2004년 춘계 학술 발표 논문집
한국원자력학회

수소 연소제어를 위한 소염망 냉각 모델 평가

A Cooling Model Evaluation from the Quenching Mesh for Hydrogen Control

홍 성완, 송 진호, 김 희동, 장 순흥
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

중대사고 시 아음속연소에서 초음속연소로의 천이 방지를 위한 화염전파 방지용 소염망에 대해 화염속도와 초기압력을 이용하여 소염망 성능을 평가 할수 있는 모델을 개발하였다. 0.3㎜의 일정 소염거리를 가진 정사각형 모형의 격자에서 열손실을 모델을 개발하여 소염망을 이용한 격실간 화염전파 방지 소형실험(대기압 이하, 수소농도 30%)와 중형실험(대기압 이상, 수소농도 8-10%)과 비교가 이루어졌다. 모델은 화염지역에서 소염망 격자로의 열손실 모델 방법에 따라 실험결과의 예측 능력에 차이를 보였으며, 실험 및 해석으로 부터 화염전파 속도와 초기 압력 조건을 이용하여 소염망의 전파 능력을 평가 할수 있는 모델식을 제시하였다.

Abstract

The model to estimate the performance of the quenching mesh that may be used to prevent the transition of the deflagration to detonation in severe accidents is developed. This model suggests the relation of the initial pressure and flame velocity for a given mixture condition. The model is developed using the heat loss equation from the flame to the mesh wall for single square mesh and is compared to the experimental results of the small-scale test(below the sub-atmospheric pressure, 30% hydrogen concentration) and medium-scale test(over the atmospheric pressure, 8-10% hydrogen concentration). The model shows the differences with the experimental results depending on the heat transfer methods from the flame to the wall. The relation to evaluate the quenchiing ability of the mesh is suggested using initial pressure and flame velocity for a given mixture condition.

1. 서론

원전 중대사고시 지르코늄과 냉각수 반응에 의해 발생하는 많은 양의 수소는 격납건물로 방출되어 폭발 반응을 일으켜 격납건물 내 기기, 내부 구조물, 때로는 격납건물에 직접적인 위협을 가하기 때문에 원전의 안전성에 영향을 미치는 주요 요인 중의 하나로 알려져 있다. TMI-2[1] 사고 이후 수소연소에 대해 많은 연구가 이루어져 국내에서도 표준원전의 경우 수소제어를 위해 점화기를 설치하였으며[2], 차세대 원전 즉 APR1400[3] 또는 EPR[4]에서는 격납건물 내에 점화기와 피동 촉매 결합기를 결합하여 사용하고 있다. 따라서 어느 경우 든 점화기를 이용한 수소제

어는 필수적으로 수소연소를 동반한다. 따라서 발생된 수소 연소는 화염이 가속되는 경우 초음속 연소로의 천이 가능성이 있다. 원전에서 소염 망을 이용한 수소제어에 대한 연구에 대한 특허를 획득 후[5], 먼저 소수 가스에 대한 소염거리 측정 연구[6]를 수행하였다. 수소가스에 대한 소염거리는 압력이 증가 할수록 감소하였으며, 포화상태에서 수증기 농도 효과에 대한 결과는 수증기 농도가 증가 할수록 증가하였으나 그 증가는 미미하였다. 따라서 원전의 수소 가스에 대한 소염거리는 안전성을 감안하여 이론 당량비 1에서(즉 수소 농도 29.7 %)에서 선정하였으며, 안전 인자를 고려[7] 하여 약 0.3mm로 결정하였다. 이 소염거리를 가진 소염 망을 제작하여 소염망을 격실 사이에 설치하였을 때 화염전파 과정을 영상화 하였다. 격실 간 소염 망을 설치하여 화염가속을 차단 할 수 있음으로써 소염 망이 화염전파에 의해 발생되는 DDT 발생 방지 방안이 될 수 있음을 실험적으로 연구하였다[8, 9]. 본 연구에서는 중대사고 시 아음속연소에서 초음속으로 천이 방지 및 기기 보호를 위해 사용 될수 있는 소염망의 성능을 화염속도와 초기압력을 이용하여 평가하였다.

2. 화염냉각 모델

화염 냉각 모델은 크게 두가지로 이루어 졌다. 첫번째는 화염 냉각이 소염망의 벽면을 통해 전도열로 이루어 지는 경우로 기존의 두개의 평판사이의 화염냉각 모델[10]을 본 실험에서 수행한 사각모형의 화염냉각 모델로 유도한 경우이고, 두번째는 화염에서의 열손실을 화염으로부터 대기로의 전도 열손실과 화염에서 벽면으로의 열전달을 대류 열전달로 이루어지는 경우이다[11].

첫번째 화염 냉각이 소염망의 벽면을 통해 전도열로 이루어지는 경우 그림 1 과 같이 사각 튜브에 의해 형성된 소염을 생각하면, 화염에서의 에너지 평형은 아래와 같다.

$$\dot{Q}'''V = \dot{Q}_{cond,tot,} \tag{1}$$

여기서 열발생율 $\dot{Q}'''$ 은 평균 반응율로 아래와 같다.

$$\dot{Q}''' = \overline{\dot{m}}_F'''\Delta h_c \tag{2}$$

$\overline{\dot{m}}_F'''$ 은 연료의 평균반응율, Δh_c 은 열료의 반응열이다. 화염 slab 으로 부터의 열손실은 Fourier ' s law 에 의해 아래와 같이 표현된다.

$$\dot{Q}_{cond} = kA\frac{dT}{dx}\bigg|_{\substack{\text{In gas}\\ \text{at wall}}}, \tag{3}$$

이 식에서 열전도율 k 와 온도구배는 화염두께에서의 값이며, A 는 열전도 면적이다. 온도 구배 dT/dx 는 그러나 근사하기가 어렵다. 온도구배의 합리적인 최저값은 중심면(온도 Tb) 로부터

