'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

수소 연소 제어용 소염망 개발을 위한 소염거리 측정

Quenching Distance Measurement for Developing Quenching Meshes for Control of Hydrogen Combustion

양승연, 김홍집, 정석호
서울대학교
서울특별시 관악구 신림동 산 56-1

김희동, 홍성완
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

수소 연소 제어 방안의 하나인 소염망 개발을 위한 기초적인 자료로서 수증기 첨가 유/무의 수소-공기 혼합기에 대한 소염거리를 실험적으로 측정하였다. 수증기가 첨가되지 않은 상태에서는 수소와 공기의 혼합비와 연소실 초기압력을 변화시켜 가면서 소염거리를 측정하였고, 수증기가 첨가된 경우에 대하여는 이론 당량비 근처의 혼합기에 수증기의 혼합비와 연소실 초기압력을 변화시켜 가면서 소염거리를 측정하였다.

대기압 상태에서 수증기가 첨가되지 않은 혼합기의 소염거리는 수소 혼합비가 이론 당량비 근처인 30 %에서 0.5 mm 정도의 최소값을 가지며, 일정한 수소-공기 혼합비에서는 소염거리가 연소실 초기압력을 증가시킬수록 압력에 반비례하여 감소함을 확인하였다. 한편, 수소-공기 혼합기에 수증기를 첨가시키면 수증기가 비활성 기체로서 작용하고 수증기로의 열손실에 의해 수증기 혼합비에 비례하여 소염거리가 증가함을 알 수 있었다. 수소-공기-수증기 혼합기에 대한 소염거리 측정 결과들로부터 소염망을 이용한 수소 연소 제어 방안의 타당성을 입증하였다.

Abstract

The characteristics of quenching meshes for control of hydrogen combustion are experimetally investigated. The quenching distances of various hydrogen-air mixtures without water vapor over a range of initial pressures are measured. Also, those of stoichiometric hydrogen-air mixtures with various water vapor mixture ratios over a range of initial pressures are measured.

The stoichiometric hydrogen-air mixtures without water vapor has the minimum quenching distance at atmospheric pressure. The experimental results of each hydrogen-air mixture show that the quenching distance is inversely proportional to the initial pressure of combustion chamber, too. For the stoichiometric hydrogen-air mixtures with water vapor, the quenching distance is more increased because of the effect of the water vapor as inert gas and heat sink which may be ascribed to the large heat capacity of it. Such experimental results of quenching distance measurement establish that the quenching meshes proposed for

1. 서 론

국내 에너지 소비는 지난 30년간 급속한 경제 발전으로 인하여 기하급수적으로 증대되어 95년에는 전세계 에너지 수요의 1.8 %를 점유하고 있으며 에너지 수입 의존도는 96.8 %에 이르고 있다. 앞으로도 국내 산업이 발달하고 경제 규모가 커짐에 따라 에너지의 수요는 계속적으로 증가할 것이다. 에너지 소비 형태를 살펴 보면, 60년대에는 석탄 및 신탄이 대부분이었으나 90년대에 들어서는 석유를 증심으로 석탄, 원자력 및 액화 천연 가스가 주종을 이루고 있다. 특히 80년대부터 원자력에 대한 의존도가 해마다 증대되고 있으며 95년에 전력 생산에서 원자력 의존도는 36.3%에 달하였다. 이처럼 원자력에 대한 의존도가 증가함에 따라 원자력 발전소에 대한 안전성 확보가 쟁점이 되고 있다. 특히 원전 사고의 경우, 발생 확률은 낮으나 일단 발생하면 주변 환경에 미치는 영향이 막대하므로 중대사고에 대한 관심이 고조되고 있다.

