
plot(t_aSlip(peak_pt),peak_hrr,'bo')
grid on
subplot(3,1,3)
plot(t_aSlip,inj_aSlip,'b',t_hrr,net_hrr_Jdeg,'r.',t_inj,0,'b*',t_inj_real,0,'r*',t_combustion,C_hrr,'ro',t_hrr,HRR_Jdeg2,'b-')

```

```
%% Ver 20-4_Step2
```

```

cut_T_continue=[T_d_fFS(1):0.005:T_d_fFS(length(T_d_fFS))];
ans_pt_combustion=find(cut_T_continue>=T_combustion_inC);
%cut_T_sp=cut_T_continue(ans_pt_combustion(1));
sp_grad_fFS_P=spline(T_d_fFS,grad_fFS_PT,cut_T_continue);

```

```

figure
subplot(1,2,1)
plot(T_dhrr,grad_fFS_HRR,'k. ');
hold on
plot(cut_T_hrr_fFS,cut_HRR_forFind_Slope,'r.')
grid on
hold on
plot(T_combustion,C_hrr,'bo')

```

```

subplot(1,2,2)
plot(T_d_fFS,grad_fFS_PT*25,'k. ');

```

```

hold on
plot(cut_T_fFS,cut_P_forFind_Slope*25,'r.')

```

```

hold on
plot(T_combustion_inC,sp_grad_fFS_P(ans_pt_combustion(1))*25,'bo')
grid on

```

```
fprintf('pressure at Combustion point =%f bar',sp_grad_fFS_P(ans_pt_combustion(1))*25)
```

```

T_inj=T_fit_dividing(ans_inj);

if T_combustion>0 & T_inj>-9
    figure
    plot(T_hrr,net_hrr_Jdeg,'r.')
    hold on
    plot(T_fit_dividing,P_final_aSlip*25*10,'b.')
    hold on
    plot(T_fit_dividing,inj_aSlip*10,'k')
    hold on
    plot(T_fit_dividing,line,'g-')
    axis( [-80 80 -600 600] )
    hold on
    plot(T_combustion,C_hrr,'k*')
    grid on

    cut_P_basePdrop1=cut_P_forFind_Slope;
    cut_T_basePdrop1=cut_T_fFS;
    cut_t_basePdrop1=t_aSlip(ans_inj:pt_max_P);

    UnderZero_gradP=find(grad_fFS_Pt<=0);

    figure
    subplot(2,2,1)
    plot(cut_t_basePdrop1,cut_P_basePdrop1*25,'r.')
    grid on
    subplot(2,2,2)
    plot(cut_T_basePdrop1,cut_P_basePdrop1*25,'r.')
    grid on
    subplot(2,2,3)
    plot(t_d_fFS,grad_fFS_Pt*25,'k.');
```

```

    hold on
    grid on
    plot(t_d_fFS(UnderZero_gradP),grad_fFS_Pt(UnderZero_gradP)*25,'bo')

    l_UZ_gP=length(UnderZero_gradP);

    pt_Ch_gradP=UnderZero_gradP(l_UZ_gP);

    t_Ch_gradP=cut_t_fFS(pt_Ch_gradP);

    cut_P_basePdrop2=cut_P_basePdrop1(1:pt_Ch_gradP+ 1);
    cut_T_basePdrop2=cut_T_basePdrop1(1:pt_Ch_gradP+ 1);
    cut_t_basePdrop2=cut_t_basePdrop1(1:pt_Ch_gradP+ 1);

    pt_max_P_bPd2=find(max(cut_P_basePdrop2)==cut_P_basePdrop2);

    P_max_inP_bPd2=max(cut_P_basePdrop2);

```

```

%step 3

cut_P_basePdrop3=cut_P_basePdrop1(pt_Ch_gradP+ 2:length(cut_P_basePdrop1));
cut_T_basePdrop3=cut_T_basePdrop1(pt_Ch_gradP+ 2:length(cut_P_basePdrop1));
cut_t_basePdrop3=cut_t_basePdrop1(pt_Ch_gradP+ 2:length(cut_P_basePdrop1));

t_bPd3=[min(cut_t_basePdrop3):0.00001:max(cut_t_basePdrop3)];

P_bPd3=spline(cut_t_basePdrop3,cut_P_basePdrop3,t_bPd3);

pt_near_MaxP=find((P_max_inP_bPd2-0.5)<P_bPd3 & (P_max_inP_bPd2+ 0.5)>P_bPd3);

