

## 직접분사식 디젤기관의 착화지연기간에 대한 고찰

방 중 철\*

금오공과대학교 기계공학부

### Some Considerations of the Ignition Delay Period in D.I Diesel Engine

Joongcheol Bang\*

School of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gyeongbuk 730-701, Korea

(Received 13 July 2009 / Accepted 12 October 2009)

**Abstract** : The four combustion stages in a diesel engine have close correlation among them. Especially, the ignition delay period has significant effect on the following combustion stage. And the period is also one of inevitable combustion processes in the diesel engine. For example, the diesel knocking is a well-known phenomenon due to the long ignition delay period.

The interval of the ignition delay period is affected by the mixture formation process in the cylinder. However, in the case of the D.I. diesel engine, the available duration to make the mixture formation of air-fuel is very short. In addition, the means of the mixture formation mainly depends on the injection characteristics and properties of the fuel. It is difficult to make complete mixture. Therefore, an early stage of combustion is violent, which leads to the weakness of noise and vibration.

In this study, using the visible engine, we measured the ignition delay period by photo sensor which detect occurrence of flame and presented the factors of the injection characteristics such as kinds of injection system, the injection pressure and the injection timing.

The relation between the ignition delay period and cylinder pressure diagram which was concurrently obtained was also estimated.

**Key words** : D.I diesel engine(직접분사식 디젤기관), Visible engine(가시화기관), Common-rail injection system(커먼레일 분사시스템), Ignition delay period(착화지연기간), Cylinder pressure diagram(지압선도)

### 1. 서론

디젤기관에 있어서 연소과정의 각 기(期)는 서로 밀접한 관계가 있으나 특히 착화지연기간은 그 후의 연소과정에 중요한 영향을 미치며 디젤기관의 연소에서는 피할 수 없는 과정의 하나이다. 착화지연기간이 길어지게 되면 착화전에 형성되는 예혼합기의 양이 증대되어 그것이 제2기에서 일시에 연소되기 때문에 급격한 압력상승을 초래하고 기관은

진동과 노크음을 발생하게 된다. 이 현상을 디젤노크라고 한다. 반면 착화지연기간이 짧아지면 초기의 연소압력은 크게 상승되지 않으나 열발생율이 낮아져서 기관성능을 저하시킨다.

가솔린기관의 정상연소에서는 초기의 압력상승이 완만하고 정속·무연연소가 행하여지나 디젤기관에서는 정상연소라도 가솔린기관보다 압력상승율과 최고압력이 높으며 저속고부하시는 매연을 발생시킨다. 실린더내의 최고압력이 높더라도 압력상승율이 작으면 노크는 일어나지 않는다. 디젤노크

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

는  $dP/d\theta$ 의 급격한 증대에 기인하며 이것이 5~6 at/deg를 넘으면 매우 심한 진동과 노크음을 유발하므로 소형차량에서는 디젤기관의 탑재를 기피하는 원인이 되었다. 따라서 승용차량에는 가솔린기관을, 승합차나 버스, 트럭 등의 중·대형차량에는 디젤기관을 탑재시키는 것이 공식처럼 되어져왔으나 근래에 이르러 커먼레일분사장치를 채택하면서 부터는 이와 같은 공식이 점차 깨어지고 있다. 자동차 유통업계와 국토해양부의 발표에 따르면 2001년 12월, 약 80만대였던 디젤승용차는 2008년 11월에는 248만대로 무려 300% 이상 증가 했다. 이와 같은 변화의 주원인은 디젤기관이 연비 면에서 우수할 뿐 아니라 승용디젤차량의 소음과 승차감이 가솔린차량과 큰 차이가 없어진 때문이다. 소음의 저감과 승차감의 향상은 기관의 차체장착기술, 엔진룸과 운전석사이의 소음차단기술등도 기여를 하였겠으나, 무엇보다도 커먼레일분사장치의 분사특성에 의한 착화지연기간의 단축이 큰 역할을 하였을 것으로 생각된다.

