

APR1400 IRWST Pool 온도분포 해석

강형석*·배윤영*·박종균*

A Numerical Study on the IRWST Pool Temperature Distribution in APR1400

Hyung-Seok Kang, Yoon Y. Bae and Jong-Kyung Park

Key Words: IRWST(격납건물내 핵연료재장전수), Sparger(분사기), Local Temperature(국부온도), Condensation(응축), Condensation Area model(응축영역모델)

Abstract

The Safety depressurization System(SDS) of KNGR prevents RCS from overpressurization by discharging high pressure and temperature coolant through the I-sparger into the IRWST during an accident. If IRWST water temperature rise locally, around the sparger, beyond 200. F by the discharged coolant, unstable steam condensation can cause large pressure load on the IRWST wall. To investigate whether this condition can be avoided for the design basis event IOPOSRV(Inadvertent Opening of one Pilot Operated Safety Relief Valve), the flow and temperature distribution of water in the IRWST is calculated by using CFX 4.3 computational fluid dynamic code. According to the results, since pool water temperature does not exceeds temperature limit within 50 seconds after the opening of one POSRV, it can be assured that the integrity of IRWST wall is maintained.

기호설명

A_f	Flow area through sparger
C_f	Discharge coefficient
κ	Specific heat ratio
\dot{m}	Mass flow rate
P_o	Pressure around sparger
P_o	Stagnation Pressure

1. 서론

차세대원자로인 APR(Advanced Power Reactor)1400에는 사고시 일차냉각계통으로부터 방출되는 증기를 격납건물내 핵연료재장전수조(IRWST:In-containment Refueling Water Storage Tank) 내에서 효율적으로 응축시키기 위해 I형 sparger가 안전감압배기계통(SDVS: Safety Depressurization Vent System) 후단에 설치되

어 있다. Sparger를 통해 방출되는 증기는 IRWST 수조내에 존재하는 과냉각수와 직접 접촉응축에 의해 응축되어 격납건물이 가압되는 것이 방지된다. 원자로냉각재계통의 과압에 의해 안전밸브가 열려 안전감압배기계통 배관을 통하여 증기가 IRWST내로 방출될 때, 증기방출 시간이 작을 때는 sparger 주변의 수조수 온도상승이 적어 방출되는 증기가 안정적으로 잘 응축되지만 증기방출이 어느 정도 진행되어 sparger 주변의 수조수 온도가 어떤 한계온도를 초과하고 방출되는 증기의 양이 감소함에 따라 증기응축이 불안정해지면서 응축진동 현상이 발생할 수 있고 응축진동은 IRWST 구조물에 큰 하중을 유발할 수 있는 것으로 나타났다[1,2]. 비등경수로(BWR: Boiling Water Reactor)의 안전감압계통과 응축수조(suppression pool)에서는 응축진동으로 인해 응축수조의 지지대 등이 파손되는 사고가 발생하였다. 따라서 SRP(Standard Review Plan)와 NUREG 보고서에서는 사고분석과 불안정한 증기응축현상을 실험 및 해석적으로 연구한 결과를 바탕으로 증기응축이 안정적으로 이루어지기 위해서는 방출되는 증기량이 1) 94 lbm/ft²-sec 이상

