

정적 구형 용기 내 연소 압력을 이용한 층류화염속도측정에 대한 연구

변정주**

Laminar Flame Speed Measurement using Combustion Pressure Trace in Constant Volume Spherical Chamber

Jung Joo Byun

ABSTRACT

Laminar flame speeds of Methane at elevated temperatures and pressures were investigated using constant volume spherical chamber. Pressure trace during combustion was measured in each test and this was used in calculating laminar flame speed of Methane. To have large amount of data, experimental apparatus was fabricated with fully automatically controlled feature. A calculating code which calculates laminar flame speeds at various temperatures and pressures with one experimental result was used to calculate laminar flame speeds. The experimental and calculating methods were verified using the calculated laminar flame speed result with PREMIX code.

Key Words : Laminar flame speed(층류화염속도), Methane(메탄), Constant volume spherical chamber(정적 구형용기)

기 호 설 명

A : flame front surface area	T : temperature
L_b : Markstein length	t : time
r : flame radius	
S_b : propagating flame speed	α : thermal diffusivity
S_{b0} : unstretched propagating flame speed	κ : stretch rate

1. 서론

연료의 연소특성은 내연기관의 성능을 결정짓는 주요 인자이다. 그 중 층류화염속도는 예혼합 연료-공기 혼합물이 층류를 유지하며 연소할 때, 화염이 화염면과 수직 방향으로 전파되는 속도로 정의할 수 있다. 이 층류화염속도는 예혼합 연료-공기의 물성치들 중 하나이며, 일정한 예혼합 연료-공기 혼합물은 같은 온도, 같은 압력 등 일정한 조건에서 유일한 값을 갖는다. 물론, 내연기관에서의 연소는 층류를 넘어 난류 연소가 대부분이며 실제 화염의 속도도 층류 속도에 비해 빠르지만, 난류 화염을 층류 화염들의 집합체로 보고 해석하는 연구나, 화염의 퍼짐(stretch)이나 화염의 구겨짐(wrinkling) 현상 등이 층류화염속도와 밀접한 연관이 있어 층류 화염

에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다[1]. 또한 층류 화염속도가 점화지연, 점화에너지 결정에도 영향을 미치므로 각종 연료에 대한 층류화염속도 연구는 연소연구에 중요한 부분을 차지한다[2]. 이러한 중요성 때문에 지난 수십년간 각종 연료의 층류화염속도에 대한 연구가 진행되어 왔지만, 내연기관을 모사할 수 있을 정도의 고온, 고압에서의 연구는 부족하였고, 기존의 방법으로는 그 신뢰성을 충분히 확보할 만큼의 많은 실험 결과를 얻을 수 없는 한계가 있었다.

본 연구에서는 고온, 고압에서 다량의 층류화염속도를 측정 및 계산하기 위해 전 과정이 자동으로 수행되는 실험장비를 제작하고, 메탄-공기 혼합물에 대해 다량의 실험 결과를 획득하였다. 그리고 그 실험 결과를 통해 기존의 계산 프로그램에서 향상된 프로그램을 활용하여 다양한 온도, 압력 및 당량비에서의 층류화염속도를 도출하였다. 실험 및 계산을 통

* 삼성중공업, 조선해양연구소

† 연락저자, jungjoo.byun@gmail.com

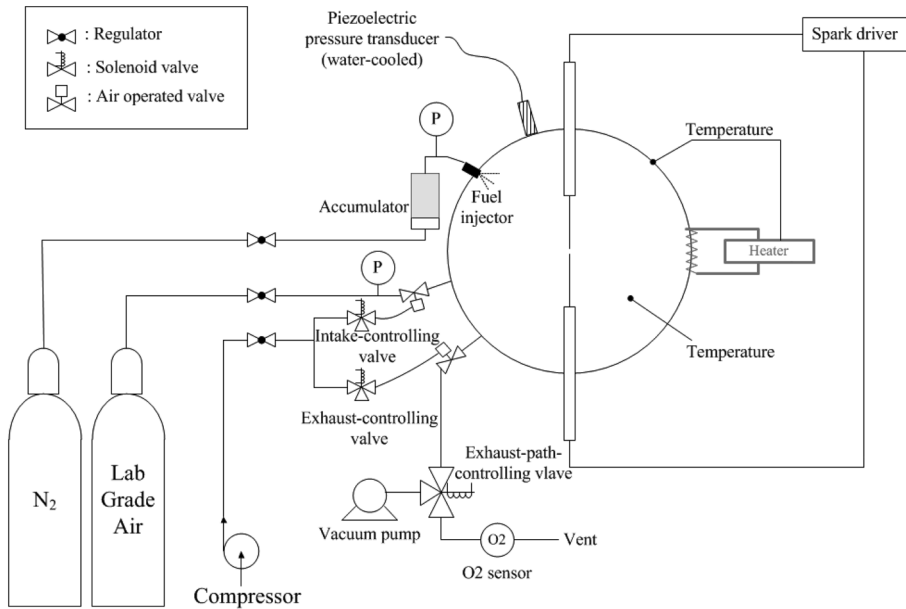


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus.

