2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

APR1400 원자로 격납건물 내에서 급수상실사고 발생시 수소와 수증기의 3차원 거동에 대한 연구

3-Dimensional Behavior of the Hydrogen and Steam from a Hypothetical Loss Of Feed Water Accident in the APR1400 Containment

김종태, 홍성완, 김상백, 김희동

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

APR1400 의 급수상실사고시 증기와 수소의 3 차원 거동에 대하여 GASFLOW 코드를 이용하여 해석하였다. 급수상실사고시 다량의 물과 증기 그리고 수소는 가압기의 POSRV 를 통하여 IRWST 내의 스파저로 배출된다. GASFLOW 해석에 사용되는 이 소스(source)의 질량유량은 중대사고 해석 코드인 MAAP 의 계산으로부터 얻었다. IRWST 내부로 방출된 증기와 수소의 거동을 분석하기 위하여 APR1400 의 격납건물을 모델링하여 3 차원 격자를 생성하였다. 사용된 격자의 총 셀(control volume) 수는 66,960 개이며 원통좌표를 사용하였다. APR1400 의 IRWST 환기구에는 IRWST 내외의 압력차에 따라 열리고 닫히는 플랩이 설치되도록 설계되어 있다. 플랩이 IRWST 내의 증기와 수소의 거동에 미치는 영향을 평가하기 위하여 GASFLOW 코드에 플랩 모델을 도입하여 플랩이 있는 경우와 없는 경우에 대하여 수치해석을 하였다. GASFLOW 는 IRWST 환기구에 설치된 플랩이 증기-수소 거동에 큰 영향을 미치는 것으로 보여주었으며, 특히 플랩이 설치된 APR1400 격납건물에서는 증기의 거동이 수소의 연소특성에 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다. LOFW 사고시 소스 방출 장소인 IRWST 와 IRWST 의 환기구로 연결된 환형격실에서 수소연소시 화염의 가속 가능성 및 수소제어기구(HMS)의 유효성을 평가하였다.

Abstract

In order to analyze hydrogen distribution during a severe accident in the APR1400 containment, GASLOW code is used. GASLOW is a finite-volume computer code that solves time-dependent compressible Navier-Stokes equations with multiple gas species in threedimensional computational domain. The hypothetical accident chosen for this study is LOFW(Loss Of Feed Water). In this accident for the APR1400 huge amount of hot water, steam, and hydrogen are released in the IRWST through the POSRV(Pilot Operated Safety and Relief Valve) of the pressurizer which is opened manually. The source of hydrogen and steam for the GASFLOW analysis is obtained from a MAAP calculation which is one of the lumped-parameter codes for severe accident analysis. In order to analyze 3-dimensional behavior of steam and hydrogen discharged in the IRWST the full geometry of the APR1400 containment is modeled and a 3-dimensional mesh is generated in cylindrical coordinates. The total number of control volumes used is this study is 66,960. The current design includes flaps at the exit of IRWST vent holes which are opened by the pressure difference between inside and outside of IRWST. The flap model is implemented in the GASFLOW code to find out the effect of the flaps on steam-hydrogen behavior. In this study it is found that the flaps affect steam-hydrogen distribution in the IRWST. When the flaps are installed at the exit of IRWST vent holes, the steam released inside the IRWST has very important roles for the hydrogen distribution and flammability. For the LOFW accident the possibilities of combustion pressure and temperature load in the IRWST and annular compartments are studied based on the Sigma-Lambda criteria. And the effectiveness of the HMS installed in the APR1400 containment is evaluated from the point of severe accident management.

1. 서론

한국에서 설계된 1400MWe 의 원자력 발전소인 APR1400 은 설계기준사고 및 중대사고시 발생하는 수소의 제어 혹은 안정적인 제거를 위하여 26 개의 수동촉매재결합기인 PAR(Passive Auto-catalytic Recombiner)와 10 개의 백열식 점화기를 설계에 반영하고있다[1]. 특히 중대사고시에는 짧은 시간에 많은 양의 수소가 생성되어 격납건물로 방출되기 때문에 수소제어기구(HMS, Hydrogen Mitigation System)가 매우 중요하게 인식되고 있다. 격납건물로 방출된 수소가 의도적 혹은 자발적으로 연소가 일어나는 경우 화염의 가속으로 인하여 격납건물에 매우 큰 충격력을 줄 수 있는 급격한 수소연소를 방지하기 위하여 혹은 이런 현상이 발생할 수 없음을 보이기 위한 많은 노력이 이루어지고 있다. MELCOR, MAAP 등과 같은 중대사고 해석을 위한 lumped-parameter 코드를 이용한 수소 거동의 해석과 병행하여 수소의 분포 및 연소를 전문적으로 해석하는 GOTHIC 코드를 이용하여 lumped 및 부분 3 차원 해석이 이루어졌으며, 또한 격납건물 전체를 3 차원 모델링하여 GASFLOW 코드를 이용한 해석도 이루어진 바 있다. [2,3,4,5]

냉각재상실사고(LOCA, Loss Of Coolant Accident) 시에는 원자로 파손전까지 대부분의 수소의 방출이 hot-leg 혹은 cold-leg 의 파단부에서 되는 반면, 급수상실사고(LOFW: Loss Of Feed Water), 전원상실사고(SBO: Station Black-Out) 등에서는 가압기의 POSRV(Pilot Operated Safety and Relief Valve)를 통해 IRWST 에서 방출된다. IRWST 는 환형의 매우 큰 격실이며 상부에 있는 네 개의 환기구를 제외하면 밀폐된 공간이므로 가상적인 중대사고시 방출되는 수소와 증기의 거동이 매우 중요하다. 지금까지 APR1400 의 LOFW, SBO 사고에 대하여 lumped 코드를 이용한 해석 및 다차원 코드를 이용한 부분(IRWST)적인 3 차원 해석이 이루어진 바가 있다. 그러나 IRWST 를 포함한 격납건물 전체의 3 차원 해석은 아직 이루어지지 못하였다. 본 연구에서는 GASFLOW 코드를 이용하여 APR1400 의 LOFW 사고에 대하여 해석을 수행하고 수소-증기의 거동을 평가하였다. 급수상실사고시 다량의 물과 증기 그리고 수소는 가압기의 POSRV 를 통

하여 IRWST 내의 스파저로 배출된다. GASFLOW 해석에 사용되는 이 소스의 질량유량은 중대사고 해석 코드인 MAAP 의 계산으로부터 얻었다.[1] IRWST 내부로 방출된 증기와 수소의 거동을 분석하기 위하여 APR1400 의 격납건물을 모델링하여 3 차원 격자를 생성하였다. 사용된 격자의 총 셀(control volume) 수는 66,960 개이며 원통좌표를 사용하였다. APR1400 의 IRWST 환기구에는 IRWST 내외의 압력차에 따라 열리고 닫히는 플랩이 설치되도록 설계되어 있다. 플랩이 IRWST 내의 증기와 수소의 거동에 미치는 영향을 평가하기 위하여 GASFLOW 코드에 플랩 모델을 도입하여 플랩이 있는 경우와 없는 경우에 대하여 수치해석을 하였다. GASFLOW 는 IRWST 환기구에 설치된 플랩이 증기-수소 거동에 큰 영향을 미치는 것으로 보여주었으며, 특히 플랩이 설치된 APR1400 격납건물에서는 증기의 거동이 수소의 연소특성에 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다. LOFW 사고시 소스 방출 장소인 IRWST 와 IRWST 의 환기구로 연결된 환형격실에서 수소연소시 화염의 가속 가능성 및 수소제어기구(HMS)의 유효성을 평가하였다.

