2003년 춘계 학술 발표 논문집
한국원자력학회

수소 연소 시 기기 보호 방안 연구

A Study on Equipment Protection during Hydrogen Burn

홍 성완, 신 용승, 송 진호, 김 희동
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

중대사고 시 수소 연소기간동안 주요 기기 보호 방안 연구를 위해 모델 기기(10x10x10 ㎝) 주변에 소염거리 0.3㎜의 소염 망을 기기 표면으로부터 25㎜ 떨어진 곳에 설치하여 소염 망의 역할을 실험하였다. 모델 기기의 건전성 평가를 위해 약 300x300x900㎜의 격실의 한쪽 끝에서 연소를 시작하여 화염 통로 중앙에 설치된 모델 기기의 표면에서 약 10㎜되는 곳에 열전대를 설치하여 소염망이 있는 경우와 없는 경우에 대해 연소기간동안 온도를 측정하였다. 이 때 연소실의 방향은 수평과 수직으로 하였다. 온도 측정결과 소염 망이 없는 경우 열전대의 위치에 따라 다르지만 대략 최대 250 ˚C부터 350 ˚C 사이에 분포를 보였으나 소염 망이 있는 경우 100 ˚C 미만을 유지하였다. 중대사고시 필수기기의 제작사 검증 온도는 약 190 ˚C부터 250 ˚C 사이에 존재하므로 기기 주변에 설치된 소염망은 연소 기간동안 기기 보호 역할을 할 수 있었다.

Abstract

The experiment on study for equipment protection during hydrogen burn was carried out. When the quenching mesh with 0.3 mm quenching distance surrounds a model equipment (10x10x10cm), the role of quenching mesh was experimentally examined. The thermo-couple is installed at 10mm far from the model equipment surface. The dimension of combustion chamber is 300x300x900 mm. The ignition starts at the one-end and propagates to the other-end. The gas temperature is measured using thermo-couple during hydrogen burn with mesh or without mesh around the model equipment. The direction of the chamber is horizontal or vertical. The maximum gas temperature is about 250 ˚C to 350 ˚C at the surface of the model equipment for without mesh. Meanwhile, the maximum gas temperature is less than 100 ˚C with mesh. In conclusion, quenching mesh could play a role of protecting a equipment during hydrogen burn because the verification temperature of the equipment by manufacture is from 190 ˚C to 250 ˚C.

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 수소제어는 필수적으로 수소연소를 동반한다. 이 경우 수소연소에 의해 격납건물 내 주요 기기들이 손상을 입을 가능성이 매우 크다. 중대사고 시 기기 건전성 평가는 주로 Lumped 코드를 사용하여 기기가 위치한 격실에서 수소연소가 발생시 가스 온도를 이용하여 기기의 건전성 유무를 평가하여 왔다[5]. 그러나 이 경우 기기 표면에서의 온도 라기보다는 격실 내부의 평균 온도 이기 때문에 기기 주변에서 연소가 발생하는 경우에 대한 정량적 평가라고 보기는 어려우며, 실제 일부 격실에서 매우 높은 온도로 가스 온도가 상승하고 있다.

원전에서 소염 망을 이용한 수소제어에 대한 연구에 대한 특허를 획득 후[6], 먼저 소수가스에 대한 소염거리 측정 연구[7]를 수행하였다. 수소가스에 대한 소염거리는 압력이 증가할수록 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[8] 하여 약 0.3㎜로 결정하였다. 이 소염거리를 가진 소염 망을 제작하여 소염 망을 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 연구하였다[9, 10]. 즉 소염 망을 격실 사이에 설치하였을 경우 화염은 연소가 시작된 격실에서만 연소가 이루어지며 소염 망이 설치된 이후 격실로 화염이 전파하지 않음을 알 수 있었다. 본 연구에서는 수소연소 시 소염 망을 이용하여 기기 보호 방안을 연구하였다.

2. 실험장치

2.1 실험장치

그림 1은 실험장치 구성도를 보여주고 있다. 실험장치는 크게 연소실, 화염 전파 상을 얻기 위한 새도우 시스템, 온도 및 압력 계측을 위한 측정 시스템으로 구성되어 있다. 그림 2는 실험에서 사용된 연소실 및 주요 계측 자료 위치를 보여주고 있다.

