

2001 추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

## 수직사각 격실에서의 국부적 수소거동에 대한 실험적 연구

### An Experimental Study on Local Hydrogen Behavior in Vertical Rectangular Compartment

이정재, 이운장, 최용석, 박군철

서울대학교

서울특별시 관악구 신림동 산56-1

#### 요 약

본 연구에서는 소격실 내부에서의 수소농도분포를 알아보기 위해 수직사각 격실 내에서의 수소거동 실험이 수행되었다. 혼합 격실은 가로와 세로가 각 1m, 높이가 1.5m인 수직사각 형태다. 실험에서 수소는 헬륨으로 대체하였으며, 가스혼합체의 주입량 및 관형 장애물의 유무에 따른 수소의 거동 또는 농도분포에 대한 현상학적 관찰과 그에 대한 기초정보를 제공함으로써 중대사고시 격납건물 내 소격실에서의 국부적 수소거동을 파악하고, 이에 대해 서울대학교에서 개발중인 3차원 수소제어분석코드 HYCA3D의 국부해석능력을 검증하기 위한 자료의 제공과 신규 원자로의 수소제어설비의 위치선정을 위한 정보제공을 목적으로 하였다. 따라서 수소거동에 영향을 주는 인자들에 대한 정성적인 민감도 분석이 이루어졌으며, 다양한 실험조건에 대한 국부적 분포경향을 확인하였다. 실험결과는 HYCA3D 코드의 계산 결과와 잘 일치하였다.

#### Abstract

In this study hydrogen behavior test in the vertical rectangular compartment was conducted to investigate the hydrogen concentration distribution in a sub-compartment. The mixing compartment is a vertical rectangular type which has the dimension of 1m×1m×1.5m. Hydrogen was alternated with helium in experiments. The goal of experiment is to understand phenomenologically the local hydrogen behavior in the NPP containment in severe accident sequence and giving data and information to verify the prediction capability for local hydrogen concentration of new 3 dimensional hydrogen control analysis code, HYCA3D, under developing in SNU. Also the experiment aims to

determine the positions of hydrogen control equipment in a new nuclear reactor, by supplying the basic information about hydrogen behavior or concentration distribution with various test conditions. So the qualitative sensitivity analysis for the factors, affecting the hydrogen behavior, was carried out and the trend of local distribution was examined. Test results showed good agreement with the calculation results from HYCA3D code.

## 1. 서론

TMI사고와 체르노빌사고와 같은 중대사고 이후 원자로 격납건물의 건전성에 대한 중요성의 인식이 높아지고 중대사고시 수소제어에 대한 대책이 요구됨에 따라, 중대사고시 수소 거동에 관한 범세계적인 실험 및 해석 연구가 진행되어왔다. 그러나 대부분의 연구가 격납 건물 전체에 대한 수소혼합을 모사하고 있어, 중대사고시 수소가 축적될 수 있는 소격실에서 국부적인 수소혼합에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 따라서 본 실험은 수소를 포함하는 기체혼합체의 기본적인 거동을 이해하고 그 거동에 대한 영향인자들을 분석함으로써 신규원전의 설계에 있어 부분적인 수소의 축적을 제어할 수 있는 수소 점화기(Igniter)나 수소 재결합기(Recombiner) 등의 수소제어설비의 위치선정에 필요한 중요한 정보를 생산하고, 서울대학교에서 개발중인 수소제어분석 코드-HYCA3D에 대한 국부해석능력을 검증하기 위한 데이터베이스를 구축하고자 한다.

