

원자력발전소 격실에서의 수소화염 가속에 대한 수치해석 연구

김 종 태,^{*1} 김 상 백,² 김 후 중³

NUMERICAL METHOD FOR EVALUATION OF HYDROGEN FLAME ACCELERATION IN A COMPARTMENT OF A NUCLEAR POWER PLANT

Jongtae Kim,^{*1} Sang-Baik Kim² and Hoo-Joong Kim³

Hydrogen safety is one of important issues for future public usage of hydrogen. When hydrogen is released in a compartment, the occurrence of detonation must be prohibited. In order to evaluate the possibility of DDT (Deflagration to Detonation Transition) in the compartment with the hydrogen release, sigma-lambda criteria which were developed from experimental data are commonly used. But they give a little conservative results because they do not consider the detailed geometrical effect of the compartment. This is the main reason of the need to mechanistic combustion model for evaluation of hydrogen flame propagation and acceleration. In this study, sigma-lambda criteria and combustion model were systematically applied to evaluate a possibility of DDT in a IRWST compartment of APR1400 nuclear power plant during a hypothetical accident. A combustion model in an open source CFD code OpenFOAM has been applied for analyses of hydrogen flame propagation. The model was validated by evaluating the flame acceleration tests conducted in FLAME facility. And it was applied to evaluate the characteristics of a hydrogen flame propagation in the IRWST compartment of APR1400.

Key Words : 수소(Hydrogen), DDT(Deflagration to Detonation Transition), 폭굉(Detonation), 화염(Flame), 전파(Propagation), 격실(Compartment)

1. 서 론

수소는 연소와 같이 에너지 발생 후에 지구온난화의 원인 중의 하나인 이산화탄소를 배출하지 않기 때문에 미래의 청정에너지 중의 하나로 꼽히고 있으며, 현재 수소의 생산, 저장 및 안전에 대한 연구가 많이 진행되고 있다[1]. 수소는 기존의 화석연료와는 매우 다른 특성을 가지고 있으며 극고압 상태를 제외하고 대부분 기체상태로 존재하기 때문에 수소의 폭발 위험성은 다른 연료에 비하여 높다. 대표적인 수소의 안

전에 대한 연구는 수소 저장 및 생산 시설에서의 누출과 수소 자동차에서의 누출[2]에 의한 사고를 들 수 있다.

이와 달리, 원자력발전소에서는 사고 시 핵연료 피복재가 고온의 수증기와 산화반응을 하여 다량의 수소가 생성되어 원자로건물 내에 축적된다. 미국의 TMI 원자로 사고시에 원자로건물 내에서 수소 폭발[3]이 있었으며, 이후로 원자로건물의 설계에서 수소에 대한 안전성이 매우 강화되었다.

수소 누출 사고 시에는 수소가 공기중으로 확산되면서 전기적 혹은 열적 원인에 의해 연소가 일어나며, 발생한 수소화염은 초기에 느린 속도로 전파되어 가다가 난류 혼합에 의하여 점점 빠르게 전파되어 간다. 수소 화염 전파에 있어서 가장 위험한 것은 폭굉(detonation)으로 천이하는 것으로 이 경우 압력파의 강도는 수십 MPa에 이른다[4]. 원자로건물 내부는 많은 격실로 이루어져 있으며 격실에는 많은 장애물(blockage)이 있어서 수소 화염의 전파에 오히려 폭굉으로의

접수일: 2010년 10월 14일, 수정일: 2010년 12월 14일,

계재확정일: 2010년 12월 17일.

1 정회원, 한국원자력연구원, 열수력안전연구부

2 한국원자력연구원, 열수력안전연구부

3 경원이엔씨

* Corresponding author, E-mail: ex-kjt@kaeri.re.kr

천(DDT, Deflagration to Detonation Transition)을 유도할 수 있다. 원자력 관련 규정에서는 원자로건물 내에서 수소연소가 일어나더라도 DDT가 발생하는 것을 방지하도록 규정하고 있다. 현재 건설중인 원전뿐만 아니라 가동중인 원전에서도 DDT를 방지하면서 수소를 제거하기 위한 수소점화기, 수소축매제결합기 등이 설치되어 있다. 그리고 새로운 원전의 설계와 건설의 인허가를 얻기 위해서는 사고 시에도 수소의 DDT가 발생하지 않음을 보여야한다.

원자로건물 혹은 격실에서 수소의 연소 및 폭발에 대한 실증 실험은 규모 면에서 매우 어려운 일로서 대부분 해석적인 연구에 의존하고 있다. 그러나 해석적인 연구에서도 DDT를 직접 모의하는 것은 계산량의 한계로 인해 수소 분포로부터 DDT의 발생 가능성을 평가하는 방법을 주로 사용한다.

전부 혹은 일부분 밀폐되어 있는 격실에서 수소가 방출되면 수소의 농도 분포 및 수소-공기 혼합 구름의 크기와 격실 내에 존재하는 장애물의 배치 등에 따라 화염의 가속 및 DDT의 발생 가능성을 평가할 수 있는 실험식 개발되어있다. 이것을 화염가속 및 DDT 지수 혹은 σ - λ criteria라고 부르며 이 두 지수 값이 1보다 크면 수소화염이 폭발으로 천이 즉 DDT가 발생할 수 있음을 나타낸다. 그러나 이 화염가속 및 DDT 지수를 이용하는 방법은 격실의 형상을 제대로 반영하지 않은 일반식이기 때문에 다소 보수적인(conservative) 결과를 얻게 된다.

수소 안전성 측면에서 앞에서 언급한 화염가속 및 DDT 지수를 이용한 평가 방법은 다소 보수적이더라도 이 두 지수 값이 1을 넘지 않도록 수소의 확산을 증대시키는 방향으로 격실의 형상을 설계하거나 혹은 수소제어장치를 설치할 수 있다. 그러나 수소 방출 격실의 형상 변경이 불가능하거나 수소제어장치가 무효한 경우에는 좀 더 엄밀한 해석방법을 적용하여 수소안전성을 평가할 필요가 있다.