연소실은 3개의 소형 격실(300x300x300 ㎜)을 직렬로 연결하여 전체길이가 900 ㎜가 되도록 하였다. 각 격실의 양 측면에는 연소 기간 동안 화염전파 과정을 가시화 하기 위해 180x180 ㎜의 광학 유리를 사용하였다. 수소 주입시 수소의 균일한 혼합을 유도하기 위해 팬을 수소 주입구의 반대 방향의 격실 벽면(그림 2참조)에 설치하였다. 전기 불꽃 점화기가 첫번째 격실 벽면 중앙(그림 2 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 ㎜이다. 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 DAS

로 전달되어 PC로 저장 된다. 온도는 K-type 열전대의 sheath를 벗겨 끝단을 용접하여 사용하였다. 그림 3은 소염망을 보여주고 있다. 소염거리 0.3㎜의 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 기간동안 온도 측정을 위해 열전대를 설치하였다.

모델기기의 건전성 실험을 위해 연소실의 중앙 즉 두 번째 격실의 중앙에 그림 4와 같은 모델 기기를 설치하였다. 모델 기기의 크기는 100x100x100 ㎜로 되어 있으며, 모델 기기의 표면에 홈을 내 지지대의 길이를 조정함으로써 기기 표면에서 소염 망까지의 거리를 조절 할 수 있도록 하였다. 모델기기 건전성 실험에서는 그림 2의 Ch2-2의 T/C을 설치하지 않고 대신 두번째 격실의 중앙 하부를 통해 T/C이 설치되었다. 모델 기기 주변의 T/C 위치는 그림 4의 중앙의 지지대 상부에 위치한 구멍이 열전대의 위치로 열전대의 끝 부분은 모델 기기 표면으로부터 10㎜ 떨어진 곳이 위치하도록 하였다. 4개의 열전대가 설치되었으며, 4개의 위치는 화염 전파면, Mirror-I 과 평행인 면, Mirror-II와 평행인 면(그림 1 참조), 그리고 상부면에 설치하였다. 그림 5는 기기 보호를 위해 설치된 소염 망의 사진을 보여주고 있으며, 그림 6은 소염망이 설치 후 연소실에 위치한 모델 기기의 사진을 보여주고 있다.

수소연소 기간동안 화염 전파 상을 얻기 위한 계측 시스템은 그림 1에서 보는 것처럼 광원으로 각각 Xe lamp와 Tungsten lamp가 사용되었으며, 광원으로부터 점 광원을 얻기 위해 F8의 Convex mirror가 사용되었다. Convex Mirror로부터 Mirror-I의 거리는 점 광원의 초점거리와 Mirror-I의 크기(8 inch)에 의해 8x8=64 inch 즉 1.63 m로 하였다. Mirror-I에서 평행광으로 반사된 beam이 연소실을 통과하도록 하였다. 연소실을 통과한 빛은 Mirror-II에 반사되어 그림 2에서처럼 고속카메라의 초점에 모이게 된다. 이때 Mirror-II에 반사된 빛을 고속 카메라에 초점에 맺히게 하게 위해 Mirror-II의 방향을 옆쪽으로 옮기게 되는데 Mirror-II에서 고속카메라로 꺾인 각을 작게 할수록 정확한 상을 얻을 수 있다. 즉 연소실과 Mirror-II의 길이를 길게 하는 것이 좋다. 본 실험에서는 연소실과 Mirror-II의 거리를 약 2m로 하였으며 꺾인 각의 크기는 약 20도 이다.

