

## 수소 연소 제어용 소염망 개발을 위한 모형 격실에서의 소염 특성 실험

### Propriety Check for Quenching Meshes for Control of Hydrogen Combustion between Two Compartments

양승연, 정석호  
서울대학교  
서울특별시 관악구 신림동 산 56-1

김홍집, 김희동, 홍성완  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

이전의 연구에서 원전 중대사고시 수소 연소 제어 방안으로서 소염망 설치를 제시한 바 있다. 격실 내에 점화기를 설치하는 경우 다른 격실로의 화염 전파를 방지하기 위해 소염망을 설치하는 방안이 타당한지를 모형 격실을 제작하여 실험을 통하여 조사하였다. 격실 간의 화염 전파 여부를 판정하기 위하여 슐리렌 가시화법을 이용하였다. 격실과 격실 사이에 소염망이 설치되어 있지 않은 경우, 화염은 예외 없이 한 격실로부터 다른 격실로 전파되어 가는 것을 확인하였다. 또한, 이전 연구에서 얻어진 수소 예혼합 화염에 대한 소염 거리의 기초 자료가 적정 소염망을 선정하는데 유용한지 검토하였다. 이로부터 수소 제어 방안으로서의 소염망의 타당성과 기초 자료의 실질적 적용 가능성을 확인하였다.

#### Abstract

In our previous study, the quenching meshes have been proposed for the control of hydrogen combustion under nuclear severe accident. It has been investigated whether the method of installation of quenching mesh to prevent flame from propagating to the other compartment is proper or not. Schlieren photograph is used to visualize the propagation of flame between two compartments. Without the quenching mesh equipped between the compartments, it has been observed that the flame always propagates from a compartment to the other. The data on quenching distance of hydrogen premixed flames gotten in our previous study is analyzed to setup of optimum quenching mesh, too. Such experimental results establish that the quenching meshes proposed for the control of hydrogen combustion are reasonably available.

#### 1. 서 론

원자력에 대한 의존도가 증가함에 따라 원자력 발전소에 대한 안전성 확보가 쟁점이 되고 있다. 원전 사고의 경우, 발생 확률은 낮으나 일단 발생하면 주변 환경에 미치는 영향이 막대하므로 원

전 사고에 대한 관심이 고조되고 있다. 특히 노심이 용융되고 격납용기가 파손되는 중대사고에 대한 이해와 대비책이 강구되어야 할 필요성이 있다. 원전의 격납용기는 외부로의 핵분열 생성물 방출을 방지하는 최후의 보루로서 매우 중요하다. 중대사고시 격납용기의 건진성을 위협하는 주요한 요인 중의 하나는 수소 연소로서 노심이 용융되는 중대사고시 발생하는 다량의 수소는 기폭하여 폭발반응을 일으킴으로써 격납용기에 직접적인 하중을 가하게 되며 안전 관련 기기에 손상을 유발시킬 수 있는 것으로 알려져 있다. 실제로 TMI-2 사고에서 노심 용융물과 수증기와의 반응으로 다량의 수소가 발생하여 격납용기로 방출되었다. 이 사고 이후로 노심 손상을 동반하는 중대사고시 격납용기 내에서 수소연소의 현상규명 및 대처방안을 위해 많은 노력이 기울여져 왔다. 지금까지 수소 제어 방안으로 점화기를 설치하거나 스프레이 및 수소 재결합기를 설치하는 방안이 제시되어 기존 원전에 설비된 바가 있다. 이와 관련하여서는 여러 개의 점화기를 격실내에 분포시켜 수소를 연소시키는 방법이 추천되고 있는 실정이다.

이전의 연구에서 양 등[1]은 중대사고시 발생할 수 있는 수소 연소 제어 방안으로서 격실 내에 점화기를 설치하는 경우 점화기 설치에 의해 발생할 수 있는 악영향을 방지하기 위하여 점화기 주위에 소염망을 설치하는 방안을 제시하였으며, 소염망 설치를 위한 기초적인 실험으로서 수소 화염의 소염 거리를 측정하는 바 있다. 본 연구에서는 모형 격실을 제작하여 소염망 설치에 의한 격실 간의 화염 전파 종결 여부를 확인하고, 소염망의 적정 제원을 선정하는데 소염 거리 측정 실험에 의한 기초 자료의 실질적 적용 가능성을 제시하고자 한다.