## 2. 수소혼합실험

### 2.1. 실험내용

중대사고시 수소거동분석에 있어 가장 기본적인 현상을 이해하기 위하여, 간단한 수직사각 격실에서의 수소혼합실험이 수행되었다. 혼합 격실의 모양과 크기는 가장 이해가 쉽고, 코드적용의 용이성을 고려하여 설계되었다. 실험에서는 실험의 안전성과 기체의 용이한 조작을 위해 분자량이 수소에 가장 가까운 헬륨(Helium)으로 대체하였다. 실험은 표1과 같이 장애물이 없는 기준실험(Test A1)이 우선적으로 수행되었고, 냉각 벽면에 의한 증기응축효과를 보기위한 벽면응축실험(Test A2), 그리고 장애물에 의한 3차원 효과를 보기위한 실험(Test B)으로 진행되었다. 각각의 실험에 대한 예비실험으로서 헬륨가스만 주입한 예비실험이 수행되었고, 가스의 주입량에 따른 효과를 관찰하기 위해 2가지의 주입량에 대한 실험이 수행되었다.

### 2.2. 장치의 구성

실험장치는 혼합 격실과 헬륨주입계통, 증기발생기, 농도 및 온도 계측계통으로 구성된다. 혼합 격실은 가로와 세로가 각각 1.0m, 높이가 1.5m인 체적 $1.5\text{m}^3$ 의 스테인리스(Stainless

steel)로 제작된 수직사각 격실(그림1)로서 0.5m의 높이에 관형 장애물(그림2)을 설치할 수 있는 구조다. 장애물로 분리된 상부와 하부의 격실에서 가스혼합체의 3차원 거동을 볼 수 있도록 제작되었다. 가스혼합체의 주입은 격실 바닥의 중앙부에서 이루어지며 주입구는 가스혼합체가 완전발달 되도록 충분히 긴 관을 거쳐 주입된다. 혼합 격실의 벽면은 증기의 응축량을 줄이기 위해 섭씨 약 75~125도로 일정하게 유지하였다. 혼합 격실의 상부에는 격실 내부를 대기압으로 유지하기 위해 가로와 세로가 각각 0.125m, 0.09m인 출구(Venting hole)를 설치하였다. 혼합 격실 내의 계측지점은 총 17곳이며, 각 부분에 대한 헬륨농도의 축출은 내경 1.4mm의 스테인리스 튜브를 이용하였다. 실험장치의 개략도를 그림3에 도시하였다.

헬륨은 순도 99.9%의 가스를 사용하였고, 헬륨탱크의 충전압은 20기압 이상으로 유지하였다. 탱크로부터 나온 헬륨은 일정 압력과 유량으로 조절되고, 예열기(Pre-heater)를 통과하여 혼합기(Mixer)에서 증기와 혼합된다. 가스혼합체는 정상상태로 혼합 격실 내부로 주입된다. 표2는 실험에 사용된 두 가지 주입량에 대한 헬륨과 증기 주입량을 나타낸다.

농도 및 온도 계측은 혼합 격실 내의 17곳에서 국부적으로 이루어진다. 헬륨은 스테인리스 튜브와 우레탄 튜브를 통해 수분제거필터를 거쳐 건조한 상태로 가스분석기(Gas analyzer)로 유입된다. 온도의 계측은 농도계측 지점에서 T-type 열전대에 의해 동시에 이루어졌다. 열전대는 Test A1, A2에서 총 14개, Test B에서는 총 23개가 사용되었다. 계측 지점의 위치는 그림4에 나타내었다. Test A1, A2에서 대칭인 지점은 같은 값을 갖는다는 가정아래 1~6번까지 총 6지점에서 계측하였고, Test B에서는 장애물에 의한 3차원 효과가 비대칭성을 주므로 2번을 제외한 1~15번까지 총 14지점에서 계측하였다.

표 1. Test Description

Test	Obstacle	Description
A1	Without	Reference Case
A2	Without	Condensing Wall
B	With	Obstacle Test

표 2. Mixture Injection Rate

Component	Flow Rate 1 (g/min)	Flow Rate 2 (g/min)
Helium	0.4	0.7
Steam	8	14.7
Mixture	8.4	15.4
Injection velocity (cm/sec)	57	101

