

2차원 예혼합 수소연소 실험을 통한
GOTHIC 6.1b 코드 수소연소해석 검증 연구

Experimental Validation for Combustion Analysis of GOTHIC 6.1b
Code in 2-Dimensional Premixed Combustion Experiments

이진용, 이정재, 박군철
서울대학교
서울특별시 관악구 신림동 산 56-1

요 약

GOTHIC 코드의 연소해석 능력에 대한 검증 연구를 위하여 서울대학교에서 제작된 2차원 수소연소 실험 장치를 이용하여 수소 예혼합 연소 실험 및 GOTHIC 코드를 이용한 연소 해석을 수행하였다. 실험 결과 수소화염의 부력 효과, 화염면의 굴곡현상 등 수소화염의 전파 특성을 확인할 수 있었다. 수소화염의 전파는 격실을 빠져나가는데 약 0.1초 정도의 시간이 걸렸으며 장애물과 점화기의 위치, 경계의 개방 여부에 따라 화염 모양에 대한 자료를 얻을 수 있었다. GOTHIC 검증 해석 결과에서 전체적인 수소화염의 전파 모양은 실험을 적절히 모사하지만 부력 효과, 선단의 모양 등 세부적인 사항을 정확히 예측하지 못하는 것으로 나타났다. 특히 미연 가스가 격실의 막힌 쪽에 존재하여 화염이 전파하는 경우 실험에서 유동이 형성되어 화염 전파 모양이 바뀌는 것과 달리 해석에서는 수소연소가 유동에 영향을 받지 않는 것으로 나타났으며 화염이 격실을 빠져나가는 시간은 실험에 비해 느린 약 1초 정도의 시간이 걸리는 것으로 예측하였다. 보다 정확한 화염 전파 예측을 위해서는 화염 전파 모델 관련 인자들의 적절한 적용과 함께 수소 화염 전파 특성이 지배방정식의 풀이에 고려되어야 할 것으로 판단된다.

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. In the experimental results, we could confirm the propagation characteristics of hydrogen flame such as

buoyancy effect, flame front shape etc.. The combustion time of the tests was about 0.1 sec.. In the GOTHIC analyses results, the GOTHIC code could predict the overall hydrogen flame propagation characteristics but the buoyancy effect and flame shape did not compare well with the experimental results. Especially, in case of the flame propagate to the dead-end, GOTHIC predicted the flame did not affected by the flow and this cause quite different results in flame propagation from experimental results. Moreover the combustion time of the analyses was about 1 sec. which is ten times longer than the experimental result. To obtain more reasonable analysis results, it is necessary that combustion model parameters in GOTHIC code apply appropriately and hydrogen flame characteristics be reflected in solving governing equations.

1. 서 론

원자력 발전소의 중대사고시 발생될 수 있는 다량의 수소는 기폭하여 폭발반응을 일으킴으로써 격납건물에 직접적인 하중을 가할 가능성이 있으며 안전관련기기에 손상을 유발시킬 수 있는 것으로 알려져 있다. TMI-2 사고 이후로 노심손상을 동반하는 중대사고시 원자로건물 내에서 수소연소의 현상규명 및 대처방안을 수립하는 것은 원자력 발전소의 건전성을 유지하는데 있어서 필수적인 과제로 인식되고 있다.

이와 관련하여 SNL FITS (화염발생한계 규명), SNL VGES (밀폐용기에서의 아음속 연소 연구), SNL FLAME (화염가속화 현상 및 DDT 발생가능성 연구)[1], NTS (대규모 시설에서의 수소연소현상, 예혼합 및 연속주입시 연소현상 연구)[2], NUPEC (소규모 실험의 경우, 수소연소현상 및 화염 천이현상 연구) 등 수소 연소특성을 규명하기 위한 실험 연구들이 수행되어 왔으며, 수소제어기 위치 선정 등에 실험 결과를 간접적으로 이용하여 왔다. 그러나 원자력 발전소의 규모 및 구조적 특성을 고려할 때, 실험 결과를 직접적으로 원자력 발전소에 적용하는 데에는 한계가 있다.