2.2 실험 절차

실험 전에 먼저 새도우 시스템 설치, 고속카메라 동기화, DAS, 점화기에 대한 성능 실험을 수행한다. 새도우 시스템은 먼저 Mirror의 위치, 광원의 강도, 연소실의 위치 및 방향을 조절하여 고속카메라로부터 깨끗한 상이 나올 수 있도록 조절한다. 새도우 시스템의 설치가 완료되면 고속카메라를 점화와 함께 동기화가 잘 이루어 지는지 확인하다. 화염 전파 과정은 고속카메라(Vision research Inc., Phantom V4.0)를 사용하여 512x512 pixels에서 1,000 pictures per second(pps)로 촬영하였다. DAS 또한, 점화기의 작동과 함께 기동되는지 확인한다. 점화기의 성능은 내부에 수분이 존재하는 경우 점화기에 물방울이 맺혀 연소가 일어나지 않거나 강도가 약해 연소가 발생하지 않는 경우가 종종 있다. 따라서 실험 전에 점화기의 성능 실험은 필수적이다.

실험 절차는 먼저 새도우 시스템의 설치가 완료되면 연소실에 수소 가스를 주입 전에 약 20분 이상 진공 펌프(ComVac, HJD2120V)를 이용하여 상대압력 -0.9bar까지 내부의 압력을 2-3회 반복하여 감압하면 연소실 내부의 수증기가 거의 사라지게 된다. 증기압 표에 의하면, -0.9bar 즉 절대기압 0.1기압부근에서 포화온도는 약 50 °C 이다. 수증기의 효과적 제거를 위한 연소실 내의 가스의 온도 증가 및 유리 벽면에 부착된 물 방울 제거를 위해 Hair Dryer로 유리 벽면을 가열시킨다. 수증기를 제거 후 Vent 밸브(그림 2 Ch 3-2)를 열면 대기 중의 공기가 압력차에 위해 자동으로 연소실로 주입되며 상대압력이 0 bar가 되면 대기중의 공기는 더 이상 연소실로 주입되지

않는다. 이때 밸브를 잠그고 수소를 주입한다. 수소 주입시 수소의 혼합을 유도하기 위해 팬을 사용하였다.

수소를 서서히 주입시켜 그림 2 Ch 3-3의 정압계(유효 숫자:소수 4 째 자리)의 분압을 이용하여 수소 농도를 맞추게 된다. 수소 농도를 맞춘 후 연소실 내부 가스의 팬에 위한 난류 강도를 줄여 가능하면 균일한 혼합 상태의 준 정적 상태에서 실험을 하기 위해 팬을 끄고 약 5초 후 점화기를 이용하여 점화 시킨다. 점화 신호는 DAS 및 고속카메라에 트리거 신호로 전달되어 온도 및 압력 측정과 화염에 대한 동영상 촬영이 동시에 이루어 진다.

3. 실험 결과

실험은 크게 세가지로 이루어졌다. 첫번째는 소염 망이 없는 경우 첫번째와 두 번째 격실에서 중앙의 화염 통로에서 온도 측정이 이루어졌다. 두 번째는 모델기기를 두 번째 격실 중앙에 설치하여 연소 기간동안 기기의 표면에 설치된 열전대를 사용하여 온도 측정이 이루어졌다. 마지막으로는 모델 기기 주면에 소염 망을 설치하였을 때 기기 표면에서 연소 기간동안 온도 측정이 이루어 졌다. 수소 농도의 변화(약 8% 부터 11%)와 화염의 강도를 크게 하기 위해 연소실의 방향을 수평과 수직으로 한 경우에 대한 실험이 이루어졌다.

소염 망이 없는 경우 수소 농도가 증가 할수록 연소로 인한 발열량이 많기 때문에 가스의 온도는 증가하였다. 그러나 연소실의 방향에 대해서는 크게 영향을 받지 않았다. 그림 7에서 수소 농도 약 11%인 경우 첫 번째와 두 번째 격실에서 시간에 따른 가스 온도는 약 550 °C 까지 상승하였다. 압력은 3.3 bar까지 증가하였으며 연소실의 압력이 매우 짧은 시간 내에 대기압 이하로 떨어지는 것으로 보아 완전연소가 발생하였음을 알 수 있다. 불완전 연소가 발생하면 압력은 증가 후 미소하게 떨어진다. 그림 8은 두 번째 격실에서 화염의 전파 과정을 보여주고 있다. 연소가 발생한 첫번째 격실로부터 급속히 두 번째 격실로 전파하는 것을 알 수 있다. 화염면이 비 대칭을 이루는 것은 상대적으로 가벼운 수소 가스가 상부에 존재하여 수소 농도가 높기 때문인 것으로 판단된다. 이 경우 두 번째 격실에서 화염속도는 약 1.2 ㎜/s이다. 동일 수소 농도에서 세 번째 격실의 새도우(Shadow) 이미지로부터 세 번째 격실에서도 연소가 진행됨을 알 수 있었다. 연소실을 수직으로 실험한 경우에는 화염이 점화원으로부터 대칭으로 전파하였다.

