

# 레이저 유도 공동 점화 방식을 이용한 예혼합기 연소 특성 향상 Combustion Enhancement of Premixed Mixtures Using Laser-Induced Cavity Ignition

모하메드 하산\*, 고 영 성\*\*, 정 석 호\*\*\*  
Hassan Mohamed, Youngsung Ko, Sukho Chung

## ABSTRACT

In this study, a new type of laser-induced ignition using a conical cavity has been developed to utilize all the available incident laser energy. In the method, it is possible to ignite combustible methane/air mixtures by directing a laser beam of a constant small diameter into a small conical cavity, without focusing the laser beam. Shadowgraphs for the early stage of combustion process show that a hot gas jet is ejected from the cavity, especially with lean mixture. After a very short time, the hot gas jet finishes issuing and the flame behavior is quite similar to flame propagation initiated by a conventional spark ignition. The combustion process using the new method exhibits more rapid pressure increase and a higher maximum pressure rise than that of the center ignition using laser-induced spark, with significant decrease in the combustion time. Also, the new ignition method is numerically modeled to simulate the flame kernel development and subsequent combustion process using the KIVA-II code. The calculated results show satisfactory agreement with experimental results.

주요기술용어 : Laser-induced Ignition (레이저 유도 점화), Cavity (공동), Combustion Chamber (정적 연소실), Lean Mixture (희박 예혼합기)

## 1. 서 론

일반적으로 스파크 점화 엔진의 경우 희박 연소의 정도를 심화시킬수록 연료 소모율의 향상과

공해물 배출의 감소에 도움이 되고, 또한 저 옥탄가 연료에서도 노크의 발생을 방지할 수 있으며 고압축비로 운전될 수 있다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고, 희박 연소 엔진은 상황에 따라 점화 에너지가 화염의 전파를 유지하기에 부족하여, 결과적으로 불완전 연소를 초래하여 사이클 간 변동 및 실화 (misfire) 로 인한 공해물 배출의 증가를 야기하는 가능성을 내재하고 있다. 그러므로 희박 연소 엔진의 개발에 있어서 보다 향

\* 서울대학교 대학원 기계공학과  
\*\* 서울대학교 대학원 기계공학과  
\*\*\* 정회원, 서울대학교 기계항공공학부

상되고 안정된 점화 방식의 도입이 요구된다. 이 밖에도 점화 문제는 가스 터빈이나 로켓 연소기 등에서도 중요한 설계 인자가 된다.

이에 따라 예혼합기의 충전으로 작동되는 엔진에 고에너지 스파크 플러그, 플라즈마 제트 점화기, 레이저 점화, 토치 (torch) 제트 및 배기가스 재순환 (EGR) 점화 시스템 등 다양한 점화 방식을 도입하고 있다 [1]. 이러한 다양한 점화 방식 중 레이저 점화는 비접촉 특성으로 인하여 에너지 및 점화 위치에 제한을 받지 않으며, 적절한 광학 장치를 도입하여 점 에너지원 (point energy source) 을 만들 수 있는 점 등 기존의 전기 전극 점화 방식에 비해 다양한 장점을 지니고 있다. 이 외에도 연소실 내의 점화 위치에 전극과 같은 금속 표면 등이 존재하지 않기 때문에 점화 초기에 발생하는 열손실을 최소화할 수 있다.

그러나 레이저 유도 스파크 점화 (laser-induced spark ignition) 의 경우, 입사 레이저 에너지의 일부만이 레이저 스파크 위치에서 소모되고 그 나머지는 스파크 위치를 그대로 지나가 손실되어, 입사된 에너지의 전부를 이용하지 못하는 단점이 있다. 레이저 유도 스파크 점화에서의 입사 에너지 손실의 정도를 측정하기 위하여,

연소실의 측면에서 레이저가 입사되어 연소실의 중앙에서 점화가 일어나는 방식을 이용한 참고 문헌 [2] 의 Fig. 2 의 방식과 같이 연소실 전후에서 에너지를 측정하는 이중 빔 배열 (dual beam arrangement) 을 이용하여 입사 에너지와 투과 에너지를 측정하였다. Figure 1 은 입사 레이저 에너지 강도에 따른 스파크에 의해 흡수되는 에너지를 나타낸 것으로서, 실선은 실험 결과를 직선 피팅한 결과이다. 점선은 입사 에너지와 동일한 흡수 에너지를 나타낸 것으로 입사 에너지가 증가할수록 손실 에너지의 값이 증가함을 볼 수 있으며, 전체적으로 약 30 ~ 70 % 정도의 입사 에너지가 손실된다.