P_maxMinusP=abs(P_max_inP_bPd2-P_bPd3(pt_near_MaxP));

pt_recoverP=find(min(P_maxMinusP)==P_maxMinusP);

recover_t=t_bPd3(pt_recoverP);

T_bPd3=spline(cut_t_basePdrop3,cut_T_basePdrop3,t_bPd3);

recover_T=T_bPd3(pt_recoverP);      % Recover pressure point

T_combustion=recover_T
t_combustion=recover_t

else
%% 3. Real Injection Timing [deg]
figure
plot(T_fit_dividing,inj_aSlip,T_hrr,net_hrr_Jdeg,'r.',T_fit_dividing(ans_inj),0,'b*',T_combustion,
C_hrr,'ro',T_hrr,HRR_Jdeg2,'b-')
title('signal of Inj & HRR(J/deg)')
xlabel('Theta(deg)')
ylabel('J/deg, Volt')
axis ( [-80 80 -200 500] )
grid on
end
IDT=t_combustion-t_inj_real %[second]

```

```

T_inj=T_fit_dividing(ans_inj);

if max(P_final_aSlip)*25 < 25 %misfire Condition from motoring data!
    fprintf('Wn misfire!!!!Wn')
end
%% 4. Saving

columnA1=t_aSlip;
columnB1=dis_Volt_aSlip; % [Volt] Data from laser displacement Sensor
columnC1=T_fit_dividing;
columnD1=P_Volt_aSlip; % [Volt] Actual Data.
columnE1=P_final_aSlip; % [Volt] Smoothline fitting .
columnF1=inj_aSlip;
columnG1=PS0_aSlip;
columnH1=PS50_aSlip;
columnI1=PS100_aSlip;
columnJ1=enc_aSlip;
columnK1=Volume_test; %[cm^3]

columnA2=t_hrr;
columnB2=T_hrr;
columnC2=net_hrr Js;
columnD2=net_hrr Jdeg;
columnE2=HRR_Jdeg2;

columnA3=t_inj;
columnB3=t_inj_real;
columnC3=T_inj;
columnD3=t_combustion;
columnE3=T_combustion;
columnF3=IDT;

Saving_Array1=[columnA1,columnB1,columnC1,columnD1,columnE1,columnF1,columnG1,colu
mnH1,columnI1,columnJ1,columnK1];
Saving_Array2=[columnA2,columnB2,columnC2,columnD2,columnE2];
Saving_Array3=[columnA3,columnB3,columnC3,columnD3,columnE3,columnF3];
S_filename='title_cal_garduation.xlsx'
xlswrite(S_filename,Saving_Array1,1)
xlswrite(S_filename,Saving_Array2,2)
xlswrite(S_filename,Saving_Array3,3)

% IMEP

file_for_IMEP='title_cal_garduation.xlsx' %jpg

```

```

[Data_ori]=xlsread(file_for_IMEP);

Theta=Data_ori(:,3);
P=Data_ori(:,5);
Volume=Data_ori(:,11);

pt_V_min=find(min(Volume)==Volume);

V_CS=Volume(1:pt_V_min);
P_CS=P(1:pt_V_min);

V_ES=Volume(pt_V_min+ 1:length(Volume));
P_ES=P(pt_V_min+ 1:length(Volume));

check80deg1=abs(V_CS-2000);
pt_V_CS_at80deg=find(min(check80deg1)==check80deg1);

check80deg2=abs(V_ES-2000);
pt_V_ES_at80deg=find(min(check80deg2)==check80deg2);

figure
plot(Volume,P*25,'b.',V_CS(pt_V_CS_at80deg),P_CS(pt_V_CS_at80deg)*25,'r*',V_ES(pt_V_ES_
at80deg),P_ES(pt_V_ES_at80deg)*25,'r*')
hold on
plot(2614,[0:max(P)],'g')
grid on

cutV_CS=V_CS(pt_V_CS_at80deg:length(V_CS));
cutP_CS=P_CS(pt_V_CS_at80deg:length(V_CS))*25;

cutV_ES=V_ES(1:pt_V_ES_at80deg);
cutP_ES=P_ES(1:pt_V_ES_at80deg)*25;

