

2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

2차원 수소연소 실험을 통한
GOTHIC 코드 수소연소해석의 검증에 관한 연구

Experimental Validation for Combustion Analysis of GOTHIC Code
in 2-Dimensional Combustion Chamber

이진용, 양승연, 박군철, 정석호
서울대학교
서울특별시 관악구 신림동 산 56-1

요 약

서울대학교에서 제작된 2차원 수소연소 실험 장치를 이용하여 수소 예혼합 연소 실험을 수행하였다. 이 실험 결과를 GOTHIC 코드의 lumped parameter 연소 모델과 상세 해석에 사용되는 mechanistic 연소 모델을 이용하여 해석하고 이를 비교함으로써 GOTHIC 코드 연소해석 능력에 대한 검증 연구를 수행하였다. 실험장치는 $1 \times 0.024 \times 1 \text{ m}^3$ 의 약 24 리터의 체적을 갖는 연소실과 주변 장치로 구성되며 수소 10 %와 공기 90 % 혼합 기체에 대한 실험을 수행하였다. 점화위치를 상부의 중앙과 모서리로 변화시키고 격실 하부의 완전 개방 및 50 % 개방 조건에 대하여 각각 실험 및 해석을 수행하였다. 연구 결과 GOTHIC 코드 연소 해석에서 실험과 일치하지 않는 결과를 나타내었다. Lumped 모델의 경우 연소 시간에 대한 예측은 비교적 적절하였으나 화염 전파, 화염 모양, 연소 팽창 혹은 압축 효과 등의 연소 현상에 대한 정보를 얻을 수 없는 한계가 있었으며, mechanistic 모델의 경우 연소 현상에 대한 간접적인 정보를 얻을 수 있었으나 연소 시간은 실험 결과에 비해 매우 느리게 예측하였다. 또한 GOTHIC 코드 내의 연소 모델 검토에서 GOTHIC 코드는 10 % 이하의 낮은 수소농도에 대한 연소해석에 취약점을 가지고 있는 것이 발견되었다.

Abstract

In this study, the prediction capability of GOTHIC code for hydrogen combustion phenomena was validated with the results of two-dimensional premixed hydrogen combustion experiment executed by Seoul National University. The experimental

chamber has about 24 liter free volume ($1 \times 0.024 \times 1 \text{ m}^3$) and 2-dimensional rectangular shape. The tests were performed with 10 % hydrogen/air gas mixture and conducted with combination of two igniter positions (top center, top corner) and two boundary conditions (bottom full open, bottom right half open). Using the lumped parameter and mechanistic combustion model in GOTHIC code, the SNU experiments were simulated under the same conditions. The GOTHIC code prediction of the hydrogen combustion phenomena did not compare well with the experimental results. In case of lumped parameter simulation, the combustion time was predicted appropriately. But any other local information related combustion phenomena could not be obtained. In case of mechanistic combustion analysis, the physical combustion phenomena of gas mixture were not matched experimental ones. In boundary open cases, the GOTHIC predicted very long combustion time and the flame front propagation could not simulate appropriately. Though GOTHIC showed flame propagation phenomenon in adiabatic calculation, the induction time of combustion was still very long compare with experimental results. Also, it was found that the combustion model of GOTHIC code had some weak points in low concentration of hydrogen combustion simulation.

1. 서 론

원자력 발전소의 중대사고시 수소거동과 관련하여 격납건물의 건전성을 위협하는 주요한 요인 중의 하나는 수소연소 현상이다. 중대사고시 발생하는 다량의 수소는 기폭하여 폭발반응을 일으킴으로써 격납건물에 직접적인 하중을 가할 가능성이 있으며 안전관련기기에 손상을 유발시킬 수 있는 것으로 알려져 있다. 실제로 TMI-2 사고에서 노심용융물과 수증기의 반응으로 다량의 수소가 발생하여 격납건물로 방출되었으며 방출된 수소가 연소함으로써 격납용기 내부의 압력을 상당히 증가시킨 것이 관측되었다[1]. TMI-2 사고의 경우 격납용기의 파손은 일어나지 않았으나, 이 사고 이후로 노심손상을 동반하는 중대사고시 격납용기내에서 수소연소의 현상규명 및 대처방안을 수립하는 것은 원자력 발전소의 건전성을 유지하는데 있어서 필수적인 과제로 인식되고 있다.

수소연소는 가연성기체의 혼합상태, 구조물의 기하학적 형태, 난류발생원 및 초기 조건 등의 영향에 따라 아음속연소인 폭연 (deflagration), 연소천이 (DDT : deflagration-to-detonation transient), 폭발(detonation)과 같은 연소특성을 나타낸다. 이와 관련하여 수소연소의 영향을 규명하기 위해 화염발생한계(flammability limits), 폭연, 화염가속현상, 폭발에 대한 실험들이 수행되어 왔으며 이를 이용하여 수소제어기의 위치 선정에 간접적으로 이용하였다. 관련 실험으로는 SNL FITS (화염발생한계 규명), SNL VGES (밀폐용기에서의 아음속연소 연구), SNL FLAME (화염가속화 현상 및 DDT 발생가능성 연

구)[2], NTS (대규모 시설에서의 수소연소현상, 예혼합 및 연속주입시 연소현상 연구)[3], NUPEC (소규모 실험의 경우, 수소연소현상 및 화염 전이현상 연구) 등이 있다.