이러한 단점을 극복하기 위한 방법으로써, 일반적인 beam stop 의 원리를 도입하여 입사되는 모든 입사 레이저 에너지를 점화에 사용할 수 있는 원추형 공동 (conical cavity) 을 이용한 새로운 점화 방식에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 또한 이러한 점화 방식을 모델링하여 수치 해석적 연구를 병행하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

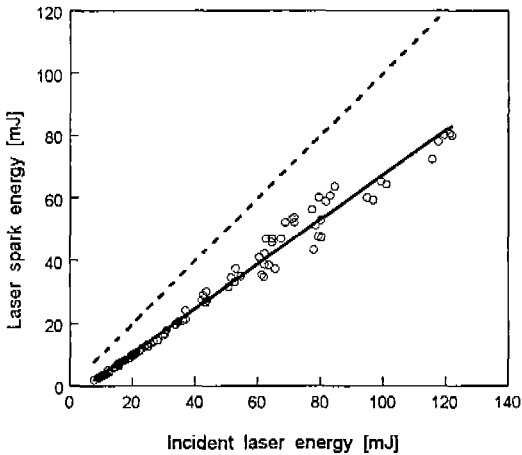


Fig. 1 Spark energy as a function of laser energy

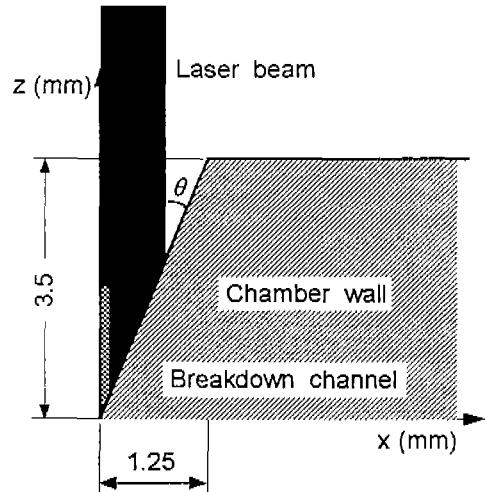


Fig. 2 Schematic of laser-induced ignition using a conical cavity and model of ignition source

본 실험에서 입사 레이저 에너지의 측정에는 에너지 센서 (Molelectron, J25-152) 와 에너지 미터 (Molelectron, EM 500) 를 사용하였고, 각종 렌즈와 광학 유리에서의 광 손실은 측정 결과 각각 6.9 % 와 2.6 % 인 것을 확인하였으며, 이를 손실 에너지 계산에 고려하였다. 그러나 스파크에 의한 플라즈마로 인해 산란된 에너지는 무시할 수 있다 [3].

Fig. 2 는 원추형 공동과 레이저 빔이 원추형 공동의 중심축에 대칭이므로 절반만 나타낸 것이다. 이러한 원추형 공동을 이용한 새로운 점화 방식의 기본적 개념은 그림과 같이 평행한 레이저 빔을 연소실 벽면의 알루미늄으로 만들어진 원추형 공동에 입사시킬 경우, 알루미늄의 반사율이 상당히 크기 때문에 일부분의 에너지는 금속 표면에 흡수되고 남은 대부분의 에너지가 금속 표면에서 반사되어 공동의 중심 축에 원통형으로 집광 (focusing) 되어 공동 내에서 breakdown 채널이 형성되면서 점화가 발생하는 것이다. 일반적으로 레이저 빔이 집광되면 그 초점에서 플라즈마 형태의 breakdown 이 발생한다 [2-4]. 이 때 원추형 공동은 일반적인 beam stop 의 원리와 같이 평행하게 들어온 레이저 빔은 공동 밖으로 빠져나가지 못하고 공동 내부에

서 일부는 가스를 가열시키고 나머지는 금속 표면을 가열시키면서 모두 소모되는 원리를 이용하여 연소실 중앙에서의 레이저 유도 스파크 점화 방식의 단점을 보완하고자 하는 것이다.

실험 장치의 전체적인 구조는 Fig. 3 과 같이 정적 연소실, 레이저 점화 시스템, 압력 측정 장치 및 가시화 장치로 구성되어 있다. 정적 연소실은  $60 \times 60 \times 20$  mm 의 직육면체 구조이며, 연소실의 윗면에 원추형 공동 점화에서의 레이저 입사를 위한 광학 유리 (quartz window) 및 측면에 레이저 유도 중앙 점화를 위한 한 쌍의 광학 유리와 다른 측면에 가시화를 위한 광학 유리 한 쌍을 설치하였다.

