

<논문> SAE NO. 943774

## 정적연소실내의 디젤분무증발과 연소특성에 관한 연구

### A Study on the Diesel Spray Evaporation and Combustion Characteristics in Constant Volume Chamber

김 상 호,\* 김 석 준,\*\* 이 만 복,\*\*\* 김 응 서\*\*\*\*  
S. H. Kim, S. J. Kim, M.B.Lee, E. S. Kim

#### ABSTRACT

As a fundamental study to apply high pressure injection system to direct injection diesel engine, fuel injection system and constant volume combustion chamber were made and the behaviors of evaporating spray with the variation of injection pressure and the ambient gas temperature were observed by using high speed camera, and the combustion characteristics with the variation of injection pressure and A/F ratio were analyzed.

As injection pressure increases, spray tip penetration and spray angle increase and, as a results spray volume increases. This helps an uniform mixing of fuel and air. Spray liquid core length decreases as ambient gas temperature increases, while it decreases as injection pressure increases but the effect of ambient gas temperature is dominant.

As injection pressure increases, ignition delay is shortened and combustion rate being raised, maximum heat release rate increases. It become clear that High injection pressure has high level of potential to improve the performance of DI-diesel engine.

주요기술용어 : Injection Pressure(분사압력), Spray Volume(분무체적), Liquid Core Length(액주길이), Ignition Delay(점화지연), Heat Release Rate(열발생율)

#### 1. 서 론

디젤 기관의 연소특성중 착화지연기간은 성능에 영향을 미치는 가장 중요한 인자중의 하나이다. 착화지연기간은 연료의 분사 시작점과 분사된

연료의 연소시작점 사이의 시간으로 정의되는데 이는, 연료 분사 압력, 주위 공기 압력 및 온도, 분사 노즐 형상, 연료의 휘발성 등에 의해 영향을 받는다. 착화지연시간이 증가하면, 연료의 자발화를 유발하는 증발된 연료의 양이 증가하게 되고,

\* 서울대학교 기계공학과 대학원  
\*\* 서울대학교 기계공학과 대학원  
\*\*\* 서울대학교 기계공학과 대학원  
\*\*\*\* 서울대학교 기계공학과

전체 연소기간중 예혼합 연소기간이 길어지게 된다. 디젤 기관에서 착화지연시간의 증가로 인한 예혼합 연소기간의 증가는 연소실내의 온도, 압력을 상승시키고, 그에 따라 배기 가스내의 질소 산화물이 증가하고, 기관의 열적, 기계적 부하를 증가시켜 내구성의 저하를 초래한다.

디젤 연료의 연소특성에 대한 연구는 실제 디젤 기관 실험과 정적 연소 실험을 통해서 연구되어 왔다. 실제 기관 실험을 통한 연구는 분사 시기, 기관 회전수, 스윙(Swirl) 효과 등의 운전 조건에 의한 영향을 이해하기에는 유리하지만, 연소실내의 온도와 압력이 시간에 따라 순간적으로 변하고, 때로는 이러한 값들을 특정하는데 어려움이 있으므로, 연소실 내부 공기의 온도와 압력등의 기본적인 인자들과 연소특성을 연관시키기가 어렵다. 반면에 정적 연소 실험은 연소실 내부 공기의 온도, 압력을 일정하게 유지시킬 수 있어 연소특성에 대한 보다 기본적인 이해가 가능하다.

Stapper 등<sup>1)</sup>은 정적연소 실험을 통해서 42종류의 연료의 물성치에 대한 연소 특성을 연구하여 연료의 세탄가(Cetan Number)에 대한 착화지연 시간을 측정하였고, Callahan 등<sup>2)</sup>은 디젤 기관 실험과 정적연소 실험을 병행하여 연료의 물성치와 연소실 내부 공기의 온도, 압력과 공연비에 대한 연소특성을 연구하였다. 그리고, Hiroyasu 등<sup>3)</sup>은 정적 연소 실험을 통해 연료 분사 압력과 주위 공기온도 등을 파라미터로 하여 연소특성과 분무의 벽면 충돌 효과 등을 연구하였다.

본 연구에서는 정적 연소실을 이용하여 연료 분사압력과 주위 공기온도에 따른 디젤 증발분무의 거동을 가시화하여 분무의 액점침투거리와 선단침투거리를 측정하였고, 연료 분사압력과 공연비에 따른 착화지연시간, 열발생을 등의 연소특성을 해석하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

#### 2.1.1 실험 장치

기존의 직접 분사식 디젤 기관에서 연료 공급 장치는 캠-플런저 방식의 연료분사 펌프에서

압력을 발생시키고, 이를 연료 공급관을 통하여 분사 노즐에 공급하는 인-라인(In-Line) 방식을 일반적으로 사용하고 있다. 그러나, 이러한 방식의 연료 공급 장치는 분사 노즐의 개변압(Opening Pressure)과 캠 형상, 헬리컬 그루브(Helical Groove)의 위치 등에 따라 연료 공급관 내에 복잡한 압력 변화를 발생시키므로 연료 분사 압력의 변화에 따른 분무 형태와 연소 현상을 측정하고자 하는 본 연구의 목적에 적합하지 않기 때문에 연료 분사 압력의 조절이 가능하고, 분사 지속 기간중에 분사 압력을 일정하게 유지할 수 있도록 연료 공급 장치를 제작하였다.

연료 분사 펌프로는 압축 공기로 구동되는 공압 펌프(Air Driven Pump)를 사용하였다. 이 펌프는 150:1의 단면적비를 갖는 가압용 플런저의 대단부에 압축 공기를 작용시켜 분사 액체를 가압하며, 최고 0.7MPa의 압축공기를 사용하여 105 MPa의 토출 압력을 얻을 수 있다. 또 연료 분사 압력을 조절하고 분사 지속 기간 중의 압력 변동을 최소화하기 위하여 연료 분사 펌프와 연료 공급관 사이에 축압기를 설치하였으며, 여기에 설치된 압력 조절 장치로 분사 압력을 조절할 수 있도록 하였다.

#### 2.1.2 분사 노즐 및 솔레노이드 구동회로

일반적으로 직접 분사식 디젤 기관에는 4-8개의 분사공을 갖는 다공 노즐이 일반적으로 사용되고 있으나, 이러한 형태의 노즐은 중첩되는 분무 형태를 나타내게 되어 분무 형태의 관찰이 곤란하기 때문에 본 실험에서는 노즐 축 방향으로 분사되는 1개의 분사공을 갖는 단공 노즐을 제작하여 사용하였다. 분사공의 지름은 0.2mm이고, 노즐 오리피스부의 무차원 길이(L/D Ratio)는 4이다.

#### 2.1.3 정적 연소실

정적 연소실(Constant Volume Combustion Chamber)은 연료 분사시의 분무 주위 기체 상태를 기관의 압축 조건과 유사한 상태로 만들 수 있도록 고온, 고압의 용기로 제작한 것으로 분사 노즐의 냉각을 고려하여 냉각수 통로가 있는 어댑터를 이용하여 분사 노즐을 정적 연소실에 부착시키도록 하였다. 재질은 연강이고, 내경은