본 연구에서는 APR1400 원자로건물을 대상으로 가상적인 사고 시 수소의 거동 및 분포를 계산하고 이 결과를 이용하여 화염가속 및 DDT 지수를 평가하였으며, 화염가속 및 DDT 지수가 1보다 높게 나타난 핵연료재장전수탱크(IRWST) 격실에 대하여 수소연소에 대한 상세 해석을 수행하여 화염전파 특성을 평가하였다.

2. 수소 분포를 이용한 화염가속 평가

2.1 화염가속 및 DDT 지수(Sigma-lambda criteria)

원자로건물 혹은 내부의 큰 격실에서 수소연소가 발생하면 벽면 혹은 화염 자체에서 발생하는 난류와 구조물에 의해 반사되는 연소 압력과 등의 영향으로 화염이 가속(flame acceleration, FA)되고 결국 초음속연소(detonation)로 천이된다.

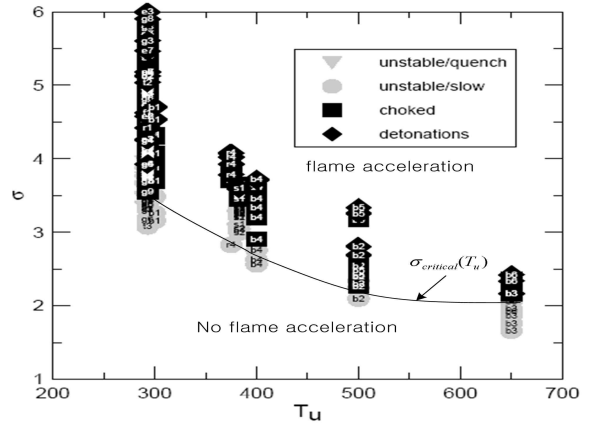


Fig. 1 Combustion regime as a function of expansion ratio σ and initial temperature T_u . Black points show fast combustion regimes, and gray points show slow combustion regimes from Breitung(1999)[5]

이와 같은 화염의 가속과 DDT를 수치적으로 직접 해석하기 위해서는 매우 작은 시간적, 공간적 스케일이 필요하기 때문에 대형 격실에서의 수소화염 전파의 상세 해석은 많은 계산량을 요구한다. 일반적으로 사고 경위에 따른 수소안전성 평가는 격실에서의 수소 거동 및 농도 분포를 계산하고 σ - λ ($\sigma - \lambda$) [4] 두 파라미터를 이용하여 격실에 형성된 수소 혼합기체의 화염 가속 및 DDT 가능성을 평가하는 방법을 사용한다. 화염가속은 기체의 성분비, 난류강도, 구조물의 길이 등에 영향을 받으며, 이 화염가속 가능성은 혼합기체의 연소팽창률인 σ 값으로 평가한다.

$$\sigma_{index} = \frac{\sigma(\overline{x_{H_2}}, \overline{x_{H_2O}}, \overline{x_{O_2}}, T)}{\sigma_{critical}(\overline{x_{H_2}}, \overline{x_{O_2}}, T)} \quad (1)$$

식 (1)은 실험에서 얻어진 $\sigma_{critical}$ (Fig. 1 참조)을 이용하여 σ_{index} 를 구하는 수식으로, $\sigma_{index} > 1$ 이면 화염이 가속될 수 있음을 나타낸다. 여기서 \overline{x} 는 기체 성분의 질량분율(mass fraction)을 의미한다. DDT 평가는 FZK-KI 실험에서 밝혀진 $D/7\lambda$ [5]를 이용한다. D는 혼합기체의 특성길이이고, λ 는 초음속연소의 cell size로서 기체의 구성비, 압력, 온도 등의 함수이다. DDT 지수 혹은 $D/7\lambda$ 값이 1보다 크면 DDT가 일어날 가능성이 있음을 나타낸다.

2.2 원자로건물 수소분포 해석 및 화염가속 평가

APR1400 원전에서 가상적인 급수완전상실사고 발생 시 수증기와 수소의 3차원 거동에 대하여 GASFLOW[6] 코드를 이

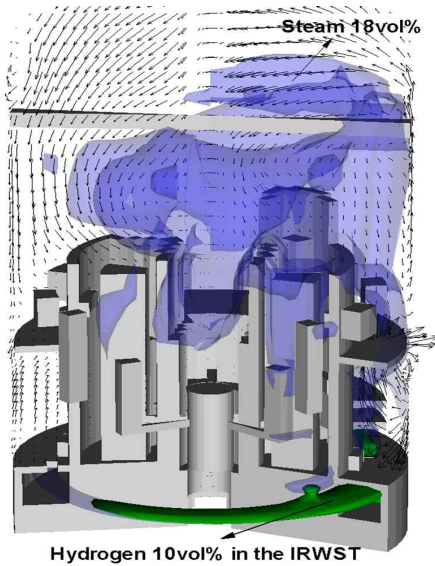


Fig. 2 Hydrogen and steam distributions in the containment at 5,900 s (accident progression time is 15,900 s)

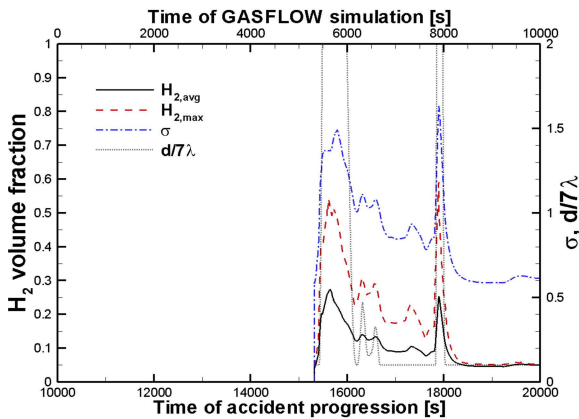


Fig. 3 Temporal hydrogen concentration and FA-DDT indices in the IRWST

용하여 해석하였다. 본 해석을 위하여 19×61×53의 원통좌표계 격자를 사용하였으며, KISTI의 NEC 벡터 슈퍼컴퓨터를 이용하여 10,000초 동안의 수소 방출 사고를 해석하는데 120 CPU 시간이 소요되었다. GASFLOW 코드를 이용한 원자로건물 내 수소 거동의 해석 방법은 참고문헌[7]에 기술되어 있다. 여기서는 APR1400의 IRWST 격실을 중심으로 수소 분포 및 화염가속 특성에 대하여 기술한다.

