

## 파일럿분사에 의한 바이오디젤유의 연소과정에 관한 연구

방 중 철<sup>\*1)</sup> · 김 성 훈<sup>2)</sup>

금오공과대학교 기계공학부<sup>1)</sup> · 금오공과대학교 대학원 기계공학과<sup>2)</sup>

### A Study on Combustion Process of Biodiesel Fuel with Pilot Injection in a Common-rail Diesel Engine

Joongcheol Bang<sup>\*1)</sup> · Sunghoon Kim<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>School of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gyeongbuk 730-701, Korea

<sup>2)</sup>Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Kumoh National Institute of Technology, Gyeongbuk 730-701, Korea

(Received 12 October 2010 / Accepted 27 December 2010)

**Abstract** : American NREL (National Renewable Energy Laboratory) reported that BDF20 could reduce PM, CO, SOx, and cancerogenic matters by 13.6%, 9.3%, 17.6%, and 13% respectively, compared to diesel fuel. BDF20 has been being tested on garbage trucks and official vehicles at Seoul City, which is positive on air environment, but negative on combustion by higher viscosity in winter season. This study investigated the combustion characteristics by applying pilot injection for improving the deterioration of combustibility caused by the higher viscosity of the BDF20 with the combustion flames taken by a high-speed camera and the cylinder pressure diagram.

A 4-cycle single-cylinder diesel engine was remodeled to a visible 2-cycle engine for taking the flame photographs, which has a common-rail injection system. The test was done laboratory temperature at 5~6°C.

The results obtained are summarized as follows,

- (1) In the case of without pilot injection, the flame propagation speed was slowed and the maximum combustion pressure became lower. The phenomena became further aggravated as the fuel viscosity gets higher.
- (2) In the case of with pilot injection, early stage of combustion such as rapid ignition timing and flame propagation was activated since intermediate products formed by pilot injection act as a catalyst for combustion of main fuel.

**Key words** : Common-rail diesel engine(커먼레일 디젤기관), Visible engine(가시화 기관), BDF20(바이오디젤 20%혼합연료), High speed flame photographs(고속도 화염사진), Cylinder pressure diagram(지압선도)

### 1. 서론

화석연료인 경유는 연료자체 내에 산소성분이 전혀 존재하지 않는 탄화수소 화합물이기 때문에 디젤기관의 특성상 저속고부하영역이나 연소말기에는 불완전연소를 유발시킨다. 그러나 친환경적이며 합산소 연료중의 하나인 바이오디젤유는 경유와 연료성상이 비슷하고 높은 에너지 밀도를 가지고 있

어 현재의 상용디젤기관에 구조변경 없이 사용가능하다는 것이 입증되었으나 점도가 높고 저온유동성이 낮아 순수 바이오디젤유는 동절기와 같은 저온 환경 하에서 사용하는 데에는 불리한 입장이다. 따라서 현재까지는 바이오디젤유를 경유와 혼합하여 사용하는 방법이 보편적이며 국가정책상 2006년 7월부터 경유 95%와 바이오디젤유 5%를 혼합시킨 연료를 시판 중에 있으나, 최근 서울시가 바이오디젤유의 확대보급을 위해 수도권 매립지를 포함한

\*Corresponding author, E-mail: bjc@kumoh.ac.kr

총 3곳에 바이오디젤유의 함유량이 20%(이하 BDF20으로 칭함)인 바이오디젤 전용주유소를 완공하고 운영에 들어갔다. 아직은 대형청소차량이나 관용차량에 시범적으로 보급중이나 자가정비시설과 주유시설을 갖춘 사업장에서는 버스, 트럭, 건설중장비에도 사용할 수 있도록 허용하고 있어 향후 보급속도가 가속될 전망이다. 미국의 신재생에너지연구소의 발표에 의하면 BDF20을 사용할 경우 경유 대비 미세먼지는 13.6%, 일산화탄소는 9.3%, 황산화물은 17.6%, 발암물질은 13% 줄어드는 효과가 있다.