따라서 원전의 중대사고시 수소거동을 예측하고 기폭 및 연소현상에 대한 분석을 위해서는 해석 코드의 이용이 필수적이다. 현재까지 연소현상의 분석은 대부분 집중모델을 사용한 코드가 사용되어 왔다. 이러한 코드의 경우, 연소에 따른 격실 전체의 압력 및 온도 증가에 대한 간략한 정보를 얻을 수 있으나 그 특성상 화염의 전파, 화염의 모양, 구조적 영향 등 국부적 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 있으나 코드 내부의 사용자 정의 변수의 검증 등 이론적 모델로서의 역할이 적절하게 검증되지 못하고 있다.

본 연구에서는 GOTHIC 6.1b 코드 내 수소연소 모델의 검토를 바탕으로, 2차원 격실에서 수소를 이용한 예혼합 장애물 연소 실험을 수행하고 이 실험을 GOTHIC 코드의 수

소연소 모델을 이용하여 해석함으로써 GOTHIC 6.1b 코드의 연소 해석 능력 검증은 목적으로 하였다.

2. 예혼합 수소연소 실험

2.1 실험 장치의 구성[3]

2차원 수소연소 모형 격실 및 관련 장치를 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. 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. 실험의 안전성과 정확한 사진을 얻을 수 있는 농도를 고려하여 수소/공기 혼합비는 12 % 내외의 희박한 연소 조건이 되도록 혼합하여 사용하였다. 실험은 장애물이 있는 상태에서의 하단 부분을 완전 개방한 후 상부 중앙에서 점화하는 연소실험을 기본으로 하여 50 cm의 막대 형태 장애물을 하단 중앙에 세로로 부착하고 격실 하부의 50 %를 개방한 후 점화 위치를 상부 중앙, 막힌 하부 구석으로 변화시켜 수행하였다. 연소실의 하단부를 개방하여 점화하였으므로 연소 조건은 연소실 내부의 압력이 대기압으로 정압인 경우에 해당된다.

3. GOTHIC 6.1b 코드 수소연소 해석

3.1 해석 격자의 구성

GOTHIC 6.1b 코드를 이용한 연소해석은 상세 격자 해석에 사용되는 mechanistic 모델을 이용하여 디폴트로 정해진 변수 값을 최대한 유지하면서 수행하였다. 해석 격자는 연소 격실을 41×41 개의 총 1681개의 셀로 구성하였으며 경계 조건을 임의의 매우 큰 격실과 가상의 유로를 이용하여 모사하였다. 실험에 사용된 장애물은 유동 면적을 0로 설정하여 null 셀로 모사하였다. 그림 2와 그림 3은 각각 장애물이 존재하고 하단부가 50 % 개방된 경우의 상세 격자의 구성과 전체 격실의 구성을 나타낸다.

3.2 해석 조건 및 방법

초기 조건은 최대한 실험과 동일하게 초기 온도는 상온(298 K), 초기 압력 대기압(101.3 kPa) 상태에 공기 88 %, 수소 12 % 조건으로 설정하였다. 점화기는 실험과 동일한 부분에 코드에서 제공하는 점화기 모델을 사용하여 초기 점화 셀을 모사하였으며 계산 시작과 동시에 작동하는 것으로 설정하였다.

계산의 수렴 및 결과의 재현성을 위하여 격자 구성 및 최대 시간 간격에 대한 민감도 분석을 수행하였으며 6.1b 버전에서 제공하는 전파 관련 변수의 연소 해석에 미치는 영향에 대한 민감도 분석을 수행하였다.

4. 결 과

4.1 예혼합 장애물 수소연소 실험 결과

장애물이 존재하고 하단부를 완전개방한 기본 실험에서 얻은 수소 화염의 이미지들을 그림 4에 나타내었다. 점화된 이후 시간이 경과해 가면서 전파되어 가는 동안 수소 화염 선단의 모양이 많이 굴곡되어지는 것을 살펴볼 수 있다. 본 실험의 경우 수소의 혼합비가 12 %로 희박 연소 조건에 해당하여 diffusive thermal instability에 의한 셀 구조의 성장으로 인한 화염 선단의 굴곡이 나타나게 된 것으로 여겨진다. 화염은 상단부의 중앙에서 점화된 후 방사방향으로 전파되고 장애물에 의해 중간 부분의 화염 구조가 방해를 받는 것이 보이며 시간이 지남에 따라 개방된 부분으로의 가속화 현상을 확인할 수 있다.