모델 기기를 두 번째 격실의 중앙 즉 화염 전파 통로에 설치한 경우 수소 농도 10%에서 가스의 온도는 연소가 시작되는 첫번째 격실에서 가장 높게 나타났으며, 압력은 최대 약 3.5 bar까지 증가하였다(그림 9). 모델기기 주변의 가스 온도는 열전대의 위치에 따라(그림 4 참조) 전면, 상면, 측면 순서로 높게 나타남을 알 수 있다. 그림 10은 모델 기기를 두 번째 격실의 중앙 즉 화염 전파 통로에 설치한 경우에 대한 화염전파 과정을 보여주고 있다. 소염망을 설치하지 않은 그림 8과 같은 경향을 보이고 있다. 그림 10에서 보듯이 모델기기 전면의 경우 첫번째 격실로부터 전파되는 화염면이 직접 가장 빨리 접촉하기 때문에 온도가 가장 높다. 또한, 그림 10에서 화염이 왼쪽 상부 모서리로부터 모델기기로 접근하기 때문에 모델기기의 상부면의 온도가 높다. 이상적으로 화염이 수직으로 대칭을 이루고 전파한다면 Mirror-I 및 Mirror-II 측의 온도는 같아야 하나 Mirror-I의 온도가 높은 것으로 보아 화염이 대칭으로 진행되지 않았음을 알 수 있다. 온도가 측정된 모든 모델기기 면에서 200 °C 부터 350 °C 사이에서 2초 동안 유지되었다. 따라서 만약 기기의 설계 온도가 200 °C 보다 낮다면 이 기기의 건전성은 위해 받을 수도 있다. 표 1은 국내발전소의 중대사고시 작동되어야 할 필수기기의 제작사 검증온도를 보여주고 있다. 중대사고시 필수기기의 제작사 검증 온도는 약 190 °C부터 250 °C 사이에 존재하므로 수소연소에 의한 기

기의 위협성은 충분하다고 볼 수 있다. 연소실을 수직으로 한 경우도 수평으로 하여 실험한 경우와 온도, 압력이 동일한 경향을 보였다.

모델 기기를 두 번째 격실의 중앙 즉 화염 전파 통로에 설치한 경우 그림 11에서 보는 것처럼 수소 농도 10%에서 가스의 온도가 첫번째 격실에서 가장 높게 나타났으며, 정압은 그림 9와 거의 비슷한 경향을 나타냈으나 압력 증가가 약간 둔화되었다. 열전대의 위치에 따라(그림 4 참조) 전면, 상면, 측면 순서대로 높게 나타남을 알 수 있다. 그러나 소염 망을 설치한 경우 모델기기 주변의 최대 온도는 100 °C 미만으로 중대사고시 필수기기의 제작사 검증 온도보다 훨씬 낮아 기기의 안전성을 보장 할 수 있다. 그림 12는 이 경우에 대한 모델 기기 주면에서 화염전파 과정을 보여주고 있다. 모델기기 상부를 통해 급격히 전파하는 것을 알 수 있으며, 하부는 다소 시간 차이를 두고 전파함을 알 수 있다. 연소실을 수직으로 세운 경우도 수평인 경우와 동일한 경향을 보였다.

4. 결과 및 토의

소염 망을 모델기기 주변에 설치하여 모델기기 표면에서 가스의 온도를 측정하여 모델기기의 건전성을 평가하는 실험을 수행하였다. 모델기기 주변에 소염 망을 설치하지 않은 경우 모델기기 표면의 온도는 일반적으로 중대시고 시 작동해야 할 필수기기의 제작사 검증 온도를 초과하였으나 소염 망을 설치하는 경우 모델기기의 표면의 온도는 100 °C 미만으로 매우 낮아 기기 보호 가능성이 충분하였다. 현재까지의 실험에서 수소농도 11%인 경우 두 번째 격실에서 화염속도가 약 1.2m/s 내외로 측정되었는데, 이것은 실제 원전에서 가능한 속도 보다 다소 낮다고 판단되어 화염속도 증가 시 소염 망 성능에 대한 실험이 계속될 예정이다.