work_CS=trapz(cutV_CS,cutP_CS)
work_ES=trapz(cutV_ES,cutP_ES)
% Bore=100 CrankRod=225
V_d=(pi*10^2/4)*2*22.5 %[cm^3]

mep=(work_CS+ work_ES)/V_d %[bar]

fprintf('Wnmep = %f barWn',mep)

```

Abstract

A Study on the Autoignition characteristics of gasoline/biodiesel blended fuel using a Rapid Compression Expansion Machine

Kyeonghun Jwa

Dep. of Mechanical and Automotive Engineering

Graduate School, University of Ulsan

Internal combustion engines using fossil fuels cause two problems: exhaustion of petroleum resources and global warming due to combustion products and air pollution. For researchers, therefore, increasing fuel efficiency and reducing harmful emissions was an important concern. Among them, the gasoline compression ignition method can reduce exhaust gas emissions with high efficiency. However, due to the spontaneous ignition resistant characteristics due to the high-octane number of gasoline, there is a problem that the combustion is not performed properly at a low intake temperature under low load operation.

In this study, the problem of GCI method at low intake air temperature was solved by using gasoline biodiesel blended fuel, and the autoignition characteristic of gasoline biodiesel blended fuel was analyzed using a rapid compression expansion machine(RCEM).

Gasoline biodiesel blend fuel was mixed 20% of biodiesel with gasoline volume and spontaneous ignition characteristics were analyzed according to fuel injection timing and compression ratio.

First, this study investigated the spontaneous ignition characteristics of gasoline biodiesel blended fuel according to the injection timing. The compression ratio was fixed at 12, and the injection timing was delayed from -49° CA ATDC. In the range of -10° CA to ATDC, the ignition delay time of the mixed fuel was shortened and the IMEP was increased as the injection timing was delayed. However, the ignition delay time and IMEP did not change when injected near TDC.

To investigate the auto-ignition characteristics of the gasoline biodiesel blended fuel according to the compression ratio, the compression ratios were tested at 10, 14 and 16, and the injection timing was -33° CA ATDC, -20° CA ATDC, -10° CA ATDC, and -0° CA ATDC. The Ignition delay tended to be shorter as the injection timing was delayed at all compression ratios. However, IMEP calculated the IMEP at CR10, CR16 only at specific injection periods and -10° at -20° CA ATDC. At the compression ratios

12 and 14, the best IMEP results were obtained at the widest crank angle range of -10° CA ATDC at -20° CA ATDC.

이력서(Curriculum Vitae)

- 성명: 좌경훈
- 생년월일: 1992년 07월 24일
- 출생지: 제주특별자치도 제주시 일주서로 4120
- 본적지: 제주특별자치도 제주시 도령로 140

학력(Education)

- 2011.03 ~ 2016.08 울산대학교 기계공학부 졸업(B.S)
- 2016.08 ~ 울산대학교 일반대학원 졸업예정(M.S)

학술활동(Activities)

- 한국 자동차공학회(KSAE) 학생회원

연구 논문 (Publication)

1. Dinh Nam Vu, Shubhra Kanti Das, Kyeonghun Jwa, Ocktaeck Lim,