미국을 비롯한 주요 선진 원자력 발전국들은 TMI-2 사고 이후 원자력 발전소의 안전성 확보를 위해 원전 설계기준사고 뿐만 아니라 노심이 용융되고 격납용기가 파손되는 중대사고에 대한 이해와 대비책이 강구되어야 할 필요성을 깊이 인식하게 되어 중대사고 규제정책의 공표와 아울러 중대사고 현상을 이해하고 규명하기 위한 연구를 지난 10 여년간 지속적으로 수행해 오고 있다. 국내 정부 규제 기관에서도 원자력 안전 정책 성명을 발표하고 '수소 제어 능력 확보 방안의 수립과 이행'을 요구하는 등 원전 안정성에 대한 보장은 원자력 발전 산업에 있어 해결해야 할 필수적인 사항이다. 원전의 격납용기는 외부로의 핵분열 생성물 방출을 방지하는 최후의 보루로서 매우 중요하다. 중대사고시 격납용기의 건전성을 위협하는 주요한 요인 중의 하나는 수소 연소로서 노심이 용융되는 중대사고시 발생되는 다량의 수소는 기폭하여 폭발반응을 일으킴으로써 격납용기에 직접적인 하중을 가하게 되며 안전관련기기에 손상을 유발시킬 수 있는 것으로 알려져 있다. 실제로 TMI-2 사고에서 노심 용융물과 수증기와의 반응으로 다량의 수소가 발생하여 격납용기로 방출되었다. 이 사고의 경우에 격납용기로 방출된 수소가 연소함으로써 격납용기 내부의 압력을 상당히 증가시켰으나 파손은 이루어지지 않았다. 이 사고 이후로 노심손상을 동반하는 중대사고시 격납용기 내에서 수소연소의 현상규명 및 대처방안을 위해 많은 노력이 기울여져 왔다. 중대사고시 격납용기 파손을 야기할 수 있는 폭굉 연소 현상을 방지하기 위한 수단으로 격납용기 내의 점화기 설치가 검토·고려되고 있으며 추가로 IAEA는 수소 점화기 설치시 수소 연소로 인한 악영향을 고려하여 설계할 것을 권고하고 있다. 이에 따라 용기 내의 국부 수소 농도 및 유동 특성을 파악하고 수소 점화후의 수소 연소를 제어할수 있는 방안이 마련되어야 한다. 이와 함께 격실내에 존재하는 주요 기기들의 건전성을 확보하기 위한 방안을 마련하는 것도 필수적이다. 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.

본 연구에서는 중대 사고시 발생할 수 있는 수소 연소 제어 방안으로서 격실내에 점화기를 설치하는 경우 점화기 설치에 의해 발생할 수 있는 악영향을 방지하기 위하여 점화기 주위에 소염망을 설치하는 방안을 제시하고자 기초적인 실험을 수행하였다. 소염망을 이용하여 수소 연소를 제어하려는 아이디어는 소염망에서의 열손실과 라디칼 재결합 또는 종결 반응에 근거를 두고 있다. 즉 화염이 소염망을 지나 전파하는 과정에서 소염망으로의 열손실로 화염 온도가 감소하므로써 화염의 강도가 약화되며, 화학적 측면에서는 소염망이 연쇄 분지 반응을 촉진시키는 활성 라디칼을 안정된 화학종으로 변화시킴으로 인해 역시 화학 반응 속도를 늦추고 화염 강도를 약화시킨다. 열손실 정도와 라디칼 종결 반응의 정도가 어느 이상 심화되는 경우, 화염이 소염되기도 하며 이러한 화염 강도 약화 및 소염 현상을 이용하여 수소 연소를 제어하므로써 기기 건전성을 확보할 수 있다.

2. 수증기를 첨가하지 않은 수소-공기 혼합기에 대한 소염거리 측정

2.1 실험 장치 및 실험 방법

Figure 1에 혼합용기, 연소실 그리고 점화장치로 구성되어 있는 실험장치를 나타내었다.

