2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

APR1400 격납건물 내에서 전원상실사고 발생시 수소 제어에 대한 연구

Hydrogen control in the APR1400 Containment for the Hypothetical Station Blackout Accident

김종태, 홍성완, 김상백, 김희동

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

한국의 차세대 원자력 발전소인 APR1400 에서 전원상실사고 발생시 격납건물 내의 수소 거동을 분석하기 위하여 3 차원 GASFLOW 코드를 이용하였다. 전원상실사고시 다량의 물과 증기 그리고 수소는 가압기의 POSRV 를 통하여 IRWST 내의 스파저로 배출된다. 중대사고 해석 코드인 MAAP 해석을 통하여 얻은 소스를 분석한 결과 IRWST 내로 방출되는 수증기는 대부분의 연료재장전수에서 응축되고 수소만이 IRWST 수면 밖으로 방출되는 것으로 나타났다. GASFLOW 해석결과 IRWST 내부의 수소 혼합기체는 산소의 기근으로 인하여 급격히 불연소 상태가 되며 방출된 수소는 IRWST 의 환기구를 통하여 환형격실로 나가서 격납건물 돔 영역으로 확산된다. 그러나 환형격실 상부에 있는 작업 갑판(operating deck)과 격납건물 외벽 사이에 만들어진 좁은 환형의 환기 통로로 인하여 작업 갑판 하부에 높은 농도의 수소 구름을 형성하였다. 각 격실별로 혼합기체의 특성을 분석한 결과 IRWST 로 방출되는 수증기가 연료재장전수에서 완전히 응축된다고 가정한 본 연구에서는 IRWST 격실과 환형격실 및 RDT 격실에서 높은 수소농도로 인하여 연소 발생시 화염의 가속과 초음속연소로 천이될 가능성을 보여주었다. 본 연구에서는 APR1400 에서 전원상실사고 발생시 수소연소로 인한 화염가속 가능성을 없애기 위하여 두가지의 수소 제어 개념을 도입하여 각각의 효과를 분석하였다.

Abstract

Advanced power Reactor APR1400 with a 1400MW electric power designed in Korea has 26 PARs and 10 glow-type igniters in its design specification in order to control or reduce the hydrogen concentration in the containment during the design-based or hypothetical severe accidents. For the station blackout accident most of the hydrogen and steam generated in the reactor vessel is released into the IRWST through the POSRVs of the pressurizer. In order to analyze hydrogen distribution during the SBO accident in the APR1400 containment, the

GASFLOW code is used. The source of the hydrogen and steam for the GASFLOW analysis is obtained from a MAAP calculation. The discharged water, steam, and hydrogen passing through the POSRVs are released into the water of the IRWST by the spargers. Most of the discharged steam is condensed in the IRWST water because of its subcooling, and dry hydrogen is released into the free volume of the IRWST, and finally goes out to the annular compartment above the IRWST through the vent holes. From the GASFLOW analysis it is said that the gas mixture in the IRWST becomes quickly non-flammable by the oxygen-starvation but the hydrogen is accumulated in the annular compartment because of the narrow ventilation gap between the operating deck and containment wall when the igniters are not operated. The current design of the APR1400 has specified that four PARs and two igniters are installed in the IRWST. When the igniters installed in the APR1400 are turned on, a short period of burning occurred in the IRWST and then the flame was extinguished by the oxygen-starvation in the IRWST. The unburned hydrogen was released into the annular compartment and goes up to the dome because no igniters are installed around the annular compartment in the base design of the APR1400. From this result it could be concluded that the control of the hydrogen concentration is difficult for the base design. In this study design modifications are proposed in view of the hydrogen mitigation strategy. One of them is to install igniters in the annular compartment in order to burn the hydrogen released from the vent holes of the IRWST. The other one is to use the concept of water confinement in the IRWST by the compartmentalization of the IRWST. By doing this the refueling water around the spargers quickly arrives at the condition of saturation and some part of the seam discharged from the spargers escapes the water surface in the IRWST. For the first modified design standing flames are made above the vent holes of the IRWST. Most of the released hydrogen was burnt in this case, but it is thought that thermal loads from the standing flame is severe and the equipments located in the annular compartment must be protected. With the second modified design huge amount of steam is released into the IRWST and goes to the annular compartment. By the steam-rich condition of the gas mixture DDT possibility is heavily reduced.

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 중대사고 시에는 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 수소

의 방출이 hot-leg 혹은 cold-leg의 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 IRWST에서 방출된다. IRWST는 환형의 매우 큰 격실이며 상부에 있는 네 개의 환기구를 제외하면 밀폐된 공간이므로 가상적인 중대사고시 방출되는 수소와 증기의 거동이 매우 중요하다. 선행연구[6]에서 APR1400의 급수완전상실사고(LOFW) 시 IRWST를 포함한 격납건물 전체의 3차원 해석을 GASFLOW 코드로 수행하였다. 그 결과 IRWST의 환기구에 설치된 플랩(flap)은 격납건물 전체의 유동 구조에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 특히 IRWST 내의 연료재장전수가 스파저로 방출되는 고온의 원자로 냉각수와 수증기에 의하여 수소가 방출되기 전에 비등점에 도달하며, 이로 인하여 많은 양의 수증기가 응축되지 않고 IRWST의 대기중으로 방출된다. 방출된 수증기는 IRWST 내의 수소의 농도를 낮추는 역할을 하였으며, 격납건물의 모든 격실에서 수소연소시 화염의 가속 가능성이 희박한 것으로 나타났다. 그러나 MAAP 분석에 의하면 전원상실사고(SBO22) 시에는 급수완전상실사고와는 달리 작업자가 수동으로 POSRV를 완전개방하지 않기 때문에 사고 시작 약 37,00초 경과후에 다량의 물과 수증기가 방출되며 바로 이어 수소가 스파저로 방출되며, 이로 인하여 IRWST 연료재장전수는 비등점에 도달하지 않고 거의 대부분의 수증기가 응축된다. 이 SBO22 사고 경위는 dry-hydrogen case로서 LOFW 사고 경위와는 달리 수소만 IRWST 대기로 방출된다. 본 연구에서는 먼저 SBO22 사고에 대하여 순수 수소만 방출된다는 보수적인 가정을 하여 APR1400의 기본 설계에 반영된 수소제어기구의 유효성을 평가하였다. APR1400의 기본 설계는 IRWST 내부에 2개의 수소점화기와 4개의 수동촉매재결합기인 Siemens사의 PAR를 설치하도록 되어 있다. 이경우에 대하여 GASFLOW 코드로 해석한 결과 IRWST 격실과 IRWST 위의 환형격실 등에서 높은 농도의 수소 구름이 형성되면서 수소연소시 화염의 가속 가능성이 높은 시간대가 존재하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 APR1400에서 전원상실사고 발생시 수소연소로 인한 화염 가속 가능성을 줄이기 위하여 환형격실에 수소점화기를 설치하고 IRWST의 환기구를 통하여 나오는 수소를 바로 연소시키는 방법과 IRWST 격실에서 스파저가 설치된 섹터 부근에 수직벽을 설치하여 IRWST 내 냉각수의 온도 상승을 유도함으로써 빨리 비등점에 도달하여 스파저로 방출되는 수증기의 일부가 IRWST 내에서 응축되지 않고 대기로 방출되도록 하는 방법을 제안하였으며, 두 가지의 APR1400의 설계 수정안을 제시하고 각각에 대하여 수소제어의 관점에서 유효성을 평가하였다.

2. 본론

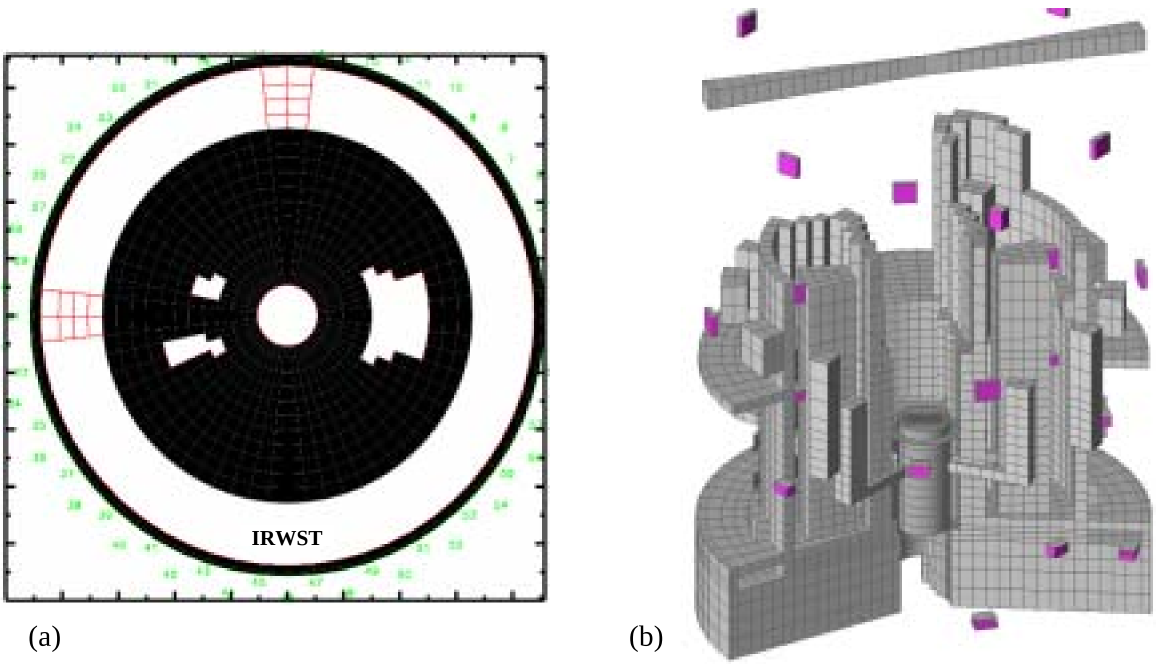
2.1. 모델링

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 79.4m이고 격납건물 외벽의 내경은 22.86m(75ft)인 원통 모양이다. 본 연구에서는 실린더 좌표(r-ϕ-z)를 사용하였으며, R 방향의 격자는 19개의 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 1피트 크기의 환형의 환기 간극(annular ventilation gap)을 위해 두 격자점을 벽에 일치시켰다. ϕ 방향의 격자는 6^{o}의 균일간격으로 총 61개를 사용하였으며 z 방향의 격자는 IRWST 내의 유동을 좀더 정확히 예측하

고 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] 모델링된 APR1400 격납건물의 자유체적은 94,861m^3 로 GOTHIC 계산에서 모델링한 94,668m^3 와 거의 일치하는 값을 보여준다. Fig. 1 은 GASFLOW 해석을 위하여 모델링된 APR1400 의 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 SBO 사고 해석을 위하여 모델링된 소스(source)의 방출지역(스파저 위치)이 나타나 있다. Fig. 1(b)는 모델링된 APR1400 격납건물 전체의 그림으로 IRWST 내의 재장전수는 정상 가동시의 수위를 모델링하였다. APR1400 은 설계사고(DBA) 및 중대사고시 발생되는 수소를 제거하거나 수소농도를 제어하기 위하여 26 개의 피동형 수소재결합기와 10 개의 백열식 점화기를 설치하도록 설계되어 있다. Fig. 1(b)에서 자주색으로 보이는 블록이 모델링된 PAR 를 나타낸다.

