2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

GASFLOW를 이용한 수소거동 해석을 위한 APR1400 격납건물의 모델링

Modeling of APR1400 Containment to Study Hydrogen Behavior Using GASFLOW Code.

김종태, 홍성완, 김상백, 김희동

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

한국의 차세대 원자력 발전소인 APR1400 에는 중대사고시에 생성되어 격납건물 내로 방출되는 수소의 위협으로부터 격납건물의 건전성을 유지하기 위하여 26 개의 촉매재결합기와 10 개의 백열식 점화기가 설계에 반영되어 있다. 이런 수소제어기구의 유효성과 격납건물 내부에서의 수소 거동을 평가하기 위하여 MAAP, MELCOR, GOTHIC 과 같은 lumped-parameter 코드가 사용되어 왔으나, 수소의 3 차원 거동을 파악하는데 한계가 있기 때문에 다차원 열수력 코드인 GASFLOW 를 사용하게 되었다. GASFLOW 코드를 이용하여 격납건물 내 수소 거동을 해석하기 위해서는 먼저 완전한 격납건물의 3 차원 형상 모델링이 필요하다. 이 형상 모델링은 격자점의 생성과 격납건물 내부 구조물 및 주요장치들의 모델링을 포함한다. 이 논문에서는 GUI 를 활용하여 GASFLOW 해석을 위한 APR1400 의 모델링에 대하여 기술하였다.

Abstract

Korean next generation nuclear power plant APR1400 has 26 Passive Autocatalytic Recombiners and 10 glow-type igniters installed in the containment to mitigate the hazards of hydrogen generated and potentially released into the containment during a severe accident. To evaluate the effectiveness of the hydrogen mitigation system and hydrogen transport and mixing behavior within the containment the mechanistic computational fluid dynamics code GASFLOW is used in parallel with such a lumped-parameter code as MAAP or GOTHIC because of its limitation in resolving 3-dimensional behavior of hydrogen. The first step to analysis involving hydrogen behavior in a full containment with the GASLOW code is

generating a realistic geometry model, which includes nodalization and modeling of the internal structures such as walls, ceilings and equipments. In this article geometric modeling of APR1400 for GASLOW analysis with GUI is presented.

1. 서론

APR1400 은 한국의 차세대 원자력 발전소로서 1400MWe 의 발전용량을 가지고 있다. 현 설계에서 APR1400 은 중대사고시에 생성되어 격납건물로 방출될 수소의 위험성을 완화(제거)하기 위한 기구로서 26 개의 수동 촉매 재결합기(Passive Autocatalytic Recombiner, PAR)와 10 개의 백열 점화기(glow-type igniter)를 갖추고 있다. 중대사고시에 수소는 원자로 용기내에서 핵연료 피복재와 수증기의 급격한 화학반응로 주로 발생되며 원자로 냉각 시스템의 파단부 혹은 감압밸브를 통하여 격납건물 내로 방출된다. 방출된 수소의 급격한 연소는 충격적인 압력부하를 수반하며 원자력발전소 격납건물의 건전성에 위협을 줄 수 있다. 수소제어기구(Hydrogen Mitigation System, HMS)의 유효성과 격납건물 내에서 수소의 이송과 혼합 거동을 평가하기 위하여 주로 MAAP[1], MELCOR[2], 혹은 GOTHIC[3] 등의 Lumped-Parameter(LP) 코드가 사용되어 왔다. 그러나 이런 LP 코드들은 완전한 격납건물 내에서 수소의 3 차원적인 거동을 모의하는데는 한계가 있기 때문에 LP 코드를 이용한 해석과 병행하여 3 차원 해석이 이루어지고 있다. 본 연구에서는 APR1400 의 격납건물 내에서 수소의 거동을 파악하기 위하여 3 차원 전산유체역학 코드인 GASFLOW[4]를 이용한다.