액체연료의 착화지연에 관한 연구는 오래전부터 수행되어져 왔으며 목적에 따라 연료의 종류나 연구배경 등은 달리하고 있으나 연구수법은 다음과 같은 3가지가 주류를 이루고 있다. 즉 실제의 기관이나 연소장치모델(고압증발장치, 급속압축장치, 정적연소실 등)에 의한 방법<sup>1-4)</sup>과 이론적 모델설정에 의한 해석방법인 축소화학반응 모델링 기법,<sup>5,6)</sup> 수치해석 모델링 기법<sup>7-9)</sup> 등이다. 이들 중 실제의 기관을 사용하여 분사하는 연료의 착화지연기간을 실시간으로 측정하는 방법은 다양한 운전조건하에서의 데이터를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 단위시간당 취득할 수 있는 데이터량도 많아 가장 신뢰성 있는 실험방법이라고 생각되나 기관을 크게 개조하여야 하는 어려움이 따른다.

본 연구에서는 커먼레일분사장치와 실린더내의 착화를 감지할 수 있도록 개조한 직접분사식의 가시화기관을 사용하여 연료의 분사압력, 분사시기 등의 분사특성변화에 따른 착화지연기간을 실시간 측정함과 동시에 실린더내의 압력변화도 측정하여 기관성능과의 관련성을 고찰하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

실험기관은 원래 수냉식 단실린더의 4행정 디젤 기관이었으나 가시화를 위하여 실린더헤드를 떼어 내고 실린더라이너에 6개의 소기공과 2개의 배기공을 가공하여 schnürle 소기방식의 직접분사식 2행정 기관으로 개조하였다. 떼어낸 실린더헤드대신에 Fig. 1과 같이 화염의 착화시기포착이 가능하도록 강화유리를 사용하여 관찰창을 설치한 별도의 헤드를 제작하여 결합시켰다. 2행정 가시화기관으로 개조하는 경우, 연료분사노즐의 장착제한으로 인해 실린더헤드측면에 노즐을 설치하여 하향분사하는 경우<sup>10)</sup>가 많으나 본 연구에서는 보다 실기에 가까운 분사조건을 구현하기 위하여 실린더헤드의 상부에 분사노즐을 설치하여 연료가 캐비티 내에 분사되도록 하였다. 단 분사노즐의 상부장착으로 인하여 전 연소실 면적의 약 70% 가시화를 실현하였다.

실린더 내에서의 소·배기유동은 Fig. 2에 나타 내었으며 소기효율을 높이기 위하여 라이너벽면을 이용하여 소기공의 양 측면과 윗면에 45°의 각도를 주어 가공하였다. 2행정기관으로 개조함에 따른 유

