

## RCM을 이용한 디젤 분무 거동 및 자발화 특성에 관한 실험적 연구

### An Experimental Study on Diesel Spray Dynamics and Auto-Ignition Characteristics to use Rapid Compression Machine

안재현\* · 김형모\*\* · 신명철\*\*\* · 김세원\*\*\*

J. H. Ahn, H. M. Kim, M. C. Shin and S. W. Kim

#### Abstract

The low-emission and high-performance diesel combustion is an important issue in the combustion research community. In order to understand the detailed diesel flame field involving the complex physical processes, it is quite desirable to study diesel spray dynamics, auto-ignition and spray flame propagation. Dynamics of fuel spray is a crucial element for air-fuel mixture formation, flame stabilization and pollutant formation. In the present study, the diesel RCM (Rapid Compression Machine) and the Electric Control injection system have been designed and developed to investigate the effects of injection pressure, injection timing, and intake air temperature on spray dynamics and diesel combustion processes. In terms of the macroscopic spray combustion characteristics, it is observed that the fuel jet atomization and the droplet breakup processes become much faster by increasing the injection pressure and the spray angle. With increasing the cylinder pressure, there is a tendency that the shape of spray pattern in the downstream region tends to be spherical due to the increase of air density and the corresponding drag force. Effects of intake temperature and injection pressure on auto-ignition is experimentally analysed and discussed in detail.

**주요기술용어(Key Words):** RCM(급속압축기), Injection System(연료 분사장치), Solenoid Valve(전자변), Auto-Ignition(자발화), Diesel Spray(디젤분무), Ignition Delay(점화지연)

#### 1. 서론

지구온난화의 원인으로 CO<sub>2</sub>가스가 크게 대두되고 있는 상황에서 저공해 고성능 디젤엔진 개발의 중요성이 느껴지며 디젤 분무 화염의

이해가 절실히 요구되고 있다. 복잡한 디젤연소의 이해를 도모하기 위해서는 기본적으로 디젤분무의 기초적인 거동 및 자발화에 관한 연구가 필수적이다.

디젤연소는 액체연료를 분공직경 0.1~0.4 mm의 분사노즐을 이용하여 분사압력이 30~100 MPa이며 최근에는 그 이상의 고압으로 분위기 온도 700~1000 K, 분위기압력 2.5~5.0 MPa 이라는 고온고압의 공기 분위기중에 간헐적으로 분사시켜 연료를 미립화하여 증발, 혼

\* 한양대학교 기계공학과 대학원

\*\* 한국항공우주연구원

\*\*\* 한국생산기술연구원

합기형성, 착화, 연소, 배기로 이동하는 현상으로 비정상상태에서 수십msec 정도의 짧은 시간에 순간적으로 완결되는 분무연소이다. 또 엔진 연소실내의 체적, 압력, 온도는 시시각각으로 변화하기 때문에 연소실내에서의 분무의 거동 및 연료증기와 공기의 혼합기 형성과정 및 연소과정은 상당히 복잡한 양상을 가진다. 따라서 디젤 연소를 지배하는 중요한 인자로 연료분무의 기하학적인 발달 및 분무 내에서 국소적인 연료와 공기의 혼합기 형성과정으로 볼 수 있다<sup>1)</sup>. 또한 자발화 현상은 점화지연과 깊은 관계가 있으며 점화지연기간이 늘어나면 그 기간동안 계속 생성된 혼합기에 착화가 이루어지면 급격한 압력의 상승을 가져오며 디젤 노킹을 발생하는데 디젤 연소의 형태를 결정하는 상당히 중요한 인자이다<sup>2),3)</sup>. 따라서 본 연구에서는 분사압력 및 분사시기에 따른 디젤분무의 기초적인 거동 및 자발화에 관하여 연구하여 저공해, 고성능 디젤기관의 개발에 도움이 되도록 한다.