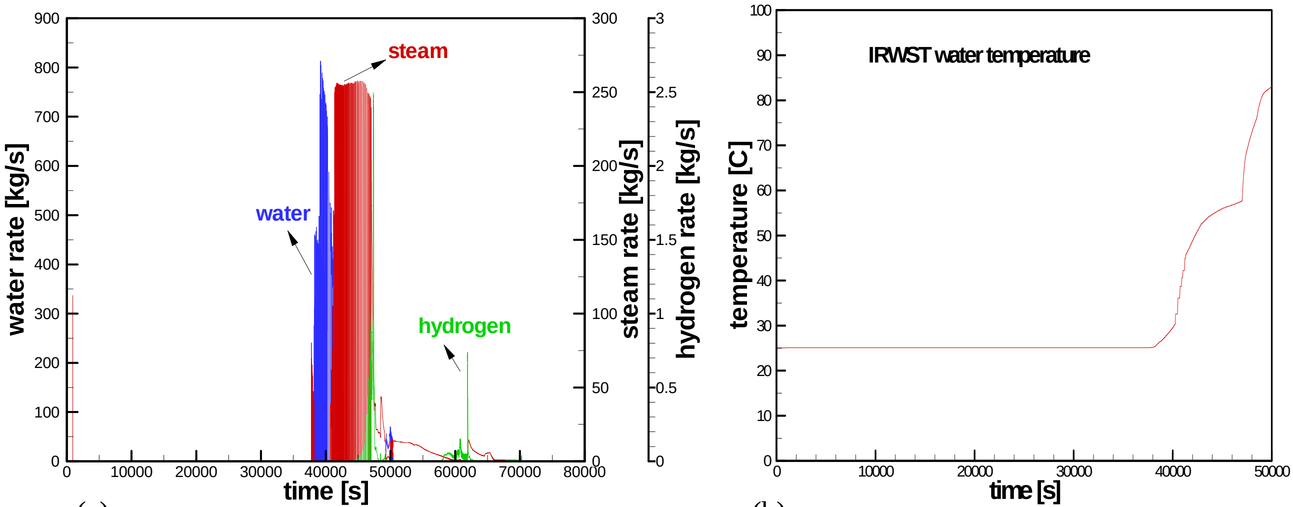


(a) (b)

Fig. 1 Modeling of APR1400 containment for GASFLOW, (a) horizontal cut view of the containment at k=6, (b) perspective view of the modeled APR1400 containment.

본 연구에서 수행된 전원상실사고(Station Black Out, SBO22)는 DC 배터리를 제외한 격납건물 내 모든 전원이 상실되는 사고로서, 원자로 트립(trip) 후 터빈에 의해 구동되는 보조급수 펌프가 8 시간동안 작동하는 중대사고 시나리오이다. 사고 발생후 원자로 내부의 현상은 MAAP 으로 계산되어지며 물, 수증기 및 원자로에서 생성된 수소는 가압기의 POSRW 를 통하여 IRWST 내부에 설치된 스파저(sparger)로 방출되며 이 소스(source)의 격납건물 내 거동은 GASFLOW 로 계산한다. Fig. 2(a)는 스파저로 방출되는 소스의 질량속도(mass rate)를 보여주는 것으로 약 37,000 초에서 잠시 수증기가 발출된 후 다량의 냉각수가 IRWST 로 방출된다. 그 후 약 6,000 초 동안 수증기가 불연속적으로 방출되고 수증기의 방출률이 급감하면서 수소가

방출되는 모습을 보여준다. 고온의 원자로 냉각수와 수증기는 IRWST 내에 있는 재장전수에 섞이면서 수증기는 응축하게된다. 초기에 재장전수의 과냉각으로 인하여 모든 수증기가 응축한다고 가정하고 재장전수 온도를 계산한 결과 Fig. 2(b)에서 보는 것처럼 사고 발생후 5 만초까지 재장전수 온도는 80C 에 이르는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 IRWST 연료재장전수의 과냉각을 고려하여 스파저로 방출되는 수증기가 모두 응축되는 것으로 가정하였으며, 사고 시작후 45,000 초부터 50,000 초까지 5,000 초 동안에 방출되는 수소의 거동을 GASFLOW 로 계산하였다. Fig. 3 은 GASFLOW 에 사용된 수소의 방출률을 시간에 따라 보여주는 그림으로 총 574kg 의 수소가 IRWST 내부로 방출된다.



(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.

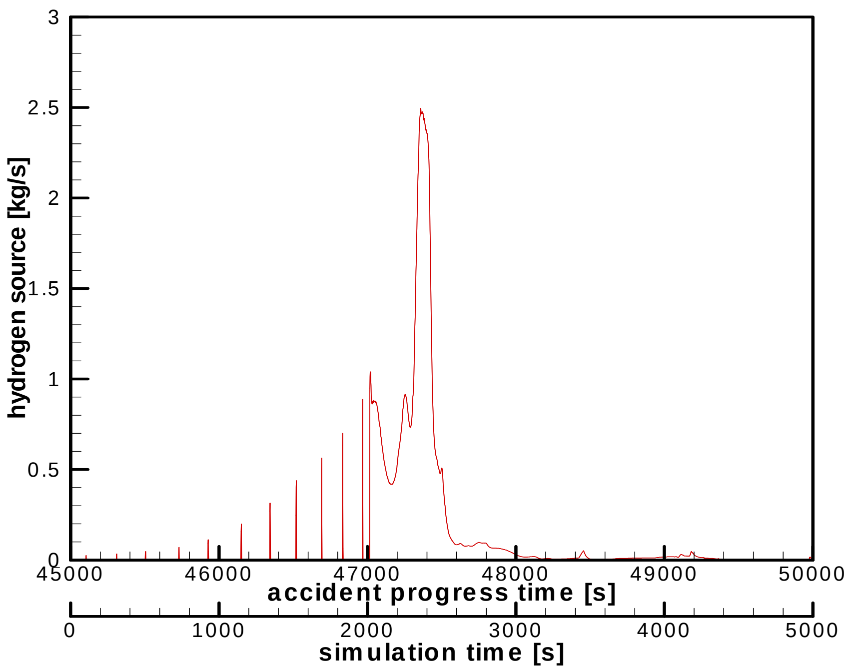


Fig. 3 Hydrogen source for GASFLOW simulation.

2.2 계산 결과

APR1400 의 IRWST 격실 천정에는 4 개의 환기구가 있으며, 이 환기구에 IRWST 내외부의 차압에 따라 열리고 닫히는 플랩(flap)이 설치되어 있다. 이 플랩은 IRWST 격실 및 격납건물 전체의 유동 구조 및 수소분포에 큰 영향을 미치는 것으로 선행 연구에서 나타났으며 본 연구에서도 수소가 IRWST 격실에서 방출되므로 4 개의 환기구에 플랩 모델을 사용하였다. 스파저로 방출되는 수증기의 완전한 응축을 가정한 fig. 3 의 수소방출률을 GASFLOW 의 소스로 사용하여 사고발생 45,000 초부터 5,000 동안의 수소거동을 해석하였다. IRWST 격실은 원주방향으로 길이가 매우 길어서 스파저가 있는 곳과 그 반대편의 냉각수 온도가 완전히 같지는 않지만, 스파저로 방출되는 물과 수증기는 고압으로 방출되는 제트 유동을 형성하여 IRWST 내 냉각수와의 열혼합을 촉진할 것으로 판단되어 여기서는 IRWST 내 냉각수의 온도가 균일하다고 가정하였다. 본 논문의 후반부에 설명이 되겠지만, 이 가정은 수소 제어의 관점에서 보수적인 결과를 얻는 것으로 생각된다.

먼저 격납건물 내에서 수소의 거동을 분석하기 위하여 수소점화기가 작동하지 않는 경우를 해석하고 수소점화기가 작동할 때의 수소분포와 비교하였다. IRWST 로 방출된 수소는 격실 내부의 공기와 섞이면서 압력이 증가하다가 IRWST 내부의 압력이 외부압력보다 0.5psi 높아지면서 환기구에 설치된 플랩이 열리고 수소 혼합기체는 IRWST 위의 환형격실로 흘러나간다. Fig. 4 는 스파저로 방출되는 수소의 질량률이 가장 높은 시점인 약 2,400 초에서 격납건물 내부의 수소분포를 보여준다. Fig. 4(a)에서 볼 수 있는 것처럼 환기구로 방출된 수소는 IRWST 위의환형격실을 지나 작업 데크(operating deck)와 격납건물 외벽 사이에 만들어진 환형의 1 피트 환기간극을 통하여 격납건물 돔으로 흘러간다. 좁은 환기 간극으로 인하여 작업 데크 아래에 둥근띠모양의 10 vol% 농도의 수소구름이 형성되어 있음을 알 수 있다. 2,400 초에서 IRWST 내부는 높은 농도의 수소 혼합기체가 형성되어 있고 fig. 4(b)의 왼쪽 환기구에서는 20 vol% 농도의 수소 플룸이 만들어져 있다. Fig. 5(a)는 IRWST 내외부의 압력을 시간에 따라 그린 것으로 5,000 초동안 격납건물의 압력상승은 0.18 기압으로 미미한 정도의 압력상승을 보여주고 있는데 이것은 낮은 밀도의 수소만 방출되기 때문으로 생각된다. IRWST 내부의 압력은 외부에 비해 0.5psi 높은 압력을 나타내며 진동을 하면서 시간에 따라 상승하는데 이것은 환기구에 설치된 플랩이 반복적으로 열렸다 닫혔다 하기때문이다. Fig. 5(b)는 4 개의 환기구에서 혼합기체의 속도를 시간에 따라 보여주는 것으로 환기구 밖으로 배기되는 속도가 양의 속도값을 갖는다. 이 계산에서는 4 개의 모든 환기구에서 간헐적으로 IRWST 밖으로 혼합기체가 나가는 모습을 보여준다. APR1400 의 기본설계에서는 IRWST 내부에 4 개의 PAR 와 2 개의 수소점화기가 설치되어 있다. Fig. 6 은 SBO 사고시에 두개의 수소점화기 위치와 네개의 PAR 위치에서 시간에 따른 수소농도의 변화를 그린 것이다. PAR 에 비하여 스파저와 가까이 설치된 수소점화기 위치에서 수소농도는 약 1,200 초부터 가연상태가되고 약 1,700 초부터 수소농도가 10%를 넘어선다. Fig. 3 에서 알 수 있듯이 2,000 초부터 수소는 연속적으로 방출되기 시작하며 IRWST 내부의 수소농도도 급격하게 상승하여 산소농도를 희석시킨다. 약 2,400 초경과 후부터는 IRWST 내부에 산소는 거의 존재하지 않으며 수소는 불연소 상태가 된다. Fig. 6(b)는 PAR 의 배기구 위치에서 기체의 온도와 농도를 보여준다. PAR 에 의한 수소의 재결합으로 배기 가스의 온도는 약 1,100K 까지 올라가지만, IRWST 내부의 산소 기근으로 인하여 더이상 수소의 재결합은 이루어지지않고 온도가 급격히 내려가는 것을 볼 수 있다. GASFLOW 코드는 lumped-parameter 코드와 결과를 비교하고 또한 각 격실별로 수소구름의 연소특성을 평가하는 기능을 가지고 있다. 본 연구에서는 GOTHIC 해석에 사용된 총 41 개의 APR1400 의 격실 자료를 입력하였다. GASFLOW 는 0%, 4%, 8%, 16% 등의 수소농도를 기준으로 각 격실별로 수소 구름을 구성한 뒤

그 혼합기체의 연속특성을 평가한다. 수소농도 0%는 격실 전체의 혼합기체를 의미하고, 4% 한계치는 격실에서 최소 연소한계인 4% 이상의 수소농도를 갖는 수소 구름을 구성하여 이 혼합기체 구름에서 수소의 연소특성을 평가한다.