원전의 중대사고시 수소거동을 예측하고 기폭 및 연소현상에 대한 분석을 위해서는 해석 코드의 이용이 필수적이다. 실험적으로 수소연소의 다양한 특성에 대한 연구가 이루어진 것에 반해, 중대사고시 코드를 이용한 연소현상의 분석은 현재까지 대부분 HECTR, CONTAIN, MAAP 등의 lumped 코드가 사용되어 왔다. 이러한 코드의 경우, 그 특성상 화염의 전파, 화염의 모양, 연소 기체의 팽창 및 압축 효과 등의 수소연소 현상에 대한 정보를 얻을 수 없는 한계가 있다. 최근 수소제어에 대한 관심이 높아지면서 국부적인 분석이 가능한 GASFLOW 또는 GOTHIC-3D 코드 등 3차원 상세 해석코드를 이용한 수소 혼합 및 연소 현상에 대한 연구가 시도되고 있다. 그러나 현재 코드 내부의 사용자 정의 변수의 검증 등 이론적 모델로서의 역할이 적절하게 검증되지 못하고 임의성을 내포하고 있으며 특히 수소연소 및 화염전파현상과 관련하여 GOTHIC 코드의 해석능력에 대한 실험적, 이론적 검증은 현재까지 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 GOTHIC 코드 내 수소연소 모델의 검토를 바탕으로, 2차원 격실에서의 수소를 이용한 예혼합 연소 실험을 수행하고 이 실험을 GOTHIC 코드의 수소연소 모델을 이용하여 해석함으로써 GOTHIC 코드의 연소 해석 능력을 검증하는 것을 목적으로 하였다.

2. 예혼합 수소연소 실험

2.1 실험 장치의 구성

2차원 모형 격실에서 전파되는 수소 화염의 특성을 살펴보기 위하여 제작된 연소실을 그림 1에 나타내었다. 연소실은 가로, 세로가 각각 1 m, 4 cm, 두께가 1 cm인 투명한 아크릴 판 2장을 2 cm × 2 cm의 알루미늄 프로파일 빔 사이에 두고 조립하여 제작하였다. 아크릴 판들과 알루미늄 빔 사이에는 두께 2 mm의 불연성 고무판을 삽입하여 밀폐(sealing)를 유지할 수 있도록 하였다. 알루미늄 프로파일 빔과 불연성 고무판의 두께를 고려하여 볼 때, 제작된 연소실의 실제 연소 체적은 $1 \times 0.024 \times 1 \text{ m}^3$ 으로 약 24 리터에 해당된다. 한편, 연소실의 깊이가 가로, 세로 방향의 길이에 비하여 훨씬 작으므로 수소화염의 깊이 방향으로의 전파가 가로, 세로 방향으로의 수소화염의 전파에 미치는 영향을 무시할 수 있어 수소 화염의 2차원 전파 특성을 살펴보는데 무리가 없으리라 판단된다. 연소실의 후면에 해당하는 아크릴 판에는 가스의 충전과 배출이 용이하도록 밸브를 설치하였고, 점화를 위하여 제작된 전기 점화기를 각각의 점화 위치에 설치하였다. 제작된 2차원 연소실은 화염의 가시화에 이용되는 고속도 사진 촬영이 용이하도록 알루미늄 프로파일 빔으로 제작된 틀에 수직으로 설치하였다.

수소 화염의 가시화를 위하여 사용된 실험 장치들을 그림 2에 나타내었다. 점화는 전기 방전 점화 방식(spark ignition)을 택하였는데, 용량 방전 방식 점화 장치(CDI, Capacity Discharge Igniter)와 자동차용 점화 코일을 사용하였다. 점화기의 점화와 동시에 고속도 카메라의 구동을 위하여 광 센서소자(Photo-coupler, PC817)를 이용한 간단한 회로를 구성하여 동기 장치(synchronizer)로 사용하였다. 수소 화염의 가시화를 위하여 고속도 CCD 카메라(motion analyzer : KODAK Ekta Pro EM1012)를 사용하였으며 수소와 공기의 혼합을 정밀하게 제어하기 위하여 습식 가스 유량계(wet test gas meter)로 보정된 질량 유량계(mass flow controller)를 사용하였다.

2.2 실험 조건 및 방법

실험에 사용된 연료는 chemically pure 등급 (>99 %)의 수소로서 건조한 공기와 혼합하여 사용하였다. 원자력 발전소 내의 중대사고 발생시 수소/공기 혼합비는 대체로 10 % 내외이며, 실험의 안전성을 위하여 희박한 연소 조건이 되도록 혼합하여 사용하였다. 한편, 연소 팽창에 따르는 연소실 내의 급격한 압력 상승으로 아크릴 판이 손상되는 경우가 발생하지 않도록 점화기의 반대쪽을 개방하여 실험하였다. 본 실험의 경우, 연소실을 개방한 후 점화하기까지의 시간 동안 발생할 수 있는 혼합기의 누출을 최소화하기 위하여 점화기의 위치는 연소실의 상단부에 위치하도록 하고 개방되는 쪽은 항상 연소실의 하단부가 되도록 하였다. 연소실의 상단부를 개방하게 되면 수소/공기 혼합비의 밀도가 공기의 밀도보다 작은 이유로 개방된 상단부를 통한 대기 중으로의 확산의 양이 많아서 정확한 실험이 어려워진다. 반면, 하단부를 개방하는 경우 비록 개방된 하단부를 통한 확산이 이루어지더라도 수소/공기 혼합기의 밀도가 상대적으로 작아서 하단부의 아래쪽에 위치한 공기를 밀어내면서까지는 확산되지 않을 것이므로 그 양이 비교적 작아서 공기와 직접 접촉하는 맨 하단부를 제외한 연소실의 대부분은 여전히 균일한 혼합비를 유지할 수 있을 것이다. 실험은 점화기를 상단부의 중앙 혹은 모서리에 설치하고 하단부 전체 혹은 50 % 개방한 경우에 대하여 각각 수행하였다. 연소실의 하단부를 개방하여 점화하였으므로 연소 조건은 연소실 내부의 압력이 대기압으로 정압인 경우에 해당된다.