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. KOPEC, “기기 생존성 평가 보고서”
6. 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
7. 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

8. Phillips, H., 1963, "On the Transmission of Explosion through a Gap Smaller than the Quenching Distance," Combustion and Flame, 7, pp. 129-135

9. 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

10. 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

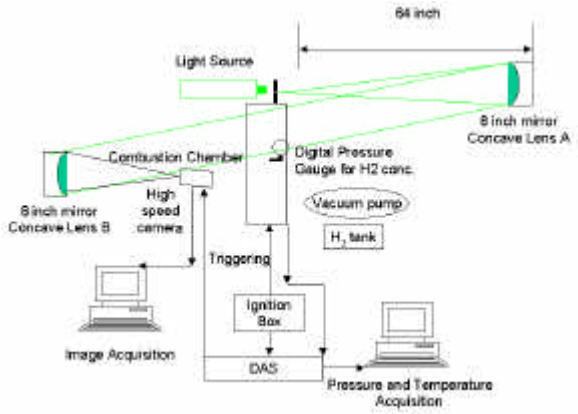


그림 1. 실험 장치 구성도

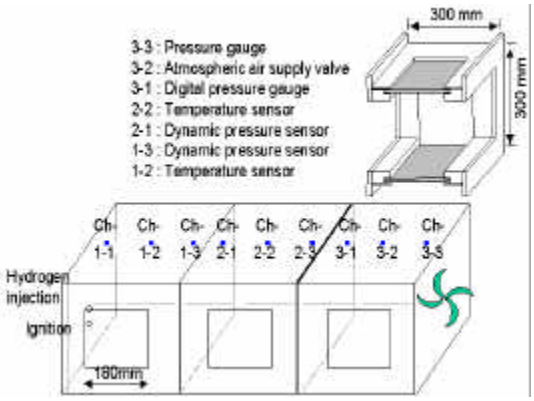


그림 2. 연소실 및 주요 계측 자료 위치

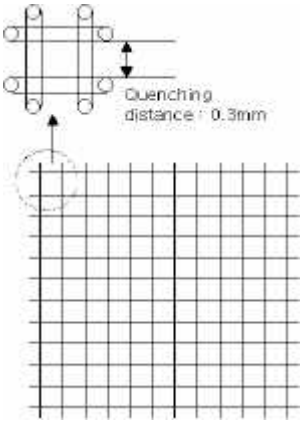


그림 3. 소염망

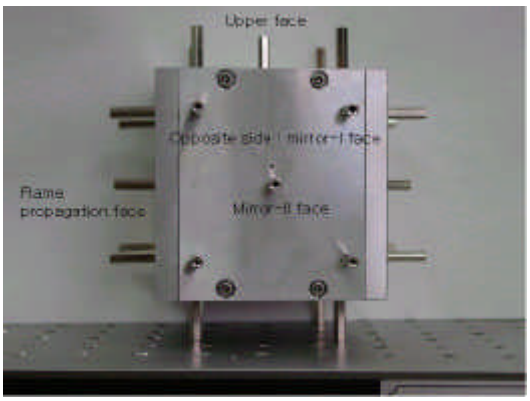


그림 4. 모델 기기 및 열전대 설치 위치

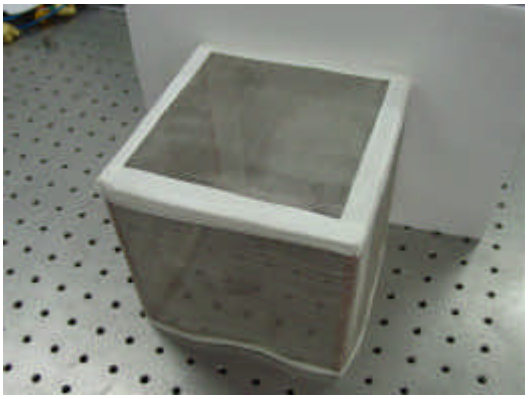


그림 5. 기기 주변에 설치 될 소염 망

그림 6. 연소실 내에서 소염 망으로 둘러싸인 모델 기기

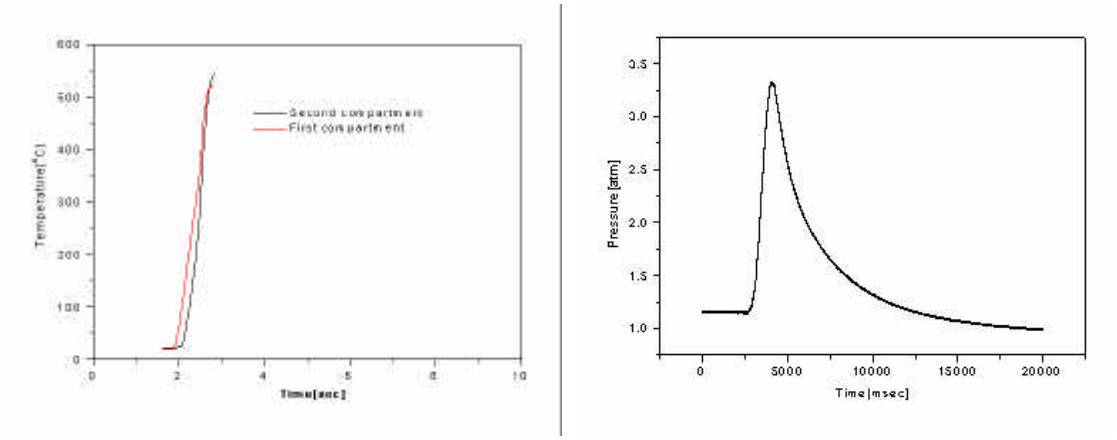


그림 7. 수소농도 11%인 경우 연소 기간동안 가스 온도 및 압력(연소실 수평)

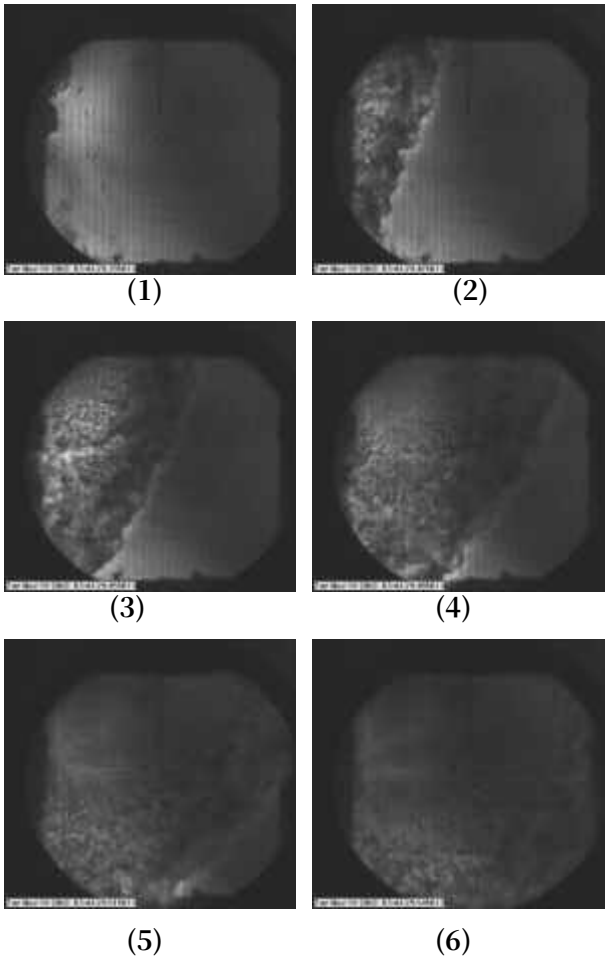


그림 8. 중간 격실에서 화염 전파 과정(수소농도 10%, Time interval : 30ms)