해 구한 층류화염속도는 Sandia 연구소에서 개발한 CHEMKIN 프로그램[3]의 PREMIX Code[4]를 이용한 계산 값과 비교하였다. 계산에서, 화학반응 메카니즘은 GRI-Mech 3.0[5]을 이용하였다.

2. 실험

2.1. 실험장치

실험장치는 Fig. 1과 같이 내부에서 연소가 발생하는 정적구형용기와 주변의 장치들로 구성되어 있다. 구형 용기는 303 스테인레스 스틸로 제작되었으며, 두 개의 반구를 연결하여 구형을 이루는 구조로 구성되어 있다. 용기의 지름은 약 12.7 cm이며, 흡기, 배기, 연료 공급, 압력 및 온도 측정, 점화 시스템 장착을 위한 여러개의 연결구가 위치하고 있다. 또한 광학장비를 통한 가시화를 위해 각각 지름이 1~1/4인치인 두 개의 관측창이 설치되어 있다. 점화 시스템은 두 개의 점화플러그와 점화 플러그 드라이브로 구성되어 있는데, 점화 플러그들은 전극을 연장하여 두 개의 전극이 간극을 갖고 구형 용기의 중심에 위치하도록 설치하여 연료-공기 혼합물의 점화를 용기 중간에서 수행하도록 하였다. 용기는 히팅 테이프로 감싸고 용기 벽면의 온도를 기준으로 제어하여 원하는 연료-공기 혼합물의 초기 온도로 가열하였다. 공기의 흡기와 배기가스의 배기는 두 개의 고압용 밸브를 이용하여 제어하였는데, 이 밸브들은 솔레노이드 밸브에 의해 제어되는, 30~100 psi의 공기로 제어되며, 650°C에서 680 기압까지 견딜 수 있는 밸브들이

다. 흡기 밸브는 공기 탱크에 연결되어 밸브가 열렸을 때 공기를 용기내로 공급한다. 배기 밸브는 3포트 솔레노이드 밸브와 연결되는데, 제어 신호에 따라 배기 혹은 진공펌프와 연결되어 배기 과정동안은 용기 내 배기가스를 배출하고, 진공 과정동안은 용기 내 남아있는 기체를 제거하여 용기 내부에 진공을 형성한다. 배기밸브와 3포트 솔레노이드 밸브 사이에는 광역산소센서(Wide-range Oxygen Sensor)를 설치하여 배기과정동안 연료-공기 혼합물의 당량비를 측정한다. 이 과정은 광역산소센서의 출력값에 대한 실제 당량비의 관계식을 이용하여 수행한다. 이 관계식은 동일한 양의 연료를 분사 후 연소시킨 배기가스를 10회 이상 저장 백에 포집하여 배기가스 성분 분석기를 통해 정확한 당량비를 측정함으로써 도출하였다. 연료의 공급은 아우디사의 직분사 연료분사기를 사용하였는데, 질소를 이용하여 축압기로 연료를 가압하고, 연료분사기를 작동시키는 신호의 길이를 인젝터 드라이브로 제어함으로써 그 분사량을 제어하였다. 본 실험 장비를 통해, 연료-공기 혼합물의 연소과정 동안 구형 용기 내부의 압력 변화를 측정하였는데, 이는 용기에 설치된 피에조 압력 센서를 통해 측정된 동압에 연소 발생 시점에서 측정된 정압을 더함으로써 계산하였다.

본 실험장비는 효율성 및 정확성 향상을 위해 전과정이 전자동으로 제어되도록 제작되었는데, 이를 위해 National Instrument사의 Compact Rio-9004를 이용하였고, 제어 프로그램으로는 LabView 프로그램을 이용하였다.

Table 1. Parameters of the calculated laminar flame speed verification test

Fuel	Methane
Initial Temperature (°C)	100
Initial Pressure (atm)	6
Equivalence ratio	0.888, 0.948, 1.025, 1.123, 1.206

2.2. 실험과정

실험 연료인 메탄에 대한 광역산소센서의 관계식을 찾기 위한 예비 실험을 완료한 후, 다양한 당량비에서의 연소 실험을 진행하였다. Table 1과 같이 초기 온도와 초기 압력이 각각 100°C, 6 atm인 예혼합 메탄-공기 혼합물에 대해 5가지의 다양한 당량비로 혼합하여 실험을 진행하였다. 한가지 조건에서 총 3번의 실험을 진행함으로써 그 반복성을 검증하였다.