GASFLOW 코드로 완전한 격납건물 내의 수소거동을 해석하기 위해서는 먼저 격납건물의 실제 형상을 모델링하는 작업이 선행된다. 이 기하학적 모델링(geometric modeling)은 격자점의 생성, 그리고 벽, 천정과 같은 내부 구조물 및 주요 장치들에 대한 모델링을 포함한다. GASFLOW 와 같은 3 차원 코드를 가지고 해석하기 위해 필요한 3 차원 형상 모델링은 격납건물의 상세자료와 많은 노동시간을 요구한다. 이것은 3 차원 해석 코드를 설계의 도구로 사용하는데 제약으로 작용한다. 최근에 FZK 에서는 GASFLOW 해석을 위한 격납건물 형상 모델링을 쉽게하고 오류를 줄이기 위해 GUI(Graphic User Interface)[5]를 개발하였다. 본 논문에서는 GASFLOW 해석을 위하여 이 GUI 를 사용하여 APR1400 을 모델링한 것을 기술하였다.

2. 본론

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

2.1. 격자 생성

GASFLOW 코드에서는 직각격자와 실린더 격자가 사용가능하며 격납건물의 전체적인 구조에 따라 적절한 격자계를 선정한다. 격자의 크기는 일반적으로 해석하고자 하는 물리적 현상을 수치적으로 모사할 수 있을 만큼의 정도를 가져야하며 사용하는 컴퓨터의 성능에 직접적으로 영향을 받는다. 격자의 크기가 결정되면 격자점을 각각의 좌표방향으로 적절히 분포시킨다. APR1400 격납건물은 약 94,000m^3의 자유체적(free volume)을 갖고 원자로 공동 바닥에서 격납건물 돔 정점까지의 높이는 79.4m 이고 격납건물 외벽의 내경은 22.86m(75ft)인 원통모양이다. 본 연구에서는 컴퓨터의 성능등을 고려하여 45,018 개의 실린더 격자(r-ϕ-z)를 사용하였다. R 방향의 격자는 18 개의 격자점으로 이루어져 있고 두번째 격자점은 원자로 용기의 외벽에 그리고 세번째 격자점은 원자로 용기 공동의 내벽에 위치한다. 그리고 세번째 이후의 격자점은 균일간격으로 분포시켰다. ϕ 방향의 격자는 6^o의 균일간격으로 총 61 개를 사용하였으며 z 방향의 격자는 등간격으로 총 41 개의 격자를 생성하였다.

(a) (b)

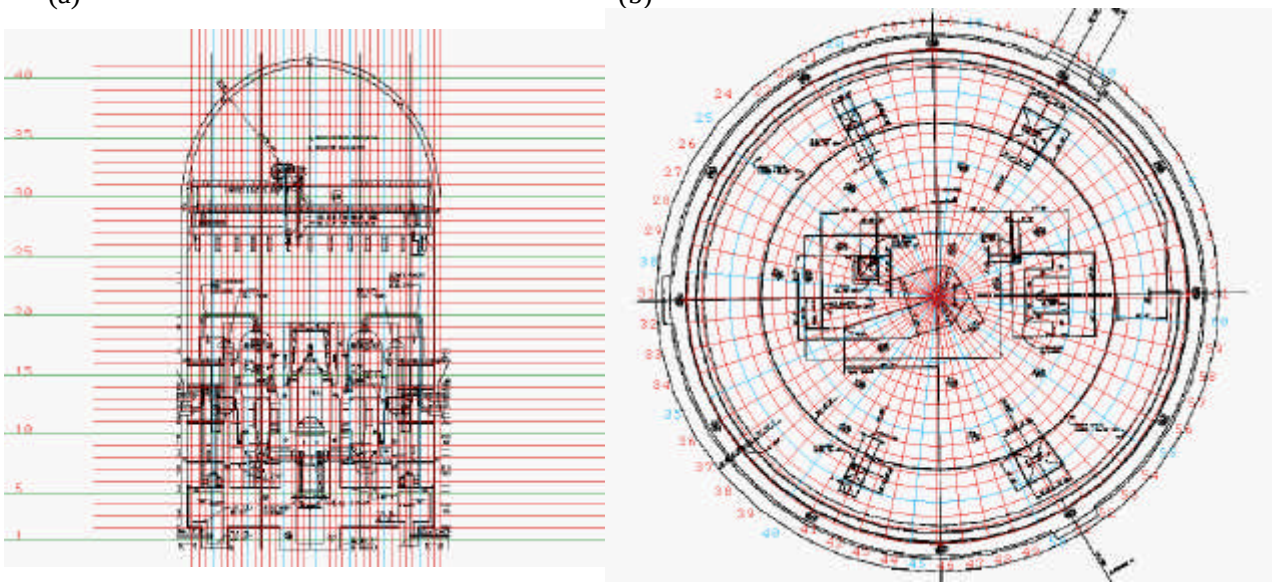

Fig. 1 Generated mesh overlapped on the containment cut drawing, (a) vertical cut view, (b) horizontal cut view at elevation 81ft.