### 3. HYCA3D 코드의 개요

서울대학교에서 개발중인 HYCA3D 코드는 원자로에서 중대사고로 인한 수소생성시 수소-증기 혼합체의 열역학적인 3차원 거동을 예측하기 위한 코드이다. SIMPLER 알고리즘을 이용하여, 3차원 Navier-Stokes 방정식을 풀어 기체거동을 예측한다. 세 가지의 가스(수소 또는 헬륨, 증기, 공기)로 구성된 가스혼합체의 거동을 모사하기 위해 연속체 모델이 사용되었고, 속도장은 가스혼합체의 평균 밀도를 이용하여 결정된다. 개별적인 가스의 거동은 중수송 방정식(Species transport equation)에서 고려된다. HYCA3D 코드는 모든 3차원 공간에 대한 모사가 가능하다.

### 4. 결과 및 토의

Test A1은 장애물이 없는 수직사각 격실에서의 수소거동 실험이다. 주입량이 많은 경우가 작은 경우보다 전체적인 농도가 높게 나타났고, 각 경우에서 3번 지점에서의 국부적 농도가 가장 높게 나타났다. 이는 주입되는 가스혼합체가 확산되기 보다는 운동량에 의한 수직 상승운동의 영향이 강하기 때문인 것으로 보인다. Test A1의 결과를 그림5에 나타내었다. Test A1의 예비실험, 즉 헬륨만 주입하는 경우와 비교하면, 전체적인 농도분포에서 최고농도 지점과 최소농도지점의 농도차이가 줄었는데, 이는 증기의 운동량과 부력에 의한 강제대류 형성의 상승효과로 혼합이 더 잘됨을 보여준다.

Test B는 통로에 의해 수직으로 연결된 두 개의 격실에서의 거동을 알아보기 위해 수행되었다. 장애물 하부 격실에서는 국부적 농도차이가 최고 6%에 이르렀는데, 이는 증기에 의한 운동량과 부력으로 인해 가스혼합체의 전체적인 흐름이 상부 장애물의 통로를 향하고 있음을 나타낸다. 따라서 격실의 바닥부분에서의 농도가 거의 비슷한 낮은 값을 가지는 것으로 확인됐다. 그러나 하부 격실에서 상부 격실로의 통로와 거리가 먼 9번과 10번 지점에서는 헬륨농도가 높은 것으로 확인되었는데 이는 상부 격실의 농도보다 높은 값이며, 중앙부에서 연속적인 주입에 의해 국부적인 축적이 생기는 것으로 판단된다. 상부 격실에서는 가스혼합이 잘 이루어져 모든 지점에서 비슷한 농도가 계측되었다. 장애물 통로인 11번 지점에서의 농도분포는 미세한 진동(Oscillation)을 보이는데, 이는 상부 격실의 공기에 비해 상대적으로 가벼운 헬륨이 주입됨으로써 생기는 불안정성에서 기인한 것으로 판단된다. Test B의 결과를 그림6에 나타내었다.

마지막으로 Test A의 결과와 HYCA3D 코드의 계산결과를 비교하였는데, 두 결과가 전반적으로 잘 일치하였다. 그림7(a)는 Test A1에서 주입량이 적은 경우(Symbol legend)와 같은 조건의 코드계산결과(Line legend)를 나타낸다. 그림7(b)에서는 Test A2와 같은 조건 즉, 격실 상부의 온도를 낮게 유지하였을 때의 증기의 응축효과를 비교하였다. 이 경우 초반(1500초 이전)에는 코드계산 결과가 다소 높게 평가하는 경향이 있었지만, 후반에는 실험결과와 일치하였다.

## 5. 결론

실험결과로부터 단순 수직사각 격실에서는 수소혼합체의 혼합이 잘 일어났다. 장애물에 의해 수직으로 인접한 두 격실이 분리된 경우, 상부 격실에서는 혼합이 잘 이루어져 각 지점의 국부 농도가 비슷하게 나타났으나, 하부 격실에서는 비교적 높은 농도분포가 나타났다. 특히 두 격실 간의 통로와 먼 지점에서는 국부적으로 농도가 축적될 수 있음이 관찰되었다. HYCA3D 코드의 계산결과와 실험결과가 잘 맞았지만, 코드의 국부해석능력에 대한 충분한 검증을 위해 보다 다양한 조건의 실험이 수행되어야 한다.

