

## 정적 연소실 내에서의 2유체 가솔린 분사기의 착화 특성에 대한 실험적 연구

### An Experimental Study on The Ignition Characteristics of an Air-Assisted Gasoline Injector in a Constant Volume Combustion Chamber

이 용 표\*, 김 승 수\*\*  
Y. P. Lee, S. S. Kim

#### ABSTRACT

The objective of this study is to determine the ignition feasibility of a single shot, air-assisted gasoline fuel injector operated in a constant volume combustion chamber under atmospheric condition. A number of parameters has been selected for this experiments, such as dwelling time, spark gap position( $r, z$ ), spark electrode geometry, supplied air and fuel masses and spray cone deflector angle.

On-site visual inspection of the instantaneous flame glow was chosen as one way to judge the successful ignition. In addition, chamber pressure and occasional photography were mobilized as for data recording. It was clearly observed that there was an entrainment air-fuel mixture toward spray axis from the spray formation and its development later on. The optimum ignition conditions were found for those parameters given above.

#### 1. 서 론

4행정기관과 비교하여 재래식 2행정 기관은 높은 비출력, 적은수의 부품 및 간단한 구조, 펌프일과 마찰손실의 감소 등 여러가지 장점을 가지고 있다. 이에도 불구하고 Short-Circuiting(소기과정중의 흡입혼합기의 직접 배출)으로 인한 배기가스와 높은 연료소비율이 문제가 되어 자동차용 엔진으로 별로 이용되지 못하고 있다. 최근들어 강화되는 각국의 공해규제로 더욱 불리해진 것이 사실이다.

이를 극복하기 위한 방법으로 DISC(Direct-Injection Stratified-Charge) Type에 의한 연

소방식이 관심을 끌게 되었다. 이 연소방식은 Short-Circuiting에 의한 문제를 해결할 수 있을 뿐 아니라, 연소성능이 연료의 특성에 덜 민감하여 Knocking의 위험없이 희박연소가 가능하여 압축비를 높임으로서 열효율을 향상시킬 수 있고, 분사연료량의 조절로 기관의 부하를 제어하여 펌프손실을 최소화할 수 있는 등의 장점을 가지고 있다. 그러나 이 연소방식도 미연 탄화수소의 증가, 고부하시 성층연료의 불완전 혼합에 의한 매연의 발생, 불완전한 착화점화 등의 문제를 안고 있다.

최근 기존 Injector가 가진 문제점들을 2유체 분사기(Air-Assisted Fuel Injector,

\* 한국과학기술원 기계공학과

\*\* 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

AAFI)를 써서 보완하고 이를 DISC의 형태로 2행정기관에 적용하고자 하는 시도가 각국에서 활발히 진행되고 있다.

2유체 분사기(AAFI)는 연속분사의 형식으로는 항공기의 가스터빈 등에 예전부터 활용되어 오고 있다. 이를 자동차 엔진에 적용하여 단속적인 분사목적으로 사용이 시도된 것은 최근의 일이다. 지금까지 가솔린기관용으로 몇가지의 AAFI가 보고되었다.<sup>1~9)</sup> 발표된 AAFI의 설계상의 주요한 차이로는 압축공기의 공급원으로 어떤 방식이 채택되느냐 하는 점이고 이들은 모두 포펫이나 밸브를 사용해야 하기 때문에 Hollow-Cone Spray를 형성하는 공통점을 갖고 있다.<sup>8)</sup> 요즘 들어 이들의 세부적인 분사특성이 발표되고 있다.<sup>6,9)</sup>

본 실험에서는 당 Lab에서 제작된 AAFI의 분사특성을 정적연소실에 적용, 조사함으로써 점화를 거시적으로 이해하려고 노력하였다.