그림 5의 (a)는 장애물이 존재하고 하단부의 50 %만을 개방 시킨 후 막힌 쪽 구석에서 점화 시킨 경우의 실험 결과를 (b)는 동일한 조건에서 상부 중앙 점화 실험의 결과를 보여준다. 구석 점화의 경우 초기 화염의 유도(induction) 시간이 매우 길게 나타났으며 고속카메라 이미지는 나타나지 않으나 초기 화염이 부력의 영향으로 상향 전파되고 이후

개방된 부분으로 가속화되어 장애물을 넘어 전파하는 모양을 보여준다. 상부 점화의 경우 점화 초기 화염은 방사형으로 전파하다가 이후 개방된 부분으로 가속화 되는 것을 뚜렷하게 볼 수 있으며 장애물의 영향을 받는 위치까지 전파 된 후 막힌 부분으로의 전파가 매우 느려지고 유동의 영향으로 개방된 부분의 장애물 상단에 위치한 화염이 밀려나는 것을 볼 수 있다.

기존 실험에서 나타난 개방된 부분으로의 화염 가속화 현상과 벽면쪽으로의 압축에 의한 효과를 모두 확인할 수 있었으며 연소 팽창에 의한 개방 부분으로의 미연가스의 유출을 확인하였다.

4.2 GOTHIC 해석 결과 및 토의[4]

그림 6은 수소 12 %, 공기 88 % 혼합 기체에 대해 하단부 완전 개방 실험에 대한 GOTHIC 해석 결과를 나타낸다. 전체적으로 개방된 부분으로의 가속화 현상, 화염 전파 모양 등은 실험과 비슷하다고 할 수 있으나 화염면의 굴곡 등은 코드의 한계상 묘사할 수 없다. 특히 실험에서 화염이 격실을 빠져나가는데 점화 후 약 0.1초가 걸린 것과 비교하면 해석은 약 1초정도로 실험에 비해 매우 느리게 화염이 전파되는 것으로 예측하고 있다.

그림 7에 장애물 존재, 하단부 50 % 개방 실험의 하단부 구석 점화에 대한 GOTHIC 예측 결과를 도시하였고 그림 8에 동일 조건의 상단 중앙 점화 실험에 대한 해석 결과를 나타내었다. 그림 7의 구석 점화 해석의 경우 실험과는 달리 초기 유도 시간이 길어지는 현상은 볼 수 없다. 전체적으로 화염은 점화 초기에 상향으로 전파가 빨리 이루어지고 이후 개방된 부분으로의 가속화 현상을 보인다. 그러나 완전개방 해석과 마찬가지로 전체 연소 시간이 실험에 비해 매우 긴 약 1초 정도의 시간이 걸리는 것으로 나타났다. 초기 상향 전파가 우세한 것도 상세 해석의 부력 효과의 반영이라기보다는 개방된 부분으로의 전파 모델에 의한 영향과 내부 전파 옵션의 상향 전파 인자들에 의한 영향으로 볼 수 있다.

그림 8의 상부 점화 해석 결과를 살펴보면 점화 후 전체적인 화염의 전파 현상은 실험과 비슷함을 알 수 있다. 특히 개방된 부분으로의 가속화 현상은 매우 명확하게 나타난다. 그러나 전체 연소 시간은 이전 해석과 마찬가지로 실험에 비해 매우 길게 나타나며 특히 막힌 부분으로의 전파 현상은 실험과 매우 다른 과정을 보여준다. 실험에서 연소 팽창에 의한 유동으로 막힌 쪽의 미연 가스가 밀려나면서 장애물을 넘어 개방된 쪽으로 전파하는 화염을 밀어내는 현상을 보인 것과 달리 해석에서는 연소에 의한 유동의 생성이 보이지 않는다. 따라서 막힌 쪽의 미연 가스는 상대적으로 매우 긴 시간에 걸쳐 서서히 연소가 일어나는 결과를 보였다.

