

● 연구 논문

급속압축팽창장치에서의 글로우 플러그 충돌분무의 연소 특성

김재휘^{*}·김진환^{**}·박권하^{***}

Combustion Characteristics of Diesel Spray Impinging on a Glow Plug in RCEM

C. H. Kim^{*}, J. W. Kim^{**} and K. H. Park^{***}

Key Words : Combustion Characteristics(연소특성), Impinging Diesel Spray(충돌디젤분무)
Rapid Compression Expansion Machine(급속압축팽창장치)

Abstract

Circumstances require improving diesel engine, and many studies have been done in constant volume chamber(CVC). Because the combustion mechanism of a diesel engine has many difficulties with non-homogeneous nature, there has been a limitation to analyzing the combustion mechanism with CVC. Studies are often given in a real engine, but also it has difficulties in modifying configuration of combustion chamber etc. To get more easy way for more engine-like test, a rapid compression mechanism has been introduced.

This study addresses to designing a rapid compression expansion machine(RCEM) driven by compressed air, and to applying it on IDI diesel combustion chamber which has a glow plug.

RCEM is introduced first and its characteristics are tested, then spray/combustion characteristics of diesel spray impinging on a glow plug in RCEM combustion chamber are investigated. The results show active combustion in the system employing spray impinging on a glow plug so as to improve combustion efficiency.

* 동의대학교 대학원

** 동의대학교 기계설계공학과

*** 한국기계연구원 엔진환경연구부

1. 서론

글로우 플러그에 분사연료를 충돌시켜 분무의 분포특성을 개선하고, 동시에 글로우 플러그의 열을 이용하여 착화성능을 향상시키는 목적의 연구들이 많이 수행되고 있다. Kusaka 등¹⁾은 분무공의 형태를 slit형으로 하고, 분무가 글로우 플러그에 부딪치면서 연소를 시작하도록 slit의 위치를 설정하였다. Saito 등²⁾은 저장(reservoir)형 글로우 플러그를 고안하여 글로우 플러그 주위에 쉴드(shield)를 두어 플러그의 온도를 높게 유지하고, 동시에 연료가 모여들도록 하고 있다. 또한 Nakashima 등³⁾은 분사기에서 글로우 플러그까지의 거리가 미치는 영향을 분석하였는데 글로우 플러그를 분사기에 가까이 유지함으로써 분무 충돌 거리를 가깝게 하는 것이 연소효율 및 유해배출물 저감에 효과가 있는 것으로 보고하고 있다.

또 최근에는 연소실공간을 급속히 압축, 팽창시킴으로써 실제 기관과 유사한 고온고압의 분위기 조건을 형성하여 주면서 또 연소실 공간을 자유로이 변화시킬 수 있는 급속압축팽창장치를 이용하여 디젤 분무/연소를 분석하고 있다. 그 이유는 실제 기관과 같은 고온고압을 형성하기 힘든 정적연소실(CVC)의 단점을 보완하고, 동시에 연소실형상 및 분사조건을 변화시키면서 연소특성을 분석하기에 부적합한 실제 기관의 어려운 점을 해결할 수 있기 때문이다.

V.W. Wong 등⁴⁾은 피스톤 속도가 1800min⁻¹인 급속압축기를 이용하여 총상급기 연소특성과 분사연료의 점화특성을 해석하였다. 그리고 Michal Kono 등⁵⁾은 충격파로 구동피스톤이 움직이는 급속압축기를 이용하여 노크강도를 분석하였다. F. Fisson 등⁶⁾은 공기압을 이용한 급속압축팽창장치를 이용하여 디젤기관에 있어서 고온연소시의 열발생에 관한 연구를 하였다. 또한 Haruki Kobayashi 등⁷⁾은 유압에 의해 피스톤이 구동되는 급속압축팽창장치를 이용하여 공기유입의 차이가 디젤분무 및 화염에 미치는 영향을 고찰하였으며, Hideo Takahashi 등⁸⁾은 급속압축팽창장치를 이용하여 고온고압하에서 디젤분무의 특성을 파악하였다.

Arun S.P. Solomon⁹⁾은 급속압축팽창장치에서 연료분무의 착화과정을 가시화하였고, K.J. Colella 등¹⁰⁾은 점화 및 연소과정에서의 온도에 대한 영향을 급속압축팽창장치를 이용하여 분석하였다.

본 논문에서는 급속압축팽창장치를 이용하여 분사연료의 글로우 플러그 충돌이 분무의 분포와 연소에 미치는 영향을 충돌이 없는 경우와 비교, 분석하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 급속압축팽창장치(RCEM)의 구성

Fig. 1은 본 연구에 사용한 단기통 급속압축팽창장치 가시화 기관의 구성도이다. 이 장치는 디젤분무 및 연소의 특성을 좀더 실제 기관에 가까운 조건에서 관찰하기 위한 장비이며 구동부, 회전흡수부 및 피구동부(가시화부)로 구성된다. 구동부에는 직경 200mm의 구동 피스톤이 설치되어 있고 0.6MPa까지의 압축공기가 공급된다. 압축공기의 압력은 공압조절장치에 의하여 조절되며, 압축공기의 압력이 기관의 회전속도를 결정하기 때문에 압축공기의 압력을 제어하여 자유로이 기관회전속도를 모사할 수 있다. 회전흡수부에는 구동축의 회전각을 감지하기 위한 엔코더(encoder)가 장착되어 있으며, 구동부의 피스톤을 제동시키기 위한 공압 브레이크가 장착되어 있다. 브레이크는 디스크형으로 0.2MPa의 압축공기를 이용한다. 피동부는 소형 승용 자동차 기관용 피스톤을 개조하여 사용하였다. 피스톤으로의 가시화를 위하여 피스톤의 길이를 연장하였으며, 피스톤의 내부를 탈부착이 가능