바이오디젤유의 디젤기관 적용에 관한 연구동향은 연료혼합율에 따른 분무특성이나 기관출력, 연료소비율, 배기배출물 농도 등의 기관성능을 비교 측정하여 대체연료로서의 이용가치를 평가하는 것이 주류를 이루고 있으며, 최근에는 바이오디젤유의 고점성에 의한 분무성 저하를 극복하기 위하여 분사압 100MPa이상의 커먼레일 분사시스템을 사용하고 있다.<sup>1-4)</sup>

한편, 오래전부터 학술적인 고찰에 의해 효과는 입증되었으나 분사시스템의 미비로 실용화가 어려웠던 파일럿분사(과거에는 실린더내 보조분사의 형태로 많은 연구가 진행되었다.<sup>5-7)</sup>)는 커먼레일 시스템의 등장 이후 실용화 되어져 연비의 향상, 소음·진동 및 NOx의 저감 등에 큰 기여를 하고 있다.<sup>8-11)</sup>

본 연구에서는 현재 서울시가 시범적으로 보급중인 BDF20의 환경적인 측면의 이점과는 달리 동절기에 나타날 수 있는 점성증가에 의한 연소성능의 저하를 개선하기위한 수단으로써 파일럿분사를 실시하였을 시의 연소과정을 화상해석하고, 또 실린더내의 압력선도를 채취하여 기관성능과의 관련성을 고찰하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

실험기관은 원래 수냉식 단기통의 4행정 디젤기관이었으나 가시화를 위하여 실린더헤드를 떼어내고 실린더라이너에 6개의 소기공과 2개의 배기공을 가공하여 Schnürle 소기방식의 직접분사식 2행정기관으로 개조하였다. 떼어낸 실린더헤드 대신에 Fig. 1

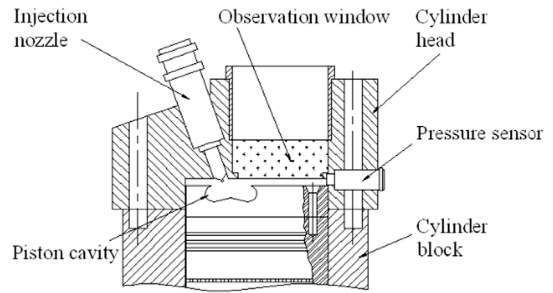


Fig. 1 Remodeling test engine and cylinder head

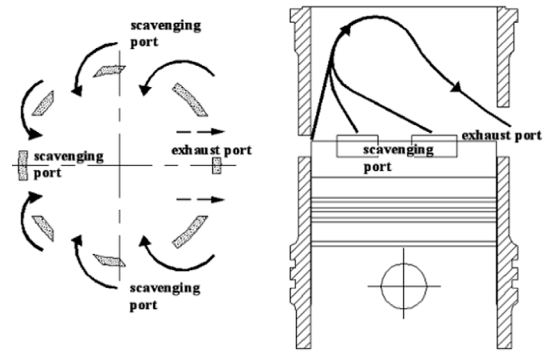


Fig. 2 Scavenging flows of experimental engine

과 같이 화염의 발달경과를 직접 촬영할 수 있도록 강화유리를 사용하여 관찰창을 설치한 별도의 헤드를 제작하여 결합시켰다. 2행정의 가시화기관으로 개조하는 경우 연료분사노즐의 장착제한으로 인해 실린더헤드 측면에 노즐을 설치하여 하향분사하는 경우<sup>12)</sup>가 많았으나, 본 연구에서는 보다 실기에 가까운 분사조건을 재현하기 위하여 실린더헤드의 상부에 노즐을 설치하여 연료가 캐비티내에 분사되도록 하였다. 단, 분사노즐의 상부장착으로 인하여 전 연소실면적의 약 70% 가시화를 실현하였다. 실린더내의 소·배기유동은 Fig. 2에 나타내었으며 소기효율을 높이기 위하여 라이너벽면을 이용하여 소기공의 양 측면과 윗면에 45°의 각도를 주어 가공하였다. 2행정기관으로 개조함에 따른 유효 압축비의 저하를 보충하고 매 사이클마다 동일한 급기밀도를 유지시키기 위하여 루츠블로워를 작동시켜 소기압을 표준대기압(101.3KPa)보다 조금 높은 110 KPa로 유지시켰다. 또 기존의 기계식 분사시스템(플러저형)을 떼어내고 커먼레일 분사시스템으로 교체하였다. Table 1 ~ Table 3은 실험기관의 제원 및 실험조건,