3. GOTHIC 코드 수소연소 해석

GOTHIC 코드를 이용한 연소해석은 디폴트로 정해진 변수 값을 최대한 유지하면서 수행하였다. 초기 조건은 실험과 동일하게 적용하여 초기 온도는 상온(298 K)으로 하였으며 초기 압력 대기압(101.3 kPa) 상태에 공기 90 %, 수소 10 % 조건을 해석하였다. 공기

는 산소 21 %와 질소 79 %로 구성되는 것으로 가정하여 제어체적 내의 혼합 기체는 수소, 산소, 질소 세 가지 기체가 정해진 비율로 각 셀에 존재하는 것으로 해석하였다. 각 기체의 물성치는 코드 내부의 값을 사용하였다.

연소 해석은 GOTHIC 코드 내에 존재하는 lumped parameter 모델과 상세 해석에 사용되는 mechanistic 모델을 이용하여 수행하였다. Lumped 해석의 경우 $1\text{ m} \times 0.024\text{ m} \times 1\text{ m}$ 의 크기를 갖는 1 개의 셀로 구성되며 상세 해석의 경우 동일한 크기 척도를 갖는 실험 장치를 $25 \times 1 \times 30$ 개의 총 750 개 셀로 구성하였다. 상세 해석에서 점화되는 부분과 가까운 셀은 작게(2 cm) 이후 전파되는 부분은 비교적 크게(4 cm) 나누었다. 상세 해석에서 점화를 위해 실험과 동일한 부분에 점화기를 설치하여 초기 점화 셀을 모사하였다. 점화기의 위치는 제어체적 상단부의 중앙과 모서리로 변화시켰고 점화기 모델은 GOTHIC 코드에서 지원하는 것을 사용하였으며 계산 시작과 동시에 작동하는 것으로 설정하였다. 경계 조건은 점화 셀과 반대쪽 면을 대기압 상태로 두어 구성하였다. 실험에서와 같이 반대쪽 면을 완전 개방하는 경우와 반을 개방하는 경우를 나누어 해석하였다. 개방된 부분의 경계 조건을 제외한 나머지 벽에는 단열 조건을 주어 계산하였다. 그림 3은 연소해석에 대한 개념도를 그림 4는 상세 해석의 격자 구성을 나타낸다. 계산의 수렴 및 결과의 재현성을 위하여 격자 구성 및 최대 시간 간격에 대한 민감도 분석을 수행하였으며 Da 수 등 수소연소 해석에 영향을 미치는 인자에 대한 민감도 분석을 수행하여 코드의 수렴 및 해석 결과에의 영향을 파악하여 최적 조건에서 계산을 수행하였다. 초기 조건이 정지된 정적 상태의 혼합 기체에 대한 연소 해석으로 상세 해석의 경우 층류 연소 모델이 적용되었다.

본 연구에 사용된 GOTHIC 코드의 버전은 6.0이다.

4. 결 과

4.1 예혼합 수소연소 실험 결과

수소 화염의 전파 특성을 살펴보기 위하여 고속도 카메라를 이용하여 얻은 수소 화염의 이미지들을 그림 5에 나타내었다. 점화된 이후 시간이 경과해 가면서 전파되어 가는 동안 수소 화염 선단의 모양이 많이 굴곡되어지는 것을 살펴볼 수 있다. 수소와 같이 확산도가 높은 기체가 희박하게 혼합되어 있는 경우 diffusive thermal instability에 의한 셀 구조의 생성과 성장이 이루어진다고 알려져 있는데, 본 실험의 경우 수소의 혼합비가 10 %로 희박 연소 조건에 해당하여 이러한 셀 구조의 성장으로 인한 화염 선단의 굴곡이 나타나게 된 것으로 여겨진다.

그림 5의 (a)는 점화기를 연소실 상단부의 중앙에 설치하고, 점화 직전 연소실의 하단부를 완전 개방하여 점화한 경우의 수소 화염의 전파를 나타내고 있다. 상단부의 중앙에서 점화된 후 방사방향으로 전파되어 가는 모습을 살펴볼 수 있다. 시간이 경과함에 따라 연

소가 완료된 점화기 근처는 점차 다시 어두운 부분으로 바뀌어 가는데, 본 실험에서 사용된 화염의 가시화 방법으로 획득된 이미지가 연소로 발생하는 수증기의 이미지가 아님을 확인시켜 준다.

그림 5의 (b)는 점화기를 연소실 상단부의 좌측 모서리에 설치하고, 점화 직전 연소실의 하단부를 완전 개방하여 점화한 경우의 수소 화염의 전파를 나타내고 있다. 점화기를 상단부의 중앙에 설치하여 점화한 경우와 비교하여 거의 흡사한 형태의 전파가 이루어지고 있음을 알 수 있다. 연소실 벽면의 화염이 비교적 화염 강도가 약하게 나타나는 것은 벽면으로의 열 손실로 인하여 화염이 약화되어지는 때문으로 판단되어진다.