2. 본론

2.1. 모델링

GASFLOW 코드로 격납건물 내의 수소거동을 해석하기위해서는 대상원전의 격납건물에 대한 기하학적 모델링, 수소 및 수증기 소스의 모델링이 필요하며 그 내용은 다음과 같다.

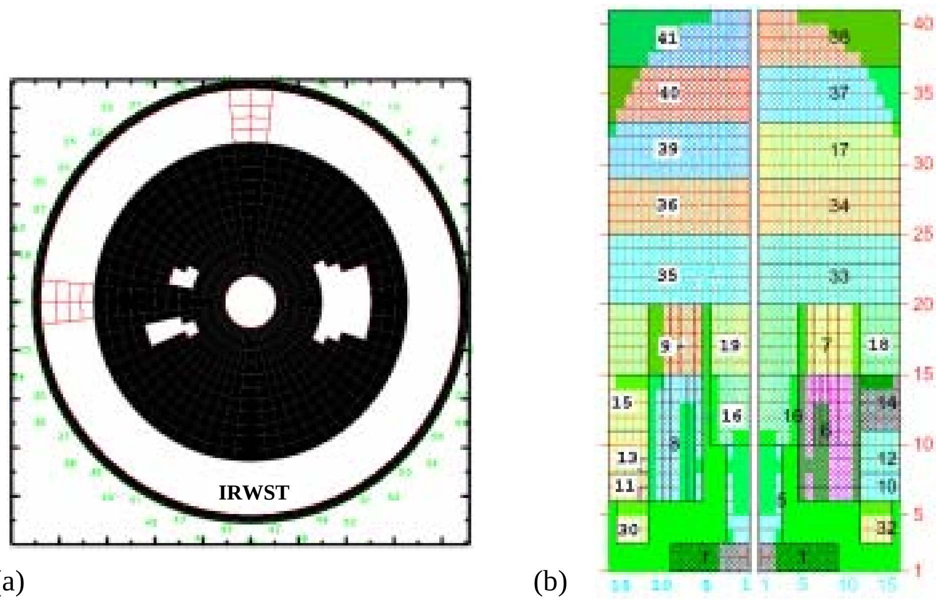
APR1400 격납건물은 약 94,000m^3 의 자유체적(free volume)을 갖고 원자로 공동 바닥에서 격납건물 돔 정점까지의 높이는 79.4m 이고 격납건물 외벽의 내경은 22.86m(75ft)인 원통 모양이다. 본 연구에서는 실린더 좌표(r-ϕ-z)를 사용하였으며, R 방향의 격자는 19 개의 격자점으로 이루어져 있고 두번째 격자점은 원자로 용기의 외벽에 그리고 세번째 격자점은 원자로 용기 공동의 내벽에 위치한다. 그리고 세번째 이후의 격자점은 균일간격으로 분포시켰으며 격납건물의 주작업층(operating deck)과 격납건물의 외벽 사이에 존재하는 1 피트 크기의 환형의 환기 간극(annular ventilation gap)을 위해 두 격자점을 벽에 일치시켰다. ϕ 방향의 격자는 6^o 의 균일간격으로 총 61 개를 사용하였으며 z 방향의 격자는 IRWST 내의 유동을 좀더 정확히 예측하고 환형격실(annular compartment)의 구조적 복잡성을 고려하여 주작업층 하부가 상부에 비해 두 배의 정도을 갖도록 하여 53 개의 격자점을 생성하였다. 생성된 총 격자수는 61,427 개이고 GASFLOW 해석에 사용된 셀(control volume)은 66,960 개이다.

GASFLOW 계산 결과로부터 격실별 평균 수소농도와 화염가속 가능성을 평가하기 위하여 GOTHIC 에서 사용한 제어체적(control volume)을 이용하였다.[3] Table 1 은 모델링된 APR1400 격납건물의 자유체적을 격실별로 GOTHIC 계산에서 모델링한 값과 비교하였다. 격실별로 약간의 차이를 보이는 것은 GASFLOW 에서 사용된 격자의 간격이 큼으로 인하여 이웃하는 두 격실 사이에서 격자점이 격실 경계에 위치하지 못하여 생긴다. 전체 격실의 자유공간을 합한 값은 거의 일치하고 있다.

Fig. 1 은 GASFLOW 해석을 위하여 모델링된 APR1400 의 단면 그림이다. Fig. 1(a)는 k=4 에서 격납건물의 단면을 보여주는 것으로 환형의 IRWST 격실과 HVT(Hold-Up Volume Tank), reactor cavity, 그리고 ICI chase 격실 등을 볼 수 있다. 특히 LOFW 사고 해석을 위하여 모델링된 소스(source)의 방출지역(스파저 위치)이 나타나 있다. Fig. 1(b)는 GOTHIC 해석에서 사용된 격실이 GASFLOW 격자의 수직 단면도에 나타나 있다. 그림에서 보는 것처럼 IRWST 는 스파저의 유무에 따라 30, 32 번의 격실에 해당된다.

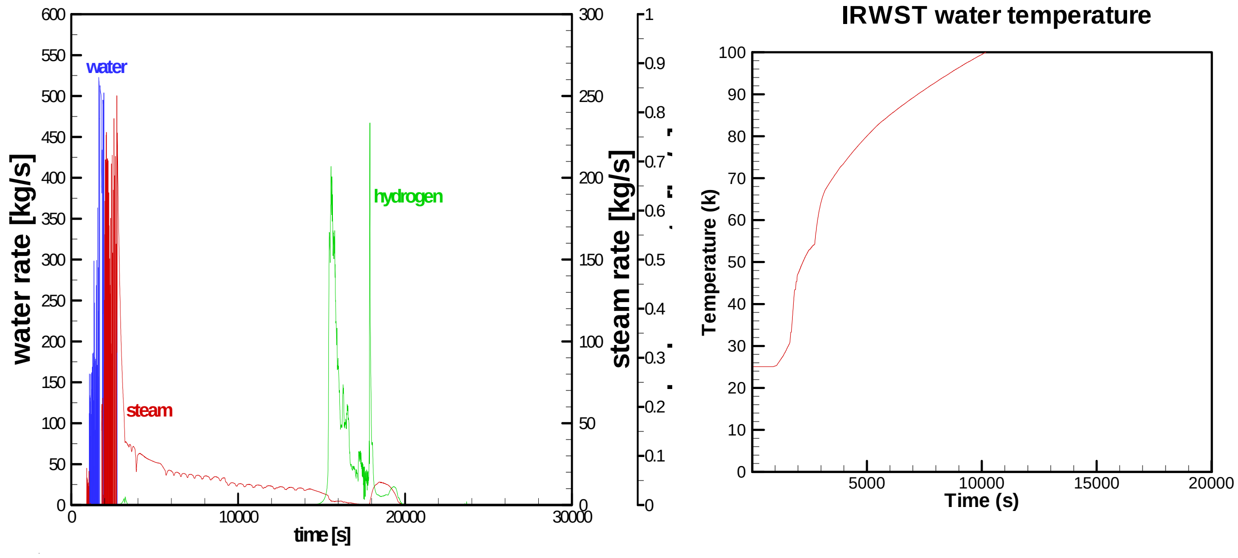
Table. 1 Definition of rooms from GOTHIC model and comparison of free volumes