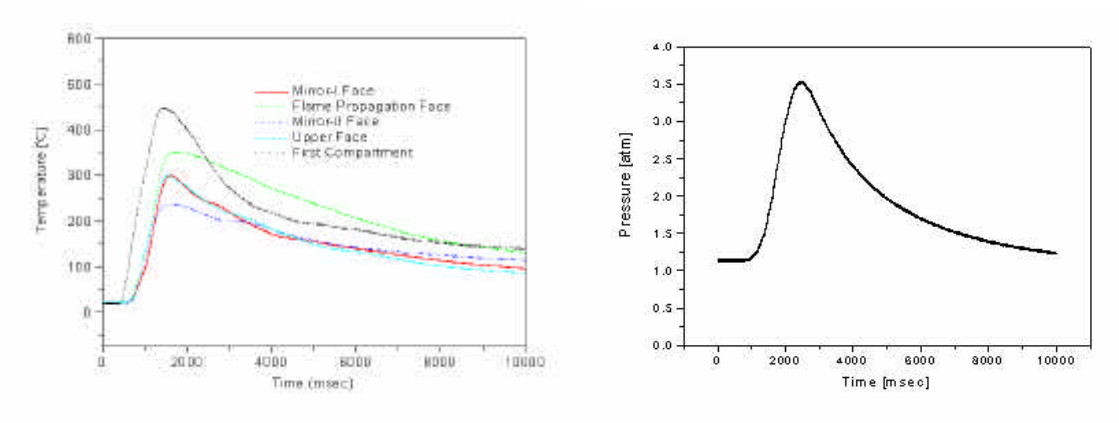


그림 9. 기기 표면에서 온도 분포 및 압력(Mesh가 없는 경우)

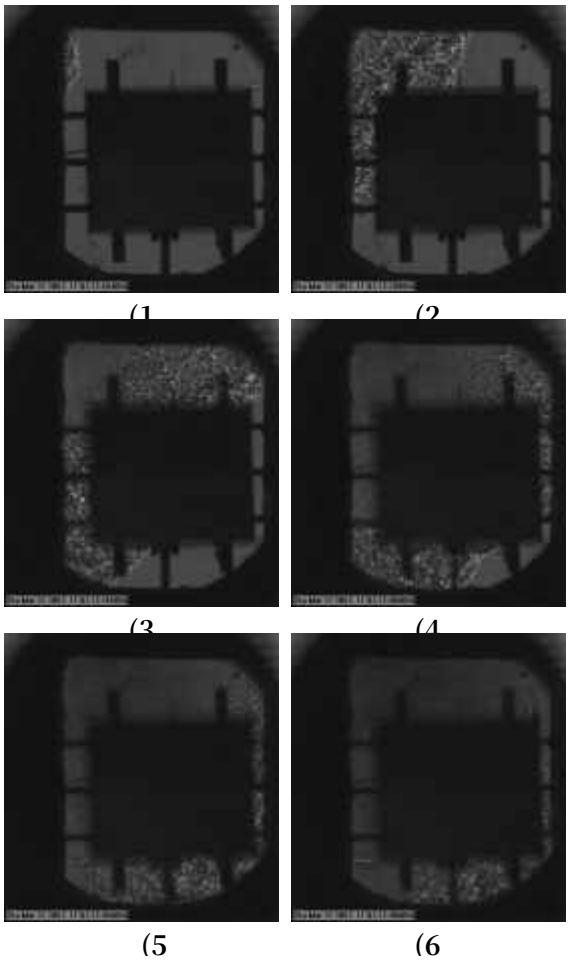


그림 10. 중간 격실에서 화염 전파 과정(수소농도 10%, Time interval : 50ms)