벽면(Tw)를 선형 분포로 가정하는 경우로 (Tb-Tw)/(d/2)이나, 여기서는 임의 상수 b_1 을 도입하여 아래와 같이 정의하였다.

$$\left|\frac{dT}{dx}\right| \equiv \frac{T_b - T_w}{d/b_1} \tag{4}$$

여기서 b_1 은 2 보다 큰수이다. 따라서 식(1)은 다음과 같다.

$$(-\overline{\dot{m}}'''_F \Delta h_c)(\delta dL) = k(2\delta L)\frac{T_b - T_w}{d/b_1} + (2\delta d)\frac{T_b - T_w}{L/b_1} \tag{5}$$

정사각 튜브이므로 d=L 이므로 식 (5)는 다음과 같이 정리될수 있다.

$$d^2 = \frac{4k\, b_1 (T_b - T_w)}{-\overline{\dot{m}}'''_F \Delta h_c} \tag{6}$$

한편, 일차원 화염모델에서 연소속도 S_L 와 화염두께 δ는 아래와 같다[10].

$$S_L = \left[-2\alpha(\nu+1)\frac{\overline{\dot{m}}'''_F}{\rho_u}\right]^{1/2} \tag{7}$$

$$\delta = \left[\frac{-2\rho_u}{(\nu+1)}\frac{\alpha}{\overline{\dot{m}}'''_F}\right]^{1/2} \tag{8}$$

$$\delta = 2\alpha/S_L \tag{9}$$

$$\Delta h_c = (\nu + 1) C_p (T_b - T_u) \tag{10}$$

여기서 ν는 mass oxidizer-fuel-to ratio 이다.

한편, Tw=Tu 로 가정하고, 식(8)과 식(10)을 이용하면 식(6)은 다음과 같이 된다.

$$d = 2\sqrt{2\, b_1}\frac{\alpha}{S_L} = \sqrt{2\, b_1}\left(2\frac{\alpha}{S_L}\right) = \sqrt{2\, b_1}\delta \tag{11}$$

한편, 두번째 모델인 화염에서의 열손실을 화염으로부터 대기로의 전도 열손실과 화염에서 벽면으로의 열전달을 대류 열전달로 이루어지는 경우이다. 화염을 일차원적으로 취급하고, 화염에 대해 에너지 방정식을 적용하면 아래와 같다[11].

$$k\frac{d^2T}{dx^2} - m_a c_p \frac{dT}{dx} = -w q^0 + L \tag{12}$$

여기서 x 는 화염에 수직방향, 단열반응율 $m_a = \dfrac{k}{\delta C_p}$, w 는 화학반응율, q^0 는 화학반응에 의해 방출되는 열, L 은 열손실을 나타낸다. 이 식의 무차원화로부터 아래와 같이 소멸조건이 얻어진다. 상세한 기술은 [11]에 있다.

$$2L(T_{af}) = m_a^2 R_u c_p T_{af}^2 / (kEe) \tag{13}$$

열손실 변수 L 은 사각 튜브를 가정하는 경우 아래와 같다.

$$L = \frac{h(T - T_0)4Ddx}{D^2 dx} = \frac{4h(T - T_0)}{D} = \frac{4k\,Nu_D(T - T_0)}{D^2} \tag{14}$$

여기서 b 를 아래와 같이 정의하자.

$$b = 4\frac{h D_h}{k} = 4 Nu_D \tag{15}$$

식 (15)와 $T=T_{af}$ 때 식(14)를 이용하면 식(13)은 아래와 같은 정리된다.

$$D = \sqrt{2e\beta\, b}\,\delta \tag{16}$$

여기서 β 는 무차원 activation energy parameter 이며, b 는 무차원 열손실 변수이다. 대표적인 β 값은 5 and 15 이다.[11].

$$\beta = E(T_{af} - T_0)/(R_u T_{af}^2) \tag{17}$$

여기서 E 는 activation energy 이다.

소염망의 경우 D=d 가 된다. 즉 (16)은 아래식과 같이 된다.

$$d = \sqrt{2e\beta\, b}\,\delta \tag{18}$$

한편, Williams[11]는 연소 혼합물이 아음속 연소속도로 흐르는 화염두께로부터 단위시간 단위면적 당 방출되는 에너지와 반응열은 화염 두께의 전도열에 의해 냉각된다고 가정하여 연소속도 및 화염두께를 아래와 같이 모델하였다.

$$S_L \approx (1/\rho_u)\sqrt{(k/C_p)w} \tag{19}$$

$$\delta \approx \frac{k}{\rho_o C_p}\frac{1}{S_L} = \frac{\alpha}{S_L} \tag{20}$$

소염두께 계산식 식(9)와 식(20)의 차이점은 식(9)는 연소속도 모델시 화염의 반응지역이 화염의 중앙에 존재한다고 가정하여 반응영역을 화염두께의 1/2 로 가정한 경우이고, 식(20)은 반응 지역 전체를 고려한 경우이다. 따라서 식(10)에서 2 의 factor 가 존재한다.

화염두께 전체를 반응지역으로 고려하는 경우 소염거리는 식(18)과 식(20)으로부터 소염거리는 아래와 같이 표현된다.

$$d = \sqrt{2e\beta\, b}\,\frac{k}{\rho_o C_p}\frac{1}{S_L} \tag{21}$$

여기서 실제 실험에 측정이 가능한 화염속도 V_f 는 기연가스가 정지상태인 경우 연소속도 S_L 과 아래와 같은 상관식을 갖는다[12].

$$V_f = \frac{\rho_u}{\rho_b} S_L \tag{22}$$

따라서 소염거리는 식(11)을 화염속도를 이용하여 정리하면 아래와 같다.