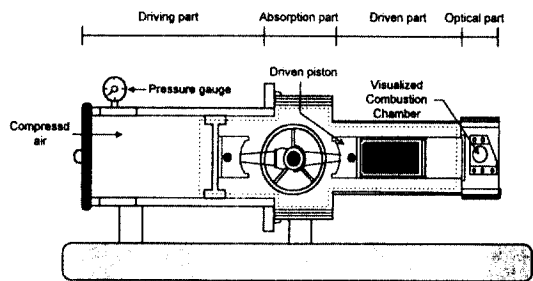


Fig. 1 Rapid compression expansion machine

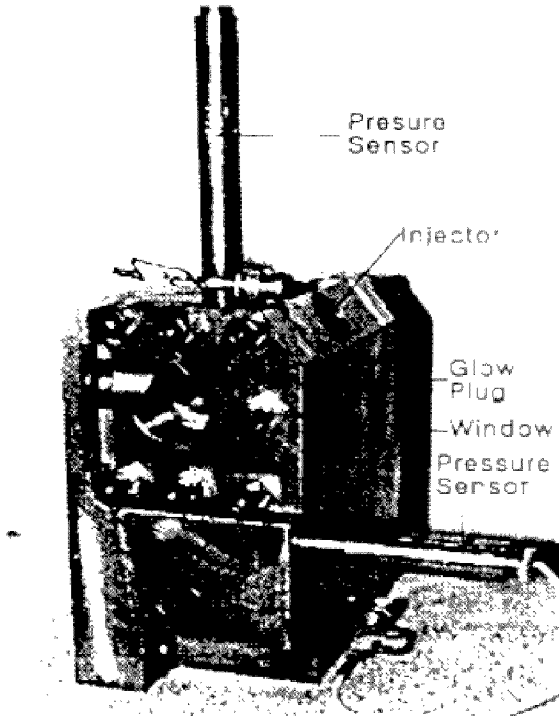


Fig. 2 Visualized combustion chamber

한 구조로 만들었다. 따라서 직접분사식의 경우 피스톤 보울 형상을, 간접분사식의 경우 피스톤 표면의 형상을 자유로이 변경할 수 있도록 하였다. 연소실 가시화 부분은 실린더 헤드 블럭만을 변경, 제작하여 사용할 수 있도록 함으로서 여러 가지 형상의 연소실을 모사할 수 있도록 하였다.

Fig. 2는 간접분사식 연소실을 가시화한 헤드의 형상이다. 가시화를 위하여 가시화 창을 마련하였으며 연소실내 압력측정을 위하여 압력센서를 삽입하였다. 또한 분사기와 글로우 플러그를 원하는 위치에 설치하였다. 또 연소실의 내부온도를 높이기 위하여 히팅멘틀을 사용하여 가열하였으며, 동시에 글로우 플러그에 전원을 공급하였다.

2.2 급속압축팽창장치의 운전특성

본 장치는 구동부에 작용하는 고압의 힘을 순간적으로 이용하는 원리이다. 공압브레이크를 작동시킨 상태에서 구동 실린더에 압축공기를 공급한다.

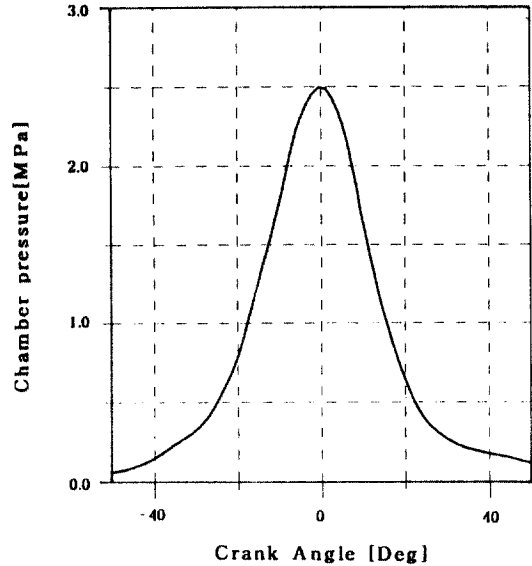


Fig. 3 Driving pressure at $P_a = 0.3MPa$

공급압력은 원하는 피스톤 속도에 맞추어 공압조절기로 제어한다. 이때 구동피스톤에 작용하는 힘은 공압 0.1MPa일 때 약 3MN이다. 브레이크에 작용하고 있는 압력을 순간적으로 제거하게 되면, 구동피스톤의 힘이 크랭크축을 돌리면서 피동부를 가속하게 된다. 압축과정이 끝나게 되면 즉, 압축 TDC 에서부터는 피동부 피스톤의 힘이 반대로 구동부로 향하게 되어 크랭크축을 연속적으로 회전시키는 데, 이때 크랭크축이 회전하면서 충격을 흡수하게 된다. 축과 함께 회전하는 브레이크 디스크의 BTDC 90° 지점에 광센서를 부착하였으며, 이 신호를 기준으로 분사, 발광 및 카메라의 작동시점을 제어하도록 하였다. 가시화 부분, 즉 연소실 부위는 실제 기관과 유사한 작동특성을 갖게 되는데, 피스톤의 연속적인 운동에 의하여 압축행정과 팽창행정을 모사할 수 있다.

Fig. 3은 연소실 압력의 변화를 나타낸 것이다. 압축비는 13이며, 구동부의 작동압력이 0.3MPa일 때 크랭크각 변화에 대응한 연소실 압력의 변화이다. 압축초기의 압력보다 팽창과정 말기의 압력이 약간 높게 나타나지만 전반적으로는 기관연소실을

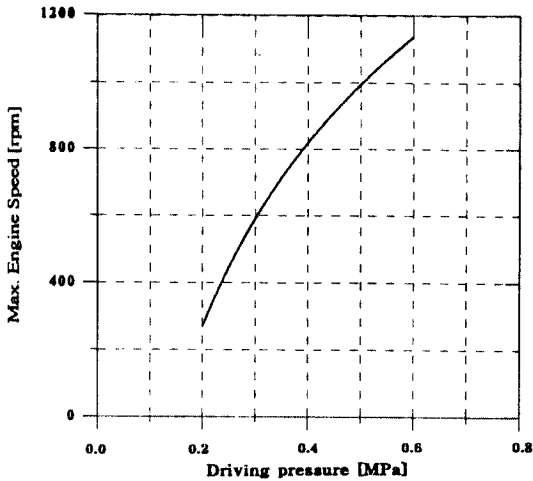


Fig. 4 Engine speed with driving pressure

모사하기에 충분함을 알 수 있다.

Fig. 4는 구동압력이 0.3MPa일 때, 상사점 근처에서의 회전속도는 약 550min-1임을 나타내고 있

다. 회전속도는 구동부의 압력증가에 비례하여 증가하기 때문에 원하는 기관회전속도를 얻기 위하여는 구동부 압력을 Fig. 4에 맞추어 압력을 적절하게 제어하면 된다.