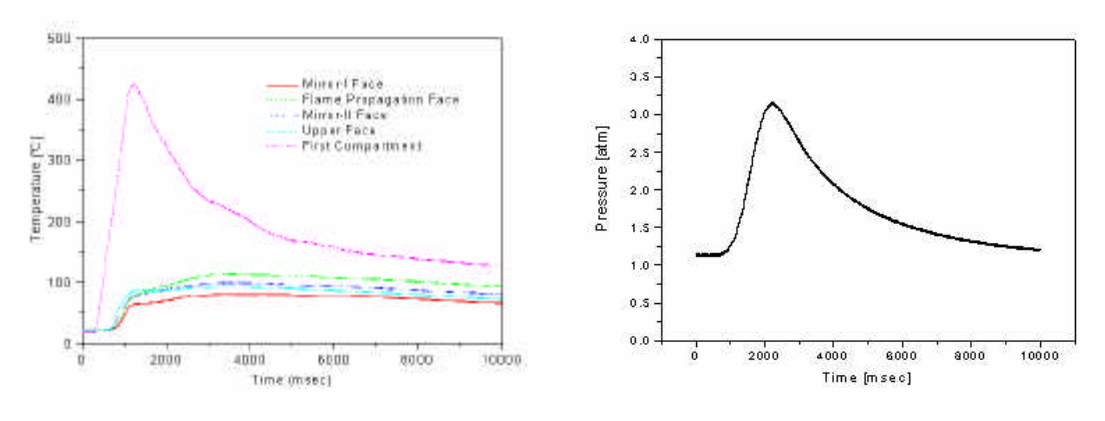
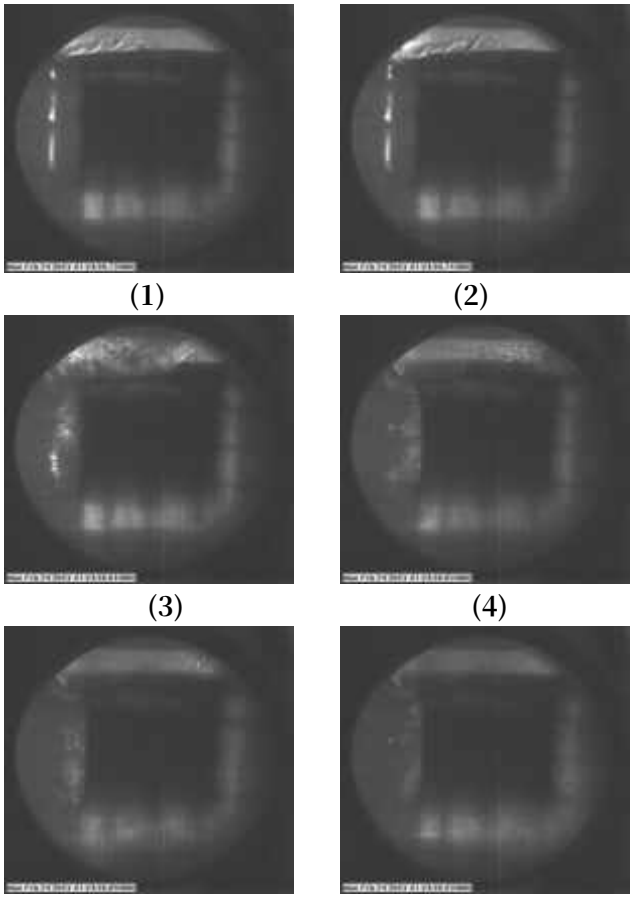


그림 11. 기기 표면에서 온도 분포 및 압력(Mesh가 있는 경우)



(1) (2)

(3) (4)

(5) (6)

그림 12. 중간 격실에서 화염 전파 과정(수소농도 10%, Time interval : 40ms)

표 1.중대사고시 주요 필수기기에 대한 제작사 검증온도

	제작사 검증온도	
Components	F	C
SDSMOV	375	191
SDS MOV 제어용 전선	464	240
압력전송기	482	250
계측용 전선	420	216
CET에 연결된 계측용 전선	482	250
junction panel	375	191
RTD 계측용 전선	482	250
HJTC probe, head lift rig junction panel		
refueling disconnect panel 및		
이들을 통하여 EPA까지 연결하는 전선	375	191
증기발생기 수위전송기(LT)	420	216
계측용 전선	482	250
격납건물 격리밸브	375	191
제어용 전선	482	250
격납건물 대기 방사선감지소자(RE)	375	191
방사선감지소자관련 계측용 전선	482	250
격납건물집수조 수위감지소자(LE)	375	191
계측용 전선	482	250