Control Volumes of the APR1400 Containment (For 42 Cells)								
Cell No.	Definition	Volume (m^3) for GOTHIC	Floor El. (ft)	k index	Ceiling El. (ft)	k index	Remark	Volume(m^3) GASFLOW
1	Reactor Cavity	311.50	69.0	1	83	3		333.05
2	ICI Chase	110.40	83.0	3	126	18		135.29
3	Corium Chamber Room	74.29	83.0	3	100	9		84.1
4	Cavity Access Area	25.60	89.5	5	114.5	13		54.68
5	Reactor Vessel Annulus	175.18	83.0	3	130	18		311.36
6	S/G #2 Compt. (Lower)	2192.81	100.0	9	156	26	north	2439.7
7	S/G #2 Compt. (Upper)	1286.84	156.0	26	191	32	north	1283.7
8	S/G #1 Compt. (Lower)	2357.34	100.0	9	156	26	south	2721.4
9	S/G #1 Compt. (Upper)	1286.84	156.0	26	191	32	south	1261.8
10	Annular Compt. #2 - 100'	1148.71	100.0	9	114	13	north	1212.9
11	Annular Compt. #1 - 100'	1225.32	100.0	9	114	13	south	1467.8
12	Annular Compt. #2 - 114'	1619.51	114.0	13	136.5	20	north	1956.9
13	Annular Compt. #1 - 114'	2071.03	114.0	13	136.5	20	south	2536.6
14	Annular Compt. #2 - 136'-6"	1501.64	136.5	20	156	26	north	1846.4
15	Annular Compt. #1 - 136'-6	1635.74	136.5	20	156	26	south	1997.7
16	Refueling Pool	1544.02	106.5	11	156	26		1950.6
17	Containment Dome #2 (Lowest)	5671.80	254.5	41	279.5	45	north	6335.7
18	Upper Compt. #2 (Lowest)	7352.97	156.0	26	191	32	north	6281.3
19	Upper Compt. #1 (Lowest)	7524.78	156.0	26	191	32	south	6801.2
20	Reactor Drain Tank Room	79.08	100.0	9	114	13		134.33
21	Letdown Heat Exchanger Room	91.46	100.0	9	114	13		222.1
22	Compt. below Rege. HX Room	626.07	100.0	9	128	17		212.06
23	Regenerative Heat Exchanger Room	138.64	128.0	17	152	25		180.57
24	Pressurizer (PZR) Compt. (Lower)	109.69	136.5	18	156	26	hole	117.12
25	Pressurizer Spray Valve Room 1	44.42	116.0	14	124	16		59.7
26	Pressurizer Spray Valve Room 2	45.58	116.0	14	124	16		44.78
27	Letdown Line Valve Room 1	68.47	116.0	14	124	16		74.63
28	Letdown Line Valve Room 2	70.60	116.0	14	124	16		74.63
29	Holdup Volume Tank	326.17	80.0	3	107.5	11		308.67
30	IRWST - No Sparger	1662.43	81.0	3	97	9	vent hole,s	1519.9
31	Pressurizer (PZR) Compt. (Upper)	330.47	156.0	26	212	35		300.02
32	IRWST - Sparger	1662.43	81.0	3	97	9	vent hole,n	1519.9
33	Upper Compt. #2 (Middle)	7907.49	191.0	32	223.1	37	north	7833.4
34	Upper Compt. #2 (Highest)	7856.27	223.1	37	254.5	41	north	6517.7
35	Upper Compt. #1 (Middle)	8031.41	191.0	32	223.1	37	south	8147.1
36	Upper Compt. #1 (Highest)	7856.27	223.1	37	254.5	41	south	6517.7
37	Containment Dome #2 (Middle)	4633.33	279.5	45	304.5	49	north	4895.8
38	Containment Dome #2 (Highest)	1853.33	304.5	49	329.5	53	north	1968.5
39	Containment Dome #1 (Lowest)	5671.80	254.5	41	279.5	45	south	6335.7
40	Containment Dome #1 (Middle)	4633.33	279.5	45	304.5	49	south	4895.8
41	Containment Dome #1 (Highest)	1853.33	304.5	49	329.5	53	south	1968.5
42	Environment	1.00E+10	100.0		1000			
Total		94668.36						94860.79



(a) (b)

Fig. 1 Modeling of APR1400 containment for GASFLOW, (a) horizontal cut view of the containment at k=4, (b) vertical cut view of the defined rooms in 3d GASFLOW mesh.



(a) (b)

Fig. 2 (a) Source from MAAP calculation, (b) temperature of IRWST water calculated using mass fluxes of steam and water and their enthalpies.