APR1400은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 원자로건물 하부에 핵연료재장전수를 저장하는 탱크인 IRWST 격실이 있으며 고압사고시 IRWST 격실로 수증기와 수소가 방출된다. Fig. 2는 사고 시작 15,900초에서 원자로건물 내 유동과 수소 및 수

증기의 분포를 보여주고 있다. IRWST 격실은 천정에 4 개의 환기구가 있으며 이 환기구를 통하여 수증기와 수소가 방출되고 있음을 알 수 있다. APR1400에서 급수완전상실사고 시에는 대부분의 수증기가 IRWST 격실에 있는 재정전수에 의하여 응축되고 소량의 수증기와 수소가 방출되기 때문에 수소의 농도가 매우 높아질 수 있다.

Fig. 3은 IRWST 격실에서 시간에 따른 수소농도의 변화와 이를 이용하여 계산한 화염가속 및 DDT 지수의 변화를 보여준다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 수소농도가 높은 시간대에서 IRWST 격실의 수소혼합구름은 화염가속 및 DDT 지수가 1보다 높게 나타난다. 이것은 IRWST 격실에서 수소연소가 발생하면 수소화염이 폭굉으로 천이될 가능성이 있음을 의미한다.

3. 수소화염 가속 해석

APR1400의 급수완전상실사고 시에는 IRWST 격실에서 발생한 수소화염은 폭굉으로 천이될 가능성을 완전히 배제할 수 없다. 그러나 화염가속 및 DDT 지수에 기반한 수소안전성 평가 방법은 격실의 형상을 제대로 반영하지 않기 때문에 보수적인 결과를 얻을 수밖에 없으며, 본 연구에서는 IRWST 내 수소연소의 상세 해석을 통하여 수소화염의 전파특성을 평가하였다.

3.1 수소 연소 해석 모델

본 연구에서는 격실 내부에서의 수소연소 및 화염의 전파 특성을 평가하기 위하여 소스 공개(open-source) CFD 코드인 OpenFoam[8]을 사용하였다. 격실에서 수소연소는 점화시점에 따라 확산화염과 예혼합화염으로 나뉘어질 수 있다. 수소가 방출되기 전에 수소제어장치 중의 하나인 수소점화기를 작동시키면 방출되는 수소는 확산화염 형태로 연소가 될 것이다. APR1400의 IRWST 내에는 2기의 수소점화기가 있으며 운전원(operator)이 사고시 작동시킬 수 있다. 본 연구에서는 IRWST 내 수소점화기를 작동시킬 수 없는 사고를 가정하였으며 이 경우 전기적 혹은 열적 원인에 의해 예혼합화염 형태의 연소가 일어난다고 볼 수 있다.

OpenFoam에는 압축성을 고려한 예혼합 기체의 해석 solver로 PaSR 모델[9]을 기반으로 하는 reactingFoam과 화염편(flamelet) 모델을 기반으로 하는 xiFoam 등 두 가지가 있으며, 본 연구에서는 난류 예혼합 수소 연소를 해석하기 위하여 reactingFoam을 사용하였다. reactingFoam의 난류 예혼합화염 모델은 PaSR 모델을 사용하고 있다.



$$\dot{\omega}_{H_2} = - \frac{\Delta t + t_c}{\Delta t + t_c + t_k} k_f [H_2]^2 [O_2] \quad (3)$$

식 (3)에서 Δt 는 계산 시간 간격이고 t_c 는 화학반응 시간을 나타내며 난류혼합에 의한 시간 t_k 는 식 (4)와 같이 구해진다. PaSR 모델의 상수 C_{mix} 는 0부터 1 사이의 값으로 FLAME 실험[10] 검증을 통하여 구하였다.

$$t_k = C_{mix} \sqrt{\frac{\mu_{eff}}{\rho \epsilon}} \quad (4)$$

3.2 FLAME 실험 해석을 통한 모델의 검증

FLAME 실험은 미국 Sandia 국립연구소에서 수행한 수소 연소 및 화염 가속 평가 실험이다. FLAME 실험은 길이가 30.5 m, 높이와 폭이 각각 2.44 m, 1.83 m인 직사각 단면을 가진 긴 채널에서 수행되었으며, 수소의 농도, 채널 내부의 장애물의 유무 그리고 채널 상부벽에 환기구의 존재에 따른 수소 화염의 가속을 평가하였다. FLAME 실험에서 가장 중요한 인자인 수소의 농도는 mole 기준(혹은 체적 기준)으로 12 %에서 30 % 사이에 있으며, 수소농도 12 vol%에서 약간의 수소 화염 가속이 측정되었으며, 15 vol%에서 채널 내부에 장애물을 설치하여 유동의 혼합을 증가시킨 경우 채널의 끝단부에서 DDT가 발생하였다. FLAME 실험 보고서에서는 F1에서 F29까지의 실험 결과를 포함하고 있으며, F1에서 F20까지는 채널 내부에 장애물을 설치하지 않고 실험하였으며, F21에서 F29는 내부에 블록 형태 혹은 판형의 장애물을 설치하여 실험하였다.

