

# APR1400의 급수완전상실사고 시 격납건물 내에서 수소와 수증기의 3차원 거동에 대한 수치해석

김 종 태<sup>\*1</sup>, 홍 성 완<sup>2</sup>, 김 상 백<sup>2</sup>, 김 희 동<sup>2</sup>

## NUMERICAL ANALYSIS OF THE HYDROGEN-STEAM BEHAVIOR IN THE APR1400 CONTAINMENT DURING A HYPOTHETICAL TOTAL LOSS OF FEED WATER ACCIDENT

Jongtae Kim, Seong-Wan Hong, Sang-Baik Kim, Hee-Dong Kim

*During a hypothetical severe accident in a nuclear power plant (NPP), hydrogen is generated by the active reaction of fuel-cladding and steam in the reactor pressure vessel and released with steam into the containment. In order to mitigate hydrogen hazards possibly occurred in the NPP containment, hydrogen mitigation system (HMS) is usually adopted. The design of the next generation NPP (APR1400) designed in Korea specifies 26 passive autocatalytic recombiners and 10 igniters installed in the containment for the hydrogen mitigation. In this study, the analysis of the hydrogen and steam behavior during a total loss of feed water (TLOFW) accident in the APR1400 containment has been conducted by using the CFD code GASFLOW. During the accident, a huge amount of hot water, steam, and hydrogen is released in the in-containment refueling water storage tank (IRWST). The current design of the APR1400 includes flap-type dampers at the IRWST vents which are operated depending on the pressure difference between inside and outside of the IRWST. It was found that the flaps strongly affects the flow structure of the steam and hydrogen in the containment. The possibilities of a flame acceleration and transition from deflagration to detonation (DDT) were evaluated by using Sigma-Lambda criteria. Numerical results indicate the DDT possibility could be heavily reduced in the IRWST compartment when the flaps are installed.*

**Key Words:** 수소제어기구(Hydrogen Mitigation System), 화염가속(Flame Acceleration), 아음속연소에서 초음속연소로의 천이(DDT), 전산유체역학(CFD)

### 1. 서 론

설계기준사고뿐만 아니라 원자로 노심이 용융되는 가상적인 중대사고에 대해서도 원자력발전소의 건전성을 유지하기 위하여 많은 노력이 이루어지고 있다. 사고로 인하여 원자로 노심의 열을 제거하지 못하게 되면 핵연료피복체로 사용되는 지르칼로이드와 같은 금속이 고온상태에서 수증기와 산화반응을 하여 수소가 만들어진다. 이와 같이 사고 시에 원자로 내에서 생성되어 격납건물로 방출되는 수소의 폭발 위험으로부

터 격납건물을 보호하기 위하여 피동촉매식 수소재결합기(passive autocatalytic recombiner, PAR) 혹은 수소점화기 등을 설치하여 수소의 농도를 제어한다. 특히 노심용융사고 시에는 짧은 시간에 많은 양의 수소가 생성되어 격납건물로 방출되기 때문에 수소제어기구(hydrogen mitigation system, HMS)가 매우 중요하게 인식되고 있다. 한국에서 설계된 1400MW의 발전용량을 가진 원자력 발전소인 APR1400은 설계기준사고 및 중대사고 시 발생하는 수소의 제어 혹은 안정적인 제거를 위하여 26개의 PAR와 10개의 백열식 점화기를 설계에 반영하고 있다[1]. 격납건물로 방출된 수소에 의도적 혹은 자발적으로 연소가 일어나는 경우, 화염의 가속으로 인하여 격납건물에 매우 큰 충격력을 줄 수 있는 급격한 수소연소(수소폭발, detonation)가 일어날 수 있다. 격납건물 내에서 이와 같은 수소연소를 방지하기 위하여 혹은 이런 현상이 발생할 수 없

접수일: 2005년 3월 8일, 심사완료일: 2005년 7월 7일.

1 정희원, 한국원자력연구소 열수력안전연구부

2 한국원자력연구소 열수력안전연구부

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

음을 보이기 위한 많은 노력이 이루어지고 있다.

격납건물과 같이 구조적으로 복잡하고 큰 공간 내에서 수 천에서 수만 초 동안 진행되는 사고현상을 수치적으로 해석하기 위해서는 많은 노력이 요구되기 때문에 오랫동안 1차원 유로로 연결된 단순화된(lumped) 몇 개의 노드를 이용해 해석하는 lumped-parameter(LP) 코드가 많이 사용되어 왔다[2,3]. LP 기법은 빠른 계산시간을 이용해 장기 사고경위의 해석이 용이하고 격납건물 전체 혹은 각 격실별로 평균된 수소의 농도를 파악하는 데는 유용하기 때문에 지금도 격납건물의 건전성 및 수소제어기구의 유효성 평가에 많이 활용되고 있다. 그러나 격납건물 내부는 배관계통처럼 유로가 1차원적으로 제한된 공간이 아니기 때문에 수치 노드 간에 연결된 유로에서 항상 유로에 평행한 유속만을 정의하는 LP 기법은 3차원적 유동구조를 파악하는 데는 한계가 있으며, 격실(노드)의 평균된 값만을 얻을 수 있기 때문에 수소제어기구의 최적 위치선정을 위한 정보를 얻을 수 없다. 최근에는 격납건물 내의 수소 거동에 대한 상세 정보를 얻기 위하여 CFD 기법을 적용하고 있다. Royl등[4]은 GASFLOW[5] 코드를 이용하여 독일 Konvoi형 원자력발전소 격납건물 내의 수증기와 수소의 거동을 분석하고 LP 코드의 결과와 비교하였다. Houkema등[6]은 상용 CFD 코드인 CFX와 LP 코드의 결과를 비교하고, 수소방출 초기에 수소의 불균일한 분포를 예측하기 위해서는 3차원 계산이 필요함을 주장하였으며, Kim등[7]은 GASFLOW 코드를 이용하여 전원상실사고 시 APR1400의 수소제어 전략을 평가하고 개선점을 제시하였다.

APR1400 원전에서 증기발생기의 급수가 완전히 상실되어 발생하는 급수완전상실(total loss of feed water, TLOFW) 사고 시에는 가압기의 안전감압밸브인 POSRV(pilot operated safety and relief valve)를 통해 격납건물내연료재장전수탱크(in-containment refueling water storage tank, IRWST)에서 수소가 방출된다. IRWST는 동심원통의 큰 격실이며 상부에 있는 네 개의 환기구를 제외하면 밀폐된 공간이므로 사고 시 방출되는 수소와 수증기의 거동이 매우 중요하다. 지금까지 APR1400의 TLOFW 사고에 대하여 LP 코드를 이용한 해석[8] 및 다차원 코드를 이용한 부분적인 3차원 해석[9]이 이루어진 바가 있다. 그러나 IRWST를 포함한 격납건물 전체의 3차원 해석은 아직 이루어지지 못하였다.