## 2. 실험 장치 및 실험 방법

Figure 1에 혼합용기, 모형 격실, 가시화 장치, 압력 센서, 그리고 점화장치로 구성되어 있는 실험장치를 개략적으로 나타내었다.

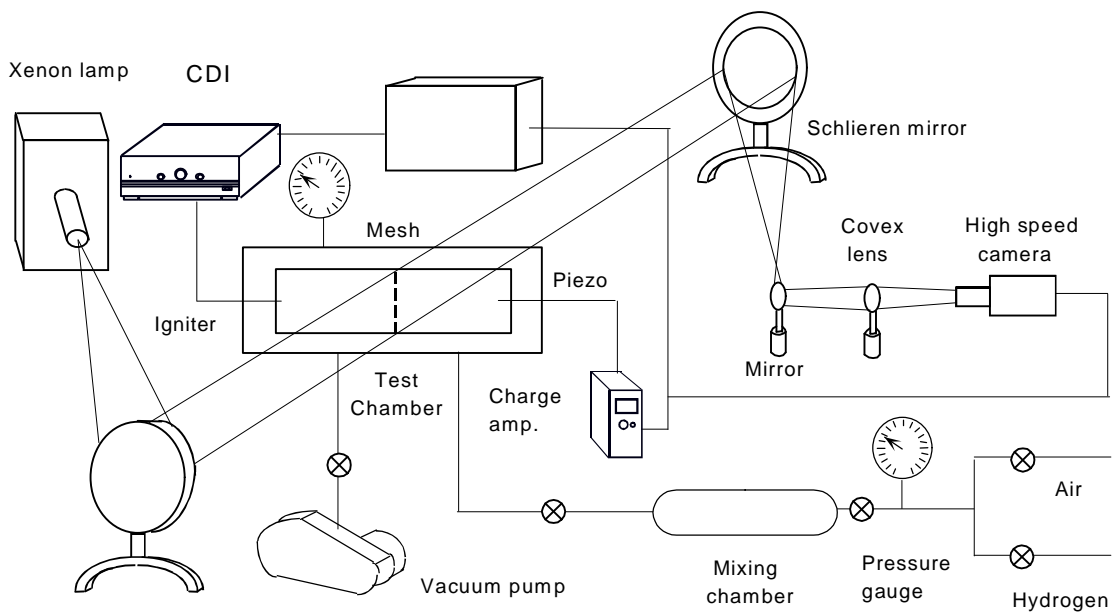


Fig. 1 Schematic of Experimental setup.

연료는 순도 99 %의 수소를, 산화제로는 압축공기를 사용하였는데, 혼합용기(mixing chamber)를 이용하여 원하는 혼합비의 예혼합기를 미리 만들었다. 진공펌프에 의해 혼합용기의 초기 압력을 10 mmHg 이하로 낮추고 진공용 압력계(Matheson : 측정범위 5-760 mmHg)와 대기압 이상

을 측정할 수 있는 압력계(Matheson : 측정범위 1-100 psi)를 사용하여 압축 공기를 원하는 압력까지 주입한 후, 원하는 혼합비가 되도록 계산된 압력까지 수소를 주입함으로써 예혼합기를 만들었다. 본 실험에서는 수소와 공기의 혼합비가 이론 당량비에 가깝도록 만들어 사용하였다.

연소실은 모형 격실을 각각 제작한 후 연결하여 사용하였다. 실험에 사용된 모형 격실의 개략도를 fig. 2에 나타내었다.