“Characteristics of auto-ignition in gasoline-biodiesel blended fuel
under engine-like conditions”, Journal of Automobile Engineering

학술대회(Conference)

1. Sakda Thongchai, Kyeonghun Jwa, Hyojin Kim, Ocktaeck Lim, “Influence of Injection Strategy on a Compression Ignition Engine Fueled with Gasoline”, 2016 ICAE Beijing-China, 2016.10.10
2. Vu Dinh Nam, Kyeonghun Jwa, Ocktaeck Lim, “Study on Characteristics of Auto-ignition in Gasoline-Biodiesel Blend fuel with a Rapid compression expansion machine”, 2016 ICAE Beijing-China, 2016.10.10
3. 좌경훈, 임옥택 “Comparative life cycle assessment of lithium-ion battery electric bus and CNG Bus from well to wheel”, 2017 Renewable Energy integration with Mini/Microgrid Applied energy symposium and forum, 2017.10.20
4. 좌경훈, 임옥택 “A Study of Natural Gas Mixing Percentage on Combustion and Emission Characteristics of a CNG/Diesel Dual-Fuel Engine”, 2017 11th Asia-Pacific Conference on Combustion, 2017.12.14
5. 좌경훈, 부 덩 남, 아르디카 세티아완, 임옥택 “A Study on Ignition Delay of Gasoline/Bio-Diesel Blended Fuel with a Rapid Compression Expansion Machine”, 2018년 6월 KSAE 춘계학술대회

6. 푸뜨라사리 야누안드리, 좌경훈, 임옥택, “Emissions control of GCI engine fueled with gasoline-biodiesel blend using double injections strategy, EGR, and intake boosting”, 2018 The 2nd International Symposium on Fuels and Energy HU-ACE (Hiroshima University Advanced Core for Energetics), 2018.07.03

감사의 글 (Thanks to)

제 욕심에 취직도 안하고 대학원을 진학한다는 말을 들으시고도 아무 말씀 없이 저를 믿고 지원 해주신 부모님께 제일 먼저 감사하다는 말을 드리고 싶습니다. 1년에 쉬는 날 거의 없이 일을 하시는 것이 못한 아들 때문인 것 같아 항상 죄송하지만 믿어주시는 만큼 열심히 살면서 부모님께 부끄럽지 않은 제 자신에게 부끄럽지 않은 사람으로 살려고 노력하겠습니다. 또 못한 오빠보다 먼저 자리를 잡고 취직해서 열심히 사회생활 하고 있는 내 동생에게도 고맙단 말을 전하고 싶습니다. 박사까지 하게 된다면 몇 년 더 못한 아들이 될지도 모르지만 그래도 믿어주시는 부모님이 있어 도전할 수 있습니다. 아버지 어머니, 경선 사랑하고 감사합니다.

처음 연구실에 들어온 2학년 겨울방학부터, 임옥택 교수님께 메일을 보내고 연구실 생활을 시작으로 만난 충환이형, 연호형, 효원이형, 재원이형, 효진이, 나랑 후형, 흥 박사형, 투샤르, 삭다, 야누, 남, 슈브라, 아디티야, 시합, 밤방, 콰, 디카까지 같은 연구실에서 만난 인연만큼 모두들 바라는 삶을 살면서 행복했으면 좋겠습니다. 앞으로 열심히 할 현이형, 유진이형, 양화도 대학원 생활에서 많이 경험하고 배우고 성장하는 시간으로 잘 지내서 졸업까지 승승장구하길 바랍니다.

13년 12월 2학년 겨울방학, 효원이형이 붙인 내연기관 연구실 연구생 모집 공지를 보고 들어와 시작한 연구실 생활, 슷기 없고 자신감도 부족했었지만 연구실이라는 소속감으로 공부도 하고 외국인 친구도 사귀고 학과 선배도 생기면서 곁돌던 학교 생활에 목표가 생기게 되었습니다. 이렇게 학부를 졸업하고 석사과정까지 졸업하는 데 있어 지원해주신 임옥택 교수님께 감사의 인사를 드립니다. 저에게 박사 유학이라는 새로운 목표를 주신 것과 값을 매기지 못할 여러가지 경험들, 학회 발표, 사업 관련 일, 학과 공부까지, 그저 취업

걱정으로 수업 듣고 졸업했다면 알지 못했을 다른 시각을 주신 것에 다시 한번 감사드립니다. 떠나는 날까지 최선을 다하도록 하겠습니다.

또한 제주도에서 울산에 올라와 이방인이라는 느낌으로 학교를 다니면서 동아리도 적응 못하고 나왔었는데 북토피아라는 독서모임을 통해 인간적으로 부족했던 면을 채우고 성장할 수 있었던 것 같습니다. 모임 막내로 시작해 어느덧, 최고 학년이 되었지만 그 동안 함께 책을 읽고 이야기를 나누면서 많은 도움이 되었습니다. 특히나 학생들을 잘 이끌어 주신 이상용 선생님과 모임의 장으로 열심히 이끌어주었던 정현이, 진겸이, 현지까지 그리고 같이 이야기를 나누는 많은 친구들에게도 고맙다고 전하고 싶습니다.

제주도를 떠나 타지 생활하면서 외롭지 않을 수 있도록 항상 응원해주고 같이 있어준 나의 친구들 용민, 정근, 대근, 준혁, 영조, 성민, 재성, 재혁, 민범, 동호, 동섭, 정훈이까지 앞으로도 계속 좋은 친구로 남자!

위의 모든 분들께 다시 한 번 감사의 인사를 드리고 부족한 졸업 논문을 읽어 주셔서 감사합니다.

2018년 6월 29일

좌경훈 드림