

2002 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

GOTHIC 및 HYCA3D 코드의 국부적 수소 농도 예측 능력에 대한 연구

A Study on the Prediction Capability of GOTHIC and HYCA3D Code for Local Hydrogen Concentrations

최용석, 이운장, 이정재, 박군철

서울대학교

서울특별시 관악구 신림동 산56-1

요 약

본 연구에서는 격납용기내에서의 GOTHIC 및 HYCA3D 코드의 수소 거동현상 예측에 대한 해석능력 검증이 여러 실험을 대상으로 수행되었다. 검증 실험의 대상으로는 지금까지 서울대학교 및 국내외 기관에서 수행된 여러 실험 중에서 빠른 천이과정이나 격실의 크기 및 장애물의 영향이 있는 것을 선택했다. 규모가 큰 격실내에서의 헬륨 거동에 대해서는 GOTHIC과 HYCA3D 모두 실험 결과와 잘 일치하는 것으로 보여졌다. 그러나 격실의 규모가 작고 격실내 장애물이 있어 복잡한 구조를 갖는 경우나 빠른 천이현상의 경우에 GOTHIC의 결과는 실험 결과와 큰 차이를 보였다. 이러한 결과는 격실내 국부적 수소거동에 대한 정밀한 예측이 필요로 되는 격실에 대해서는 GOTHIC 해석이 적합하지 않다는 것을 보여주고 있다. 이와 반면에 HYCA3D 코드는 비교한 모든 실험에 있어서 합당한 예측 결과를 보여 주었다

Abstract

In this study the prediction capability of GOTHIC and HYCA3D code for local hydrogen concentrations was verified with experimental results. Among the experiments, executed by SNU and other organization inside and outside of the country, the fast transient and the obstacle cases are selected. In case of large subcompartment both the code show good agreement with the experimental data. But in case of small and complex geometry or fast transient the results of GOTHIC code have the large difference from experimental ones. This represents that GOTHIC code is unsuitable for these cases. On the contrary HYCA3D code agrees well with all the experimental data.

1. 서론

TMI-2 사고 이후 지금까지 중대사고시 수소거동에 대하여 여러 연구기관에서 많은 연구가 수행되었으나 아직도 많은 기술적 불확실성이 존재한다. 미국 원자력 규제위원회(US NRC)는 격납용기내 수소거동 현상을 중대사고 8개의 불확실성 항목 중의 하나로 지정하여 이에 대한 연구를 계속하도록 하고 있다.

이에 따라 대부분의 원전 보유국이 자국의 사정에 적합한 수소제어 관련 규제지침을 마련하고 있고 국내에서도 표준원전 울진3,4호기의 운영허가조건으로 수소제어대책이 요구되었고 APR 1400 설계지침이 될 중대사고시 수소제어 KINS 규제지침을 마련하고 있다. 이러한 규제지침에는 국부 수소농도 제한과 적절한 수소제어설비의 설치를 요구하고 있다. 따라서 국부 수소농도 예측과 더불어 3차원 해석이 수반되어야 하며 이를 위해 현재 APR 1400 설계팀이 보유하고 있는 GOTHIC 코드와 같은 3차원 해석 코드를 사용하여야 한다. 그러나 이 코드의 3차원 수소농도 예측 능력은 실험적으로 검증되어 그 타당성이 입증되어야 한다.

본 연구에서는 GOTHIC 코드의 3차원적 수소해석능력을 검증하기 위하여 국내외에서 수행된 수소혼합실험의 결과와 GOTHIC 코드의 해석 결과를 비교하였고, 국부적 수소농도 해석을 위하여 자체적으로 개발된 HYCA3D 코드의 해석 결과와도 비교 분석하였다.

2. GOTHIC 및 HYCA3D 코드의 개요

2.1 GOTHIC 코드

GOTHIC 코드는 원전 격납건물 및 기타 주요 건물의 설계, 인허가, 안전 및 운전 에 대한 분석에 적용하는 일반화된 열수력 코드다. 특히, 설계기준사고시 격납건물 전체 또는 격실의 압력변화를 해석할 수 있는 코드다. 여러 유체 및 다상유동에 대한 질량, 운동량, 그리고 에너지 보존방정식을 푸는 제어체적 방식 전산프로그램으로 국제적으로 공인되어 널리 사용되고 있는 COBRA 코드를 모체로 개발되었으며 응용범위를 확대하기 위해 lumped parameter model도 적용이 가능하다. 유체는 vapor, drop 그리고 연속적인 액체(continuous liquid)로 구성되어지며, vapor 상은 수증기와 비응축성기체들로 구성되어 있고 모두 같은 온도와 속도를 가진다. 각 체적 내에서 각 상은 자신의 온도와 속도를 가지고 압축성으로 가정한다.