가스혼합체의 유입량이나 속도 등의 영향인자들에 대한 정량적인 민감도 분석이 요구되며, 소격실에서의 국부적 수소혼합 현상에 대한 보다 다양한 정보생산을 위해 원자로 중대사고 환경을 모사하는 성층화 실험연구 및 살수계통 작동시의 증기응축에 의한 수소농도분포에 대한 연구도 필요하다고 판단된다.

## 참고문헌

Y.S. Choi, U.J. Lee, G.C. Park, *Study on Local Hydrogen Behaviors in a Subcompartment of the NPP Containment*, Nuclear Engineering and Design, vol.208, 2001

Wolf. L, Valencia. L., *1990 - Large-scale HDR - Hydrogen Mixing Experiment at HDR and Future Experiments Test Group E 11*. Proceedings 18<sup>th</sup> Water Reactor Safety Information Meeting, Rockville, MD, USA, 1990

Lundström P. et.al., *Hydrogen Behavior in Ice Condenser Containments*, Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics NURETH-7, Saratoga Springs, New York, 1995

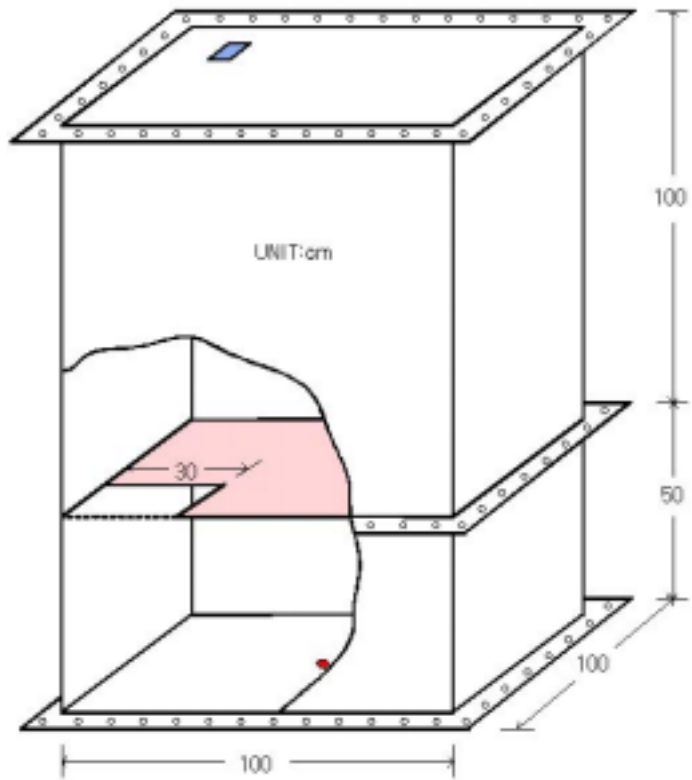


그림 1. Hydrogen Mixing Compartment

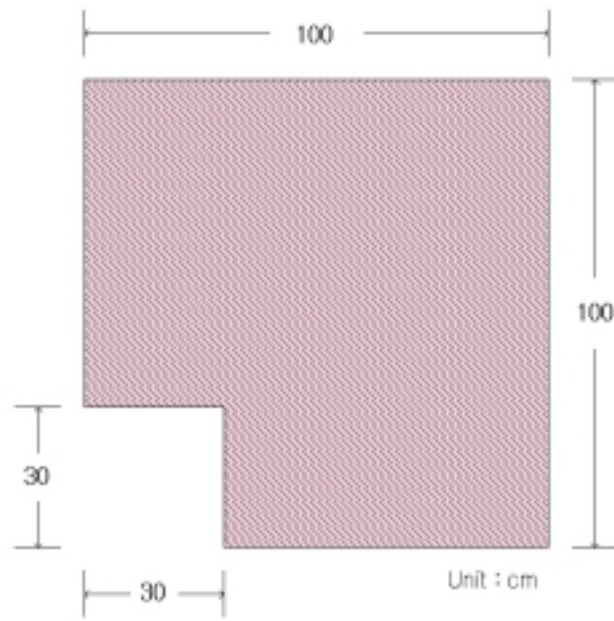


그림 2. Plate Type Obstacle

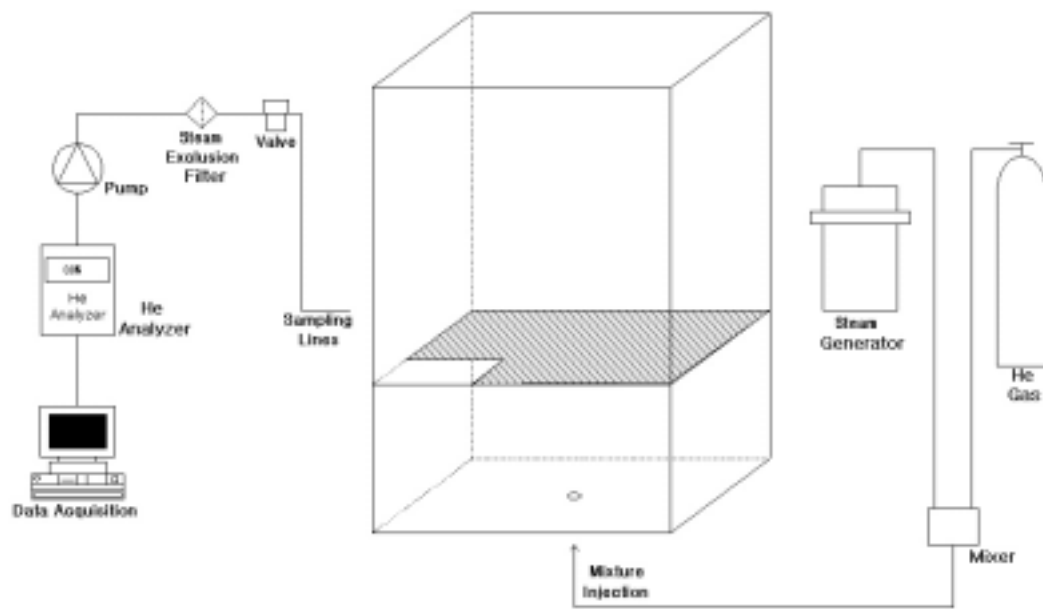


그림 3. Schematic of Hydrogen Mixing Test Facility

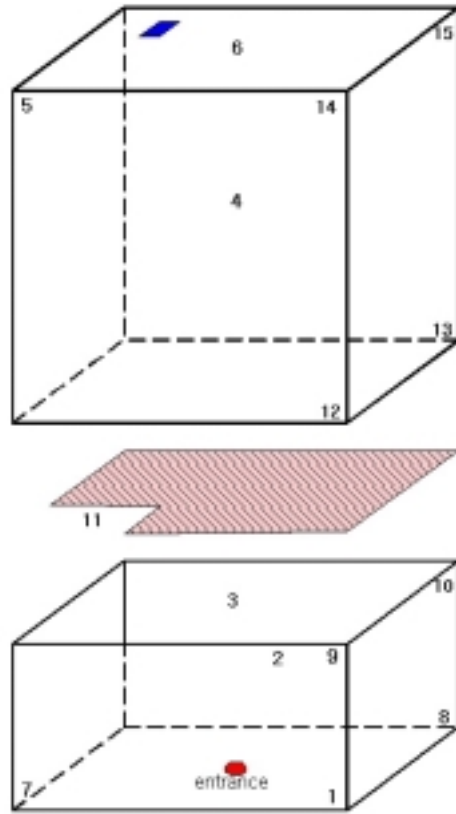
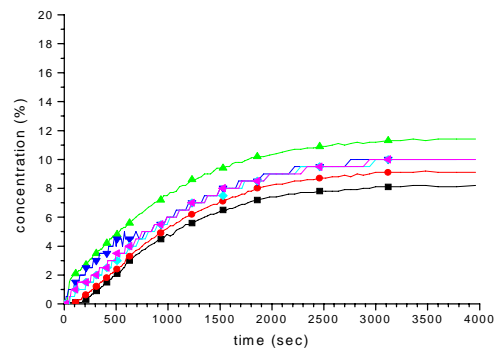
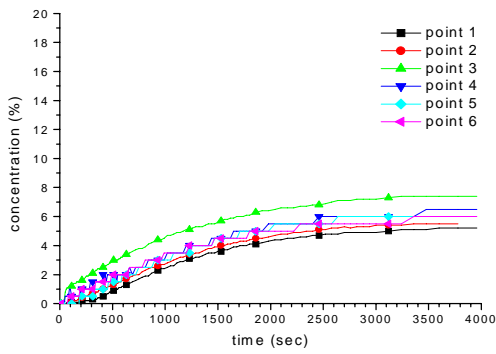