2.2. GUI 를 이용한 격납건물 내부의 콘크리트 구조물과 주요 장비들에 대한 모델링

격납건물 내부는 원자로 용기, 증기발생기, 냉각수 펌프 등와 같은 중요 장비들과 복잡한 콘크리트 구조물로 이루어져 있다. 이런 복잡한 형상을 모델링하기 위하여 GUI 를 사용한다. 격납건물의 단면도를 생성된 격자와 중첩시켜 각 구조물의 위치를 컴퓨터 그래픽 상에서 마우스로 입력한다. 컴퓨터 그래픽 파일 형태의 도면을 GUI 화면에 띄운 다음 생성된 격자를 읽어드려 스케일링한 뒤 두개의 그림을 중첩시킨다. Fig. 1(a)와 (b)는 생성된 격자를 단면도와 중첩시켜 나타낸 그림으로, 이 그림을 이용하여 내부 구조물의 위치와 크기를 모델링한다.

GUI 작업은 격자와 중첩된 수평단면도 상에서 이루어지며 각 구조물의 수직 위치는 fig. 1(a)를 참조하여 수작업으로 이루어진다. 사용된 격납건물의 수평단면도는 81, 100, 114, 136, 156ft 에서의 단면도이며 각각에 대한 격자점의 k 값은 table 1 에 나타내었다. 그리고 격납건물 내의 주요 장비들에 대한 상부와 하부의 위치를 GOTHIC 계산에서 모델링된 값과 비교하여 table 2.에 나타내었다.

Table 1. K indices for the locations of horizontal cut drawings

horizontal cut	height	k index
el81	365.8	3
el100	944.9	6
el114	1371.6	8
el136	2057.4	11
el156	2651.8	14

Table 2. K indices for the main equipments of APR1400 .

	Equipment						
Number	name	mat #		k-index	height	elevation	GOTHIC ele.
1	RPV	7	bottom	5	794	95.0	94.3
			top	11	1985	134.1	130
2	Steam Generator	7	bottom	8	1389.5	114.6	116.4
			top	19	3573	186.2	186.2
3	S/G pedistal	1	bottom	6	992.5	101.6	100
			top	8	1389.5	114.6	116.4
4	Reactor coolant pump	7	bottom	8	1389.5	114.6	115.6
			top	13	2382	147.1	148.9
5	RCP pedistal	1	bottom	6	992.5	101.6	100
			top	8	1389.5	114.6	115.6
6	Integrated Head Assembly	6	bottom	11	1985	134.1	135.1
			top	16	2977.5	166.7	173.3
7	Safety Injection Tank	6	bottom	12	2183.5	140.6	139
			top	18	3374.5	179.7	181.4
8	Hot Leg	7	bottom	8	1389.5	114.6	115.6
			top	9	1588	121.1	119.1
9	Cold Leg	7	bottom	8	1389.5	114.6	116.1
			top	9	1588	121.1	118.6
10	Pressurizer	7	bottom	12	2183.5	140.6	136.5
			top	20	3771.5	192.7	190

격납건물 내부 구조물과 주요 장비들에 대한 재료의 열물성치는 다음 table 3 에 나타내었다. 이 데이터는 GASFLOW 코드의 입력자료에 첨가되며 격납건물 내부 구조물의 모델링에 이 재료 번호가 사용된다.

Table. 3 Material number and thermal properties.

mat #	visible	type	material	thermal conductivity erg/cm s K	specific heat erg/g s K	density g/cm3	jlow	jup	walldef
1	yes	concrete	concrete	2.04E+05	9.60E+06	2.4	13	49	
2	no	SS	steel shell	5.00E+06	4.70E+06	7.85			1
3	no	concrete	concrete mobs	2.04E+05	9.60E+06	2.4	49	13	
4	yes	concrete	concrete walls	2.04E+05	9.60E+06	2.4			2
5	no	concrete	concrete shell	2.04E+05	9.60E+06	2.4			
6	yes	steel	crane+strut	5.00E+06	4.70E+06	7.85			3
7	separate	insulated	components	1.00E-10	1.00E-10	1			
8	no	water	IRWST	5.00E+06	4.19E+06	1			
9	separate	insulated	accumulator	1.00E-10	1.00E-10	1			
10	no	steel	recobox	5.00E+06	4.70E+06	7.85			4,5,6