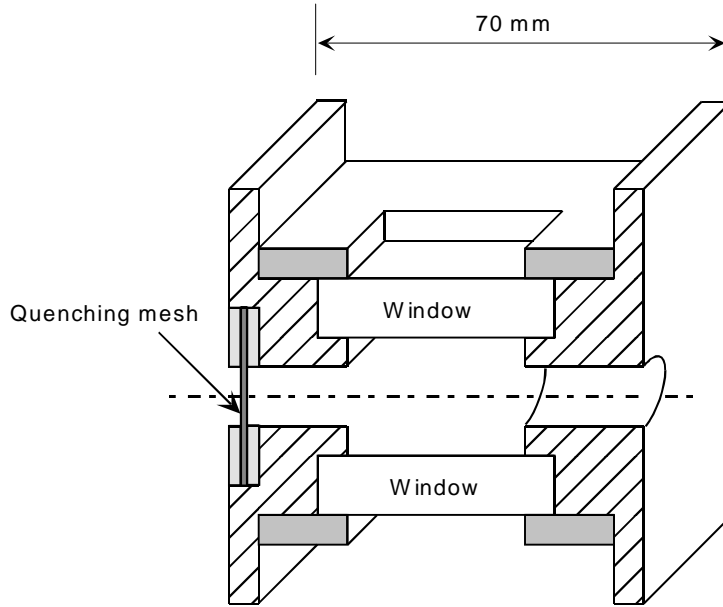


Fig. 2 Schematic of compartment of test chamber

격실은 70X70X70 mm의 직육면체의 형태로 만들었으며, 재료는 두랄루민을 사용하였다. 격실의 크기에 제약이 있었던 것은 가시화를 위한 거울의 크기(150 mm)에 두 격실이 모두 포함될 수 있게 하기 위함이다. 격실과 격실 사이에는 소염망을 설치하여 소염망을 중심으로 격실들이 양분되도록 하였다. 모형 격실의 전면과 후면은 가시창을 설치하여 격실 간 화염 전파 현상의 가시화와 연소실 내부의 상황을 살펴볼 수 있도록 하였다. 가시창으로는 두께 10 mm의 관측용 광학 유리창(BK7)을 사용하였으며, 연소실과 가시창 사이에는 O-링을 두어 밀폐를 유지시켰다. 격실의 좌우 측에는 혼합기가 들어오는 흡입부와 연소 가스가 배출되는 배기부 및 연소실 내 압력을 확인할 수 있는 압력계가 설치되도록 하였다.

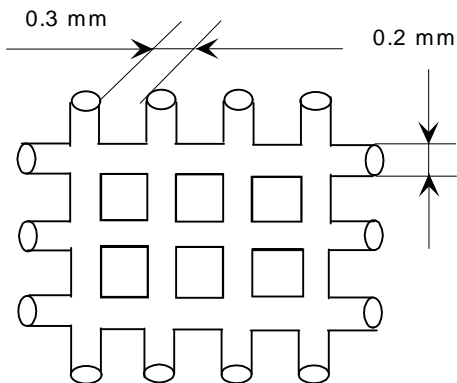


Fig. 3 Stainless steel screen type mesh.

연소실의 모형 격실 사이에 설치되는 소염망의 형태를 fig. 3에 나타내었다. 수소 연소의 제어용 적정 소염망 선정을 위한 이전의 기초 실험 결과들 [2,3]로부터 이론 당량비로 혼합된 수소/공기 혼합기의 경우 연소실의 초기 압력이 1 기압 이하의 경우에는 최소 소염 거리가 0.5 mm 로 측정되었음을 고려하여 간극 0.3 mm인 스크린 타입의 소염망을 사용하여 실험하였다.

연소실의 점화를 위한 점화장치는 전기 전극 점화기를 제작하여 사용하였다. 전극은 일반적으로 전극 재료로 널리 사용되는 직경 1 mm 피아노선을 이용하였으며, 전극의 간격은 충분히 화염의 점화가 가능한 2

mm 정도로 하였다. 연소실의 한쪽 끝에 설치되는 점화 장치는 GC(Gas Chromatography)에서 사용되는 셉텀을 사용하여 가스의 누설이 방지되도록 하였다. 점화 장치는 방전 점화를 위하여 CDI와 자동차용 점화코일을 사용하였는데 CDI 인가 전압을 높여 충분한 점화에너지로 점화가 발생되도록 하였다.

한편, 연소실의 다른 한쪽 끝에는 화염 발생시 연소실 내의 순간적인 압력 변화를 측정할 수 있도록 압전 소자(piezoelectric pressure transducer, Kistler type 6051, range 0-200 bar)와 증폭기(charge amplifier, Kistler type 5011)를 설치하였다.