그림 5의 (c)는 점화기를 연소실 상단부의 중앙에 설치하고, 점화 직전 연소실의 하단부 중 우측의 절반만을 개방하여 점화한 경우의 수소 화염의 전파를 나타내고 있다. 또한 그림 5의 (d)는 점화기를 연소실 상단부의 좌측 모서리에 설치하고, 점화 직전 연소실의 하단부 중 우측의 절반만을 개방하여 점화한 경우의 수소 화염의 전파를 나타내고 있다. 하단부를 완전 개방하여 점화한 경우들과 비교하여 화염의 강도가 비교적 강하게 나타나고 있다 이는 하단부가 절반만 개방된 관계로 연소 팽창에 의하여 수소/공기 혼합기가 대기중으로 방출되어지는 면적이 줄어들어 단위 시간동안 연소가 이루어지는 수소/공기 혼합기의 양이 상대적으로 많아지기 때문이라 여겨진다. 한편, 수소 화염이 개방된 부분으로 다가갈수록 화염이 전파되는 속도가 증가하는 것으로 나타나는데 이는 연소 팽창으로 인한 수소/공기 혼합기의 방출이 이루어지는데 개방된 부분으로의 유동이 발생하여 이의 속도가 더해지는 때문이라 여겨진다.

그림 6은 고속도 카메라의 이미지로부터 수소 화염의 선단에 해당되는 부분만을 획득하여 표시한 것으로 (a), (b), (c)와 (d)는 각각 그림 6의 (a), (b), (c)와 (d)에 상응한다. 확산도가 높은 수소가 희박하게 혼합되어 있는 혼합기의 연소에서 나타나는 셀 구조의 생성과 성장을 명확하게 확인할 수가 있다. 점화 초기에는 수소 화염의 선단이 전체적으로 동일한 속도로 전파하다가 양측면의 벽으로 다가가는 화염은 전파속도가 느려지고, 반면 개방된 부분으로는 화염의 전파속도가 빨라지고 있음을 살펴볼 수 있는데, 벽면으로 다가가는 화염은 벽면에 의한 압축의 영향으로 속도가 느려지고, 개방된 부분으로 다가가는 화염은 팽창으로 인한 유동이 개방된 부분으로 이루어지므로 유동의 속도가 더하여지기 때문이라 여겨진다. 이는 그림 7의 (d) 하단부의 우측만이 개방되어 있는 경우의 화염의 전파에서 더욱 명확하게 드러나고 있는데 하단부가 완전 개방되어 있는 경우에는 화염면이 전체적으로 동일한 속도로 전파되어지는 것에 비하여, 개방되어 있지 않고 벽의 역할을 하고 있는 하단부의 좌측으로는 벽면으로 다가갈수록 화염의 전파속도가 느려지는 반면 개방되어 있는 우측 하단부로는 화염이 전파속도가 빨라지고 있음을 알 수 있다.

4.2 GOTHIC 해석 결과 및 토의

그림 7은 수소 10 %, 공기 90 % 혼합 기체에 대한 lumped parameter 연소 해석 결과

를 도시한 것이다. 온도는 약 120 msec 정도까지 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 간접적으로 연소가 120 msec 정도에서 완료되었다는 것을 의미하며 실험과 비교해 볼 때 연소 시간에서는 적절하게 예측한다고 할 수 있다. 그러나 lumped 모델의 특성상 화염의 진행, 내부 혼합기의 팽창 등 제어체적 내의 상세 정보를 얻을 수 없다는 단점이 있다.

그림 8은 수소 10 %, 공기 90 % 혼합 기체에 대해 경계 조건으로 대기압 조건을 준 수소연소 상세해석 결과를 수소 분율로 도시한 것이다. 연소가 완료되는 시간은 경우에 따라 약 30 초 정도로 나타났으며 이는 실험과 비교할 때 매우 느리게 연소가 진행되는 것이다. 중앙 점화 및 모서리 점화시 연소는 초기에 점화 위치에서 방사형으로 진행되는 것을 볼 수 있으며 경계를 50 % 개방한 경우, 전체적으로 연소가 개방된 쪽으로 진행되는 것을 볼 수 있다. 그러나 실험에서 연소가 수십 msec 정도의 시간 척도를 가지며 완료되는 것을 고려할 때, 수십 초 정도의 시간 척도를 가지는 결과는 물리적으로 화염의 전파를 적절히 모사한다고 판단하기 힘든 결과이다.

이러한 GOTHIC 해석 결과는 다음의 원인에 대한 검토가 필수적이라 판단된다.

첫째, GOTHIC 코드의 있는 수소연소 모델링에 대한 검토, 보완이 필요하다. 상세 격자에 사용되는 층류 연소(Laminar Mechanistic Burn) 모델[4]은 Lewis와 von Elbe[5] 등이 세운 수소-산소 반응에서의 물 생성량을 이용한 것으로, 이 이론적 모델은 직경 3.9 cm에서 10 cm 정도의 vessel에서의 실험을 통하여 검증된 것이다. 그러나 검증에 이용된 혼합 기체는 수소 농도가 20 %에서 80 %까지의 범위로 본 연구에서 수행되는 10 % 정도의 수소 농도 및 공기 혼합체에 대한 검증은 바탕으로 하고 있지 않다. 또한 이 모델은 검증에 사용된 실험의 벽면 효과를 무시하고 GOTHIC 코드에 적용된 것으로 이에 대한 검토가 필요하다. 난류 연소 모델(Turbulent Mechanistic Burn)의 경우, eddy dissipation concept[6]에 기초하고 있으며 반응율은 $k-\epsilon$ 모델에서의 turbulence parameter와 직접적으로 연관되어 있다. 연소율 계산에 있어서 cold quenching과 high turbulence flame quenching의 두 개의 실험적 제한치가 사용되며 다음과 같은 공기 중 수소의 층류 화염 속도 상관식이 사용된다.

$$S_1 = 260 - 3000(X_H - 0.42)^2 \quad \text{cm/s}$$

난류 연소에 사용되는 모델에서 공기 중 수소의 층류 화염 속도 계산식을 살펴보면 혼합 기체 중 수소 몰분율에 따라 이 모델을 사용하는데 제한이 있음을 알 수 있다. 이 화염 속도 식은 수소 몰분율이 약 12.7 %에서 71.4 %까지만 양의 값을 갖는다. 따라서 이하 또는 이상의 수소 분율에서는 음의 속도를 예측하며 이는 계산에 영향을 미칠 수 없어 모델의 보완이 필요하다.