$$d = 2\sqrt{2\,b_1}\left(\frac{k}{\rho_u c_p}\frac{\rho_u}{\rho_b V_f}\right) = 2\sqrt{2\,b_1}\left(\frac{k\,T_u}{C_p \overline{M}}\right)\left(\frac{\rho_u}{\rho_b}\frac{1}{P}\frac{1}{V_f}\right) \tag{23}$$

$$d = C_1 C\left(\frac{\rho_u}{\rho_b}\frac{1}{P}\frac{1}{V_f}\right) \tag{24}$$

여기서,

$$C_1 = 2\sqrt{2b1}\ \text{(b1 >2)} \tag{25}$$

$$C = \left(\frac{k\,T_u}{C_p \overline{M}}\right) \tag{26}$$

한편, 식(21)도 화염속도를 이용하여 정리하면 아래와 같다.

$$d = \sqrt{2e\beta\, b}\left(\frac{k\,T_u}{C_p\,\overline{M}}\right)\left(\frac{\rho_u}{\rho_b}\frac{1}{P}\frac{1}{V_f}\right) \tag{27}$$

$$d = C_2 C\left(\frac{\rho_u}{\rho_b}\frac{1}{P}\frac{1}{V_f}\right) \tag{28}$$

여기서,

$$C_2 = \sqrt{2e\beta\, b} \tag{29}$$

$$\rho_u = \frac{P}{\left(R_u / MW_{mix}\right)T_u} = \frac{P\,MW_{mix}}{R_u\,T_u} \tag{30}$$

$$MW_{mix} = x_{h2}\,MW_{h2} + (1 - x_{h2})\,MW_{air} \tag{31}$$

$$\overline{M} = \frac{MW_{mix}}{R_u} \tag{32}$$

Ru 는 universal constant 이다. 한편, 식(5)에 벽면으로의 전도와 대류를 동시에 고려하는 경우를 모의하기 위해 전도열을 선형 분포(b_1=2)로 가정하면 식(5)는 다음과 같다.

$$(-\overline{\dot{m}}_F'''\Delta h_c)(\delta dL) = k(2\delta\, d)\frac{T_b - T_w}{d/2} + (2\delta\, L)\frac{T_b - T_w}{L/2} + (4\delta\, d)\frac{k}{d}Nu_d\, h_g(T_b - T_w) \tag{33}$$

식(33)을 d 에 대해 정리하면

$$d^2 = \frac{8k(T_b - T_w)}{-\overline{\dot{m}}_F'''\Delta h_c} + \frac{4k\,Nu_d(T_b - T_w)}{-\overline{\dot{m}}_F'''\Delta h_c} \tag{34}$$

식(7)부터 식(11)의 과정을 거치면 식(34)는 소염거리로 아래와 같이 정리된다.

$$d = \frac{2\alpha}{S_L}\sqrt{4 + 2\,Nu_d} = \sqrt{4 + 2\,Nu_d}\,\delta \tag{35}$$

이를 화염속도를 이용하여 정리하면 아래와 같다.

$$d = 2\sqrt{4 + 2\,Nu_d}\left(\frac{k}{\rho_u c_p}\frac{\rho_u}{\rho_b V_f}\right) = 2\sqrt{4 + 2\,Nu_d}\left(\frac{k\,T_u}{C_p\,\overline{M}}\right)\left(\frac{\rho_u}{\rho_b}\frac{1}{P}\frac{1}{V_f}\right) \tag{36}$$

여기서 f 를 아래와 같이 정의하자

$$f = 2\sqrt{4 + 2\,Nu_d} \tag{37}$$

따라서 식(36)의 소염거리는 아래와 같다.

$$d = fC\left(\frac{\rho_u}{\rho_b}\frac{1}{P}\frac{1}{V_f}\right) \tag{38}$$

3. 해석 결과

표 1 은 계산에 사용된 물질량을 나타낸다. 먼저 실험에서 사용된 수소농도에 조건에 대해 식(24)과 식(28)에서 계수를 제외한 나머지 즉 팽창비, 압력 및 화염속도의 관계 즉 $(\rho_b/\rho_u)P\,V_f$ 를 소염거리가 0.3㎜ 일 때 계산하였으며, 이를 이용하여 실험 압력 조건에서 화염속도를 계산하였다. 이 화염속도가 주어진 조건에 대해 소염망의 성능을 유지 할수 있는 최대 화염속도가 된다. 식(24)를 적용한 결과가 표 2 에 있다. 이때 온도 분포는 선형분포(b1=2)를 가정하였다. 수소농도가 30%인 0.3, 0.5 및 1 기압에서 각각 26.21, 15.73, 7.86m/s 의 화염속도까지 소염이 가능한 것으로 나타났으며, 대기압, 수소농도 10%인 경우 2.9m/s 의 화염속도까지 소염이 가능하며, 1.4 및 2 기압의 경우 2.07m/s 와 1.45m/s 까지 소염이 가능한것으로 나타났다. 즉 압력이 증가 할수록 동일수소 농도에 대해 소염망이 성능을 유지 할수 있는 최대화염속도는 줄어들었다.

한편, 식(28)을 적용하였을 경우 b 값의 계산은 일정열속조건과 일정 온도 조건[13]에 따라 달라 질수 있다. 먼저 열속이 일정한 경우(Nud=3.63)가 표 3 에 같다. 수소농도가 30%인 0.3, 0.5 및 1 기압에서 각각 103.7, 62.24, 31.12m/s 의 화염속도까지 소염이 가능한 것으로 나타났으며, 10% 수소농도에서 1, 1.4 및 2 기압에서 각각 11.48, 8.2, 5.74m/s 의 화염속도까지 소염이 가능한 것으로 나타났다. 식 (28)을 적용하였을 경우 온도가 일정한 경우(Nud=2.98)를 가정한 경우 표 4 와 같다. 수소농도가 30%인 0.3, 0.5 및 1 기압에서 각각 93.99, 55.4, 28.2 m/s 의 화염속도까지 소염이 가능한 것으로 나타났으며, 10% 수소농도에서 1, 1.4 및 2 기압에서 각각 10.4, 7.43, 5.2m/s 의 화염속도까지 소염이 가능한 것으로 나타났다. 이들 경우 화염지역을 전체로 고려하면 소염최대 속도는 2 배가 된다.