격납건물 내부의 구조물과 주요 요소들은 GASFLOW 해석에서 유동과 열전달에 직접 관여하게 되며 GASFLOW 는 obstacle 과 wall 로 모델링을 한다. 구조물의 두께가 격자의 셀을 하나 이상 차지하는 경우는 obstacle 로 처리하며 구조물의 두께가 사용된 격자의 간격보다 작은 경우는 wall 로 모델링한다. 격납건물의 1 차 및 2 차 방호벽과 주요 장비들은 격자 간격에 비하

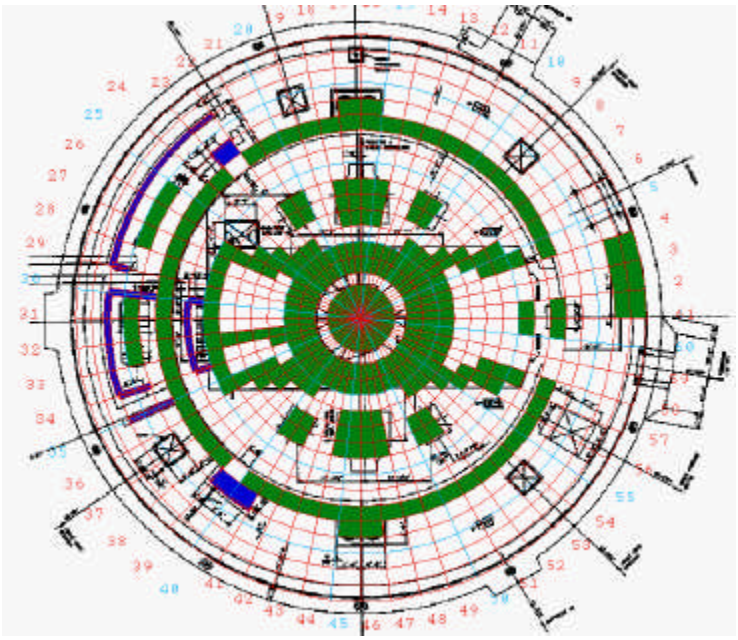

Fig. 2 A view of generated obstacles and walls k=7

여 충분히 크기 때문에 obstacle 로 처리하였으며, 그외 격실 벽등은 wall 로 모델링하였다. Fig. 2 는 k=7 에서 모델링된 내부 구조물을 100ft 단면도와 함께 보여준다. 원자로 압력용기, 증기발생기, 펌프, 윤활유 탱크, RDT 탱크 등의 주요 요소들이 나타나 있고, 1 차 및 2 차 방호벽도 볼 수 있다. 특히 HVT(Hold-up volume tank), ICI chase 격실 등이 만들어져 있음을 알 수 있고, RDT 탱크 격실과 LHX(Let-Down Heat Exchanger) 격실의 벽은 wall 로 처리한 것을 볼 수 있다. Fig. 3 은 k=13 에서 모델링된 내부 구조물을 136ft 단면도와 함께 보여준다. 증기발생기 격실과 가압기 격실, 그리고 핵연료장전 풀이 만들어져 있는 것을 볼 수 있다. 2 차 방호벽의 바깥쪽으로 4 개의 안전주입탱크(SIT) 모델링되어 있다.