연료로서는 메탄을 사용하였으며, 메탄/공기의 예혼합기 조성은 각 기체의 분압비에 의해 조절되어 혼합실 (mixing chamber) 내에 미리 공급함으로써 혼합기의 균일성을 유지한 후 연소실에 공급되었다. 원하는 조성의 예혼합기를 만들기 위하여 우선 진공 펌프를 사용하여 혼합실을 진공상태로 만든 후, 만들고자 하는 예혼합 기체의 압력과 당량비를 결정하고 정밀 진공 압력계 (vacuum gage : Matheson 63-5601 : 760 mmHg ~ 0 absolute) 및 브루든 압력계 (pressure gage : Matheson 63-5612 : 0 ~ 100 psig) 를 이용하여 먼저 연료를 원하는 압력까지 주입한 후, 공기를 미리 결정된 최종 압력까지 주입하였다. 본 연구에서는 당량비  $\phi = 1.0$  과 0.7 의 예혼합기를 사용하였다.

점화원으로는 Nd:YAG 레이저 (Spectra Physics, GCR 150) 의 단일 발진 (single shot) 을 이용하였는데, 레이저 빔의 파장은 532 nm, 펄스 폭은 7 ns, 빔 반경은 7 mm, 최대 출력은 약 360 mJ 이다. 이러한 레이저 빔을 초점 거리 200 mm 의 볼록 렌즈와 초점거리 50 mm 의 오목 렌즈를 이용하여 약 1.8 mm 의 평행광으로 바꾼 후, 연소실 윗면의 광학 유리를 통해 Fig. 2 와 같이 연소실 바닥 중앙의 원추형 공동 (직경 2.5 mm, 길이 3.5 mm) 에 입사시켰다. 원추형 공동을 이용하여 예혼합기를 점화시키기 위한 최

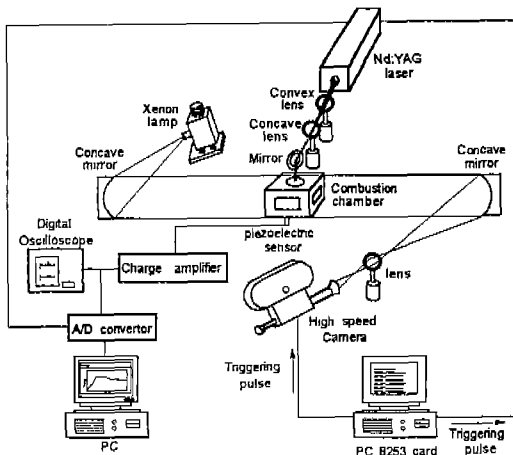


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup for laser-induced cavity ignition

소 점화 레이저 에너지는 원추형 공동의 크기, 입사되는 레이저 빔의 직경에 따라 달라지는데, 본 실험 조건에서의 최소 점화 레이저 에너지는 당량비  $\phi = 1.0$  과  $0.7$  에 대해 각각  $60 \text{ mJ}$  과  $90 \text{ mJ}$  이다. 본 실험에서 사용된 입사 레이저 에너지는 당량비  $\phi = 1.0$  과  $0.7$  에 대해 각각  $80 \text{ mJ}$  과  $110 \text{ mJ}$  로, 각각 조건에서의 최소 점화 레이저 에너지보다  $20 \text{ mJ}$  씩 큰 에너지를 사용하였다.

연소실 내 화염 전파 과정의 가시화를 위하여 새도우 그래프 (shadowgraphs) 기법을 도입하였으며, 고속도 카메라 (Hitachi, 16HM) 와 고속도 비디오 카메라 (Kodak, Ektapro) 의 촬영 시점과 레이저 단발 점화의 시점을 동기시켜 촬영하였다. 새도우 그래프 기법에서 광원은 제논등 (Xenon lamp) 을 사용하였으며, 두 개의 오목 거울 (직경  $23 \text{ cm}$ , 초점 거리  $2 \text{ m}$ ) 을 Z-형태로 배치하였다.

연소실 내 연소 압력은 압전 압력 센서 (piezo-electric sensor: Kistler, 6051) 와 충전 증폭기 (charge amplifier: Kistler, 5011) 및 아날로그/디지털 변환기 (A/D board: Analogic Fast 12-1) 을 이용하여 데이터를 처리하였다. 각 연소 조건에서 실험 결과의 재현성이 뛰어난 것을 확인한 후, 각 조건마다 3 회 이상의 압력 신호를 측정하여 평균값을 나타내었다.

### 3. 수치 해석 방법

앞서 논의한 새로운 공동 점화 방식에 의해 생성되는 화염핵 (flame kernel) 의 형성 과정과 연소 과정을 모델링하여 KIVA-II 코드를 이용하여 수치적으로 계산함으로써, 실험에서 측정하기 어려운 화염핵 발달 초기의 압력 분포, 속도장 및 온도 분포 등을 계산해 보았다. 연소실은 실제 연소실과 동일한 높이와 부피를 지닌 원통형으로 가정되었으며, 초기 압력  $1.5 \text{ 기압}$  과 이론 당량비의 메탄/공기 예혼합기 조건에서 계산되었다. 계산에 사용된 지배 방정식 및 수치 해석 방

법은 Amsden et al. [5] 에 자세히 언급되어 있으므로 본문에서는 생략하기로 한다.