본 연구에서는 GASFLOW 코드를 이용하여 APR1400의 TLOFW 사고에 대하여 해석을 수행하고 수소-수증기의 거동을 평가하였다. APR1400의 IRWST 환기구에는 IRWST 내외의 압력차에 따라 열리고 닫히는 플랩(flap) 형태의 댐퍼(pressure relief damper)가 설치되도록 설계되어 있다. 플랩은 양방향으로 열리는 장치로서 정상 운전 시에는 닫혀있지만 연료재장전을 위하여 연료재장전수가 IRWST 밖으로 빠져나

갈 때는 부압에 의하여 플랩이 열리고 공기가 흡입된다. 반대로 사고 시에는 수증기와 수소가 IRWST 내로 들어가기 때문에 압력이 올라가게 되며 이로 인해 플랩이 열려 IRWST 내부의 수증기와 수소가 밖으로 배출된다. 플랩은 이와 같이 과도한 압력이 걸리는 것을 막기 위하여 설치된 장치이지만 사고 시 수소의 거동에 직접적으로 관여하기 때문에 수소의 제어 측면에서 중요하게 인식되어야한다. 그러나 기존의 lumped 해석이나 준 3차원 해석에서는 플랩의 영향이 정확이 모의 되지 않았다. 이것은 플랩으로 인한 수소 및 수증기의 3차원 거동을 완전히 모의하기에는 기존의 해석 방법으로는 불충분함을 의미한다. 본 연구에서는 플랩이 IRWST 내의 수증기와 수소의 거동에 미치는 영향을 평가하기 위하여 GASFLOW 코드에 플랩 모델을 도입하여 플랩이 있는 경우와 없는 경우에 대하여 수치해석을 하였다. 그리고 TLOFW 사고 시 소스 방출 장소인 IRWST와 IRWST의 환기구로 연결된 환형격실에서 수소연소 시 화염의 가속 가능성 및 수소제어기구의 유효성을 평가하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 수치 기법

APR1400 격납건물 내의 3차원 열유동을 해석하기 위하여 본 연구에는 GASFLOW[5] 코드를 사용하였다. GASFLOW 코드는 직각격자 유한체적법을 이용하여 비정상 압축성 Navier-Stokes 방정식을 이산화하며 ICED-ALE 알고리즘을 사용하여 해를 구한다.

원자력발전소 사고 시에 격납건물 내로 고온의 수증기와 수소가 방출되고 방출된 고온의 수증기는 격납건물 내의 열역학적 상태(온도와 압력 등)에 따라 응축을 하게 되며, 대류, 전도 및 복사에 의하여 격납건물 내의 장애물(콘크리트, 철, 수조의 물 등)과 열전달을 한다. 그리고 PAR나 점화기에 의하여 수소는 산소와 화학적 반응을 하며 열과 수증기를 생성한다. 본 연구에서는 수소(H<sub>2</sub>), 질소(N<sub>2</sub>) 산소(O<sub>2</sub>), 수증기(H<sub>2</sub>O), 물 액적(H<sub>2</sub>O) 등 5개 성분(화학종, species)의 화학종 수송방정식과 연속방정식, 운동량방정식, 내부에너지방정식 등을 기본방정식으로 하며, 상태방정식을 보조방정식으로 사용한다.

$$\frac{d}{dt} \int_V \Phi dV = \oint_S \Phi (\vec{b} - \vec{u}) \cdot \vec{A} dS + \int_V S_{\Phi} dV \quad (1)$$

식 (1)은 격자속도  $\vec{b}$ 로 움직이는 표면적 S(면적벡터  $\vec{A}$ )로 둘러싸인 검사체적 V에 대하여 유체속도  $\vec{u}$ 의 일반변수  $\Phi$ 를 ALE(arbitrary Lagrangian and Eulerian) 개념으로 적분한 보

존방정식이다. 물성치의 생성(source)과 소멸(sink)을 나타내는  $S_p$ 는  $\Phi$ 에 따라 다른 의미를 갖는다. 비응축(non-condensible) 가스인 수소 등의 화학종 수송방정식은 농도구배에 의한 질량확산(mass diffusion)과 화학반응에 의한 그 질량의 생성과 소멸을 포함하며, 응축 가스인 수증기는 비응축 가스의 소스에 응축과 증발의 상변화율을 더한 것이 된다. 수증기의 응축에 의하여 생성되어 산존하는(dispersed phase) 액적은 균질평형모델(HEM, homogeneous equilibrium model)을 이용하여 비압축성 연속체로 가정한다. 본 연구에서 사용된 GASFLOW 코드의 HEM은 각 검사체적 내에서 모든 화학종의 기체와 액적이 균일하게(well mixed) 분포하고 열적으로 평형상태에 있다는 가정으로 액적과 기체에 대하여 단일한 속도와 온도를 갖는다. 검사체적 내부 혹은 구조물의 벽면에서 응축된 액적의 양이 한계값보다 증가하면 필름이나 rainout 형태로 소멸(depletion)된다.

에너지보존방정식은 내부에너지를 변수로 하며, 소스항에는 전도와 복사에 의한 열전달, 화학종의 물질확산에 의한 엔탈피 수송, 화학반응에 의한 반응열(발열, 흡열), 그리고 응축과 증발의 상변화열 등을 포함한다. 내부 구조물에서의 열전달은 열전도방정식을 풀어서 모의하며 그 벽면에서의 온도는 인접한 셀로부터 전달되는 열속(대류, 응축, 증발 등)을 이용하여 구한다. 사고 시에 격납건물 내로 방출되는 수증기는 고온 상태이므로 상온의 격납건물 내 구조물 혹은 외벽과의 복사열전달을 무시할 수 없다. 일반적으로 격납건물 내 사고 시에 복사를 고려한 경우가 복사를 고려하지 않은 경우에 비하여 수증기의 응축이 많이 일어나게 되며 이로 인하여 격납건물 내 압력이 상대적으로 낮게 나타난다. 본 연구에서는 복사열전달을 모의하기 위하여 P-N 구조화법 중의 P-1 근사법을 사용하였다. 격납건물 내에서 수소연소가 발생할 수 있으며 이를 모의하기 위하여 일 단계 finite-rate 화학반응 모델을 사용하였으며, 난류유동 해석을 위하여 벽면함수를 이용한  $k-\epsilon$  모델을 이용하였다.

격납건물 내부에는 복잡한 콘크리트 구조물과 장비들이 설치되어 있으며, 이런 구조물에 의하여 격납건물은 여러 개의 작은 격실(compartment)로 나뉘어 진다. 이런 격실에서는 수소연소가 발생하면 벽면과 화염 자체에서 발생하는 난류와 구조물에 의해 반사되는 연소 압력과 등의 영향으로 화염이 가속(flame acceleration, FA)되고 결국 초음속연소(detonation)로 천이(DDT, deflagration to detonation transition)된다. 이와 같은 화염의 가속과 DDT를 수치적으로 직접 해석하기 위해서는 매우 작은 시간적, 공간적 스케일이 필요하기 때문에 격납건물과 같은 대형 구조물에서는 많은 계산량을 요구한다. 본 연구에서는  $\sigma-\lambda$  ( $\sigma-\lambda$ )[10] 두 파라미터를 이용하여 격실에 형성된 가연 혼합기체의 특성을 평가하는 방법을 사용

한다.