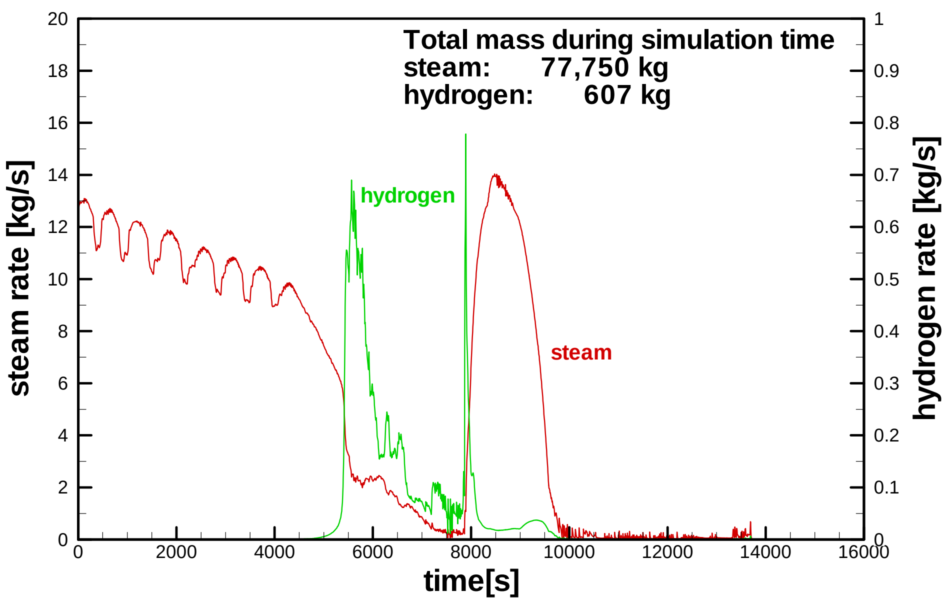
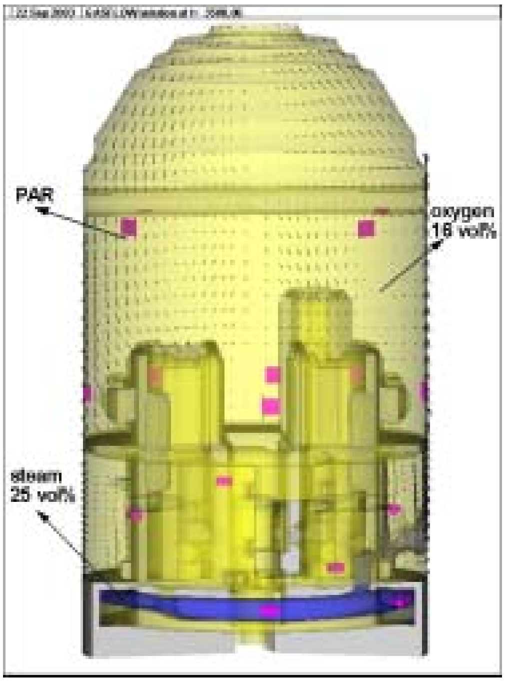


Fig. 3 Steam and hydrogen source for GASFLOW simulation.

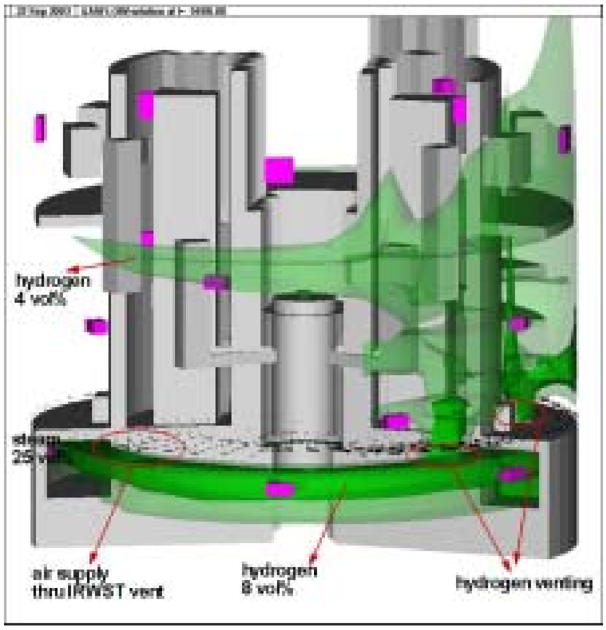
LOFW17 에서는 사고가 시작된 시점으로부터 30 분에 후에 POSRV 가 수동으로 열리고 이것을 통하여 IRWST 내에 설치되어 있는 스파저로 다량의 냉각수와 증기 그리고 수소가 방출된다. Fig. 2(a)는 MAAP 계산에서 얻어진 IRWST 로 방출되는 소스를 시간에 따라 보여주고 있다. 약 15,000 초까지는 물과 증기만 방출되고 그후부터 수소가 방출된다. 고온의 물과 증기는 IRWST 내의 냉각수 온도를 높이고 결국 높은 온도로 인하여 스파저로부터 방출되는 증기의 응축을 방해한다. MAAP 계산에서 얻어진 소스의 잘량유량과 엔탈피를 적분하여 IRWST 내의 냉각수 온도를 계산한 결과 fig. 2(b)와 같이 사고후 10,000 가 지나면서 냉각수의 온도가 비등점에 도달하는 것으로 나타났다. GASFLOW 의 3 차원 계산량을 줄이기 위하여 사고후 10,000 까지는 스파저를 나온 증기가 완전히 응축하고 10,000 초 후부터는 증기가 모두 IRWST 내의 냉각수 수면 밖으로 방출된다고 가정하여, 사고후 10,000 초부터 해석을 하였다. Fig. 3 은 GASFLOW 해석을 위한 증기와 수소의 소스를 시간에 따라 보여주고 있다. 해석시간동안 방출된 증기와 수소의 총 질량은 각각 77,750kg, 607kg 이다.

2.2 계산 결과

현재의 APR1400 설계는 IRWST 의 환기구에 IRWST 내외부의 차압이 0.5psi 이상이면 열리는 플랩(flap)이 설치되어 있다. 먼저 플랩이 격납건물 전체에서 증기와 수소의 거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 4 개의 IRWST 환기구가 완전히 개방된 상태에서 해석을 수행하였다. IRWST 에 설치된 스파저와 환기구의 위치는 fig. 5(a)에 그려져 있다. Fig. 4 는 증기, 산소 및 스소의 3 차원 분포를 보여주는 그림으로 플랩이 없는 경우의 전체적인 유동 구조를 파악할 수 있다. Fig. 4(a)에서는 t=3,500s 에서 격납건물 내 증기의 분포와 속도 분포를 보여준다. 증기의 20 vol% iso-surface 를 보면 그림의 오른쪽에 위치한 환기구(vent 3, 4)에서 방출되는 증기의 플룸(plume)을 볼 수 있으며, 왼쪽의 환기구를 통하여 공기가 계속적으로 IRWST 내부로 공급되어산소가 증기와 층을 이루고 있다. 중심 단면에서의 속도를 보면 오른쪽에 위치한 환기구를 통해 배출된 증기가 환형격실을 거쳐 작업 데크(operating deck)와 격납건물 외벽 사이의 환형간극(annular vent gap)을 통하여 격납건물 돔으로 가고 격납건물 왼쪽에서는 하향 기류가 만들여져 환형격실을 지나 IRWST 의 환기구로 유입되는 큰 순환유동을 만들어 낸다. Fig. 4(b)는 수소 방출의 첫번째 피크를 지난 t=5,600s 에서 수소의 분포를 보여준다. 오른쪽에 있는 IRWST 환기구에서 8 vol% 이상의 수소 플룸이 형성되어 있다.환기구 바로 위쪽의 수평단면에서 속도장을 보면 공기기 왼쪽 환기구를 통하여 IRWST 내부로 유입되는 것을 알 수 있다. Fig. 5(a)는 IRWST 환기구에서 유속을 시간에 따라 보여주는 것으로, 그림의 환기구 1, 2 에서는 IRWST 내부로 흐르는 유동이, 그리고 환기구 3, 4 에서는 IRWST 외부로 흐르는 유동이 있음을 알 수 있다. Fig. 5(b)는 IRWST 내부에 설치된 두 개의 점화기 위치에서 증기, 산소 그리고 수소의 농도를 시간에 따라 나타내었다. 산소의 농도가 시종 10 vol% 전후를 유지하고 있으며 수소가 방출되는 시기에는 수증기의 농도가 낮아져 혼합기체가 가연(flammable) 영역에 있음을 알 수 있다. Fig. 6 의 IRWST 격실에 대한 수소와 수증기의 농도변화를 보면 스파저가 있는 IRWST 격실에서는 평균 수소농도가 15 vol% 이상되는 시간대가 존재하며 그 영역에서는 화염가속 지수 및 d/7l(DDT 지수)가 1 보다 크게 나타난다.