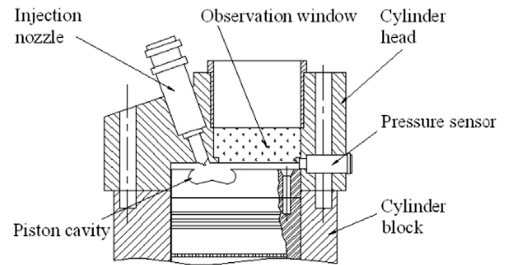


Fig. 1 Remodeling test engine and cylinder head

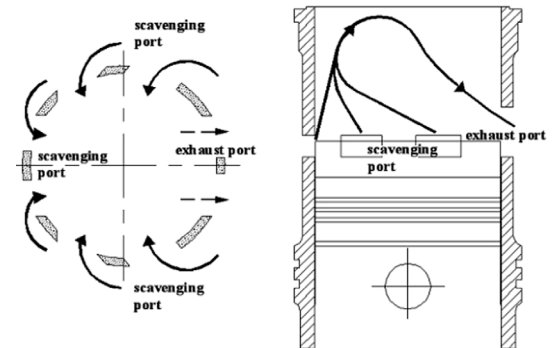


Fig. 2 Scavenging flows of experimental engine

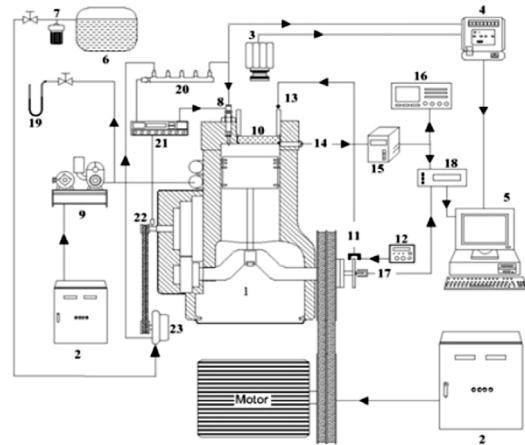
효율축비의 저하를 보충하고 매 사이클마다 동일한 급기밀도를 유지시키기 위하여 루츠블로워를 작동시켜 소기압을 표준대기압(101.3 KPa)보다 조금 높은 105KPa로 유지시켰다. 실험기관의 회전속도는 차량의 출발 시에 해당하는 1,000rpm에 고정시켰으며 이와 같은 저속회전에서는 실린더내에서 발생하는 공기유동이 적어 실험조건에 따른 영향을 더욱 명확히 얻을 수 있을 것으로 생각된다. Table 1과 Table 2는 실험기관의 제원 및 실험조건을 나타낸 것이다.

한편, Fig. 3은 착화지연기간을 측정하기 위한 실험장치의 개략도이며 계측방법은 다음과 같다.

커먼레일 분사장치의 인젝터드라이버(Smartek, SCR-1000S)에 구동전류가 통전되는 시점을 연료분사개시시기로 하고, 소자수광면상의 광점의 움직임을 연속출력으로 발생시키는 1차원 비분할형 포토센서로부터의 출력을 연소개시시기로 하였다. 이 포토센서의 제원을 Table 3에 나타낸다. 단, 포토센서로부터의 출력은 실험실주변의 각종 장치들로부터의 전기노이즈에 의한 오작동을 피하기 위하여 40mV에서 트리거 신호로 변환시켰다.

이와 같이 인젝터드라이버로부터의 트리거 출력

을 출발신호, 포토센서로부터의 트리거출력을 정지신호로써 시간간격측정장치(Universal counter, TAKEDA RIKEN TR 5830)에 입력시키고 이 두개의 입력신호차를 1/100ms의 단위로 측정해서 열염(hot flame, 600nm)의 착화지연기간(이하 착화지연기간으로 칭함)으로 하였으며 측정값의 신뢰성을 높이고 경향성을 알 수 있도록 각 실험조건별 200사이클분의 데이터를 취득하였다. Fig. 4는 인젝터드라이버 및 포토센서 출력의 시간관계를 나타낸 실예이다. 그림에서 보는 바와 같이 본 실험에서 측정된 착화지연기간은 실제의 착화지연기간보다 40mV에서 트리거신호로 변환될 때까지의 시간차( $\Delta T$ )만큼 길게 계측됨을 알 수 있다.



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

Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Specifications of experimental engine

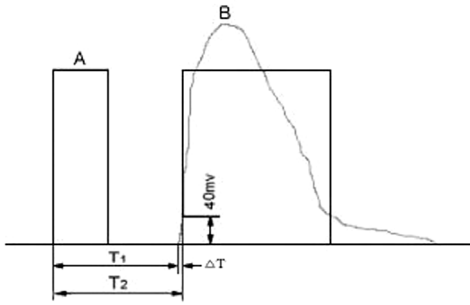
| Items                 | Specifications              |
|-----------------------|-----------------------------|
| Engine type           | 2-stroke D.I. diesel engine |
| Bore × Stroke         | 92 mm × 95 mm               |
| Compression ratio     | 16.4                        |
| Scavenging port open  | 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           | 16 mg/st                    |
| Fuel injection pressure | 80, 100, 120 MPa            |
| Fuel injection timing   | BTDC 5°, BTDC 12°, BTDC 22° |
| Nozzle holes            | 6                           |
| Scavenging pressure     | 105 KPa                     |