2.3 디젤분사 및 연소분석 시스템의 구성

Fig. 5는 디젤분사 및 연소분석시스템을 나타내고 있다. 급속압축팽창장치와 주변시스템, 분사시스템, 가시화시스템 및 제어시스템으로 구성된다. 분사시스템은 분사펌프, 직류모터, 축압탱크, 솔레노이드밸브, 솔레노이드 밸브 제어기와 분사기로 구성되어 있다. 직류모터로 분사펌프를 작동시켜 축압탱크에 압력을 35MPa까지 저장할 수 있도록 하였으며, 축압탱크에 저장된 고압연료는 솔레노이드 밸브가 열리면 분사기로 보내진다. 분사시기와 분사기간은 솔레노이드 밸브 제어기로 밸브의 동작을 제어하여 분사시기와 분사기간을 조절하였다. 분사특성을 분석하기 위하여 압력센서와 니들양정

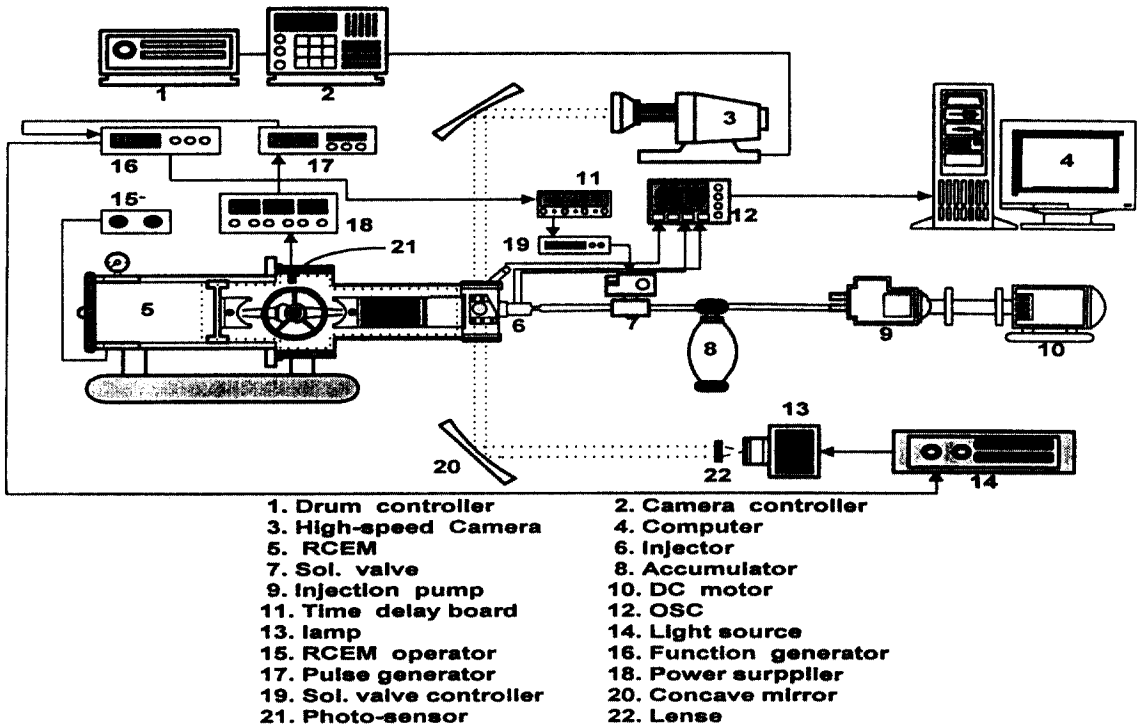


Fig. 5 Diesel spray/combustion analyzing system

센서를 분사기에 설치하였으며 Bosch형 분사울 측정장치를 제작, 사용하였다. 가시화 시스템은 고속드럼카메라 혹은 CCD카메라, 광원, 오목거울 및 제어장치로 구성되어 있다. 광원은 발광시간을 11ms까지 조절할 수 있는 미국 코딘사의 제논램프를 이용하였으며, 이 빛을 2개의 오목거울을 사용하여 평행광으로 만들어 분석하고자 하는 연소실을 음영촬영할 수 있도록 하였다. 전체적인 작동 및 제어시스템은 급속압축팽창장치에 부착된 광센서로부터의 신호를 기준으로 작동된다. 상사점전 90°에서 발생된 신호는 적당한 크기로 증폭된 후 분사, 발광 및 카메라 작동 시점에 맞추어 지연된 후 분배된다. 암실의 경우 카메라는 계속 오픈될 수 있다. 따라서 분사시기, 분사기간 및 분사압력을 변화시키면서 실험할 수 있으며, 이때의 분무 및 연소과정을 가시화하였다. 동시에 연소실내의 압력을 측정, 입력시켜 연소특성을 종합적으로 분석할 수 있게 하였다.

2.4 분사제어 시스템

실험장치중 분사제어 시스템의 특성은 Table 1과 같은 실험조건에서 조사하였다. 분사압력, 분사지속기간 및 배압의 변화가 분사제어 시스템의 분사 특성 변화에 미치는 영향은 다음과 같다.

Fig. 6(a)는 Test 1, 즉 분사지속기간의 변화에 따른 니들 거동과 분사울의 변화를 나타낸다. 배압을 0MPa, 관로압력을 26MPa로 하였으며, 분사지속기간을 3ms, 5ms, 7ms, 9ms로 변화시켜 가며 측정하였다. 분사지속기간의 증가와 관계없이 니들의 초기거동은 비슷한 기울기를 갖고 열리는 것을 알 수 있으며, 분사울 역시 유사한 경향을 보인다. 이것은 관로압력이 일정하기 때문이며, 분사울 특성 곡선에 나타나듯이 3ms와 9ms에서 분사울의 최고치는 차이가 나지만 니들의 최대양정은 비슷한 것으로 나타났으며, 분사지속기간이 길어질수록 분사울이 증가되며, 분사후 7ms에서 분사울이 약간 감소함을 보여준다. 분사기간은 솔레노이드밸브를 열어주는 시간보다 약간 증가됨을 알 수 있는 데, 이는 니들의 관성에 의한 영향으로 생각된다. 실제

분사기간은 솔레노이드밸브 작동기간보다 약 3ms 길다는 것을 알 수 있다. 따라서 실험에서는 이를 고려하여 솔레노이드밸브 작동기간을 조절하였다.

Table 1 Variations for injection tests

	Line Pressure [MPa]	Back Pressure [MPa]	Injection Duration [ms]
Test 1	26	0	3, 5, 7, 9
Test 2	26	0, 2, 4, 6, 8	3
Test 3	20, 22, 24, 26, 28	0	3

Fig. 6(b)는 배압(back pressure)변화에 따른 니들 거동과 분사울의 변화를 나타낸 그림이다. 기관에서는 연료가 압축공기중으로 분사되기 때문에 노즐에 역방향의 압력(배압)이 작용하게 된다. 따라서 배압이 분사에 미치는 영향을 조사하였다. 배압은 분사울 측정기의 관로내에 일정한 압력을 유지시켜 조절하였으며, 0MPa, 2MPa, 4MPa, 6MPa, 8MPa에서 실험하였다. 배압이 증가할수록 니들의 최대양정도 비례적으로 증가하며, 미세한 정도지만 분사기간도 길어짐을 알 수 있다. 이는 연료공급압력으로 니들이 상승할 때 배압에 의한 압력증가의 효과가 추가되기 때문이다. 하지만 분사울은 배압이 없는 경우가 배압이 있는 경우보다 상대적으로 증가함을 알 수 있다.