화염가속은 기체의 성분비, 난류강도, 구조물의 길이 등에 영향을 받으며, 이 화염가속 가능성은 혼합기체의 연소팽창률인  $\sigma$  값으로 평가한다.

$$\sigma_{dex} = \frac{\sigma(\overline{x_{H_2}}, \overline{x_{H_2O}}, \overline{x_{O_2}}, T)}{\sigma_{critical}(\overline{x_{H_2}}, \overline{x_{O_2}}, T)} \quad (2)$$

식 (2)는 실험에서 얻어진  $\sigma_{critical}$ 을 이용하여  $\sigma_{index}$ 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  $D/7\lambda$ [11]를 이용한다. D는 혼합기체의 특성길이이고,  $\lambda$ 는 초음속연소의 cell size로서 기체의 구성비, 압력, 온도 등의 함수이다. DDT 지수 혹은  $D/7\lambda$  값이 1보다 크면 DDT가 일어날 가능성이 있음을 나타낸다.  $\sigma-\lambda$  파라미터를 이용한 수소화염의 가속과 DDT 가능성의 평가는 수소혼합기체를 포함하는 격실의 기학적 구조를 적절히 반영하지 못하기 때문에 화염의 가속을 수치적으로 직접 모사하는 방법에 비하여 보수적인 결과를 얻을 수 있다.

본 연구와 같이 비정상상태의 장기(long-term) 사고 해석은 많은 컴퓨팅 자원을 필요로 한다. 인텔의 펜티엄IV 2기가 리눅스 PC를 이용하여 10000초의 APR1400 사고경위를 해석하는데 2000CPU시간이 소요되었다. 본 연구에서는 계산 시간을 줄이기 위하여 코드를 KISTI 소재 NEC-SX6 벡터형 슈퍼컴에 맞게 벡터화를 하여 계산을 수행하였다.

## 2.2 격납건물과 방출소스 모델링

APR1400 격납건물은 약 94,000m<sup>3</sup>의 자유체적(free volume)을 갖고 원자로 공동 바닥에서 격납건물 돔 정점까지의 높이는 79.4m이고 격납건물외벽의 내경은 22.86m(75ft)인 원통 모양이므로 본 연구에서는 실린더 좌표계( $r-\theta-z$ )를 사용하였다. 반경(R) 방향으로 19개의 격자점을 사용하였고, 원주( $\theta$ ) 방향의 격자는 6°의 균일간격으로 총 61개를 사용하였으며 높이(z) 방향의 격자는 IRWST 내의 유동을 좀 더 정확히 예측하고 환형격실(annular compartment)의 구조적 복잡성을 고려하여 작업데크(operating deck) 하부가 상부에 비해 두 배의 밀집도를 갖도록 하여 53개의 격자점을 생성하였다. 생성된 총 격자수는 61,427개이고 GASFLOW 해석에 사용된 셀(control volume)은 66,960 개다.

Fig. 1과 2는 격납건물의 형상을 모델링하여 얻은 표면 격자를 보여준다. APR1400 격납건물 전체의 구조를 파악할 수 있는 Fig. 1과 2에는 주요 격실과 장비들이 나타나 있다. 격납

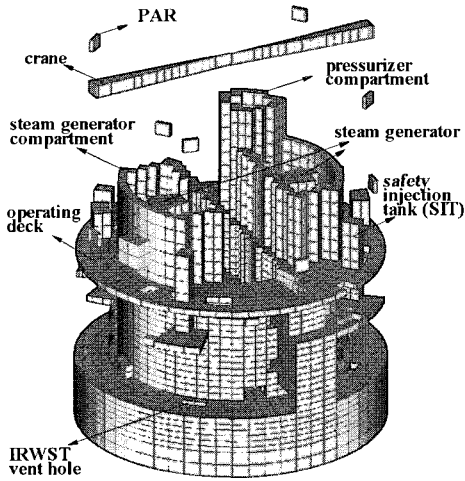


Fig. 1 Perspective view of the surface mesh generated for the APR1400 NPP containment

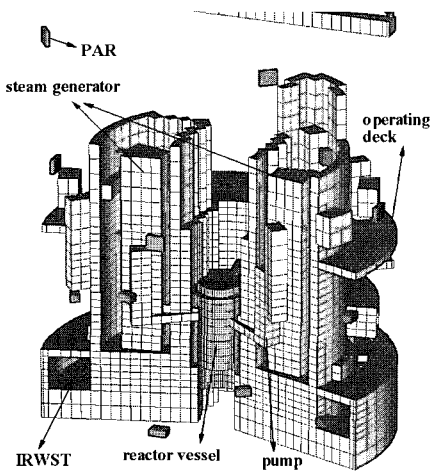


Fig. 2 Inside of the modeled APR1400 NPP containment

건물 중심에는 원자로가 위치하며, 그림의 오른쪽과 왼쪽으로 두 개의 증기발생기 격실이 위치한다. 증기발생기 격실에는 증기발생기와 2개의 펌프가 있으며 이들은 냉각제 관으로 원자로와 연결되어 있다. 하부에 위치한 IRWST는 연료재장전수를 저장하는 탱크로 동심원통 모양이며 천정에는 환기구가 있다. IRWST 위쪽의 공간을 환형격실이라 부르며 이 환형격실 위로 작업데크가 있다. 이것은 격납건물 외부와 비슷한 높이(altitude)를 갖는 곳이며 원자력발전소 작업자의 주요 작업이 이루어지는 곳이다. 이 작업데크는 원통형의 격납건물 외벽과 1피트의 간극을 갖도록 설계되어 있으며 이 환형의 환기간극(annular vent gap)은 환형격실과 작업 데크 상부 공간을

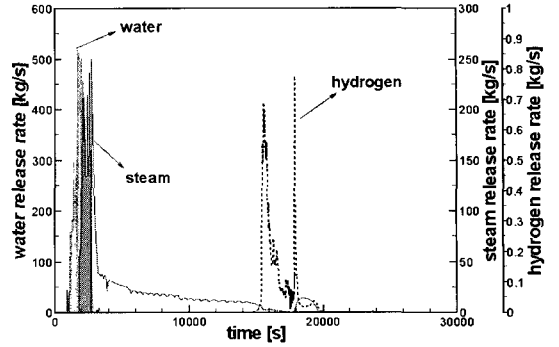


Fig. 3 Source mass rates released during the TLOFW accident

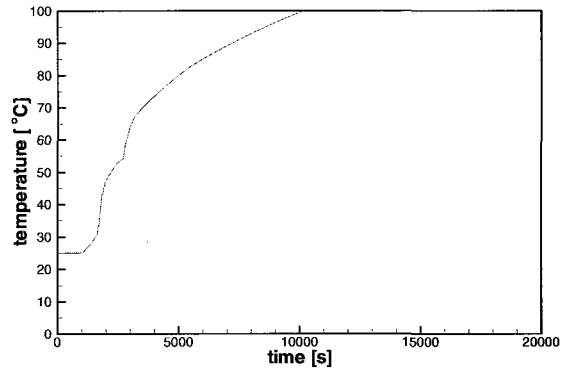


Fig. 4 Temperature of IRWST water calculated using masses and enthalpies of the released steam and water

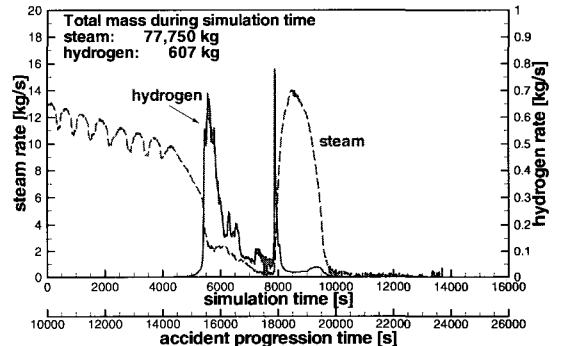


Fig. 5 Steam and hydrogen source used for the GASFLOW simulation

연결하는 유로 역할을 한다. PAR는 길이가 1m 이상인 4각 채널모양이며 벽면에서 약간의 거리를 두고 설치가 된다. APR1400 격납건물 내에는 26개의 PAR가 설치되며 Fig. 1과 2에서는 모델링된 PAR를 볼 수 있다.