GOTHIC 6.1b 버전의 코드에서 수소 연소의 화염 전파 및 연소율에 영향을 미치는 인자로 점화 한계 온도, 가연 및 미연 수소 분율, 화염 두께 등이 있다. 이 인자들은 코드에

서 사용자 입력 값으로 줄 수 있으며 상세 해석의 지배방정식 해법보다는 화염 전파 모델에 관련된 인자들이다. 이러한 인자들에 대한 민감도 분석 결과를 요약하면 다음과 같다. 점화 한계 온도의 경우 디폴트 값인 175 °C 대신 임의로 점화 한계 온도를 100 °C로 낮추었을 때 연소가 빠르게 진행되어 연소 시간은 0.4 초 정도로 나타났다. 이는 GOTHIC 내부에서 채택하고 있는 온도 가중 방법에 의해 주변 온도가 전화 한계 온도에 도달하는 시간이 짧아짐에 따른 결과이다. 기연 및 미연 수소 농도의 경우 기연 수소 농도를 크게 설정함에 따라 연소가 빠르게 진행되었으나 실험 결과와 비교할 때 그 영향은 상대적으로 작게 나타났으며 미연 수소 농도는 낮게 설정할수록 연소가 빠르게 진행되었으나 그 영향은 무시할 정도로 작게 나타났다. 화염 두께의 경우 화염두께를 디폴트 값보다 작게 설정했을 때 연소가 빠르게 진행되었으나 영향은 작은 것으로 나타났다.

GOTHIC 6.1b 코드는 기존 GOTHIC 6.0 버전 코드와 비교할 때 수소 연소 해석에서 많은 개선이 이루어졌음을 볼 수 있다. 이는 코드 내 기존 모델의 보완 뿐 아니라 사용자 입력값의 적절한 선택이 중요한 역할을 하는 것으로 판단된다. 그러나 실험 결과와 비교할 때 해석 결과는 약 10 배 정도의 느린 화염전파를 예측하고 있다. 이는 기존에 언급한 화염 전파 모델의 특성 뿐 아니라 지배방정식의 해법에 연소에 의한 생성항 처리에 대한 확인이 필요함을 의미한다[3]. 수소 연소 현상에 중요한 역할을 하는 부력 효과에 대해 GOTHIC 코드는 농도 차이에 의한 부력항이 포함되어 있지 않으며, 운동량 방정식에서 확산항을 하나의 소스항처럼 취급하고 있다. 연소에 의한 화학종의 변화 및 에너지 생성을 지배방정식에서 고려하고 있으나 연소 팽창 효과 혹은 밀도 변화에 의한 효과 등 유동에 영향을 주는 인자에 대한 고려가 적절히 반영되어 있지 않은 것으로 판단된다. 따라서 대형 실험인 FLAME 등 개방된 부분으로의 화염 전파 현상의 모사에서는 지배방정식과 화염 전파 모델이 비교적 적절히 수소 화염의 전파를 모사할 수 있을 것으로 판단되나 소격실의 복잡한 구조, 특히 막힌 부분으로의 화염 전파 현상의 모사에는 실험과 상이한 결과를 도출할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 GOTHIC 코드 수소연소 해석 능력을 검증하기 위하여 2차원 연소 격실에서의 예혼합 장애물 연소 실험을 수행하고 이에 대한 GOTHIC 6.1b 코드 해석을 수행하였다.

전체적인 화염의 전파 형상 및 개방된 부분으로의 화염 가속화 현상은 정성적으로 적절히 모사함을 알 수 있었으나 화염 전파 속도는 실험에 비해 느리게 예측하였다. 이는 기존 화염 전파 모델인 온도 가중 방법에 의한 연소 체적의 증가량을 계산하는 방법과 연소에 의한 생성항의 처리가 지배방정식에서 적절히 이루어지지 않은 결과로 판단된다. 특히 장애물이 존재하고 막힌 부분으로 화염이 전파될 경우 연소에 의한 밀도의 변화, 부력 효과, 연소 팽창에 의한 유동의 생성 등 수소 화염 전파 특성에 대한 고려가 이루어질