사용된 좌표계와 점화 에너지의 공급 위치는 Fig. 2 에 나타난 바와 같으며, 본 연구에서는 공급되는 레이저의 점화 에너지가 공동 내의 가열된 영역에서 예혼합기의 열발생으로 변환된다는 가정 [6] 이 도입되었으며, 이로 인해 공동의 중심 축에 발생하는 원통형 플라즈마는 반경  $0.08 \text{ mm}$ , 높이  $1.42 \text{ mm}$ , 최대 온도  $10,000 \text{ K}$ , 압력  $8 \text{ 기압}$  으로 가정되었다. 계산 초기 조건으로는 초기 온도  $300 \text{ K}$  의 예혼합기가 정적 (quiescent) 상태로 존재하고, no slip 조건과 화염핵으로부터 벽면으로의 열전달을 고려하였다.

앞서 언급한 에너지 공급 항은 Gaussian 형태를 가지며 다음과 같이 가정된다 [7].

$$\dot{q} = \frac{D_s}{\tau_s} \exp\left\{-\left(\frac{r}{r_s}\right)^{2\nu}\right\} \quad \text{for } 0 \leq t \leq \tau_s \quad (1)$$

$$\dot{q} = 0 \quad \text{for } t > \tau_s \quad (2)$$

위 식에서  $D_s$  는 에너지 항의 밀도,  $\tau_s$  는 에너지 공급 기간,  $r_s$  는 레이저 빔의 반경을 의미하며,  $\nu$  는 형상 계수 (shape factor) 로 본 계산에서는  $1$  로 계산되었다.

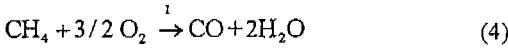
또한 입사 레이저 빔이 공동 금속 표면에 흡수됨으로써 발생하는 순간 금속 표면 온도는 다음 식과 같다 [8].

$$T_s = \frac{D_s r_s \alpha \cos \theta}{\rho c (\pi k t)^{1/2} (4kt + r_s^2)} \exp\left[-\frac{r^2}{4kt + r_s^2}\right] \quad (3)$$

여기서  $\alpha$ ,  $\theta$ ,  $\rho$ ,  $c$ ,  $k$  는 각각 금속 표면의 열 흡수율 (thermal absorptivity), 레이저 빔의 입사각, 밀도, 비열 (specific heat) 및 열전도율 (thermal diffusivity) 를 나타낸다. 알루미늄의 물성치는 각각  $\alpha = 10 \%$ ,  $\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$ ,  $c = 0.9 \text{ J/g}$ ,  $k = 0.76 \text{ cm}^2/\text{s}$  이며 [9], 레이저 입사각  $\theta = 19.7^\circ$  이다.

다차원 연소 과정의 계산에 따르는 컴퓨터의

계산 및 저장 한계로 인해 간략화된 반응 메커니즘 (simplified reaction mechanism) 이 사용되었으며, 메탄의 화학 반응 연소 부모델 (submodel) 은 Bradley [10] 의 결과를 도입하였다. 메탄의 산화 과정을 나타내는 2 step 메커니즘이 사용되었으며, 메탄의 소멸 반응식과 일산화탄소 (CO) 의 산화 반응식은 다음과 같다.



위 식의 반응율은 Arrhenius 형태식으로 다음과 같이 표현된다.

$$w_1 = -\frac{d[\text{CH}_4]}{dt} = 1.0 \times 10^{14} \times \exp\left[-\frac{2.3654 \times 10^4}{T}\right] [\text{CH}_4]^{0.7} [\text{O}_2]^{0.8} \quad (6)$$

$$w_2 = -\frac{d[\text{CO}]}{dt} = 4.5 \times 10^{11} \times \exp\left[-\frac{1.9628 \times 10^4}{T}\right] [\text{CO}] [\text{O}_2]^{0.25} [\text{H}_2\text{O}]^{0.5} \quad (7)$$

#### 4. 결과 및 토의

앞서 언급한 바와 같이 레이저 유도 스파크 점화에서의 입사된 레이저 에너지의 손실을 없애기 위한 새로운 점화 방식으로서 레이저 공동 점화에 관한 실험을 수행하였다.