최근 컴퓨터의 발달로 인하여 디젤기관의 성능 및 그에 영향을 주는 각종 요소와의 관계를 다차원적, 열역학적 또는 현상론적으로 모델링 시킨 시뮬레이션을 통한 예측결과가 많이 보고되고 있다<sup>4)</sup>. 복잡한 물리적 과정을 포함하는 디젤 연소현상을 수치적으로 모델링하는 데는 많은 한계와 불확실성을 가지고 있기 때문에 디젤 분무연소에 대한 연구에 있어서 분무거동, 자발화 및 연소과정에 대한 실험은 필수적인 것이다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 연구에서는 디젤기관 연소실내에서의 연소현상 및 분무거동을 관측하기 위하여 실 기관과 비교적 유사하며 정상상태의 재현성이 충족되는 급속압축기(Rapid Compression Machine)를 제작하였고 여러 분사조건에서의 연구가 가능한 분사압, 분사기간, 분사시기등의 제어가 가능한 유압제어형 전자식 분사

장치를 제작하였다.

#### 2.1.1 급속압축기

본 급속압축기는 압축공기를 구동력으로 사용하며 1회의 압축행정을 가지며 주요 제원을 Table 1에 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 급속압축기의 구동은 10bar의 순수압축공기를 4배 증압변을 이용하여 구동부에 설정된 압축공기를 공급한다. 또한 구동부의 견반부에는 3개의 슬레노이드 및 소음기를 장착하여 급속압축기의 속도 및 압축력을 가변 할 수 있게 제작되었다. 또한 스톱피의 위치를 변화시킴으로서 압축비를 변화시킬 수 있다. 가시화를 위한 관측창은 피스톤의 크라운부( $\phi 45$ [mm])와 실린더 헤드에 두 개의 관측창( $\phi 40$ [mm])이 있다. 연소실의 형상은 기본적으로 Bowl(in Piston)형과 Pancake형의 2형태로 변화가 가능하다. 연소실의 형상이 Bowl형일때는 피스톤의 크라운을 통한 Bottom View와 헤드부를 통한 Upper View로 관측이 가능하다. Pancake형의 경우에는 Upper View의 관측이 가능하며 피스톤 뒷면에 평면거울을 부착하여 웨도우 그래피 및 슈리렌등의 광계측이 가능하게 제작하였다.

Table 1 Main specification of RCM

Combustion Chamber Shape	Bowl in Piston & Pancake
Bore	85.00mm
Stroke	150-245 mm
Compression Ratio	1 : 8-13
Driving Pressure	15 - 20 bar
Mean Piston Speed	2.8msec
Equivalent Revolutional Speed of Engine	160 rpm
Total Length	2700.00 mm
Height	1000.00 mm

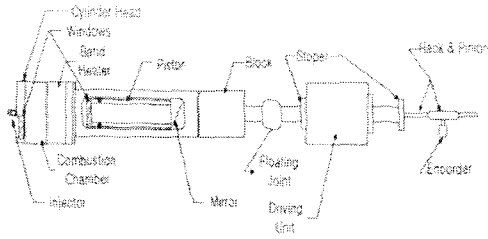


Fig. 1 Structure of RCM

2.1.2 노즐 및 연료 분사 장치

본 실험에 사용된 Injector는 기존의 양산품(노즐형식: 784)으로 6개의 분공을 가지고 있으며 분무각은 6공 모두 수직선상으로부터 75°의 각으로 향하며 각 분공사이의 각도는 60°이다. 분공의 직경은 0.211mm이다. 이 Injector와 nozzle의 개략도를 Fig. 2에 나타내었고 Nozzle tip의 상세도를 Fig. 3에 나타내었다.

분사장치는 Fig. 4에 나타내었다. 본 장치는 연료 공급부, 고압 생성부 그리고 분사 제어부의 3개의 부분으로 나눌 수 있다. 연료 공급부는 공압을 이용하여 High pressure cylinder로 연료를 공급한다. 고압 생성부에서는 원하는 분사압 및 분사를 제어하기 위한 제어압 그리고 니들을 고정시키는 고정압을 생성한다. 그리고 분사제어부에서는 2개의 2/2 Way 고압 솔레노이드 밸브를 이용하여 분사 시기, 기간, 양을 제어한다. 또한 솔레노이드 콘트롤러는 응답속도가 본 연구에서 요구되는 수십 micro sec.로 충족하며 정확한 시간 간격(수 micro sec. ~ 수십 nano sec.)을 가진다.