* 한국원자력연구소

일 때 응축수조 냉각수의 국부온도(local pool temperature)가 200°F, 2) 증기량이 42 lbm/ft²-sec 이하일 때는 210°F를 넘지 않도록 규정하고 있고, 3) 42~94 lbm/ft²-sec 사이에서는 국부온도를 1), 2)를 이용하여 내삽법으로 구할 것을 권고하고 있다[1,2]. 여기서 국부온도는 sparger와 응축수조의 모양에 따라 다를 수 있으며 현재 명확한 정의는 없는 상태이다. 국부온도는 sparger로부터 방출되는 제트에 의해 유입되는 유체의 온도를 의미하며, 일반적으로 그림 1과 같이 증기의 응축 현상에 영향을 미치는 sparger의 바로 위부분 또는 밑부분의 평균온도로 정의하고 있다. 본 논문에서는 계산된 유동과 온도의 분포를 고려하여 국부온도의 위치를 결정하였다. 여기서 이 국부온도 값은 응축수조를 냉각시키지 않을 때의 값이다. 현재 진행중인 APR1400의 설계에는 원자력 규제기관이 안정적인 증기응축에 관한 새로운 국부온도요건을 정하기 전까지 비등경수로의 X, T형 sparger에서의 국부온도 요건을 사용하기로 하였다. APR1400의 안전감압배기계통 및 IRWST가 증기응축에 관한 국부온도 요건을 만족하는지를 조사하기 위해서는 일차계통 냉각재가 IRWST로 이상유동의 형태로 방출될 때의 열수력현상과 이로 인한 IRWST 수조수의 열수력 거동을 파악할 필요가 있다. 또한 국부온도요건을 초과한다면 증기방출 시작 후 얼마만에 초과하는지를 조사할 필요가 있다. 따라서 안전감압배기계통의 설계기준사고인 IOPOSRV (Inadvertent Opening of one Pilot Operated Safety Relief Valve)에 대하여 범용전산유체코드인 CFX4.3을 사용하여 증기방출시 IRWST내 온도분포변화에 대한 해석을 수행하였다.

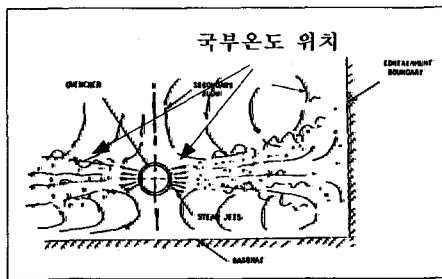


Fig.1. Flow Pattern on Steam Discharge in BWR Suppression Pool

2. 안전감압배기계통 및 IRWST 개요

APR1400의 안전감압배기계통은 원자로와 원자로 냉각재계통의 건전성을 유지하기 위해 설계기준 사고시에는 비응축성가스 및 증기의 배기와 원자

로 냉각재계통을 감압하고 설계기준초과사고시에는 원자로 냉각재계통을 급속감압시켜 안전주입수를 주입하며 취출 및 주입운전이 가능하도록 하였다. 안전감압배기계통은 가압기에 설치된 안전밸브(POS RV), 배관계통 및 I형 sparger로 구성되며 2 트레인으로 이루어져 있다. 또한 안전감압배기계통은 일차계통 냉각재를 IRWST로 방출하며 방출된 증기는 IRWST 수조수에 의해 응축된다. 이때 응축으로 인해 IRWST 수조수의 온도가 상승하면 IRWST에 연결된 정지냉각재계통을 사용하여 수조수를 냉각시킨다. 그림 2는 안전감압배기계통의 개략도이다. IRWST는 그림 3과 같이 격납용기 하부에 환형으로 설치되어 있다. Sparger 형상은 그림 4에 나타나 있으며, APR1400은 ABB-Atom에 의해 개발된 M150 sparger를 사용한다. Sparger 하단의 discharge head에는 원주 방향으로 직경 10mm의 작은 구멍이 1줄에 16개씩 9줄에 걸쳐서 144개가 뚫려져 있다. 그리고 sparger 밑바닥에는 직경 25mm의 구멍이 한 개가 있다. 또한 sparger 상단에는 Load Reduction Ring(LRR)이 있는데 IRWST로 방출되는 증기의 약 20%가 이곳을 통해 방출된다. IRWST는 격납용기 내에서 밀폐되어 있고 4개의 댐퍼(damper)가 배기 작용을 한다. Sparger 및 IRWST 관련 제원은 표 1에 정리되어 있다.

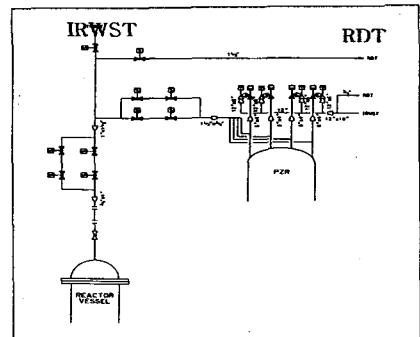


Fig.2. Schematic Diagram of SDVS[2]