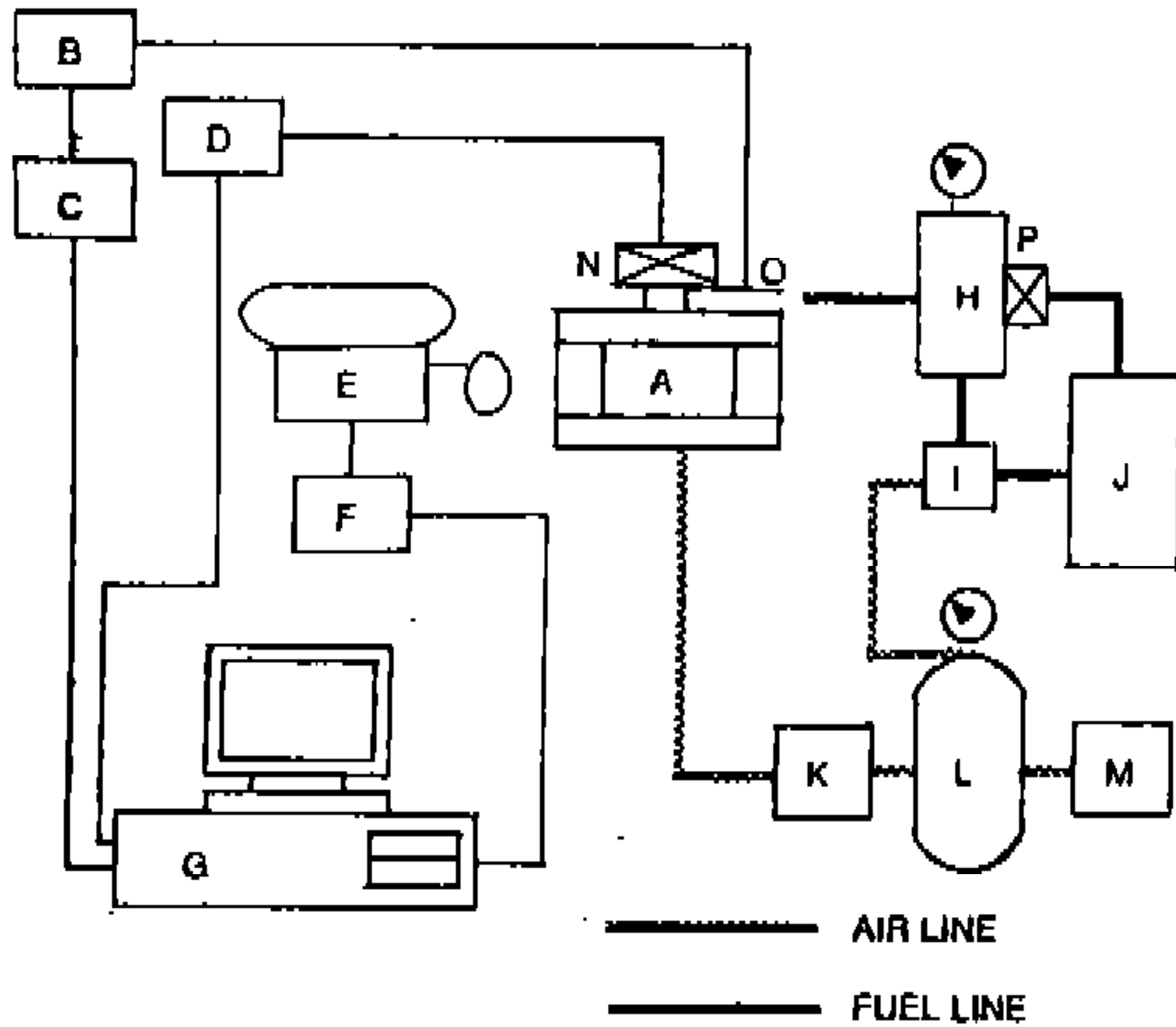
120mm이며, 분무와 연소의 가시화가 가능하도록 정적 연소실 양측에 직경 150mm, 두께 40mm의 석영 가시창(Optical Quartz Window)을 부착할 수 있게 하였으며, 연소실 내부 온도를 700K까지 올릴 수 있는 전열선을 연소실 내벽에 부착하였다.

Fig.1에 실험 장치의 개략도를 나타낸다.

## 2.2 실험 방법

### 2.2.1 증발 분무 실험

증발 분무의 거동을 관찰하기 위해서 분사 압력에 따라 분무실의 온도를 변화시키면서 분무 선단 침투 거리와 분무각, 분무 액주 침투거리를



- A : COMBUSTION CHAMBER
- B : CHARGE AMPLIFIER
- C : A/D CONVERTER
- D : INJECTOR CONTROLLER
- E : HIGH SPEED CAMERA
- F : CAMERA CONTROLLER
- G : HOST COMPUTER
- H : ACCUMULATOR
- I : FUEL PUMP
- J : FUEL TANK
- K : AIR COMPRESSOR 1
- L : AIR TANK
- M : AIR COMPRESSOR 2
- N : INJECTOR
- O : PRESSURE TRANSDUCER
- P : PRESSURE REGULATOR

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

측정하였다. 분무실 내부를 2.0MPa의 질소로 채워넣고, 분무실의 온도를 300K, 470K, 670K로 변화시켰으며, 분무 선단 침투 거리와 분무각을 측정하는데에는 새도우그래프를 이용하였으며, 액체 상태 침투 거리를 측정하는데에는 백 일루미네이션 촬영을 이용하였다. 실험시 고속 카메라의 속도는 4000pps로 하였으며, 흑백 16mm 필름을 이용하였다.

### 2.2.2 정적 연소 실험

정적 연소 실험은 연소실의 내부를 2.0MPa, 670K의 공기로 채워넣고, 분사 압력과 분사량에 따른 연소시의 측정 압력을 통해 착화 지연 시간과 연소 기간을 측정하였으며, 연소 현상을 가시화하는데에는 고속 카메라와 16mm칼라 필름을 사용하였다.

### 2.2.3 연소실 온도 측정

실험초기에 정적 연소실내의 공기온도를 측정하였다. 이를 위하여 예비실험중에 온도의 균일성을 확인하기 위하여 열전대를 세군데 설치하였다. 연료 분무가 이루어지는 분무축 상에서 연소실 중앙부와 벽면에서 10mm 및 30mm 떨어진 곳에서 온도를 측정하였다. 온도 구배는 중앙부와 30mm 부위의 온도는 같은 온도 수준을 나타내고, 벽면에서 10mm 부위의 온도는 중앙부와 7-10K 수준으로 높게 측정되었다. 따라서 온도는 실험중에는 벽면에서 30mm 떨어진 온도를 측정하여 온도를 제어하였다.

## 3. 결과 및 검토

### 3.1 증발 분무

#### 3.1.1 분무 선단 침투 거리와 분무 액주 침투 거리

Fig.2에 분사 압력에 따른 분무 선단 침투 거리를 분사 시작점으로부터의 경과 시간에 대해 나타낸다. 분사 압력이 증가할수록 분무 선단 침투 거리는 증가하는데 20MPa에 비해 40MPa와 60MPa의 차이가 상대적으로 작게 나타나는 것은 분사 노즐의 특성에 기인하는 것으로, 분사 압력이 60MPa 부근에서는 노즐 내부에서 연료가 무화된 상태로 분사되는 것을 알 수 있다.

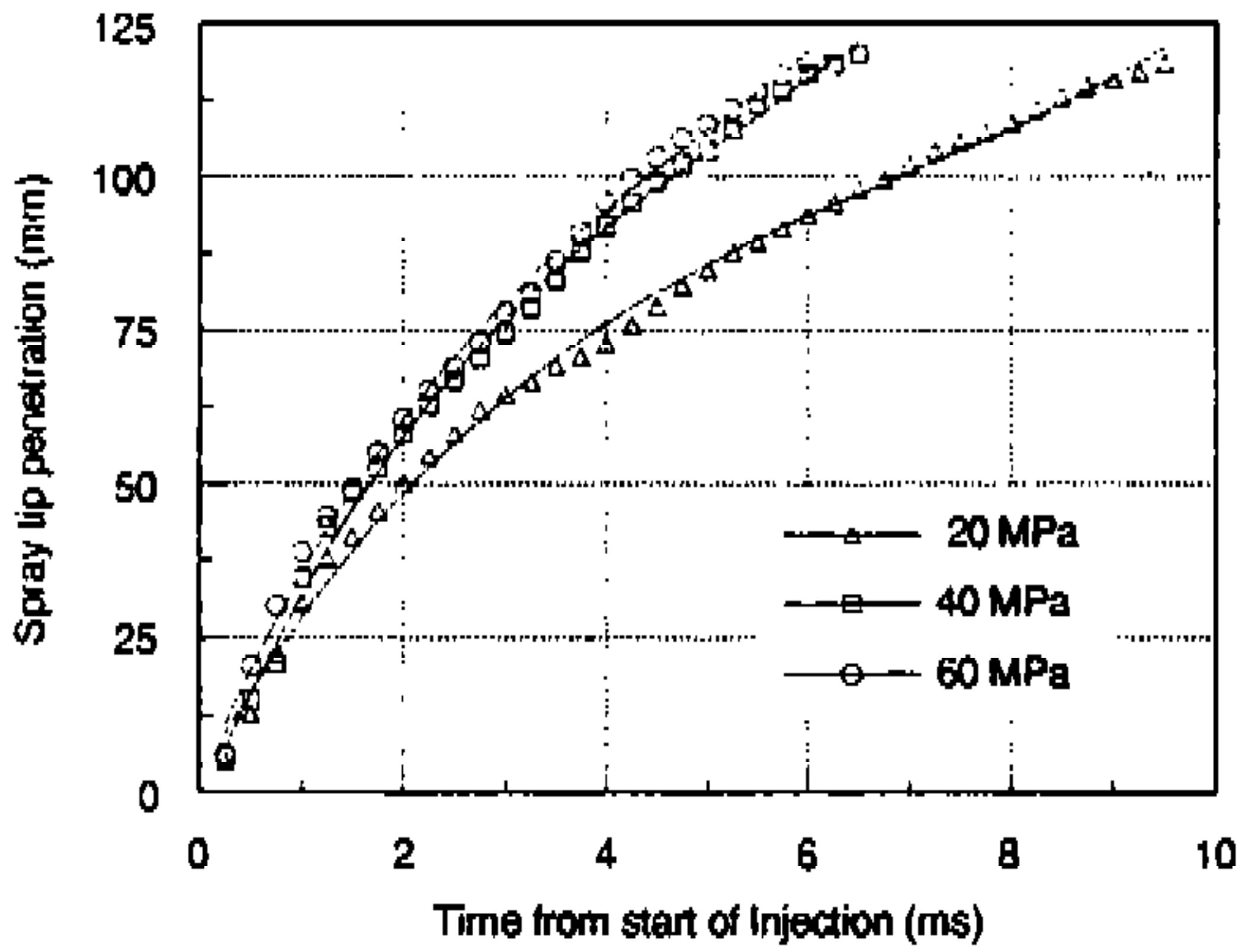


Fig.2 Spray tip penetration injected into nitrogen at 2.0MPa 670K with injection pressure of 20, 40, 60MPa