본 연구의 대상인 APR1400의 급수완전상실사고는 증기발생기의 급수가 완전히 상실되어 원자로에서 발생된 열을 제

거하지 못하여 일어나는 사고이다. 특히 GASFLOW 코드를 이용하여 격납건물 내 수소의 거동을 해석하기 위하여 선정된 이 사고는 사고 시작 30분 후에 운전원(operator)에 의하여 가압기의 안전감압밸브(POSRV)가 완전히 개방되며 원자로의 열제거를 위한 더 이상의 행위가 이루어지지 않아 노심용융으로 이어지는 가상적인 사고이다[1].

급수완전상실 사고 시 다량의 물과 수증기 그리고 수소는 가압기의 POSRV를 통하여 IRWST 내의 스파저(sparger)로 배출된다. GASFLOW 해석에 사용되는 이 방출 소스의 질량유량은 중대사고 해석 코드인 MAAP의 계산으로부터 얻었다. Fig. 3은 MAAP 계산에서 얻어진 IRWST로 방출되는 소스를 시간에 따라 보여주고 있다. 약 2000초까지는 물과 수증기가 같이 방출되고, 그 후부터 물은 방출되지 않는다. 수소는 약 3500초 부근에서 잠시 0.01 kg/s 정도 방출되다가 15000초까지 거의 방출되는 않으며, 15000초에서 20000초 사이에 집중적으로 방출된다.

스파저는 POSRV와 연결되어 있으며 IRWST 내의 연료재장전수에 잠겨있는 일종의 노즐로서 가압기로부터 방출되는 고온 고압의 수증기를 효과적으로 응축시킬 수 있도록 설계된 장치이다. 스파저를 통하여 분출된 수증기는 주위 냉각수의 과냉각도에 따라 응축율이 달라지는데 참고문헌[12]에 의하면 연료재장전수의 온도가 90도 이하이면 거의 모든 수증기가 응축되고 90도에서 100도의 천이영역을 지나 100도의 포화온도에서는 수증기가 응축되지 않는다. 급수완전상실사고 시 스파저를 통하여 방출되는 고온의 물과 수증기는 IRWST 내의 연료재장전수 온도를 높이고, 결국 높은 온도로 인하여 스파저로부터 방출되는 수증기는 더 이상 응축되지 못하게 된다. MAAP 계산에서 얻어진 소스의 질량유량과 엔탈피를 적분하여 IRWST 내의 연료재장전수 온도를 계산한 결과 Fig. 4와 같이 사고 시작 후 10000초가 지나면서 연료재장전수의 온도가 비등점에 도달하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 사고 10000초까지는 모든 수증기가 응축되고 그 후 방출되는 수증기는 응축되지 않고 대기 중으로 방출된다고 가정하고, Fig. 5와 같이 10000초부터 방출되는 수증기와 수소를 이용하여 수치해석을 수행하였으며, 이 기간 동안 격납건물로 방출된 수증기와 수소의 총량은 각각 77750kg, 607kg이다.

### 2.3 해석 결과

#### 2.3.1 플랩이 없는 경우

현재의 APRI400 설계는 IRWST의 환기구에 IRWST 내의 부의 차압이 3400Pa(0.5psi) 이상이면 열리는 플랩 형태의 댐퍼가 설치되어 있다. 플랩이 격납건물 전체에서 수증기와 수소의 거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 4개의 IRWST

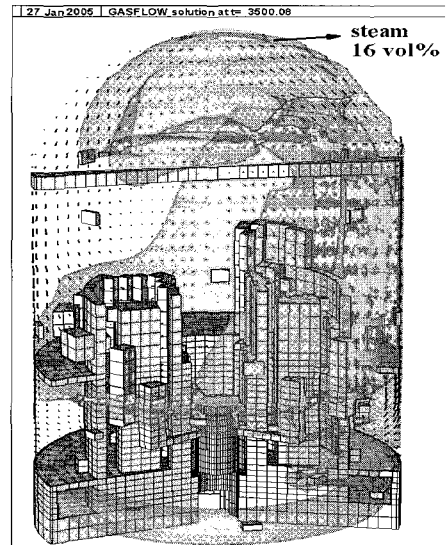


Fig. 6 Steam distribution at t=3500s in the containment without flaps at the IRWST vents

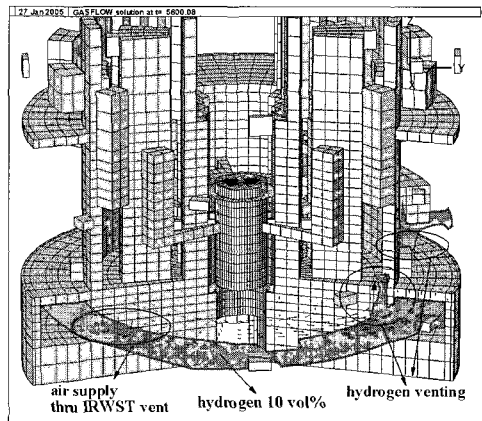


Fig. 7 Hydrogen distribution at t=5600s in the containment without flaps at the IRWST vents

환기구가 완전히 개방된 상태에서 GASFLOW 코드를 이용하여 해석을 수행하였다.