계산을 위한 전산격자(computational grid)는 lumped 또는 다차원으로 구성할 수 있으며 세분된 공간(subdivided volume)내에서의 제어체적은 직육면체 형태로만 구성할 수 있고 3차원적 분포를 가지는 속도, 온도, 압력이 보존방정식에 의해 계산된다. 구성된 계산격자 내의 연속적인 입의의 두 cell을 수력학적으로 연결하기 위해서는 flow path(junction)가 사용되며 junction 내에서는 1차원적 유동에 의해 운동량이 보존된다.

2.2 HYCA3D 코드

HYCA3D는 중대사고시 원자력 발전소 격납용기내에서 발생하는 수소와 증기 혼합체의 3차원적 거동 및 열수력학적 정보를 예측하기 위해 개발된 컴퓨터 코드다. 3차원 시간중속 Navier-Stokes 방정식이 SIMPLER 알고리즘에 의해 계산된다. 수소 또는 헬륨, 증기 및 공기의 혼합체 거동을 모사하기 위해 연속체 모델이 적용되었고, 여기서 속도장은 이들 기체 혼합체의 평균밀도를 이용하는 단일 속도를 정의하였고 각 기체들의 독립적인 거동은 화학종 수송 방정식에서 고려된다. 느린 유동에 대해서는 압력과 전달에 대해서 고려하지 않아도 되기 때문에 국부적 유체의 밀도는 평균 유체압력과 국부적 온도 및 기체 화학종의 상대적 농도의 함수로서 표현된다. 이것은 Boussinesq approximation으로는 정확하게 표현할 수 없는 큰 밀도차에 의한 부력으로 인한 유동에 대한 모사를 가능하게 해준다. 또한 HYCA3D는 직교형 및 원통형 좌표계의 임의의 기하학적 구조에서 계산될 수 있으며, 각 화학종의 상대적인 농도차에 의한 부력효과와 수증기의 응축에 대한 모델을 포함하고 있다. 보다 상세한 내용은 참고문헌을 참조하기 바란다.

3. 검증실험

GOTHIC과 HYCA3D의 해석 능력을 검증하기 위해 서울대학교 및 해외에서 수행된 여러 실험이 검증용 실험으로 선택되었다. 서울대학교에서 수행된 해석 격실의 규모가 작은 He-Bu 실험(실험 A)과 세분된 수직사각격실 실험(실험 B)이 코드 검증을 위해서 선택되었다. 이러한 실험의 모의 계산의 목적은 작고 세분된 격실 내에서의 빠른 천이에 대한 각 코드의 3차원적 수소거동 해석 능력을 검증하기 위함이다. 그림 1은 실험B의 헬륨 계측 지점을 나타낸다. 그리고 수소 혼합현상을 평가하기 위한 실험으로 여러 코드의 검증시 세계적으로 널리 모사되어 왔던 규모가 큰 해석 격실 실험인 HEDL의 환형격실 실험(실험 C)을 토대로 격납건물내에서의 수소 혼합현상에 대한 두 코드의 해석능력이 검토되었다. 각 실험에 대한 일반적인 조건들을 표1에 나타내었다.