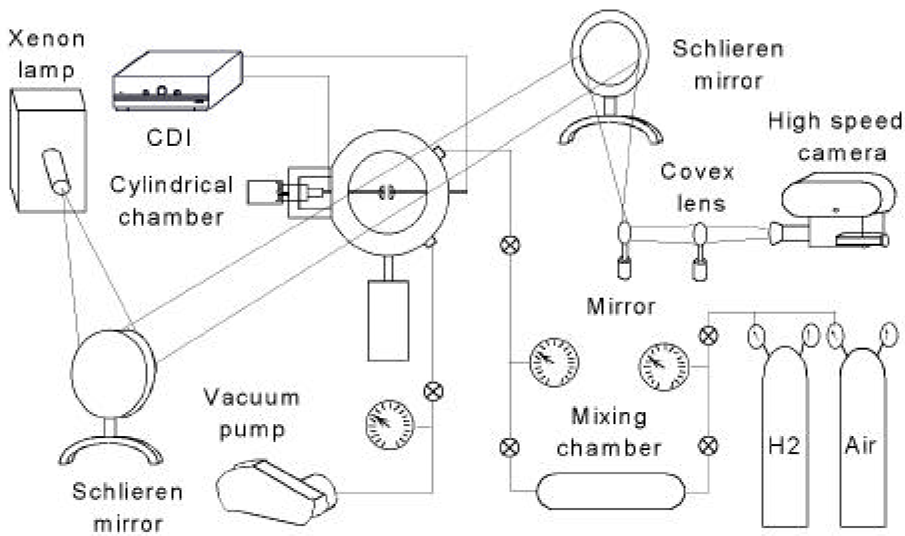

Figure 1 Schematic of Experimental Setup.

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 이상을 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. 혼합기의 농도가 균일하도록 혼합기를 만든 후 30분 이상 경과한 후, 실험에 사용하였다.

Figure 2에 실험에 사용한 원통형 연소실의 개략도를 나타내었다.

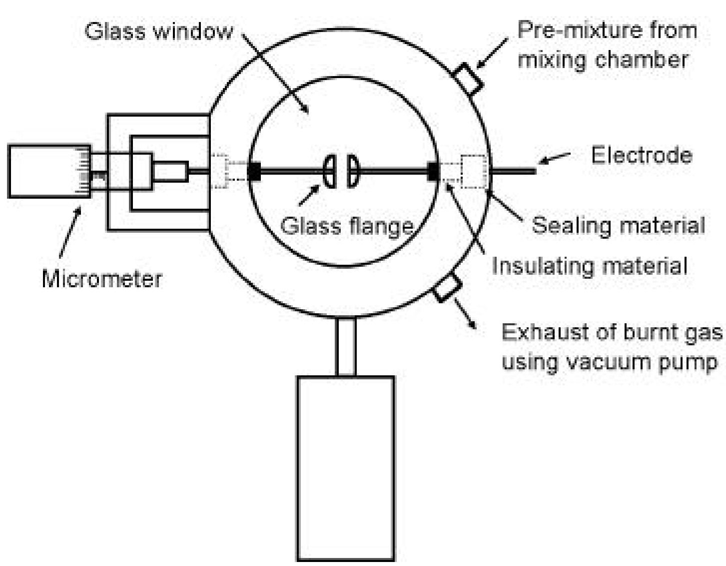

Figure 2 Schematic of Combustion chamber

연소실은 내경 50 mm, 깊이 10 mm의 원통형으로 전면과 후면은 가시창을 설치하여 연소실 내부의 상황을 살펴볼 수 있을 뿐만 아니라, 전기전극의 간극을 확인할 수 있도록 하였다. 가시창은 직경 80 mm, 두께 15 mm의 유리를 사용하였는데, 연소실과 가시창 사이에는 O-링을 두어 밀폐를 유지시켰다. 연소실 측면에는 혼합기가 들어오는 흡입부와 연소 가스가 배출되는 배기부를 설치하였는데, 흡배기부에는 dead volume을 최소화하면서 흡배기 밸브를 설치하였다.

전기전극은 직경 1 mm 의 텅스텐선을 사용하였는데, 직경 10 mm 의 유리 플렌지를 설치하기 위하여 유리와의 친화성이 좋은 텅스텐 재질의 선으로서 일반적으로 전극 재료로 널리 사용되는 피아노선을 대체하였다. 전극의 끝부분에 유리 플랜지를 부착할 경우 소염거리의 크기에는 아무런 영향을 미치지 않고, 어떤 전극 간극 이하에서의 점화 에너지를 급격하게 상승시킴으로써 소염거리의 측정을 더욱 편리하고 명확하게 만들어 준다[1]. 본 연구에서는 1 mm 텅스텐 선의 끝단에 10 mm 크기의 원형 유리 플렌지를 설치하여 실험하였다.