본 연구에서는 APR1400 원자로건물 내 IRWST 격실에서의 수소화염 전파 및 가속에 대해 reactingFoam을 적용하고자 하며, 이를 위하여 먼저 reactingFoam의 FLAME 실험 해석을 통하여 코드의 수치기법과 연소모델을 검증하고 또한 PaSR 모델의 인자값을 선정하였다. Table 1은 reactingFoam의 검증에 사용된 실험 케이스이며, 특히 F22는 채널 내부에 1.83 m 간격으로 폭 0.3 m인 평판을 양 측벽에 설치한 경우이다.

Fig. 4는 FLAME 실험 해석을 위하여 사용된 격자를 보여 주고 있다. 길이 방향으로 100 개, 높이와 폭 방향으로 각각 24, 18개의 육면체 셀로 구성하였으며, 오른쪽의 끝이 출구로 비반사 출구경계조건을 사용하였으며 그 외 경계면은 모두

Table 1 FLAME test cases simulated by openfoam

case	H ₂ mole-concentration	obstacles	DDT
F10	12.3 %	x	x
F14	30 %	x	o
F22	15 %	o	o

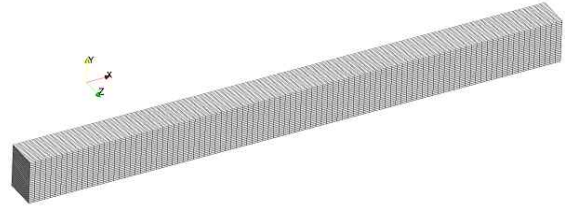


Fig. 4 Surface mesh and geometry of the FLAME test channel

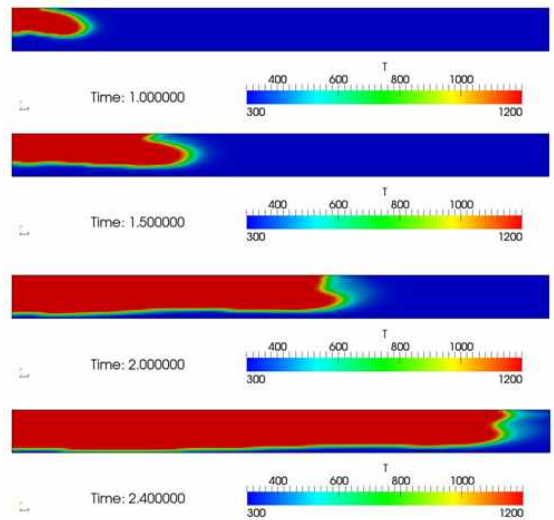


Fig. 5 Flame propagation by temperature contours for FLAME F10 test

단열벽면 조건을 사용하였다. FLAME 실험 해석을 위하여 인텔 Xeon 2.3 GHz PC를 사용하였으며, 채널 내부의 초기 수소 농도와 화염이 출구까지 도달하는데 걸리는 시간에 따라 차이는 있으나 약 2.5~3 CPU 시간이 소요 되었다.

3.2.1 F10 실험 해석

F10 실험은 수소 농도가 12.3 vol%로 다소 낮은 경우로, 채널 내부에 난류를 강제적으로 발생시킬 장애물이 존재하지 않기 때문에, 실험 결과에서도 화염의 전파 속도가 매우 낮게 예측되었다. Fig. 5는 reactingFoam의 계산 결과로, 화염면의 위치를 파악하기 위하여 등온도선도를 각 시간에 따라 그린 것으로, 화염면의 구조 및 화염의 전파 속도를 짐작할 수 있다. 수소 농도가 12.3 vol%인 경우 수소 화염은 매우 느린 속도로 전파해가며, 특히 연소 기체와 비연소 기체 사이의 온도 차이에 의한 부력의 영향으로 화염면이 많이 휘어져 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 채널의 상부에서 화염이 하부보다 다소 빠르게 전파되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 채널의 길이 방향으로 중심선을 따라 구한 온도구

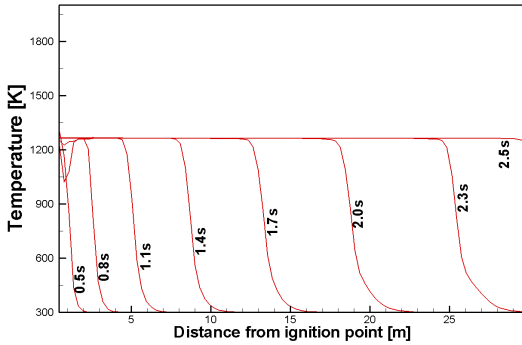


Fig. 6 Temperature profiles for FLAME F10 test

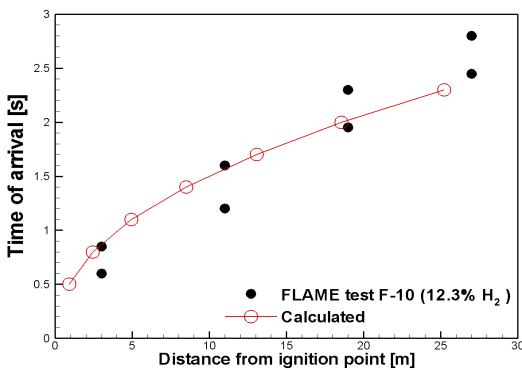


Fig. 7 Flame arrival time along the channel for FLAME F10 test

배의 시간에 따른 변화를 보여주고 있으며, Fig. 7은 F10 실험에 대하여 채널의 길이 방향으로 점화기 위치에서 거리에 따른 수소 화염의 도달 시간을 실험값과 계산결과를 비교한 것으로 채널 내부에서 전파되는 수소 화염의 위치를 reactingFoam이 대체적으로 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

채널 내부에 장애물이 없고 수소 농도가 12.3 vol%로 낮은 경우 수소 화염은 난류의 예혼합 화염으로 채널 내부를 천천히 전파해 나가는 것으로 보인다.