실험	부피 (m ³)	주입 혼합체	초기 조건		경계 조건			비고
			압력 (kPa)	온도 (°C)	헬륨 (kg/sec)	증기 (kg/sec)	혼합체 온도	
실험 A	0.000225	헬륨	101.3	25	2.4×E-6	-	25	소격실
실험B	1.5	헬륨/ 증기	101.3	90	6.7×E-6	1.3×E-4	100	세분된 사각 격실
실험 C	24.644	헬륨/ 증기	97.6	64.4	시간에 따라 변함			세분된 대형 격실

표 1 각 실험의 조건

4. 해석 결과 비교 및 토의

실험 A (He-Bu 실험)에 대한 코드 해석 결과와 실험 결과의 비교가 그림 2에 보여진다. 그림에서와 같이 GOTHIC의 계산 결과는 실험 결과보다 크게 높게 예측되었다. 계산 결과에서 실험 시작 후 약 50 초가 지났을 때 모든 계측 지점의 헬륨 농도는 부피비로 약 90 %에 도달하는 반면, 실험 결과에서는 각 헬륨농도 계측지점마다 약간의 농도 차이를 보여주고 있다. 이와 반면에 HYCA3D에 의한 계산 결과는 실험 결과보다 약간 높게 예측하는 결과를 보이고 있지만, 하부(L)와 중간부(C) 및 상부(U)의 He 농도 분포 경향은 유사하다. 이러한 GOTHIC의 해석결과는 실험 A의 전체 천이 시간을 고려해 볼 때 작은 격실내에서의 빠른 천이현상을 모사하는 데 있어서 해석적 한계가 있음을 보여주고 있다. GOTHIC의 결과와 비교해 볼 때 규모가 작은 격실내에서의 He 혼합체의 거동에 대해서는 HYCA3D의 해석 능력이 더 우수하다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 실험 B의 모사에 있어서도 유사한 결과를 보여주고 있다.

그림 3은 실험 B(SNU Test)의 해석적 및 실험적 결과에 대한 비교를 나타낸다. 그림에서와 같이 GOTHIC의 해석결과는 실험결과와 격실내 전반적인 헬륨분포에 있어서 차이를 보이고 있으며, 특히 하부 격실(그림 3a)의 계측지점 3번과 10번의 헬륨 농도분포에 있어서 전혀 다른 예측결과를 보이고 있다. 여기서 계측지점 3은 하부격실의 중앙에 위치해 있고 계측지점 10번은 하부격실의 구석이며 이곳은 판형 장애물의 아랫부분이다. 실험 B의 계측지점 3번에서 실험과 GOTHIC 해석의 헬륨농도 차이는 실험 시작 3000초 후 약 3 %에 이르게 된다. 그리고 이 시점에서 3번과 10번의 농도분포는 실험에서 약 2 %의 차이를 보이지만 GOTHIC의 해석 결과는 두 지점에서의 농도분포를 거의 같게 예측한다. 반면에 HYCA3D의 해석결과는 3번과 10번 지점사이의 농도 차이를 확연하게 보여주며 실험 결과를 잘 예측하는 것으로 보여진다. 상부 격실(그림 3b)의 경우도 마찬가지로 GOTHIC은 실험 결과에 비해 상당히 낮은 농도를 제시하나 HYCA3D는 적절한 값을 예측한다. 하지만 두 코드 모두 2000초 이후 시간에 따른 천이 과정을 제대로 모사하지 못하는 경향을 보이는 한다. 이러한 결과에서 볼 때, 규모가 작고 복잡한 격실내의 가스 혼합체 거동상의 장애물이 될 수 있는 구조물 주변에서의 3차원적인 빠른 천이현상에 대해 GOTHIC 코드는 활용에 제한성이 있으며 HYCA3D의 해석능력이 우수한 것으로 판단된다. 또한 수소거동 및 사고 관리의 측면에서 중요시되는 소격실에서의 국부적 수소거동에 대한 해석적 예측 시 HYCA3D가 GOTHIC 코드보다 더 적합하다고 할 수 있다.

실험 C 즉, HEDL HM-6실험에 대한 해석 결과와 실험 결과가 그림 4에서 비교되었다. 전반적으로 코드 해석 결과는 실험 결과와 잘 일치한다. GOTHIC 해석 결과와 실험 결과사이의 최대 헬륨농도 차이는 약 1% 이내다. 상대적으로 매우 작은 체적의 실험인 실험 A와 B의 해석 결과와 비교해서 체적이 약 16배 더 큰 실험 C의 경우에는 실험 종료 시간까지 GOTHIC 코드 해석 결과가 실험 결과와 잘 일치하는 것으로 보인다. HYCA3D 역시

1% 이내의 오차 내에서 상당한 정확성을 보이므로 HYCA3D는 비교적 큰 격실내에서의 수소거동에 대한 예측능력 또한 우수함을 알 수 있다.