분사의 제어는 Fig. 2의 ②번 Line을 통하여 Injector내의 needle을 고정압으로 고정시키고 Fig. 2의 ①번 Line을 통해 분사압을 공급한 후 Fig. 4의 솔레노이드 밸브의 A, B의 개폐로 분사가 제어된다.



Fig. 2 Schematic of injector

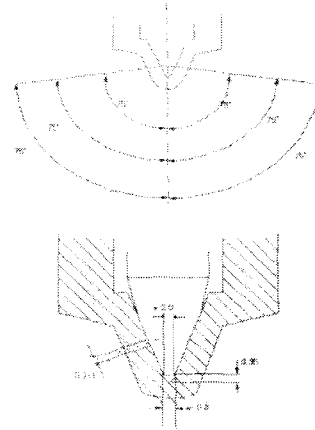


Fig. 3 Schematic of nozzle tip

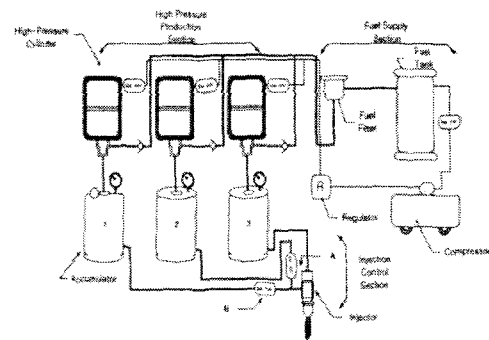


Fig. 4 Injection System of RCM

2.2 실험방법

급속압축기의 구동으로 얻어지는 엔코더의 Z상을 동기 신호로 사용하며 이 동기신호를 Digital delay pulse generator를 통해 시간지연을 거친 후 Solenoid controller로 신호를 주어 분사장치를 구동시켰고 광학계에 구동 신호를 준다. 데이터 취득은 Oscilloscope 등으로 취득하였으며 압력 데이터는 Cylinder pressure sensor(Kistler, 6125A), Line pressure sensor(Kistler, 4067)를 이용하여 취득하였고, 화상데이터는 고속카메라(Kodak, HS M.A. 4540mx & Motion corder analyzer)를 이용하여 취득하였다.

2.2.1 급속압축기의 구동

급속압축기는 먼저 10 bar의 순수압축공기를 중압변을 통하여 20bar의 압력으로 구동부에 공급후 고속 솔레노이드 밸브의 개폐로 구동부의 압축공기를 토출시키며 피스톤부를 발전시킨다. 피스톤은 임의의 위치에 고정된 스톱퍼에 의하여 정지되며 이 스톱퍼의 위치로 압력비를 조절할 수 있다. 측정 후 limit s/w 및 솔레노이드 밸브에 의하여 원상태로 돌아간다.

2.2.2 분사장치의 구동

먼저 각각의 High pressure cylinder로 연료를 공급시킨 후 Fig. 4의 제어부에 있는 솔레노이드 밸브 A를 열고 인젝터 내의 니들을 고정압으로 고정시킨다. 그리고 솔레노이드 밸브 A의 공급 라인 입구에 니들의 움직임을 제어할 수 있는 제어압을 공급한다. 고정압과 제어압을 공급한 후 분사압을 공급한다. 솔레노이드의 제어는 급속압축기가 구동됨에 따라 나오는 엔코더 신호에서 Z상의 신호를 Digital delay pulse generator를 통하여 일정한 시간 지연을 가지고 Solenoid controller로 5V D.C 신호가 들어가 임의의 시간 후에 솔레노이드 밸브가 작동한다. 솔레노이드 밸브 A, B의 시간간격 및 각각의 솔레노이드의 개폐기간에 따라 분사시기 및 분사상태를 조절할 수 있다. 또한 분사압의 변화는 공급부에 공급하는 압력의 변화로서 행하여진다. 신호처리도를 Fig 5에 나타내었다.