그림 4. Sampling Points

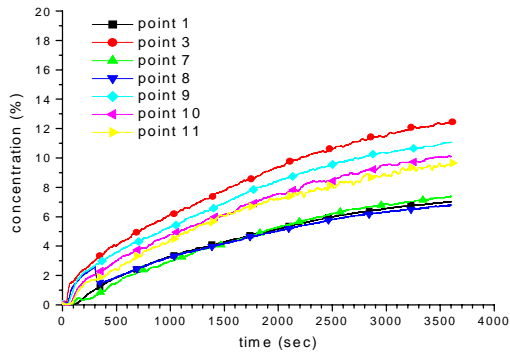


(a) Small Injection

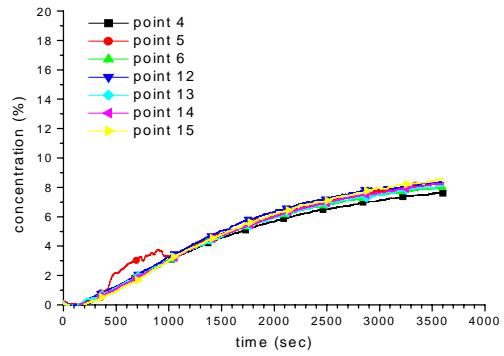
(b) Large Injection

그림 5. Helium Concentration in the Test A1



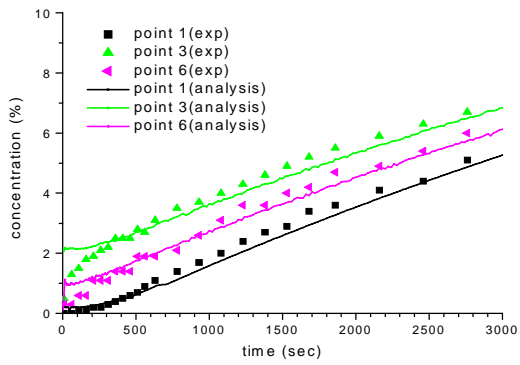


(a) Lower Compartment

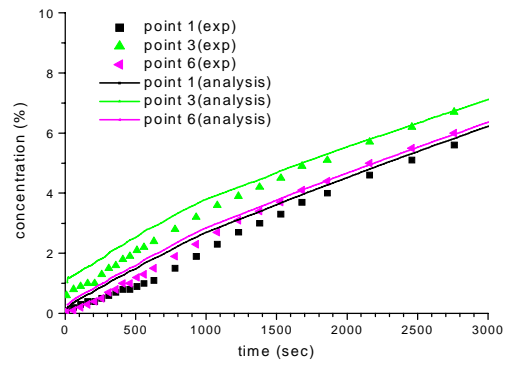


(b) Upper Compartment

그림 6. Helium Concentration in the Test B



(a) Small Injection Case in Test A1



(b) Condensing Wall Case in Test A2

그림 7. Comparison of the Results of Experiment and Calculation