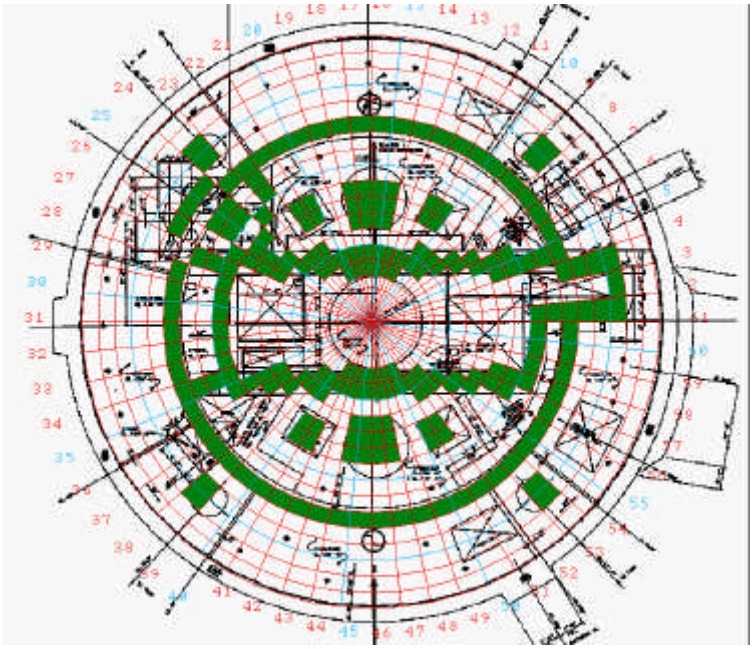

Fig. 3 A view of generated obstacles and walls at k=13

APR1400 격납건물 내에는 수소 제어를 목적으로 26 개의 촉매재결합기(PAR)와 10 개의 백열식 수소점화기를 사용한다. 수소점화기는 설계 위치에 맞는 격자의 인덱스를 GASFLOW 입력자료에 첨가하며 PAR 는 챔버를 wall 로 모델링하여 유로를 형성한다.

GASFLOW 계산 결과로부터 격실별 평균 수소농도와 DDT 가능성을 평가하기 위하여 GOTHIC 에서 사용한 제어체적(control volume)을 이용한다. GOTHIC 의 제어체적 구성은 마찬가지로 GUI 를 통하여 이루어지며 이것을 이용하여 GASFLOW 해석을 위해 모델링된 APR1400 격납건물의 자유체적을 평가할 수 있다. Table 4 는 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 위차하지 못하여 생긴다. 전체 격실의 자유공간을 합한 값은 거의 일치하는 값을 보인다.

Table. 3 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	10		130.83
3	Corium Chamber Room	74.29	83.0	3	100	6		91.4
4	Cavity Access Area	25.60	89.5	4	114.5	8		56.45
5	Reactor Vessel Annulus	175.18	83.0	3	130	10		314.92
6	S/G #2 Compt. (Lower)	2192.81	100.0	6	156	15	north	2643.6
7	S/G #2 Compt. (Upper)	1286.84	156.0	15	191	20	north	1207.4
8	S/G #1 Compt. (Lower)	2357.34	100.0	6	156	15	south	2960.7
9	S/G #1 Compt. (Upper)	1286.84	156.0	15	191	20	south	1188.1
10	Annular Compt. #2 - 100'	1148.71	100.0	6	114	8	north	1192.4
11	Annular Compt. #1 - 100'	1225.32	100.0	6	114	8	south	1443
12	Annular Compt. #2 - 114'	1619.51	114.0	8	136.5	11	north	1914.4
13	Annular Compt. #1 - 114'	2071.03	114.0	8	136.5	11	south	2285.4
14	Annular Compt. #2 - 136'-6"	1501.64	136.5	11	156	15	north	2354
15	Annular Compt. #2 - 136'-6	1635.74	136.5	11	156	15	south	2541.7
16	Refueling Pool	1544.02	106.5	7	156	15		2216.6
17	Containment Dome #2 (Lowest)	5671.80	254.5	29	279.5	33	north	6286
18	Upper Compt. #2 (Lowest)	7352.97	156.0	15	191	20	north	5563
19	Upper Compt. #1 (Lowest)	7524.78	156.0	15	191	20	south	6024
20	Reactor Drain Tank Room	79.08	100.0	6	114	8		132.06
21	Letdown Heat Exchanger Room	91.46	100.0	6	114	8		211.01
22	Compt. below Rege. HX Room	626.07	100.0	6	128	10	6-8,8-10	208.46
23	Regenerative Heat Exchanger Room	138.64	128.0	10	152	14		177.51
24	Pressurizer (PZR) Compt. (Lower)	109.69	136.5	10(11)	156	15	hole	161.91
25	Pressurizer Spray Valve Room 1	44.42	116.0	8	124	9		58.7
26	Pressurizer Spray Valve Room 2	45.58	116.0	8	124	9		44.02
27	Letdown Line Valve Room 1	68.47	116.0	8	124	9		73.37
28	Letdown Line Valve Room 2	70.60	116.0	8	124	9		73.37
29	Holdup Volume Tank	326.17	80.0	3	107.5	7		325.77
30	IRWST - No Sparger	1662.43	81.0	3	97	6	vent hole,s	1224.6
31	Pressurizer (PZR) Compt. (Upper)	330.47	156.0	15	212	23		281.06
32	IRWST - Sparger	1662.43	81.0	3	97	6	vent hole,n	1224.6
33	Upper Compt. #2 (Middle)	7907.49	191.0	20	223.1	25	north(23)	7833.4
34	Upper Compt. #2 (Highest)	7856.27	223.1	25	254.5	29	north	6517.7
35	Upper Compt. #1 (Middle)	8031.41	191.0	20	223.1	25	south	8147.1
36	Upper Compt. #1 (Highest)	7856.27	223.1	25	254.5	29	south	6517.7
37	Containment Dome #2 (Middle)	4633.33	279.5	33	304.5	37	north	4846.1
38	Containment Dome #2 (Highest)	1853.33	304.5	37	329.5	41	north	1968.5
39	Containment Dome #1 (Lowest)	5671.80	254.5	29	279.5	33	south	6286
40	Containment Dome #1 (Middle)	4633.33	279.5	33	304.5	37	south	4846.1
41	Containment Dome #1 (Highest)	1853.33	304.5	37	329.5	41	south	1968.5
42	Environment	1.00E+10	100.0		1000			
Total		94668.36						93874.49