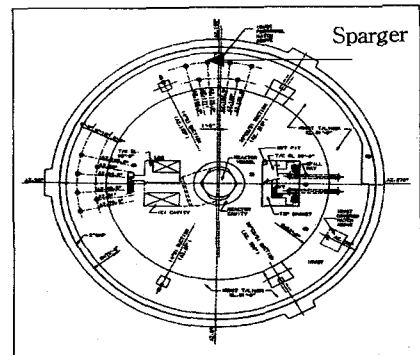


Fig.3. IRWST (Top View)[2]

3. 수치해석

3.1 임계유동 및 응축영역 모델

IOPOSRV시 sparger를 통해 증기가 IRWST 수조로 방출될 때에 sparger에서의 압력은 POSRV 개방 후 급격하게 상승하여 3.0초 이후부터는 1.8MPa를 유지한다[3,4]. 이때 IRWST 수조수는 대기압 상태이기 때문에 임계유동이 발생할 수 있다[3,4]. 본 계산에서는 가압기에서 sparger로 이상유동의 형태로 향하는 일차계통 냉각재를 이상기체와 단열상태로 가정하여 sparger로부터 방출되는 임계유량을 식(1), (2)와 같이 구하였다[3,4].

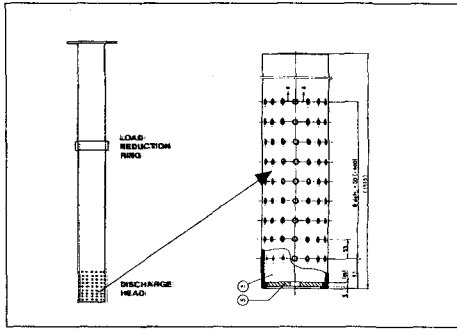


Fig.4. Sparger Geometry[2]

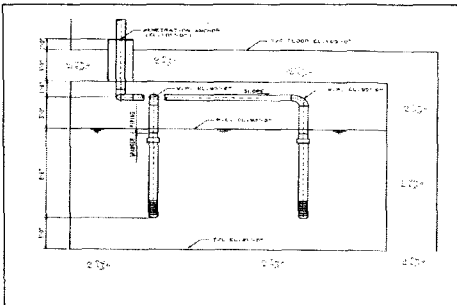


Fig.5. IRWST (Side View)[2]

Table.1. Parameters of IRWST & sparger[2]

	항 목	단 위	값
I R W S T	높이 (Height)	m	4.88
	폭 (Width)	m	5.73
	내벽/외벽 직경	m	32.30/43.76
	수조수 잠김높이 (초기)	m	3.66
	수조수 체적 (초기)	m ³	2505.6
	공기 체적 (초기)	m ³	835.2
	내벽과 sparger 사이 거리	m	1.52
	바닥과 sparger 사이 거리	m	0.91
	수조수 온도/압력	*F/psia	50~120/ 14.7±1
S p a r g e r	Sparger 길이	m	3.32
	Sparger 지름	cm	15.9
	Discharger Head 길이	cm	50.0
	한 개의 헤더내 Sparger 사이의 간격	m	3.04
	Discharger Header의 구멍 개수/직경	개/cm	144/1.0
	Discharger Header의 구멍들사이의 간격	cm	5

$$\dot{m} = C_f A_f P_o \sqrt{\frac{1}{R T_o \frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{P_e}{P_o} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_e}{P_o} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}} \quad (1)$$

$$T_o = T_{pzt} \left(\frac{P_o}{P_{pzt}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (2)$$

여기서 C_f 는 방출계수로 Idelchik의 "Handbook of Hydraulic Resistance"[5]에서 구하였고 A_f 는 sparger 하단의 방출구멍의 총 면적이고 P_o 는 sparge 방출구멍에서의 압력이다. P_e 는 sparger 주변에서의 IRWST 수조수 압력으로 대기압(0.1MPa)에 sparger 잠김높이(2.74m)에 해당하는 정압력(26.7KPa)을 더한 값인 0.1267MPa 으로 가정하였다. 증기가 IRWST내로 방출될 때 sparger 주변에서의 압력은 유동형태가 공기분출에서 증기방출로 변화됨에 따라 압력이 변하고 증기 방출시간에 따라서도 압력이 변화겠지만 IRWST 수조수가 대기압의 공기와 자유수면을 형성하고 있어 sparger 주변의 압력이 계속 0.1267MPa로 유지된다고 가정하였다. 이와 같이 계산된 sparger 한 개에서 방출되는 임계유량은 약 26.89kg/s 이다.