Table 3 Specifications of photo sensor

| Type No.                    | HAMAMATSU, S9212 |
|-----------------------------|------------------|
| Operating temperature       | -40 ~ 50°C       |
| Peak sensitivity wavelength | 550 nm           |
| Rise time                   | 0.5 μs           |



A : Injector driver output  
 B : Photo sensor output  
 T<sub>1</sub> : Practical ignition delay period  
 T<sub>2</sub> : Ignition delay period in this experiment

Fig. 4 Example of measured ignition delay period

### 3. 실험결과 및 고찰

착화지연기간은 물리적 착화지연기간과 화학적 착화지연기간으로 나눌 수 있으며, 전자는 분사된 연료가 증발하여 발화에 필요한 농도의 혼합기를 형성함과 동시에 착화온도까지 가열되는 기간, 후자는 착화온도에 도달한 후 폭발염을 발생하기까지의 기간이다. 그러나 실제로는 물리적지연과 화학적지연이 부분적으로 겹치게 되므로 양자의 명확한 구분은 곤란하다. 실린더내의 공기유동이 강하고 공기온도가 착화온도보다 충분하게 높은 경우에는 물리적지연기간은 매우 짧고 화학적 지연이 대부분을 점하나, 시동시와 같은 저온이거나 기관회전수가 낮은 경우에는 물리적지연이 지배적이 된다.

Fig. 5는 동일한 실험기관에 커먼레일분사장치와 이 장치의 등장 이전에 주로 사용되던 플런저타입의 기계식분사장치를 교체 장착하여 측정된 각 200 사이클분의 착화지연기간을 나타낸 것이다. 기계식 분사장치에 있어서는 플런저가 연료펌프구동용 캠에 의해 작동하므로 첫째, 분사량은 플런저와 노즐 니들밸브의 양정에 따라 점차 증가하고 둘째, 분사량의 증가에 따라 분사압력도 증가하며 분사말기에는 노즐이 닫히면서 압력도 떨어진다. 결국 분사최대압력은 평균분사압력보다 2배 이상 높은 분사특성을 가지므로 분무입자의 편차가 커지게 된다. 반면 커먼레일분사장치에 있어서는 가압된 연료 자체를 직접분사하기 때문에 전 분사기간에 걸쳐 고압을 유지할 수 있어 분무입자가 고르고 미립화 특성

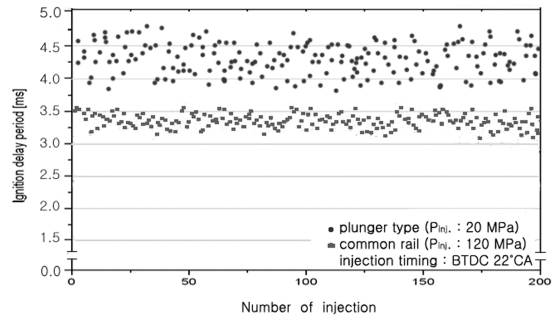


Fig. 5 Comparison of ignition delay period between plunger type injection system and common-rail injection system (engine speed : 1,000 rpm, scavenging pressure : 105 KPa)

이 우수하다. 기계식 분사장치를 장착한 직접분사식 디젤기관에서는 연료의 분사시기가 BTDC 22°~24°CA인 경우가 대부분이므로 Fig. 5에 있어서는 양 분사장치의 분사시기는 모두 BTDC 22°CA로 동일하게 하여 연료분사장치간의 분사특성차이에 의한 착화성을 비교하는데 목적을 두었다.