둘째로 GOTHIC 코드 수소 연소율의 계산 방식에 대한 검토가 필요하다. GOTHIC 코드에서 수소의 소모율(consumption rate)은 다음과 같이 계산한다.

$$\dot{m} = \text{Max}(w_f, w_t)V_{\text{eff}}$$

수소의 소모율 계산에 사용되는 유효 체적의 경우 주변의 셀과의 가중 평균된 온도에 의해 정의되는 값으로 실제 연소가 일어난 부피를 의미한다. 가중 평균하여 계산하는 방법의 경우 매뉴얼 상에서 FLAME 실험장치를 모사하여 검증하였다고 하나 검증 결과에 대한 언급을 찾아 볼 수 없으며 FLAME 실험 역시 혼합 기체의 조성 및 실험의 특성이 본 연구에서 사용하는 것과 차이를 보이고 있어 10 % 정도 혹은 그 이하에서의 수소와 공기 혼합체의 연소현상에 대해 적절히 검증되었다고 할 수 없다. 또한 FLAME 실험 장치의 경우 한 쪽 방향으로 매우 긴 사각 채널의 형태를 가지고 있으며 그 규모가 매우 큰 실험 장치로 이 실험과의 결과가 적절히 부합된다할지라도 점화 초기에 해당하는 본 연구의 경우 GOTHIC 코드가 타당하게 해석할 수 있는지에 대한 검토는 이루어졌다고 할 수 없다.

마지막으로 지배방정식의 풀이 과정에 대한 명확한 확인이 필요하다. Lumped 모델의 경우 혼합 기체의 수소, 산소 등의 분율을 입력으로 하는 화염 속도 상관식에 의해 화염 속도가 정해지며 이 화염 속도를 이용하여 체적의 크기로 나누어 연소가 완료되는 시간이 정해진다. 따라서 실험 장치의 크기와 내부 혼합 기체의 분율만 정해지면 단순 상관식에 의해 연소 완료 시간이 정해지는 것이다. 그러나 상세 해석의 경우는 화염 속도 상관식에 의한 연소 완료 시간이 정해지는 것이 아니라 유효 연소 체적이 늘어남에 따라 연소가 일어난 체적이 전파하는 것으로 모델링되어 있어 연소 체적을 모사하는 방법 및 지배방정식의 풀이 과정에도 연소 해석이 영향을 받게 된다. GOTHIC 코드의 경우 농도 차이에 의한 부력항이 포함되어 있지 않고, 운동량 방정식에서 확산항을 하나의 소스항처럼 취급하고 있으며, 수평 방향의 대류항을 이상적 가정이라는 모호한 개념을 사용하여 계산하고 있어 이에 대한 검토가 필수적이다.

경계를 단열 조건으로 하고 수소 농도를 20 % 정도로 높여서 해석을 수행한 결과 점화 초기 연소가 매우 느리게 진행하나 일정 시간이 흐른 후 급격히 가속되어 제어체적의 약 반 정도가 50 msec 정도의 시간에서 연소가 완료되는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 GOTHIC 코드가 초기에 연소가 진행되는 속도를 늦게 예측한다는 것으로 앞서 언급한 바 있는 FLAME 장치와 같이 한 방향으로의 길이가 매우 길어 경계에서의 압력의 영향을 비교적 덜 받는 경우 일정 시간 후의 화염 가속화 현상을 모사 할 수는 있다고 하겠으나 낮은 수소농도, 크기가 매우 작은 경우의 연소 해석에서 화염의 전파 및 연소 시간의 예측은 적절하다고 할 수 없다.

5. 결 론

GOTHIC 코드 수소연소 해석 능력을 검증하기 위한 연구로 2차원 연소 격실에서의 예혼합 연소 실험 및 이에 대한 GOTHIC 코드 해석을 수행하였다.

GOTHIC 코드의 lumped parameter 모델을 이용하여 해석한 경우, 연소 완료 시간은 실험에 비해 적절히 예측하였으나 화염 전파나 화염의 모양, 연소 가스의 팽창과 압축 효

과 등의 정보는 얻을 수 없었다.

GOTHIC 코드를 이용하여 상세 해석을 수행한 결과, 경계로의 화염 진행이나 초기 방사 모양의 화염 전파 현상 등을 확인할 수 있었으나 연소 시간에 있어서 실험을 모사하지 못하는 것을 알 수 있었다. 또한 GOTHIC 코드 연소 모델의 검토에서 수소 10 % 이하의 낮은 농도가 포함된 경우의 연소 모델의 보완이 필요하다는 것을 발견하였다.

수행된 예혼합 수소연소 실험 결과는 수소연소 현상을 연구하는데 기초자료로서 기여할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. J.O.Henrie and A.K.Postma (1987). Lessons Learned from Hydrogen Generation and Burning During the TMI-2 Event. GEND-061, U.S. Department of Energy.
2. M.P.Sherman, S.R.Tieszen, and W.B.Benedick (1989). FLAME Facility-The Effect of Obstacles and Transverse Venting on Flame Acceleration and Transition to Detonation for Hydrogen/Air Mixtures at Large Scale. NUREG/CR-5275, Sandia National Laboratories.
3. A.C.Ratzel (1985). Data Analyses for Nevada Test Site (NTS) Premixed Combustion Tests. NUREG-4138, Sandia National Laboratories.
4. (1997). GOTHIC-CONTAINMENT ANALYSIS PACKAGE : TECHNICAL MANUAL. NAI.
5. Lewis,B., and G. von Elbe, Combustion, Flames and Explosions of Gases, Academic Press, Inc., New York, 1961
6. Magnussen, B.F. (1989). Modeling of Nox and Soot Formation by the Dissipation Concept. IFRF 1st Topic Oriented Meeting. Ijmuiden, The Netherlands.
7. Thompson R. T. et al. (1984). Large Scale Hydrogen Combustion Experiments. ANS intl Conference on Containment Design. Toronto, Canada.