GOTHIC 해석에서 사용된 제어체적은 GASFLOW 코드에서 room(격실)이라는 이름으로 모

델링이 된다. GASFLOW 해석을 통해 각 격실의 평균 수소농도와 수소구름의 크기가 시간에 따라 계산되며 이 값은 나중에 수소 연소특성을 평가하는 자료가 된다. 특히 각 격실별로 수소구름의 크기를 결정하기 위하여 최소수소농도(h2lowfl)를 사용하는데 h2lowfl=0 은 격실크기가 바로 수소구름의 크기가 되며, h2lowfl=4 는 격실내에서 수소가연한계(4 volume%) 보다 높은 농도의 영역만을 수소구름에 포함시킨다. Fig. 4 는 GASFLOW 해석에 사용된 APR1400 의 격실들을 보여준다.

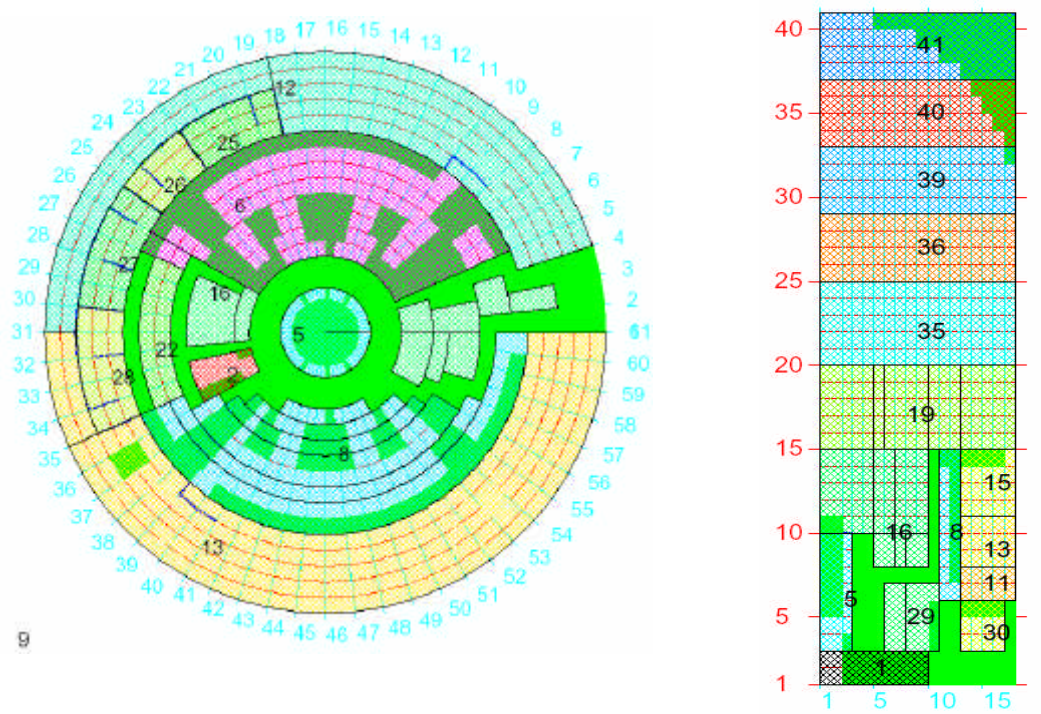

Fig.4 Visualization of the defined rooms in 3d GASFLOW mesh, (a) horizontal view at k=9, (b) vertical view at j=60