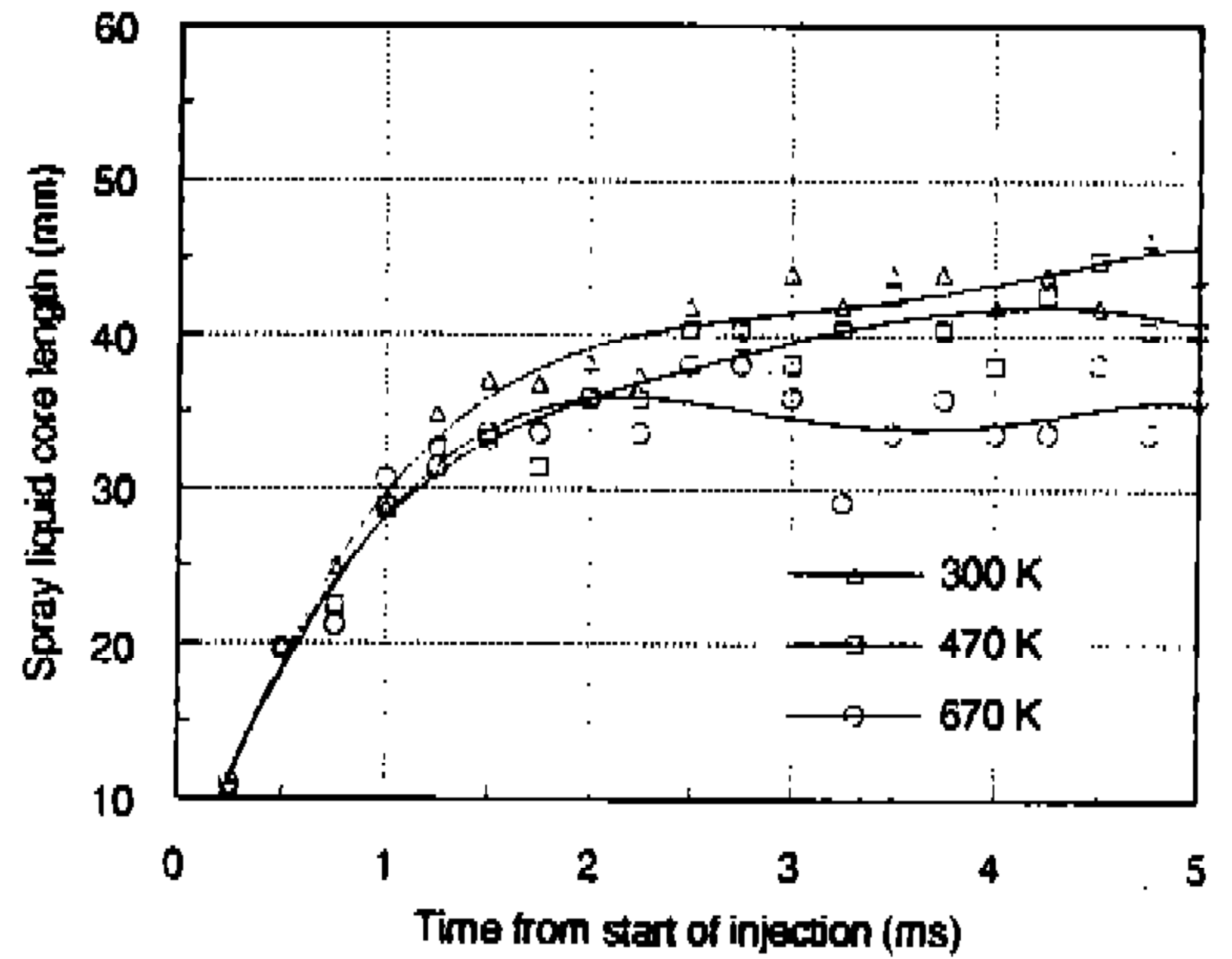


Fig.5 Spray liquid core penetration injected into nitrogen at 2.0MPa, 300K, 470K, 670K with injection pressure 60MPa

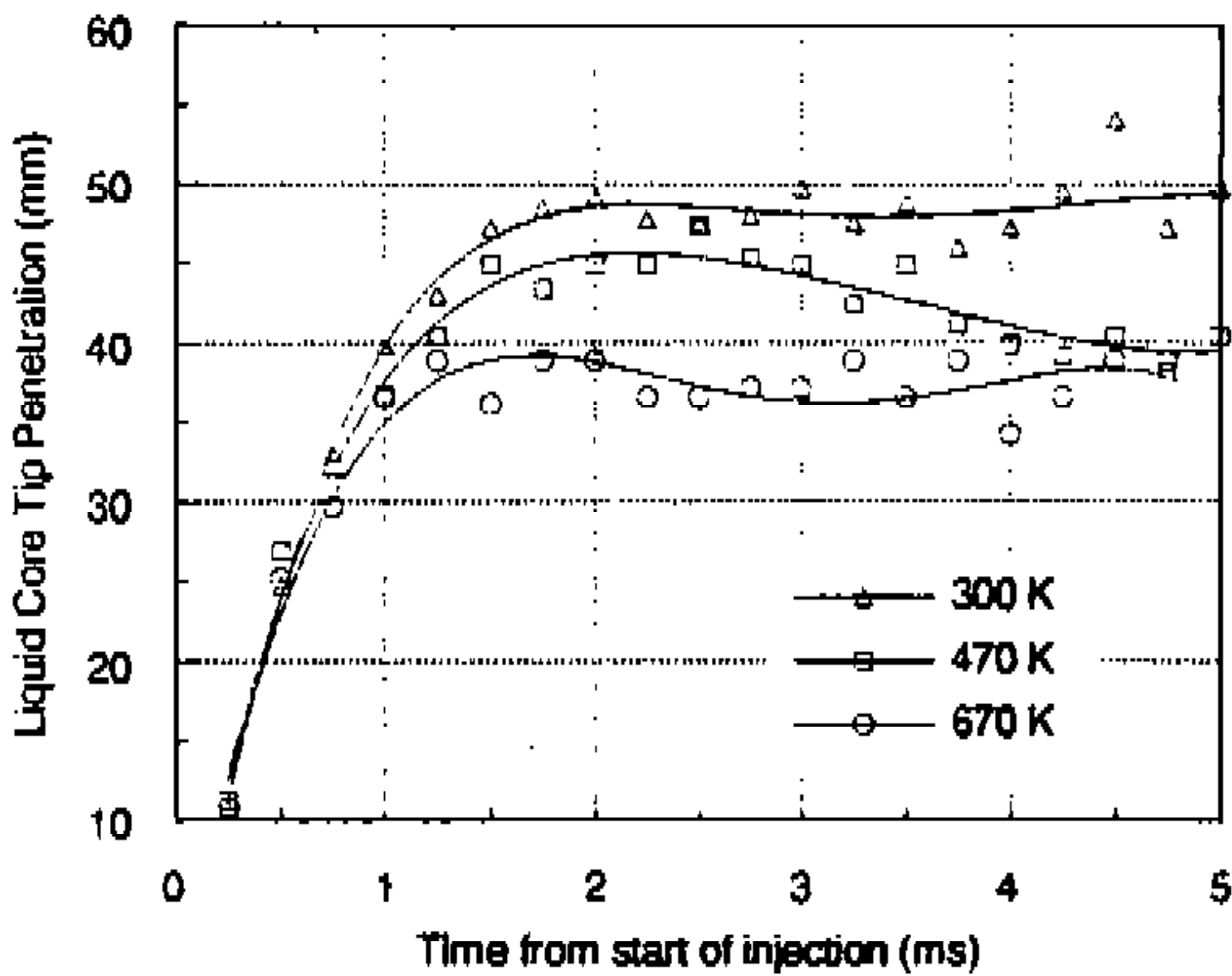


Fig.3 Spray liquid core penetration injected into nitrogen at 2.0MPa, 300K, 470K, 670K with injection pressure 20MPa