그림 1. 2차원 모형 격실

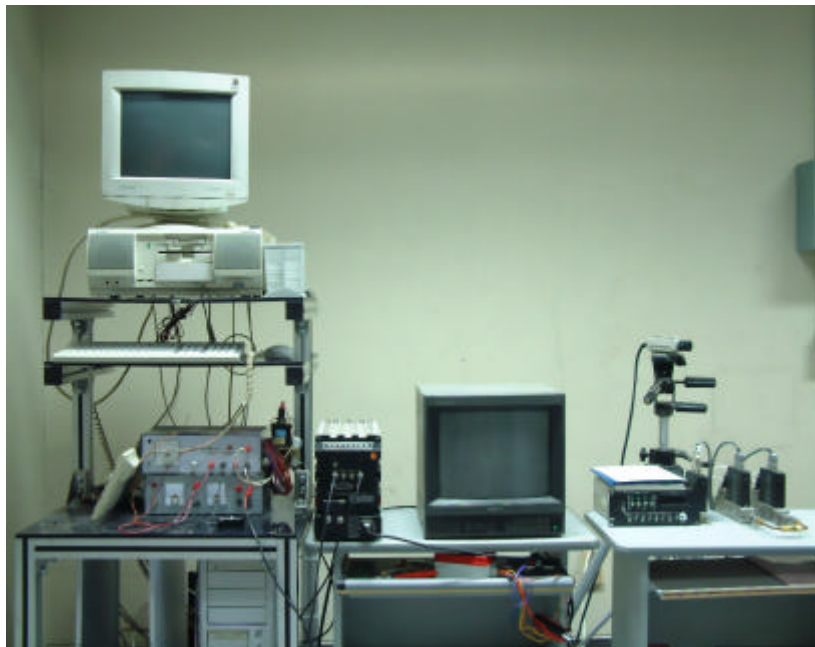


그림 2. 실험 장치의 구성

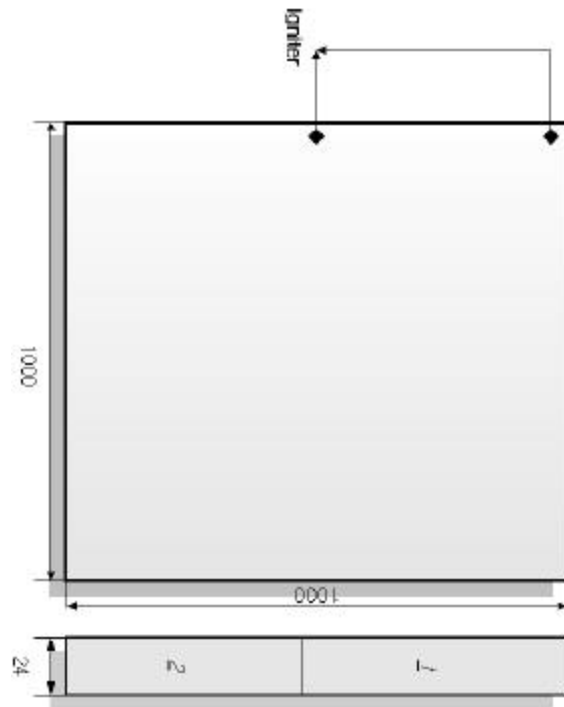


그림 3. 수소연소 해석 개념도

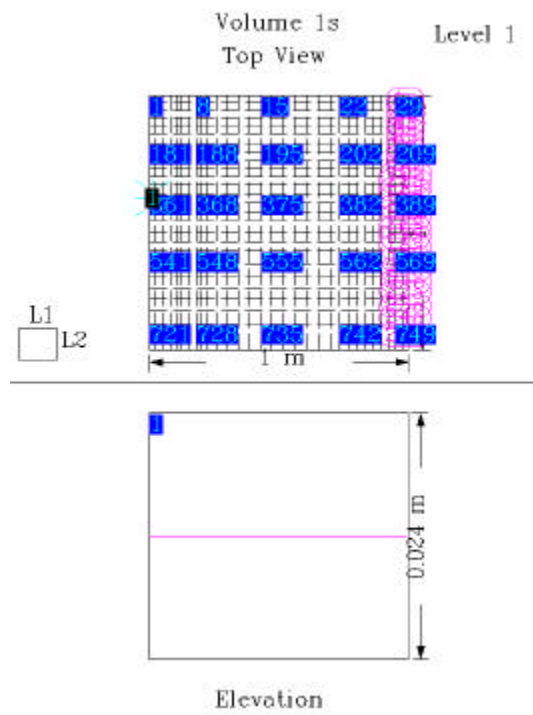


그림 4. 상세 해석의 격자 구성

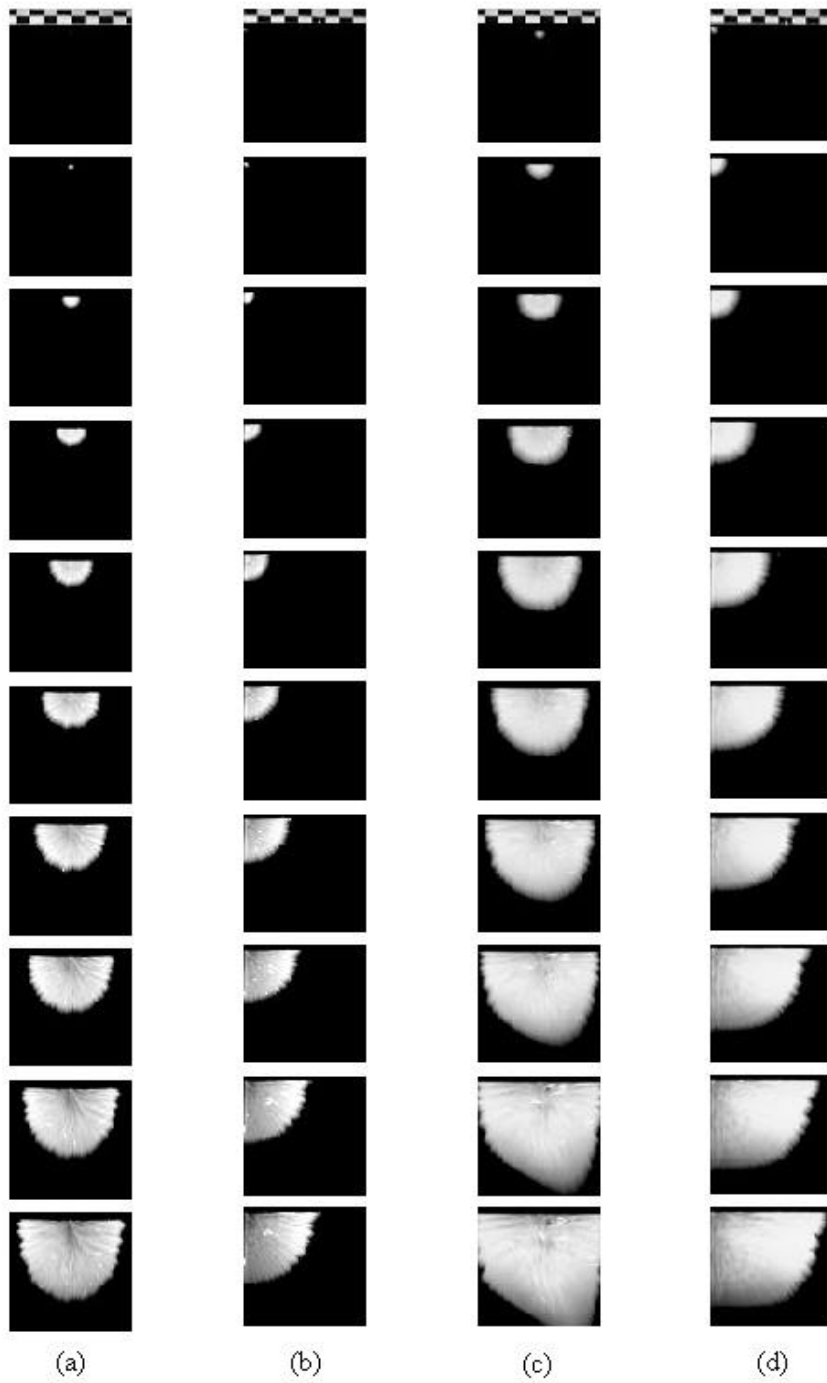