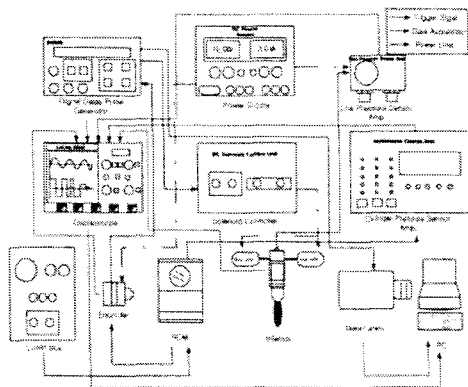


Fig. 5 Trigger Signal and Data Acquisition System

2.2.3 가시화 시스템

Ar Ion Laser에서 나오는 514.5nm 파장대의 광을 전반사 미러를 통하여 볼록렌즈로 광원을 확대시킨 후 슈리렌미러를 이용하여 평행광을 만들고 Iris를 통과한 후 Beam splitter로 50:50으로 광원을 분리시킨 후 실린더 헤드부와 피스톤 보울부의 관측창으로 광을 보내고 이를 Half mirror를 통과시켜 관측창으로 주사하였고 Half mirror에서 나오는 상을 두대의 High speed digital camera를 이용하여 동시에 계속하였다. 가시화 시스템을 Fig. 6에 나타내었다.

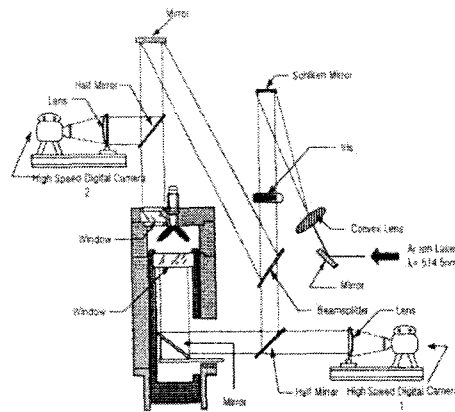


Fig. 6 Optical System for Photography by High Speed Camera

3. 실험결과 및 고찰

디젤분무의 발달 및 형성과정, 자발화 및 연소과정<sup>5),6)</sup>을 체계적으로 분석하기 위하여 본 연구에서는 RCM 및 전자분사장치를 이용하여 분사압력, 분사시기 그리고 압축초기온도가 연료분무의 거동 과 자발화에 미치는 영향을 실험적으로 해석하였다. 실험시 RCM의 압축비는 12 : 1 로 고정하였다.

3.1 디젤 분무 거동의 특성

분사압의 변화에 따른 분무 거동의 거시적 특징을 Fig. 7과 Fig. 8에서 살펴보았다. 분사압이 40MPa

인 경우에 분사 후 0.9msec가 경과하였을 때의 사진을 보면 30MPa인 경우보다 분무각이 크며 액주의 상단에서 분열이 생기는 것을 관측 할 수 있으나 분사압이 30MPa의 경우 40MPa의 경우보다 대체로 Breakup이 늦게 일어남을 보이고 있다. 분사압이 상승할수록 분무각이 커지며 Breakup이 빨라 일어나는데 이는 분사압이 높은 경우 낮은 경우에 비하여 더 많은 운동량을 가지고 있는데 연료가 노즐을 통과할 때 이 운동량들이 난류에너지로 바뀌게 되어 난류에너지가 더 큰 고압분사의 경우에 일차 및 이차적인 미립화 과정이 촉진되기 때문이다. 12시 및 10시 방향으로 연료제트의 미립화 및 연료 액적의 분열이 먼저 진행되어 분무의 발달이 비대칭적으로 진행되는 데 이는 대기중 분무 실험 및 여러 다른 조건에서도 계속 관찰되었던 현상으로 노즐의 가공 특성으로 인한 현상으로 생각된다.

그리고 분사압이 40MPa인 경우의 자발화는 분사 후 1.50msec에서 나타나며 30MPa인 경우에는 1.60msec에서 나타나 분사압이 높을 경우 점화 지연이 짧아짐을 알 수 있다. 이는 분사압력이 큰 경우가 액적분열과 증발, 그리고 연료증기와 공기와의 난류 혼합이 상대적으로 빠르게 진행되어 자발화의 충족 조건인 유체역학적 시간척도와 화학반응의 시간척도가 거의 대등한 Damköhler 수, 1.0의 상태에 일찍 도달하기 때문이다.