금속 재질의 연소실 벽과 전극을 전기적으로 절연시키기 위해서 테프론 재질의 관을 이용하여 전극을 피복하였고, 이 테프론 관이 연소실 벽면보다 안쪽으로 돌출하게 함으로써 큰 전극 간극에서도 스파크가 두 전극사이에서만 발생하도록 해주었다. 전극의 간극을 조절해주기 위해서 전극은 연소실 벽면에서 전후로 이동이 가능해야하고, 동시에 연소실의 밀폐도 유지되어야 한다. 이를 위해서 가스 분석기(Gas Chromatography)에서 사용되는 셉텀을 사용하였다. 연소실의 밀폐 여부는 수소-공기 혼합기를 연소실에 채운 후 일정 시간이 지난 후에도 연소실의 압력이 일정하게 유지됨으로부터 확인할 수 있었다. 전극의 간극을 조절해주기 위해서 한 쪽 전극에는 마이크로미터(길이 25 mm, 해상도 0.01 mm)를 설치하여 두 전극이 맞다은 상태의 눈금과 점화를 수행할 당시의 눈금 차를 읽음으로써 전극 간극을 측정하였다. 소염거리로 판명된 상태의 전극 간극은 카세토미터(catheto meter)로 재확인함으로써 실험오차를 줄이도록 노력하였다.

점화 장치는 방전 점화를 위하여 점화기 (Capacity Discharge Ignitor, CDI)와 자동차용 점화 코일을 사용하였는데, 입력 전압을 조절할 수 있도록 하여 코일에 저장되는 전기 에너지량을 조절함으로써 점화에 이용되는 방전 에너지를 조절하였다.

일반적인 방전 점화의 경우에 있어서는 전극 간극에 따라 점화가 가능한 에너지가 다른데, 이중 가장 작은 값을 최소 점화 에너지(Minimum ignition energy)라고 정의하며, 연료, 당량비, 온도, 그리고 압력 등에 따라 달라진다고 알려져 있다[1]. 본 연구에서의 주 관심사인 소염거리는 어떤 전극 간극 이하에서는 점화 에너지를 아무리 증가시켜도 점화가 일어나지 않을 때, 그러한 전극 간극의 최대 값으로 정의하였다. 본 연구에서는 처음에는 충분히 큰 전극 간극에서 점화를 시도한 다음, 점화가 일어나면 새로운 혼합기를 다시 연소실에 채운 다음, 전극 간극을 더 줄여서 점화를 다시 시도하는 방식으로 소염거리를 측정하였다. 일단, 점화가 일어나지 않는 간극을 찾으면 그 간극에서 CDI 인가 전압을 높여 점화 에너지를 높이면서 다시 점화를 시도하는 방식으로 소염거리를 확인하였다. 어떤 전극 간극 이하에서는 점화에너지에 상관없이 점화가 일어나지 않는 것는 CDI에 인가하는 전압이 낮아지면 스파크가 발생하지 않으므로 스파크가 발생하는 최소 전압에서 이미 최소 점화에너지 이상의 에너지가 혼합기에 공급됨을 의미한다.

수증기가 첨가되지 않은 경우에 대해서는 수소-공기 혼합기에 대한 수소의 혼합비를 10 %에서 60 % 까지 증가시키면서, 각각의 수소 혼합비에 대하여 연소실 초기 압력을 1, 1.5, 2, 2.5 기압으로 변화시켜가며 소염거리를 측정하였다. 먼저 연소실을 진공펌프를 이용하여 진공에 가까운 상태를 만들고, 혼합용기에 원하는 수소 혼합비로 미리 만들어둔 수소-공기 혼합기를 연소실에 설치된 브루돈 압력계를 이용하여 원하는 압력만큼 연소실에 주입한 다음 흡기부 밸브를 닫은 후 점화를 시도하였다. 연소실 내에서의 연소 반응 유무는 수소의 연소 생성물인 수증기가 가시창에 응결되는지의 여부를 살펴봄으로써 알 수 있으나, 수소의 연소 반응에 의한 연소실 내의 급격한 압력 변화와 폭발음으로도 이를 확인할 수 있었다.

2.2 실험 결과 및 고찰

섀도우 그래프(shadow graph) 기법을 이용하여 연소실 내의 수소 화염 전파 모습을 살펴 보았다. 섀도우 그래프 시스템으로는 제논등 (Xenon lamp)과 초점 거리 2 m, 직경 30 cm의 오목거울을 사용하였다. 섀도우 그래프 이미지는 고속도 CCD 카메라(motion analyzer : KODAK Ekta Pro EM1012)를 이용하여 초당 1000 프레임 (1000 frame per second)의 속도로 촬영하였다.

Figure 3와 Fig. 4에 각각 점화가 일어난 경우와 점화가 일어나지 않은 경우의 대표적인 섀도우 그래프 이미지를 나타내었다.