Fig. 7 은 IRWST 격실에서 수소농도 4% 이상의 혼합기체의 평균 및 최대 농도와 수소연소 특성을 보여준다. PAR 의 수소재결합으로 인하여 수증기의 농도는 약간 상승하지만 전체 해석시간동안 10% 미만의 낮은 농도를 보여주고 있다. 2,000 초 전까지는 스파저를 통하여 간헐적으로 수소가 방출되므로 수소가 방출되는 시기에는 수소농도 4% 이상의 수소 구름이 형성되었다가 수소방출이 없어지면서 수소의 확산으로 인하여 수소 농도 4% 이상의 혼합기체 구름이 없어지는 특성을 보인다. 약 2,000 초 후부터 스파저를 통하여 수소가 연속적으로 방출되면서 IRWST 격실 내의 수소 농도가 급격히 상승하고 수 분간 화염가속지수(sigma) 및 d/7L(DDT 지수)가 1 보다 크게 나타난다. 약 2,200 초까지 수소 농도가 상승하다가 수소 농도가 소멸된 것처럼 보이는 것은 그 때부터 IRWST 내부에는 산소가 존재하지 않으므로 가연 구름이 형성되지 못하기 때문이다. Fig. 8 은 IRWST 상부의 환형격실과 RDT(Reactor Drain Tank) 격실에서 4% 이상 수소 농도를 갖는 혼합기체 구름의 연소특성을 보여주고 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 환형격실과 RDT 격실에서도 수 분동안 화염이 가속되어 초음속연소로 천이될 가능성이 있음을 의미한다.

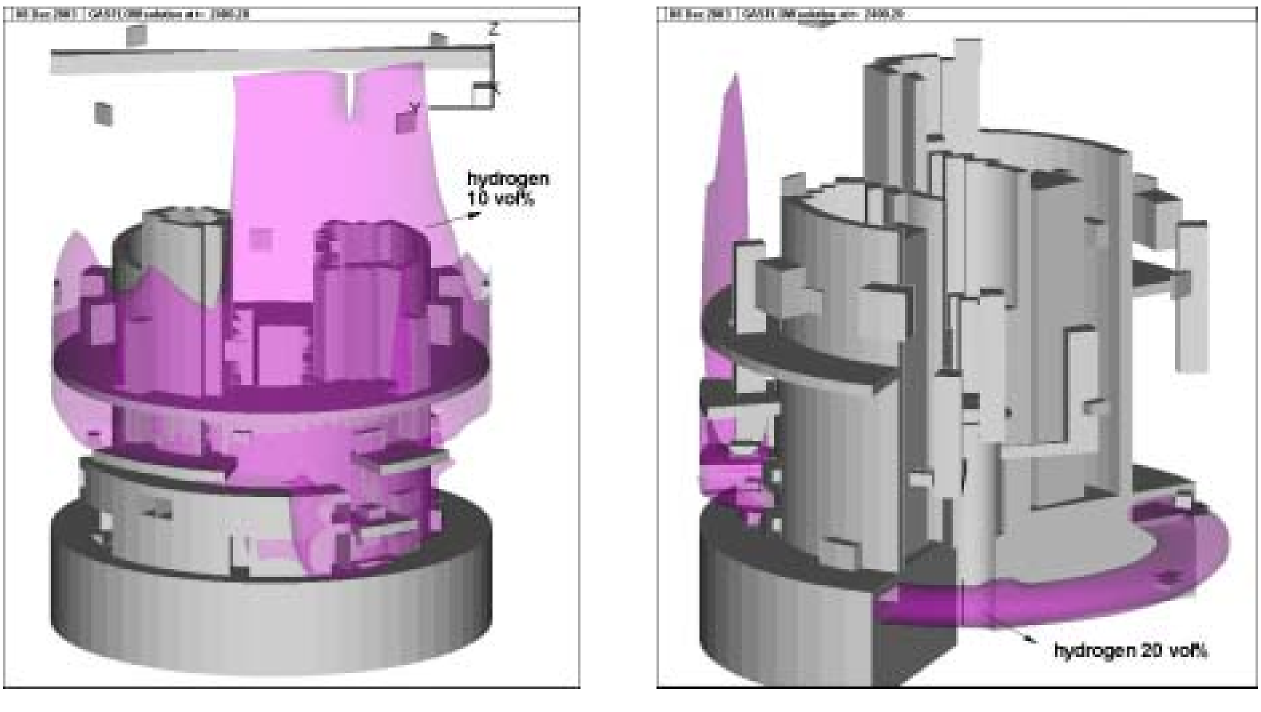
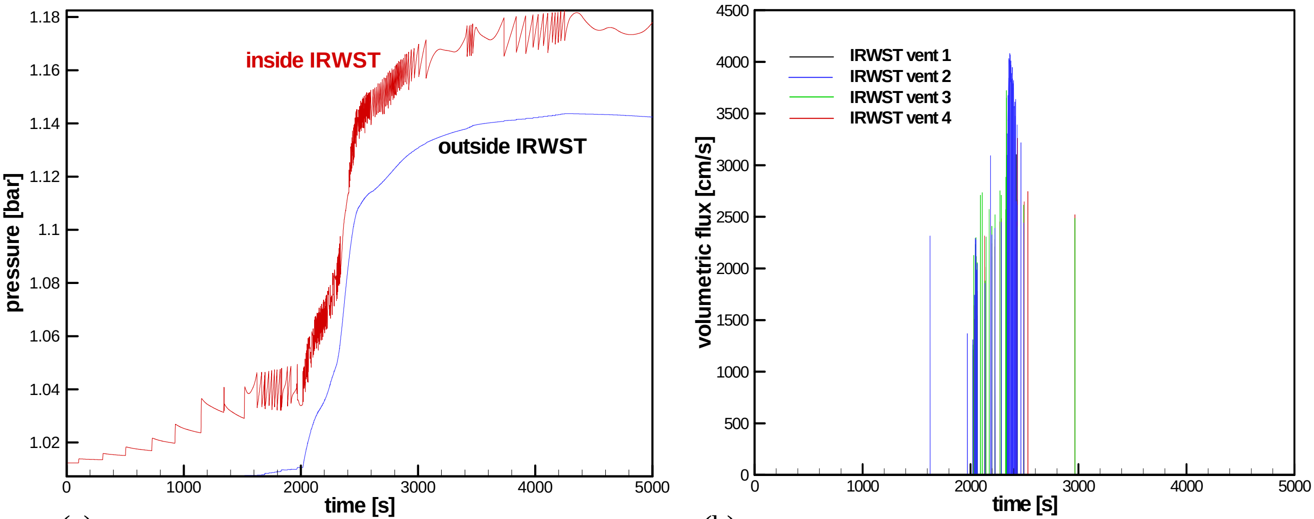
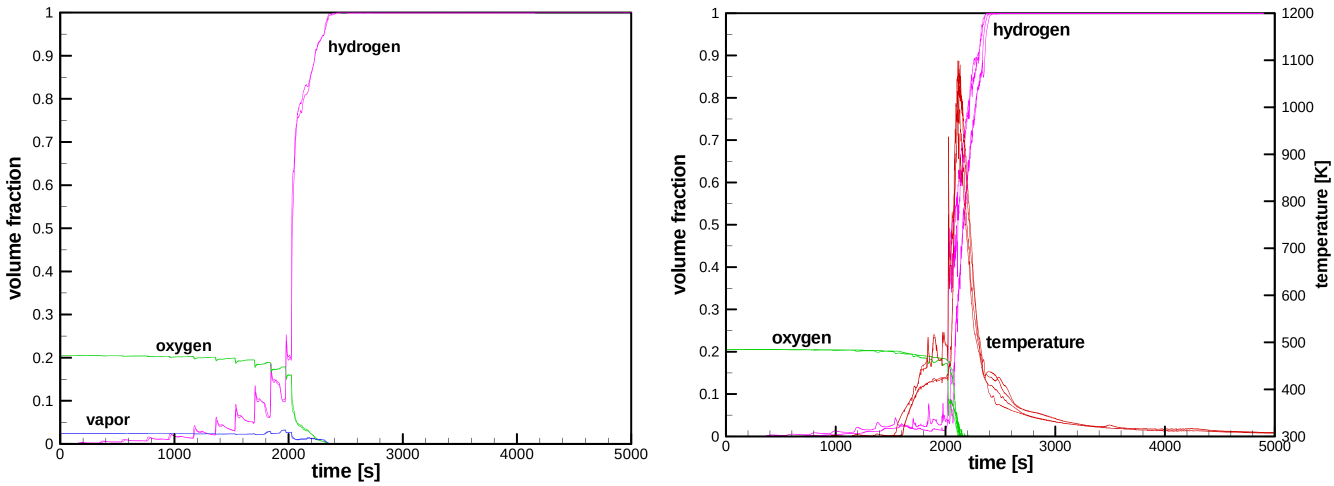


Fig. 4 GASFLOW results at t=2400s for the SBO accident, calculated hydrogen distribution in the APR1400, (a) 10 vol% hydrogen cloud is developed around the operating deck, (b) 20 vol% hydrogen plume is shown at the left IRWST vent hole.



(a) (b)

Fig. 5 GASFLOW results for the SBO accident, (a) pressure-time histories inside and outside IRWST, (b) volumetric fluxes at the four vent holes.



(a) (b)

Fig. 6 GASFLOW results for the SBO accident, (a) Species concentrations at the igniter locations(I9, I10) inside the IRWST, (b) Exhaust temperature and hydrogen-oxygen concentrations at the inlet of PARs inside the IRWST.