Sparger를 통해서 방출된 증기는 상대적으로 저온의 IRWST 수조수에 의해 즉시 응축이 되는데 CFX4.3과 같은 범용 전산유체코드에서는 증기의 응축현상을 정확하게 모사하는 모델이 현재까지는 없다. 따라서 본 계산에서는 증기가 sparger에서 방출된 다음 그림 6과 같은 증기분사거리 (steam penetration distance)내에서 증기가 모두 응축된다는 응축영역(condensation area) 모델을 이용하여 응축영역 출구에서의 응축수의 속도, 온도를 계산하여 CFX4.3의 입구경계조건으로 사용하였다[2,6]. 여기서 응축영역은 증기분사 거리에 크게 의존하는데, 이 증기분사거리는 sparger를 통과하는 유량, 방출구의 구멍지름 및 수조수의 온도, 압력의 함수로 알려져 있다. 일

반직으로 상대적으로 많은 증기유량이 좁은 방출구를 통해서 분사될 때 sparger의 반경방향(제트의 축방향)으로는 방출구멍 지름의 8~10배, 축방향(제트의 반경방향)으로는 지름의 2배정도로 증기 제트가 퍼지면서 응축된다고 보고되었다 [1,6]. 응축영역을 벗어나는 응축수의 속도, 온도는 응축영역내로 들어오는 증기의 유량, 엔탈피와 유입수조수(이후 유입수조수로 지칭)의 유량, 엔탈피를 바탕으로 질량 보존과 에너지 보존 법칙을 적용하여 구할 수 있다. Sparger 주변의 응축영역은 그림 6과 같이 정의되고 응축영역 경계에서 들어오는 증기와 유입수조수, 벗어나는 응축수를 간략하게 나타내면 그림 7과 같다. 여기서 응축영역내로 들어오는 증기의 유로면적은 sparger 표면에 있는 전체 방출구 구멍이 되고 응축수가 통과하는 유로면적은 응축영역의 바깥쪽 둘레의 표면적으로 가정할 수 있다. 응축수의 속도, 온도를 구하기 위해서는 응축영역내로 들어오는 증기량과 증기분사의 영향으로 인해 응축영역내로 들어오게 되는 유입수조수의 유량을 먼저 평가해야 한다. 증기유량은 앞에서 계산한 임계유량이 되며 응축영역내로 들어오는 유입수조수의 유량은 식(3), (4)의 관계식을 이용하여 계산할 수 있다. 또한 식(3), (4)를 풀어서 식(5)와 같이 응축수의 유량(\dot{m}_{out})을 구할 수 있는데, 유입수조수의 엔탈피(h_{in})와 응축수의 엔탈피(h_{out})를 알아야만 계산할 수 있다. 유입수조수의 엔탈피는 한국수력원자력주식회사에서 제공한 IRWST 수조수의 초기상태 값(84 °F, 14.7psi)으로 가정하여 ASME 증기표에서 구할 수 있고 응축수의 엔탈피는 응축영역의 바깥 경계면에서의 압력, 온도를 알아야 한다. 본 계산에서는 이 엔탈피 값을 sparger의 잠김깊이에 해당하는 압력에서의 포화상태로 가정하여 구하였다. 이와 같이 구한 유입수조수 및 응축수의 유량은 각각 약 195kg/s, 222kg/s 이다. 본 계산에서는 유입수조수와 응축수의 엔탈피는 계속 변화하지 않고 유지된다고 가정하였다. 응축수의 유량을 응축경계면에서의 표면적과 밀도로 나눈 응축수의 속도는 약 0.55m/s 가 된다. 여기서 응축수가 응축경계면을 균일하게 통과한다고 가정하였다. 이렇게 구한 응축수의 속도와 온도는 0.55m/s와 106°C(222°F)이며, 이 값이 CFX 전산해석의 입구 경계조건이 된다. 실제 IRWST내 유동장에서는 sparger 주변의 IRWST 수조수 온도와 압력에 따라서 응축수의 속도와 온도가 약간씩 변화겠지만 본 계산에서는 0.55m/s와 106°C(222°F)로 계속 유지된다고 가정하였다.