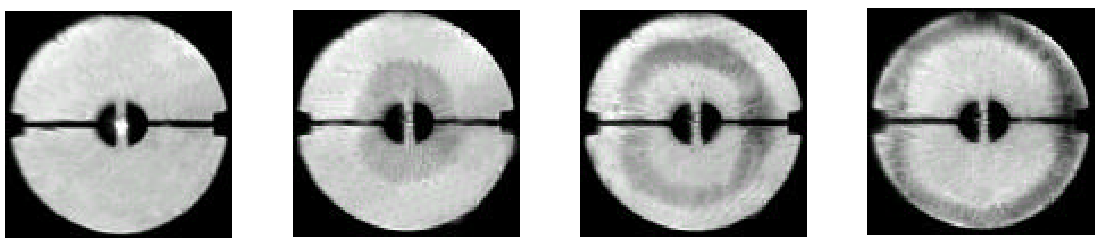

Figure 3　Shadow graph image of flame propagation.

Figure 3는 수소 혼합비 22.5 %, 연소실 초기 압력 1.5 기압에서 전극 간극이 2 mm 인 경우의 화염 전파 모습을 1 ms 간격으로 촬영한 결과이다. 첫 이미지에서 밝은 부분이 스파크 방전 모습이고, 3 ms 만에 화염 전파가 연소실 벽면까지 거의 이루어짐을 볼 수 있다.

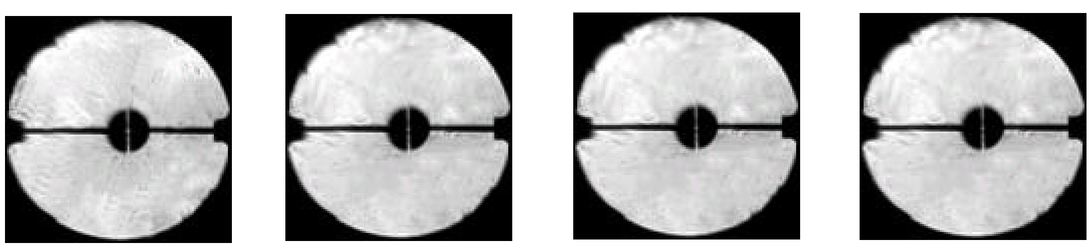

Figure 4　Shadow graph image of flame quenching.

Figure 4는 수소 혼합비 22.5 %, 연소실 초기 압력 1.5 기압에서 전극 간극이 0.28 mm 인 경우의 이미지를 1 ms 간격으로 촬영한 결과이다. 첫 이미지에서 밝은 부분은 역시 스파크 방전을 나타내는데, 이 후 시간이 경과된 이미지들에서 방전 이전과 비교하여 아무런 변화가 없음을 볼 수 있다. 이 때의 전극 간극 0.28 mm는 주어진 혼합비와 연소실 초기 압력 조건에서의 소염거리보다 충분히 작은 값으로 점화가 일어나지 않았음을 확인할 수 있다.

수증기가 첨가되지 않은 상태에서 수소의 혼합비에 따른 소염거리를 측정한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 가로축은 수소의 혼합비 즉, 혼합물 중의 수소의 비를 퍼센트로 표시한 것이고 세로축은 측정된 소염거리를 나타낸다. 측정된 소염거리는 수소 혼합비가 이론 당량비 근처인 30 %에서 최소값을 보이는데, 화염의 온도가 이론 당량비 조건에서 가장 높다는 점을 고려하면 전극으로의 열손실에도 불구하고 계속 화학 반응을 유지할 수 있음으로 해서 소염이 잘 일어나지 않