Fig. 6, 7은 수증기, 산소 및 수소의 3차원 분포를 보여주는 그림으로 플랩이 없는 경우의 전체적인 유동 구조를 파악할 수 있다. Fig. 6에서는 3500초에서 격납건물 내 수증기의 분포와 속도 분포를 보여준다. 수증기의 25 vol% iso-surface를 보면 그림의 오른쪽에 위치한 환기구에서 방출되는 수증기의 플룸(plume)을 볼 수 있다. 중심 단면에서의 속도를 보면 오른쪽에 위치한 환기구를 통해 배출된 수증기가 환형 격실을 거쳐 작업데크와 격납건물 외벽 사이의 환형 환기간극을 통하여 격납건물 돔으로 가고 격납건물 왼쪽에서는 하향 기류

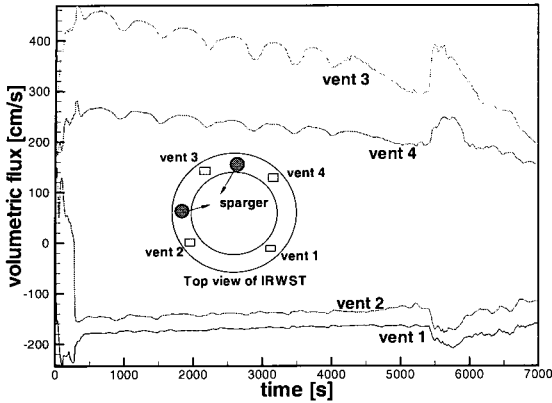


Fig. 8 Volumetric fluxes at the four vent holes in the case without flaps installed

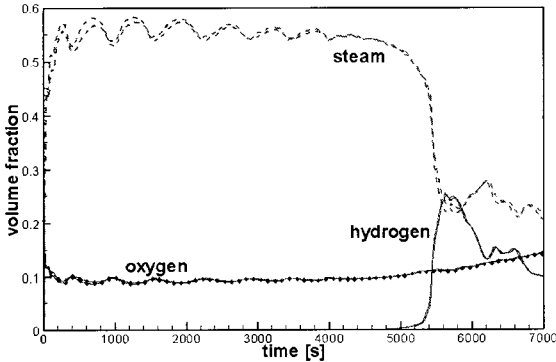


Fig. 9 Species concentrations at the igniter locations inside the IRWST in the case without flaps installed

가 만들어져 환형격실을 지나 IRWST의 환기구로 유입되는 큰 순환유동(recirculation flow)을 만들어 낸다.

Fig. 7은 수소 방출의 첫 번째 피크를 지난 5600초에서 수소의 분포를 보여준다. 오른쪽에 있는 IRWST 환기구에서 8 vol% 이상의 수소 플룸이 형성되어 있다. 환기구 바로 위쪽의 수평 단면에서 속도장을 보면 공기가 왼쪽 환기구를 통하여 IRWST 내부로 유입되는 것을 알 수 있다. IRWST의 환기구에 플랩 형태의 댐퍼가 설치되어 있지 않아서 IRWST와 그 위쪽의 환형격실 사이에 유로가 항상 만들어져 있는 경우, 4개의 IRWST 환기구 중 일부에서는 기체가 방출되고 이것은 환형격실을 지나 격납건물 돔 영역까지 올라가서 반대편으로 하강하여 IRWST의 반대편 환기구로 유입되는 큰 순환유동을 만들어 내는 이유는 IRWST, 환형격실, 환형 환기간극으로 이어지는 격납건물의 기하학적 구조와 더불어 IRWST 환기구의 위치와 스파저의 위치 등에 크게 영향을 받은 것으로 사료된다.

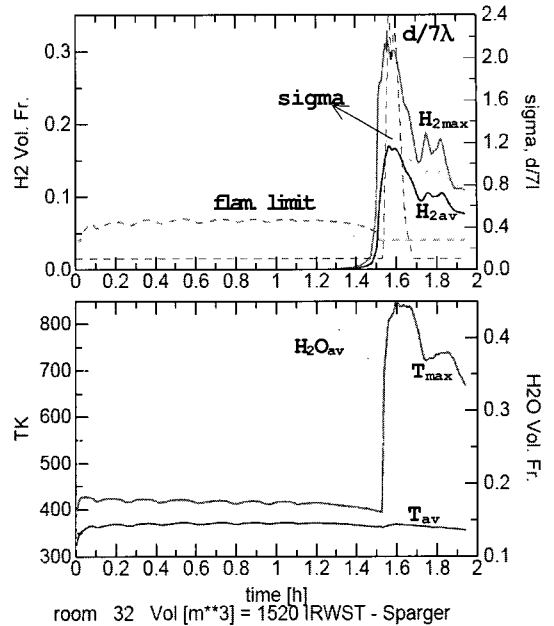


Fig. 10 The characteristics of the hydrogen mixture cloud in the IRWST compartment in the case without flaps installed

Fig. 8은 IRWST 환기구에서의 유속을 시간에 따라 보여주는 것으로, 그림의 환기구 1, 2에서는 IRWST 내부로 흐르는 유동이, 그리고 환기구 3, 4에서는 IRWST 외부로 흐르는 유동이 있음을 알 수 있다. 환기구 2에서는 초기 약 300초까지는 IRWST 내부의 기체가 밖으로 유출되지만, 그 후에는 IRWST 안으로 유입된다. 환기구 3은 두 스파저의 사이에 위치하기 때문에 다른 환기구에 비하여 상대적으로 많은 양의 기체가 흘러나가는 것으로 보인다. 환기구 2는 환기구 4와 마찬가지로 스파저에 인접해 있지만 초기 약 300초를 제외하면 기체가 IRWST로 유입되는 입구역할을 하는데 이것은 환기구 3에서의 큰 유량과 무관하지 않은 것으로 생각된다. IRWST 환기구의 개수와 위치 등 격납건물의 기하학적 특성에 의하여 격납건물 전체적인 재순환유동이 형성되며, 이로 인하여 IRWST 격실로 공기가 계속적으로 유입된다.

Fig. 9는 IRWST 내부에 설치된 두 개의 점화기 위치에서 수증기, 산소 그리고 수소의 농도변화를 시간에 따라 보여준다. 스파저를 통하여 IRWST 내로 수증기가 방출되기 시작함과 동시에 산소의 농도는 10 vol% 대로 떨어지고 수증기의 농도 50 vol% 이상을 유지하고 있다. 수증기가 5000초까지 다량으로 방출되고 있지만 산소의 농도가 10 vol% 대를 유지하고 있는 것은 격납건물 내의 재순환유동에 의하여 IRWST 내로 공기가 유입되기 때문이다. 5000초 이후 수소가 방출되면서 수증기의 농도는 줄어드는 반면 산소의 농도는 약간 상승

하는 것으로 나타났다. 수소의 방출로 IRWST 격실 내부는 수증기농도가 낮아져 혼합기체가 가연(flammable) 영역에 있음을 알 수 있다. 특히 5500초 이후부터는 수소의 농도가 10 vol% 이상이기 때문에 수소연소 시 화염의 가속 가능성도 배제할 수 없다.

Fig. 10의 IRWST 격실에 대한 수소와 수증기의 농도변화를 보면 스파저가 있는 IRWST 격실에서는 평균 수소농도가 15 vol% 이상 되는 시간대가 존재하며 그 영역에서는 화염가속지수 및 DDT지수가 1보다 크게 나타난다. 이것은 수소연소가 발생하는 경우 화염의 가속 및 초음속 연소로 천이될 가능성이 있는 것을 의미한다. 현재 GASFLOW 코드는 화염의 가속 및 DDT를 직접 모의할 수 없고 계산된 수소농도로부터 얻어지는 화염가속지수와 DDT지수를 이용하여 화염의 특성을 평가하기 때문에 IRWST와 같은 기하학적 형상에서 기계역학적(mechanistic)으로 DDT 발생을 단정할 수 없지만, DDT 지수가 DDT 실험으로부터 얻어진 자료에 기초하기 때문에 DDT 가능성을 완전히 배제할 수는 없다.