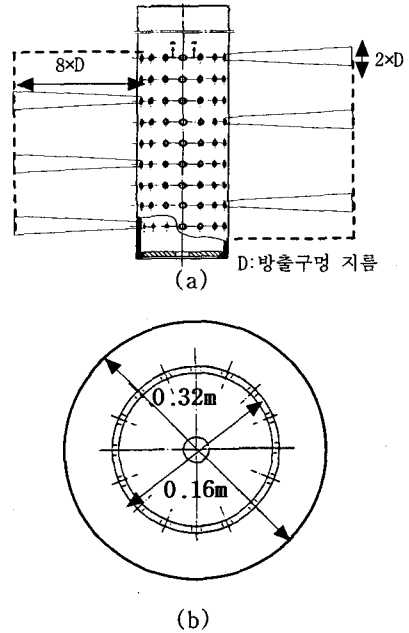


Fig.6. Condensation Area Model around Sparger

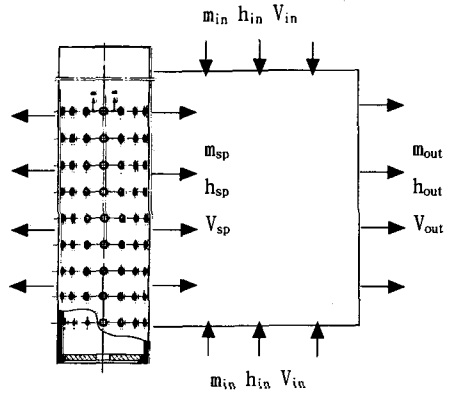


Fig.7. Steam, Entrained Water & Condensated Water through Condensation Area Model

$$\dot{m}_m + \dot{m}_{out} = \dot{m}_p \quad (3)$$

$$\dot{m}_p h_p + \dot{m}_m h_m = \dot{m}_m h_m \quad (4)$$

$$\dot{m}_{out} = \dot{m}_p \frac{h_p - h_m}{h_{out} - h_m} \quad (5)$$

3.2 지배방정식 및 계산 알고리즘

본 계산은 범용 전산유체코드인 CFX4.3를 사용하였다. CFX4.3는 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation) 알고리즘을 사용하며 연속방정식, Navier-Stokes 운동량 방정식

과 에너지방정식 등을 푼다. 또한 본 계산에 사용된 난류 모델은 표준 k-ε이다[7]. 본 계산은 증기가 물 속에 잠겨있는 sparger를 통해 물과 공기가 자유수면(free surface)을 형성하고 있는 IRWST로 방출되어 응축되고, 이로 인해 발생되는 IRWST내 응축수 및 수조수의 유동현상을 과도상태로 묘사하는 것이다. 이와 같은 유동현상을 묘사하기 위해 IRWST내의 유동장을 비압축성 유동, 다상 유동, 부력 유동, 열전달, 난류 모델을 사용하였다. 여기서 증기응축 현상은 증기응축 영역 모델을 도입하여 응축수의 속도, 온도를 도출하여 경계조건으로 주었다. 본 계산에 사용된 다상유동 모델은 "multi-fluid model"의 간략한 형태인 "homogeneous model"을 사용하였다.