Figure 4(a), (b)는 초기 압력 1.5 기압 예혼합기의 당량비가 각각 1.0, 0.7 일 때 공동 내에 평행한 레이저 빔을 입사시킴으로써 점화가 일어났을 때의 점화 후 시간에 따른 화염 전파 과정을 고속도 색도우 그래프 기법을 이용하여 촬영한 것이다. 당량비 1.0 의 경우 점화 후 약 0.5 ms 에서 공동 입구로부터 분출된 제트 형상을 볼 수 있으며, 시간이 흐름에 따라 화염면의 일부가 연소실 벽면과 접촉하면서 기존의 전기 전극 점

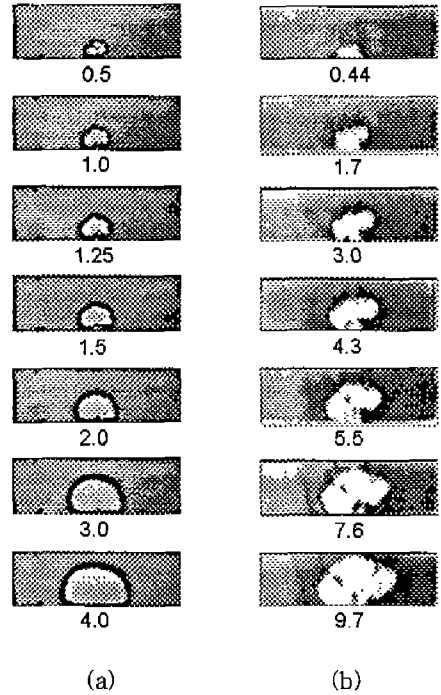


Fig. 4 Shadowgraphs for early stages of combustion process with  $P_i = 1.5$  atm, a)  $\phi = 1.0$  and b)  $\phi = 0.7$  (numbers indicate time in ms after ignition)

화 방식에서의 화염 거동과 유사한 반구형 층류 화염면을 형성하게 된다. 당량비 0.7 의 경우는 공동으로부터 당량비 1.0 인 경우보다 강한 고온의 가스 제트가 분출되고, 제트 형태의 화염이 보다 오랜 시간 동안 유지되며, 주름진 화염면을 형성하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 당량비 0.7 인 경우의 입사 레이저 점화 에너지가 작음으로 인해 초기 가스 제트의 분출 강도가 크고, 희박 메탄/공기 예혼합기의 유효 Lewis 수가 1 보다 작을 때 나타나는 확산-열 불안정성 (diffusional-thermal instability) 때문이다. 또한 공동으로부터의 가스 제트의 분출은 앞서 기술한 공동 내에서의 고온과 고압의 조건이 형성됨을 뒷받침한다.

Figure 5(a), (b)는 각각 당량비 1.0, 0.7 의 메탄/공기 예혼합기에서 레이저 유도 스파크를 이

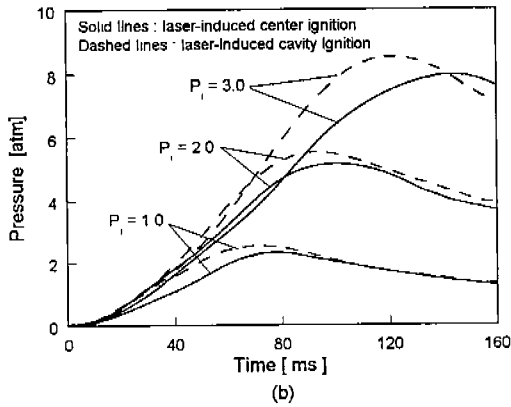
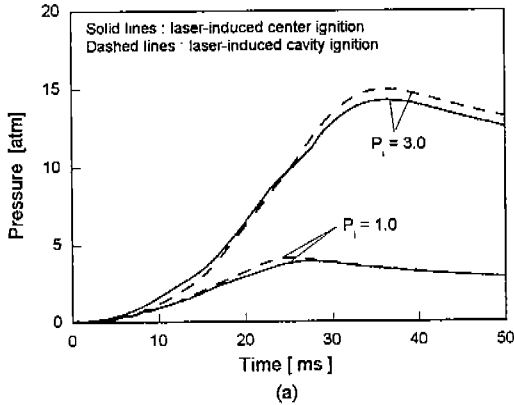


Fig. 5 Pressure rise as a function of time for various initial pressures with (a)  $\phi = 1.0$  and (b)  $\phi = 0.7$

용한 연소실 중앙 점화 방식 [2] 과 레이저 공동 점화 방식을 사용하였을 때, 연소실 초기 압력 변화에 대한 시간에 따른 연소실 압력 변화 과정을 나타낸 것이다. 참고로 이후 레이저 공동 점화와 비교된 레이저 유도 스파크 점화에 사용된 입사 레이저 에너지는 43 mJ 이다. 당량비 1.0 의 경우에는 두 점화 방법간의 차이가 명확하게 나타나지는 않으나 새로운 레이저 공동 점화 방식에서의 연소실 최대 압력이 다소 큼을 알 수 있다. 이러한 연소 특성의 향상은 당량비 0.7 인 경우에 보다 명확히 나타나 연소 속도와 연소실 내 최대 압력이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이로써 새로운 레이저 공동 점화 방식은 회박 예