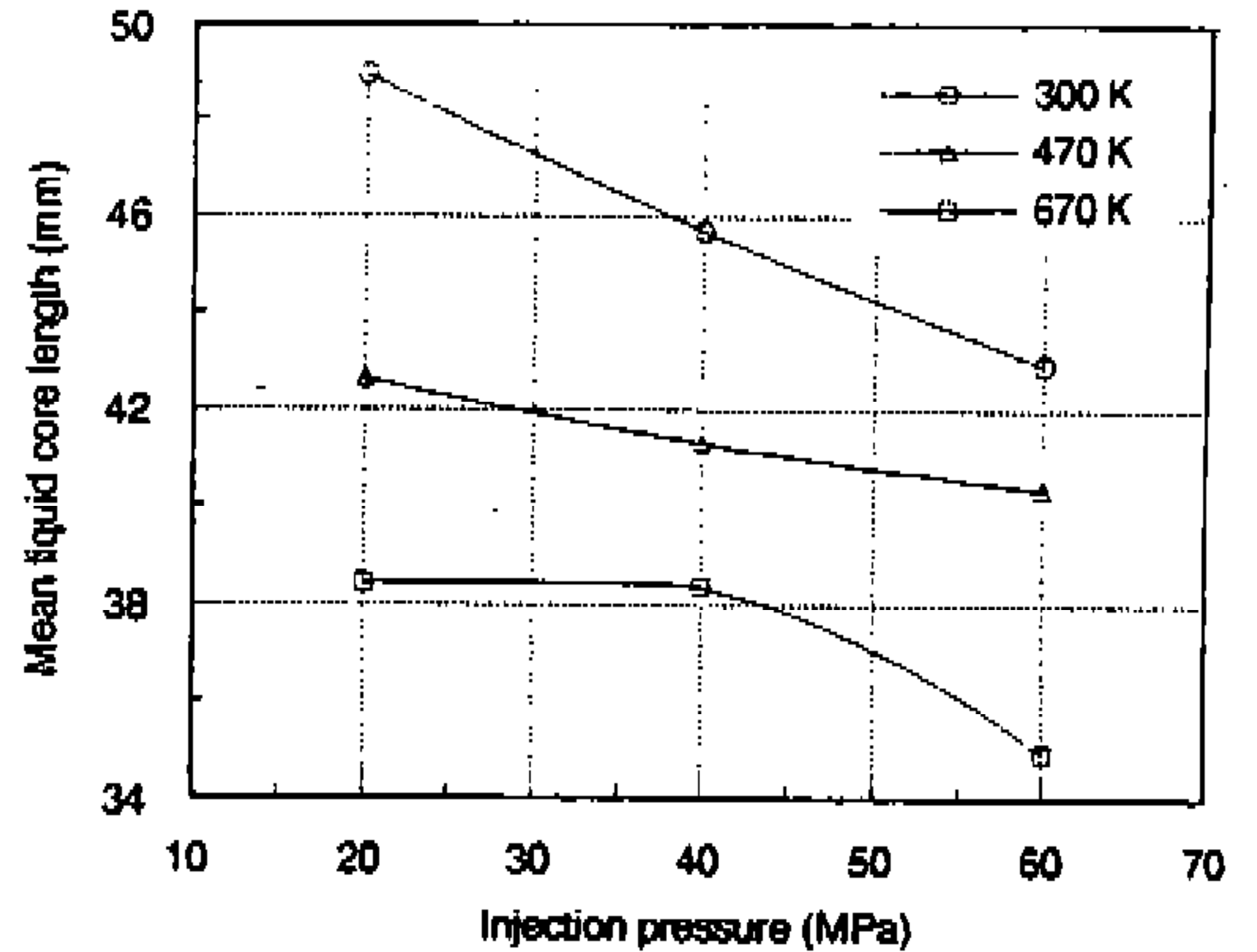


Fig.6 Spray mean liquid core penetration injected into nitrogen at 2.0MPa, 300K, 470 K, 670K

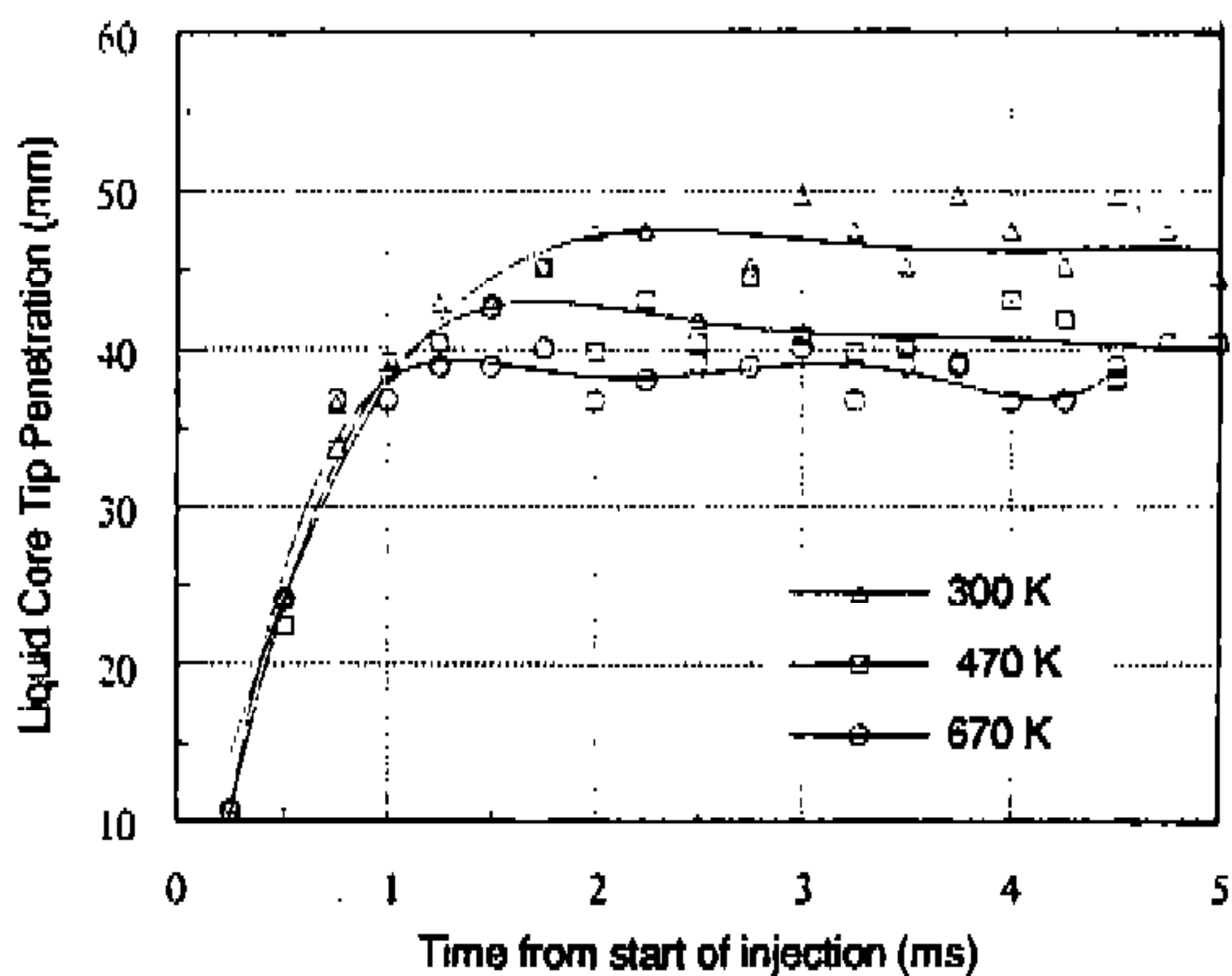


Fig.4 Spray liquid core penetration injected into nitrogen at 2.0MPa, 300K, 470K, 670K with injection pressure 40MPa