3.2.2 F14 실험 해석

F14 실험은 F10에 비하여 채널 내부 수소-공기 혼합기체의 수소농도가 30 vol%로 매우 높은 경우로, 수소의 등가당량비에 해당하는 농도이다. 이 F14 실험에서는 수소화염이 가속되어 DDT가 발생하였으며 수소화염은 폭굉 형태로 출구를 빠져나간 것으로 추정되었다.

이 실험에 대하여 reactingFoam을 이용하여 수소 화염의 전파 특성을 해석하였다. Fig. 8은 각 시간에 따른 수소 화염의 화염면을 보기 위하여 동온도선도를 그린 것으로 F10에 비하여 매우 빠른 속도로 화염이 전파되어 가는 것을 알 수 있다.

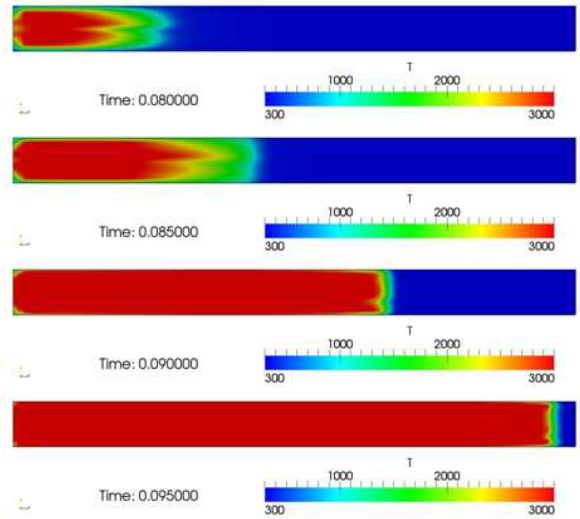


Fig. 8 Flame propagation by temperature contours for FLAME F14 test

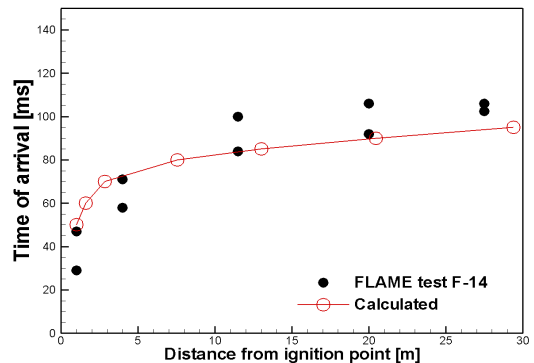


Fig. 9 Flame arrival time along the channel for FLAME F14 test

Fig. 9는 F14 실험에 대하여 채널의 왼쪽 끝단에 설치된 점화기 위치에서 채널의 길이 방향으로 거리에 따른 수소 화염의 도달 시간을 실험값과 계산 결과를 비교한 것이다. 화염 도달 시간 곡선과 x축의 사이각이 작아질수록 화염이 가속되는 것을 의미하는 것으로 실험 결과인 검은 점은 채널의 10 m 부근에서 화염이 급속히 빨라짐을 짐작할 수 있다. 반면에 계산 결과에서는 화염속도의 변화가 5 m부근에서 크게 나타나는데 이것은 본 연구에서 사용된 PaSR 난류화염 모델에 기인한 것으로 판단되며 화염면과 난류의 상호작용에 대해 상세히 해석하기 위해서는 더 정교한 모델이 필요한 것으로 사료된다. 그러나, PaSR 난류화염 모델이 수소 농도에 따른 화염의 가속 특성을 적절히 예측할 수 있는 것으로 판단된다.

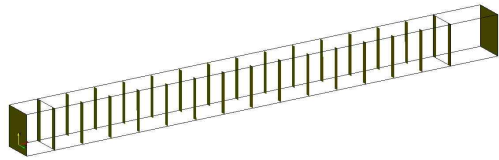


Fig. 10 Modeled geometry for F22 test case

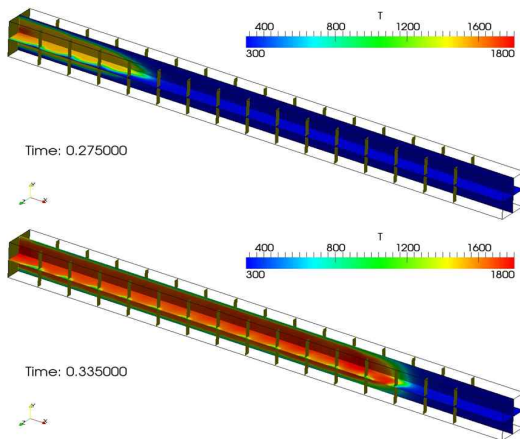


Fig. 11 Flame propagation by temperature contours for FLAME F22 test

3.2.3 F22 실험 해석

F22 실험은 채널 내부의 좌우 수직 벽에 평판을 1.83 m 간격으로 설치하여 채널 단면적에 대한 장애물의 면적비인 blockage ratio를 33 %로 두고, 수소 농도 15 vol%인 수소-공기 혼합기체에서 수소화염의 전파를 실험하였으며, 특히 채널의 끝단에서 DDT가 발생한 실험이다. F22 실험해석에서도 다른 경우와 동일한 격자를 사용하였으며 채널 내부에 Fig. 10에서 보는 바와 같이 평판을 두께가 0인 벽으로 모델링하였다.