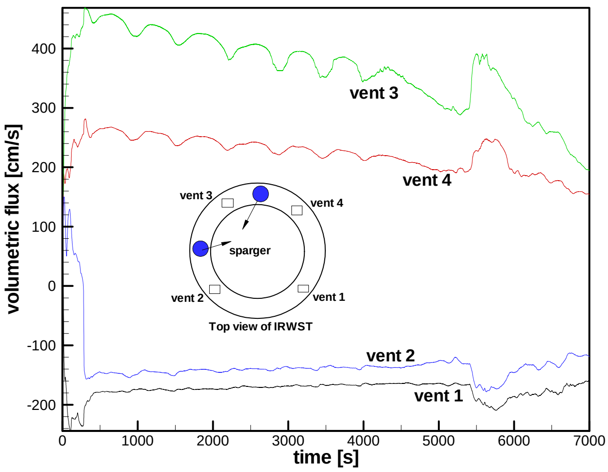


(a)

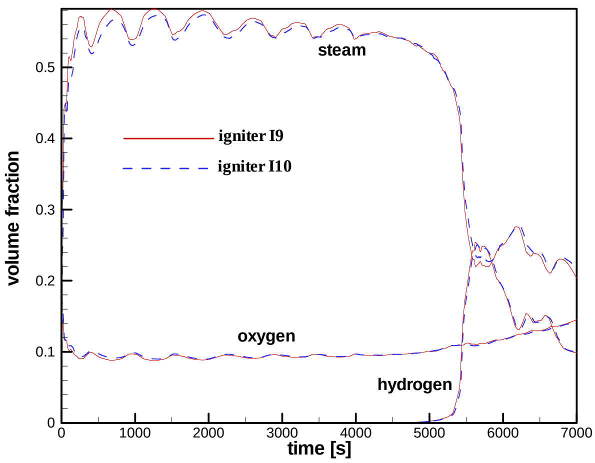


(b)

Fig. 4 GASFLOW results without flap at the IRWST vent holes, (a) calculated steam and oxygen distributions with velocity field on the center plane at t=3500s, (b) hydrogen distribution inside IRWST and its discharge thru the vent holes with velocity field on the horizontal plane above the IRWST vents.

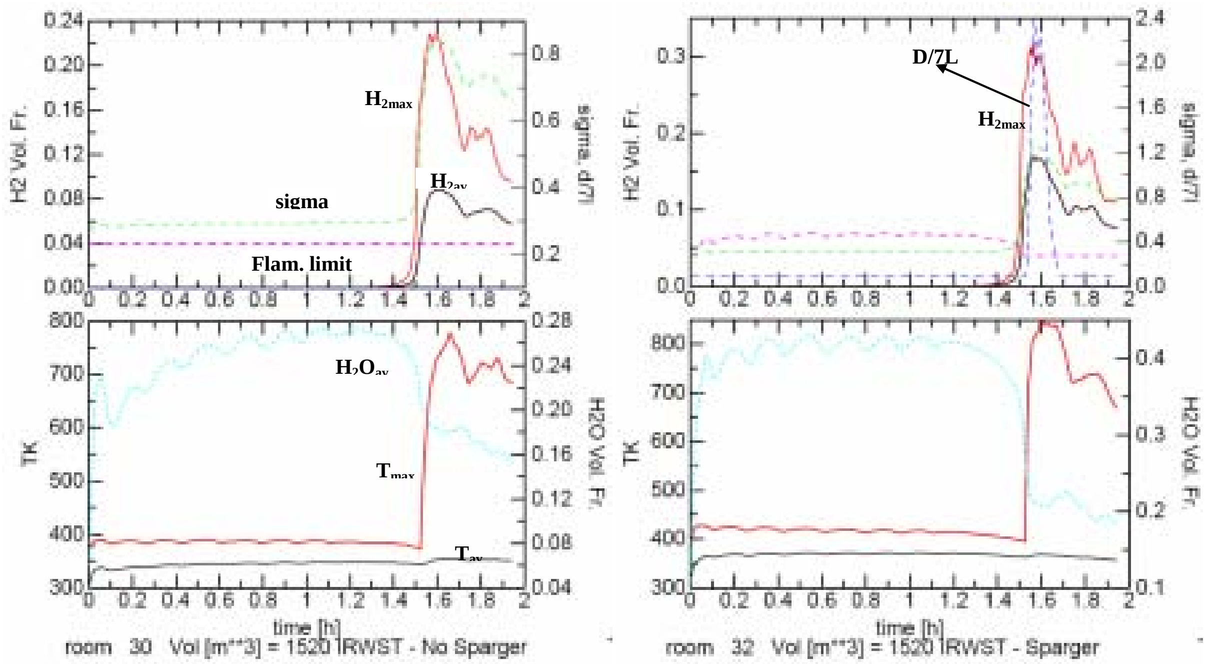


(a)



(b)

Fig. 5 GASFLOW results without flap at the IRWST vent holes, (a) volumetric fluxes at the four vent holes, (b) species concentrations varied with the time at the igniter locations inside IRWST.

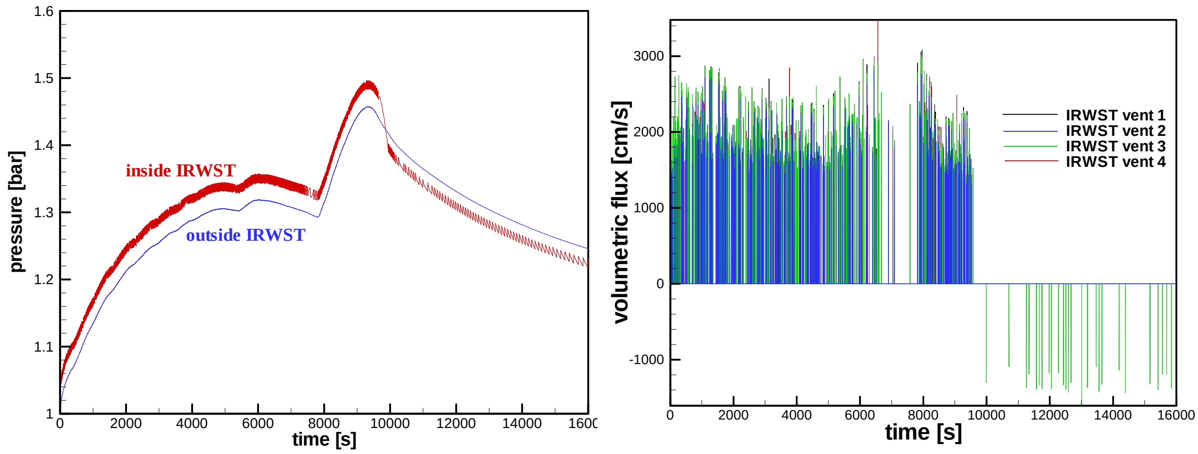


(a) (b)