3.3 해석대상 격자

본 계산을 위한 격자모델은 그림 3의 IRWST 도면을 바탕으로 CFX-Meshbuild를 사용하여 그림 8과 같이 다중블록으로 생성하였다. IOPOSRSV 일차계통냉각재는 안전감압배기계통의 한 트레인만을 통과하여 6개의 sparger를 거의 균일하게 관통해서 IRWST로 방출된다. 이때 나머지 한 개의 트레인에서는 방출되는 냉각재가 없기 때문에 냉각재 방출이 있는 한 개 트레인의 6개의 sparger를 고려하여 전체 IRWST의 1/4만 모델링하였다. 격자생성시 sparger의 discharge head 부분과 그 주변은 이차유동이 발생하는등 유동현상이 매우 복잡할 것으로 예상되어 격자간격을 매우 세밀하게 하였고, sparger에서 멀리 떨어진 곳은 속도나 온도의 변화가 크지 않을 것으로 판단되어 격자간격을 조금 크게 하였다. Sparger 배관 내부의 유동현상은 본 계산에서 고려의 대상이 아니므로 격자모델링에서 sparger 배관 표면만 모델링하였다. LRR과 discharge head 밑부분의 2.5 cm 구멍 한 개는 전체유로면적에서 차지하는 유로면적이 각각 15%, 3% 이므로 무시하였다. 또한 discharge head 모델링에서는 실제 증기가 방출될때는 discharger head에서 반경방향(수평방향)으로 분사되기 때문에 이를 묘사하기 위해서 입구조건을 discharger head 측면에 지정해주었다. 그리고 격자모델링에서 discharge head의 반경은 증기응축 영역을 고려하여 그림 6과 같이 0.32 m로 하였다. 실제 IRWST 구조물은 상부가 밀폐되어 있고 4개의 압력 탬퍼에 의하여 격납용기 내부 공기와 순환되고 있지만, 본 계산에서는 상부가 개방되어 있는 것으로 가정하여 모델링하였다. 또한 공기, 물의 자유수면의 모델링은 초기조건에서 사용자 프로그램(User Fortran)을 활용하여 모델링하였다. 격자모델에서 생성된 블록 및 격자 셀 수는 각각 425개, 33,504개 이다.

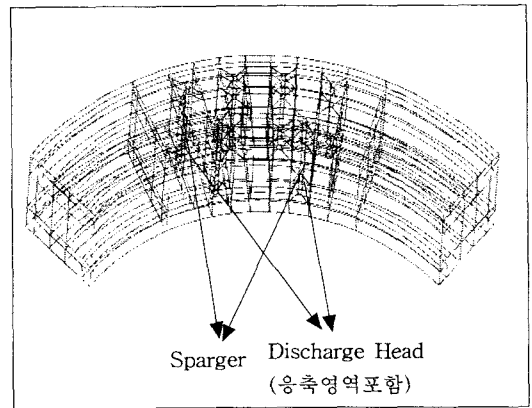


Fig.8. Grid Model

3.4 경계조건 및 계산절차

본 계산에서 응축영역의 바깥부분에 Dirichlet 조건인 입구경계조건을 지정하였고 속도와 k, ε 값 등은 표 2와 같이 주었다. IRWST의 윗부분에는 Neumann 조건인 압력출구경계조건을 대기압 상태로 주었고 공기만 입출입 가능하도록 하였다. 본 해석대상 격자는 1/4 대칭조건이기 때문에 IRWST의 오른쪽 벽면은 대칭조건을 주었으나 왼쪽 벽면은 유동이 매우 약할 것으로 예상되어 CFX4.3의 벽면조건으로 주었다. 질량보존, 엔탈피, 속도에 대한 계산오차가 1.0×10^{-4} 정도가 될 때 까지 반복계산을 수행하였다.

Table. 2. Boundary Condition Values & Properties Values

항 목	단 위	값
속도	m/s	0.55
온도	℃(°F)	106.78 (222.0)
k_i	m^2/s^2	$k_{inlet} = 0.002 V_{inlet}^2$
ϵ_i	m^2/s^3	$\epsilon_{inlet} = \frac{k_{inlet}^2}{0.3D}$
$\beta(=\Delta\rho/\rho\Delta T)$	K^{-1}	3.30E-04
밀도	공기	1.189
	수조수	995.92
점도	공기	1.8160E-05
	수조수	8.0796E-04
IRWST 상부 공기압력	MPa	0.1