때 보다 정확한 화염 전파 예측이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 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.
2. A.C.Ratzel (1985). Data Analyses for Nevada Test Site (NTS) Premixed Combustion Tests. NUREG-4138, Sandia National Laboratories.
3. 이진용, 양승연, 박군철, 정석호(2002). 2차원 수소연소 실험을 통한 GOTHIC 코드 수소연소해석의 검증에 관한 연구. 2002 추계학술발표회 논문집, 한국원자력학회
4. (1997). GOTHIC-CONTAINMENT ANALYSIS PACKAGE : TECHNICAL MANUAL. NAI.
5. Thompson R. T. et al. (1984). Large Scale Hydrogen Combustion Experiments. ANS intl Conference on Containment Design. Toronto, Canada.



그림 1. 2차원 연소 격실 및 실험 장치

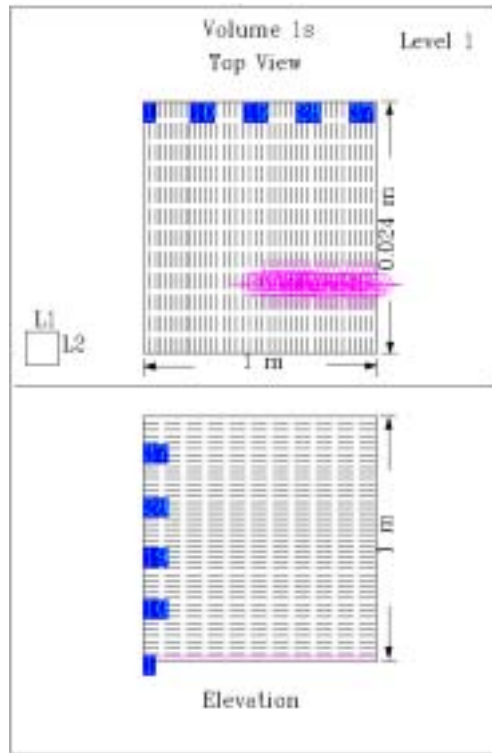


그림 2. 상세 격자의 구성



그림 3. 해석 격실의 구성

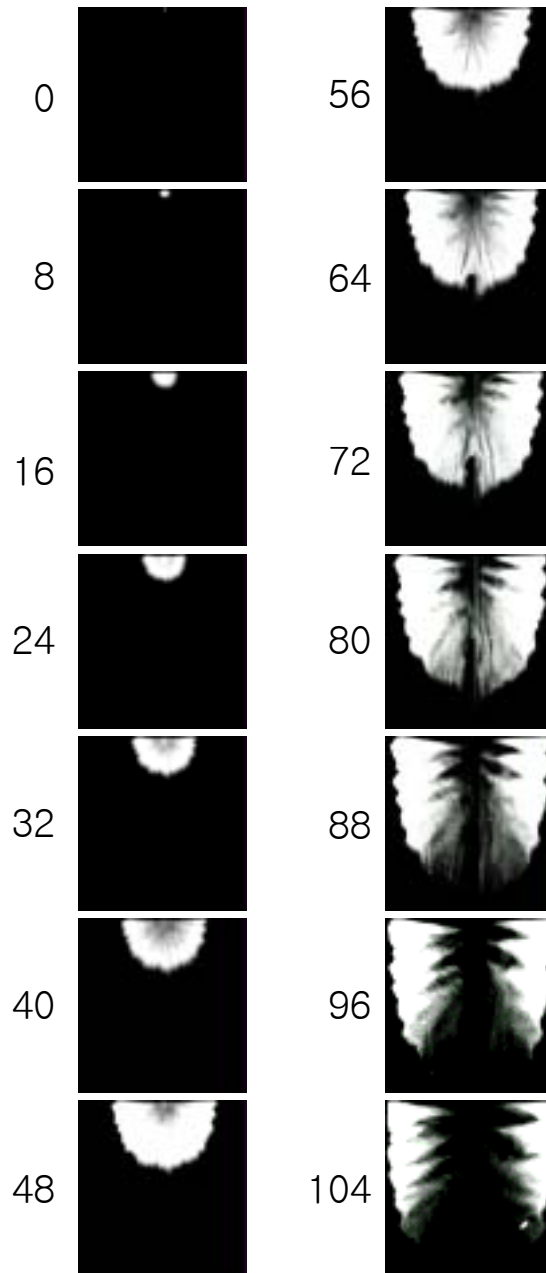


그림 4. 12 % H₂/Air 혼합기의 화염 전파
 (장애물 존재, 하단부 완전개방, 상부 중앙점화, 시간 msec)