Fig. 6(c)는 관로압력(line pressure)변화에 따른 니들의 거동과 분사울 변화이다. 이 실험은 배압이 0MPa일 때 관로압력을 20, 22, 24, 26, 28MPa로 변화시키며 측정하였다. 관로압력이 낮은 경우 니들의 거동은 최대값과의 차이가 현저하게 나타나며, 분사울 특성은 완만한 기울기를 갖는다. 그러나, 관로압력이 증가할수록 분사울곡선의 기울기는 점점 급해지며, 니들도 신속히 최대로 열리게 된다. 한편 자유분무의 길이는 관로압력이 1MPa 증가함에 따라 약 0.4% 정도 성장하는 것으로 나타났다. 이는 펌프최대압력 60MPa인 분배형 분사펌프 시스템의 경향과 거의 일치한다.

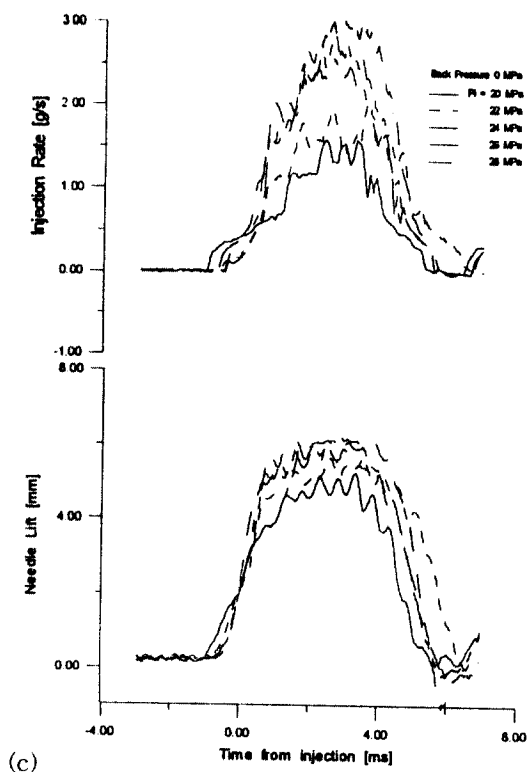
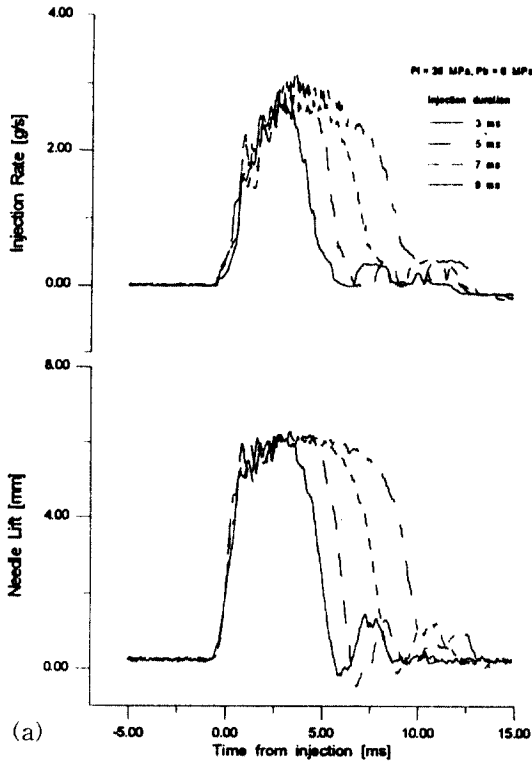
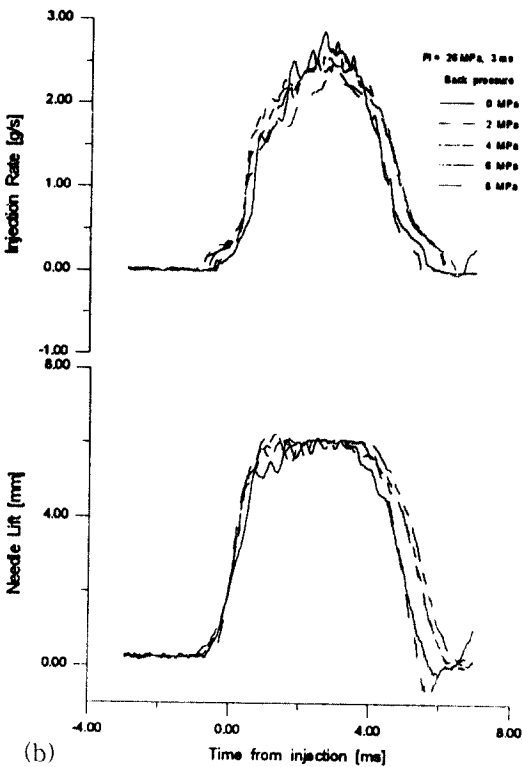


Fig. 6 Injection rate and needle lift

Table 2. Test conditions

Conditions	value
Diameter of Inj. hole (mm)	1
Diameter of Nozzle tip (mm)	0.5
Amount of Fuel Injection(cc/stroke)	0.047
Accumulator pressure (MPa)	24
Injection timing (BTDC °)	5,10,15
Inj. duration (ms)	5
Distance between nozzle and glow plug (mm)	24



2.5 실험방법

급속압축팽창장치에 설치된 와류실에 예열 플러그가 설치되어 있을 경우와 예열 플러그가 설치되지 않은 경우로 구분하여 실험하였다. 각각의 경우에 연소실에 연료를 분사하여 연소가 어느 정도 진행

될 때까지의 전과정을 촬영하여 분무분포와 연소 과정을 가시화하였다. 실험조건은 Table 2와 같다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 와류실에서의 분무특성

Fig. 7, 8은 와류실내의 분무형상을 가시화한 것으로 각각 플러그 충돌이 있는 경우와 없는 경우를 나타내고 있다. 충돌이 있는 경우에는 분사된 액적들이 모두 플러그에 충돌되어 넓게 퍼지면서 압축 과정의 공기흡입에 의한 와류의 영향으로 연소실 내부에 골고루 분포함을 보여주지만 플러그 충돌이 없는 경우에는 분사초기의 액적들이 바로 연소실 벽면에 퇴적됨으로써 연료가 벽면주위에만 분포됨을 보여준다.