압축초기 온도에 따른 분무 거동을 살펴보면 초기의 온도가 높아지면 액적의 증발율이 증가되어 연료 증기의 양이 증가함에 따라 분무가 가지는 운동량이 연료증기의 저항에 의하여 감소하게 되어 분무의 도달거리는 더 짧아지며 속도 또한 느려지게 된다. Fig. 9와 Fig. 10의 비교에서 분무초기에는 분무의 발달에 거의 차이가 없으나 1msec 후부터 압축초기 온도가 337.15K인 경우의 분무가 압축초기 온도가 373.15K인 경우 보다 더 빠르게 발달함을 알 수 있다. 또한 이 경우의 점화 지연은 압축초기 온도가 높은 경우에 1.65msec, 그리고 낮은 경우가 1.80msec로 압축초기 온도가 높은 경우 0.15msec정도 점화 지연이 짧아진다.

Fig. 11와 Fig. 7에서 분사 후 1.8msec 이후의 분

무형상을 볼 때 분사시기가 느린 경우에 분무의 후류가 원주에 가까운 형상을 보임을 알 수 있는데 이는 피스톤이 TDC에 접근하면서 실린더내의 혼합기의 밀도가 증가하게 되어 연료 액적들이 주위 기체에 의한 항력의 증가로 인하여 분무의 관통거리가 감소하기 때문이다. 또한 이러한 액적에 작용하는 항력은 분무의 표면에 시간에 따라 불규칙한 파동을 형성하면서 분무를 반경방향보다 넓게 퍼지게 한다. 점화 지연은 분사시기가 낮은 경우 약 0.15msec정도 더 짧게 나타난다.

### 3.2 자발화 특성

점화 지연과 압축초기온도와와의 상관관계를 Fig. 9과 Fig. 10에서 살펴보면 압축초기온도가 373.15K의 경우에는 분사 후 1.65msec 후에 자발화점이 관측되지만 초기온도가 337.15K인 경우에는 1.8msec 후에 자발화점이 발견된다. 이는 온도에 따른 증발률에 의한 것으로 주위 온도가 높은 경우 연료증기가 더 빨리 발달하게 되어 점화 지연은 압축초기온도가 높은 경우에 더 짧게 나타난다. 또한 화염의 전파는 압축초기온도가 낮은 경우가 약간 더 급격하게 연소되는데, 이는 주위 온도가 더 높아질수록 화염은 노즐 출구 가까이 다가가게 되고 따라서 더 많은 스프레이가 화염에 의해 둘러 쌓이게 된다. 이것은 점화 지연이 고온에서는 짧아지게 되지만, 분무는 짧은 점화 지연 기간에서는 완전하게 형성되지 않으며 연료증기의 양이 점화 지연이 긴 경우보다 더 작게 생성이 되므로 압축초기온도가 저온 보다 고온일 때 혼합기의 양이 더 적으므로 점화 지연은 짧더라도 초기온도가 저온인 경우보다 덜 급속히 연소하게 된다.

점화 지연과 분사시기에 관한 영향은 Fig. 7과 Fig. 11에서 살펴보았다. 분사시기가 BTDC 10°인 경우가 BTDC 15°인 경우보다 0.15msec 가량 더 빨리 자발화가 보인다. 이는 분사시기는 즉, 실린더 압력의 변화와 관련이 되는데 분사시기가 TDC에 가까워질수록 실린더 압력이 보다 더 큰 상태에서 분무가 시작된다고 볼 수 있다. 이때에 실린더 내 압력의 변화에 따른 영향으로 분무의 증발율이 커지게 되며 또한 실린더 압력이 커짐에 따라 압축되어진 공기의

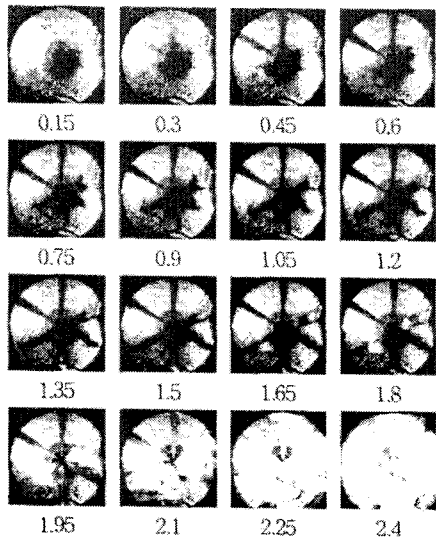


Fig. 7 High Speed Photographic of the Diesel Spray and Auto-Ignition ( $P_i=40\text{MPa}$ ,  $T_i=\text{BTDC}10$ ,  $T_{ini}=333.15\text{K}$ )