Fig. 5에 의하면 기계식분사장치를 사용한 경우에 있어서는 착화시기가 약 3.8~4.8ms의 사이, 즉 1ms간의 넓은 범위에 걸쳐 산포되어 있는 점으로 미루어 볼 때 매 사이클마다 착화시기의 변동이 심하여 진동연소가 일어났음을 알 수 있다. 또 착화지연기간이 길어 압력상승율도 크고 사이클간의 최고 압력차이도 클 것으로 사료된다. 그러나 커먼레일 분사장치를 사용한 경우에는 동일한 분사시기였음에도 착화시기의 분포가 0.5ms의 범위내인 약 3.1~3.55ms로 좁혀지고 착화지연기간도 매우 단축되어 보다 안정적인 연소가 일어났음을 나타내고 있다. 두 분사장치의 평균착화지연기간과 착화시기의 산포도(표준편차)를 비교하여 보면 평균착화지연기간은 4.31ms에서 3.3ms로 약 23% 단축되었고 산포도는 0.24에서 0.11로 50% 이상 개선된 효과를 보였다. 이처럼 기계식분사장치를 사용하였을 시의 불안정한 연소변동은 시동이나 아이들링운전과 같은 저속운전시 발생되던 차량진동의 큰 원인이 되었을 것에 틀림이 없다.

이번에는 동일한 분사장치에 있어서 분사압력 및 분사시기의 변화가 착화지연기간에 미치는 영향을 알아보기 위하여 커먼레일분사장치를 사용하여 측

정한 결과로부터 고찰하여 본다.

먼저 Fig. 6은 분사시기를 BTDC 12°CA에 고정시켜두고 분사압력을 80MPa, 100MPa, 120MPa로 증가시킨 경우의 착화지연기간을 측정한 것이다.

그림에 의하면 분사압력을 증가시킬수록 착화지연기간은 단축되고 착화시기의 분포범위도 좁아지는 경향을 보이고 있어 연소가 안정화되고 있음을 알 수 있으나 분사압력증압분 만큼씩의 단축은 일어나지 않고 있다. 각 분사압력에서의 평균착화지연기간은 80MPa일 때 약 2.6ms, 100MPa일 때 약 2.38ms, 120MPa일 때 약 2.34ms로서 80MPa에서 100MPa로 증가시킨 경우에는 약 0.22ms의 단축이 일어나나 100MPa에서 120MPa로 증가시킨 경우에는 약 0.04ms의 단축에 지나지 않는다. 특히 100MPa과 120MPa에서의 착화시기 산포도를 구해본 결과는 0.05로서 차이가 없었다. 분사압력의 증가는 연료입자와 공기와의 상대속도를 증가시켜 분무주변공기의 분무속(spray flux)으로의 유입량증가, 분무자체의 난류생성, 연소실벽면과의 충돌속도증가에 의한 재미립화 등으로 인해 혼합기형성을 촉진시킨다. 그러나 착화가 일어나기 위해서는 공기와의 혼합상태도 중요하지만 연료의 자연발화에 필요한 주변공기온도의 영향도 받게 된다. 미립화특성이 좋아진 만큼 증발도 활발해지므로 이로 인한 기화열량의 증가는 분무주변공기온도를 저하시켜 증압된 만큼의 착화지연단축은 일어나지 않는 것으로 생각된다. 본 연구에서는 분사압력을 더 높여서 실험해보지는 못하였으나 분사압력의 증가에 따른 착화지연기간의 단축이나 착화시기의 안정에는 한계가 있을 것으로 유추되며 이 한계 분사압력의 범위는 기관의 종류나 기타 다른 인자들의 영향에 따라 차이가 있을 것이다.