3.5 해석결과

IOPOSRV시 일차계통냉각재가 이상유동의 형태로 sparger를 통하여 IRWST로 방출될 때의 IRWST Pool내의 열유동 현상을 약 50초 동안 해석하여 다음과 같은 결과를 얻었다. POSRV 개방 후 약 7초에서 sparger discharge head의 중간높이에서 IRWST내 속도 및 온도분포는 그림 9, 10에 나타나 있다. 속도분포 그림에서 discharge head를 중심으로 응축수가 방사 모양으로 균일하게 퍼져나감을 알 수 있다. 온도분포 그림에서는 discharge head 주변은 방출된 응축수에 의해 초기온도인 84°F에서 약 220°F로 즉시 상승함을 알 수 있고 "나"와 같이 sparger 사이 지점에서는 초기온도인 85°F가 그대로 유지되는 것으로 나타났다. 이것은 응축수의 속도가 0.55m/s로 작기 때문에 discharge head에서 방출된 후 반경 방향으로 진행하다가 부력효과에 의해 응축수가 대부분 위로 상승하기 때문인 것으로 판단된다. 본 유동해석 결과를 자세히 관찰하기 위해 IRWST내 sparger 2, 3(그림 10)을 따라 원주방향으로 절단하여 속도, 온도분포를 나타낸 것이 그림 11, 12에 나타나 있고 sparger 5(그림 10)를 반경방향으로 절단하여 속도, 온도분포를 나타낸 것이 그림 13, 14에 나타나 있다. 그림 11의 속도분포에 의하면 응축수가 0.55m/s로 방출된 다음 "가"와 같이 부력효과에 의해 위로 상승하는 것을 볼 수 있고 sparger 바로 윗부분("나")과 밑부분("다")에서는 sparger로 향하는 이차유동이 발생함을 알 수 있다. 이 "나", "다" 지점에 있는 IRWST 수조수가 방출된 증기가 응축될 때 방출되는 증기쪽으로 흘러가기 때문에 안정적 증기 응축에 관련된 국부온도 지점이 될 수 있다. 이 지점의 온도가 200°F 이상이면 증기의 응축현상이 불안정하게 되는 것이다. 온도분포는 그림 12에 나타나 있는데, 응축수와 IRWST 수조수의 유동형태에 따라서 온도가 분포되는 것을 알 수 있다. Discharge head의 바로 옆부분은 방출되는 응축수로 인하여 220°F로 즉시 상승하지만 위 부분은 100~160°F로 유지됨을 알 수 있다. 또한 부력효과 때문에 sparger discharge head 주변의 온도분포가 대칭형이 아니라 위로 치우쳐 있는 모양("가")인 것을 알 수 있다. 그림 13은 sparger 5 주변의 반경방향 속도분포인데, 전체적인 유동형태는 그림 11과 유사하며 sparger 5 왼쪽부분이 IRWST 내벽과 가깝기 때문에 방출된 응축수의 영향으로 IRWST 수조수가 내벽에 부딪힌 다음 sparger 5 밑부분쪽으로 흘러오는 현상("가")이 있음이 알 수 있다. 또한 그림 14의 온도분포는 전체적으로 그림 12와 유사함을 알 수 있다. 그리고 공기의 온도는 초기조건 온도인 85°F로 거의 유지되는 것을 알 수 있다. IOPOSRV

후 50초에서의 온도분포는 그림 15와 같다. 증기의 방출시간이 증가함에 따라 응축수가 IRWST Pool 내로 퍼져나가는 효과보다 부력효과에 의해 IRWST 수조수가 위로 상승하는 효과가 더 큼("가")을 알 수 있다. 또한 상승한 IRWST 수조수는 주변으로 이동하는 것을 "나"와 같이 알 수 있다. 이와 같은 계산결과를 바탕으로 안정적 증기응축에 영향을 미치는 국부온도로 예측되는 지점(그림 11의 P1, P2와 그림 13의 P3, P4)과 부력효과에 의한 IRWST 수조수의 유동형태를 파악할 수 있는 지점(그림 11의 P5와 그림 10의 P6, P5와 P6은 같은 높이임)을 선택하여 시간에 따른 온도변화를 나타낸 그래프는 그림 16과 같다. P1과 P3은 sparger 2, 5의 discharge head 바로 윗부분의 온도로 0~10초 사이에 84°F에서 150°F로 급격하게 상승하고 그 이후로는 완만하게 증가한다. P2와 P4는 sparger 2의 바로 밑부분의 온도로 초기온도인 84°F에서 거의 변하지 않는 것으로 나타났는데, 이것은 방출된 응축수가 대부분 부력효과에 의하여 위부분으로 상승하기 때문에 응축수의 영향을 거의 받지 않는 것으로 판단된다. P5는 sparger 2와 3의 가운데 위치에서 discharge head로부터 약 2.6m 위에 있는 지점으로 0~15초까지는 온도변화가 거의 일어나지 않다가 15~25초 사이에 가파르게 온도상승이 일어난 다음 다시 완만하게 온도가 상승하는 것을 볼 수 있다. 이것은 계산초기에는 부력효과가 작아서 이곳까지 응축수의 영향이 미치지 않아서 저온으로 유지되다가 일정시간이 경과하면 고온으로 상승된 IRWST 수조수 온도가 이곳에 도달하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 P6의 온도는 계속 초기온도인 84°F를 유지하는데, 이것은 P6의 위치가 sparger 4로부터 어느 정도 떨어져 있기 때문에 부력효과가 아직 미치지 못한 것으로 판단되며 시간이 경과하면 온도가 상승할 것으로 예상된다.