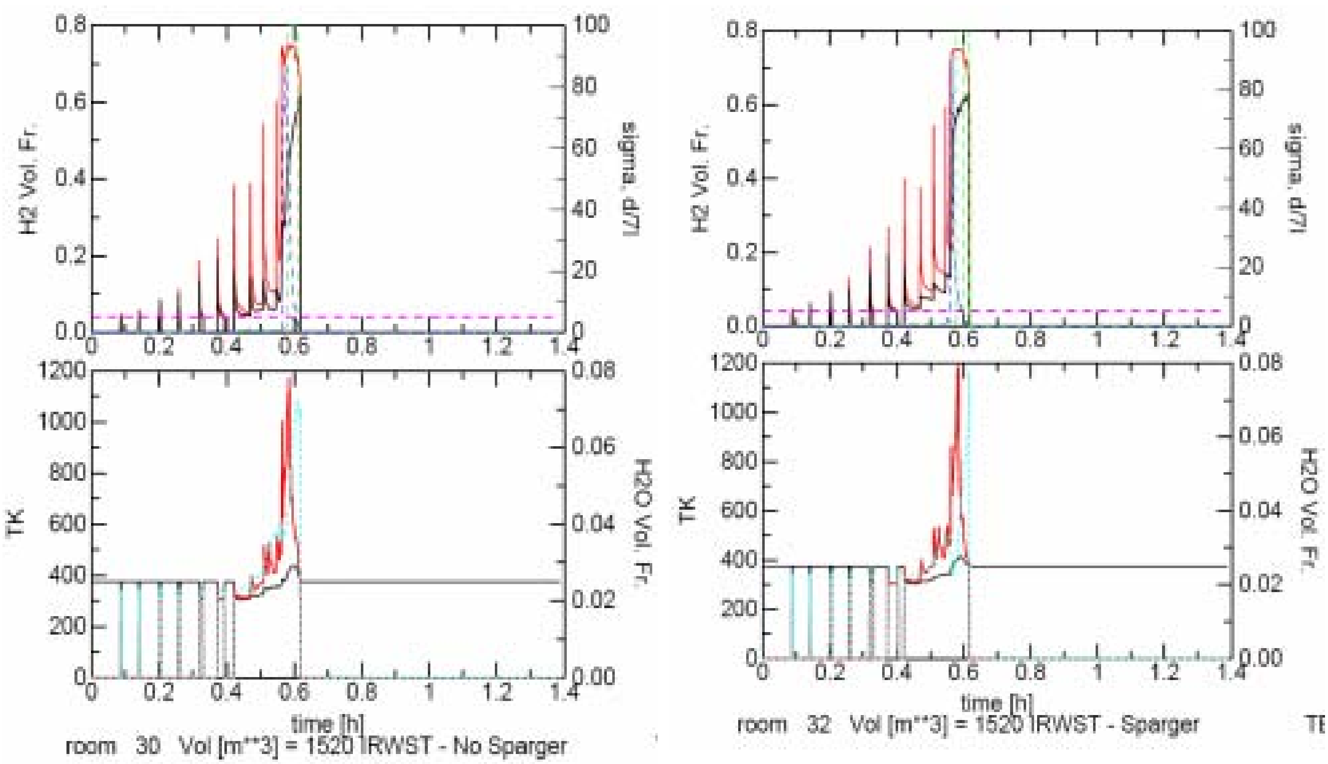


Fig. 7 The characteristics of the mixture cloud in the IRWST compartment.

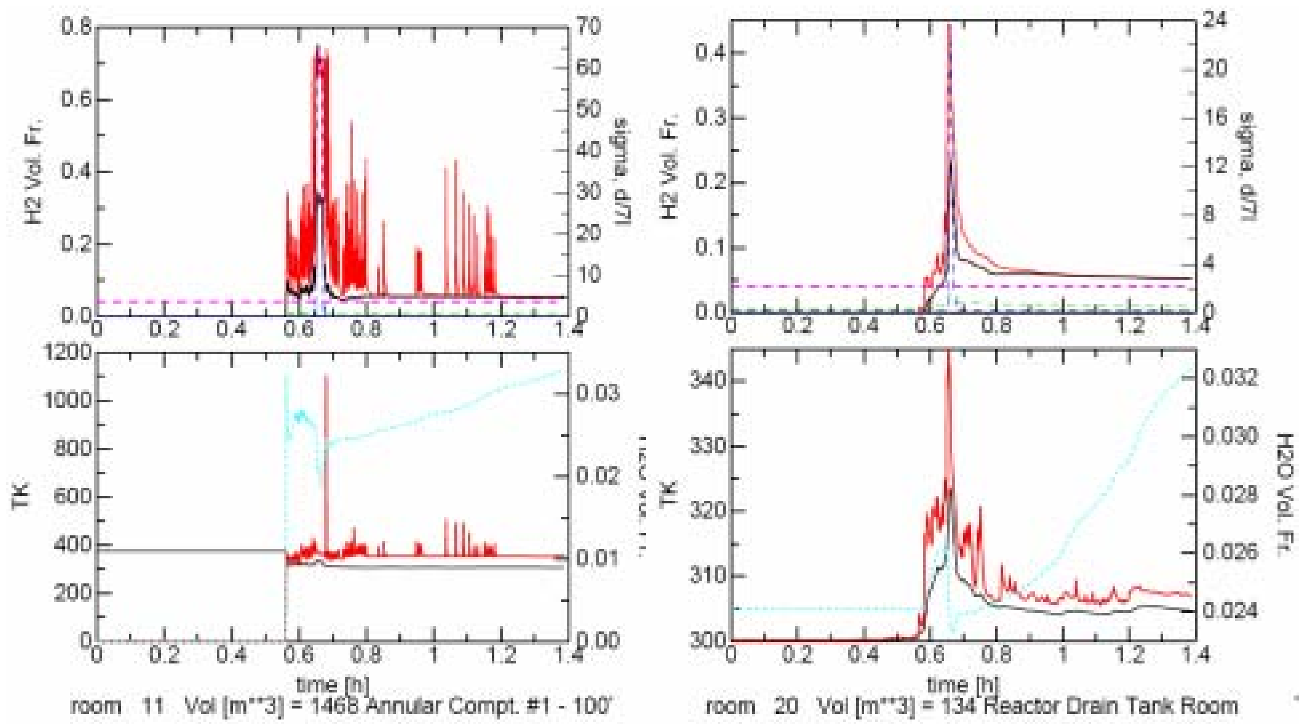
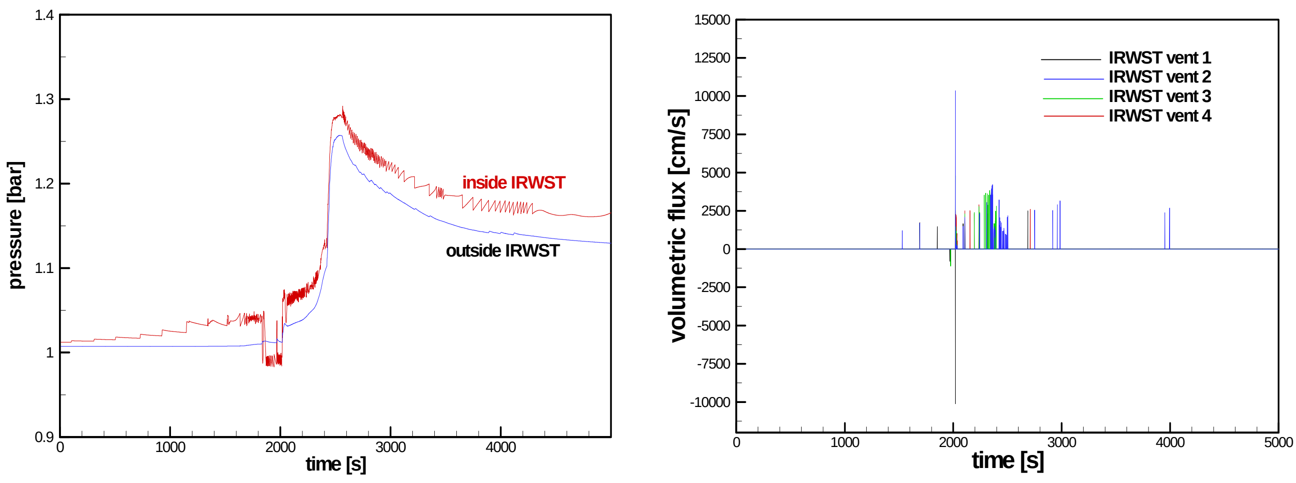


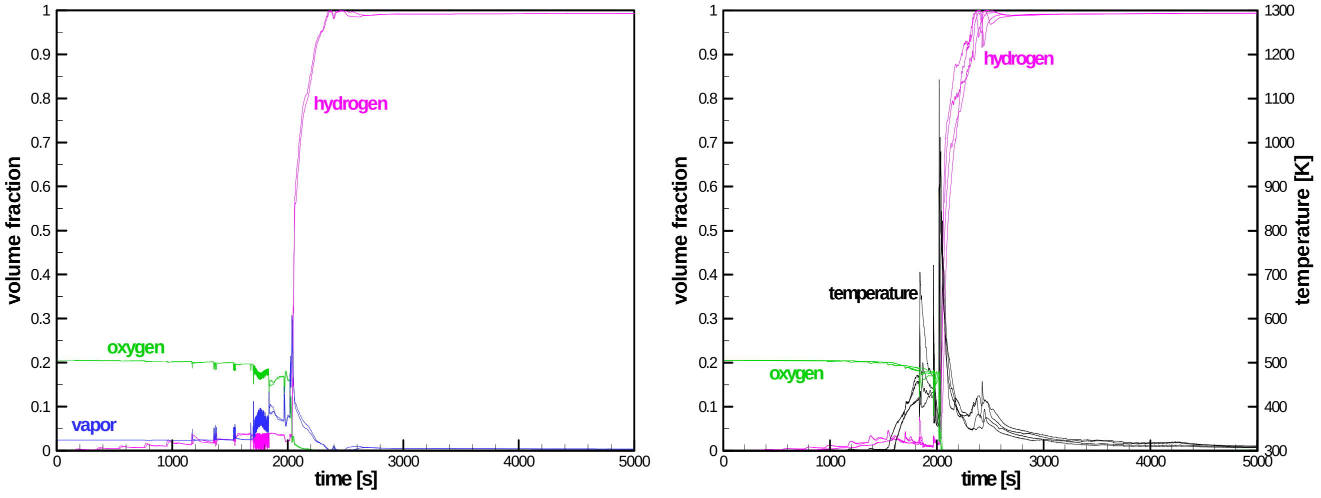
Fig. 8 The characteristics of the mixture cloud in the annular compartment and RDT room

다음은 수소점화기를 작동한 경우에 대하여 해석을 하였으며 fig. 9 에서는 수소점화기가 작동하는 경우 작동하지 않는 경우에 비하여 격압건물의 압력이 많이 상승한 것으로 나타나지만, 2,600 초 이후부터는 압력이 천천히 감소하고 있다. Fig. 10 을 보면 수소점화기의 작동으로 약 2,000 초까지 간헐적인 수소 연소가 발생하여 수소 농도가 연소 한계인 4% 미만을 유지한다. 약 2,000 초부터 수소가 연속적으로 방출되면서 순식간에 IRWST 내부의 산소를 소모하고 더이상의 수소 연소가 일어나지 않는 상태가 된다. Fig. 11, 12 는 IRWST 와 환형격실에서 수소 구름의 연소 특성을 보여준다. 수소점화기가 작동하지 않은 경우에 비하여 수소화염의 가속가능성이 높은 시간 영역이 크게 줄은 것으로 나타났다. 그러나 이경우 IRWST 내에서 수소점화기가 작동하기 때문에 약 2,000 초 부근에서 발생하는 연소는 매우 큰 압력파를 발생할 가능성이 있다. Fig. 13 은 SBO 사고에 대해 수소점화기가 작동하는 경우 2,400 초에서 격납건물 내 수소 분포를 보여준다. APR1400 의 기본 설계에서는 환형격실에 수소점화기가 설치되어 있지 않기 때문에 수소점화기가 작동하지 않은 경우와 마찬가지로 작업 데크 아래의 환형격실에서 10 vol% 이상의 수소 구름이 형성되어 있는 것을 볼 수 있다. 그리고 오른쪽에 보이는 IRWST 의 환기구를 통하여 높은 수소 농도의 플룸이 만들어져 있다. 수소점화기가 작동하는 경우에도 IRWST 내에서 짧은 시간동안 수소연소가 일어나고 그후 IRWST 내의 산소 고갈로 인하여 더 이상 수소 연소는 발생하지 않으며 높은 농도의 수소 기체가 IRWST 밖으로 방출되며 이것은 환형격실을 통하여 격납건물 전체로 확산되어 간다. 수소점화기가 작동하지 않는 경우와 작동하는 경우에 대하여 GASFLOW 로 해석한 결과 IRWST 내에 설치된 수소점화기는 SBO 사고에 대하여 격납건물 전체에 대한 수소거동에 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있으며, 특히 IRWST 격실과 환형격실에서는 수소연소 발생시 화염의 가속 가능성과 초음속 연소로의 천이 가능성이 높은 시간대가 수 분간 존재함을 알 수 있다. 또한 환형격실에 설치된 PAR 는 수소재결합을 하면서 발열반응으로 인하여 고열이 발생하고 이로 인하여 작업 데크 아래에 축적된 높은 농도의 수소 구름에 수소연소를 유발할 가능성도 배제할 수 없다.