다음으로, Fig. 7 및 Fig. 8은 분사압력을 120MPa로 유지시킨 채 분사시기를 BTDC 12°CA를 중심으로 하여 10°진각 및 7°지각시킨 경우의 착화지연기간과 그 때 실린더내의 압력변화를 TDC를 중심으로 나타낸 것이다. 단 압력선도는 매 사이클마다의 변동성을 고려하여 20사이클분을 평균한 것이다. Fig. 7에서 보듯이 분사시기를 TDC근처로 지각시키면 지연기간은 급격하게 짧아져 약 1.5ms를 전후하

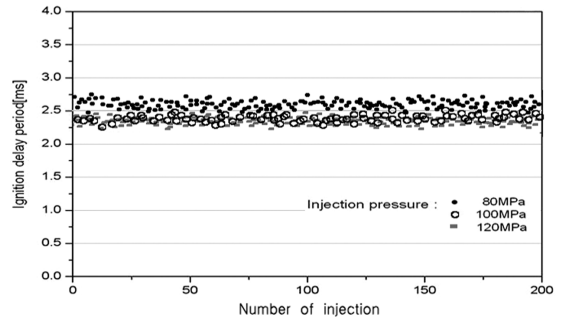


Fig. 6 Ignition delay period of each injection pressure at injection timing BTDC 12°CA (engine speed : 1,000 rpm, scavenging pressure : 105 KPa)

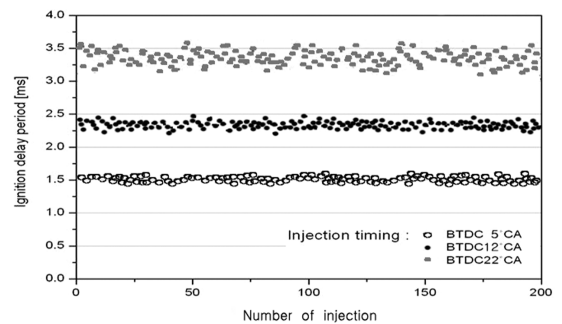


Fig. 7 Ignition delay period of each injection timing at injection pressure 120 MPa (engine speed : 1,000 rpm, scavenging pressure : 105 KPa)

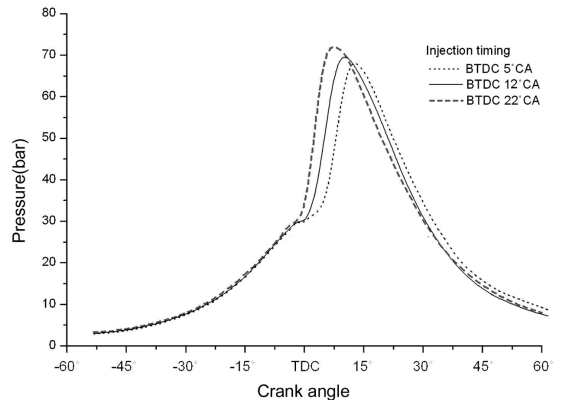


Fig. 8 Cylinder pressure diagrams of each injection timing at injection pressure 120 MPa (engine speed : 1,000 rpm, scavenging pressure : 105 KPa)

여 착화가 일어날 뿐 아니라 산포도도 0.03으로 좁혀져 지극히 안정적인 연소를 하게 된다. 이는 분사시기가 지각될수록 실린더내의 고온·고압의 상태에 이르게 되므로 공기의 점성은 증가되는 반면 연