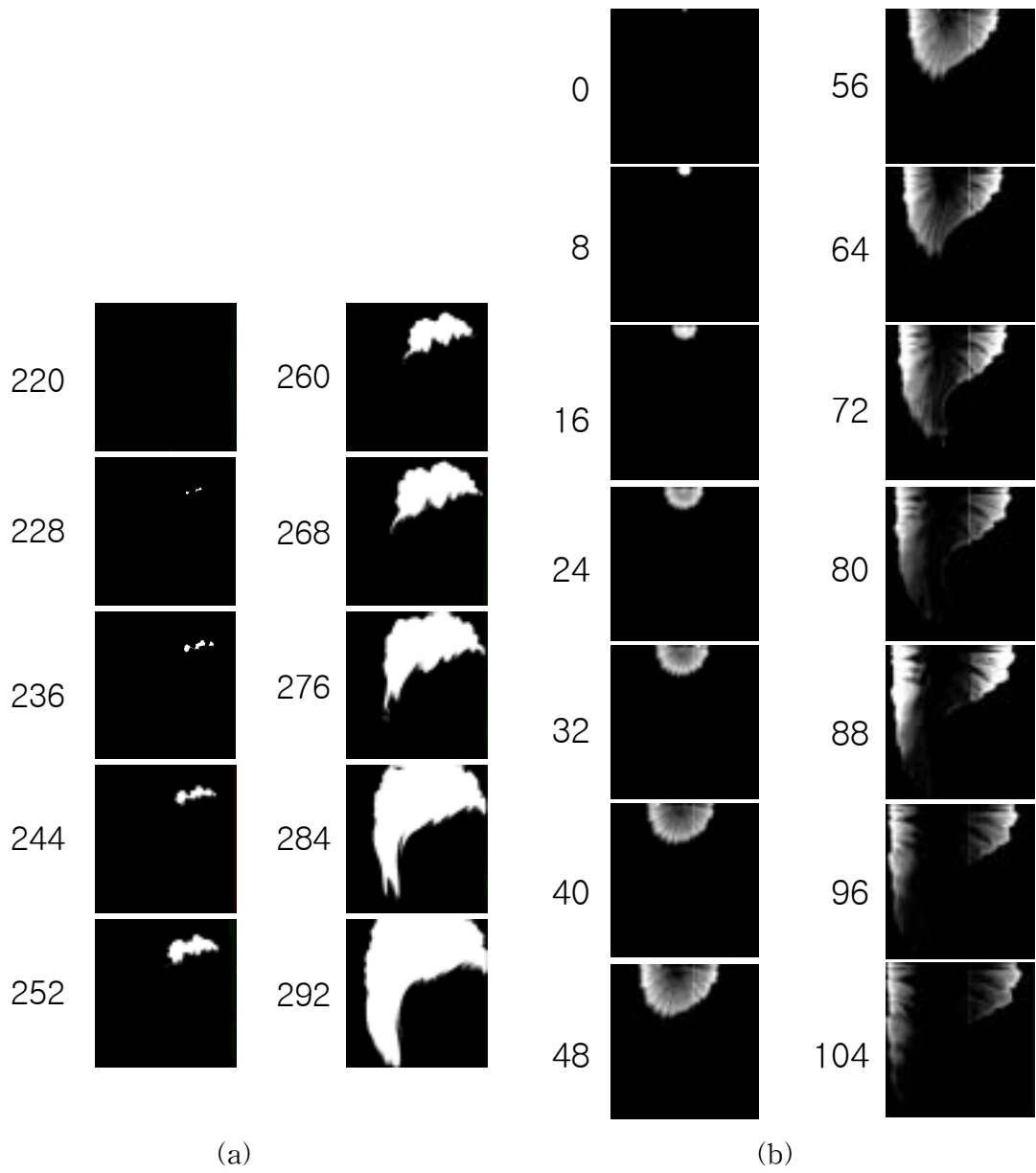


그림 5. 12 % H₂/Air 혼합기의 화염 전파

(a) 장애물 존재, 하단부 50 %개방, 폐쇄하단 구석점화, 시간 msec