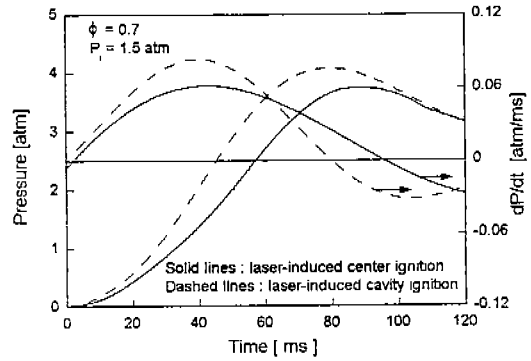


Fig. 6 Pressure rise and its rate as a function of time

혼합기에서 보다 향상된 연소 특성을 나타낸다는 것을 알 수 있다. Figure 6 은 예혼합기 초기 압력 1.5 기압, 당량비 0.7 일 때의 연소실 압력과 압력 변화율을 비교한 것으로서, 연소실 압력 변화를 또한 레이저 공동 점화 방식에서 크게 향상됨을 확인할 수 있다.

Figure 7 은 당량비 0.7 의 회박 예혼합기에서 두 가지 점화 방식에서의 연소 시간 (combustion time) 을 예혼합기 초기 압력의 함수로 나타낸 것이다. 여기서 연소 시간은 예혼합기의 기연 가스 질량 분율이 90 % 가 될 때까지의 시간을 의미하고 [11], 기연 가스 질량은 측정

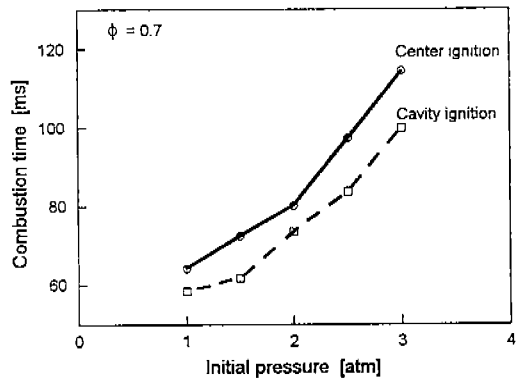


Fig. 7 Comparison of combustion time as a function of initial pressure between both ignition types

된 시간에 따른 압력 변화율로부터 구해진 열발생율을 이용하여 계산된 것이다 [2]. 예혼합기 초기 압력에 관계없이 레이저 공동 점화 경우의 연소 시간이 상대적으로 더욱 감소된 것을 볼 수 있으며, 이는 고온 가스 제트 생성으로 인한 연소 속도의 향상에 기인한다.

위와 같은 연소 특성의 향상에 대해서 실험적으로 측정하기 어려운 추가적인 정보 (압력, 온

도, 속도) 를 얻기 위한 방안으로 KIVA-II 코드를 사용한 수치해석적 연구를 수행하였다. Figure 8 은 이론 당량비의 조성과 초기 예혼합기 압력 1.5 기압일 때, 레이저 입사 후 0.01 ms 에서 생성된 압력 분포와 속도장을 나타내는데, 이 순간의 압력파는 구형 구조를 가지는 것을 확인할 수 있다. 압력파 (shock wave) 는 이미 고온의 플라즈마 핵 (kernel) 과 분리되어 주위