Fig. 11은 채널 내부를 전파해가는 화염면의 위치를 보여주고 있다. 0.275 s에서 0.335 s 동안 화염이 9개의 평판을 지나갔으며 이것을 속도로 환산하면 약 275 m/s에 해당한다. 즉 0.275 s 이전까지 이동한 거리에 비하여 이후 0.06 s 동안 이동한 거리가 두 배 이상 길며 이것은 화염이 채널 내부에 설치된 평판 장애물에 의하여 급격히 가속되고 있는 것으로 짐작할 수 있다. FLAME 실험과 같이 정지된 수소 혼합기체에 연소가 일어나면 연소된 기체의 열팽창에 의해 유동이 발생하고 이 유동은 고온의 연소 기체와 미연 기체의 혼합을 유도하여 화염의 전파를 촉진시킨다. FLAME 채널 내부에 설치된 수직 평판은 유동의 난류 혼합을 증가시키며 이것은 화염면을 늘리거나 굴곡시켜(wrinkling) 더 빠른 연소가 일어날 수

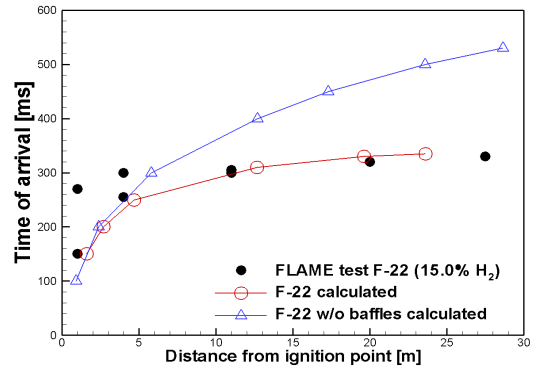


Fig. 12 Flame arrival time along the channel for FLAME F22 test

있도록 한다.

채널 내부의 장애물이 화염의 전파 속도에 미치는 영향을 파악하기 위하여 F22와 같은 조건에서 평판이 없는 경우와 있는 경우 화염면의 도달 시간을 비교하였다. Fig. 12에서 보는 바와 같이 평판 장애물이 없는 경우에는 화염이 서서히 가속되지만 평판이 설치되어 있는 경우에는 채널의 5 m 지점을 지나면서 급격히 가속되고 있음을 알 수 있다.

예혼합 연소 코드 reactingFoam의 PaSR 모델을 FLAME 실험 해석을 통하여 검증하였으며, 본 수치계산으로부터 PaSR 모델의 C_{mix} 값으로 0.5가 모든 실험 결과와 유사한 화염 전파속도를 보여주었다.

3.3 IRWST 격실에서의 화염 가속 평가

본 논문의 2절에서 기술한 수소농도 분포의 계산과 화염가속 및 DDT 지수(σ - λ criteria)에 의한 수소 화염의 폭발 가능성을 평가하는 것은 매우 유효한 방법으로 지금도 기본적인 수소안전성 평가 툴로 사용되고 있다. 그러나 이와 같은 방법은 격실의 형상을 제대로 반영하지 않았기 때문에 보수적인 결과라는 평을 받고 있다. APR1400의 IRWST는 반지름이 16.15 m와 21.89 m인 환형 격실로 핵연료재장전수 수면 위로 높이 1.37 m의 빈 공간으로 안전감압 시에 수소기체가 방출된다. IRWST 격실로 수소를 방출하는 개념은 APR1400뿐만 아니라 다른 나라의 원전에도 적용된 바가 있으나, 수소안전성 측면에서 수정되거나 보강되어졌다. APR1400에서도 마찬가지로 IRWST 격실에서의 수소의 안전성은 이슈가 되어 왔으며 본 연구에서는 기존의 화염가속 및 DDT 지수에 의존하는 수소안전성 평가 방법과 수소화염의 전파 및 가속 특성을 예혼합 연소 모델을 이용하여 평가하는 방법을 적용하여 IRWST 격실에서의 수소안전성을 평가하고자 하였다.

본 연구의 대상인 IRWST 격실은 바깥 벽면의 원주방향 길이가 137 m에 이르는 매우 큰 환형의 격실로 천정에는

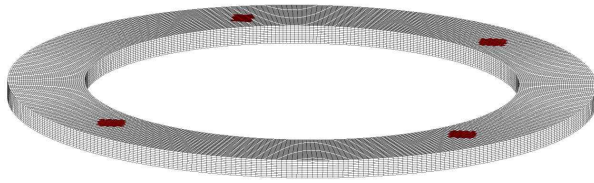


Fig. 13 IRWST geometry and the surface mesh for hydrogen combustion analysis with openfoam

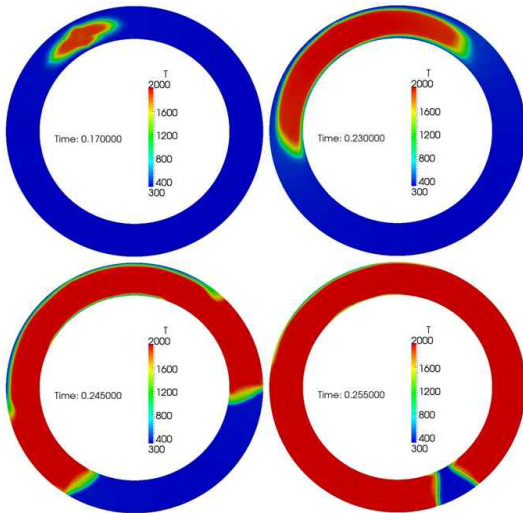


Fig. 14 Flame propagation along time in the IRWST without vent openings at H2 of 20 vol%

4 개의 환기구가 설치되어 있다. 이와 같은 구조의 격실 내에서 수소 농도에 따른 수소 화염의 특성, 화염의 전파 속도, 그리고 DDT 발생을 수치해석적인 방법으로 평가하는 것은 수소 제어 관점에서 IRWST의 특성을 파악하는데 매우 중요하다.

여기서는 IRWST 격실 내에서 수소화염이 발생하는 경우 수소화염이 가속될 수 있는지 그리고 IRWST의 천정에 있는 환기구가 화염가속에 어떤 영향을 미치는 지를 평가하기 위하여 FLAME 실험 해석을 통하여 검증한 연소해석 기법을 이용하여 수소농도 20 vol%와 25 vol%에 대하여 계산을 수행하였다. 그리고 IRWST 환기구의 영향을 평가하기 위하여 환기구가 없는 경우와 있는 경우를 계산하여 두 경우를 비교하였다.