이들 해석 결과를 두개의 실험결과와 비교하였다. 소형실험장치는 그림 2 에서처럼 모델 격실, 혼합실, 가시화 장치로 구성되어 있다. 모델 격실은 그림 3 과 같이 30×20×20 mm depth 의 격실이 길이 40㎜, 내경 10㎜ 를 가진 관으로 연결되어 있다. 화염 전파과정의 가시화를 위해 가시화 창이 설치되어 있다. 화염전파를 시작을 위해 첫번째 격실의 한쪽 면에 점화기가 설치되어 있다. 소염망은 통로의 중앙에 설되어 있다. 초기 압력을 0.25 기압부터 1 기압 까지 변경하였으며, 수소농도는 30%로 하였다. 그림 4 는 소염망의 모형을 보여주고 있다. 소염거리는 기존의 실험 결과[7]를 바탕으로 0.3㎜ 를 선정하였다. 그림 5 는 압력이 대기압보다 낮고, 수소농도가 30%에서 수행된 소형실험결과를 보여준다. 이를 이용하여 화염속도를 계산한 결과가 표 5 에 있다. 표 5 에서 보듯이 0.3bar 의 경우 18.75m/s 의 경우 소염이 이루어 졌으나 25m/s 의 경우 소염이 이루어지지 않았다. 따라서 식(24)를 적용한 표 2 에서 소염 최대 화염속도가 26.21m/s 인 것을

고려하면 25㎧ 의 경우 실험에서 소염이 이루어져야 하나 실제로 소염이 이루어지지 않아 해석결과와 차이를 보인다. 0.5bar 와 1Bar 의 경우 실험에서 20.8㎧ 와 21.43㎧ 인 경우 소염이 이루어지지 않았는데, 표 2 에서 소염 최대 화염속도가 0.5Bar 에서 15.73 ㎧ 와 1.0Bar 7.86㎧ 이므로 소염이 이루어지지 않았다. 그러나 식(28)을 적용하여 수소농도 30%, 압력 0.3bar 에 대해 대해 일정열속을 가정한 표 3 와 일정 온도를 가정한 표 4 에서 소염 최대 속도가 각각 103.74㎧ 와 각각 93.99㎧ 로 실험결과와 많은 차이를 보였다.

그림 6은 중형 규모의 실험장치 구성도를 보여주고 있다. 실험장치는 크게 연소실, 화염 전파상을 얻기 위한 섀도우 시스템, 온도 및 압력 계측을 위한 측정 시스템으로 구성되어 있다. 그림 7는 실험에서 사용된 연소실 및 주요 계측 자료 위치를 보여주고 있다. 연소실은 3개의 소형 격실(280x280x300 L mm)을 직렬로 연결하여 전체길이가 900 mm가 되도록 하였다. 각 격실의 양측면에는 연소 기간 동안 화염전파 과정을 가시화 하기 위해 180x180 mm의 광학 유리를 사용하였다. 수소 주입시 수소의 균일한 혼합을 유도하기 위해 팬을 수소 주입구의 반대 방향의 격실 벽면(그림 7참조)에 설치하였다. 전기 불꽃 점화기가 첫번째 격실 벽면 중앙(그림 7 참조)에 설치되어 불꽃 핵을 유도하기 위해 설치하였다. 점화기의 에너지 크기는 최대 400 V 인가 시 16.5 kV로 점화가 이루어질 수 있다. 본 실험에서는 인가 전압의 크기를 140 V로 맞추어 실험하였으며, 점화기의 전극 봉 간극은 약 2 mm이다. 첫번째 격실의 Ch 1-3과 두 번째 격실의 Ch 2-1에 동압계를 설치하여 화염전파 속도를 측정하고자 하였다. 세 번째 격실의 Ch 3-3은 정압계로 이 정압계를 이용하여 초기 수소 농도를 제어한다. 정압 계측은 SIEMENS, 7MF4032를 이용하였으며, 동압은 PCB Piezotronics Inc. W112A02를 이용하였다. 측정된 온도 및 압력은 DAS로 전달되어 PC로 저장 된다. 온도는 K-type 열전대의 sheath를 벗겨 끝단을 용접하여 사용하였다. 그림 3은 소염망을 보여주고 있다. 소염거리 0.3mm의 망이 사용되었다. 연소실내 기기나 격실간 소염망을 설치하지 않은 경우 연소실 상부에는 첫번째 및 두 번째 격실 중앙(Ch 1-2 및 2-2)에 연소 기간 동안 온도 측정을 위해 열전대를 설치하였다. 그림 8은 압력이 대기압 이상이고 수소농도가 약 8~10% 에서 수행된 실험 결과를 보여주고 있다.

그림 8 의 (a)는 소염망이 설치되지 않은 경우에 대한 일반적인 화염전파에 대한 shadow images 를 보여주고 있우며, (b)와 (c)는 소염망이 설치되었음에도 불구하고 화염이 전파한 경우를 보여주고 있다. 이 그림에서 화염속도는 화염전파 후 압력이 역방향으로 전파되어 화염속도를 감소시키므로 화염속도 계산시 화염이 window 의 중간까지 진행 될 때 시간을 고려하여 계산되었다. 그림 8(d)와 (e)는 화염이 전파하지 않는 것을 보여주고 있다. 초기 압력이 높을수록(e) 화염의 흔적이 소염망 뒤에도 존재하는 것으로 보아 화염전파 가능성이 높았음을 알수 있다.