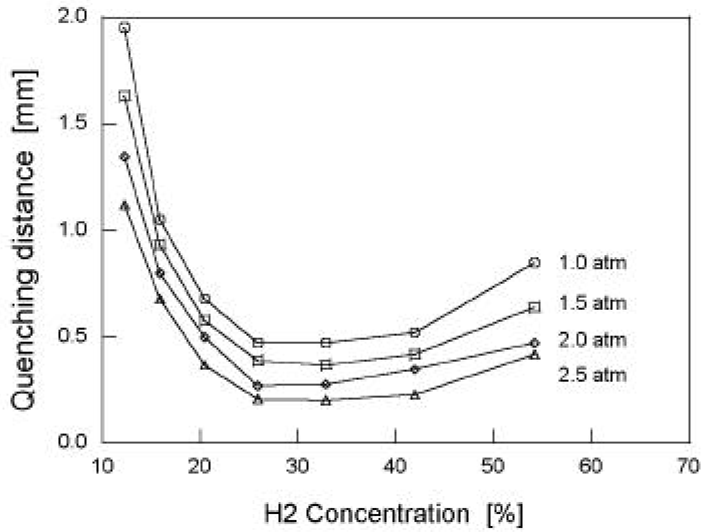

Figure 6는 연소실 초기 압력에 따른 소염 거리를 나타내는데, 초기 압력이 높을수록 소염 거리가 작아짐을 알 수 있다. 압력이 높을수록 스파크 주위에 단위 체적당 연료의 양이 많아 에너지 발생량이 많아짐으로 인해서 소염이 잘 일어나지 않는 것으로 볼 수 있다.

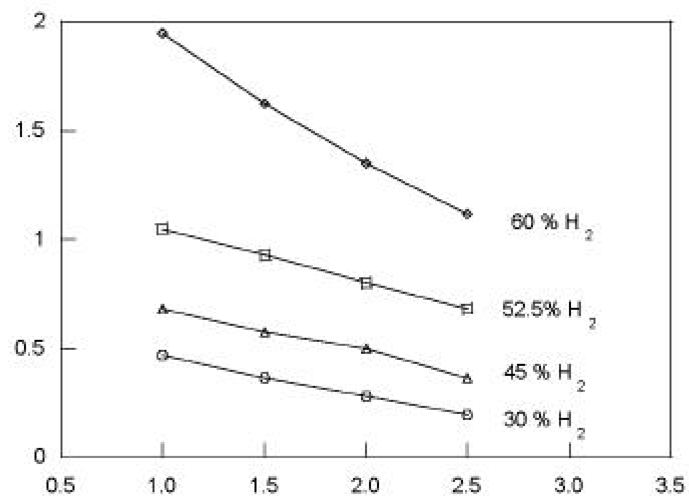

Figure 6 Quenching distance with initial pressure.

이전의 연구 결과[2] 들에 의하면 소염 거리 d_q는 다음과 같은 식으로 표현되는 화염면의 두께 δ에 비례한다고 알려져 있다.

$$d_q \sim \delta \sim \frac{\lambda}{C_p \rho_u S_L} \sim \frac{\lambda T_u}{C_p \bar{M}} \frac{1}{p} \frac{1}{S_L} \tag{1}$$

여기서, 아래첨자 u 는 미연 상태를 나타내며, λ는 혼합 기체의 열전도율(conductivity), C_p는 정압 비열(constant pressure specific heat), ρ_u는 미연 상태의 혼합기의 밀도, S_L는 화염 전파속도(burning velocity), T_u는 미연 상태의 혼합기의 초기 온도, $\overline{M}$는 혼합기체의 평균 분자량(mean molecular weight), 그리고 p는 연소실 내부의 초기 압력을 나타낸다. 이들 중 열전도율 λ와 정압 비열 C_p는 연소실의 초기 온도, 압력 및 혼합기체의 혼합비에 따라 크게 변하지 않는 물성치임에 반하여 화염 전파속도 S_L은 연소실의 초기 조건에 민감하다고 알려져 있다[3]. 압력의 영향만을 고려한 화염 전파속도는 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다[4].

$$\frac{S_L}{S_L(p=1)} = 1 + 0.0069(\log_{10} p) - 0.30586(\log_{10} p)^2 - 0.06610(\log_{10} p)^3 + 0.04736(\log_{10} p)^4 \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)로부터 소염거리에 대한 초기 압력의 영향은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$d_q \sim \frac{1}{p[1 + 0.0069(\log_{10} p) - 0.30586(\log_{10} p)^2 - 0.06610(\log_{10} p)^3 + 0.04736(\log_{10} p)^4]} \quad (3)$$

즉, 소염거리는 연소실 내부의 초기 압력에 반비례한다고 볼 수 있는데 소염거리와 초기 압력의 곱으로 표현된 값들의 수소의 혼합비에 따른 변화를 나타낸 Fig. 7에서처럼 모든 실험 측정값들이 하나의 곡선으로 거의 적합되는 사실로부터 이를 확인할 수 있다.