## 2. 실험장치의 구성

### 2.1 2유체 분사기 (Air-Assisted Fuel Injector, AAFI)

연소특성 파악을 위해 본 실험에서 사용한 AAFI의 전체적인 형태는 그림 1과 같다. 이미 발표된 여러 분무기들과 같이 포펫은 원

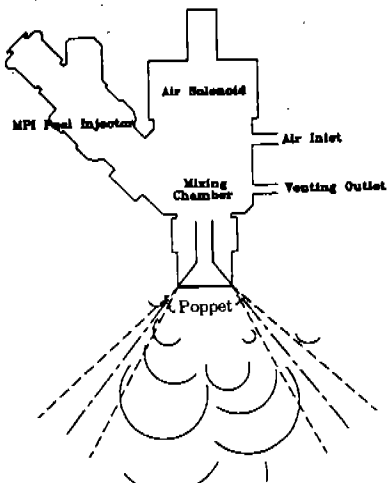


Fig.1 Schematic diagram of air-assisted gasoline injector

추(Cone) 형태이다.

MPI Injector가 연료의 정확한 계량을 위해 사용되었고 공기량의 제어에는 DC 솔레노이드(Lucas Ledex Co.)가 사용되었다. 연료 쪽엔 5기압 그리고 공기에는 9기압의 공급 압력을 유지시켰다. 분사기를 구동시킬 때 연료와 공기의 후방압력이 다르므로 MPI Injector 쪽에서의 역류를 방지하기 위해서 연료의 공급이 끝나는 시기에 공기의 공급이 시작되도록 하였다. 따라서, 혼합실(Mixing Chamber)안에 우선 연료가 분사된 후 곧이어 공기가 공급되어 연료와 섞이게 되고 이 공기압으로 포펫이 열리면서 연소실 내부로 Hollow Cone 형태로 분사된다.

### 2.2 정적 연소실 (Constant Volume Combustion Chamber)

그림 2는 위의 AAFI 장치의 착화특성을 파악하기 위해 제작된 정적 연소실이다. 이 연소실은 연소의 가시화를 위하여 전후의 양벽을 열처리한 강화유리로 설치하였다.

연소실 내부에서의 형성된 화염의 전체적 경계를 파악하기 위해서 그림 3의 방법으로 사진을 찍었고, 외부로부터 스파크의 위치를 조정할 수 있도록 점화전극의 위치를 미세조정할 수 있는 장치를 마련하였다. 연소실의 소기는 압축공기를 이용하였다. 연소압력변화를 측정하기 위해서 압전형(Kistler Co.)의 압력 센서를 사용하였다.

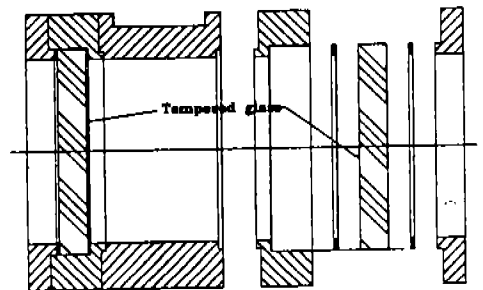


Fig.2 Structure of constant volume combustion chamber

정적연소실의 제원은 다음의 표와 같다.

Table 1 Design specification of tested constant volume combustion chamber

Material	High Pressure Steel Pipe
Volume	0.001056 m <sup>3</sup>
Outer Diameter	188mm
Inner Diameter	116mm
Thickness	36mm
Length	182mm

앞의 장치들의 전체적인 배치모양은 그림 4와 같다.