표 6 은 여러 실험결과에 대한 화염속도를 계산한 결과이다. 표 6 에서 보듯이 수소농도 8%, 1 기압에서 5㎧ 의 경우 소염이 이루어 지지 않았으며, 이는 표 2 에서 2.84㎧ 가 소염 최대 화염속도로 나타나 실험과 일치한다. 수소농도 10%, 1.3 기압, 수소농도 10%의 경우 표 2 에 나타나지 않았으나 소염 최대가 속도가 2.9㎧ 보다 작아 표 6 의 10㎧ 의 화염은 소염이 불가능하여 실험과 일치한다. 그림 9 는 대기압 이상 여러 압력조건에서 화염가속장치를 이용하였을 경우에 대한 수소농도 약 10%에 대한 화염속도를 보여주고 있다. 화염속도는 약 1.65㎧ 정도이다. 이들 실험조건에서 화염은 모두 전파하지 못하였다. 1.4bar 의 경우 표 2 에서

수소농도 10%의경우 소염 최대 속도가 2.07㎧ 이나 실험에서 약 1.65㎧ 까지 소염이 되는 것으로 나타났다. 그러나 1.8bar 의 경우 비록 화염속도는 측정하지 않았으나 유사한 화염속도를 가정할 때 소염이 이루어졌으나 2.0Bar 의 경우 소염이 이루어 지지 않았다(그림 10 참조). 즉 2.0Bar 이상의 경우 실험에서는 소염 최대속도는 약 1.65㎧ 이나 해석에서는 표 2 에서 소염최대 화염속도가 약 1.45㎧ 로 나타났다. 따라서 압력이 대기압 보다 높고 수소농도가 약 10%정도인 경우 식(24)는 잘 맞지 않았다. 한편, 식(28)을 적용하여 일정 열속을 가정한 표 3 와 일정 온도를 가정한 표 4 에서 대기압, 수소농도 10%에서 대기압의 경우 소염 최대 속도가 11.48 및 10.4㎧ 로 실험결과와 많은 차이를 보였다.

따라서 대기압 이상 수소농도 8~10% 부근의 소염 최대 속도를 고려하기 위해 식(24)에서 계수 b1 을 2 에서 2.5 로 조정한 경우가 하는 경우가 표 7 에 있다. 이 경우 실험과 해석이 잘 일치한다. 그러나 화염면에서의 전도와 벽면으로 대류열전달을 가정한 식(28)의 경우 앞서 지적하였듯이 화염속도 계산 시 반응 지역을 1/2 로 줄인다 하여도 실험결과를 잘 예측하지 못한다. 그러나 반응지역을 소염두께 전 영역으로 하고 우변에 3.5 를 가정하는 경우 실험과 잘 일치한다.

한편, 벽면으로의 전도와 대류를 동시에 고려한 식(38)의 계산결과가 표 8 에 있다. 표 8 에서 전도와 대류를 고려하는 경우 소염 최대 화염속도를 실제보다 over estimate 하는 경향이 있다. 앞서 지적하였듯이 벽면에서 전도만 고려하는 경우 소염 최대속도를 underestimate 한다.

한편, 화염속도와 초기압력사이의 관계를 실험에서 고찰하기 위해 식(24)와 식(28)에서 각각 앞의 계수를 A 라 할 때 즉 소염거리가 팽창비, 화염속도의 역수 압력의 역수를 제외한 나머지 변수를 모두 어떤 일정변수(A)라 가정 할 때 소형 실험 및 중형실험의 결과가 표 5 와 표 6 의 맨 오른쪽 칸에 표시되어 있다. 소형 실험인 수소농도 30%인 경우 표 5 에서 화염은 0.93A 보다 작은 경우 전파하였다. 반면 화염은 1.24A 보다 큰 경우는 화염이 전파하지 못하였다. 그러므로 0.3㎜ 의 소염거리를 가진 소염망을 가진 격실간 소염실험에서 최대 소염 전파 속도는 0.9A 와 1.2A 사이에 존재한다. 한편, 압력이 대기압 이상이고 수소농도가 10% 정도인 경우 실험결과인 표 6 에서 화염속도는 소염망 위치의 후단에서 측정되었다. 표 6 에서 quenched 라고 표시된 경우는 소염망이 없이 측정된 화염속도이고 propagation 이라고 표시된 경우는 소염망이 설치된 경우라도 화염이 전파한 경우니다. 소염망이 설치된 경우 소염은 1.8Bar 이하에서는 거의 모든 경우 소염이 이루어 졌으나 2.0Bar 이상에서는 화염이 전파하였다. 표 6 에서 0.65A 이하 인 경우 화염은 전파하였으며, 1.59C 이상인 경우 소염이 이루어졌다. 따라서 소형 실험과 중형 실험에서 소염기준은 1.0A 로 평가할수 있으며, 해석결과도 이 값이 1 일때 실험결과와 가장 잘 일치한다. 즉 팽창비, 화염속도 및 초기압력에 대한 소염기준은 아래와 같다.

$$\frac{\rho_b}{\rho_u}\frac{1}{p}\frac{1}{V_f}\approx 1 \qquad (39)$$

4. 결과 및 토의

중대사고 시 아음속연소에서 초음속으로 천이 방지를 위해 사용 될수 있는 소염망에 대한 화염속도와 초기압력을 이용한 소염망의 성능을 평가 할수 있는 모델을 개발하였다. 개발된 모델을