Fig. 13은 수소 연소 해석을 위해 사용된 IRWST 격실의 격자를 보여주고 있다. 생성된 격자의 수는 원주방향으로 360, 반경방향으로 41, 높이방향으로 11로 총 162,360 개의 육면체 셀로 구성되어 있다. Fig. 13의 진하게 표시된 부분은 IRWST 환기구로 계산에서는 비반사 출구조건을 사용하였다.

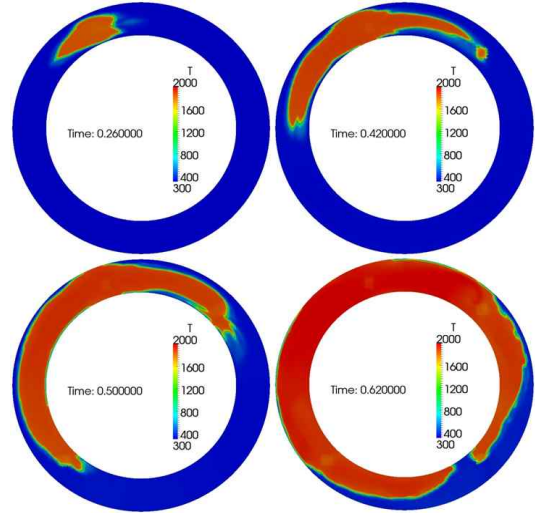


Fig. 15 Flame propagation along time in the IRWST with vent openings at H2 of 20 vol%

3.3.1 IRWST 내 수소농도가 20 %인 경우

IRWST 내 수소-공기 혼합기체의 수소 농도가 20 vol%인 경우에 대하여 수소 화염의 전파를 계산하였다. 이 계산에서는 IRWST 내 120°에 설치된 점화기에 의하여 점화가 되는 것으로 가정하였으며, IRWST 천정에 환기구가 없는 경우에 수소 화염의 전파 특성을 살펴보았다.

Fig. 14는 각 시간 별로 화염면의 위치를 파악하기 위하여 등온도선도를 나타낸 것으로, 점화기 위치에서 발생한 수소 화염이 시간이 지남에 따라 시계방향과 반시계방향으로 전파되어 가는 것을 알 수 있다. 계산 결과에 의하면 IRWST 내 화염이 완전히 전파해 가는데 약 0.26초정도 소요되었으며 0.23초 이후에 화염이 급격히 가속되는 것으로 나타났다. 0.255초에서 화염의 전파속도는 약 1400 m/s를 보이고 있으며 이것은 일반적으로 DDT가 발생하는 것으로 알려진 약 1000 m/s의 화염 전파속도보다 높기 때문에 IRWST 내에서 수소화염 전파 후기에는 DDT가 발생한 것으로 판단할 수 있다.

IRWST 내 수소 연소에 환기구가 미치는 영향을 평가하기 위하여 수소 농도 20 vol%에 대하여 환기구가 있는 경우를 해석하였다. Fig. 15는 IRWST 상부 단면에서의 온도분포를 보여주는 것으로, 왼쪽 위의 그림을 보면 0.2초에서 IRWST의 2사분면에 위치한 환기구의 영향으로 화염면이 비대칭적으로 전파되어 가고 있음을 알 수 있다. Fig. 15의 오른쪽 위 그림을 보면 1사분면에 위치한 환기구에서는 화염이 환기구의 유동에 의해 끌려가듯 화염이 이동하고 있는 것을 볼 수 있다. IRWST의 환기구를 모의한 경우 전체적으로 화염이 전파해가

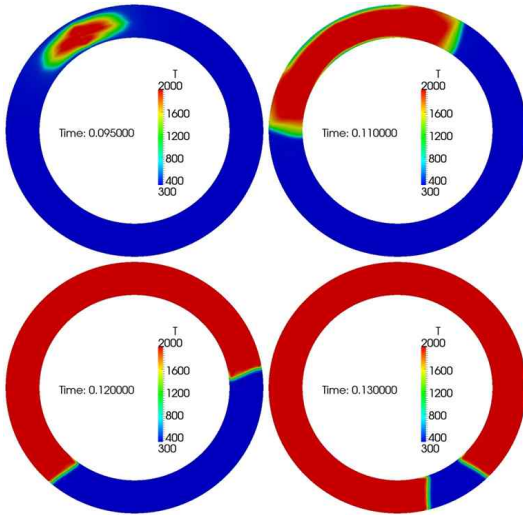


Fig. 16 Flame propagation along time in the IRWST without vent openings at H2 of 25 vol%

는 데는 약 0.6 이상이 걸렸으며 이것은 환기구가 없는 경우의 0.26초에 비하여 매우 길다. 환기구를 고려한 경우 최종 화염전파 속도는 약 162 m/s로 매우 낮게 나타났으며 이는 고속의 난류화염 전파속도에 해당한다.

IRWST 내 수소 농도가 20 vol%인 경우 IRWST의 환기구의 영향으로 수소화염이 감속되어 DDT가 발생하지 않는 것으로 판단된다.

3.3.2 IRWST 내 수소농도가 25%인 경우

IRWST 격실 내 수소-공기 혼합기체의 수소 농도가 25 vol%인 경우에 대하여 IRWST 내 수소 연소를 계산하였으며 환기구의 유무에 따른 화염의 전파 속도를 비교하여 환기구가 수소 연소에 미치는 영향을 평가하였다.

환기구를 모의하지 않은 경우, IRWST 내 수소 농도가 25 vol%에서는 높은 수소 농도로 인하여 수소 화염이 매우 빠른 속도로 전파하는 것으로 나타났다. Fig. 16을 보면 알 수 있듯이, 약 0.13초의 매우 짧은 시간 내에 IRWST 내 수소가 완전히 연소하였으며, 특히 0.13초 부근에서는 화염의 전파속도가 1539 m/s로 예측되어 DDT가 발생한 것으로 판단된다.