(a) (b)

Fig. 9 GASFLOW results for the SBO accident with igniters turned on, (a) pressure-time histories inside and outside IRWST, (b) volumetric fluxes at the four vent holes.



(a) (b)

Fig. 10 GASFLOW results for the SBO accident with igniters turned on, (a) Species concentrations at the igniter locations(I9, I10) inside the IRWST, (b) Exhaust temperature and hydrogen-oxygen concentrations at the inlet of PARs inside the IRWST.

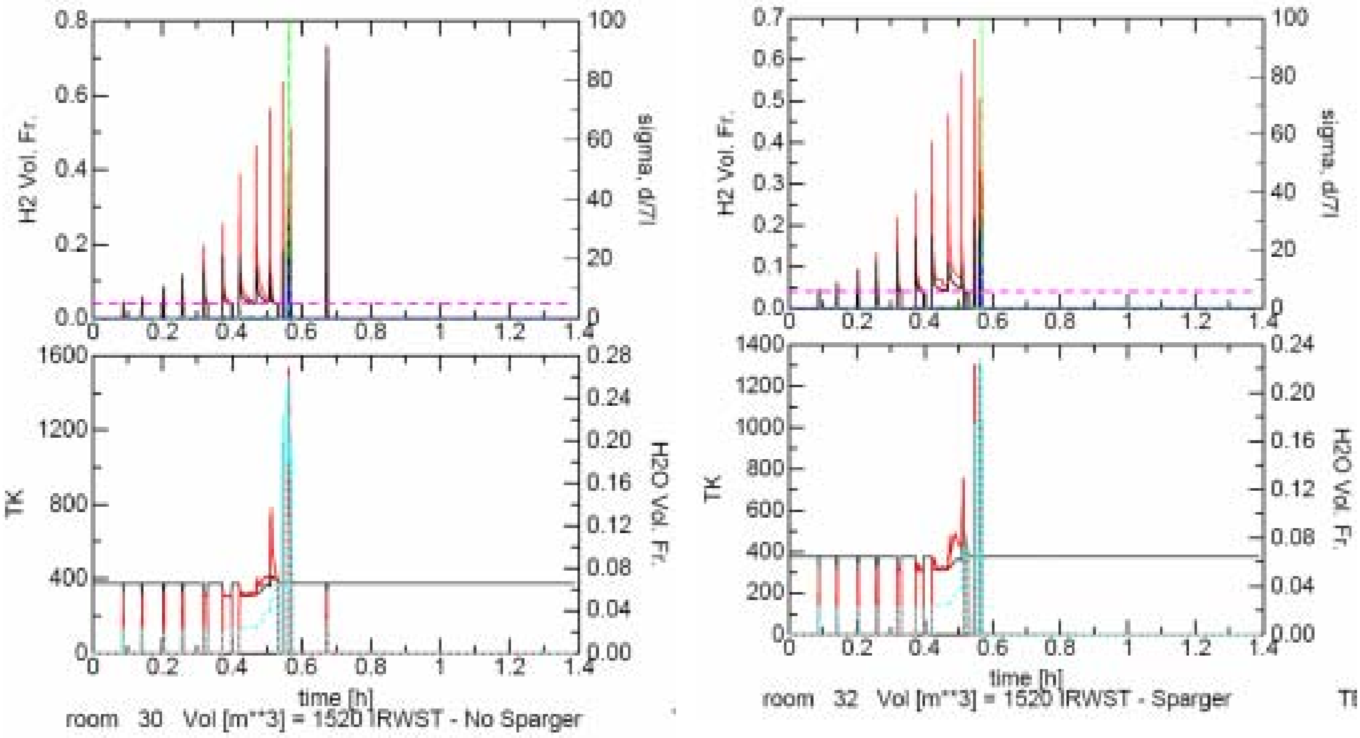


Fig. 11 The characteristics of the mixture cloud in the IRWST compartment when the igniters turned on.

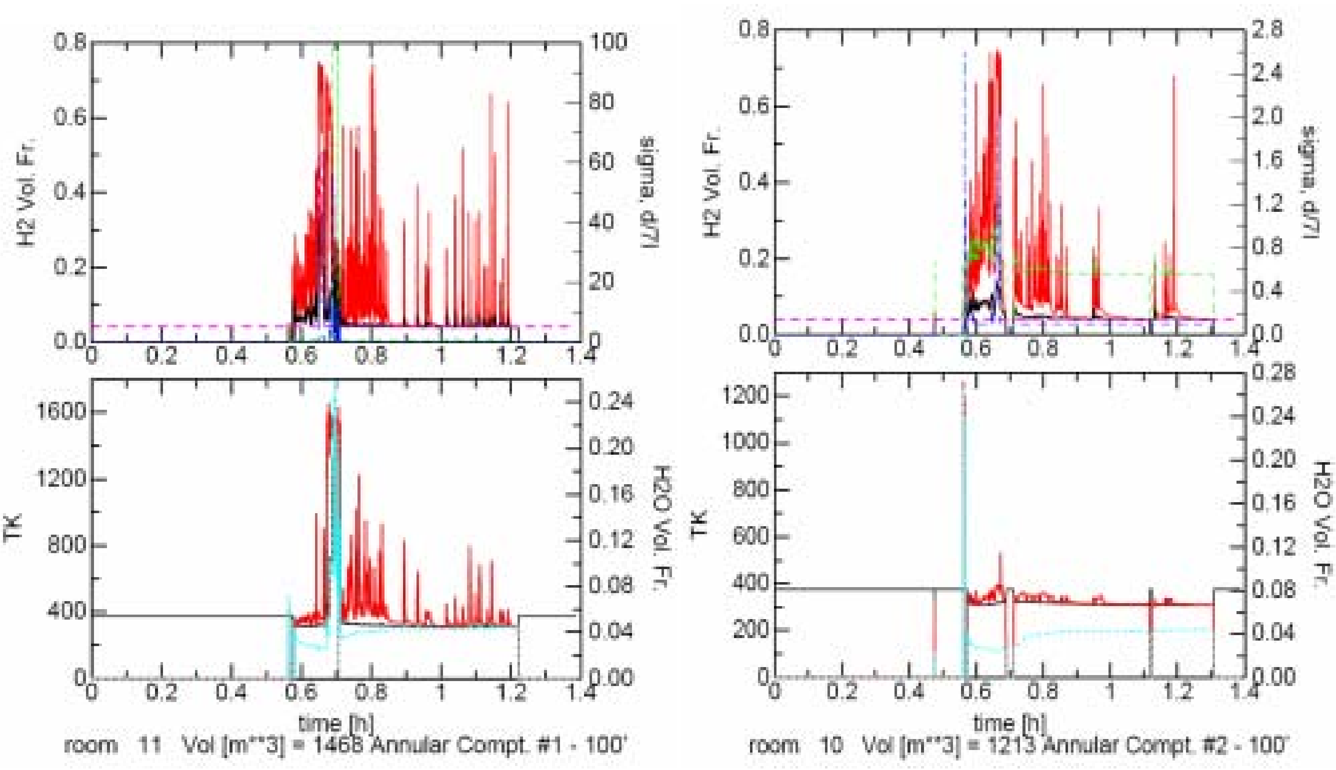


Fig. 12 The characteristics of the mixture cloud in the annular compartment when the igniters are turned on.

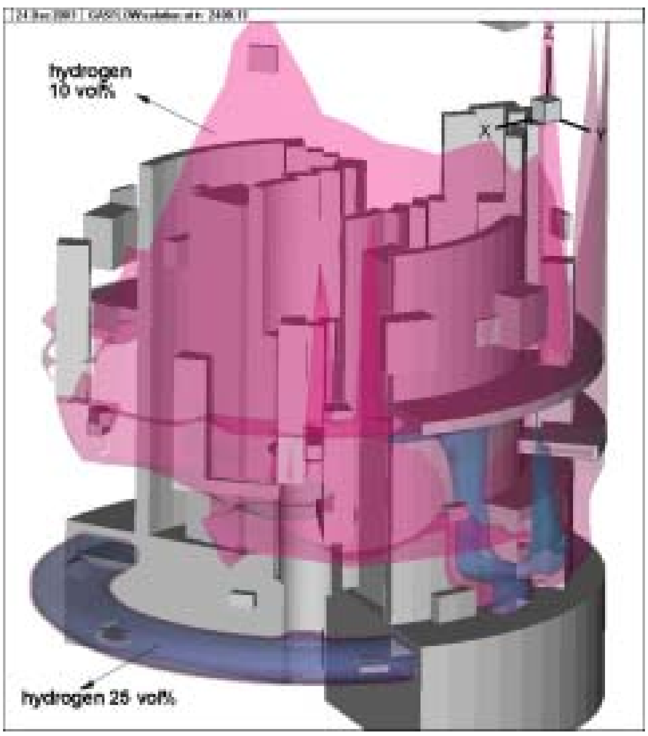


Fig. 13 GASFLOW results at t=2400s for the SBO accident, calculated hydrogen distribution in the APR1400 with the igniters turned on.

APR1400 의 기본 설계에 반영된 수소제어 기구는 SBO 사고에 대하여 수소를 적절히 제어하지 못하는 것으로 판단되며, 다음과 같이 APR1400 의 설계를 수정하여 GASFLOW 해석을 통하여 그 유효성을 평가하였다. 본 연구에서는 두 가지의 개념을 제안하고 각각에 대하여 격납건물 내 수소의 거동을 분석하였다. 첫번째 방법은 환형격실에 수소점화기를 설치하고 IRWST 의 흰기구를 통하여 나오는 수소를 바로 연소시키는 것이다. 그리고 두번째 방법은 IRWST 격실에서 스파저가 설치된 섹터 부근에 수직벽을 설치하여 IRWST 내 냉각수의 온도 상승을 유도하는 것이다. 현재 APR1400 의 기본 설계에서는 스파저가 90 도 간격으로 두군데 설치되어 있으며, 스파저로 방출된 고온의 원자로 냉각수와 수증기는 환형의 IRWST 격실의 원주방향으로 확산되면서 IRWST 내의 냉각수 온도를 상승시킨다. IRWST 는 둥근 띠 모양의 격실로 내벽은 반지름이 16.15m(53ft) 외벽의 반지름이 21.89m(71.83ft)이고 정상 운전시 수심은 3.5m(11.5ft)로 총 냉각수의 질량은 약 2400 톤이다. 스파저로 방출되는 물과 수증기는 고압으로 방출되는 제트 유동을 형성하여 IRWST 내 냉각수와의 열혼합을 촉진할 것으로 판단된다. 두개의 스파저를 포함하는 120 도 간격의 두 수직벽을 IRWST 내에 설치함으로써 제트에 의한 대류의 냉각수 혼합을 120 도 내의 냉각수로 제한(water confinemnet in the IRWST)함으로써 120 도 내의 냉각수는 빨리 비등점에 도달하게 되고 그뒤 스파저로 방출된 수증기는 대부분 응축되지 않고 냉각수 표면을 이탈하여 IRWST 의 기체 공간을 채우게 된다. 두 수직벽은 IRWST 의 내벽과 외벽에 연결되어 있지만 하부는 IRWST 바닥에서 약간의 간극을 두어 IRWST 전체의 수위는 전영역에 대하여 균일하게 유지되도록 할 수 있다.