### 3. 실험결과

연소실험은 분사의 전체적인 형상과 공급공기량에 따른 분무의 특성변화를 개략적으로

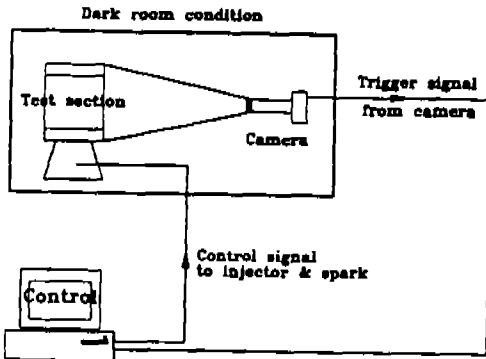


Fig.3 photographic layout for maximum flame speed

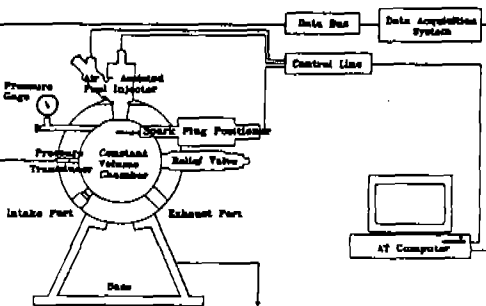


Fig.4 AAFI Ignition test layout in a constant volume combustion chamber

파악하는 것으로 시작되었다. 이어서 점화시기를 변화시켜 스프레이가 분사되기 시작하는 시간과 점화 전극에 스파크가 형성되는 시간차인 Dwelling Time에 따른 점화의 차이를 관찰하였다. 점화 위치변화가 착화에 주는 영향과 점화전극의 형상차이에 의한 효과도 조사하였다. 공급되는 공기의 양에 따른 점화의 성향을 관찰하였으며 저부하의 연료조건에서 Deflector를 사용하였고 이에 의한 스프레이 형태와 착화성능의 변화를 알아보았다. 전체적인 착화실험은 초기온도는 293K(상온), 초기압력은 1atm의 조건에서 수행하였다.

### 3.1 스프레이의 분무형태 관찰

그림 5(a)는 연료 20.8 mg와 공기 18.8 mg를 분사시켰을 때 시간에 따른 분무의 형태를 Shadow-Graph의 기법으로 사진에 담은 것이다. 포켓의 Cone은 분사기 축을 중심으로 84°의 분무각으로 혼합기를 방출한다. 이와같은 초기형태에도 불구하고 곧이어 스프레이의 선단부터 분사기의 축방향으로의 혼입(Entrainment)이 활발하게 일어나 종형(Bell Shape)의 분무형태로 천이되는 것을 관찰할 수 있다. 그림 5(b)에서 공급공기량만을 28.9mg로 늘렸을 때 Bell의 내경이 커지고(1ms의 사진을 참조) 혼입에 소요되는 시간도 커지게 된다. 두 사진상으로는 위 내용들의 확연한 판단은 힘들며 큰 속도차이는 없는 것으로 보인다.

### 3.2 점화에 미치는 Dwelling Time의 효과

Dwelling time( $t_d$ )이란 이미 언급한 바와 같이 스프레이가 분사되기 시작하는 시간과 점화전극에 Spark가 발생하는 시간차를 말한다. 공기 솔레노이드를 구동하는 신호의 길이에 따라 포켓이 작동하는 기간이 달라진다. 일관성을 유지시키기 위해서 공기 솔레노이드의 구동신호가 끝나는 시간을 영점(zero point)으로 하여 Dwelling time을 계산하였다. 실제로 포켓은 이 시기보다 약 0.5ms 앞서 열리기 시작한다.