Table 1 Specifications of experimental engine

Items	Specifications
Engine type	2-stroke D.I. diesel engine
Bore × Stroke	92 mm × 95 mm
Compression ratio	16.4
Scavenging port open	ATDC 120°CA
Scavenging port close	ABDC 60°CA
Exhaust port open	ATDC 108°CA
Exhaust port close	ABDC 72°CA
Cooling type	Air-cooling

Table 2 Experimental conditions

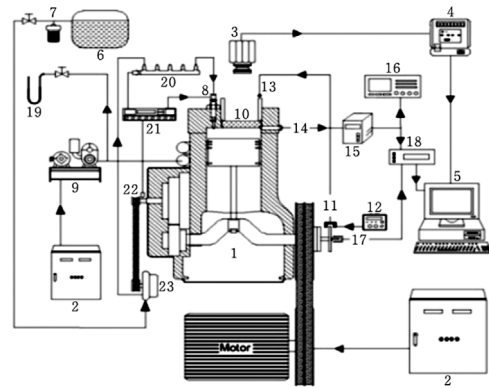
Items	Conditions
Engine speed	1,000 rpm
Combustion chamber	Toroidal type
Fuel delivery	Main alone 12 mg/st Main 9mg/st, Pilot 3mg/st
Main injection timing	BTDC 18°CA
Pilot injection timing	BTDC 30°CA, BTDC 40°CA, BTDC 50°CA
Fuel injection pressure	100 MPa
Scavenging pressure	110 KPa
Nozzle holes	3
Test fuels	Diesel fuel, BDF20

Table 3 Physical properties of test fuels

Properties	Diesel fuel	BDF20
Density (15°C, kg/m <sup>3</sup> )	837.3	846.4
Viscosity (50°C, mm <sup>2</sup> /s)	3.0	3.2
Cetane number	51.4	53.6
Carbon content (wt.%)	85.83	84.63
Hydrogen content (wt.%)	13.82	13.54
Nitrogen content (wt.%)	0.16	0.18
Oxygen content (wt.%)	0	1.61

사용연료의 물성치를 나타낸 것이다. 본 실험에서 사용한 BDF 20은 대두유(soybean oil, C12~C22 FAME)와 경유를 20% 대 80%의 체적비로 혼합시킨 것이다.

Fig. 3 및 Fig. 4는 실험장치의 개략도와 실험장치의 실물사진으로서, 연소화염은 기관을 충분히 난기운전 시킨 후 고속비디오카메라(motion analyzer, Xtra HG-TH)를 사용하여 5000 frames/sec의 속도로 촬영하였다. 이 촬영속도에서는 기관의 회전속도가 1,000 rpm 이면 1 frame 당의 간격은 1.2°CA이다.



- 1. Experimental engine
- 2. Inverter controller
- 3. High speed camera
- 4. High speed camera processor
- 5. Personal computer
- 6. Fuel tank
- 7. Fuel filter
- 8. Injector nozzle
- 9. Roots blower
- 10. Observation window
- 11. Photo diode
- 12. Power supply
- 13. LED
- 14. Pressure sensor
- 15. Amplifier
- 16. Oscilloscope
- 17. Encoder
- 18. A/D board
- 19. U-manometer
- 20. Common rail
- 21. Injector driver
- 22. Cam sensor
- 23. High pressure pump

Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

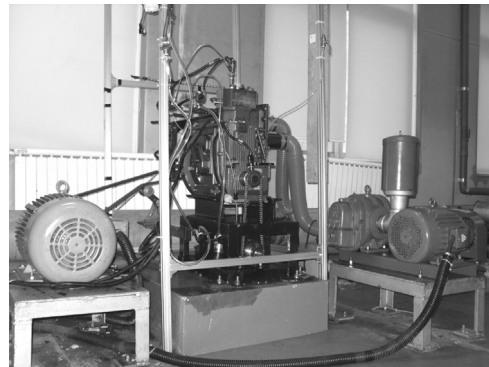


Fig. 4 General view of experimental apparatus

또한 화상에서 TDC 위치를 확인하기 위하여 플라이휠의 TDC마크에 맞추어 설치한 포토다이오드로부터의 신호를 LED로 점멸시키고 연소화염과 동시에 촬영하여 TDC를 나타내었다. 뿐만 아니라 이때 실린더내의 압력변화도 동시에 측정하여 화염 발달 상태에 따른 특징을 비교하였다. 그리고, 본 실험은 실내온도가 5~6°C 인 동절기에 실시되었다.