한편 IRWST의 환기구를 모의한 경우, Fig. 17에서 보는 바와 같이 초기 0.095초와 0.11초에서의 그림에서는 환기구의 영향으로 화염면이 다소 찌그러지는 것이 보이나 그 이후로는 환기구에 의한 화염면의 왜곡은 나타나진 않는다. 앞에서 수소농도가 20 vol %의 경우 환기구가 화염 전파를 방해하는 것으로 파악되었으나 수소농도 25 vol%에서는 환기구가 있는 경우가 화염이 더 빨리 전파되는 것으로 나타났다. 환기구가

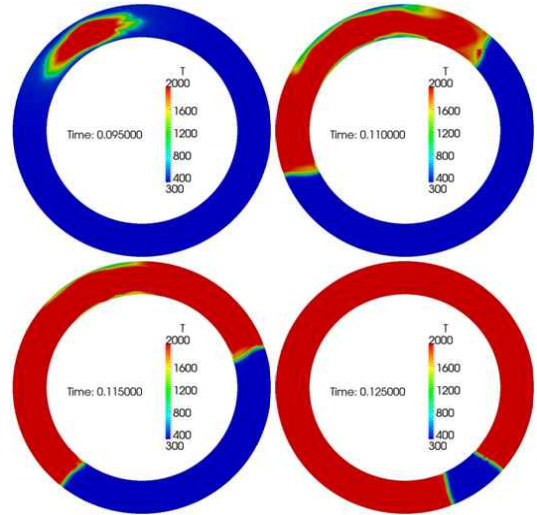


Fig. 17 Flame propagation along time in the IRWST with vent openings at H2 of 25 vol%

있는 경우 IRWST 내 수소농도가 25 vol%인 경우 최종 화염전파 속도는 1730 m/s로 예측되며 이것은 환기구가 없는 경우의 속도보다 더 큰 값이다.

수소농도가 20 %인 경우와 25 %인 경우에 대하여 IRWST의 환기구가 화염전파에 미치는 영향을 비교해보면 화염면의 전파속도가 어느 속도에 비해 낮으면 격실 내 압력에 의해 환기구를 배출되는 유동이 격실 내부의 화염 전파를 방해하는 쪽으로 영향을 미치지만 화염면이 어느 속도보다 빠르게 환기구를 통과하는 경우 오히려 환기구가 장애물과 같이 난류 혼합을 증가시켜 화염의 전파를 가속시키는 역할을 하는 것으로 판단된다.

5. 결 론

전체 혹은 부분적으로 밀폐된 격실에서 수소가 누출되는 경우 매우 작은 에너지에 의해서 수소는 점화될 수 있으며 수소화염은 빠른 속도로 전파되어 조건에 따라 DDT가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 원자로건물 내에서 사고시 수소가 방출되어 어느 격실에서 수소가 누적되는 경우에 대하여 수소 폭발 가능성을 평가할 수 있는 방법을 적용하였다. 먼저 원자로 건물 내에서 수소의 확산 및 농도 분포를 계산하고 이를 이용하여 화염가속 및 DDT 지수로 DDT 발생 가능성을 평가하였으며, DDT 발생 가능성이 있는 격실에 대하여 난류예혼합 수소연소 모델을 적용하여 격실의 형상을 고려한 화염전파 특성을 평가하였다. APR1400 원전의 IRWST로 수소가 방출되는 경우 환기구가 있는 경우에도 수소 농도가 25 %에

서는 DDT가 발생할 수 있음을 보여주었다. 이 방법은 원자로 건물의 다른 격실 혹은 원자로 건물 전체에 대한 수소화염의 전파 특성을 평가하는데 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

본 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국연구재단의 원자력기술개발사업으로 지원받았습니다.

참고문헌

- [1] 2006, 이광원 외, "수소가스 사고 및 위험성에 대한 안전 관리 기술개발," *호서대학교 C-3-1*.
- [2] 2010, 안혁진, 정재혁, 허남건, 이문규, 용기중, "터널 내 수소연료 자동차의 수소 누설로 인한 수소 확산에 대한 수치해석," *한국전산유체공학회지*, 제15권, 제2호, pp.47-54.
- [3] 1987, Henrie, J.O. and Postma, A.K., "Lessons Learned from Hydrogen Generation and Burning During the TMI-2 event," *Idaho NL Report*, GEND-061, DE87 010696.
- [4] 2000, OECD/NEA, "Flame Acceleration and Deflagration-to-Detonation Transition in Nuclear Safety," *Nuclear Safety* NEA/CSNI/R(2000)7.
- [5] 1999, Breitung, W. et al., "Criteria for Deflagration-to-Detonation Transition in Nuclear Containment Analysis," *SMIRT-15 Post-Conference Seminar on Containment of Nuclear Reactor*, Seoul, Korea.
- [6] 1998, Travis, J.R. et al., "GASFLOW: A Computational Fluid Dynamics Code for Gases, Aerosols, and Combustion," LA-13357-M, FZKA-5994, Los Alamos National Laboratory.
- [7] 2005, 김종태, 홍성완, 김상백, 김희동, "APR1400의 급수 완전상실사고 시 격납건물 내에서 수소와 수증기의 3차원 거동에 대한 수치해석," *한국전산유체공학회지*, 제10권, 제3호, pp.9-18.
- [8] 2010, Weller, H. et al., "OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox User Guide," <http://www.openfoam.com>.
- [9] 2001, Golovitchev, V.I. and Nordin, N., "Detailed Chemistry Spray Combustion Model for the KIVA Code," *SAE Congress*.
- [10] 1989, Sherman, M.P., Tieszen, S.R. and Benedick, W.B., "FLAME Facility: The Effect of Obstacles and Transverse Venting on Flame Acceleration and Transition to Detonation for Hydrogen-air Mixture at Large Scale," NUREG/CR-5275 SAND85-1264 R3.