3.2 연소의 가시화

Fig. 9, 10은 분사시기가 BTDC 10°일 때의 연소현상으로 플러그 충돌이 있는 경우와 없는 경우를 비교한 것이다.

플러그 충돌이 있는 경우에는 BTDC 3°에서 연소가 시작됨을 알 수 있으며, 플러그에 충돌된 액적들이 분포되는 플러그 하단의 영역에서 점화가 시작됨을 나타내고 있다. 그리고 착화된 후에 곧바로 연소실 전체로 화염이 전달되어 연소가 활발하게 진행된다. ATDC 2°까지 활발하게 진행되던 연소는 시간이 지남에 따라 점차 사라지게 된다.

한편 플러그 충돌이 없는 경우에는 착화시점이 플러그충돌이 있는 경우보다 1° 지연됨을 보여주며, 연소도 활발하지 못하여 오랜 시간동안 연소가 진행됨을 알 수 있다.

Fig. 11, 12는 분사시기 BTDC 5°일 때의 연소 특성을 나타낸 사진이다. 분사시기가 BTDC 10°일 때와 비교하면 착화시기가 2° 늦어지며 착화가 되는 시점에서는 아직 분무연료가 충분히 연소실 내부에 고루 분포하지 못하고 있음을 알 수 있다. 그러나, 분사시기가 BTDC 10°일 때와 마찬가지로 플러그 충돌의 경우가 착화시점이 빠르며 연소가 급격하게 진행되어 단기간내에 연소가 완료됨을 확인 할 수 있다. 한편, BTDC 1°에서의 사진을 보면 플러그 하단에서 시작된 화염이 분무연료를

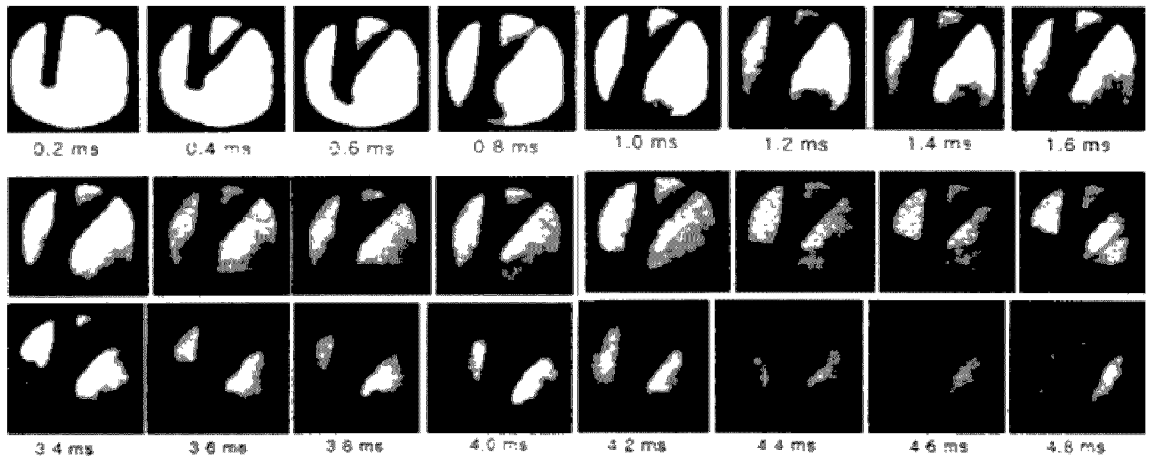


Fig. 7 Spray development with impingement on glow plug



Fig. 8 Spray development in the no-plug case

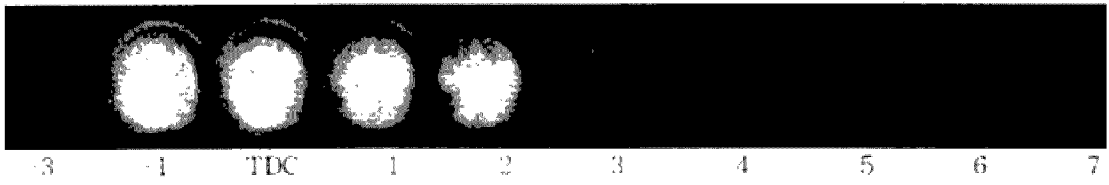


Fig. 9 Visualized flames in the plug impingement at injection timing BTDC 10°

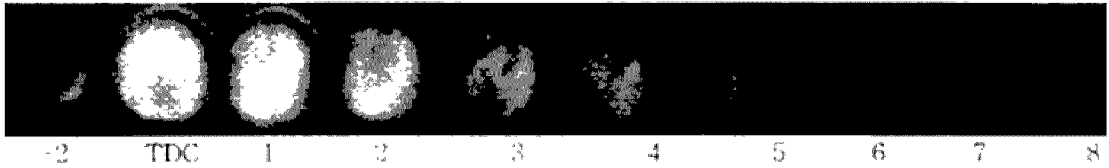


Fig. 10 Visualized flames in the no-plug impingement at injection timing BTDC 10°