(b) 장애물 존재, 하단부 50 %개방, 상부 중앙점화, 시간 msec

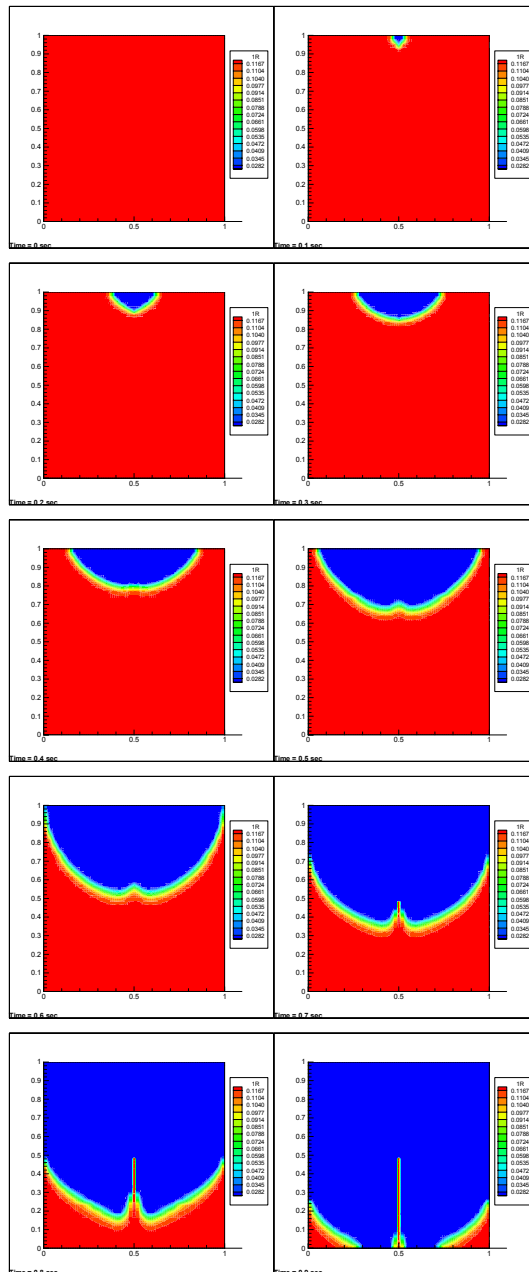


그림 6. 12% H₂/Air 예혼합기의 화염 전파
(GOTHIC 해석, 하단부 완전개방, 상부 중앙점화)