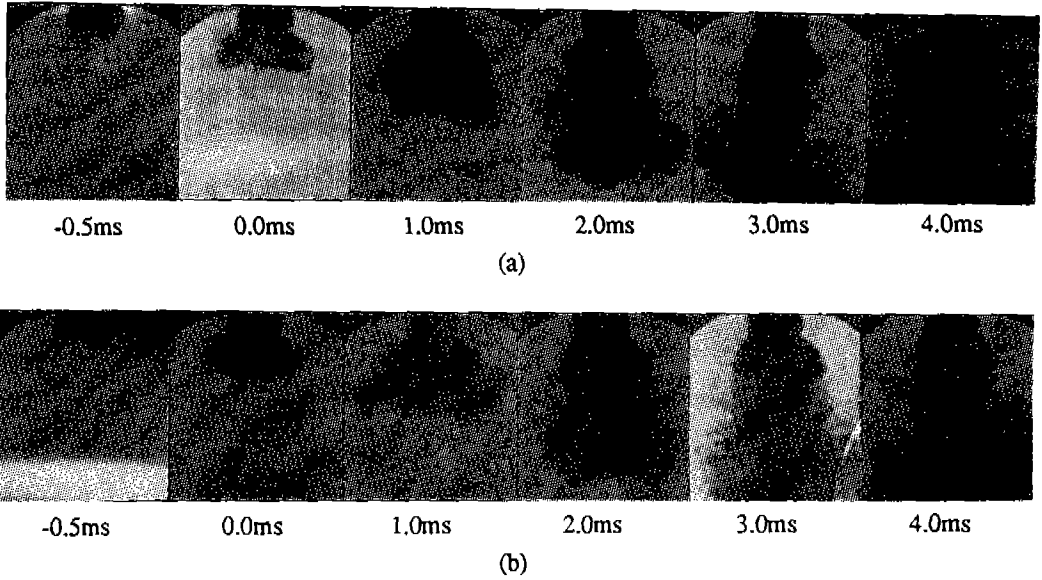


Fig.5 Sequential air-assisted injection spray photography, time is counted from end of air-solenoid trigger signal (a) fuel: 10.5 mg, air: 18.8 mg, (b) fuel: 10.5 mg, air: 28.9 mg

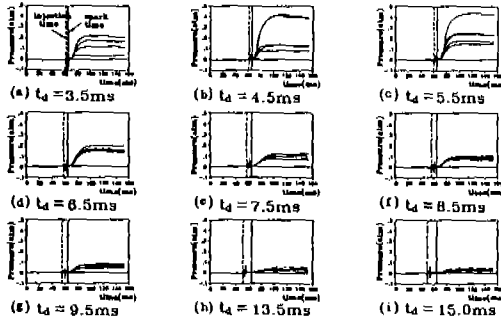


Fig.6 Combustion chamber pressure traces and its test-to-test variations recorded under various dwelling times, spark position at  $r=0$  mm,  $z=19$  mm, fuel: 20.8 mg, air: 18.8 mg,  $t_d$  is dwelling time

그림 6은 3.5 ms 부터 15.0 ms 까지의 Dwelling time에서 착화 및 부분적인 연소가 항상 이루어짐을 보여준다. 그림 7은 이때 착화된 화염의 전체적인 모습을 보여주는 것으로 그림 3에서와 같은 압실조건에서 찍은 것이다.

그림 6에서 4.5 ms ~ 6.5 ms의  $t_d$  사이에서 가장 양호한 착화가 이루어짐을 알 수 있

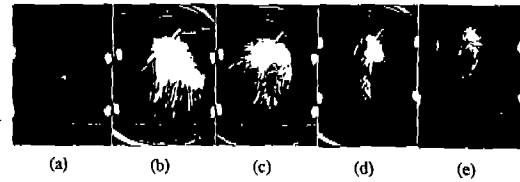


Fig.7 Flame was taken in constant volume chamber with B-shutter under dark room condition. Therefore, this picture shows maximum flame spread. Spark at  $r=0$  mm,  $z=19$  mm, fuel: 20.8 mg, air: 18.8 mg. (a)  $t_d=3.5$  ms (b)  $t_d=6.5$  ms (c)  $t_d=7.5$  ms (d)  $t_d=9.5$  ms (e)  $t_d=13.0$  ms

으며 이 기간은 시험된 가연기간( $t_d=3.5$  ms ~ 15 ms)의 초기에 해당된다. 이 시기는 그림 5의 분무형태로부터 볼 수 있듯이 분사된 스프레이의 선단이 통과한 후 약 4 ms ~ 6 ms 사이이다. 여기서 양호한 착화시에도 압력측정치의 시험편차가 나타나는 것을 볼 수 있는데 이는 SI 기관의 특징인 전극 사이에서 형성되는 화염핵의 사이클간의 변화(cyclic variation) 때문인 것으로 생각된다. 본 분사기는 공급된 연료가 거의 분무초기에 집중되어

분사되기 때문에 분무선단의 혼합기의 농도는 매우 높을 것으로 생각되며, 유동속도는 약 16m/s 정도의 큰 값을 갖기 때문에 착화에 적합하지 않은 것으로 보인다. 상대적으로 분사기간의 중, 후반(가연  $t_d$  중의 초기에 해당)에는 연료/공기 등가비 (fuel/air equivalence ratio)인  $\phi$  값이 줄어들고 속도도 감소되므로 가연의 혼합기 상태가 만들어짐이 예상된다.