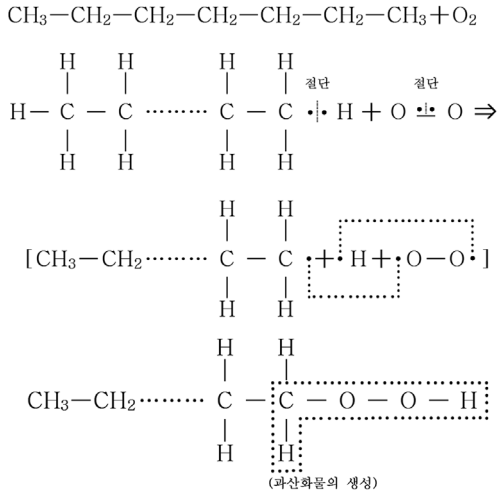
### 3. 실험결과 및 고찰

기관의 연소성 개선에 미치는 파일럿분사의 효과

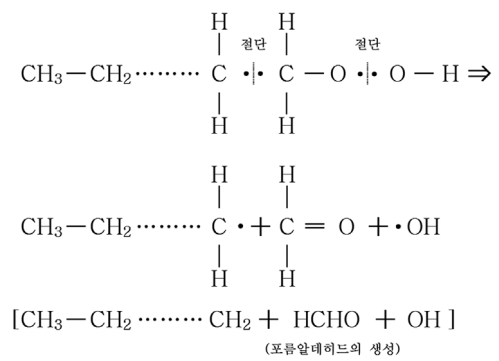
는, 압축행정 중 실린더내로 분사된 파일릿 분무에 의해 형성된 희박 예혼합기의 완전산화 또는 열분해에 의해 생겨난 중간생성물(주로 유리기)이 주분무의 연소반응, 특히 발화핵이 형성될 때까지의 초기연쇄반응을 촉진시키는 기폭제의 역할을 하는 것으로 생각하면 이해하기 쉽다.

예를 들어 n-heptane(C<sub>7</sub>H<sub>16</sub>)의 가연성 혼합기가 산화하는 경우 다음과 같은 화염전반응(pre-reaction) 과정을 거치게 된다.

가) 과산화물 생성반응 (peroxide reaction)



나) 포름알데히드 생성반응 또는 냉염반응(cool flame reaction)



Hirako 와 Ohta 등의 보고서<sup>5-7)</sup>에 의하면 C-H 결합의 해리에너지가 적은 연료일수록 유리기의 생성이 쉬어 이를 선 분사할 경우 주분무의 착화에 미치는 영향이 커진다고 밝히고 있다.

Fig. 5는 BDF20을 주연료로 사용하여 파일릿분사시기의 변화에 따른 연소경과를 경유를 분사한 경우와 비교하여 나타낸 화염사진이다.

본 실험에 사용한 toroidal 연소실처럼 좁고 깊은 캐비티를 가진 연소실의 경우, 연소실 구경비가 작기 때문에 주분무의 도달거리는 매우 짧아 분사초기에는 대부분의 연료가 직접 캐비티 벽면에 충돌한다. 이 충돌과정에서 분무는 재미롭해 되거나 일부의 연료는 캐비티 벽면을 따라 선회하면서 증발하여 주변의 공기와 빠른 속도로 혼합되어진다.

Fig. 5에서 살펴보면 연료의 종류를 막론하고 각 분사조건별 최초의 착화는 분무의 충돌이 일어난 캐비티내의 몇 곳에서 발생된 발화핵으로부터 시작된다. 이후 가벼워진 연소가스가 열혼합에 의해 캐비티의 중심부로 이동하면서 혼합이 촉진되어 캐비티 전역으로 화염이 확산된 후 압축간극부로 분출되는 형태를 띠고 있다.