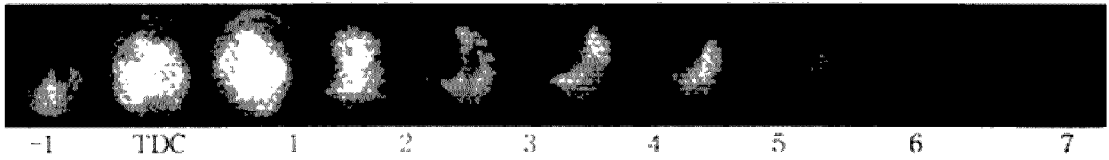


Fig. 11 Visualized flames in the plug impingement at injection timing BTDC 5°

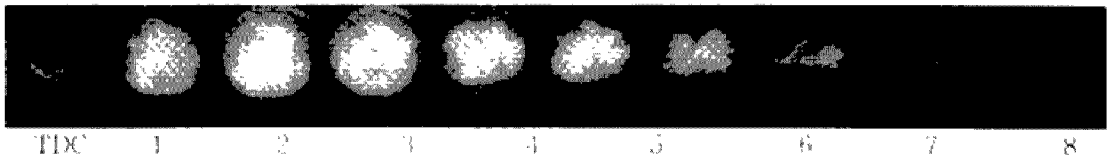


Fig. 12 Visualized flames in the no plug impingement at injection timing BTDC 5°

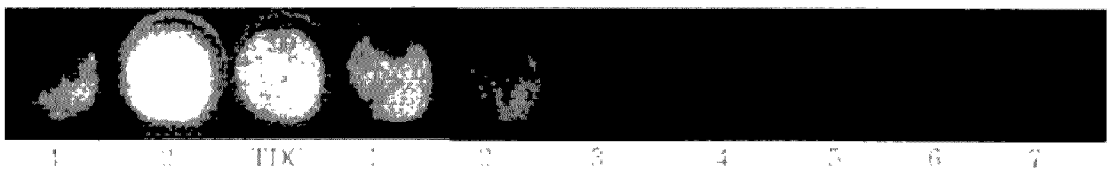


Fig. 13 Visualized flames in the plug impingement at injection timing BTDC 15°

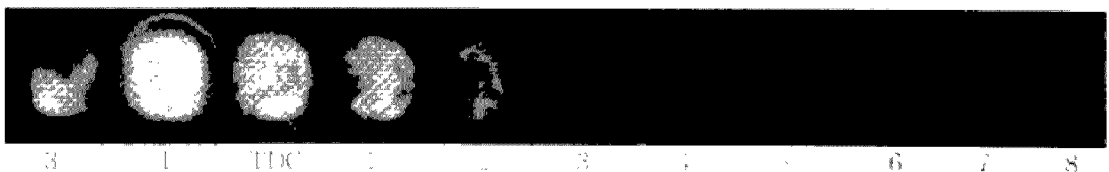


Fig. 14 Visualized flames in the no plug impingement at injection timing BTDC 15°

타고 전파됨을 알 수 있는 데, 이는 분사시기가 10, 15° 일 때에는 나타나지 않는 현상이다.

Fig. 13, 14는 분사시기 BTDC 15°에서의 연소 특성이다. 분사시기 5, 10°에서와 마찬가지로 플러그충돌을 이용하는 경우가 충돌이 없는 경우보다 훨씬 더 활발한 연소를 진행하는 것을 나타내고 있다. 하지만 후연소기간동안의 거동에는 큰 차이가 없음을 나타내고 있는 데, 이는 분사시기가 너무 빨라서 충돌분무에 의한 액적분열효과가 감소된 것으로 생각된다.

3.3 와류실 압력 특성

Fig. 15, 16, 17은 와류실내의 압력변화를 나타낸 것으로 각각 분사시기 BTDC 5°, 10°, 15°인 경우이다. 앞서의 연소현상에서도 파악할 수 있었던 것처럼 플러그 충돌의 경우에는 착화가 빨리 일어나며, 분무의 충돌미립화에 의하여 신속히 연소가 진행됨으로써 급격한 압력상승을 보여 준다. 또한 많은 연료가 순간적으로 연소됨으로써 높은 피크(peak)압력을 나타낸다. 따라서 글로우 플러그