먼저 연소실을 진공펌프를 이용하여 진공에 가까운 상태를 만들고, 혼합용기에 이론 당량비의 혼합비로 미리 만들어둔 수소-공기 혼합기를 연소실에 설치된 브루돈 압력계를 이용하여 원하는 압력만큼 연소실에 주입한 다음 흡기 밸브를 닫고 점화를 시도하였다. 연소실 초기 압력을 0.5, 0.75, 1 기압으로 변화시켜가며 소염망을 설치한 경우와 설치하지 않은 경우의 격실 간의 화염 전파 여부를 슐리렌 그래프(schlieren graph) 기법을 이용한 가시화 방법과 점화 후 압력 변화 곡선을 살펴봄으로써 확인하였다. 슐리렌 그래프 시스템으로는 제논등 (Xenon lamp)과 초점 거리 2 m, 직경 30 cm의 오목거울을 사용하였다. 슐리렌 그래프 이미지는 고속도 CCD 카메라(motion analyzer : KODAK Ekta Pro EM1012)를 이용하여 초당 5000 프레임 (5000 frame per second)의 속도로 촬영하였다.

## 2. 실험 결과 및 고찰

Figure 4에 각각 격실 간 화염 전파가 일어난 경우와 일어나지 않은 경우의 대표적인 슐리렌 그래프 이미지를 나타내었다.

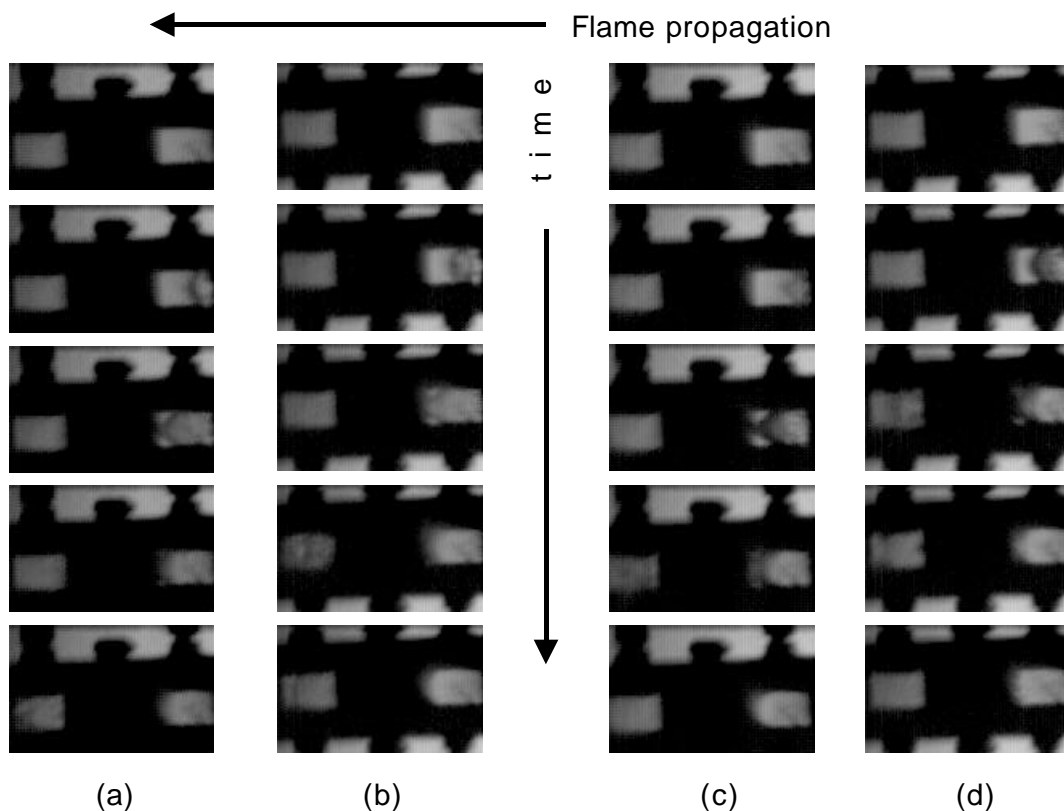


Fig. 4 Schlieren graph images of flame propagation process between compartments.