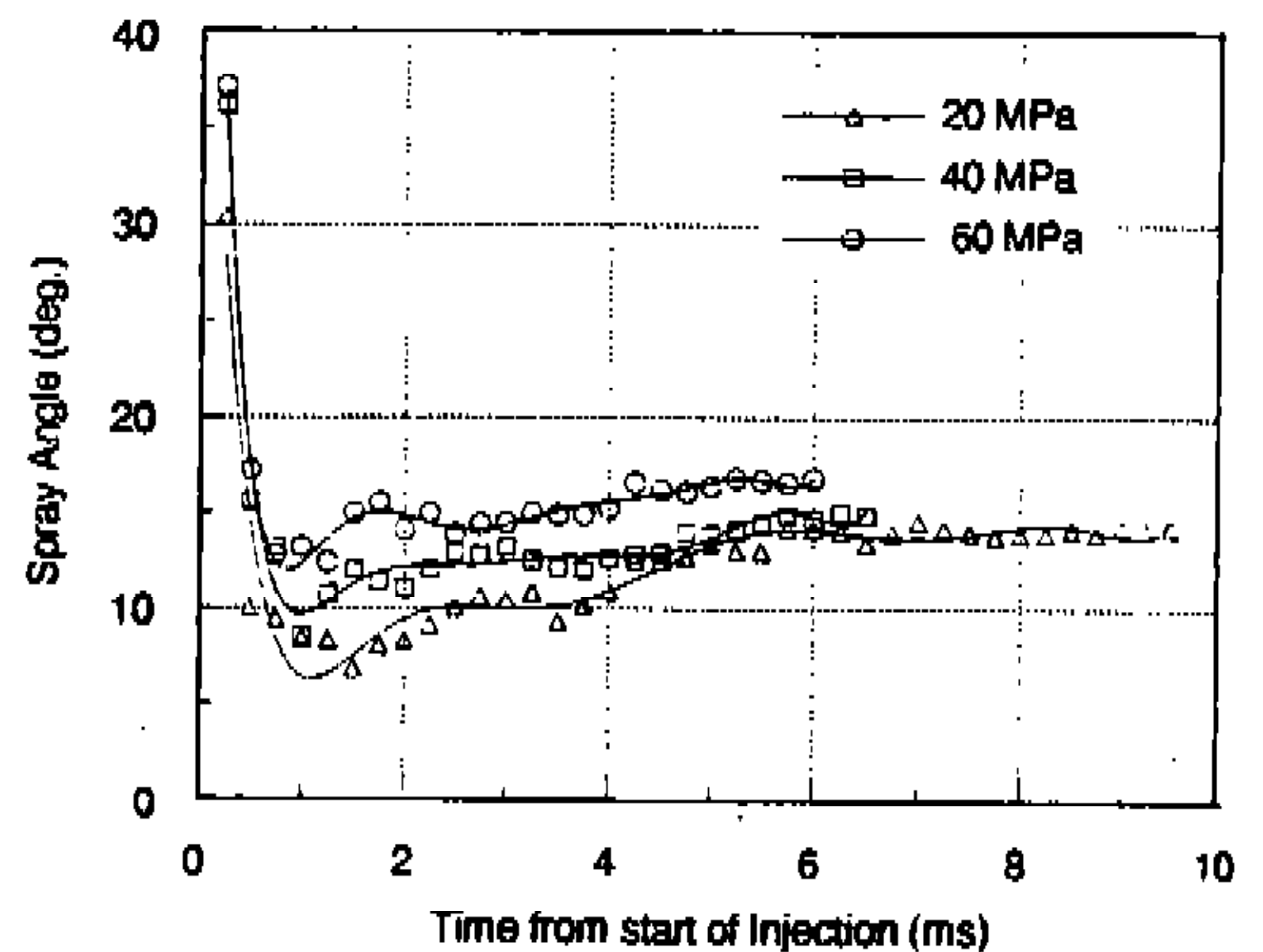


Fig.7 Spray angle injected into nitrogen 2.0 MPa, 670K with injection pressure 20, 40, 60MPa

백 일루미네이션 사진으로는 분무의 액주 부분을 관찰할 수 있다. 각각의 분사 압력과 분무실의 온도에 대하여 분무 액주 침투 거리는 분사 초기에 증가하다가 점차 일정한 값을 갖는 것으로 나타났다. Fig.3-5는 분사 압력이 20, 40, 60MPa인 경우의 분무실의 온도에 따른 분무 액주 침투 거리를 분사 시작점으로부터의 경과 시간에 대하여 나타낸다. 분무실의 온도가 증가함에 따라 분무 액주 침투 거리는 감소하는데 이는 분무실의 온도가 높을수록 분무의 증발이 활발히 일어나기 때문이다. Fig.6은 액주 침투 거리가 준 평형 상태에 도달했을 때의 그 평균값을 분무실 온도에 따라 분사 압력에 대해서 나타낸다. 분사 압력이 증가함에 따라 분무 액주 침투 거리가 감소하는 경향을 보이는데, 이것은 분사 압력이 증가할수록 노즐 내부에서 연료의 무화가 촉진되어서 분사 시에 액주 형태로 존재하는 부분이 짧아졌기 때문이며, 감소하는 정도가 크지 않아서, 분무 액주 침투 거리는 분무실 온도에 지배적이라고 볼 수 있다.

### 3.1.2 분무각 및 분무 체적

분무의 새도우그래프 사진으로 분무각의 변화를 관찰할 수 있다. 분사 초기에는 분무의 길이가 짧고 분무의 형태도 불규칙하기 때문에 정확한 분무각의 측정에 어려움이 있으나 분사 후기에 비하여 대체로 큰 분무각을 가진다. Fig.7에 분사 압력 20, 40, 60MPa인 경우인 분무각을 분사 시작점으로부터의 경과 시간에 대하여 나타낸다. 분사 압력이 증가할수록 분무각은 큰 값을 가지며, 분무각이 준 평형상태가 되는데 걸리는 시간은 분사 압력이 증가함에 따라 짧아진다.

분무 선단 침투 거리와 분무각으로부터 분무 체적을 계산할 수 있다. 분무 체적은 분무 내부로 유입된 공기량과 비례하는 것으로 분무 체적이 커지면 연료와 공기의 양호한 혼합이 이루어져 연소가 원활하게 된다. Fig.8에 분사 압력 20, 40, 60MPa인 경우의 분무 체적을 분사 시작점으로부터의 경과 시간에 대하여 나타낸다. 분사 압력이 증가함에 따라 분무 체적은 증가하여 연소에 유리한 조건을 이루게 되며, 공기이용율 향상에 의한 유해배출물(Soot 등) 저감의 수단이 될수가

있다는 것을 알 수가 있다.

## 3.2 정적 연소

### 3.2.1 연소실의 압력과 열발생률

Fig.9는 공연비가 157이고 분사 압력 20, 40, 60 MPa인 경우의 연소 압력을 분사 시작점으로부터의 경과 시간에 따라, 그리고 연소실 압력 측정값으로부터 계산한 열발생률을 나타낸 것이다. 분사압력을 증가시킬 수록 점화지연기간이 짧아 지는데, 이는 고압화에 따른 분무입자의 미립화의 향상[10]과 더불어 증발율이 촉진되고, 분무체적 증가에 의한 국부 공기이용율이 증가되기 때문이다. 분사율 증가에 따라 열발생률 최대값이 증가하고 연소기간이 짧아져, 기관효율 향상이 기대된다. Fig.10은 공연비가 94.2 일때의 연소실 압력과 열발생률 곡선이고, Fig.11은 공연비가 62.8 일때의 연소실 압력과 열발생률 곡선이다. 공연비 157인 경우와 94.2인 경우를 비교해보면, 분사 압력이 40, 60MPa일때는 두 경우의 압력 상승과 열발생률의 형태가 유사하나 분사 압력이 20MPa일때는 연소 기간이 현저히 증가함을 알 수 있고 또한 열발생률의 형태도 완만하고 그 최대값도 떨어진다. 공연비가 62.8인 경우는 이러한 현상이 분사 압력 20, 40MPa 일때 모두 나타나고, 연소 후기에 기간이 길고 열발생률이

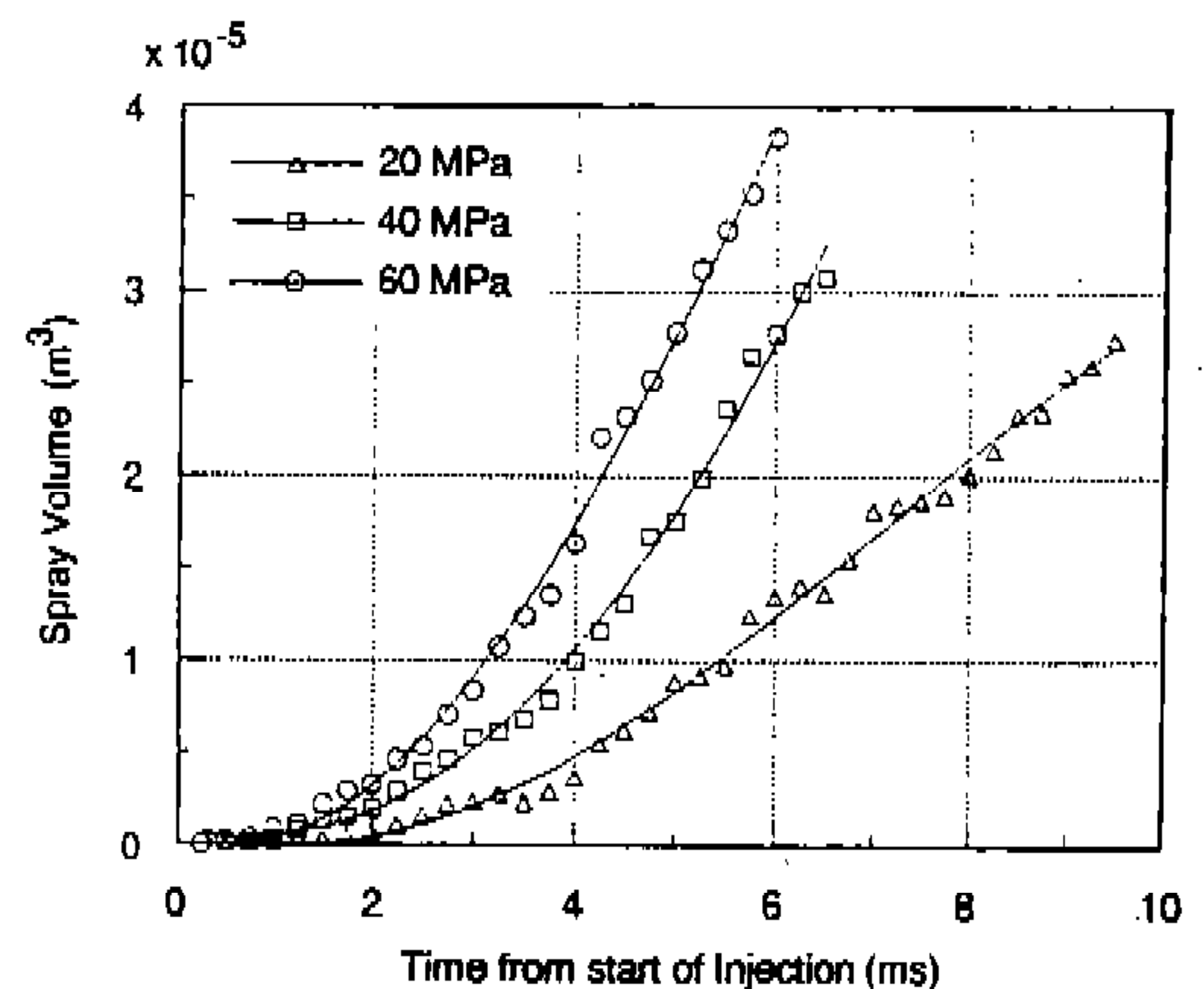


Fig.8 Spray volume injected into nitrogen 2.0 MPa, 670K with injection pressure 20, 40, 60MPa