지금까지의 해석에 근거하여 여러가지의 시험조건에서 점화상태를 압력곡선으로 비교하고자 할 때 Dwelling time은 각 조건이 조성하는 가연시간대의 초기값을 취하여 사용하였다.

### 3.3 스파크 위치의 영향

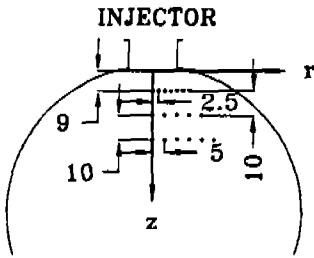


Fig.8 Tested spark position

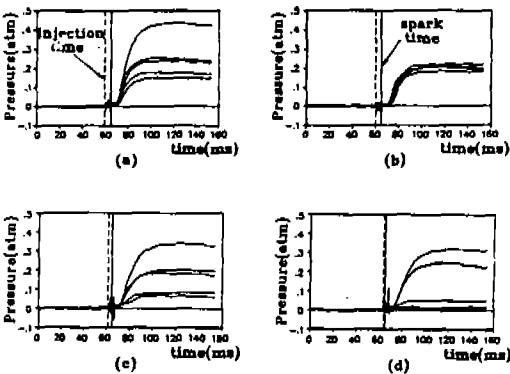


Fig.9 Combustion chamber pressure data for various  $r$ -positions,  $z = 19$  mm, fuel : 20.8 mg, air : 18.8 mg,  $t_d$  is dwelling time. (a)  $r = 0$  mm,  $t_d = 5.5$  ms (b)  $r = 5$  mm,  $t_d = 5.0$  ms (c)  $r = 10$  mm,  $t_d = 3.5$  ms (d)  $r = 15$  mm,  $t_d = 1.5$  ms

그림 8에서와 같이 포켓의 축방향인  $z$  방향과 이와 직각인  $r$  방향에 대한 착화의 효과를 알아보았다. 그림 9, 10은 이 두 방향에 대한 결과를 보여준다.

두 그림의 결과로는  $r = 0 \sim 5$  mm,  $z = 19$  mm의 부근이 점화에 유리한(안정된 점화초기압력) 위치임을 알 수 있지만 이는 공급공기가 달라지면 Spray의 Entrainment정도가 틀려지므로 이에 따라 최적점도 이동할 것이므로 위치에 대한 종합적인 결과는 분사기에 대한 더많은 실험을 통한 무차원 변수의 도출에 의존해야 할 것이다.

### 3.4 스파크 간극 설치 형상의 효과

스프레이의 유동방향과 스파크 간극의 기하

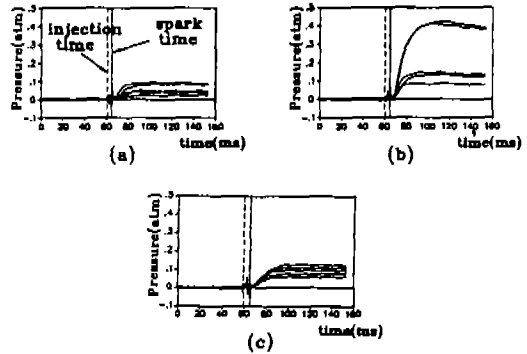


Fig.10 Combustion chamber pressure data under various  $z$ -positions,  $r = 0$  mm, fuel : 20.8 mg, air : 18.8 mg,  $t_d$  is dwelling time. (a)  $z = 9$  mm,  $t_d = 4.0$  ms (b)  $z = 19$  mm,  $t_d = 4.5$  ms (c)  $z = 29$  mm,  $t_d = 5.5$  ms