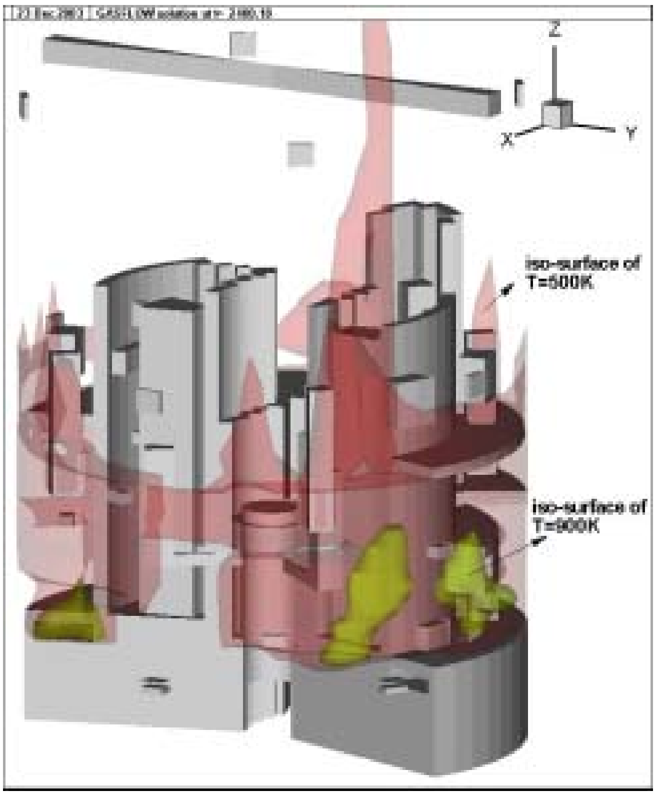


Fig. 14 GASFLOW results at t=2400s for the SBO accident, calculated temperature distribution in the APR1400 when igniters are installed in the annular compartment above the IRWST.

첫번째 수정 디자인에서는 IRWST 위의 환형 격실에 수소점화기를 설치하여 IRWST 환기구를 통하여 배출되는 수소를 바로 연소시키는 개념으로 IRWST 환기구 위쪽에 수소점화기 모델을 GASFLOW 입력자료에 넣어서 계산을 수행하였다. Fig. 14 는 fig. 3 의 수소 방출 데이터를 이용하여 계산한 결과를 보여준다. 이 그림은 2,400 초에서 격납건물 내 온도장을 보여주는 것으로 IRWST 환기구 위에 정지 화염(standing flame) 만들어져 있는 것을 알 수 있다. 연소된 가스는 환형격실을 지나 격납건물 돔쪽으로 흘러가면서 격납건물 내 대기의 온도와 압력을 상승시켰다. Fig. 15 는 IRWST 위의 환형격실에서 수소 혼합기체의 시간에 따른 농도와 온도를 보여준다. 기체의 평균 온도는 약 600K 까지 상승하는 반면 화염부에서 최고 온도는 1,600K 이상 상승하는 것으로 나타났다. IRWST 에서 방출되는 수소를 직접 연소시킴으로써 환형격실 내의 평균 수소농도를 4% 이하로 낮추어 환형격실 전체적인 연소는 발생할 수 없는 상태임을 알 수 있다. 하지만 IRWST 환기구에 정체된 수소화염의 높은 온도로 인하여 환형격실의 콘크리트 구조물 및 인접한 장비들에 매우 큰 열부하를 줄 것으로 생각되며 중요한 장비들에 대한 열로부터의 보호가 필요할 것으로 판단된다.

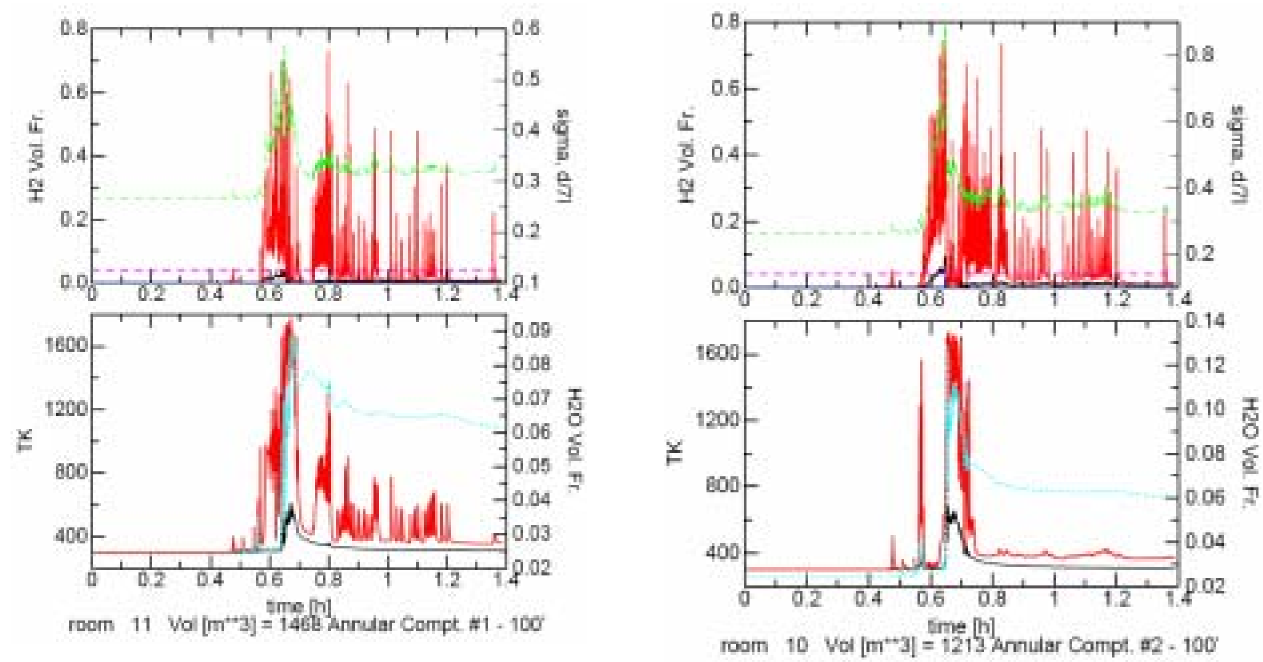
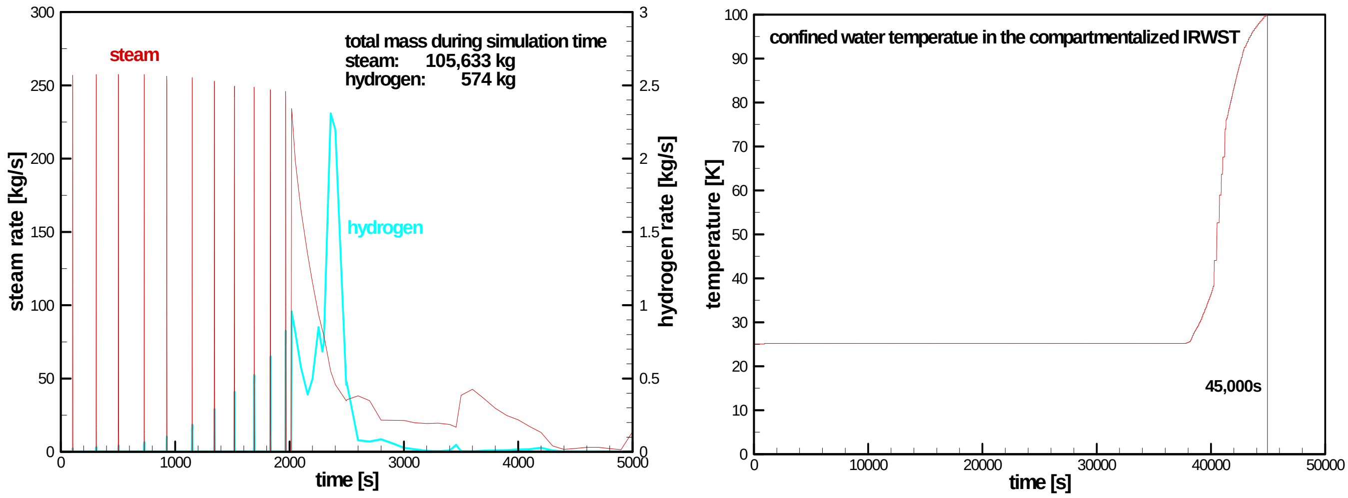


Fig. 15 The characteristics of the mixture cloud in the annular compartment when igniters are installed in the annular compartment above the IRWST.

SBO 사고시 적절한 수소 제어를 위한 두번째 개선안은 스파저로부터 방출되는 수증기의 일부분을 이용하여 수소의 농도를 낮추는 것으로 IRWST 내에 격벽(partition wall)을 두는 것이다. 두 스파저를 포함하는 120 도 간격의 격벽으로 인하여 스파저 부근의 냉각수는 급격하게 온도가 상승하여 비등점에 도달하게되고 이로 인하여 그후 방출되는 수증기는 거의 응축되지 않고 냉각수 표면을 벗어나 IRWST 의 공간으로 흘러들어간다. Fig. 14(b)는 스파저가 있는 영역의 냉각수(confined IRWST water)의 온도상승을 시간에 따라 나타낸 것으로 약 45,000 초에 비등점에 도달한다. MAAP 계산 결과로부터 얻은 45,000 초부터 50,000 초까지 방출된 수증기와 수소의 질량은 각각 105 톤, 574kg 이다.(Fig. 16(a)) 이 소스(수증기 및 수소) 자료를 이용하여 5,000 초 동안 GASFLOW 로 계산을 수행하였다. Fig. 17 은 2,400 초 시점에서 격납건물 내의 수