평가 결과 화염지역에서 벽면으로의 열전달을 전도로 모델하는 경우가 실험을 가장 잘 근사하게 예측하였으나 정확한 모의를 위해서는 전도모의시 선형분포가 아니라 다른 분포를 가정(계수를 조정)하여야만 실험과 보다 더 잘 일치하였다. 또한, 소염거리가 팽창비, 화염속도의 역수 압력의 역수가 약 1에서 소염기준이 되었다. 향후 압력증가시 화염속도에 대한 확실한 검증과 원전 적용을 위해 수증기가 존재할 때에 대한 모델 개발 및 실험이 계속되어야 한다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. NASC, 1980, “Three Mile Island – Unit 2 Accident,” Nuclear Safety Analysis Center Report
2. YGN 3&4, FSAR
3. KNGR, PSAR
4. Nuclear Safety NEA/CSNI/R(99)16, “State of Art Report on Containment Thermal-hydraulics and Hydrogen Distribution”, June 1999
5. S. W. Hong, H. D. Kim, H. J. Kim, S. H. Chung: Installation method of Quenching grid for Hydrogen Control in Pressurized Water Reactors, Patent Registration No: 0335830, Korea, 2002
6. H. J. Kim, S. W. Hong, H. D. Kim, S. Y. Yang, S. H. Chung: Quenching Distance Measurement for the Control of Hydrogen Explosion, CD-Rom Proc., 18th ICDERS, USA, 2001
7. Phillips, H., 1963, “On the Transmission of Explosion through a Gap Smaller than the Quenching Distance,” Combustion and Flame, 7, pp. 129-135
8. Seong-Wan Hong, Yong-Seung Shin, Jin-Ho Song, “PERFORMANCE TEST OF THE QUENCHING MESHES FOR HYDROGEN CONTROL”, Journal Nuclear Science and Technology, AESJ, in progress
9. S.W. Hong, Y.S. Shin, J. H. Song, H. D. Kim, H.J. Kim, “Visualization study of flame propagation during hydrogen combustion with quenching mesh”, PSFVIP-4, June 3-5, 2003
10. Stephen R. Turns, “An Introduction to Combustion: Concepts and Applications”, 2nd Edition, Mc Graw Hill, 2000
11. Williams, F. A., “*Combustion Theory*”, 3rd Ed., Addison-Wesley, Menlo Park, CA, 1985
12. EPRI, “Technical Report 12.3: Hydrogen Combustion in Reactor Containment Buildings”, Sep. 1983.
13. Ozisik M. Necati, “Basic Heat Transfer”, MaGRAW-Hill KOGAKUSHA, LTD, 1977.

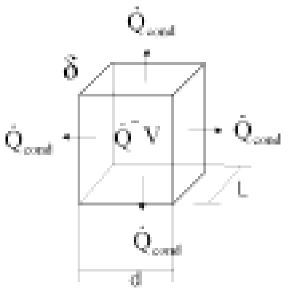


Fig. 1 Schematic of flame quenching for square tube

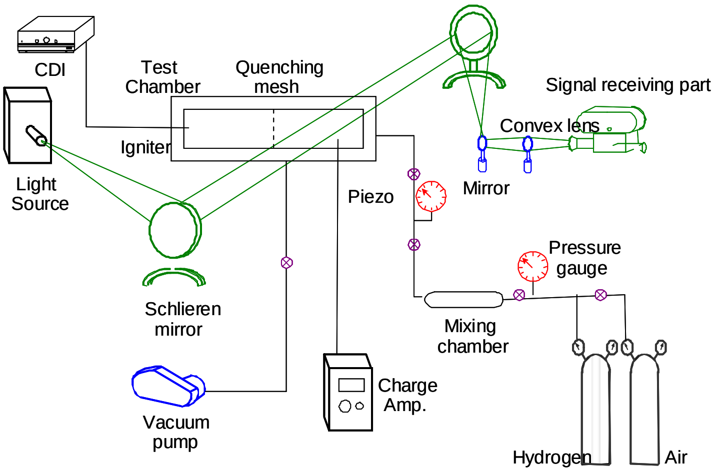


Fig. 2 Schematic of Experimental Apparatus

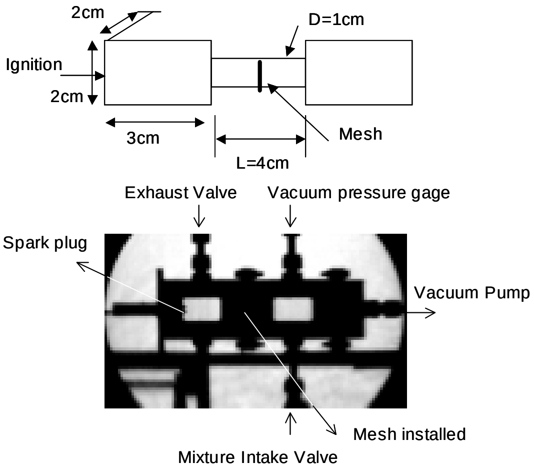


Fig. 3 Combustion Chamber

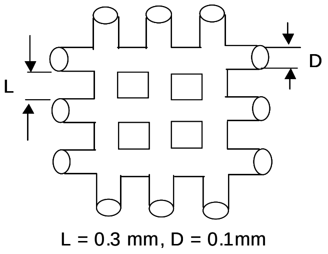
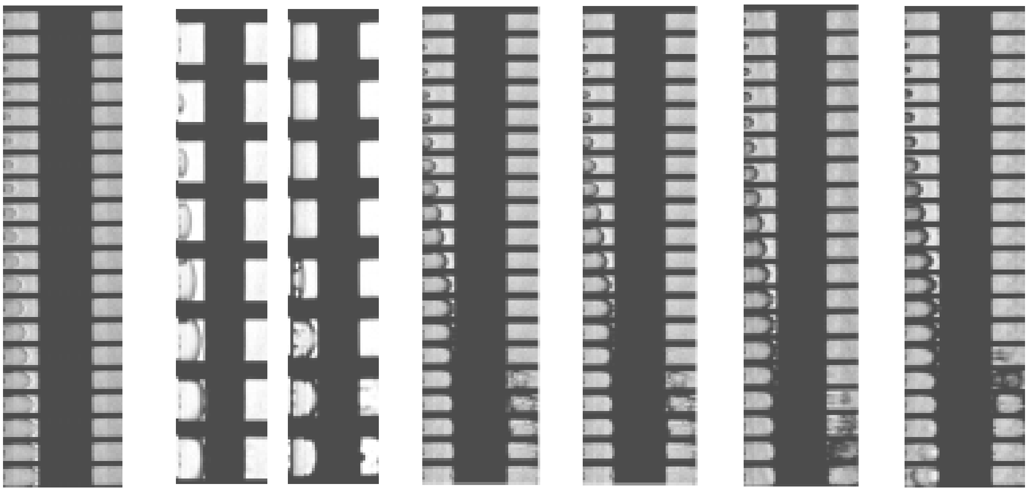