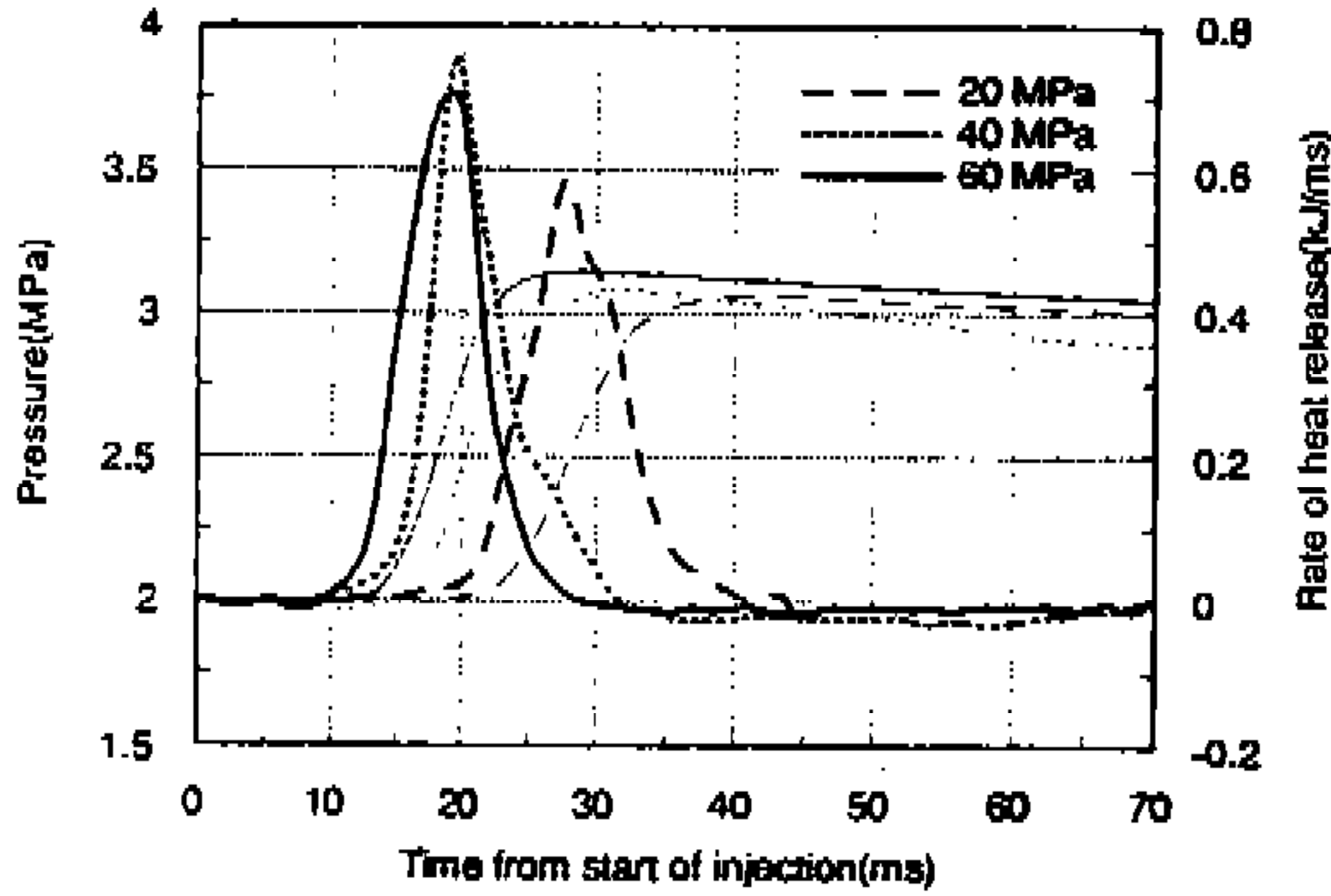


Fig.9 Combustion pressure histories and Heat release diagram with injection pressure 20, 40, 60MPa, A/F ratio 157

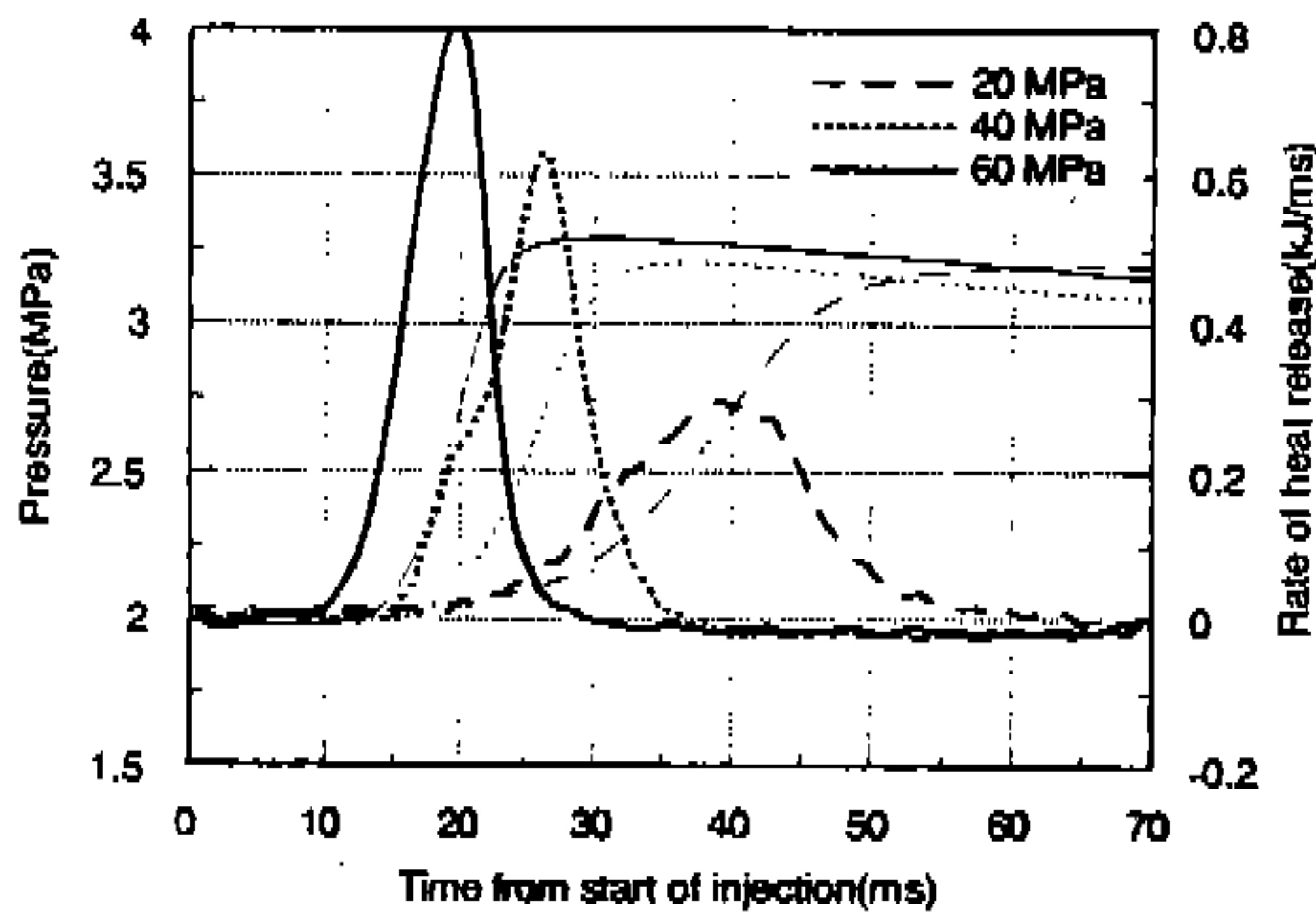


Fig.10 Combustion pressure histories and Heat release diagram with injection pressure 20, 40, 60MPa, A/F ratio 94.2