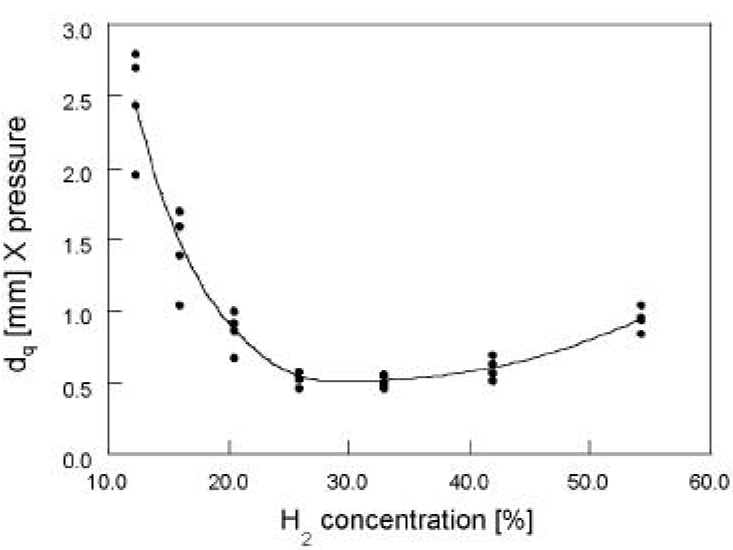

Figure 7 Quenching distance considering the initial pressure effect of H_2 with H_2 concentration.

한편, 수소의 혼합비가 작은 경우 즉, 수소가 희박한 영역이 수소가 과농한 영역에서보다 소염거리가 더 길어지는 것으로 나타나고 있다. 이는 연소 반응에 참가하지 못한 잔여 가스(residual gas)의 역할로 설명할 수 있는데, 수소가 희박한 경우는 열용량이 상대적으로 큰 공기가 잔여 가스로서 더 많이 남게 되어 열손실이 더 커지기 때문이라고 판단된다.

3. 수증기를 첨가한 수소-공기 혼합기에 대한 소염거리 측정

3.1 실험 장치 및 실험 방법

수증기를 첨가한 수소-공기 혼합기에 대한 소염거리를 측정하기 위한 실험장치는 혼합용기, 연소실, 항온장치 그리고 점화장치로 구성되어 있다.

본 연구에서는 별도의 수증기 공급 장치로부터 연소실 내의 수소-공기 혼합기에 수증기를 첨가하는 방법을 사용하지 않고, 수소와 공기가 혼합되는 혼합용기 내에 미리 일정량의 물을 공급한 후 일정 포화온도에서 이를 증발시켜 수소-공기-수증기 혼합기를 만들었다. 일정 포화온도에서 증발되는 수증기의 전체 혼합기에 대한 혼합비는 공기-수증기 혼합기에서의 포화압력을 바탕으로 계산하였다. 본 연구에서의 혼합기는 수소-공기-수증기 혼합기로서 공기-수증기 혼합기에서의 포화압력과는 다소 차이가 있지만, 공기 이외의 비활성기체(inert gas)의 존재가 수증기의 포화 압력에 미치는 영향은 미미하다고 알려져 있으므로[5], 공기-수증기 혼합기에서의 포화압력을 바탕으로 한 수증기의 혼합비 계산은 타당하다고 볼 수 있다.

한편, 일정량의 수증기가 첨가된 예혼합기를 연소실로 공급한 후, 수증기가 다시 응결되지 않도록 하기 위하여 연소실도 수증기의 포화온도가 유지되도록 항온조에 넣어 둔 상태로 실험하였다.

3.2 실험 결과 및 고찰

Figure 8에 이론 당량비 근처의 수소-공기 예혼합기에 대하여 수증기가 첨가되지 않은 경우와 일정한 포화온도에서 증발한 수증기의 혼합비가 약 10 % (포화온도 333 K), 약 20 % (포화온도 353 K)인 경우가 되도록 만든 수소-공기-수증기 혼합기의 초기 압력에 따른 소염거리를 측정한 결과를 나타내었다.