먼저 파일릿분사를 실시하지 않았을 경우에 있어서 경유의 화염과 BDF20 화염간의 연소경과를 비교하여 보면, 경유를 분사한 (a)의 경우에는 최초의 착화가 BTDC 2.4°CA에서 일어난 후 TDC에 이르면 서부터는 화염이 거의 연소실 전역까지 전파되고 있어 초기연소가 매우 급격함을 알 수 있다. 가연혼합기의 순간적인 연소량 증대는 평균유효압력을 높여 열효율과 기관출력을 증대시키나 과도할 경우에는 노크를 유발시키므로 경계하여야 할 요소중의 하나이다. 초기연소가 급격했던 만큼 연소중반기 이후에는 잔존산소의 부족과 더불어 연소생성물의 급증에 의해 연료분사종료시점 근처에서 분사된 연료는 불완전 연소를 하게 되고 일부 산소와 마주치지 못한 연료는 그대로 그을음이 되어 배출된다. 연소중반 이후의 화염사진에서 보듯이 좌측상단에서 우측하단에 걸쳐 띠모양으로 형성되어져 있는 암갈색의 화염군은 매연 발생영역으로 생각되며 따라서 잔광기간도 길어질 것으로 예측된다.

이에 비하여 파일릿분사없이 BDF20을 분사한 (b)의 경우에는, 연료자체의 물성상 점도가 높고 큰 표면장력으로 인해 분무의 분열과 혼합기 형성이 지연되어 발화핵의 크기나 개수가 줄어들 뿐 아니라 발화핵의 발생시기도 경유에 비해 약 2.4°CA 정

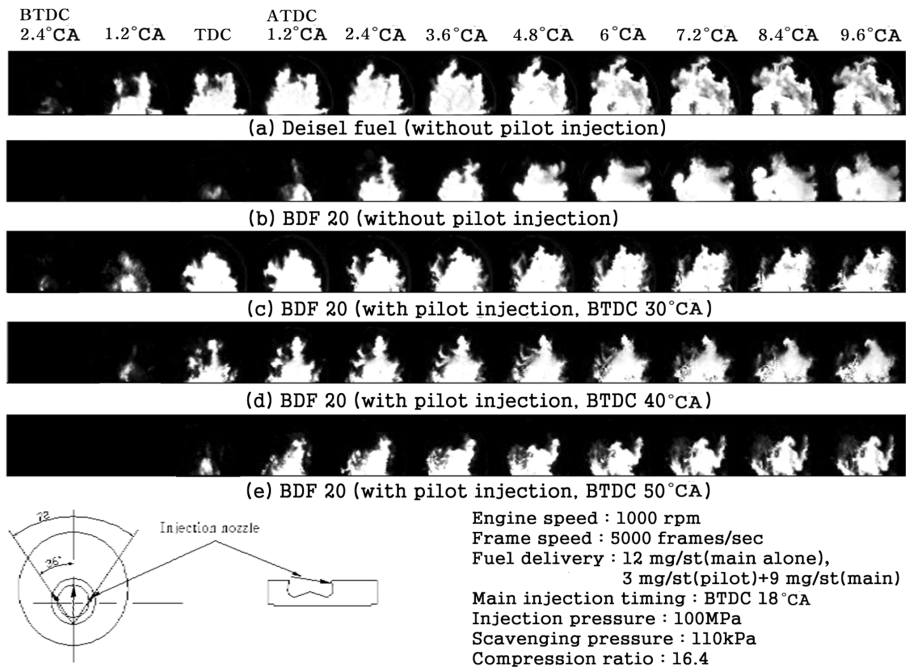


Fig. 5 High speed flame photographs of each pilot injection timing using BDF20

도 늦어지고 있다. 또 착화이후의 화염전파속도에 있어서도 차이를 보여 캐비티내에서의 확산속도가 느리고 캐비티로부터 압축간극부로의 화염분출력이 매우 약하기 때문에 분출된 이후에도 유동이 거의 보이지 않는 화염덩어리를 형성한 채 연소가 진행된다. 그러나 연료자체에 함유된 산소에 의해 경유의 화염보다 매우 밝은 빛깔을 띠고 있다.