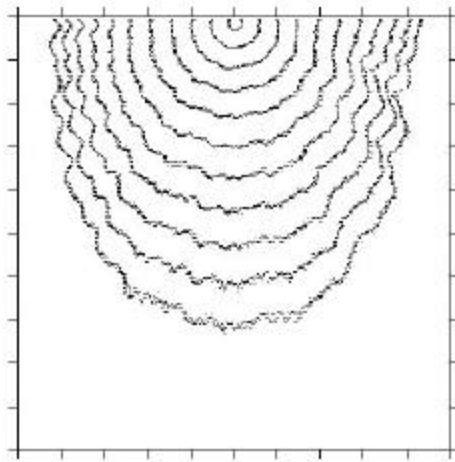
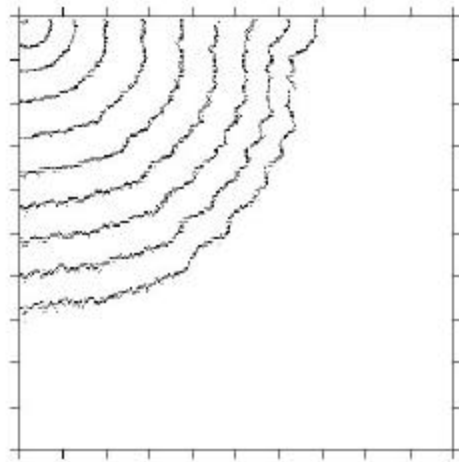


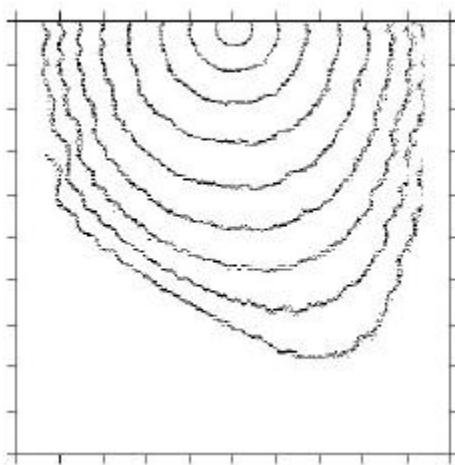
그림 5. 10 % H₂/Air 혼합기의 화염 전파 사진 (250 fps) ;
 (a) 중앙점화, 100 %개방 (b) 모서리점화, 100 %개방
 (c) 중앙점화, 우측 50 %개방 (d) 모서리점화, 우측 50 %개방