Fig. 4 Schematic of Quenching Mesh



(a)[0.25,0.1] (b)[0.3,0.2] (c)[0.3,0.2] (d)[0.45,0.1] (e)[0.5,0.1] (f)[0.75,0.1] (g)[1.0,0.1]

Fig. 5 Schlieren Photographs [Pressure(Bar), Time interval(ms)]

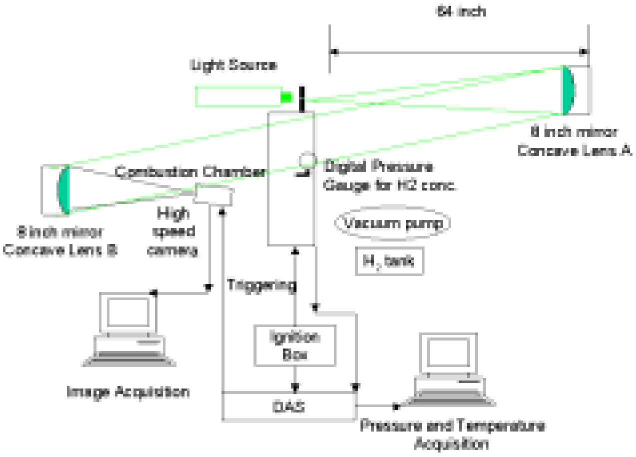


Fig. 6 Schematic of Experimental Apparatus

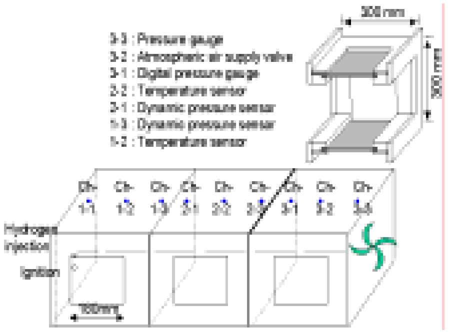
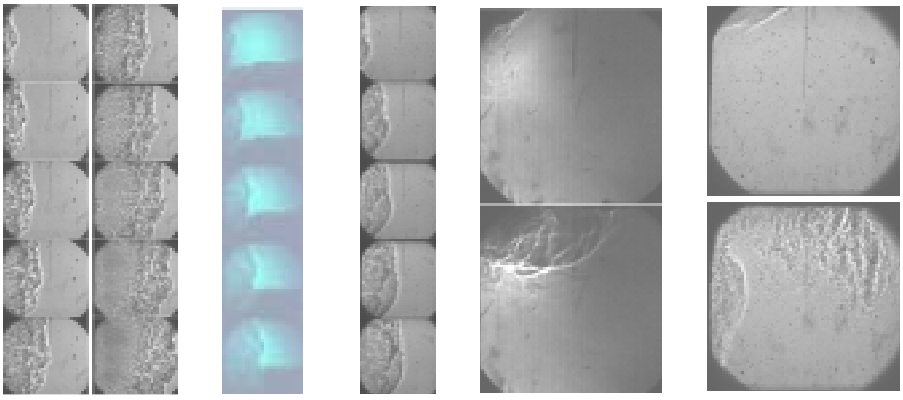


Fig. 7 Schematic of Combustion Chamber



(a)[1.4,11,9.1] (b)[1,8,3.6] (c)[1.3,10,2.2](d)[1,10,315]

(e)[1.3,10,203]

Fig. 8 Shadow Photographs [Pressure (Bar), H2 Conc. (%), Time interval (ms)]

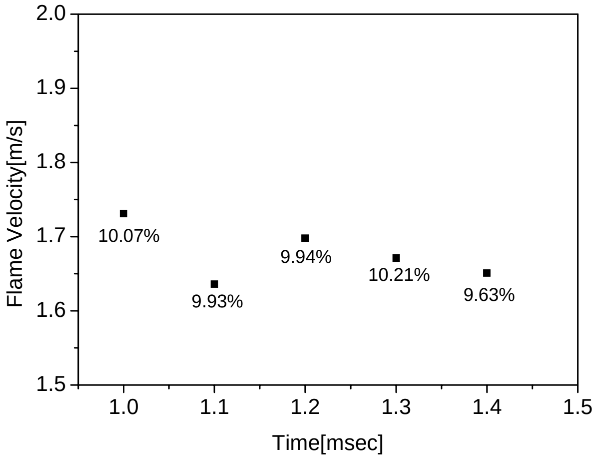


Fig. 9 Flame Velocity with Pressure

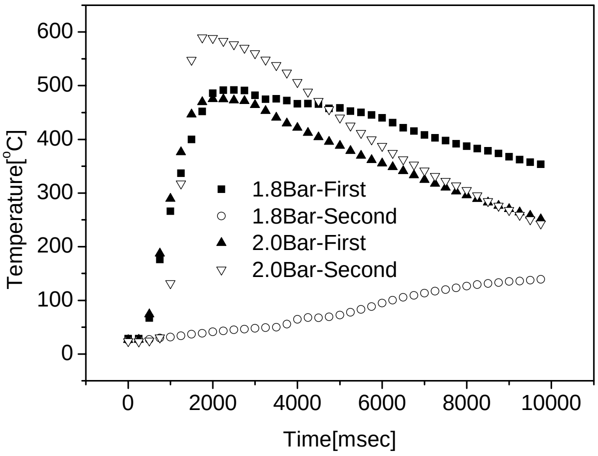


Fig. 10 Compartment gas temperature during burn

Table 1. Material Properties

XH2	MWmix	Ru	$\overline{M} = MW_{mix}/R_U$	T_f,ad	T_u	$T_{avg} = \frac{(T_{f,ad}+T_u)}{2}$	Cp at Tavg	k at Tavg	$C = \frac{\lambda T_u}{C_p \overline{M}}$
Mole Fraction	Kg/ kmoe	J/Mole-K	g-K/J	K	K	K	J/kg-K	W/m-K	
0.08	26.702	8.31434	3.21E-03	2318	300	1309	1190.62	0.08362	6.561
0.09	26.434	8.31434	3.18E-03	2318	300	1309	1190.62	0.08362	6.627
0.1	26.165	8.31434	3.15E-03	2318	300	1309	1190.62	0.08362	6.695
0.11	25.897	8.31434	3.11E-03	2318	300	1309	1190.62	0.08362	6.765
0.3	20.795	8.31434	2.50E-03	2318	300	1309	1190.62	0.08362	8.424