### 2.3.2 플랩이 있는 경우

IRWST 환기구에 플랩 형태의 댐퍼가 설치된 경우 수증기와 수소의 거동을 분석하였다. Fig. 11은 플랩이 있는 경우 GASFLOW로 계산한 압력 변화를 보여준다. IRWST 안쪽의 압력은 매우 짧은 주기를 갖는 진동을 하면서 시간에 따라 서서히 증가하다가 감소하지만, IRWST 외부 압력은 그런 진동 없이 내부 압력과 비슷한 경향으로 변한다. IRWST 내외부의 압력은 설계값인 0.5psi의 차이를 보이며 변화하고 있다. 약 2.5초 후에 최초로 플랩이 열리며 그 후로 열림과 닫힘을 반복하면서 변화한다. IRWST 내부의 압력변화에 짧은 주기를 갖는 진동이 있는 이유는 IRWST 내부에서 방출되는 소스의 압축성 효과와 플랩의 개폐작동 때문이다. 만약 소스가 비압축성 유체라면 방출되는 소스의 양만큼 IRWST의 환기구를 통하여 배출되어야하기 때문에 이런 형태의 진동은 만들어질 수 없으며 연속적으로 환기구를 통하여 배기가 이루어질 것이다. 즉 방출 소스의 압축성효과와 플랩의 개폐 작동에 의하여 IRWST 내부 압력에 진동이 다음과 같이 발생한다. IRWST 내부의 압력이 외부의 압력보다 0.5psi만큼 높아 플랩이 열리면서 IRWST 내부의 기체가 배출되고 동시에 압력이 내려가면서 차압이 0.5psi보다 낮아져 플랩이 닫히는 것을 반복하게 된다.

시간에 따른 거시적인 압력 변화를 보면 소스의 방출 특성을 따르고 있다는 것을 알 수 있는데, 5500초까지 수증기만 방출되는 기간 동안 격납건물 내 압력은 포물선 형태로 압력 증가율이 둔화되어 가다가 수소가 방출되면서(4500초) 잠시 압력이 상승하지만 수소 방출의 최대점을 지나면서 방출된

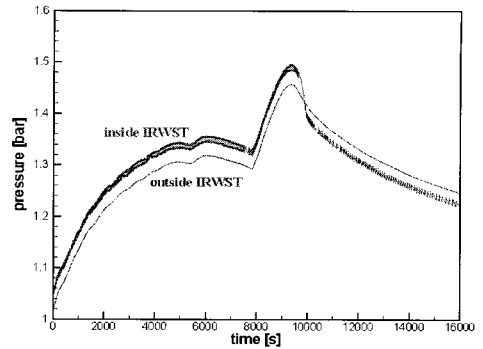


Fig. 11 Pressure-time histories inside and outside the IRWST in the case without flaps installed

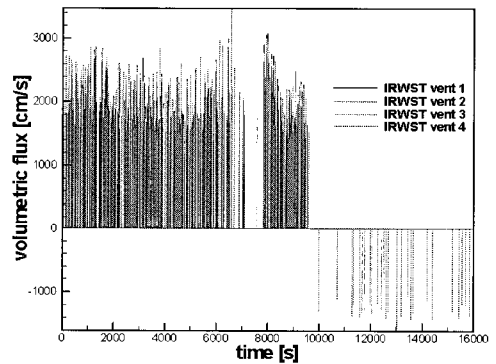


Fig. 12 Volumetric fluxes at the four vent holes in the case with flaps installed

수증기의 응축에 의하여 압력이 천천히 감소한다. 8000초경에 다시 수증기 방출이 증가하면서 압력이 증가하지만 수증기 방출이 줄어들면서 압력도 빠르게 감소한다. 특히 10000초 이후부터 소스의 방출이 거의 사라지면서 IRWST 내외부의 압력이 반전되어 밖의 압력이 안쪽보다 더 높게 나타나는데, 이것은 IRWST 안쪽이 수증기의 농도가 높은 상태에서 수증기가 응축되기 때문이다.

Fig. 12는 IRWST의 환기구에서의 유량을 시간에 따라 보여주는 것으로 양(+)의 값은 환기구를 통하여 IRWST 내부의 기체가 방출되는 것을 의미하고 음(-)의 값은 IRWST 안쪽으로 기체가 유입되는 것을 나타낸다. IRWST 환기구에 플랩이 없는 경우와 있는 경우를 비교하면, 있는 경우에는 네 개의 모든 환기구를 통하여 소스가 IRWST 밖으로 방출되는 유동 특성을 보여준다는 것이다. 즉 스파저를 통하여 소스가 방출되는 동안에는 IRWST 안쪽으로 공기의 유입이 이루어지지 않는 것을 나타낸다. 또 다른 점은 플랩의 반복적인 개폐로 인하여 환기구에서의 유속이 피크 파형처럼 불연속적인 패턴

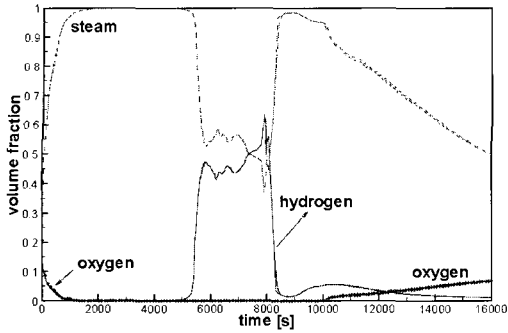


Fig. 13 Species concentrations at the igniter locations inside the IRWST in the case with flaps installed

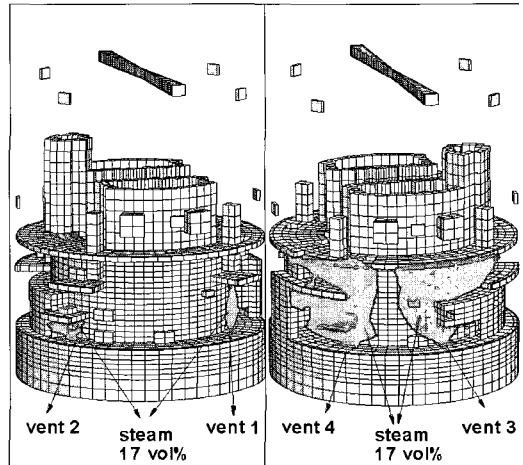


Fig. 14 Steam distribution at t=1900s in the containment with flaps at the IRWST vent.

을 보여주는 것이다. 스파저를 통한 소스 방출이 중단된 10000초 이후부터는 유량이 음의 값을 가지는데 이것을 Fig. 11의 압력변화와 함께 살펴보면, IRWST 안쪽에 존재하는 높은 농도의 수증기가 응축되면서 압력이 외부보다 낮아지고 이 부압에 의하여 IRWST 밖의 공기가 안쪽으로 유입되는 것이다.