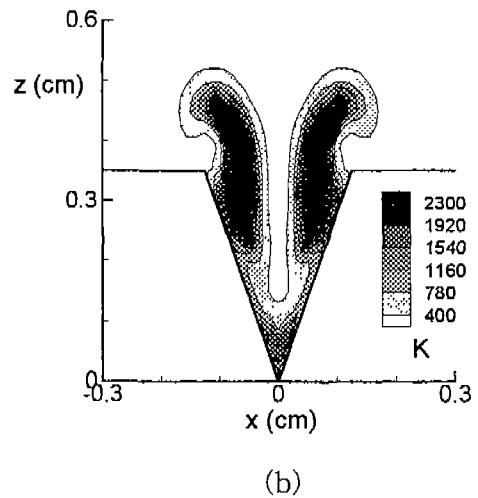
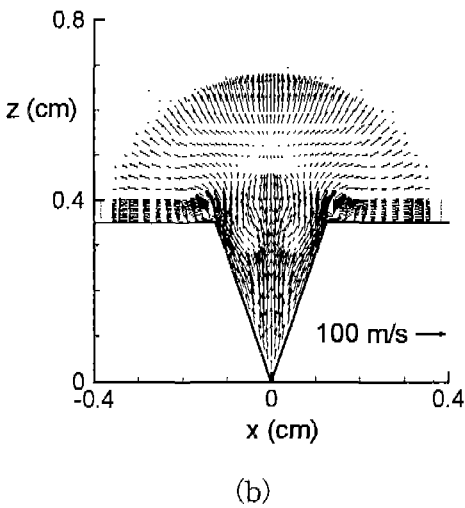
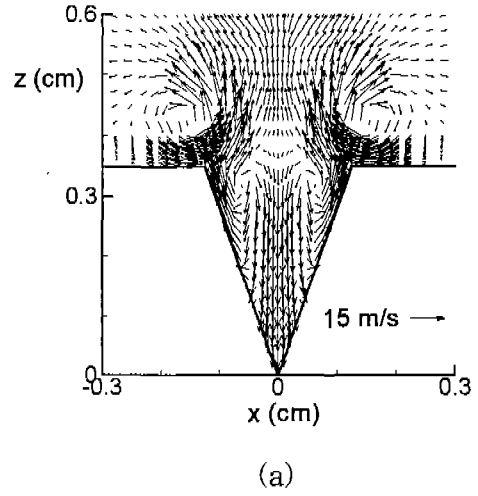
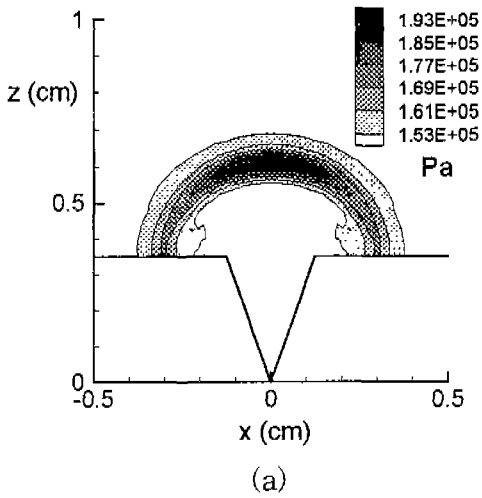


Fig. 8 Pressure (a) and velocity (b) distribution profile for stoichiometric  $\text{CH}_4/\text{Air}$  mixture at 1.5 atm and 0.01 ms

Fig. 9 Velocity (a) and temperature (b) field for stoichiometric  $\text{CH}_4/\text{Air}$  mixture at 1.5 atm and 0.1 ms

의 정지된 예혼합기 쪽으로 전파함을 볼 수 있으며, 속도장에서는 압력과 전면의 유동이 크게 교란 받지 않음을 알 수 있다.

Figure 9(a)는 레이저 입사 후 0.1 ms 후의 연소 초기의 속도 분포를 나타내는 것으로 공동 외곽에 형성되는 한 쌍의 와 (vortex)와 공동 내부의 한 쌍의 약한 와를 볼 수 있으며, Fig. 9(b)에서는 고온의 플라즈마 외곽의 와가 상당히 발달된 것을 볼 수 있다. 이러한 가스의 유동으로 인하여 고온의 가스가 공동 벽면을 타고 밖으로 밀리면서 온도 분포는 중심 축에서 저온을 나타내는 홈 (groove) 형상이 나타난다.

Figure 10은 화염 전파 초기에서의 온도 분포를 점화 후 시간에 따라 나타낸 것으로서, 연소 초기의 0.5 ms의 온도 분포에서 공동으로부터 고온의 제트 형태로 화염이 분출되는 것을 볼 수 있다. 고온의 제트 형태의 화염이 연소실 내로 분출된 후, 화염 전파의 속도가 감소하기 시작하며 반경 방향으로 주로 전파가 일어나게 되어 점화 후 1.5 ms에서 제트 형태의 화염 형태가 반구형 화염 전파와 유사하게 변화된다. 이와 같은 화염 전파 형태는 동일 조건에서의 실험 결과인 Fig. 4(a)와 상당히 유사한 형태를 보인다. 이로부터 본 계산 결과가 실제 공동 내의 초기 화염 전파 과정을 잘 모사할 수 있음을 확인하였다.

## 5. 결론

본 연구를 통하여 점화 영역 근처에서 모든 입사 레이저 에너지의 손실없이 점화를 일으킬 수 있는 레이저 공동 점화 방법이 제시되었다. 이와 같은 레이저 공동 점화 방식에서는 레이저 빔을 별도로 집광 (focusing) 하지 않고 원추형 공동 내로 평행하게 입사시킴으로써 예혼합기를 점화시킬 수 있다.

이러한 새로운 점화 방식으로 예혼합기를 점화시킬 경우, 점화 초기에 공동으로부터 고온 고압의 가스 제트가 분출된 후 기존의 전기 전극 점화와 유사한 반구형의 화염 전파 경향을 보인다.