실험 과정은 다음과 같다. 실험 전 히터를 충분한 시간동안 작동시켜서 연료-공기 혼합물이 원하는 초기 온도까지 가열된 후 실험을 시작하였다. 용기가 가열되는 동안 용기 및 각종 밸브에서의 밀봉상태를 확인하였다. 가열이 완료되면 공기 탱크의 압력조절기를 원하는 초기 압력으로 조절하고, 원하는 당량비를 위한 5개의 인젝터 드라이브 신호 길이값을 입력하였다. 위 준비과정이 완료된 후 컨트롤 패널의 Automatic 버튼을 누름으로써 아래의 과정을 자동으로 수행하였다.

2.2.1. 용기 내 잔류가스 제거 및 진공

이 과정은 이전 실험에서 남아있을 수 있는 배기 가스 혹은 실험 전 유입되었을 수 있는 용기 내 공기나 불순물 등을 제거하는 과정이다. 우선, 흡기 및 배기 밸브를 모두 열어 깨끗한 공기가 충분한 시간동안 용기내부를 흐르도록 한다. 이후 흡기 밸브를 닫

고 배기 밸브를 열고, 진공펌프와 연결되도록 하여 용기를 진공상태로 만든다. 위 과정을 한번 더 수행하여 용기내 배기가스, 공기, 불순물 등이 모두 제거되도록 한다.

2.2.2. 연료 및 공기 공급

이 과정은 진공상태인 용기에 연료 및 공기를 공급하는 과정이다. 미리 입력해 놓은 인젝터 드라이브의 신호 길이에 의해 연료가 분사되는데, 이때 인젝터 자체의 연료 분무 효과와 진공 및 고온의 용기 내부 환경에 의해 연료는 기체 상태로 존재하게 된다. 이후 흡기 밸브를 열어 원하는 초기 압력까지 공기가 용기에 공급되도록 한다. 그 후, 공급된 연료 및 공기 혼합물이 용기 내에서 안정되고, 균일한 온도까지 가열되도록 충분한 시간 동안 기다린다. 본 실험에서는 3분의 시간 동안 기다렸는데, 그 검증 과정은 뒤에 설명하였다.

2.2.3. 점화, 압력측정 및 당량비 측정

이 과정은 예혼합된 연료-공기 혼합물을 점화플러그를 이용하여 점화하고, 연소 과정동안 용기내 압력변화를 측정하며, 이후 배기 과정동안 당량비를 측정하는 과정이다. 점화 플러그 드라이브의 신호를 이용하여 점화 플러그를 작동시켜 예혼합 연료-공기 혼합물을 연소시키고 동시에 피에조 압력센서를 이용하여 동압을 측정한다. 연소가 완료된 후 배기밸브를 열어 연소가스를 배기시키고 그 과정동안 산소센서를 이용하여 당량비를 측정한다.

2.2.4. 반복

획득한 실험결과를 파일에 저장하고, 동일한 당량비에 대해 동일한 실험을 2회 더 반복한다. 이후 그 다음으로 입력된 당량비에 대해 실험을 하며 입력된

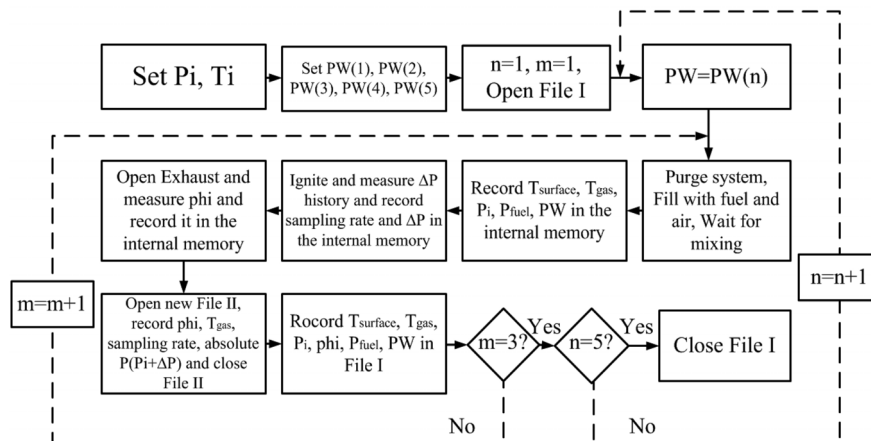


Fig. 2. Flowchart of one set of experiments.