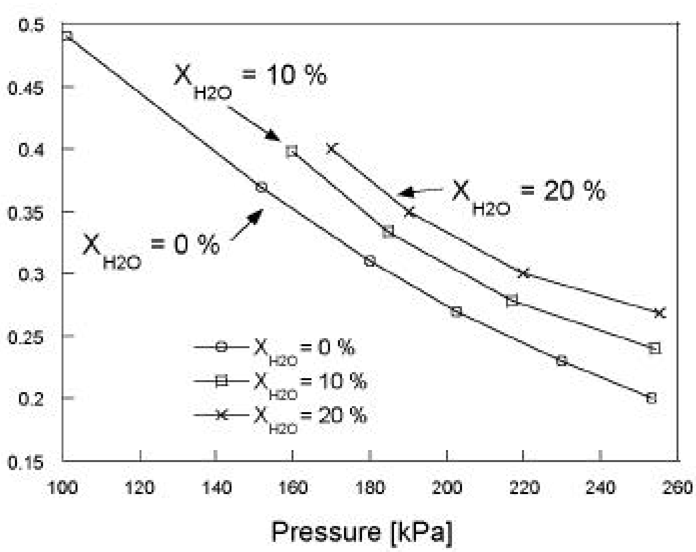

Figure 8 Quenching distance of H_2 with H_2O concentration.

수증기의 혼합비가 클수록 소염거리가 증가하는 것을 알 수 있는데, 혼합기에 첨가된 수증기가 비활성 기체로서 작용하게 되어 전체적인 혼합기의 열용량이 증가하는 결과로 열손실이 증가하여

4. 결론

수소 연소 제어 방안의 하나인 소염망 설치를 위한 기초적인 자료로서 수증기 첨가 유/무의 수소-공기 혼합기에 대한 소염거리를 실험적으로 측정하였다. 수증기가 첨가되지 않은 상태에서는 수소와 공기의 혼합비와 연소실 초기 압력을 변화시키면서 소염거리를 측정하였고, 수증기가 첨가된 경우에 대하여는 이론 당량비 근처의 혼합기에 수증기의 혼합비와 연소실 초기압력을 변화시켜가면서 소염거리를 측정하였다.

광학적 가시화 방법(쉴리렌)을 사용하여 수소 연소 반응의 화염 전파에 대한 섀도우 그래피 이미지를 얻을 수 있었고, 이로부터 연소실 내에서의 소염 여부를 확인할 수 있었다.

소염거리에 대한 여러 인자들 중에서 연소실 내부의 초기 압력이 증가할수록 소염거리가 감소한다는 기존의 연구 결과를 확인할 수 있었으며, 연소 반응에서의 잔여 가스가 소염거리에 미치는 영향도 함께 고찰하였다.

수증기가 첨가되지 않은 혼합기의 대기압 상태에서의 소염거리는 수소 혼합비가 이론 당량비 근처인 30 %에서 0.5 mm로 매우 작은 값을 가지나, 수증기가 첨가된 경우는 수증기가 비활성 기체로서 작용하고 수증기로의 열손실에 의해 소염거리가 1 1.5 mm까지 증가함을 알 수 있었다. 수증기가 첨가되지 않은 수소-공기 혼합기의 경우는 연소를 제어하기 위하여 0.5 mm 이하의 매우 작은 소염망을 설치하여야 하지만, 수증기의 첨가에 의한 소염 거리의 증가로 소염망의 제작이 보다 용이하게 되었으며, 수소 연소 제어 방안의 하나로서 소염망은 타당하다고 볼 수 있다.

후기

본 연구는 한국원자력연구소와 서울대학교 정밀기계설계공동연구소의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

[1] Lewis, B. and von Elbe, G., 1987, Combustion, Flames and Explosion of Gases, 3rd Ed., Academic Press, Orlando, 333-361.

[2] Williams, F. A., 1985, Combustion Theory, 2nd Ed., Addison-Wesley, Menlo Park, CA, 268-271.

[3] Sohn, C. H., Aum, Y. G., Chung, S. H., Hong, S. W., and Kim, H. D., 1999, A Burning Velocity Correlation for Premixed Hydrogen/Air/Steam Flames, KSME Int'l J., Vol. 13, 294-303.

[4] Mauss, F., Peters, N., Rogg, B., and Williams, F. A., 1991, Reduced Kinetic Mechanisms for Premixed Hydrogen Flames, in *Reduced Kinetic Mechanisms for Applications in Combustion Systems* (N. Peters and B. Rogg Eds.) Vol. 15 of Lecture Notes in Physics, Springer-Verlag, 29-43.

[5] Michel A. Saad, 1997, Themodynamics (Principles and Practice), Int'l Ed., Prentice Hall, 546-547.