Figure 4는 이론 당량비로 혼합되어 있는 수소/공기 예혼합기가 연소실 초기 압력이 각각 0.5 기압 (a, b), 1 기압 (c, d)이 되도록 채워진 상태에서 격실 간 소염망이 설치된 경우 (a, c)와 격실 간 소염망이 설치되지 않은 경우 (b, d)의 화염 전파 모습을 2 ms 간격으로 촬영한 결과이다. 각 이미지의 우측에서 점화가 되어 좌측으로 화염이 전파되어 가고 있으며, 소염망의 설치 위치는 이미지의 중앙부 검은 부분이다. 중간 밝은 부분이 스파크 방전 모습이고, 3 ms 만에 화염 전파가 연소실 벽면까지 거의 이루어짐을 볼 수 있다. 세 번째 이미지에서 화염면이 미연 가스 측으로 불룩하게 굴곡이 져서 전파하다가 격실 간의 통로가 좁아지는 이유로 중심부의 화염면이 급속하게 가속되어 썩기 모양의 화염이 발생함을 볼 수 있다. 화염면이 격실 간의 통로를 지난 후에 해당되는 네 번째 이미지의 경우 소염망에 의해 화염이 더 이상 전파되지 못한 (a)의 경우는 좌측 격실쪽에 화염면이 형성되어 있지 않는 반면, 소염망이 설치되어 있지 않은 (b), (d)와 비록 소염망이 설치되어 있더라도 적정 소염망으로서의 역할이 제대로 수행되지 못한 (c)의 경우는 좌측 격실의 중앙부근에 화염면이 형성되어 있는 것을 살펴 볼 수 있다.

수소 연소의 제어용 적정 소염망 선정을 위한 이전의 기초 실험 결과로부터 이론 당량비로 혼합된 수소/공기 혼합기의 경우 연소실의 초기 압력이 1 기압 이하의 경우에는 최소 소염 거리가 0.5 mm 로 결정되었음을 고려하여 간극 0.3 mm인 스크린 타입의 소염망을 사용하여 실험하였음에도 불구하고 연소실의 초기 압력이 1 기압인 경우 소염망이 제대로 작동되지 않은 점에 대한 고찰을 위하여 점화 후 시간에 따른 연소실 내부의 압력 변화 추이를 살펴본 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

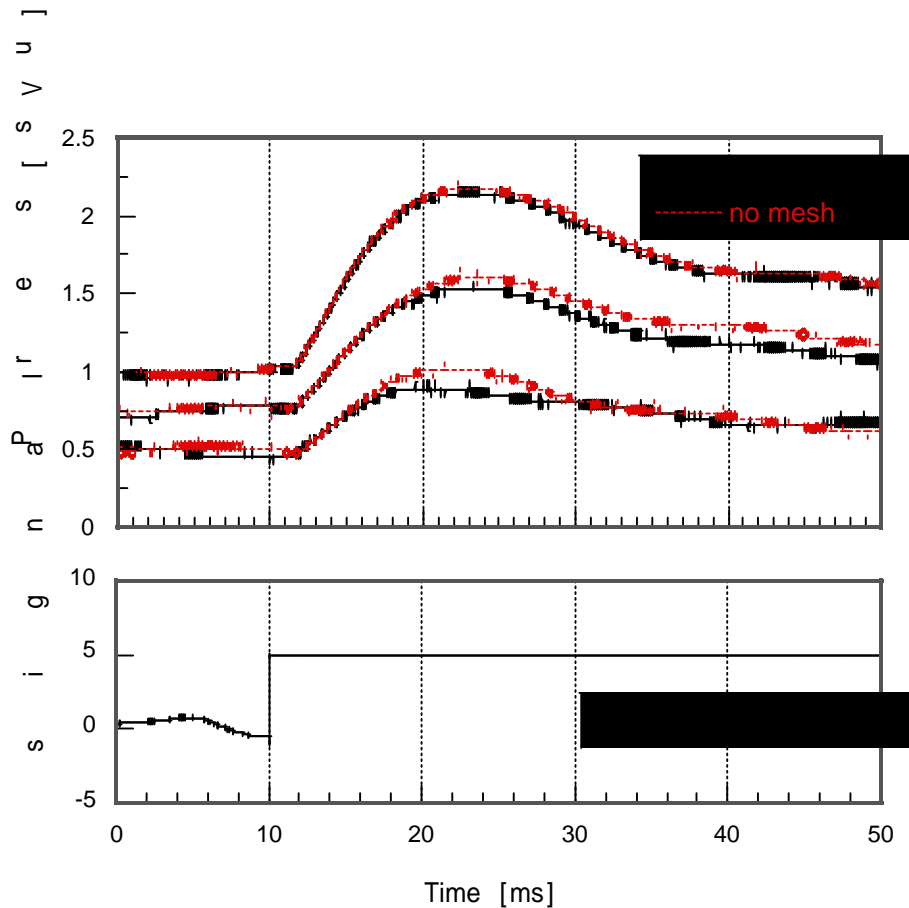


Fig. 5 Pressure history by flame propagation in combustion chamber.