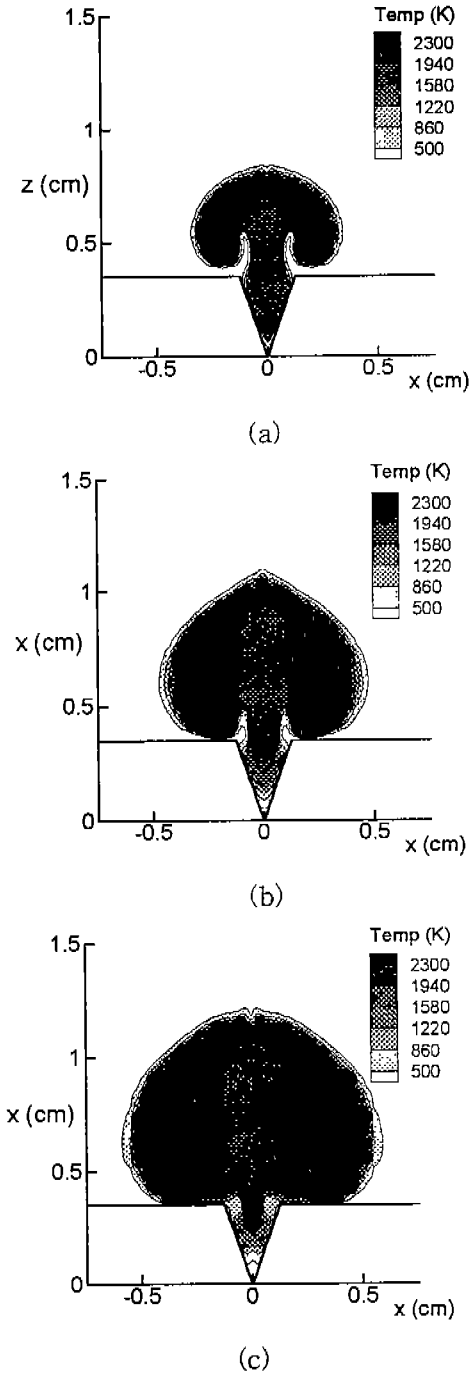


Fig. 10 Temperature distribution field for stoichiometric  $\text{CH}_4/\text{air}$  mixture for  $P_i = 1.5$  atm after a) 0.5 ms, b) 1.0 ms, and c) 1.5 ms



또한 이 때 레이저 유도 증양 점화 방식보다 연소 속도와 연소 압력을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

레이저 유도 공동 점화 방식에서의 화염핵 발달 초기 과정과 연소 과정을 모델링하여 KIVA-II 코드를 이용하여 수치 계산을 수행함으로써 속도장, 압력 분포 및 온도 분포에 대한 결과를 얻어 실험 결과와 비교해 본 결과, 화염 전파 과정이 잘 일치하는 경향을 나타내었다.

### 참고 문헌

1. J. D. Dale, and A. K. Oppenheim, "Enhanced Ignition for I. C. Engines with Premixed Gases", SAE paper 810146, pp. 606-621, 1981.
2. H. Mohamed, Y. S. Ko, K.J. Yoon, and S. H. Chung, "An Experiment on the Combustion Characteristics with Laser-Induced Spark Ignition", KSME International Journal, Vol. 13, No. 1, 1999.
3. J. A. Syage, E. W. Fournier, R. Rianda, and R. B. Cohen, "Dynamics of Flame Propagation Using Laser-Induced Spark Initiation: Ignition Energy Measurements", J. Appl. Phys., Vol. 64, pp. 1499-1507, 1988.
4. P. D. Ronney, "Laser versus Conventional Ignition of Flames", Optical Engineering, Vol. 33, pp. 511-521, 1994.
5. A. A. Amsden, P. J. ORourke, and T. D. Butler, "KIVA-II: A Computer Program for Chemically Reactive Flows with Sprays", Los Alamos National Laboratory report, LA-11560-MS, May 1989.
6. S. M. Jeng, and D. R. Keefer, "Numerical Study of Laser-Sustained Hydrogen Plasmas in a Forced Convective Flow", AIAA J. Propulsion, Vol. 3, pp. 255-262, 1987.
7. J. F. Ready, "Effects of High-Power Laser Radiation", Academic Press, New York, pp. 67-126, 1971.
8. L. J. Radziemski, D. A. Cremers, Laser-Induced Plasmas and Applications, Marcel Dekker, Inc. New York, 1989.
9. G. Weyl, A. Pirri, and R. Root, "Laser Ignition of Plasma off Aluminum Surfaces", AIAA Journal, Vol. 19, No. 4, pp. 460-469, 1980.
10. D. Bradely, S. B. Chin, M. S. Draper, and G. Hankinson, "Aerodynamic and Flame Structure Within a Jet-Stirred Reactor", Sixteen Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 1571-1581, 1976.
11. J.B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, pp. 389-395.