Table 2. Calculation Results Considering Conduction to Wall(b1=2)

XH2	b1	C1	C1*C	d	$\frac{\rho_b}{\rho_u} P V_f$	$\frac{\rho_u}{\rho_b}$	Vf P=1	Vf P=1.4	Vf p=2
0.08	2	4	26.24	3.00E-04	1.143	3.250	2.84	2.03	1.42
0.09	2	4	26.51	3.00E-04	1.132	3.250	2.87	2.05	1.44
0.1	2	4	26.78	3.00E-04	1.120	3.250	2.90	2.07	1.45
0.11	2	4	27.06	3.00E-04	1.109	3.250	2.93	2.09	1.47
0.3	2	4	33.70	3.00E-04	0.89	7.000	26.21 1)	15.73 2)	7.86 3)

When 1), 2) and 3) are 0.3bar, 0.5bar and 1.0bar, respectively

Table 3. Calculation Results at Constant Heat Flux to Wall

XH2	베타	b	C2	C2*C	$\frac{\rho_b}{\rho_u} P V_f$	$\frac{\rho_u}{\rho_b}$	Vf at P=1	Vf at P=1.4	Vf at P=2
0.08	3.18	14.52	15.83	103.87	0.289	3.250	11.25	8.04	5.63
0.09	3.18	14.52	15.83	104.93	0.286	3.250	11.37	8.12	5.68
0.1	3.18	14.52	15.83	106.00	0.283	3.250	11.48	8.20	5.74
0.11	3.18	14.52	15.83	107.10	0.280	3.250	11.60	8.29	5.80
0.3	3.18	14.52	18.83	133.38	0.225	7.000	103.74 1)	62.24 2)	31.12 3)

When 1), 2) and 3) are 0.3bar, 0.5bar and 1.0bar, respectively

Table 4. Calculation Results at Constant Temperature to Wall.

XH2	베타	b	C2	C2*C	$\frac{\rho_b}{\rho_u} P V_f$	$\frac{\rho_u}{\rho_b}$	Vf at P=1	Vf at P=1.4	Vf at P=2
0.08	3.18	11.92	14.35	94.11	0.319	3.250	10.20	7.28	5.10
0.09	3.18	11.92	14.35	95.07	0.316	3.250	10.30	7.36	5.15
0.1	3.18	11.92	14.35	96.05	0.312	3.250	10.40	7.43	5.20
0.11	3.18	11.92	14.35	97.04	0.309	3.250	10.51	7.51	5.26
0.3	3.18	11.92	14.35	120.85	0.248	7.000	93.99 1)	55.4 2)	28.2 3)

When 1), 2) and 3) are 0.3bar, 0.5bar and 1.0bar, respectively

Table 5. Test Results at Sub-atmospheric pressures

	Pressure [Bar]	Flame Speed [m/s]	Quenching Distance
Quenched	0.25	15	1.87A
	0.3	18.75	1.24A
Propagation	0.3	25	0.93A
	0.45	23.08	0.67A
	0.5	20.08	0.61A
	0.75	20.00	0.47A
	1	21.43	0.33A

Table 6. Test Results near atmospheric pressures

	Pressure[Bar]	Flame Speed [m/s]	H2 Conc. [%]	Quenching Distance
Quenched	1	1.49	9.91	2.18A
	1.1	1.75	10.66	1.69A
	1.2	1.4	10	1.93A
	1.3	1.54	9.88	1.62A
	1.4	1.46	9.68	1.59A
	1.8	1.65*	¯10	1.09C
Propagation	1	5	8	0.65A
	1.3	8.12	10	0.31A
	2.0	1.65*	¯10	0.99C
	2.2	1.65*	¯10	0.9C

* Assumed from Fig. 9

Table 7. Calculation Results Considering Conduction to Wall(b1=2.5)

XH2	b1	C1	C1*C	d	$\frac{\rho_b}{\rho_u} P V_f$	$\frac{\rho_u}{\rho_b}$	Vf P=1	Vf P=1.4	Vf p=2
0.08	2.5	4.47	29.34	3.00E-04	1.023	3.250	3.18	2.27	1.59
0.09	2.5	4.47	29.64	3.00E-04	1.012	3.250	3.21	2.29	1.61
0.1	2.5	4.47	29.94	3.00E-04	1.002	3.250	3.24	2.32	1.62
0.11	2.5	4.47	30.25	3.00E-04	0.992	3.250	3.28	2.34	1.64
0.3	2.5	4.47	37.67	3.00E-04	0.796	7.000	29.3 1)	17.85 2)	8.79 3)

When 1), 2) and 3) are 0.3bar, 0.5bar and 1.0bar, respectively

Table 8. Calculation Results Considering Conduction and Convection to Wall

XH2	f	C1*C	d	$\frac{\rho_b}{\rho_u} P V_f$	$\frac{\rho_u}{\rho_b}$	Vf P=1	Vf P=1.4	Vf p=2
0.08	6.31	41.40	3.00E-04	0.725	3.250	4.48	3.20	2.24
0.09	6.31	41.82	3.00E-04	0.717	3.250	4.53	3.24	2.27
0.1	6.31	42.25	3.00E-04	0.710	3.250	4.58	3.27	2.29
0.11	6.31	42.68	3.00E-04	0.703	3.250	4.62	3.30	2.31
0.3	6.31	53.16	3.00E-04	0.564	7.000	41.34 1)	24.81 2)	12.40 3)

When 1), 2) and 3) are 0.3bar, 0.5bar and 1.0bar, respectively