료입자의 표면장력은 감소되어 무화와 증발이 촉진됨에 따라 물리적 착화지연이 크게 단축된 것에 기인한다. 그러나 Fig. 8에 의하면 분사시기가 지각되면 연소최고압력은 약 2bar 낮아지고 또 최고압력의 발생시기도 약 2~3°C 낮아져 기관출력의 저하가 예상된다. 반대로 분사시기를 진각시켜 TDC 근처에서 급격한 연소를 시키면 최고압력이 약 3bar 상승하여 기관출력면에서는 유리하나 압력상승율이 과대할 경우에는 노킹이 우려된다. 따라서 노크의 발생이나 출력의 저하를 피하면서 원활한 연소가 일어날 수 있는 적정분사시기를 결정하여야 한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 실린더내의 착화를 식별할 수 있도록 개조한 단기통의 직접분사식 디젤기관을 사용하여 연료분사장치의 종류, 연료의 분사압력, 분사시기 등의 분사특성변화가 착화지연기간에 미치는 영향을 고찰하였다. 얻어진 성과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 동일한 실험기관을 사용하여 연료분사장치의 분사특성차이에 의한 착화성을 비교한 결과, 기계식(플러저형)분사장치를 장착하였을 시는 매 사이클마다 착화시기의 변동이 클 뿐만 아니라 착화지연기간도 길어 매우 불안정한 진동연소 형태를 보인 반면 커먼레일분사장치를 장착하였을 시는 기계식분사장치와 동일한 분사시기였음에도 불구하고 착화시기가 안정되고 착화지연기간도 크게 단축되는 경향을 보였다.
- 2) 위 1)과 같은 결과는 실험기관이나 조건 등에 따라 정량적인 차이는 있겠지만, 본 실험에서 커먼레일분사장치는 기계식분사장치에 비해 1,000 rpm의 저속회전에서 평균착화지연기간을 약 23% 단축시키고 착화시기의 변동범위도 50% 이내로 축소 시켰다. 이와 같은 효과는 차량의 진동이나 소음경감에 큰 기여를 할 것으로 사료된다.
- 3) 분사압력의 증가는 분무의 미립화특성을 향상시켜 착화지연기간을 단축시키고 착화시기도 안정시키나 일정압력을 넘어서면서부터는 착화지연 단축효과가 크게 감소되는 경향을 보였다. 분사압력의 증가에 의한 착화지연기간의 단축

에는 한계가 있을 것으로 사료된다.

- 4) 분사시기의 진, 지각에 따라 착화지연기간과 실린더 내 최고압력 및 최고압력 형성시기 등이 큰 변화를 보였다. 이것은 기관출력에 직접 영향을 미치게 되므로 노크의 발생이나 출력의 저하를 피할 수 있는 적정의 분사시기를 결정하여야 한다.

#### 후 기

본 연구는 금오공과대학교에서 지원하는 학술연구비에 의해 수행되었습니다.

#### References

- 1) T. C. Yu and O. A. Uyehara, "Physical and Chemical Ignition Delay in an Operating Diesel Engine Using the Hot-Motored Technique," Transactions of SAE, Vol.64, No.4, pp.712-720, 1975.
- 2) J. K. Yoon and J. H. Lim, "A Study on the Characteristics of Ignition and Combustion in a Diesel Spray Using Multi-Component Mixed Fuels," Journal of Energy Engineering, Vol.16, No.3, pp.120-127, 2007.
- 3) Y. R. Kim, J. M. Lim and K. D. Min, "Ignition Delay Characteristics of DME and Diesel Sprays," Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.352-358, 2004.
- 4) H. S. Ohn, Y. R. Kim and K. D. Min, "Ignition Delay Measurement of Diesel Sprays in a Constant Volume Vessel," Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.387-392, 2004.
- 5) H. U. Kim, S. S. Pae and K. D. Min, "Characteristics of the Ignition Delay for Hydrocarbon Fuels by Reduced Chemical Kinetics Modeling," Transactions of KSAE, Vol.9, No.4, pp.44-49, 2003.
- 6) J. M. Lim, Y. R. Kim, H. S. Ohn and K. D. Min, "Prediction of Ignition Delay for HSDI Diesel Engine," Fall Conference Proceedings, KSME, pp. 1704-1709, 2004.
- 7) Y. W. Yu, S. K. Kim and Y. M. Kim, "Numerical Modeling for Auto-Ignition and Combustion Processes of Fuel Sprays in High-Pressure Environment," Fall Conference Pro-

- ceedings, KSAE, pp.308-313, 2000.
- 8) H. S. Kim and N. W. Sung, "The Effect of Ambient Gas Pressure on Fuel Spray Evaporation and Ignition," Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.319-325, 2002.
  - 9) T. J. Wang and S. W. Baek, "Study on Vaporization and Combustion of Spray in High Pressure Environment," Transactions of KSME, Vol.27, No.9, pp.1273-1281. 2003.
  - 10) 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.