한편, 파일럿분사를 실시한 경우에 있어 전술한 유리기 등의 중간생성물들이 주분무의 연소에 영향을 미치기 위해서는 양 분무간의 상대적 위치가 대단히 중요할 것으로 생각된다. 따라서 파일럿분사시기별 양 분무의 접촉상태를 예상하여 보면

(1) 파일럿분사시기(BTDC 30°CA)와 주분사시기가 12°CA의 간격을 가지는 (c)의 경우에는 파일럿분무에 의해 형성된 희박예혼합기가 주분무의 주류부를 감싸는 형태가 될 것으로 생각된다. 따라서 주분무와 예혼합기의 접촉면적이 넓고 접촉시간도 유지할 수 있어 예혼합기로부터의 중간생성물이 주분무의 초기연소반응에 있어 연쇄담체의 역할을 하는데 매우 유리하게 작용할 것이다.

(2) 파일럿분사시기(BTDC 50°CA)와 주분사시기가

32°CA의 간격을 가지는 (e)의 경우처럼 실린더내의 온도와 압력이 낮은 상태에서 파일럿분사를 실시하게 되면 분무의 관통력이 너무 강해져 노즐 반대측의 냉각된 실린더 벽면에 부착하게 되어 증발이 늦어진다. 또 증발이 일어난 극히 미량의 연료는 실린더내의 공기유동에 의해 연소실 전역에 걸쳐 분포하게 되나 이 예혼합기로부터 생성된 중간생성물의 농도가 너무 낮아지게 된다.

또 연소실의 일부에서 착화가 일어나면 실린더 벽면에 부착되어 증발이 늦어졌던 파일럿분무는 주분무와 접촉하지 못한 채 자연발화 하게되어 중간생성물이 주분무의 연소에 유효하게 이용되지 못할 것으로 생각된다.

이상과 같은 유추 하에 파일럿분사시기별 연소경과를 비교하여 본다.

먼저 (c)의 연소경과부터 살펴보면, 연료의 물성상 착화시기가 지연되었던 (b)와는 달리 경유의 착화시기와 동일해 질 만큼 발화가 빨라지고 캐비티내에서의 화염 확산이나 분출력이 활성화 되어짐을 보인다. 뿐만 아니라 압축간극부로 분출이 일어난 이후에는 이곳에 존재하던 예혼합기로 화염이 전파

되면서 팽창속도가 빨라지고 완전연소에 가까운 황백색 열염이 화염의 전부를 이루고 있다. 이 황백색의 열염은 연소 중기 이후까지 이어지고 있어 분사된 주분무의 대부분이 무연연소 될 것으로 생각되며, 연소중기 이후 암갈색의 화염군이 나타나던 경우의 화염과는 확연히 차이를 보인다. 이는 전술한 (1)의 작용에 의해 주분무의 연소가 촉진됨과 아울러 실린더내의 산소가 부족해지는 연소중기 이후에도 연료자체의 산소성분이 연소에 관여하였기 때문일 것으로 판단된다.

반면, (e)의 연소경과는 (b)에 비해 캐비티로부터의 화염분출력은 조금 향상된 것으로 보이나 압축간극부로 분출된 이후에는 화염의 성장이 둔화되고, 특히 주분무의 화염군으로부터 분리된 것처럼 보이는 작은 화염군이 실린더의 좌측 벽면 둘레에 걸쳐 늦게까지 형성되고 있다. 이 작은 화염군은 냉각된 실린더벽면에 부착되어져 서서히 증발이 일어나고 있는 파일럿분무에 의한 화염으로 생각되며, 이런 경우에는 파일럿분무가 주분무의 연소에 유효한 영향을 미치지 못하게 된다.

그리고 (d)의 연소경과는 (c)와 (e)의 중간적인 형태를 보여주고 있다.