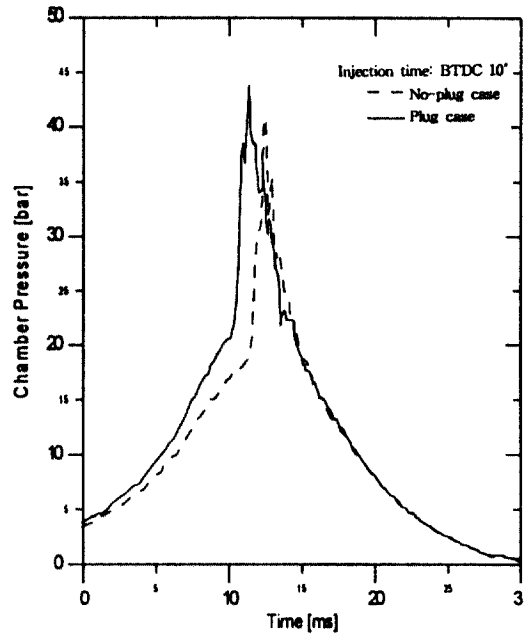


Fig. 16 Chamber pressure variation at inj. BTDC 10°

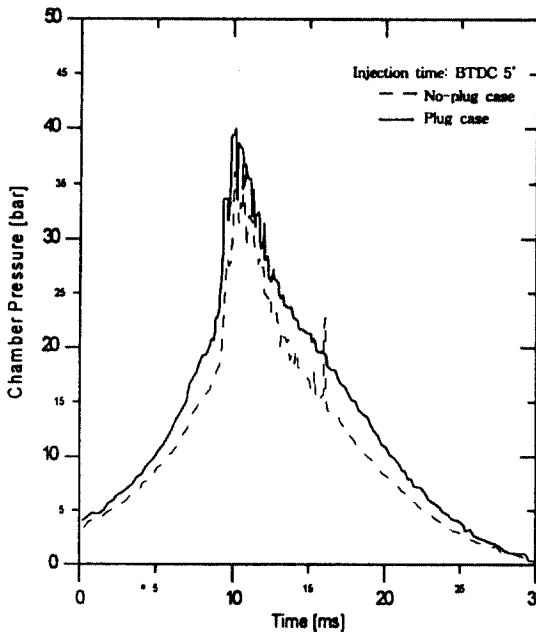


Fig. 15 Chamber pressure variation at inj. BTDC 5°

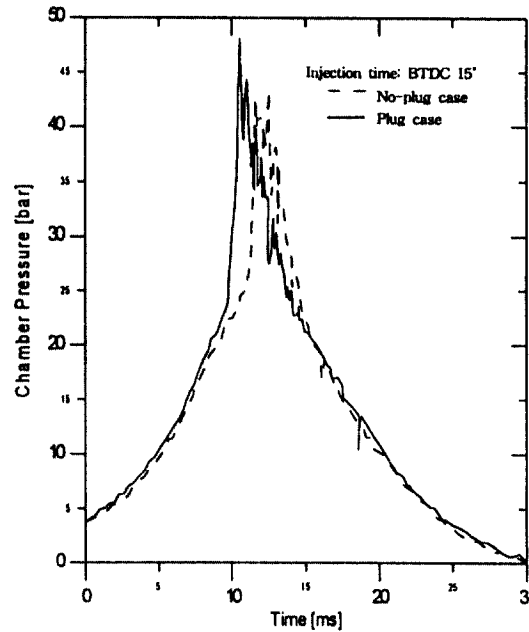


Fig. 17 Chamber pressure variation at inj. BTDC 15°

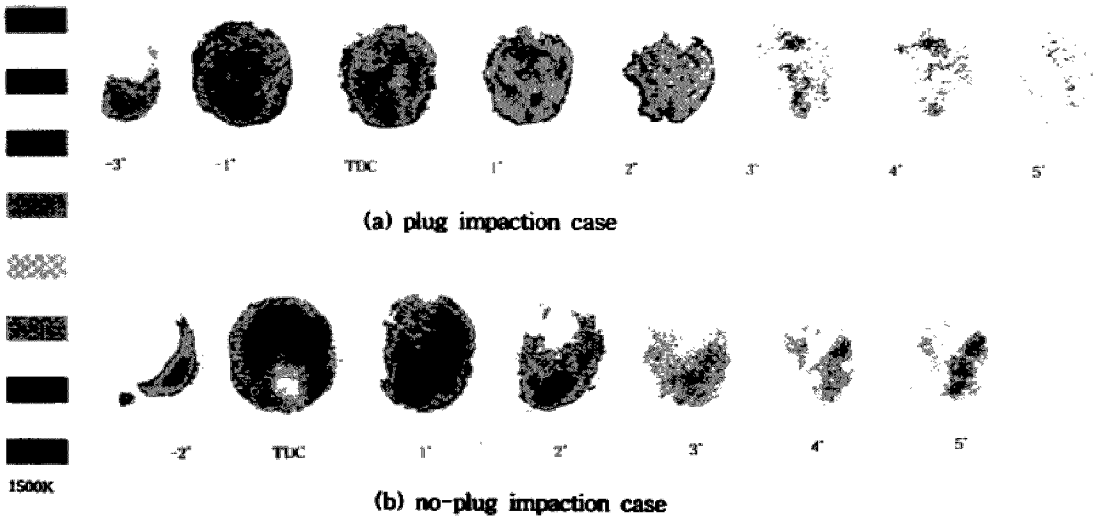


Fig. 18 Flame temperature distribution for the BTDC 10° injection case

충돌의 경우가 충돌이 없는 경우에 비해 연소효율의 향상과 매연 미립자의 배출을 감소할 수 있을 것으로 판단된다.

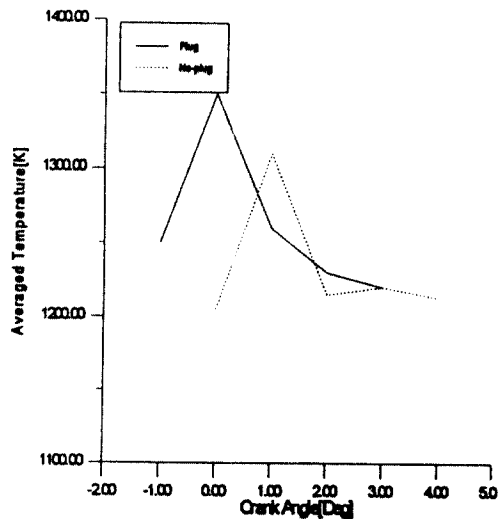
3.4 온도분포 특성

Fig. 18, 19는 분사시기가 BTDC 10° 인 경우의 와류실내 화염온도 분포 및 평균값을 나타낸 것이다. 전반적으로 화염분포와 비슷한 온도분포를 나타내며, 화염의 가장자리에서 높은 값을 나타내고 있다. 충돌이 있는 경우 연소 개시점부터 크랭크각 2° 까지 높은 온도분포를, 2° 후에는 낮은 분포를 보이고 있다. 충돌이 없는 경우에는 고온분포 기간이 0-2° 사이로 충돌분무의 경우에 비해 줄어든 반면, 이후 구간에서는 중온영역이 오랜기간 지속됨을 보여준다.

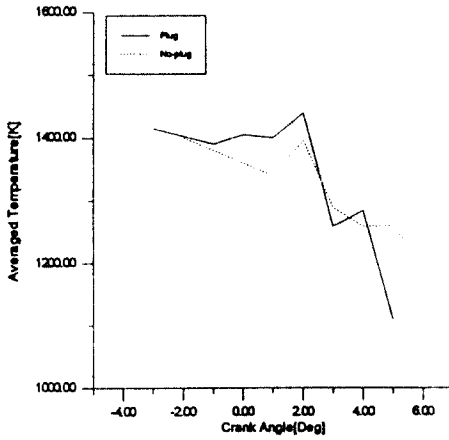
3.5 soot분포 특성

Fig. 20, 21은 분사시기가 BTDC 10° 일 때의 시간경과에 따른 KL-지수분포(KL-factor distribution)의 특성 및 평균값을 나타낸다. 전반적으로 주연소가 진행되는 동안에는 화염의 가장자리에서 높은 값을 나타냄을 알 수 있다. 플러그충돌이 없는 경우

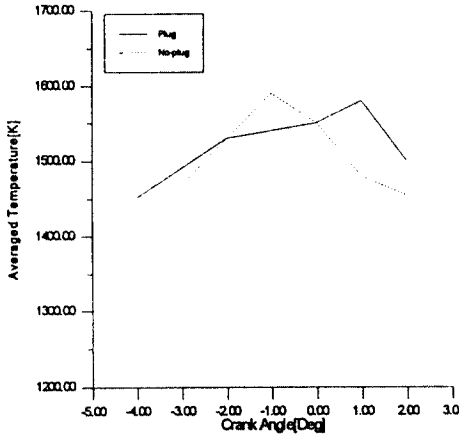
와 비교할 때, 플러그충돌이 있는 경우는 주연소기간 동안은 높은 값을 보이지만 주연소가 끝나는 후 연소기간에는 낮은 값을 보이다가 일찍 사라지게 된다. 이는 플러그 충돌의 경우에는 분무의 미립화가 촉진되고, 따라서 연소가 활발한 주연소기간 동안에 대부분의 soot가 연소되어 소멸됨을 의미한다.



(a) Injection timing BTDC 5°



(b) Injection timing BTDC 10°



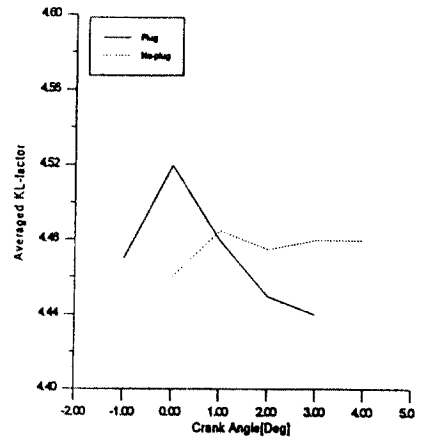
(c) Injection timing BTDC 15°

Fig. 19 Averaged temperature variations

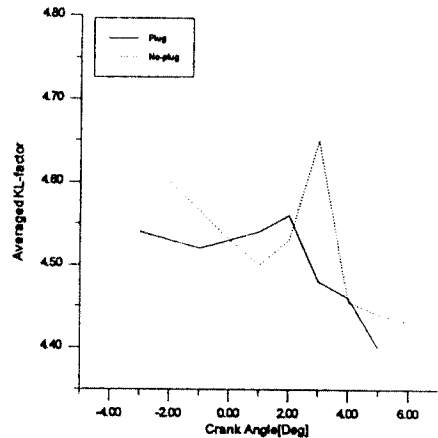
4. 결 론

간접분사식 디젤기관의 와류실에서 분무의 플러그충돌이 연소에 미치는 영향을 분석한 본 연구의 결과는 다음과 같다.