그림 5는 IRWST 격실내의 수소 농도를 두 코드를 사용하여 모사한 결과를 나타낸다. 시간에 따른 천이 현상에 다소간의 차이를 보이기는 하나, 대체적으로 서로 상응하는 결과를 보여주고 있다. 따라서 두 코드 모두 대형 격실내의 수소 농도 예측능력은 타당함을 알 수 있다.

5. 결론

격납용기내에서의 수소 거동현상 예측에 대한 GOTHIC 및 HYCA3D 코드의 해석능력 검증이 여러 실험을 대상으로 수행되었다. 지금까지 서울대학교 및 국내외 기관에서 수행된 여러 실험 중에서 빠른 천이과정이나 격실의 크기 및 장애물의 영향성 관점에서 검증 실험을 선택했다. GOTHIC의 해석 결과는 규모가 큰 격실내에서의 헬륨 거동에 대해서 실험 결과와 잘 일치하는 것으로 보여졌다. 그러나 격실의 규모가 작거나 격실내 장애물이 있어 복잡한 구조를 갖는 모델이나 빠른 천이현상의 경우에는 헬륨 혼합체의 거동이 실험 결과와 큰 차이를 보였다. 이러한 결과는 격실내 국부적 수소거동에 대한 정밀한 예측이 필요로 되는 격실에 대해서는 GOTHIC 해석이 적합하지 않다는 것을 보여주고 있다. 이와 반면에 HYCA3D 코드는 비교한 모든 실험에 있어서 합당한 예측 결과를 보여 주었다.

참고문헌

T.L. George et al., GOTHIC - Containment Analysis Package, Technical Manual, Numerical Applications, Inc., December 1997.

G.R. Bloom et al., *Hydrogen Distribution in a Containment with a High Velocity Hydrogen-Steam Source*, HDEL-SA-2582, Hanford Development Engineering Laboratory, September 1982.

Y.S. Choi, U.J. Lee and G.C. Park, *Study on Local Hydrogen Behaviors in a Subcompartment of the NPP Containment*, Nuclear Engineering and Design, vol.208, pp.99-116, 2001.

U.J. Lee, Y.S. Choi and G.C. Park, *Development of an Analytical Model for Local Hydrogen Behavior Analysis in NPP Containment*, Proceedings of 16th International Conference on SMiRT, SMiRT-16, Washington DC, August 2001.

Jung-Jae Lee, Un-Jang Lee, Goon-Cherl Park, *Fundamental Experiments on local Hydrogen behaviors under severe accident conditions in a rectangular subcompartment of nuclear power plant*, Proceedings of ICONE10- 10th International Conference on