Fig. 6 Hydrogen and steam concentrations with temperature variation in the IRWST rooms (a) without spargers (room 30, south), (b) with spargers (room 32, north)

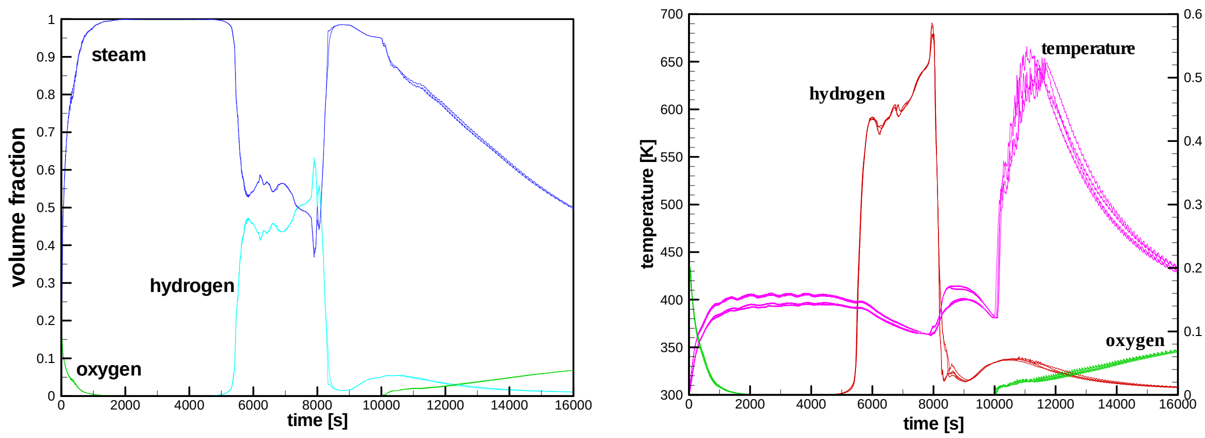
GASFLOW 코드에는 차압이 한계값(threshold)보다 커지면 열리게되는 rupture disk 모델을 가지고 있으나, 차압에 따라 열리고 닫히는 플랩 기구는 없기 때문에 rupture disk 모델을 개선하여 플랩 모델을 구성하였다. 현재의 플랩 모델은 차압에 따라 열리고 닫히는 특성에 대한 자료가 없기 때문에 닫힐 때는 차압이 한계값보다 10% 낮은 점에서 닫히도록 설정하였다.

Fig. 7 은 플랩이 있는 경우 GASFLOW 로 계산한 압력 변화와 IRWST 환기구에서의 유속을 보여준다. IRWST 내외부의 압력은 설계값인 0.5psi 의 차이를 보이며 변화하고 있다. 약 2.5 초 후에 최초로 플랩이 열리며 그후로 열림과 닫힘을 반복하면서 변화한다. Fig. 7(a)에서 IRWST 내부의 압력을 보면 진동하면서 상승하는 것을 볼 수 있는데 이것은 IRWST 내부의 압력이 외부의 압력보다 0.5psi 만큼 높아 플랩이 열리면서 IRWST 내부의 기체가 배출되고 동시에 압력이 내려가면서 차압이 0.5psi 보다 낮아져 플랩이 닫히는 것을 반복하기 때문이다. 10,000 초후에는 IRWST 내부로 소스의 방출이 거의 소멸되고 IRWST 내부에 남아 있던 증기가 응축되면서 압력이 IRWST 외부보다 낮아지기 때문이다. Fig. 7(b)를 보면 약 10,000 초까지는 네 개의 환기구를 통하여 IRWST 내부의 기체가 방출되는 것을 알 수 있고, 그후부터는 IRWST 외부에서 기체가 내부로 유입되는 것을 알 수 있다.



(a) (b)

Fig. 7 GASFLOW results with flap at the IRWST vent holes, (a) pressure-time histories inside and outside IRWST, (b) volumetric fluxes at the four vent holes



(a) (b)

Fig. 8 Inside IRWST, (a) species concentrations at the igniter locations(I9, I10), (b) exhaust temperature and hydrogen-oxygen concentrations at the inlet of PARs(P1, P2, P3, P4)

Fig. 8(a)는 IRWST 내부에 설치된 두 개의 점화기 위치에서 각 기체성분의 상대농도의 변화를 보여준다. 초기에 IRWST 내부에 있던 공기는 스파저로부터 나온 증기에 의해 IRWST 밖으러 밀려나서, 1,000 초 이후부터 10,000 초까지는 산소가 전혀 없는 산소 기근(starvation)상태를 지속한다. 수소가 방출되는 시기에는 IRWST 내부에 증기와 수소만 존재하기 때문에 두 그래프가 대칭적인 모습을 하고 있다. Fig. 8(b)는 IRWST 내부에 설치된 네 개의 PAR 로 유입되는 기체의 농도와 PAR 에 의해 재결합된 기체(exhaust)의 온도를 시간에 따라 나타내었다. 5,000 초와 10,000 초 사이에는 산소 기근으로 인하여 수소가 PAR 에 의하여 재결합되지 못하고 외부로 배출되며, IRWST 내부의 증기가 응축

되면서 공기가 유입된 후부터 PAR 에 의한 수소재결합이 이루어지는 것을 exhaust 기체의 온도 변화를 통해 알 수 있다. Fig. 9 는 t=1,900s 에서 증기의 3 차원 분포를 보여주는 그림으로 네 개의 IRWST 환기구에서 증기 플룸이 형성되어 있는 것을 알 수 있다. 그리고 증기는 스파저가 있는 IRWST 격실에서 더 많이 배출되고 있으며 이것은 플랩이 없는 경우와 비슷한 큰 순환 유동 구조를 만들고 있음을 짐작할 수 있다. 스파저를 통한 수소 방출의 두 번째 피크 점을 지난 t=8,150s 에서 수소의 거동도 이와 유사한 형태를 보인다(Fig. 10) . Fig. 10 을 보면 환형격실에서는 수소의 농도가 6% 이상이며 증기의 농도가 20% 미만인 연소가능(flammable)한 혼합기체를 형성하고 있다. IRWST 환기구에 플랩이 설치되어 있는 경우 초기에 증기에 의해 공기는 희석 및 방출되고 그후 공기의 공급이 이루어지지 못하므로 연소 자체가 불가능한 것으로 나타났다. 10,000 후에 IRWST 내부의 증기응축에 의하여 공기가 유입되면서 혼합기체의 수소 농도는 가연한계를 넘어서지만 수증기의 비율이 60%를 넘어서기 때문에 연소가 일어날 가능성은 매우 희박하다.