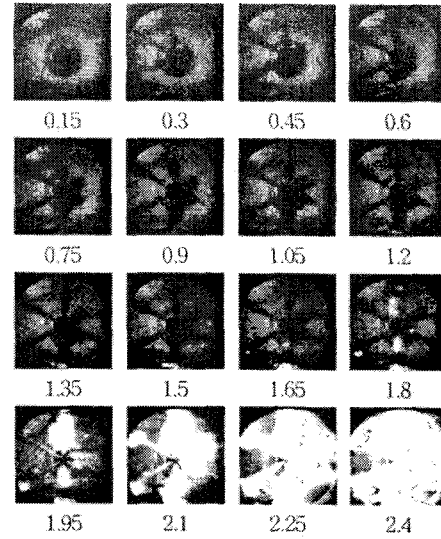


Fig. 9 High Speed Photographic of the Diesel Spray and Auto-Ignition ( $P_i=30\text{MPa}$ ,  $T_i=\text{BTDC}15$ ,  $T_{ini}=373.15\text{K}$ )

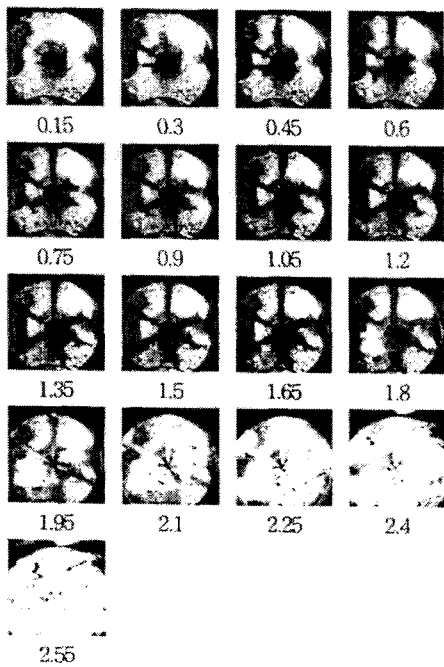


Fig. 8 High Speed Photographic of the Diesel Spray and Auto-Ignition ( $P_i=30\text{MPa}$ ,  $T_i=\text{BTDC}10$ ,  $T_{ini}=333.15\text{K}$ )

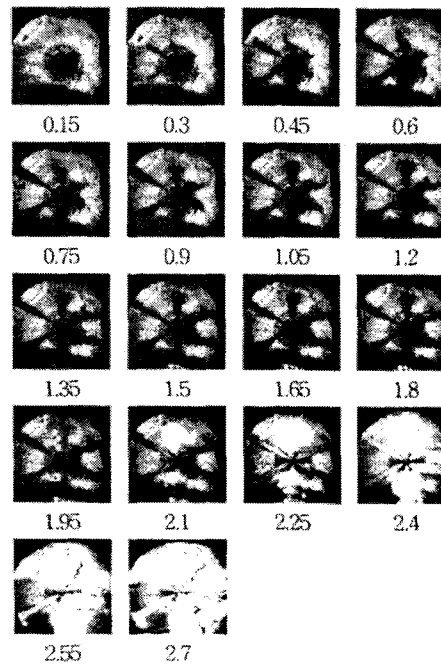


Fig. 10 High Speed Photographic of the Diesel Spray and Auto-Ignition ( $P_i=30\text{MPa}$ ,  $T_i=\text{BTDC}15$ ,  $T_{ini}=333.15\text{K}$ )