모델링된 APR1400 격납건물의 전체적인 구조는 fig. 5 에서 볼 수 있다. 왼쪽 그림은 주요 장치들을 볼 수 있도록 table 3(material table)의 3 번을 제거하였다. 오른쪽 그림에서 격납건물의 외벽과 내부의 전체적인 구조를 파악할 수 있다.

2.3. 소스항의 모델링

Fig. 6 은 MAAP[1]을 이용하여 계산된 APR1400 의 SBLOCA 에 대한 소스자료를 도식화한 것이다. 초기 4000 초까지 냉각수와 수증기가 같이 방출되는 기간동안은 포화상태로 가정하였

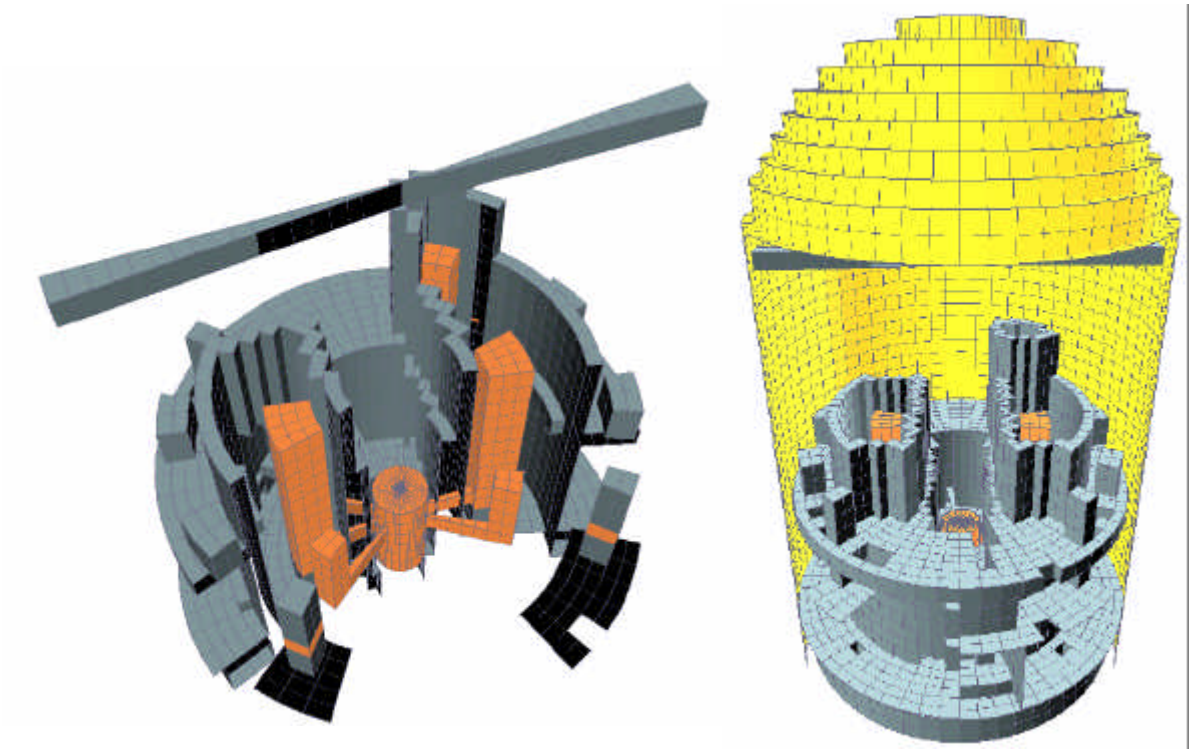

Fig. 5 3-dimensional perspective view of the modeled APR1400 containment.