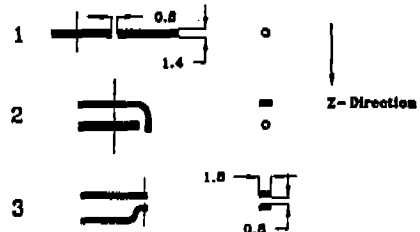


Fig.11 Spark electrode geometry: "z" is spray axis

학적인 배치가 점화에 미치는 영향을 알아보기 위하여 그림 11의 세가지의 점화전극으로 실험하였다. 2번형태는 일반적인 가솔린 엔진용의 전극이고 3번 형태는 고압의 단상 분사기를 DISC 기관에 사용할 경우 유동을 차단하는 Blocking 효과로서 전극의 후면에 가연영역을 만들 목적으로 사용되었던 형태다.<sup>12)</sup>

이들 3가지의 전극을 연료 20.8mg로 만든 혼합기 분무의 연소에 사용한 결과 1형태만이 착화 가능하였고, 나머지 두가지의 형태는 점화에 실패하였다. 이에대한 이유로는 2, 3의 전극의 Blocking 효과가 본 실험에 사용한 AAFI의 유동조건에는 바람직하지 못한 방향으로 작용한 결과라고 평가된다.

따라서, 본 실험의 모든 착화실험 결과는 1형태의 전극에 의한 것이다.

### 3.5 공급 공기량

연료량을 20.8mg으로 하고 9.39mg, 18.8mg, 28.9mg의 값으로 공기량을 변화시켰을 때 마지막 경우인 28.9mg에서 또, 연료량을 10.5mg으로 하고 9.39mg, 13.5mg, 18.8mg, 24.8mg, 28.9mg의 값으로 공기량을 변화시킨 경우 24.8mg 이상에서 각각 착화에 실패하였다. 이 두 경우에서 공기량이 많을 경우에 점화가 안되는 까닭은 혼입에 의한 종형(Bell shape)이 길어져서 스파크 간극의 위치가 최적착화 지점에서 벗어나기 때문이라고 생각된다.

### 3.6 공급 연료량

정적 연소실내에 갇혀진 303.7mg의 공기량을 기준으로 연료/공기 등가비(fuel / air

equivalence ratio)  $\phi = 1, 1/2, 1/4$ 인 세가지의 공급연료량에 대하여 점화를 시도하였다.  $\phi = 1/4$ (연료량 5.2mg)에서 모든 영역에서 점화시키는데 실패하였으며 이 경우의 착화를 위해 다음의 Deflector가 필요하게 되었다.

### 3.7 Deflector의 효과

앞의 연료량 5.2mg 일때의 착화실패에 대한 조치로써 Injector의 Tip 부위에 84°의 분사각을 60°로 줄이는 그림 12의 Nozzle Deflector를 설치하였고 결과적으로 착화

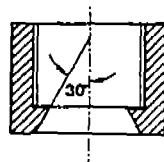


Fig.12 Narrow angled nozzle deflector

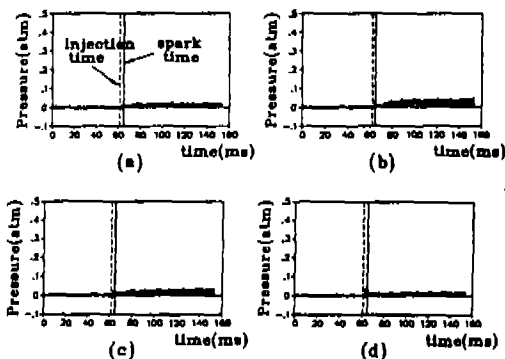


Fig.13 Combustion chamber pressure data collected for 5.2mg fuel supply condition ( $\phi = 1/2$ )  $r = 0$  mm,  $z = 19$  mm (deflector is used). (a)  $\text{air} = 6.66$  mg,  $t_d = 3.5$  ms (b)  $\text{air} = 9.39$  mg,  $t_d = 3.0$  ms (c)  $\text{air} = 11.44$  mg,  $t_d = 3.5$  ms (d)  $\text{air} = 13.5$  mg,  $t_d = 4.0$  ms