증기와 수소의 분포를 보여주는 것으로 많은 양의 수증기가 IRWST 환기구를 통하여 격납건물로 방출된 것을 볼 수 있다. 이로 인하여 수소 농도는 많이 낮아졌으며 10% 농도의 수소 구름도 환형격실의 부분적으로 퍼져있는 것으로 나타났다. Fig. 18(a)는 IRWST 내부와 외부의 시간에 따른 압력변화로, 많은 수증기의 방출로 인하여 압력이 약 2 기압까지 상승하였다. Fig 18(b)는 IRWST 환기구에서 기체속도를 나타내며 음의 값은 IRWST 내부에서 스파저로부터의 수증기 방출이 멈춘 시간에 IRWST 내부에 있던 수증기가 응축되면서 압력이 감소하여 IRWST 위의 환형격실로부터 공기가 유입되는 것을 의미한다. IRWST 내에 설치된 수소점화기 위치에서 혼합기체의 농도를 보면 (fig. 19(a)) 수소가 가연 농도에 이르기 전에 스파저로부터 방출된 수증기에 의해 대부분의 산소가 희석되어 수증기와 함께 IRWST 밖으로 밀려나간 것을 알 수 있다. 스파저로부터 수소 방출이 최고에 달하는 2,400 초 부근에서 최대의 수소 농도는 30%에 달하고 그후로 수증기에 의해 희석되어 연소 한계점보다 낮은 농도을 유지하였다. IRWST 격실 내 혼합기체는 시종 높은 수증기의 농도로 인하여 비가연 상태를 유지한다. Fig. 20 과 21 은 환형격실에서 혼합기체의 시간에 따른 성분별 농도 변화와 화염가속 지수등을 보여주고 있다. 환형격실은 IRWST 격실 위에서부터 114 피트까지, 114 피트에서 136.5 피트까지 그리고 136.5 피트에서 156 피트까지 세층으로 나누고 각 층별로 증기발생기를 기준으로 2 개의 격실로 나누어 총 6 개의 격실로 GOTHIC 에서 모델링하였으며 GASFLOW 해석에서도 이 격실 자료를 사용하였다. Fig. 20 은 100-114 피트 사이의 격실로 시간별 최대 수소농도의 최대값은 약 20% 정도이고 평균 수소농도는 최고 약 10%에 이르나 대부분의 시간동안 5% 대를 유지하고 있다. 평균 수증기 농도는 최고 60%까지 오르다가 낮아져서 약 30%에서 머무르는 것으로 나타났다. Fig. 20, 21 을 보면 수증기의 영향으로 화염가속지수가 1 보다 낮은 값을 유지하고 있으므로 수소연소 발생시 화염의 가속가능성은 없는 것으로 나타난다. Fig. 22 는 RDT 격실과 IRWST 전체 격실에 대한 것으로 두 격실 모두 화염가속지수인 sigma 가 1 보나 낮은 값을 유지하고 있다. 특히 IRWST 격실 내부는 높은 수증기 농도로 인하여 수소 연소 가능성이 매우 희박하며 해석 후반부에서 방출하는 수증기에 의해 IRWST 내부의 수소를 희석 및 밀어내는 작용을 한다.



(a) (b)

Fig. 16 (a) Source of SBO22 in the compartmentalized IRWST, (b) Water temperature in the confined IRWST.

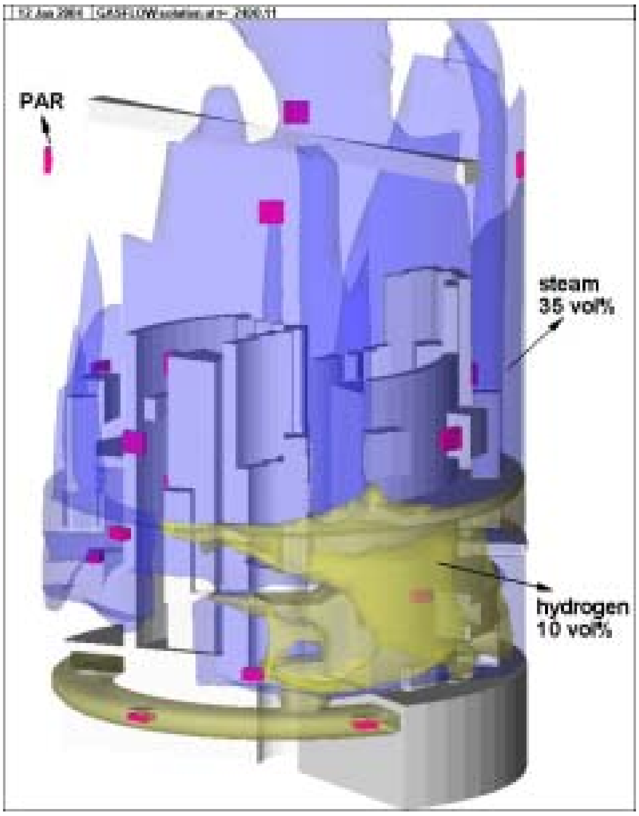
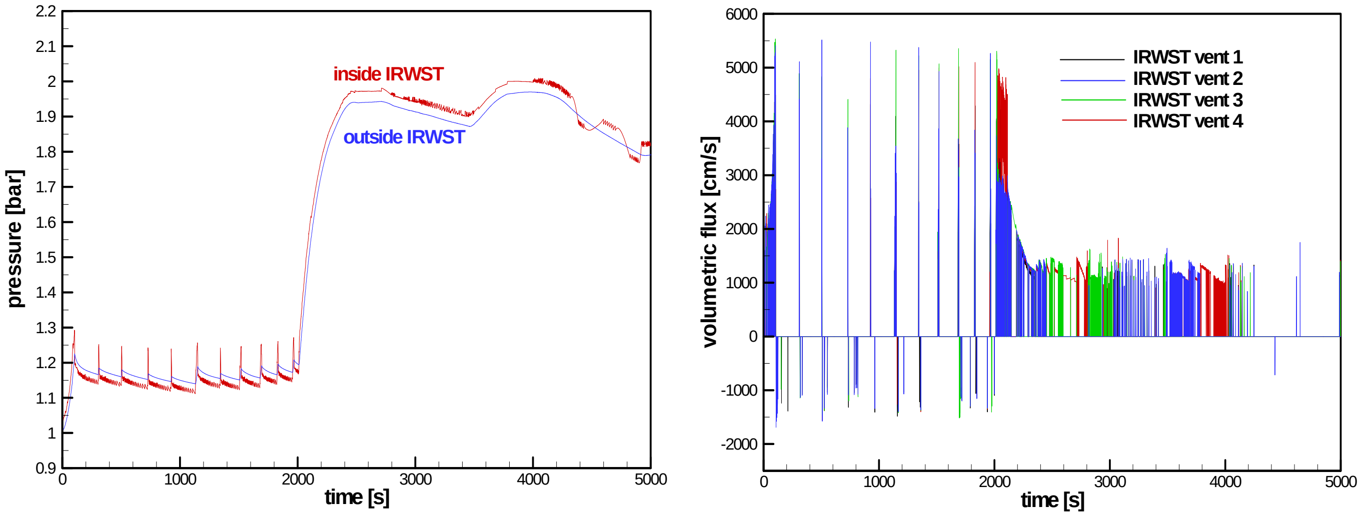
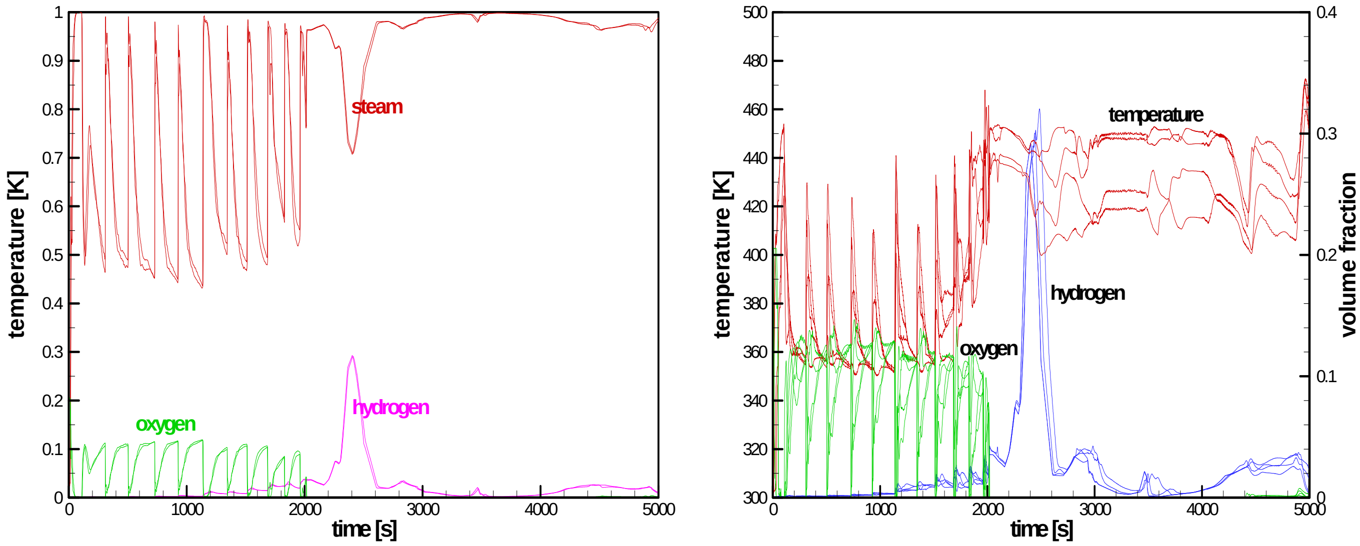


Fig. 17 GASFLOW results at t=2400s for the SBO accident, calculated hydrogen distribution in the APR1400 where the IRWST is compartmentalized.



(a) (b)

Fig. 18 GASFLOW results for the SBO accident in the APR1400 with the confined IRWST, (a) pressure-time histories inside and outside IRWST, (b) volumetric fluxes at the four vent holes.



(a) (b)

Fig. 19 GASFLOW results for the SBO accident in the APR1400 with the confined IRWST, (a) Species concentrations at the igniter locations(I9, I10) inside the IRWST, (b) Exhaust temperature and hydrogen-oxygen concentrations at the inlet of PARs inside the IRWST.

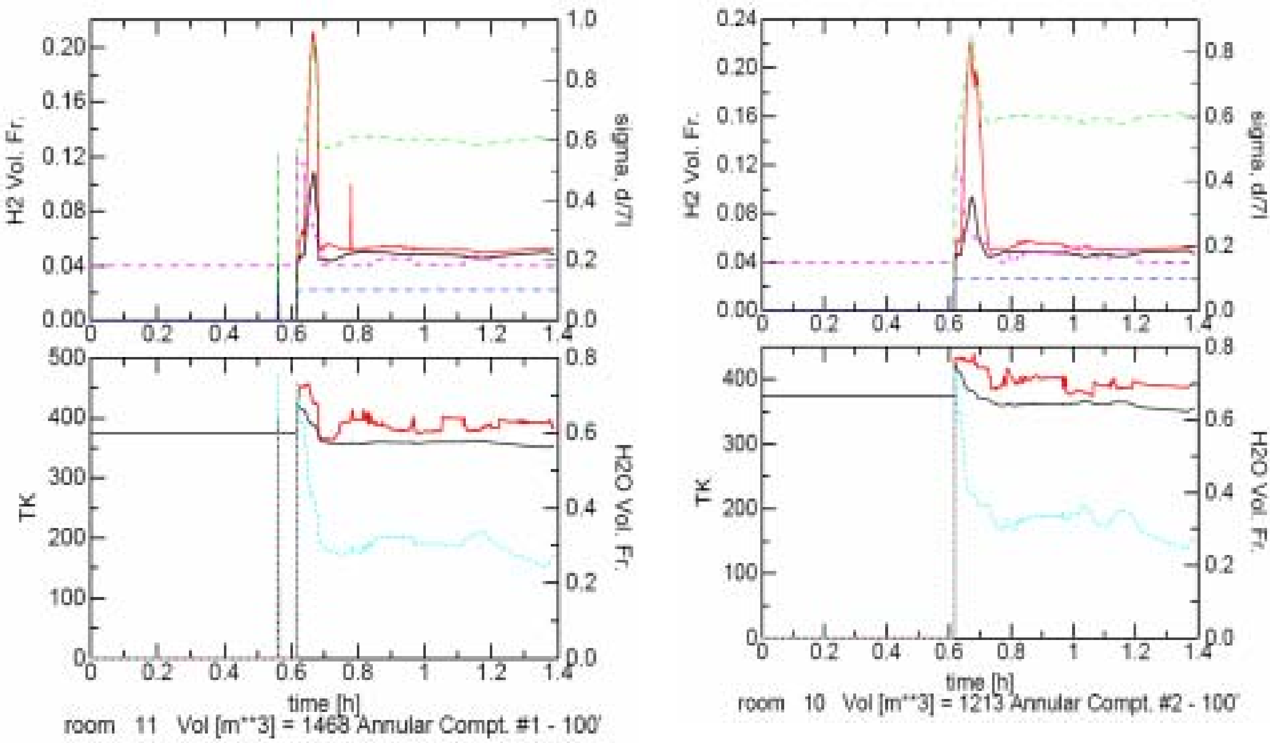


Fig. 20 The characteristics of the mixture cloud in the annular compartment when the IRWST is compartmentalized.