으며 그 이후는 과열수증기가 방출되는 것으로 모델링하였다. GASFLOW **에서는 수증기와 수소는 방출지점**(SBLOCA **시는** cold-leg **의 파단부)에서 잘 혼합되어 같은 온도(엔탈피는 서로 다르다.)로 방출된다고 가정한다.**

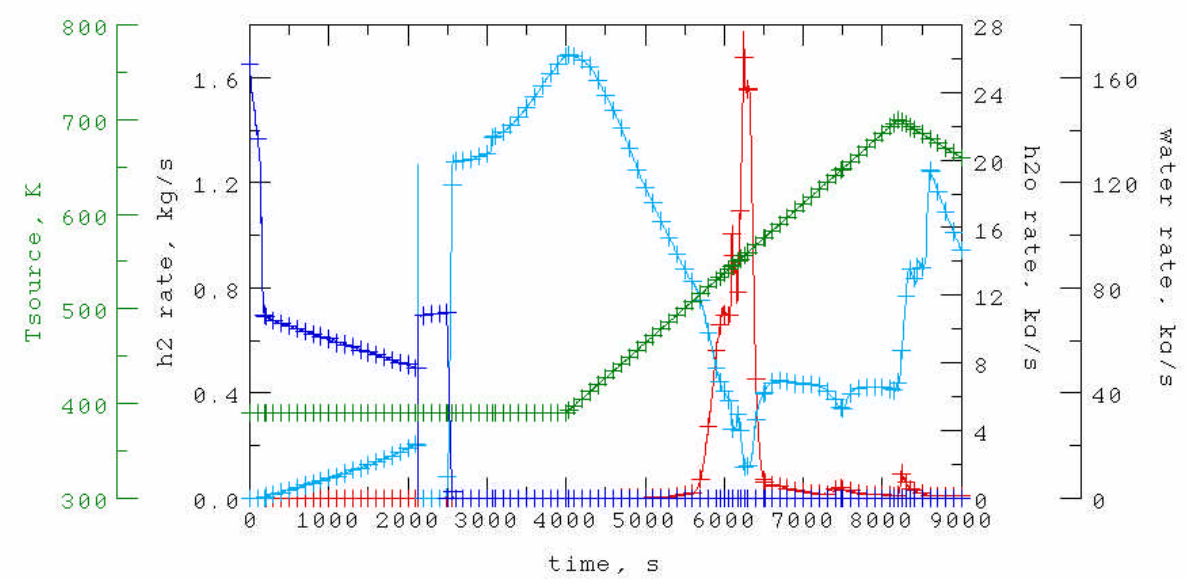

Fig. 6 GASLOW source data for APR1400 containment, steam, water, hydrogen source and temperature of SBLOCA from MAAP analysis.

3. 결론

SBLOLCA 시 APR1400 격납건물 내에서 수소의 거동을 GASFLOW 코드로 해석하기 위하여 GUI 를 이용하여 격납건물의 형상을 모델링하였다. 생성된 격자의 셀 수는 49,476 개로 셀 당 약 $2m^3$ 의 크기를 갖는다. PAR 와 점화기는 APR1400 의 설계자료에 따라 설치된 위치를 포함하는 격자의 셀에 모델링하였다. 모델링된 APR1400 의 입력자료를 이용하여 GASFLOW 로 계산된 자유공간은 $93,874m^3$ 으로 GOTHIC 으로 모델링된 값과 매우 일치함을 보였다. 그리고 SBLOCA 에 대한 수증기와 수소의 방출량은 MAAP 에서 얻어진 결과를 이용하여 모델링하였다. 여기서 모델링된 APR1400 의 입력자료를 이용하여 현재 SBLOCA 시에 수소의 거동에 대하여 계산을 수행하고 있다.

후기

본 연구는 과학기술부 중장기과제에서 재정적 지원을 받았습니다.

참고문헌

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

[2] 김시달등, "APR1400 의 노내 연소가스 생성량에 대한 민감도 분석," KAERI/TR-1980/2001

[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] J. R. Travis, et al., "GASFLOW: A Computational Fluid Dynamics Code for Gases, Aerosols, and Combustion," LA-13357-M FZKA-5994, 1998

[5] Jongtae Kim, "격납건물 내 수소거동 해석연구를 위한 독일 FZK 출장보고서," KAERI/OT-1073/2003, 2003