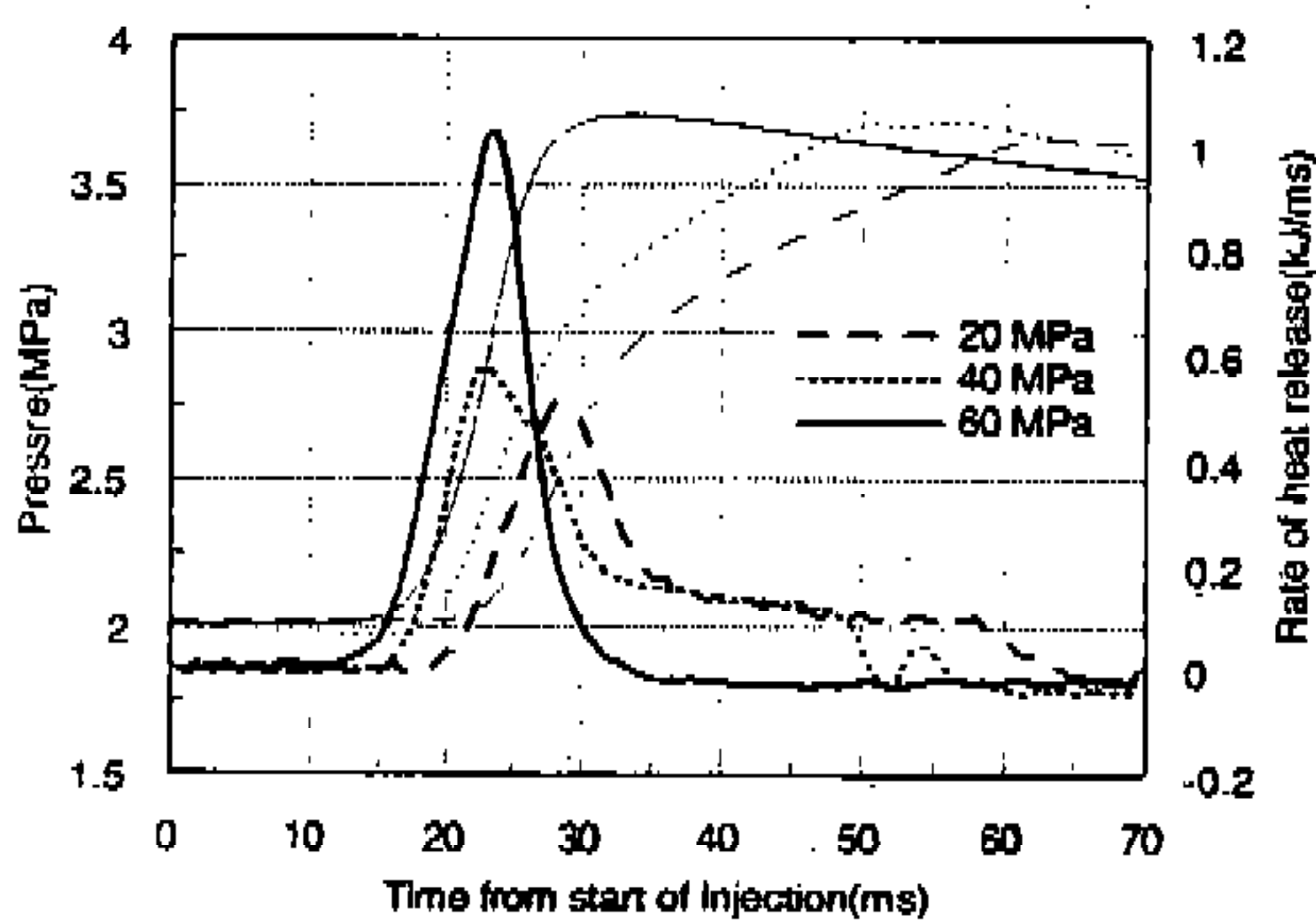


Fig.11 Combustion pressure histories and Heat release diagram with injection pressure 20, 40, 60MPa, A/F ratio 62.8

낮은 2차 연소가 일어남을 알 수 있다. 이는 저 분사율에 기인하는 것으로, 확산연소기간이 지나치게 길게 나타나는 것을 보여주는 것인데, 압축상사점 근처의 극히 제한된 시간에 연소가 이루어져야 하는 디젤기관에 적용될 때, 이러한 경향은 불완전 연소로 인한 유해 배출물의 원인이 되며, 기관 출력의 저하를 유발하게 된다.

### 3.2.2 착화 지연 시간과 연소 기간

디젤 기관에서 착화 지연 시간은 분사 시작점과 연소 시작점 사이의 시간으로 정의된다. 분사 시작점은 일반적으로 인젝터의 니들이 들려지는 시점을 취하는데 반해, 연소 시작점은 정확히 정의하기가 어렵다. 대체적으로 열발생률 곡선이 상승하기 시작하는 시점과 화염사진에서 불꽃이 처음 나타나는 시점등을 취하는데, 지금까지 연구된 결과에 의하면, 불꽃이 처음 나타나는 시점이 열발생률 곡선이 상승하기 시작하는 시점보다 늦어지는 것으로 알려져 있다.<sup>4)</sup> 본 연구에서는 분사 시작점은 인젝터의 니들이 들려지는 시점으로 하였고, 연소 시작점은 연소실의 압력이 최대 증가값의 5% 증가하는 시점과 열발생률 곡선의 5% 증가시점의 평균값을 취하였다.

Fig.12는 공연비에 따른 착화 지연 시간을 분사 압력에 대해서 나타낸다. 각각의 공연비에 대하여 분사 압력이 증가할수록 착화 지연 시간이 짧아지며 이는 질소 산화물의 주 생성영역인 예혼합 연소 기간을 단축하여 유해배출물인 질소 산화물의 저감수단으로 고압분사화를 기대할 수 있으며, 공연비가 감소할수록 착화 지연시간이 길어지는 경향이 나타난다. Fig.13은 공연비에 따른 연소 기간을 분사 압력에 대해서 나타낸 것이다. 착화 지연 시간과 마찬가지로 분사 압력이 증가할수록 연소 기간은 짧아지고, 공연비가 감소할수록 연소 기간이 증가하는 경향이 나타나는데, 분사 압력이 20MPa 일때는 공연비가 157에서 94.2로 감소했을 때 연소기간이 크게 증가하고, 분사 압력이 40MPa 일때는 공연비가 94.2에서 62.8로 감소했을 때 연소 기간이 크게 증가하다.

이러한 착화 지연 시간과 연소 기간의 분사 압력에 따른 특성은 고온, 고압에서의 분무의 거동과 직접적인 관련이 있는데, Fig.8에서 알 수

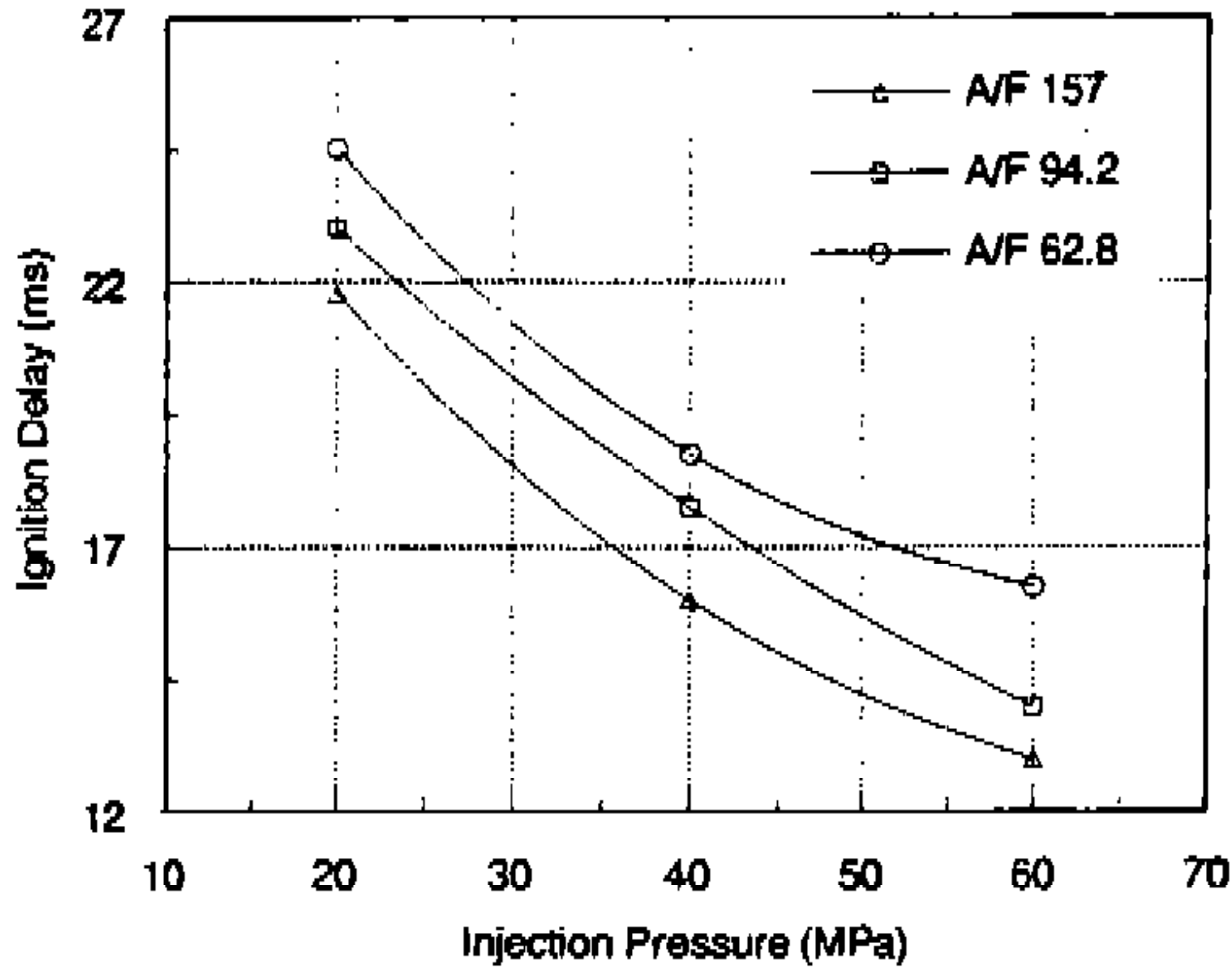


Fig.12 Ignition delay with A/F ratio 157, 94.2, 62.8 plotted against injection pressure