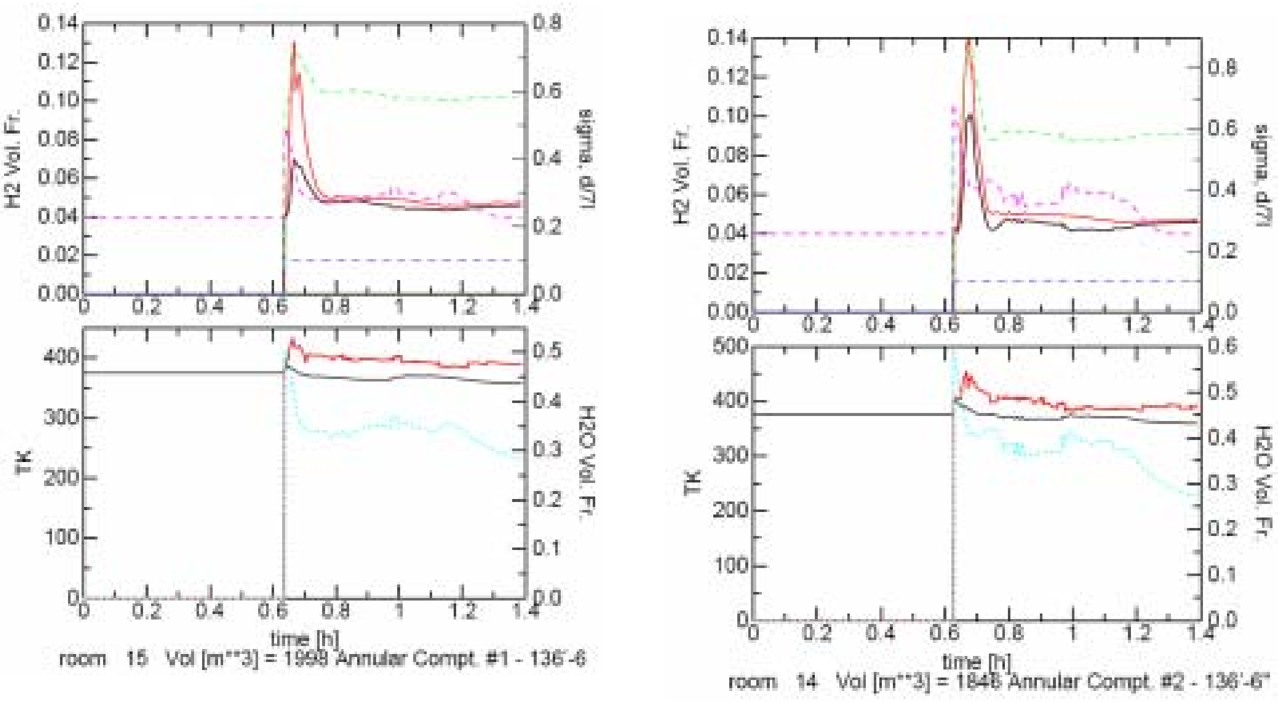


Fig. 21 The characteristics of the mixture cloud in the annular compartment when the IRWST is compartmentalized.

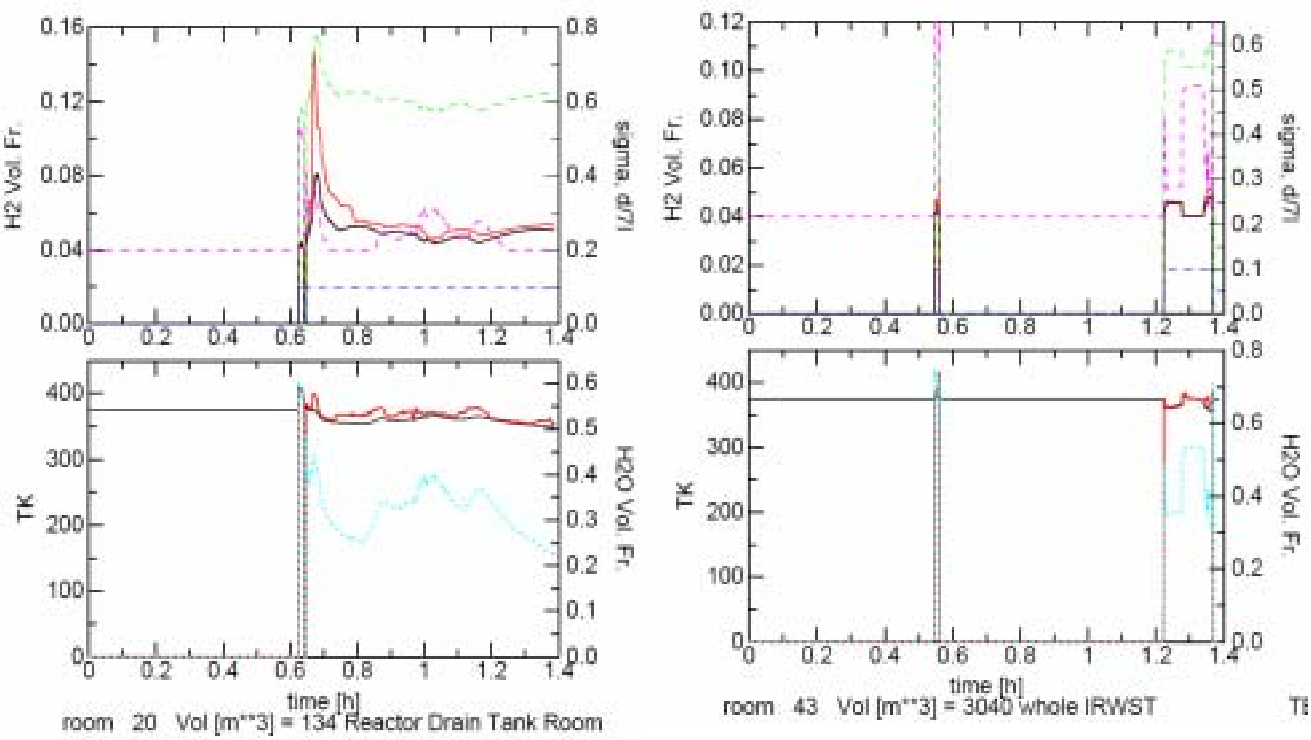


Fig. 22 The characteristics of the mixture cloud in the annular compartment and RDT room when the IRWST is compartmentalized.

3. 결론 및 향후 연구 과제

Beyond DBA(Design Base Accident) 중에 하나인 전원상실사고(SBO)의 경우 수소와 수증기의 거동을 3 차원 해석 코드인 GASFLOW 를 이용하여 해석하였다. 본 연구에서 해석을 수행한 전원상실사고 시에는 원자로 냉각수, 수증기 및 수소등은 스파저를 통하여 IRWST 내로 방출된다. 이 소스 데이터는 MAAP 으로부터 얻어 사용하였다. 본 연구의 대상 원전인 APR1400 에 설계된 26 개의 PAR 와 10 개의 수소점화기를 모델링하여 해석하였으며, SBO 사고에 대한 이 수소제어기구의 유효성을 평가하였다. IRWST 내 연료재장전수의 과냉각도를 고려하여 수소만 방출된다고 가정하고 GASFLOW 로 해석한 결과 IRWST, 환형격실 및 RDT 격실 등에서 수소연소 발생시 화염이 가속되어 초음속 연소로 천이될 가능성을 나타내는 sigma, d/7l 값이 1 보다 높은 영역이 수 분간 존재하는 것으로 나타났다. APR1400 의 기본 설계에 반영된 수소제어 기구는 SBO 사고에 대하여 수소를 적절히 제어하지 못하는 것으로 판단되며, 두 가지 방법으로 APR1400 의 설계를 수정하여 GASFLOW 해석을 통하여 그 유효성을 평가하였다. 첫번째 방법은 환형격실에 수소점화기를 설치하고 IRWST 의 환기구를 통하여 나오는 수소를 바로 연소시키는 것이다. IRWST 에서 방출되는 수소를 직접 연소시킴으로써 환형격실 내의 평균 수소농도를 4% 이하로 낮추어 환형격실 전체적인 연소는 발생할 수 없는 상태임을 GASFLOW 해석 결과 알 수 있었으며, IRWST 환기구에 정지된 수소화염의 높은 온도로 인하여 환형격실의 콘크리트 구조물 및 인접한 장비들에 매우 큰 열부하를 줄 것으로 생각되며 중요한 장비들에 대한 열로부터의 보호가 필요할 것으로 판단된다. 그리고 두번째 방법은 IRWST 격실에서 스파저가 설치된 섹터 부근에 수직벽을 설치하여 IRWST 내 냉각수의 온도 상승을 유도하는 것이다. 본 연구에서는 90 도 간격으로 설치된 두 스파저를 포함하도록 120 도 간격을 갖는 두 개의 수직벽을 두고 IRWST 연료재장전수의 열흐름을 차단함으로써 빨리 비등점에 도달하여 스파저로 방출되는 수증기의 일부가 IRWST 내에서 응축되지 않고 대기로 방출되도록 하였다. MAAP 의 소스자료를 이용하여 lumped 로 계산한 결과 연료재장전수는 사고 시작후 45,000 초에서 비등점에 도달하였으며 응축되지 않고 방출되는 수증기량은 약 105 톤 정도로 나타났다. 이 수증기와 수소를 가지고 GASFLOW 해석을 수행한 결과 IRWST 및 환형격실에서 수증기가 수소의 농도를 희석시켰으며 모든 격실에서 전 해석시간동안 화염가속지수가 1 보다 낮게 나타났으며, 특히 IRWST 격실 내부는 높은 수증기 농도로 인하여 수소 연소 가능성이 매우 희박하며 해석 후반부에서 방출하는 수증기에 의해 IRWST 내부의 수소를 희석 및 밀어내는 작용을 하였다. IRWST 내 연료재장전수의 열흐름을 제한하는 개념은 SBO 사고시 응축되지 않은 수증기의 방출을 유도함으로써 APR1400 격납건물의 수소제어에 큰 도움을 주는 것으로 나타났으며, 이 개념을 다른 사고 시나리오에 적용함으로써 APR1400 에 대한 건전성을 평가할 것이다.

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
[6] Jongtae Kim, et al., "3-Dimensional Behavior of the Hydrogen and Steam from a Hypothetical Loss of Feed Water Accident in the APR1400 Containment," 2003 한국원자력학회 추계학술대회, 용평, 2003