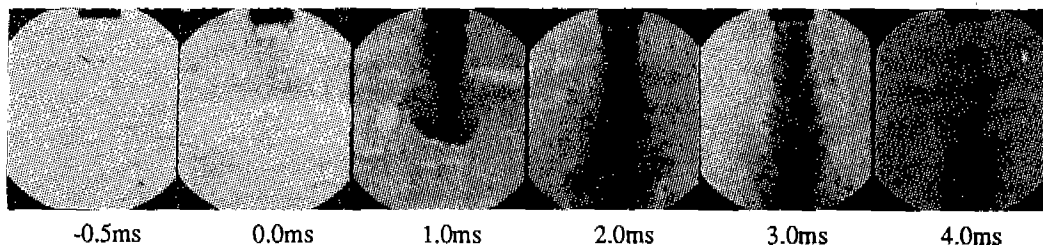


Fig.14 Sequential air-assisted Injection spray photography (deflector is used)

가 이루어지게 되었다. 그림 13는 이를 사용하여  $\phi = 1/4$ 의 연료량으로 실험한 것이다. 이 Deflector를 사용했을 때 유동의 전체적인 변화를 그림 14에서 볼 수 있다. 여기서는 선단의 속도가 더 빨라지고(약 36m/s) 분사의 퍼짐이 좁아지는 것을 알 수 있다. 이러한 상황에서  $\phi = 1/4$  이상되는 연료량에서의 Deflector 효과를 보기 위하여  $\phi = 1$ 의 조건으로도 연소실험을 수행하였다. 이때 Dwelling time에 따른 연소실내의 압력변화는 그림 15에 표시되어 있는 바와같이 나타났다. Deflector가 설치되지 않은 경우인 그림 6과 비교하여 약간의 차이를 느낄 수 있

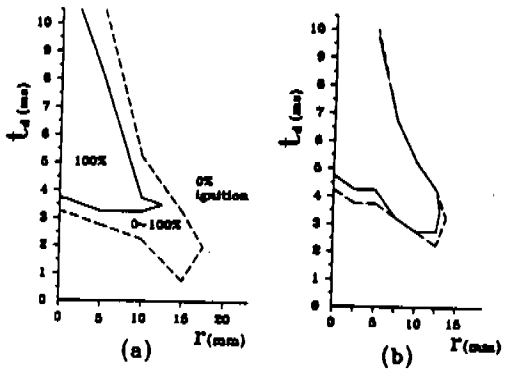


Fig.17 The effect of electrode position in radius and dwelling time on flame ignitability, fuel : 20.8 mg, air : 18.8 mg, z = 19 mm. (a) with deflector and (b) without it. The region inside the solid line was 100 % probable for successful ignition while there was absolutely no flame ignition outside dashed line.

으나 이 경우 Deflector로 인한 현저한 착화 성능의 악화는 보이지 않았다. 그림 16은 이 경우 암실조건에서 찍은 화염사진이다. 따라서 저부하시의 실화를 방지하기 위해서는 Deflector의 사용이 요구된다. 연료량이 20.8 mg 일때의 r-방향의 점화위치와 Deflector의 유무 및 Dwelling time의 변화에 따른 착화 효과를 그림 17에 나타내었다. 여기에서도 Deflector의 유무에 따라 분무각의 차이를 느낄 수 있다.

#### 4. 결 론

1) 분무형태를 사진으로 관찰하였을 때 종형(Bell Shape)의 스프레이 외형으로 미루어 축방향으로의 Entrainment가 활발한 것으로 짐작된다.

2) Dwelling time( $t_d$ )의 효과를 관찰하였을 때 전체가연  $t_d$ 의 초기에 해당되는 시간 즉, 분사된 Spray의 선단이 통과한 이후(4ms ~ 6ms)에 가장 만족스런 착화가 이루어짐을 알 수 있었다.