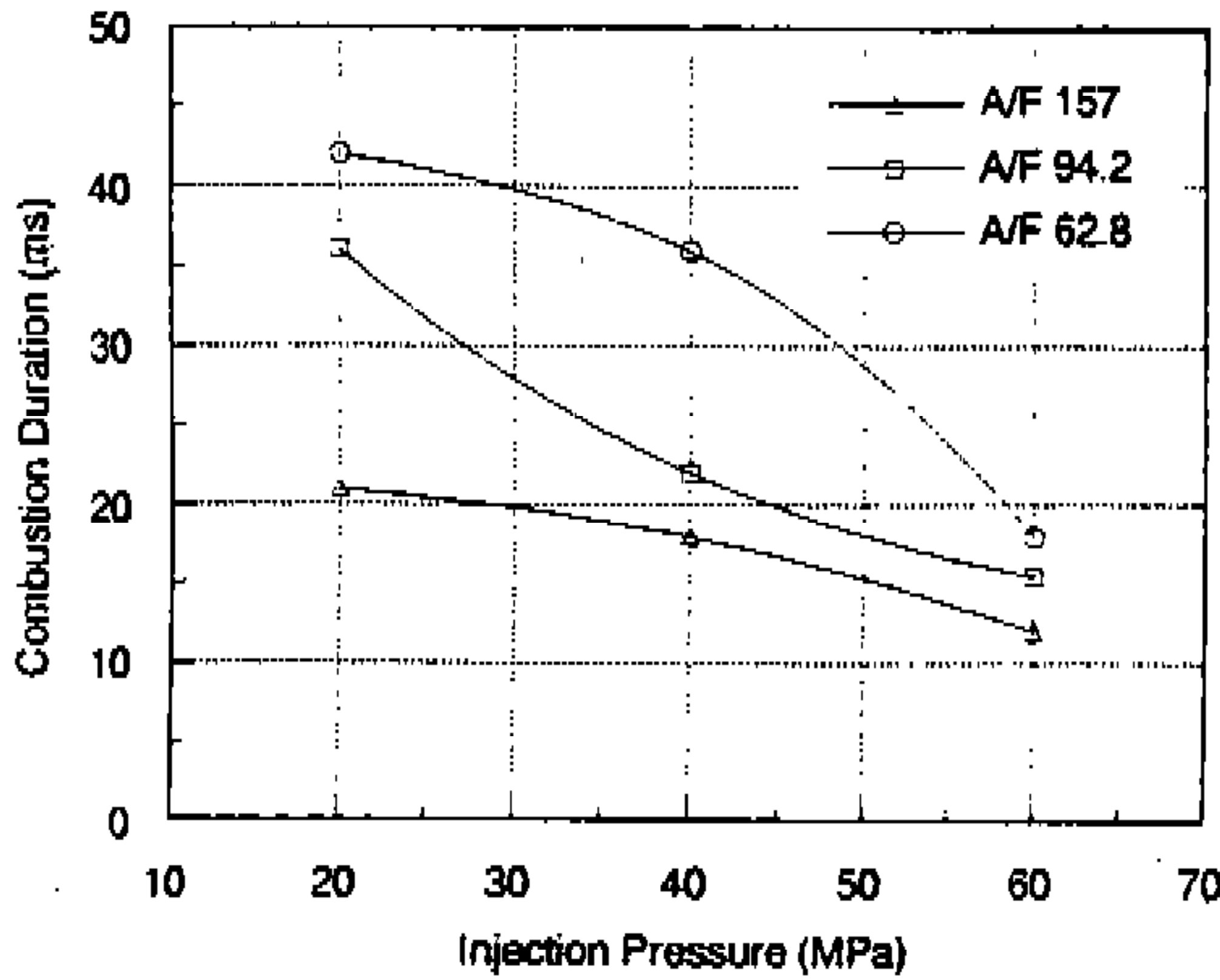


Fig.13 Combustion duration with A/F ratio 157, 94.2, 62.8 plotted against injection pressure

있듯이 분사 압력이 증가함에 따라 분무 체적이 증가하여 연료의 공기 이용률이 향상됨에 따른 양호한 연소 조건을 반영한 것이라 볼 수 있다.

연소실 압력과 열발생률, 착화 지연 시간, 연소 시간 등의 결과로부터 유추해 볼 때, 각각의 분사 압력에 따라 열발생률이 높고 연소 시간이 짧은 연소 특성을 나타낼 수 있는 분사량에 임계점이 존재하며, 그 분사량의 임계값은 분사 압력이 증가함에 따라 늘어남을 알 수 있다. 또한 분사량이 일정할 때는 분사 압력이 높을수록 착화

지연 시간이 짧아지고, 분사율 증가에 따라 열 발생률과 연소시간이 짧은 연소 특성을 가지게 된다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

직접 분사식 디젤 기관에 고압 분사 방식을 적용하기 위한 기초 연구로서 정적 연소실을 제작하여 증발 분무와 연소 특성을 해석하였고, 증발 분무의 분무 선단 침투 거리와 분무 액주 침투 거리, 분무각, 분무 체적 등과 연소시의 압력과 열발생률, 착화 지연 시간, 연소 시간 등에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 분사 압력 증가는, 분무 체적의 증가를 야기시키고, 이는 곧 국부공기 이용률 증대시켜, 유해 배출물 감소 수단이 될 수 있다.
- 2) 분무실의 온도를 증가시킬수록, 그리고 분사압력을 고압화시킬수록, 증발이 촉진되어 분무 액주 침투 거리가 감소하게 되며, 분무실의 온도가 더 큰 영향인자가 된다.
- 3) 분사 압력을 증가시킬 수록 증발율이 촉진되어 착화 지연 시간이 짧아지기 때문에 질소산화물 저감의 대책수단이 될 수가 있으며, 평균 공연비가 낮을수록 착화 지연 시간은 길어진다.
- 4) 분사율의 증가는 최대 열발생율을 증가시키고, 연소시간이 짧아져, 기관의 연소 효율의 향상을 이룰 수가 있다.

#### 후 기

본 연구는 국방과학연구소에서 지원한 기초연구사업의 연구결과이며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. T.W.Ryan, III and B. Stapper, "Diesel Fuel Ignition Quality as Determined in a Constant Volume Combustion Bomb", SAE Paper 870586, 1987.

2. T.W.Ryan, III and T.J.Callahan, "Engine and Constant Volume Bomb Studies of Diesel Ignition and Combustion", *SAE Paper* 881626, 1988.
3. H.Hiroyasu, T.Kadota and M.Arai, "Fuel Spray Characterization in Diesel Engines", *Combustion Modeling in Reciprocating Engine*, Edited by J.N.Mattavi, Plenum Press, 1980.
4. J.B.Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill, 1989.
5. T.Kamimoto, H.Yokota and H.Kobayashi, "Effect of High Pressure Injection on Soot Formation Processes in a Rapid Compression Machine to Simulate Diesel Flames", *SAE Paper* 871610, 1987.
6. K.S.Varde and D.M.Popa, "Diesel Fuel Spray Penetration at High Injection Pressures", *SAE Paper* 830448, 1983.
7. W.Merzkirch, *Flow Visualization*, Academic Press, 1974.
8. Y.Won, T.Kamimoto, H.Kobayashi and H.Kosaka, "2-D Soot Visualization in Unsteady Spray Flame by means of Laser Sheet Scattering Technique", *SAE Paper* 910223, 1991.
9. 장근석, "디젤 기관의 연료 분사압과 노즐 형상에 따른 분무 특성에 관한 연구", 서울대학교 대학원 석사학위 논문, 1992.
10. 지요한, "디젤 분무의 거동 및 분무 입경 분포에 관한 연구", 서울대학교 대학원 박사학위 논문, 1993.