Fig. 6은 Fig. 5와 동일한 조건에서 취득한 실린더내의 압력변화를 TDC를 중심으로 나타낸 것으로 사이클마다의 변동성을 고려하여 20사이클분을 평

균한 값이다. Fig. 6에 의하면 각 분사조건별 모터링시의 압력선도는 모두 같으나 압축행정말기에 이르러 착화가 일어나면서부터는 큰 차이를 보인다. 경유를 주분사만 한 경우의 압력선도는 압력상승율이 매우 급하고 연소최고압력도 가장 높으며 최고압력 도달시기도 가장 빠른 반면, BDF 20을 주분사만 한 경우에 있어서는 압축말기의 압력선도가 일정기간 거의 수평을 유지하다가 재차 상승하고 있어 이 수평 유지 기간 동안에는 착화가 일어나지 않았음을 알 수 있다. 그리고 최고압력도 경유에 비해 약 5~6bar 낮을 뿐 아니라 최고압력도달시기도 약 2°CA 정도 늦어지고 있다. 흡기포트를 이용하여 적극적으로 스웰을 발생시키는 4행정기관에 비하여 본 연구에서처럼 소기류 자체만을 이용하여 스웰을 발생시키는 2행정기관의 특성상 혼합기형성의 지연을 어느 정도 인정한다 하더라도 BDF 20을 4행정기관에 주분사만 할 경우에는, 특히 외기온도가 많이 떨어지는 동절기에는 기관출력의 저하를 예상하지 않으면 안 될 것으로 판단된다. 그러나 BDF 20을 사용하였더라도 파일럿분사를 실시하게 되면 분사시기별 차이는 있으나 최고압력과 최고압력도달시기가 회복되는 경향을 보이며, Fig. 5의 화염사진에서도 확인된 바와 같이 주분무와의 접촉상태가 가장 양호할 것으로 생각되었던 BTDC 30°CA에서 파일럿분사를 한 경우에는 경유의 압력선도와 거의 동일

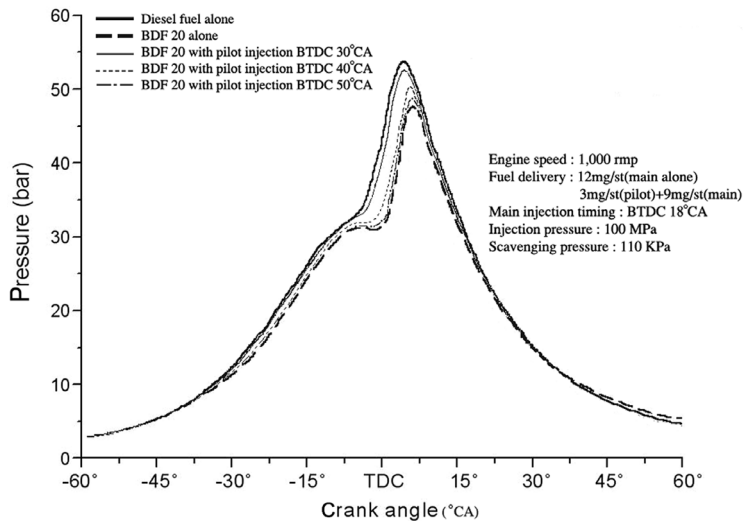


Fig. 6 Cylinder pressure diagrams of each pilot injection timing using BDF20

한 선형을 가지며 연소최고압력만 1~2bar 정도 차이를 보이므로 기관출력에 미치는 영향이 없다고는 할 수 없으나 우려할 정도는 아닐 것으로 생각된다. 그 대신 기관의 진동이나 연소소음 면에서 조금은 유리할 것이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 동절기에 나타날 수 있는 BDF 20의 점성증가에 의한 연소성능의 저하를 개선하기 위한 수단으로서 과일릿분사시의 연소특성을 고속도화염사진과 실린더내의 압력선도로부터 고찰하였다. 얻어진 성과를 요약하면 아래와 같다.