그림에서 볼 수 있듯이 점화는 스파크 트리거 신호가 감지되는 10 ms에서 발생한다. 솔리덴 이미지에서 볼 수 있듯이 점화 이후의 연소실에서의 화염의 전파 과정은 초기 소염망의 위치에 이르기 전까지 구형의 화염으로 전파되는데 이와 같은 화염 전파 중반 무렵까지의 지속적인 화염면

증가에 의한 발열량의 증가는 압력 파형을 거의 단조 증가 형태로 나타내게 한다. 이러한 단계를 지나 소염망이 제대로 역할을 하는 초기 압력이 0.5 기압인 경우 소염망 통과시(점화 후 약 14 ms 경과) 소염망으로의 과도한 열손실을 당함으로써 압력 증가율의 감소를 수반하게 되어 압력 파형에서 변곡점이 존재한다. 그 이후 격실간 통로를 지난 후반 연소 과정에서의 완만한 압력 증가는 압축된 미연가스의 영향으로 보여진다. 한편, 소염망이 설치되어 있지 않거나 소염망이 제대로 작동하지 않은 경우는 소염망 도달 시점에서도 압력 파형에서 변곡점이 존재하지 않고 지속적인 단조 증가형태가 나타나고 있음을 살펴볼 수 있다. 최고 압력에 도달된 이후 지속적인 압력 감소는 연소가 완전히 끝나 화염면이 존재하지 않는 상태에서 지속적인 열손실을 받고 있기 때문으로 여겨진다.

연소실의 초기 압력이 1 기압인 경우 소염 거리에 해당하는 0.3 mm의 소염망이 제대로 작동하지 않는 이유는 기초 실험에서 측정된 소염 거리는 정압인 상태의 예혼합기에 대한 자료인데 비하여 fig. 5의 압력 파형 곡선에서 살펴 볼 수 있듯이 비록 초기 압력은 1기압이더라도 화염면이 소염망을 통과하는 시점인 점화 후 약 14 ms 경과 시의 연소실 압력은 약 1.37 기압으로 상승되어 소염망에서의 소염이 이루어지지 않은 것이라고 할 수 있다.

#### 4. 결론

수소 연소 제어 방안의 하나인 소염망 설치를 위한 기초적인 자료로서 실험적으로 측정된 소염 거리를 적용한 소염망이 설치된 모형 격실을 제작하여 소염망 설치에 의한 격실 간의 화염 전파 종결 여부를 검사하였다. 광학적 가시화 방법을 사용하여 수소 연소 반응의 격실 간 화염 전파에 대한 솔리덴 그래피 이미지를 얻을 수 있었고, 이로부터 소염망에서의 소염 여부를 판정할 수 있었다. 적정 소염망을 설치하였을 경우 효과적으로 격실 간의 화염 전파를 억제할 수 있음을 확인함으로써 수소 연소 제어 방안의 하나로서 소염망은 타당하다고 볼 수 있다.

화염이 전파되는 과정에 설치된 소염망의 적정 제원은 정압인 상태에서 측정된 소염 거리보다 작아져야 함을 확인할 수 있었고, 이러한 사실로부터 적정 소염망의 선정은 화염이 소염망에 도달하는 시점에서의 연소실 내부 조건에 합당한 조건에서 이루어져야 함을 알 수 있었다.

#### 후기

본 연구는 한국원자력연구소와 서울대학교 정밀기계설계공동연구소의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

- [1] 양승연, 김홍집, 정석호, 김희동, 홍성완, 2000, 원자력 학회 춘계학술 발표회 논문집
- [2] Lewis, B. and von Elbe, G., 1987, Combustion, Flames and Explosion of Gases, 3<sup>rd</sup> Ed., Academic Press, Orlando, 333-361.
- [3] Williams, F. A., 1985, Combustion Theory, 2<sup>nd</sup> Ed., Addison-Wesley, Menlo Park, CA, 268-271.