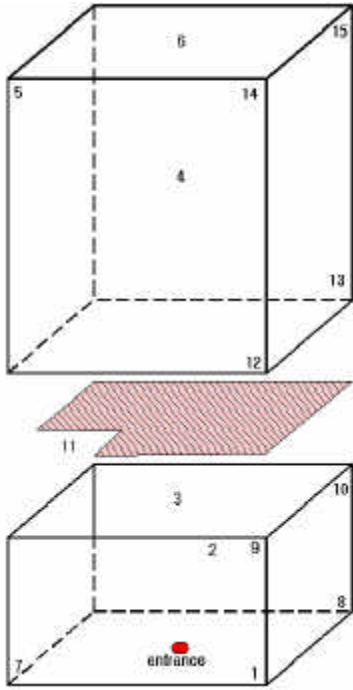


그림 1. 실험B의 헬륨 계측지점

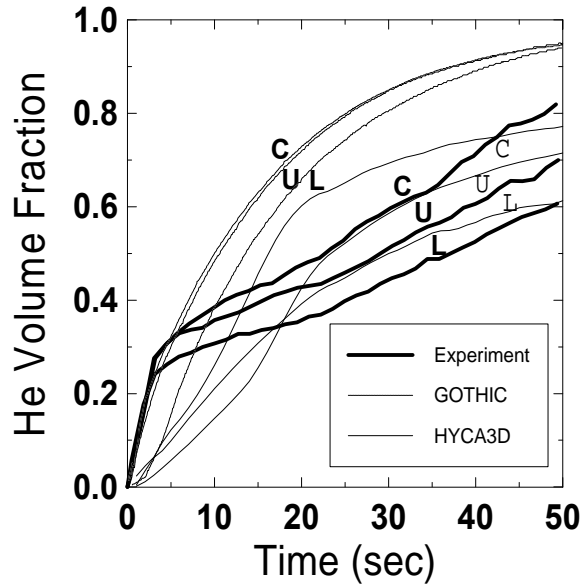
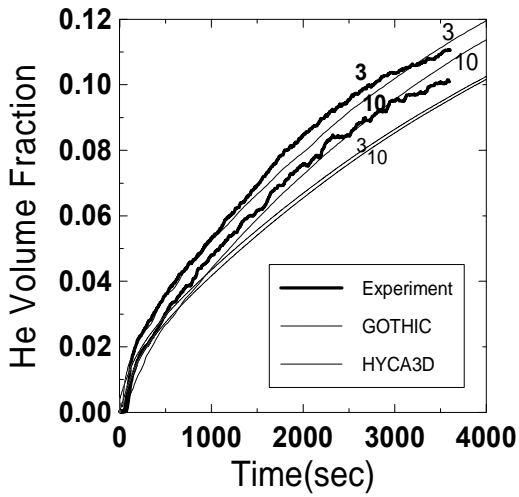
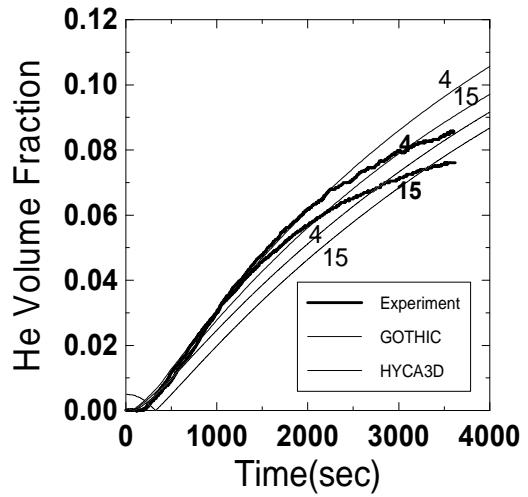


그림 2. 실험A의 코드 해석결과 및 실험결과



(a) 하부 격실



(b) 상부 격실

그림 3. 실험B의 코드 해석결과 및 실험결과

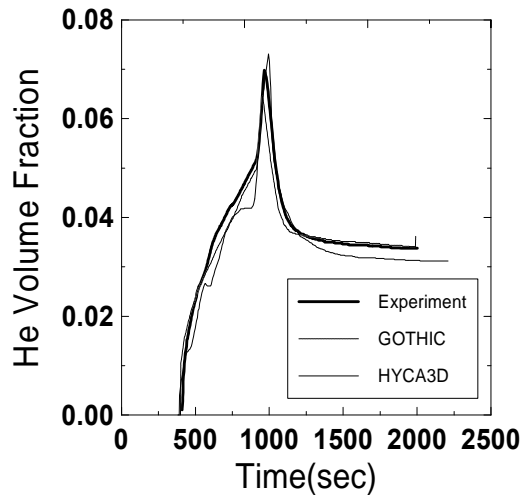


그림 4. 실험C의 코드 해석결과 및 실험결과

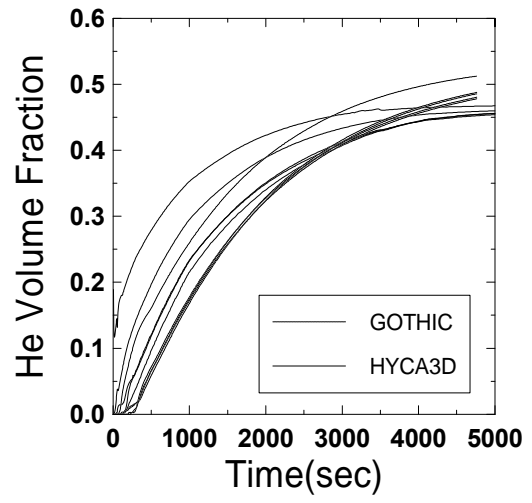


그림 5. IRWST의 코드 해석결과 비교