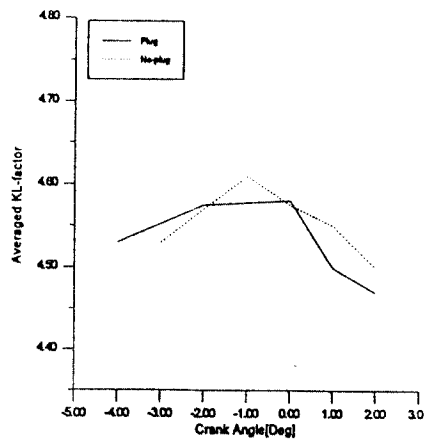
- 1) 본 연구에 사용된 급속압축팽창장치는 압축 공기를 직접 구동실린더에 주입하기 때문에 작동준비가 간단하며, 충격을 효과적으로 흡수할 수 있었으며, 엔진 속도를 600~1800min-1까지 적절히 조절할 수 있었다.
- 2) 글로우 플러그 충돌을 이용한 경우에는 충돌



(a) Injection timing BTDC 5°



(b) Injection timing BTDC 10°



(c) Injection timing BTDC 15°

Fig. 20 Averaged KL-factor variations

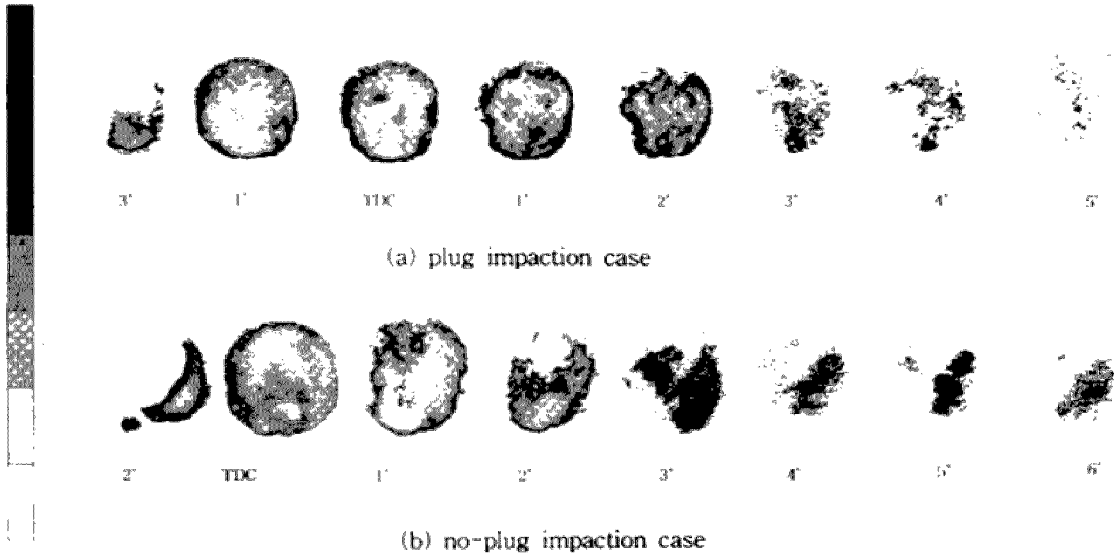


Fig. 21 KL-factor distribution for impaction and no-impaction cases at injection timing BTDC 10°

후 액적들이 2차 미립화되면서 주위공기의 유동을 활성화시키고 증발효율을 향상시킴으로서 착화성능의 향상과 화염전파속도의 증가를 가져왔다.

- 3) 온도는 전반적으로 연소가 활발히 진행되는 연소실 중앙부에서 높게 나타났으며, 플러그 충돌이 있는 경우에는 주연소기간 동안 고온을 후기연소기간 동안 저온을 보여준 반면, 충돌이 없는 경우에는 후기연소기간 동안에도 높은 온도가 계속됨을 보여 주었다.
- 4) 플러그 충돌을 이용한 와류실의 경우에 주연소기간 동안 활발한 연소현상을 보여 주었으며, 결과적으로 soot 값을 저감함과 동시에 연소효율의 향상을 기대할 수 있었다.

참고문헌

- 1) Kusaka, J., Daisho, Y., Saito, T. and Kihara, R., "Controlling Combustion Characteristics using a Slit Nozzle in a Direct-Injection Methanol Engine", SAE 941909, 1994
- 2) Saito, F., Takamori, Y. and Saito, H., "Combustion Characteristics of a Reservoir Type Glow Plug Assisted Methanol-Fuel Direct Injection Diesel Engine", Mazda 技報, pp. 121~129, 1990
- 3) Nakashima, N., Katafuchi, M., Nakajima, H and Imoto, K., "Development of Glow-Assisted Methanol Engine for Light-Duty Trucks", 自動車技術學術講演會抄録(日本), 9302439, pp. 113~116, 1993
- 4) V. W. Wong, J. M. Rife and M. K. Martin, "Experiments in Stratified Combustion with a Rapid Compression Machine", SAE 780638, 1978
- 5) Michal Kono, Siichi Shiga, Seiichiro Kumagai and Kazuo Inuma, "Thermodynamic and Experimental Determination of Knock Intensity by using a Spark-Ignition Rapid Compression Machine", Combustion and Flame, Vol. 54, pp. 33~47, 1983
- 6) F. Fisson and T. Kageyama, "Realization of a Rapid Compression Machine(Application

- to the Determination of a Gaseous Premixture Auto-ignition)", COMODIA 90, pp. 117~121, 1990
- 7) Haruki Kobayashi, Takeyuki Kamimoto and Shin Matsuoka, "A Photographic and Thermodynamic Study of Diesel Combustion in a Rapid Compression Machine", SAE 810259, 1981
- 8) Hideo Takahashi, Katsuya Tomaru, Seiichi Shiga, Takao Karasawa and Toshio Kurabayashi, "Characteristics of Diesel Spray with Unsteady and Higher Injection Pressure Using a Rapid Compression Machine", SAE 910226, 1991
- 9) Arun S. P. Solomon, "Photographic Study of Fuel Spray Ignition in a Rapid Compression Machine" SAE 860065, 1986
- 10) K. J. Colella, E. N. Balles, J. A. Ekchian, W. K. Cheng and J. B. Heywood, "A Rapid Compression Machine Study of the Influence of Charge Temperature on Diesel Combustion", SAE 870587, 1987