3) 스프레이 축에 가까울수록 유리한 점화

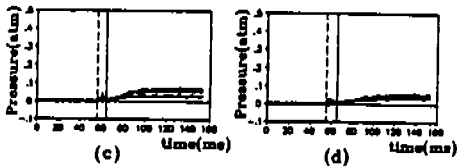
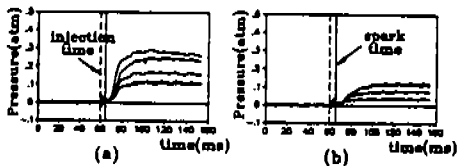


Fig.15 Combustion chamber pressure trace collected for various dwelling time with deflector installed, spark gap at  $r = 0$  mm,  $z = 19$  mm, fuel : 20.8 mg, air : 18.8 mg. (a)  $t_d = 5.0$  ms (b)  $t_d = 6.0$  ms (c)  $t_d = 8.5$  ms (d)  $t_d = 10.0$  ms

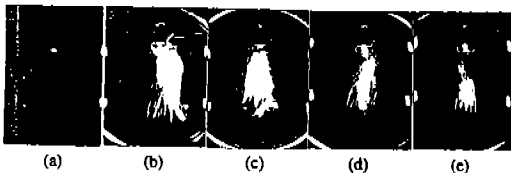


Fig.16 Flame photography ignited in constant volume chamber with deflector installed. Spark at  $r = 0$  mm,  $z = 19$  mm, fuel : 20.8 mg, air : 18.8 mg. (a)  $t_d = 4.0$  ms (b)  $t_d = 5.0$  ms (c)  $t_d = 6.0$  ms (d)  $t_d = 8.0$  ms (e)  $t_d = 10.0$  ms

가 이루어졌다.

4) 공기유동이 없는 정적연소에서 스프레이의 유동방향과 직각으로 형성된 스파크 arc가 가장 만족스런 점화를 가져다 주었다.

5) 정해진 연료량에 대하여 공급공기량이 일정량보다 커지면 스프레이의 형태가 확대되며 착화성능이 악화되었다.

6) 예각의 Deflector를 사용했을 때 선단의 속도는 더 빨라지고 분사의 폭이 좁아졌다. 이러한 효과로 낮은 부하조건에서는 이 Deflector를 사용하여 점화가 가능하였다.

### 참 고 문 헌

1. D. Laforgia, B. Chehroudi, and F. V. Bracco, "Structure of Sprays From Fuel Injectors-Part II, The Ford DFI-3 Fuel Injector", 1989 SAE International Congress, Paper 890313, February, 1989.
2. B. Chehroudi, and F. V. Bracco, "Structure of a Transient Hollow-Cone Spray", Society of Automotive Engineers, 1988 International Congress Paper 880522, February, 1988.
3. P. Duret, A. Ecomard, and M. Audinet, "A New Two-Stroke Engine with Compressed Air-Assisted Fuel Injection for High Efficiency Low Emissions Applications", SAE Paper 880176, February, 1988.
4. P. Duret, "Device and Method for Injecting Fuel into an Engine, Assisted by Compressed Air or Gas", United States Patent No.4, 796, 594, January, 1989.
5. K. Landfahrer, D. Plohberger, H. Alten, and L. Mikulic, "Thermodynamic Analysis and Optimization of Two-Stroke Gasoline Engines", SAE Paper 890415, February, 1989.
6. C. K. Schlunke, P. W. Ragg, R. M. Davis, and C. Lucas, "Injection Fuel to an Engine", United States Patent No.4, 753, 213, June 10, 1988.
7. "The Orbital Combustion Process Engine", Information Bulletin, Fuels and Lubricants Conference, 1989.
8. J. Emerson, P. G. Felton, and F. V. Bracco, "Structure of Sprays From Fuel Injectors-Part III, The Ford Air-Assisted Fuel Injector", SAE Paper 900478, 1989.
9. Pierre Duret, Jean-Francois Moreau, "Reduction of Pollutant Emissions of the IAPAC Two-Stroke Engine with Compressed Air Assisted Fuel Injection"
10. R. Mugele, and H. D. Evans, "Droplet Size Distributions in Spray", Ind. Eng. Chem., Vol. 43, No.6, 1951, pp.1317-1324.
11. A. H. Lefebvre, "Atomization And Sprays", Hemisphere Publishing Corporation, 1989, pp.90-91.
12. S. P. Arun, Solomon, "A Photographic Study of Fuel Spray Ignition in a Rapid Compression Machine", SAE Paper 860065, 1986.