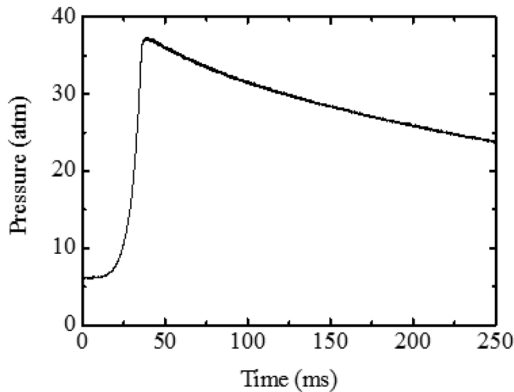


Fig. 3. Experimental result of a representative experiment.

마지막 당량비에 대한 실험을 마칠 때까지 위의 전 과정을 반복한다.

한번의 실험은, 점화 전 3분의 대기시간을 포함하여 약 6분이 소요되었고, Fig. 2는 본 실험과정을 나타내는 순서도이다. 한 세트의 실험 후 두 종류의 파일들이 생성되는데, 하나의 파일로 생성되는 첫 번째 파일에는 전 실험에 대해 용기 벽면의 초기 온도, 연료-공기 혼합물의 초기 온도, 초기 압력 등의 초기 조건과, 배기 과정에서 측정된 당량비 등이 전 실험에 대해 기록되어 있으며, 각 실험마다 하나씩 생성되는 두 번째 파일들에는 당량비, 초기 온도, 데이터 획득 주기 및 연소과정 동안의 압력 변화가 기록된다. Fig. 3은 한 실험에서 얻은, 용기 내 압력변화를 나타내는 실험결과이다. 이 그림에서 모든 연소 과정은 점화가 일어난 후 약 47 ms 후에 모두 끝나며, 이후 용기 벽면을 통한 열손실에 의해 압력은 감소함을 확인할 수 있다.

2.3. 균일 혼합의 검증

앞에서 설명한 바와 같이 용기 내 연료-공기를 공급 후 안정된 상태가 될 때 까지 3분의 시간을 대기하였는데, 이는 아래와 같은 과정을 통해 검증하였다.

첫째로, 다양한 대기 시간에 대한 실험 결과를 비교하였다. Fig. 4는 실험 결과를 보여주는데, 그림에서 보는 바와 같이 10초 이상의 대기 시간에서 균일한 실험 결과를 나타내는 것을 확인할 수 있다.

둘째로, 온도의 균일함을 검증하기 위해 보수적인 해석으로, 용기 벽면에 의한 연료-공기 혼합물로의 열전달이 오직 전도로만 이루어질 때 외부의 온도가 용기의 중간까지 도달하는데 걸리는 시간을 아래와 같이 해석적인 방법으로 계산하였다. 구형 용기 내 연료-공기 혼합물을 고체인 전도체로 가정하고, 초기 상온인 상태에서 외부 면을 100°C로 가열했을 때 전도 열전달 만으로 외부의 온도가 중심까지 도달

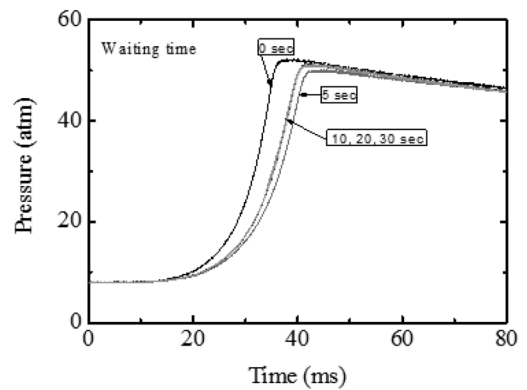


Fig. 4. Pressure histories with various air-fuel mixing times.

하는데 걸리는 시간을 계산하였다. 이 경우 지배 방정식은,

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

이며, 초기 조건과 경계 조건은 다음과 같다.

$$T(r, t=0) = 300$$

$$T(r=0.0635, t > 0) = 373$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} (r=0, t) = 0$$

변수분리의 방법으로 용기 내 위치 별 시간에 따른 온도 관계식을 구하면 다음과 같다.

$$T = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n}{r} \sin(\lambda_n r) \exp^{-\alpha \lambda_n^2 t} + 373$$

이때, C_n 과 λ_n 은 다음과 같다.

$$C_n = \frac{-73 \int_0^{0.0635} r \sin(\lambda_n r) dr}{\int_0^{0.0635} \sin^2(\lambda_n r) dr}$$

$$\lambda_n = \frac{n\pi}{0.0635}$$

Fig. 5는 위 해석 결과를 선도로 나타내며, 이를 통해 오직 전도로만 전달된다는 가정에서도 약 1분 30초 후에는 용기 중심의 온도가 벽면의 온도에 도달함을 확인할 수 있다. 이로써 3분의 대기 시간은