Fig. 13은 IRWST 내부에 설치된 점화기 위치에서 기체의 농도변화를 시간에 따라 보여준다. IRWST 환기구에 플랩이 설치된 경우에 스파저를 통하여 수증기가 방출되면, 수증기는 IRWST 내부의 공기와 섞여 (희석작용) IRWST 밖으로 나가게 되고, 약 1000초부터는 IRWST 내부에 산소가 존재하지 않고 수증기만 존재한다. 약 4500초부터 수소가 방출되지만 이미 IRWST 내부는 수증기만으로 가득 차있기 때문에 이때 수소 혼합기체는 비가연 상태이다. 수소의 농도가 증가하면서 상대적으로 수증기의 농도는 감소하며 약 8000초에서는 수소의 농도가 60 vol%까지 올라간다. 그러나 8000초부터 다시 급격히 증가하는 수증기의 방출로 인하여 IRWST 내부는 수증기의 농도가 올라간다. 약 9000초에는 IRWST 내부의 수소의 농도는 5 vol% 이하로 떨어졌다가 수증기의 응축의 의하여 10000초까지 조금 상승한다. 10000초부터는 스파저를 통한 소스의 방출의 거의 사라지고 IRWST 내부는 남아 있는 수증기의 응축에 의하여 수증기의 농도가 선형적으로 떨어진다. 이 수증기의 응축은 IRWST 내부의 압력을 감소시켜 IRWST 외부로부터 공기의 유입을 유도한다. 이로 인하여 IRWST 내 산소의 농도는 서서히 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 14는 t=1900s에서 수증기의 3차원 분포를 보여주는 그림으로 네 개의 IRWST 환기구에서 수증기 플룸이 형성되어 있는 것을 알 수 있다. 즉, IRWST 환기구에 플랩이 설치되어 있지 않은 경우에는 4개의 환기구 중에서 2개의 환기구를 통하여 공기가 유입되었으나 플랩이 설치되어 있는 경우에는 모든 환기구를 통하여 소스가 방출되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 수증기는 스파저 근처에 있는 환기구를 통하여 (오른

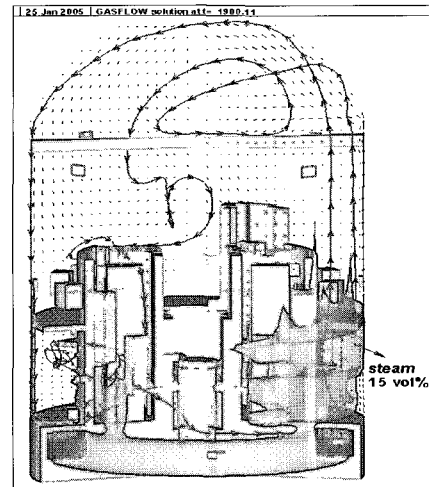


Fig. 15 Steam flows at t=1900s in the containment with flaps at the IRWST vent

쪽 그림) 더 많이 배출되고 있는 것으로 보인다.

Fig. 15는 같은 시각에 수증기의 흐름을 보여주기 위하여 수직 단면에서의 속도장과 유적선을 나타내었다. 그림의 오른쪽에 위치한 IRWST의 환기구(환기구 4)에서 시작한 유적선은 수직방향으로 격납건물 돔 영역으로 올라가고, 일부는 돔 영역에서 순환하는 복잡한 경로를 지나서 반대편 증기발생기 격실로 흘러 들어가는 것을 볼 수 있고, 다른 유적선은 격납건물 외벽을 따라 크게 순환하여 반대편 벽을 따라 내려가서 그림의 왼쪽에 위치한 환기구에서 방출되는 소스와 섞이면서 약간 상승하는 듯 복잡한 경로를 따라 돌다가 환형격실을 타고 다시 오른쪽의 환기구 근처로 흘러가는 재순환 유동구조를 보여주고 있다.



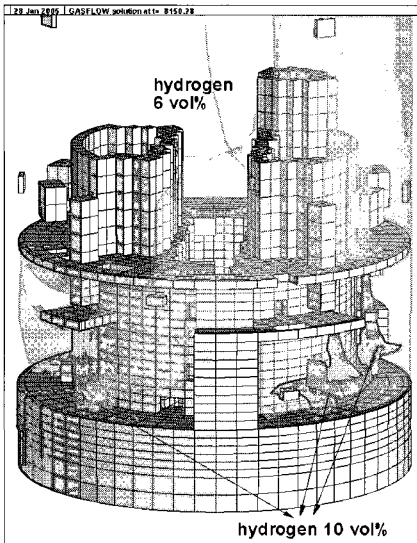


Fig. 16 Hydrogen distribution at t=8150s in the containment with flaps at the IRWST vent

IRWST 환기구에 플랩이 설치되어 있는 경우와 설치되어 있지 않은 경우의 유동 구조를 비교해보면, 서로 비슷한 점과 다른 점을 찾을 수 있다. 우선 IRWST 환기구의 개수와 위치 그리고 스파저의 위치 등은 고정되어 있기 때문에 이 기하학적 특성은 플랩의 유무와 관계없이 두 경우 모두 유동 구조에 반영되는 것으로 판단된다. 즉 네 개의 환기구 중에서 스파저에 가까이 있는 환기구를 통하여 더 많은 소스가 방출될 수 있는 원인을 제공 하고 있다는 것이다. 이로 인하여 플랩의 유무와 관계없이 격납건물 전체적으로 재순환유동이 형성된다. 격납건물 내에 형성된 재순환유동의 흐름 방향도 위에 언급된 스파저와 환기구의 기하학적 특성에 의해 만들어진 것으로 플랩의 유무에 관계없이 일치한다. 그러나 환기구에 설치된 플랩은 IRWST 내부 유동에 큰 영향을 미치며 이로 인하여 재순환유동의 형태가 플랩의 유무에 따라 달라진다. IRWST 환기구에 플랩이 없는 경우에는 일부 환기구 즉 스파저에 인접한 환기구를 통해 방출 소스가 나가고 반대편 환기구를 통하여 공기가 유입되어 격납건물 전체의 재순환유동장에 IRWST도 포함되지만, 플랩이 있는 경우에는 모든 환기구를 통하여 수증기가 나가기 때문에 격납건물 재순환유동장에서 IRWST는 제외된다. 하지만 환기구에서의 서로 다른 유속은 재순환유동을 만드는 모멘트를 제공하고 있다.

스파저를 통한 수소 방출의 두 번째 피크 점을 지난 t=8150s에서 수소의 거동도 이와 유사한 형태를 보인다(Fig. 16). 격납건물 내 수소의 분포를 보면 6 vol%의 수소구름은 IRWST 위에 있는 환형격실을 둘러 싸고 있으며 특히 스파저가 있는 오른쪽의 환기구로 더 많은 수소가 방출되어 작업테

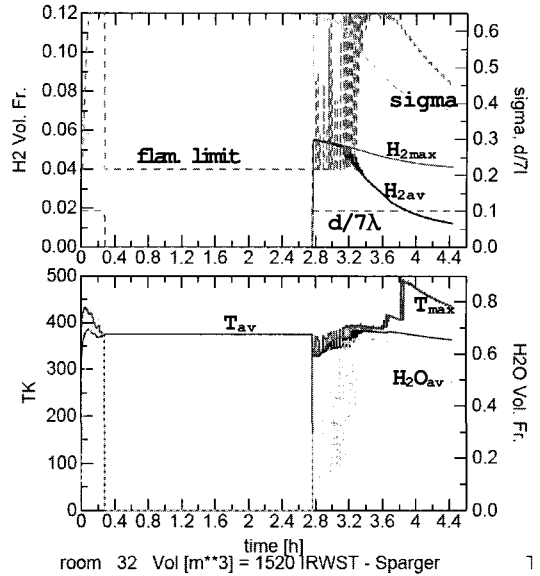


Fig. 17 The characteristics of the hydrogen mixture cloud in the IRWST compartment in the case with flaps installed