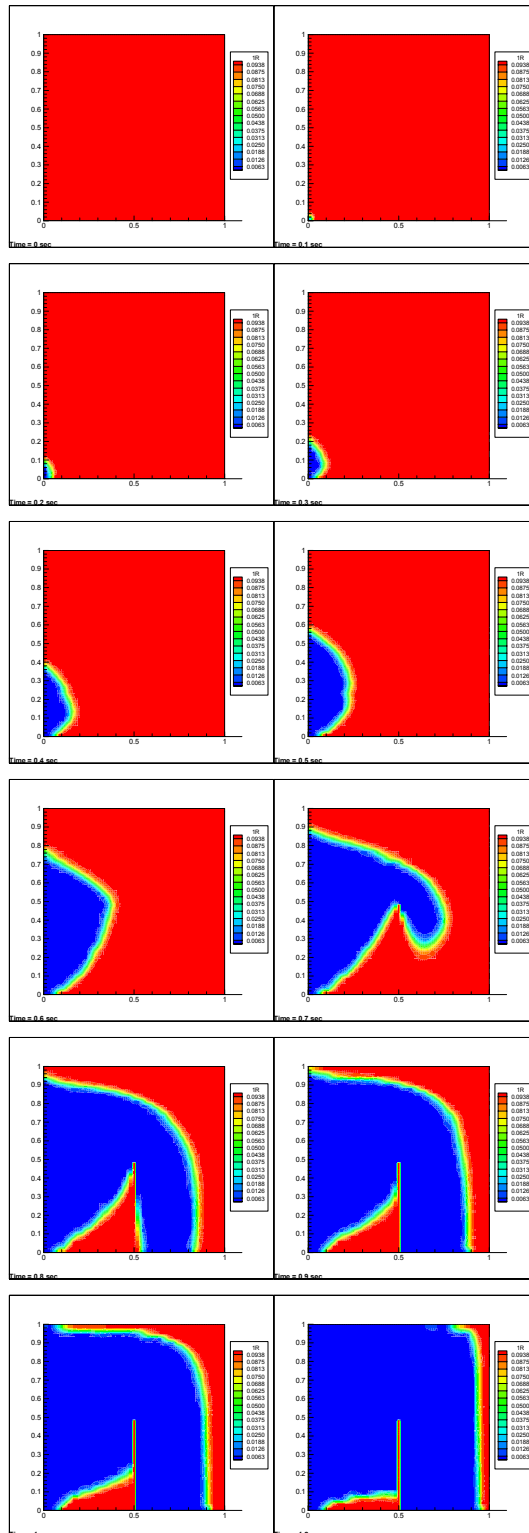


그림 7. 12% H₂/Air 예혼합기의 화염 전파
(GOTHIC 해석, 하단부 50 % 개방, 하단부 구석점화)

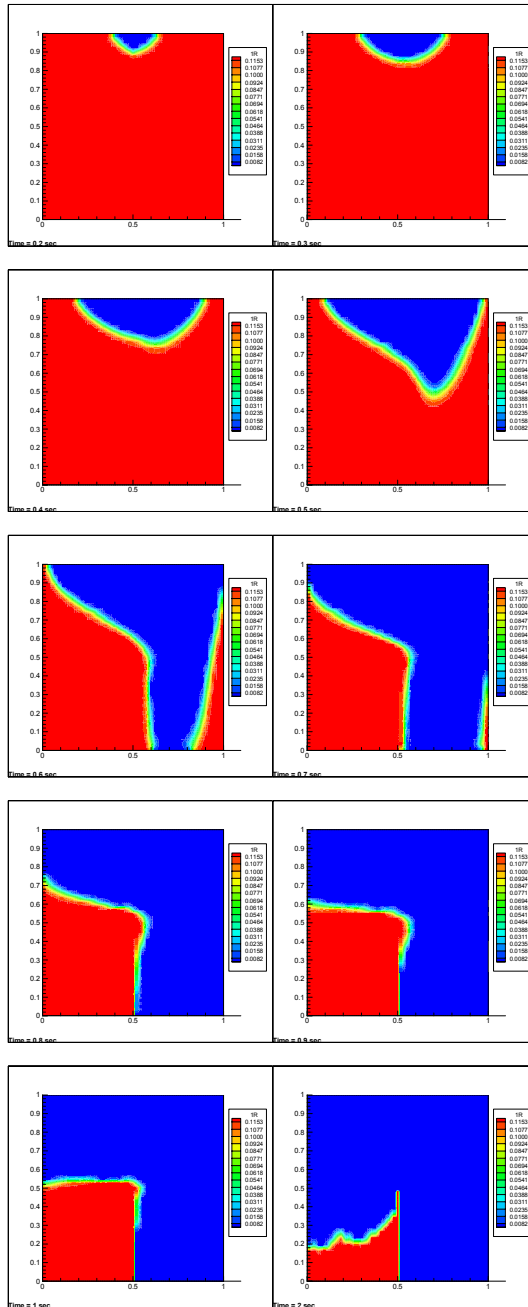


그림 8. 12% H₂/Air 예혼합기의 화염 전파
(GOTHIC 해석, 하단부 50 % 개방, 상단 중앙점화)