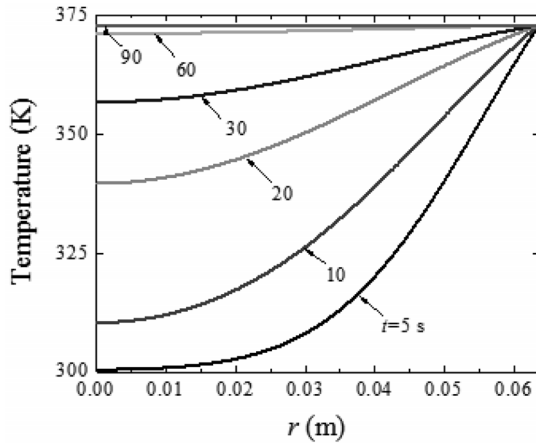


Fig. 5. Temperature profiles in a quiescent air-fuel mixture with various waiting times.

균일온도, 안정된 상태를 위한 충분한 대기시간임을 검증하였다.

3. 층류화염속도 계산 및 검증

3.1. 계산 프로그램

계산 프로그램은 Ryan과 Lestz의 프로그램을 바탕으로, 보다 정확하고 효율적인 계산을 위해 수정하였다[6]. 본 계산에서의 해석 모델은 구형 용기 내 연료-공기 혼합물이 중심에서 시작하여 반지름 방향으로 연소됨을 이용한다. Fig. 6은 연소과정 동안 중심에서 반지름 방향으로 진행되는 연소화염의 수치적 모델을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 용기 내부를 매 순간 기연소 영역, 연소 영역, 미연소 영역의 세 영역으로 구분하며 각 영역간 물질 이동은 없는 것으로 가정한다. 연소 과정동안 미연소 영역은 화염의 전파에 따라 화염이 피스톤의 역할을 하여 가압되고, 고온, 고압으로 압축된다. 이 이유로 본 실험방법은 비록 초기 온도, 초기 압력은 정해져 있지만, 연소 과정동안 고온, 고압의 미연소 연료-공기 혼합물이 형성되어 한번의 실험으로도 다양한 고온, 고압에서의 층류화염속도를 측정 및 계산할 수 있다.

해석 영역인 용기 내부는 2000개의 계산 영역으로 나뉘며, 각각의 영역은 미연소 영역에서 시작하여 화염이 지나갈 때 연소 영역, 화염이 지난간 후 기연소 영역으로의 변화를 겪는다. Fig. 7은 계산과정의 흐름도를 나타낸다. 계산은 실험 결과를 읽는 과정으로 시작되며 계산의 정확성과 안정성을 위해 측정된 읽은 값을 필터링하는 과정을 거친다. 이후 계산과정은 하나의 시간에 대해 모든 공간에 대한 계산을 마친 후 다음 시간의 계산을 수행하는 방식으로 연소가 일어나는 전 시간에 대해 계산을 수행한다. 공간에 대

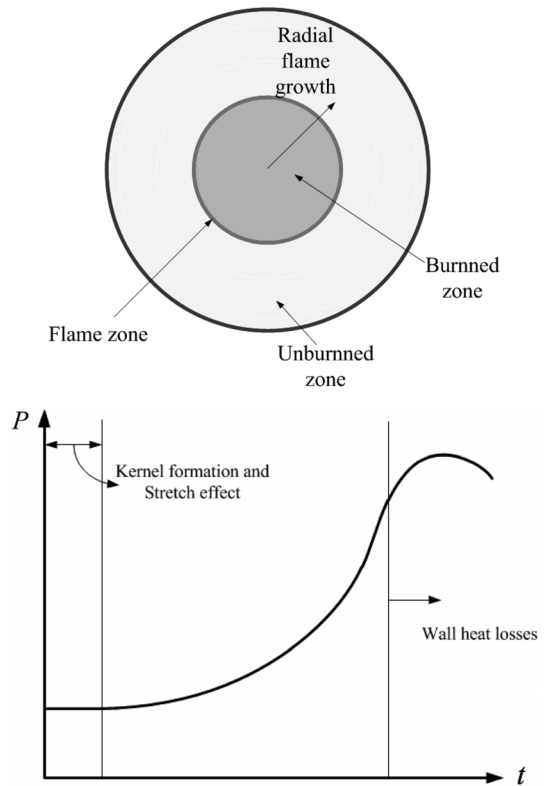


Fig. 6. Numerical flame growth model.