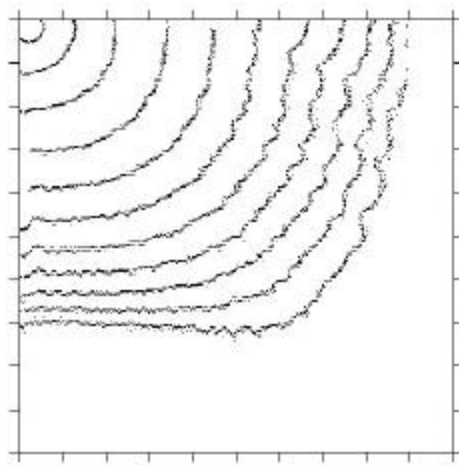
(a) 상단중앙점화, 하단 100 %개방



(b) 상단모서리점화, 하단 100 %개방



(c) 상단중앙점화, 하단우측 50 %개방



(d) 상단모서리점화, 하단우측50%개방

그림 6. 10% H₂/Air 예혼합기의 화염 전파

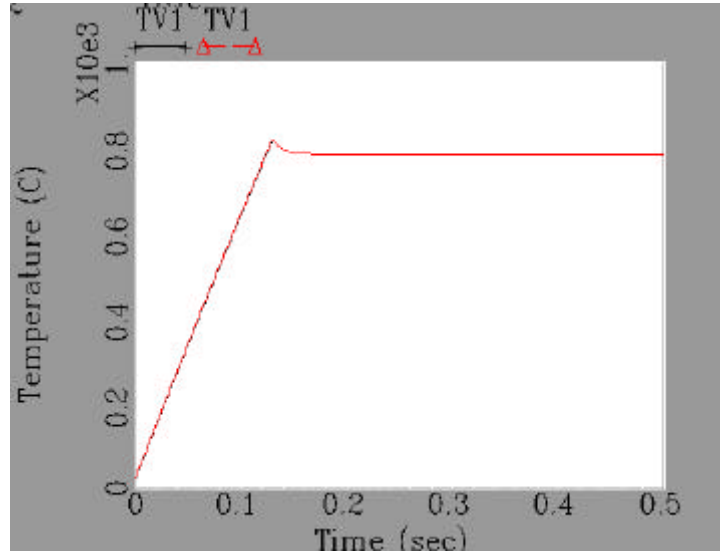


그림 7. GOTHIC lumped 체적 내 온도 변화

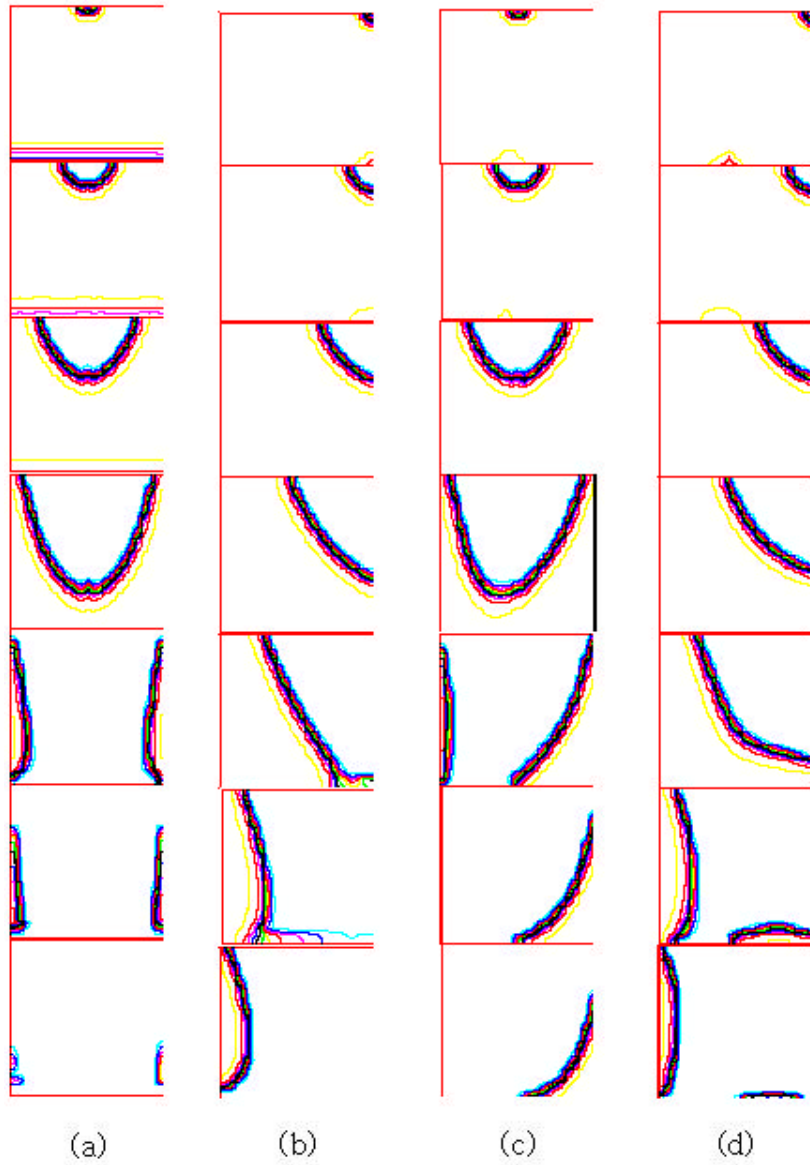


그림 8. 10 % H₂/Air GOTHIC-3D 해석 결과
 (a) 중앙점화, 100 %개방 (b) 모서리점화, 100 %개방
 (c) 중앙점화, 우측 50 %개방 (d) 모서리점화, 우측 50 %개방