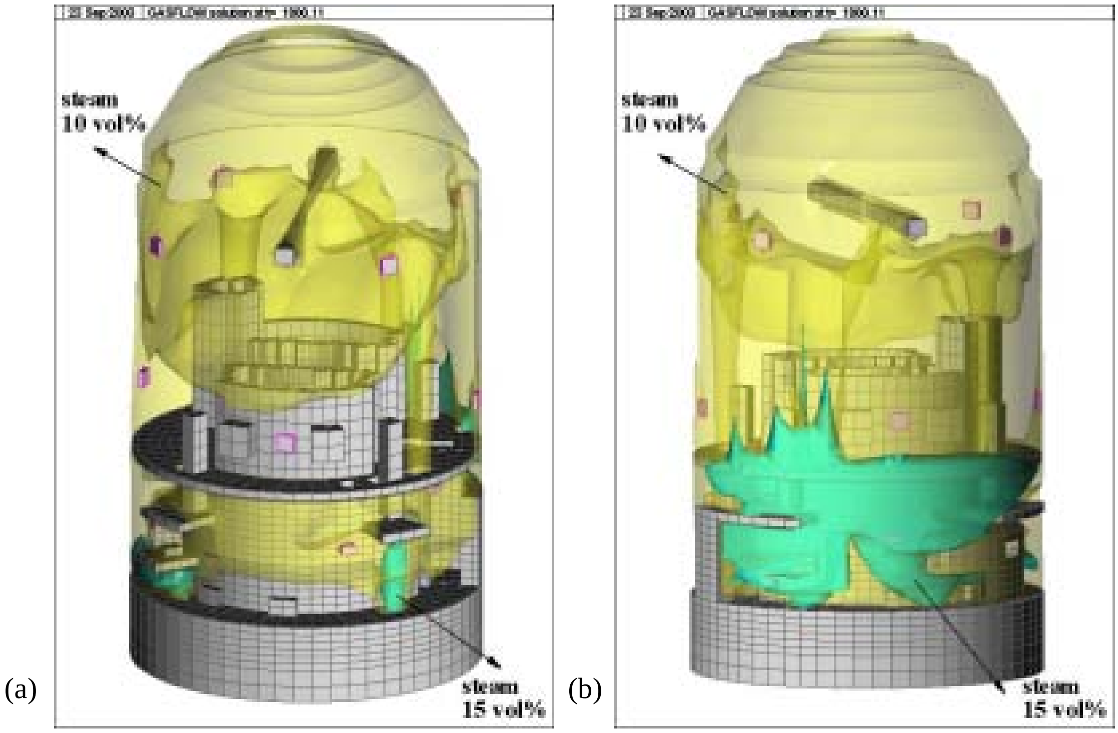


Fig. 9 GASFLOW results with flap at the IRWST vent holes, calculated steam distributions at t=1900s, (a) steam plums from IRWST room without sparger (room 30), (b) steam plums from IRWST room with sparger (room 32).

Fig. 12 는 114 피트 아래의 환형격실에서 수소와 증기의 농도, 그리고 화염가속 가능성을 보여준다. 이 환형격실에서는 약 7,900 초 후부터 수소의 농도가 가연한계(upward flammability lower limit)를 넘는 값을 가지지만 모든 기간 동안 화염의 가속 가능성은 없는 것으로 나타났다.

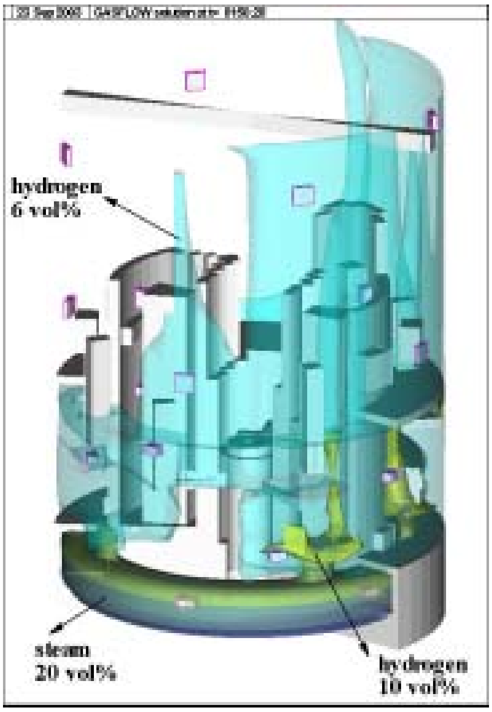
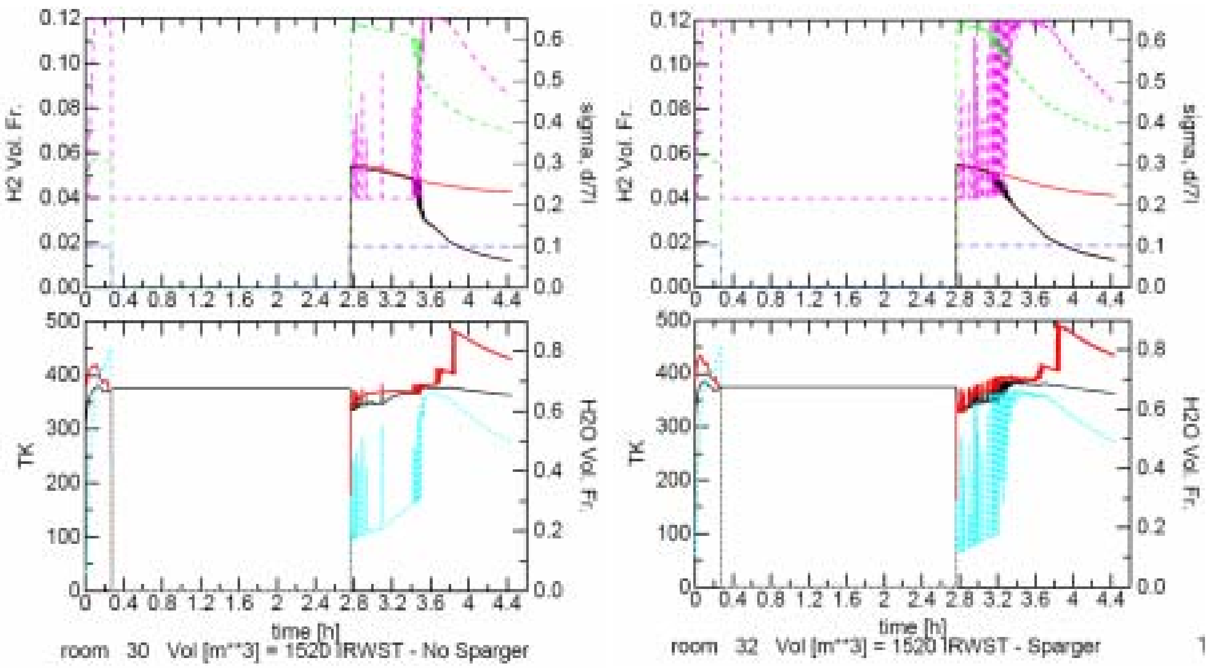
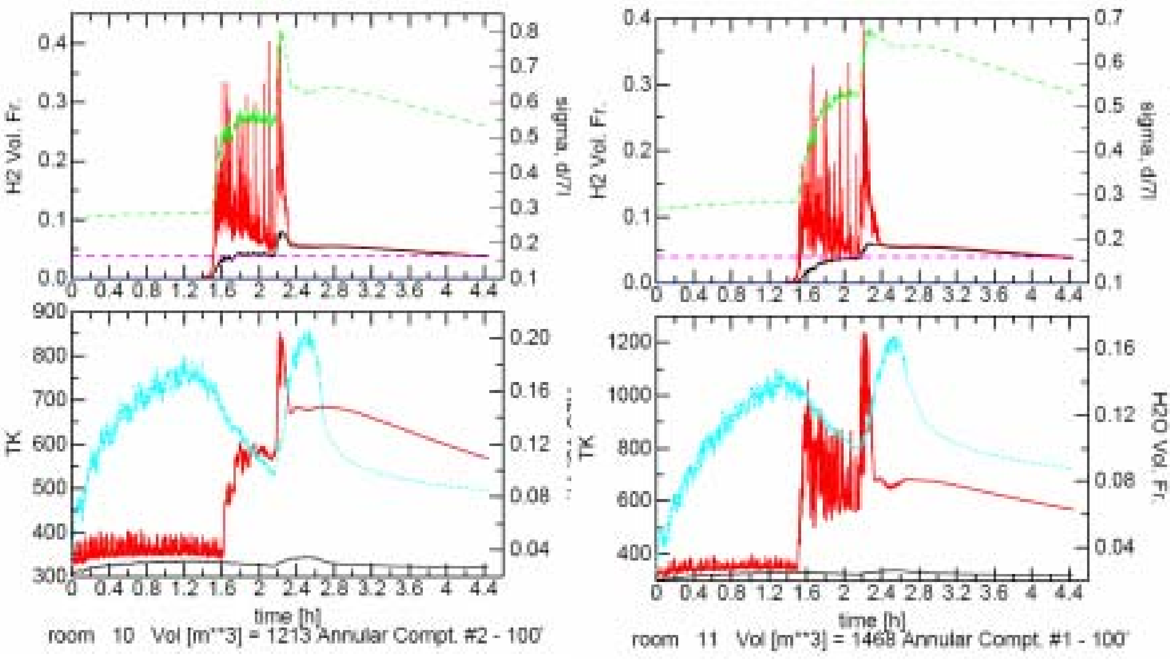