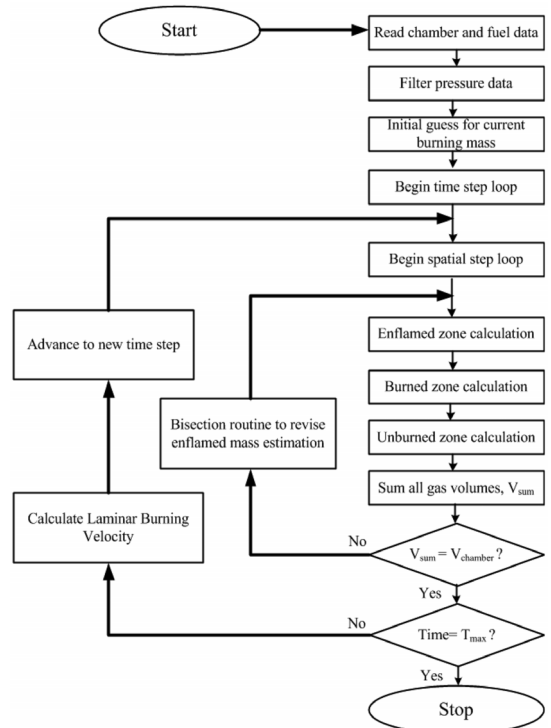


Fig. 7. Flowchart of the computational procedure.

한 세부적인 계산은, 우선 그 시점에서 연소가 일어나는 연료-공기 혼합물의 질량을 가정한 후 이 가정한 값을 이용하여 연소 영역, 기연소 영역, 미연소 영역에 대한 부피를 계산한다. 이후 계산 과정에서는, 계산된 세 영역의 부피 합을 실제 용기의 부피와 비교하여 두 값이 다를 경우 두 값이 허용된 오차 내에서 같아질 때까지 연소 중인 연료-공기 혼합물 질량의 새로운 값을 가정하며 부피 계산 및 실제값과의 비교를 반복한다. 반복 계산을 통해 현 계산 시점에서 연소가 일어나는 연료-공기 혼합물의 질량을 찾은 후, 화염 전-후단의 질량보존의 법칙을 이용하여 화염의 속도를 계산한다. 이후 다음 시간에 대한 계산을 반복하며, 위 과정을 실제 연소가 일어난 전 과정에 대한 계산이 완료될 때까지 계속하여 전 과정동안의 층류화염속도를 계산한다.

실제 계산은 점화 플러그에 의해 점화가 일어나는 시점부터 화염이 용기의 벽면에 도달하는 시점까지 수행하지만, 모든 영역의 화염 속도를 층류화염속도라 할 수는 없다. 특히 화염의 초기는 점화 플러그의 영향과 구형 화염의 특성상 퍼짐(stretch)의 효과로 층류 화염 속도가 왜곡되며 후기는 용기 벽면을 통한 열손실에 의해 정확한 층류화염 속도라 할 수 없다. 본 연구에서는 층류화염속도를 반지름 6.35 cm 크기인 화염 중에서 반지름이 3.0 cm와 4.5 cm 사이일 경우의 속도값만을 택하였으며, 그 이유는 다음절에서 설명하였다. 각각의 당량비에 반지름 3.0 cm, 4.5 cm를 기준으로 층류화염속도를 택했을 때, 온도 및 압력의 범위는 각각 약 380 K과 480 K 사이, 약 5.3 atm과 12.7 atm 사이이다. 이 온도, 압력 범위는 다양한 초기 조건에서 추가적인 실험을 함으로써 더 범위를 넓혀 층류화염속도를 측정 및 계산할 수 있다.

3.2. 계산 결과의 검증

메탄-공기의 실험 및 계산 결과는 CHEMKIN의 PREMIX Code를 이용한 결과와 비교함으로써 검증하였다. Fig. 8은 실험을 통한 계산값과 PREMIX Co-

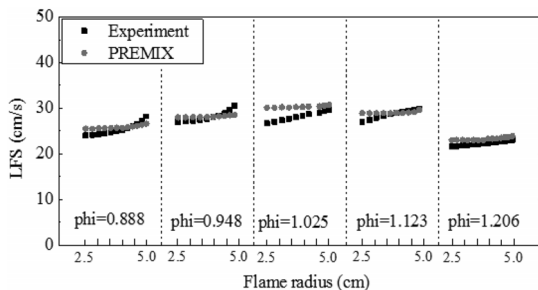


Fig. 8. Comparison between experimental laminar flame speed and calculated laminar flame speed from the PREMIX code.