- 1) 과일릿분사 없이 BDF 20을 주분사한 경우에는 경유의 연소경과에 비하여 발화핵의 크기나 개수가 줄어들 뿐 아니라 발화핵의 발생시기도 약 2.4°C 정도 늦어졌으며 착화이후에도 유동이 거의 보이지 않는 화염덩어리를 형성한 채 연소가 진행되었다.
- 2) 위 1)과 같은 원인으로 인하여 연소최고 압력이 5bar 이상 저하되었으며 최고압력 도달시기도 2°C 정도 지연되었다. 본 실험이 실내온도 5~6°C에서 실시된 점을 생각하면 동절기에는 기관출력의 저하가 우려된다.
- 3) 과일릿분사를 실시한 경우에는, 희박예혼합기의 전염반응에 의해 생성된 중간생성물이 주분무와 충분한 접촉면적과 접촉시간을 유지할 수 있도록 분사시기를 결정하여야 한다. 본 실험에서는 과일릿분사와 주분사가 12°C의 간격을 가질 때가 화염의 발화시기, 캐비티로부터의 분출력, 연소실내 확산속도 등의 연소경과에 있어 가장 양호한 결과를 얻을 수 있었다.
- 4) 위 3)과 같은 결과로 인하여 연소최고압력과 최고압력 도달시기 등이 경유의 압력선도와 거의 동일한 수준까지 개선되었다.

#### 후 기

본 연구는 금오공과대학교에서 지원하는 학술연구비에 의해 수행되었습니다. 아울러 화염사진은 원래 컬러이었으나 인쇄과정에서 흑백으로 전환되었음을 양해하여 주시기 바랍니다.

#### References

- 1) D. S. Baik and S. W. Lee, "A Study on Spray and Combustion Characteristics by Temperature of Biodiesel Fuel," Transactions of KSAE, Vol.16, No.1, pp.152-157, 2008.
- 2) S. H. Yoon, M. Y. Kim, S. I. Kwon, H. S. Jeon and C. S. Lee, "Combustion Characteristics of Biodiesel Fuel Derived from Soybean in a Common-rail Diesel Engine," Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.1922-1928, 2006.
- 3) S. H. Choi and Y. T. Oh, "A Simultaneous Reduction of Smoke and NOx with Biodiesel Fuel in a D.I. Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.13, No.2, pp.65-71, 2005.
- 4) K. H. Ryu, Y. J. Yun and Y. T. Oh, "The Combustion Characteristics of Agricultural Diesel Engine using Biodiesel Fuel (Ester of Rice Bran Oil)," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineer, Vol.27, No.2, pp.181-187, 2003.
- 5) Y. Hirako and M. T. Ohta, "Effect of Lean Pre-mixture on the Combustion in Diesel Engine (1st Report)," Bulletin of JSME, Vol.16, No.101, pp.1750-1757, 1973.
- 6) Y. Hirako and M. T. Ohta, "Effect of Lean Pre-mixture on the Combustion in Diesel Engine (2nd Report)," Bulletin of JSME, Vol.17, No.104, pp.256-263, 1973.
- 7) Y. Hirako and M. T. Ohta, "Effect of Lean Pre-mixture on the Combustion in Diesel Engine (3rd Report)," Bulletin of JSME, Vol.17, No.109, pp.936-943, 1973.
- 8) W. Choi, C. W. Park, S. H. Kook and C. S. Bae, "The Effect of Triple Injection on Engine Performance and Emission in a HSDI Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.12, No.5, pp.40-57, 2004.
- 9) M. Y. Kim, D. J. Lee, H. G. Roh, J. H. Lee and C. S. Lee, "Effect of Injection Parameters on Combustion and Flame Characteristics in a Small Common-rail Diesel Engine," Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.397-404, 2003.
- 10) H. G. Roh and C. S. Lee, "The Effect of Multi-

- ple Injection on the Stability of Combustion and Emission Characteristics in a Passenger Car Common-rail Diesel Engine,” Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.330-335, 2006.
- 11) C. W. Park, S. H. Kook and C. S. Bae, “The Effect of Pilot Injection on the Engine Performance and Emissions in a HSDI Diesel Engine,” Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.286-291, 2003.
- 12) I. S. Choi and J. C. Bang, “The Flame Characteristics by Combustion Chamber Shape in 2 Stroke D. I. Diesel Engine,” Transactions of KSAE, Vol.11, No.1, pp.55-63, 2003.