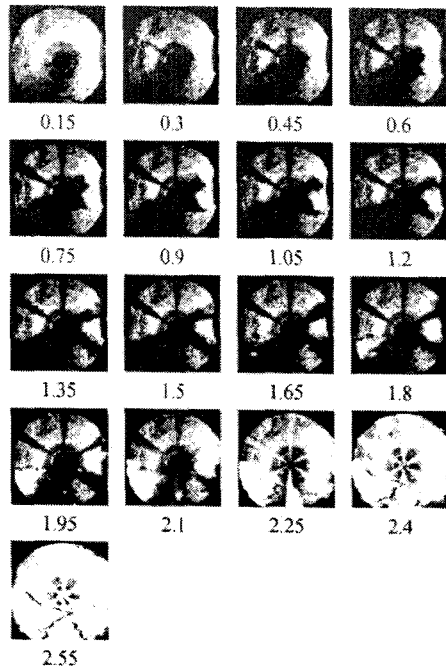


Fig. 11 High Speed Photographic of the Diesel Spray and Auto-Ignition ( $P_i=40\text{MPa}$ ,  $T_i=BTDC15$ ,  $T_{ini}=333.15\text{K}$ )

밀도는 더욱 커지게 되고 분사된 액적들은 그 만큼 많은 공기들과 충돌하여 Breakup될 확률이 커지게 된다. 그 표면적은 더욱 작아지고 보다 쉽게 공기가 entrain되어서 점화 조건에 맞는 혼합기를 빨리 형성하기 때문에 점화 지연이 짧아진다.

분사압과 점화지연을 Fig. 9과 Fig.11에서 보면 분사압이 40MPa의 경우가 30MPa의 경우보다 약 0.1msec정도 점화지연이 짧아지는 것이 보이는데 이는 앞 절의 분무거동에서 나타내었듯이 분사압이 큰 경우 그 분무가 가지는 운동량이 크기 때문에 분사각이 커지며 Breakup이 빨리 일어나게 되면서 공기와 연료와의 접촉이 더 많아진다. 따라서 분사압이 큰 경우에 더 빨리 자발화 형상이 일어나게 된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 RCM을 이용하여 분사압력, 분사시

기 그리고 압축초기온도가 연료분무의 거동 과 자발화에 미치는 영향을 실험적으로 해석하였으며 실험결과를 요약하면 아래와 같다.

- (1) 본 실험을 통하여 급속 압축기가 디젤기관의 연소 현상을 잘 묘사함을 알 수 있었고 전자 제어식 단발분사장치가 원활한 분사를 수행함을 확인 할 수 있다.
- (2) 분사압의 증가와 더불어 분무각이 넓어지고 분무의 관통속도와 액적분열이 빨라짐을 확인하였다.
- (3) 분사시기가 TDC에 가까워질 수록 점화지연이 짧아지고 분무의 후류의 형태가 원주화 형태되는 경향을 가지게 된다
- (4) 압축초기 온도가 높아지면 점화지연은 줄어들고 화염의 전파속도는 상대적으로 느려짐을 알 수 있다.

#### 참고문헌

1. A. Mohammadi, K. Miwa, T. Ishiyama, and M. Abe, 1998, "Investigation of Droplets and Ambient Gas Interaction in a Diesel Spray Using a Nano-Spark Photography Method", SAE paper no. 981073, 1998
2. S. Matsuoka, T. Kamimoto, and H. Kobayashi, "Photograph and Image Analysis Studies Of Diesel Spray And Flame With A Rapid Compression Machine And A D.I. Diesel Engine(Interpretation And Conceptual Image)", SAE paper no. 845009, 1984
3. T. Kamimoto, H. Kobayashi, and S. Matsuoka, "A Big Size Rapid Compression Machine for Fundamental studies of Diesel Combustion", SAE paper no. 811004, 1981
4. R. D. Reitz, "Modeling Atomization Processes in High-Pressure Vaporizing Sprays", Atomization and Spray Technology, 3, pp. 309-337, 1987
5. J. Sato, Katsuyuki Konishi, H. Okada and T. Nioka, "Ignition Process Fuel Spray

Injected into High Temperature Atmosphere", 21st. Int. Symposium on Combustion, pp. 695-702, 1986

6. 小林治樹, 神本武征, "急速壓縮装置によるディーゼル燃焼に関する研究", 日本機械學會論文集 48-426