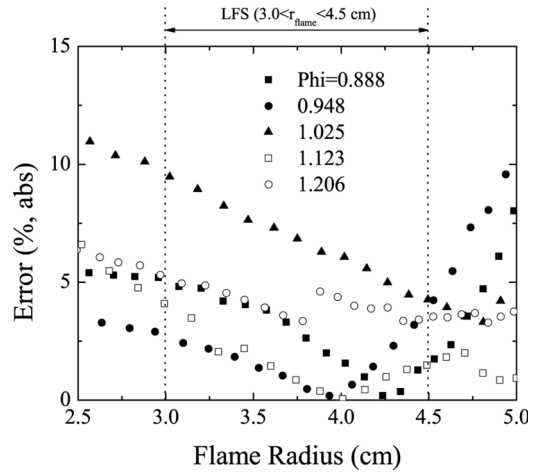


Fig. 9. Error of the comparison between experimental laminar flame speed and calculated laminar flame speed from the PREMIX code.

de를 이용한 계산값의 비교를 나타낸다. 이 그림은 화염의 반지름의 크기가 2.5 cm와 5 cm 사이인 경우에 대해 비교한 결과로 예상한 바와 같이 화염의 크기가 작은 경우와 큰 경우, 오차가 커짐을 확인할 수 있다. Fig. 9는 화염의 크기에 따라, 실험을 통한 계산 값과 PREMIX Code를 이용한 계산 값의 오차를 나타낸 선도로, 반지름이 3 cm와 4.5 cm 사이인 경우 모든 경우에서 오차값이 10% 미만이었으며, 대부분의 경우 5% 미만의 오차값을 보임을 확인하였다. 이를 통해, 점화 플러그 및 화염 퍼짐(stretch)의 영향이 큰 초기 화염 영역을 화염의 반지름의 크기가 3 cm 미만인 경우로 정하고, 벽면을 통한 열손실의 영향이 큰 화염 후단 영역을 화염의 반지름의 크기가 4.5 cm 초과하는 영역으로 정하였다.

초기 화염의 영역을 선별하는데 있어 타당성 검증을 위해 화염 퍼짐(stretch) 분석을 수행하였다[7]. 화염 퍼짐 분석은 당량비 0.948인 경우에 대해 화염의 반지름이 1.5 cm 이상 3 cm 이하인 경우에 대해 수행하였다. 화염 퍼짐 분석에서는 화염전파속도(propagating flame speed)를 사용하였는데, 이는 연료-공기 혼합물의 물성치인 층류화염속도와 달리 실험장비의 영향을 받는 화염의 속도로, 광학적인 방법으로 화염을 관찰하였을 때 시간당 화염의 이동거리를 측정함으로써 계산할 수 있는 화염속도이다. 화염전파속도에서의 화염 퍼짐의 영향을 나타내는 Markstein length, L_b 와 화염 퍼짐이 없는 화염전파속도, S_{b0} 와의 관계는 다음과 같다.

$$S_{b0} - S_b = L_b \cdot \kappa$$

여기서, 화염 퍼짐비, κ 는 다음과 같이 정의된다.