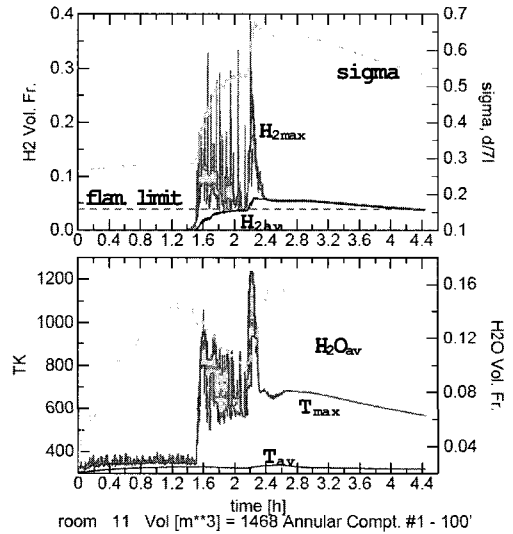


Fig. 18 The characteristics of the hydrogen mixture cloud in the annular compartment in the case with flaps installed

크 위로 6 vol%의 수소구름이 펼쳐져 있는 것을 볼 수 있다. 그러나 10 vol% 이상 고농도의 수소구름은 IRWST 환기구 근처의 제한적인 영역에만 존재하는 것을 알 수 있다.

급수원전상실사고 시 수소는 IRWST에서 방출되어 환기구를 빠져나와 환형격실로 가서 상부의 격납건물 돔 쪽으로 흘러가면서 확산된다. 이런 유동 구조로 인하여 IRWST와 그 위의 환형격실에서 수소 구름의 특성이 매우 중요하다. Fig.

17은 IRWST에서 수소혼합 기체의 특성을 보여주는 것으로 수소구름의 평균 수소농도는 6 vol% 미만임을 알 수 있다. 이 그림에서 2.8시(1000초) 이전에는 수소농도가 0인데 이것은 산소의 고갈로 인하여 연소 가능한 수소구름이 형성되어 있지 않은 것을 의미한다.

Fig. 18에서 알 수 있듯이 환형격실에서도 사고해석 시간 동안 평균 수소농도는 5 vol%정도를 유지하고 있으며 이로 인하여 수소 혼합구름이 연소가 되어도 화염이 가속될 가능성이 없는 것으로 나타났다. 환형격실에서 최대온도가 갑자기 1000K 이상으로 상승하는 것은 환형격실에 설치된 PAR에 의하여 수소가 재결합되면서 발생한 국소적인 현상이며 환형격실 전체의 평균온도는 매우 낮은 상태를 유지하고 있다.

### 3. 결 론

APR1400 원자력발전소에서 급수완전상실사고의 경우 격납 건물 내에서 수소와 수증기의 거동을 3차원 열유동 해석 코드인 GASFLOW를 이용하여 해석하였다. APR1400의 IRWST 환기구에 플랩이 있는 경우와 없는 경우에 대하여 수증기와 수소의 거동을 해석하고 서로 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

IRWST 환기구에 플랩이 없는 경우에는 일부 환기구(스파저에 인접한 환기구)를 통해 방출소스가 나가고 반대편 환기구로 공기가 유입되어 격납건물 전체의 재순환유동장에 IRWST도 포함되지만, 플랩이 있는 경우에는 모든 환기구를 통하여 수증기와 수소가 나가기 때문에 격납건물 재순환유동장에서 IRWST는 제외되는 것으로 나타났다. 환기구에 설치된 플랩은 IRWST 내부의 유동에 직접적으로 영향을 미치는 것으로 나타났으며 특히 수소제어의 관점에서 긍정적인 효과를 주는 것으로 평가되었다. IRWST 환기구에 플랩이 없는 경우에는 수소가 방출되는 시기에 IRWST 내부의 수증기 농도가 낮고 산소가 지속적으로 공급되어 수소혼합 기체는 연소발생시 화염의 가속 및 DDT로의 천이 가능성이 있는 것으로 나타났으나 플랩이 있는 경우에는 수소방출 시기에 고농도의 수증기와 산소의 고갈로 인하여 수소연소가 불가능하였다.

본 연구를 통하여 환기구의 플랩이 수소와 수증기의 3차원적 거동 미치는 영향을 파악할 수 있었으며 플랩이 수소제어의 관점에서 중요한 수단이 됨을 밝힐 수 있었다.

### 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 중장기 사업 일환으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

- [1] 2002, "Severe Accident Phenomenology and Containment Performance for the APR1400," *APR1400-SSAR*, Ch.19-2, KOPEC.
- [2] 홍성완, 외2인, 1994, "격납용기내에서 수소혼합 및 이송에 관한 연구," *KAERI/TR-455/94*, 한국원자력연구소.
- [3] Hawley, J.T. et al., 1989, "Study of Hydrogen Mixing within the Combustion Engineering System 80+ Containment," *Trans. of the American Nuclear Society*, vol.60, p.740-742.
- [4] Royle, P. et al., 2000, "Analysis of Steam and Hydrogen Distributions with PAR mitigation in NPP Containment," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.202, p.231-248.
- [5] Travis, J.R. et al., 1998, "GASFLOW: A Computational Fluid Dynamics Code for Gases, Aerosols, and Combustion," *LA-13357-M, FZKA-5994*, Los Alamos National Laboratory.
- [6] Houkema, M. et al., 2003, "CFD Analysis of Steam and Hydrogen Distribution in a Nuclear Power Plant," *NURETH-10*, Seoul, Korea, Oct. 10.
- [7] Kim, J. et al., 2005, "Hydrogen Mitigation Strategy of the APR1400 NPP for a Hypothetical Station Blackout Accident," *Nuclear Technology*, Vol.150, No.3, p.263-282.
- [8] Lee, B.C. et al., 2001, "An Optimal Hydrogen Control Analysis for the In Containment Refueling Storage Tank (IRWST) of the Korean Next Generation Reactor(KNGR) Containment under Severe Accidents," *ICONE 9*, France.
- [9] Lee, B.C. et al., 2003, "An Evaluation of the Effectiveness of the APR1400 Hydrogen Mitigation System Using Sophisticated Lumped Parameter Code coupled with 3 dimensional Model," *ICAPP03*.
- [10] Breitung, W. et al., 1999, "Criteria for Deflagration-to-Detonation Transition (DDT) in Nuclear containment Analysis," *SMIRT-15 Post-Conference Seminar on Containment of Nuclear Reactor*, Seoul, Korea.
- [11] Dorofeev, S.B. et al., 1996, "Analysis and Evaluation of DDT Criteria for Severe Accident Conditions," *Report Russian Research Center, Kurchatov Institute, Moscow*.
- [12] 박준경 외5인, 1998, "증기 제트 응축현상에서의 응축하중에 대한 실험적 연구," *한국원자력학회 춘계학술발표회 논문집*.