Fig. 10 Calculated steam and hydrogen distributions, 10 vol% hydrogen plums are shown at the exits of IRWST vents.



(a) (b)

Fig. 11 Hydrogen and steam concentrations with temperature variation in the IRWST rooms (a) without spargers (room 30, south), (b) with spargers (room 32, north) in case of flaps installed.



(a) (b)

Fig. 12 Hydrogen and steam concentrations with temperature variation in the annular compartment, (a) room 10, (b) room 11, below 114 ft.

3. 결론 및 향후 연구 과제

Beyond DBA(Design Base Accident) 중에 하나인 급수완전상실사고(LOFW)의 경우 수소와 수증기의 거동을 3 차원 해석 코드인 GASFLOW 를 이용하여 해석하였다. APR1400 의 IRWST 환기구(vent hole)에는 0.5psi 차압 발생시 개폐가 되는 플랩이 설치되어 있다. 플랩이 없는 경우에는 IRWST 환기구 중 2 개에서는 source 가 배출되고 다른 2 개에서는 공기가 유입되는 유동 현상이 나타났으나 플랩이 설치된 경우에는 모든 환기구를 통하여 source 가 배출되었다. IRWST 내에 설치된 스파저를 통한 소스의 방출이 거의 없어진 후에는 IRWST 내부에 남아있던 수증기의 응축으로 인하여 IRWST 내부가 격납건물보다 압력이 낮아져서 공기가 환기구를 통하여 흡입되었다. IRWST 내부에 설치된 PAR 는 흡입된 공기를 이용하여 수소를 재결합하여 천천히 제거하였다. IRWST 내부는 초기에 대량의 수증기 방출에 의해 공기가 완전히 제거되었으며 5,000 초 후 수소가 방출되는 시점에는 산소 기근(starvation)으로 인하여 비가연(non-flammable) 상태가 된다. 8,000 초 후부터는 다시 수증기의 방출로 인하여 수소는 IRWST 밖으로 밀려나가서 IRWST 내부의 수소 농도는 10% 미만을 유지하였다. 본 연구를 통하여 LOFW 사고시 IRWST 내부의 3 차원 유동 특성을 예측할 수 있었으며, APR1400 의 설계에서는 IRWST 환기구에 설치된 플랩과 수증기의 방출 및 응축이 전체 격납건물 수소제어에서 매우 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다.

LOFW 사고의 경우는 IRWST 냉각수 온도의 상승으로 수소가 방출되기 약 5,000 초 전부터 수증기가 응축되지 않고 바로 IRWST 의 자유공간으로 배출 되었다. 전원 상실사고인 SBO 의 경우 MAAP 해석 결과를 보면 수증기의 방출이 IRWST 냉각수 온도를 비등점까지 올리지 못

함으로 인하여 냉각수에 응축되지 못하고 냉각수 수면을 이탈하는 수증기의 양은 거의 미미할 것으로 생각된다. 이와 같은 dry-hydrogen case 에 대하여 스파저에서 나온 수증기의 응축률에 따른 IRWST 내부의 수소분포 및 화염가속가능성에 대한 평가를 수행 중에 있다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 중장기 사업 일환으로 수행하였습니다.

참고문헌

[1] "19.2 Severe Accident Phenomenology and Containment Performance for the KNGR," KOPEC, 2002

[2] Byung-Chul Lee et al., "An Optimal Hydrogen Control Analysis for the In-Containment Refuling Storage Tank(IRWST) of the Korean Next Generation Reactor(KNGR) Containent under Severe Accidents," ICONE-9, France, 2001

[3] Byung-Chul Lee et al., "An Evaluation of the Effectiveness of the APR1400 Hydrogen Mitigation System Using Sophisticated Lumped Parameter Code coupled with 3-dimensional Model," ICAPP03, 2003

[4] Jongtae Kim et al., "Modeling of APR1400 Containment to Study Hydrogen Behavior Using GASFLOW Code," 2003 한국원자력학회 춘계학술대회, 경주, 2003

[5] Jongtae Kim et al., "Analysis of Hydrogen Behavior in the APR1400 Containment with GASFLOW Ⅱ," NURETH-10, Seoul, Korea, Oct. 10, 2003