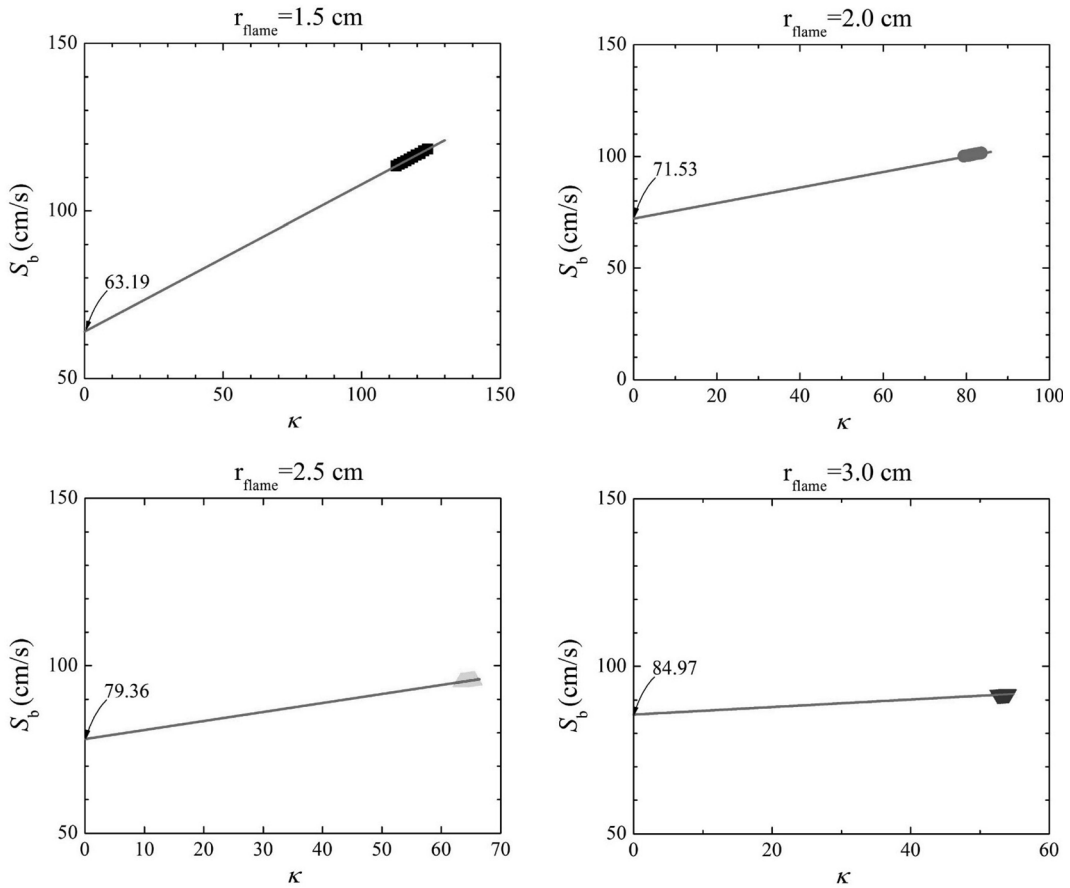


Fig. 10. Results of stretch analysis.

Table 2. Propagating flame speed and unstretched flame speed at various flame radii

r_{flame} (cm)	S_b (cm/s)	S_{b0} (cm/s)	error (%)
1.5	113.25	63.19	79.23
2.0	99.86	71.53	39.60
2.5	95.11	79.36	19.84
3.0	91.58	84.97	7.78

$$\kappa = \frac{1}{A} \cdot \frac{dA}{dt} = \frac{2}{r} \frac{dr}{dt}$$

이 관계식을 이용한 S_b - κ 선도로부터 화염 퍼짐비, κ 가 0일 때의 값을 외삽함으로써 화염 퍼짐(stretch)이 없는 화염의 전파속도, S_{b0} 를 구할 수 있다. Fig. 10은 화염의 크기가 1.5, 2, 2.5, 3 cm인 경우에 대해 κ 가 0일 때 찾은 S_{b0} 값을 나타내며, Table 2에 그 결과를 정리하였다. 결과에서 보는 바와 같이, 화염의 반지름의 크기가 3 cm인 경우 S_{b0} 와 S_b 의 오차가 7% 정도로 수렴함을 알 수 있다. 이를 통해 화염 퍼짐의

영향을 무시할 수 있는 기준으로 택한 화염 반지름 3 cm 이상의 조건이 타당함을 검증하였다.

4. 결론

본 연구에서는 고온, 고압에서 예혼합 메탄-공기 혼합물의 층류화염속도를 실험으로 측정하고 계산하였다. 모든 과정이 전자동으로 제어되는 실험장비를 개발, 제작하여 정확성과 효율성을 높였으며, 특히 한번의 실험으로 다양한 고온, 고압의 환경에서 층류화염속도를 측정할 수 있는 방법을 택하여 그 효율성을 극대화하였다.

화염 퍼짐(stretch) 분석을 통해 화염 퍼짐의 영향을 받는 영역에 대해 고찰하였다. 화염속도가 다른 인자로부터 영향을 받는 영역을 제외한 층류화염속도의 실험 결과는 PREMIX Code의 계산 결과와 비교하였고, 그 결과 모든 경우에서 오차값이 10% 미만, 대부분의 경우 5% 미만의 오차값을 보이며 검증되었다.

후기

본 연구는 저자가 University of Texas at Austin 박사과정 중 Southwest Research Institute의 지원으로 진행하였으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] P. A. Libby and K. N. C. Bray, "Implications of the laminar flamelet model in premixed turbulent combustion", *Combustion and Flame*, Vol. 39, 1980, pp.33-1.
- [2] C. R. Ferguson and J. C. Keck, "On laminar flame quenching and its application to spark ignition engines", *Combustion and Flame*, Vol. 28, 1977, pp. 197-205.
- [3] R. J. Kee, J. Warnatz, and J. A. Miller, Sandia report sand83-8209.
- [4] R. J. Kee, J. F. Grear, M. D. Smooke, and J. A. Miller, Sandia report sand85-8240.
- [5] C. T. Bowman, M. Frenklach, W. R. Gardiner, and G. Smith, *The GRI 3.0 Chemical Kinetics Mechanism*, www.me.berkeley.edu/gri_mech/, 1999.
- [6] T. W. III Ryan, S. S. Letz, "The Laminar Burning Velocity of Isooctane, N-Heptane, Methanol, Methane, and Propane at Elevated Temperature and Pressure in the Presence of a Diluent", *SAE Paper* 800103, 1980.
- [7] J. Beeckmann, O. Rohl, and N. Peters, "Experimental and numerical investigation of iso-octane, methanol and ethanol regarding laminar burning velocity at elevated pressure and temperature", *SAE Technical Paper* 2009-01-1774, 2009.

접수일 : 2012. 02. 25
심사완료일 : 2012. 04. 01