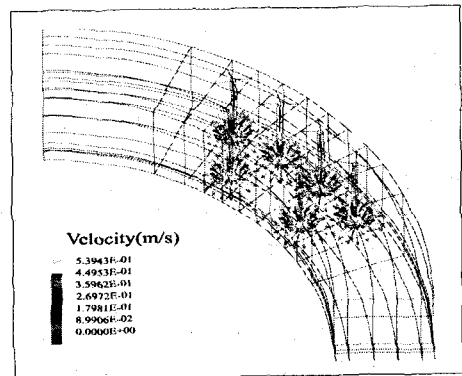


Fig.9. Velocity Profile in IRWST Pool at 7sec. (at H=1.1m)

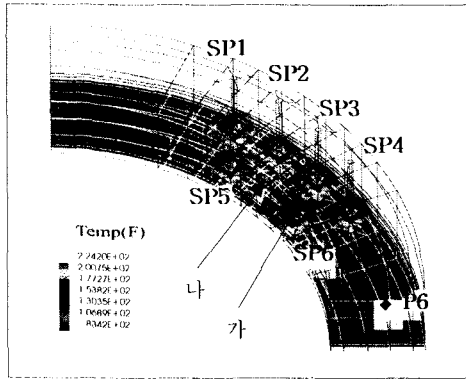


Fig.10. Temp. Distribution in IRWST Pool at 7sec. (at H=1.1m)

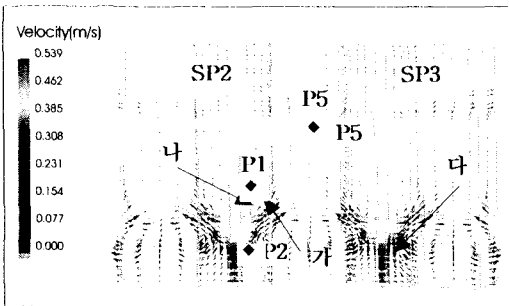


Fig.11. Velocity Profile around SP2,3 at 7sec. (Cut Surface in Azimuthal Direction)

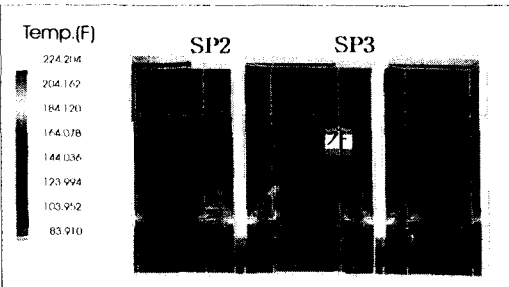


Fig.12. Temp. Distribution around SP2, 3 (Cut Surface in Azimuthal Direction)

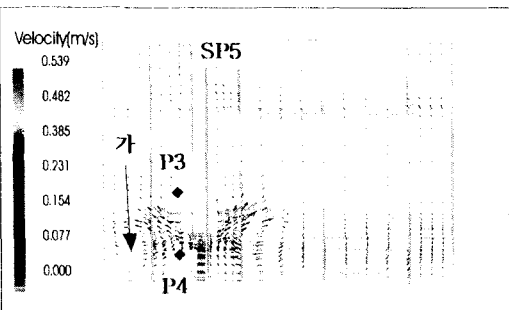


Fig.13. Velocity Profile around SP5 (Cut Surface in Radial Direction)

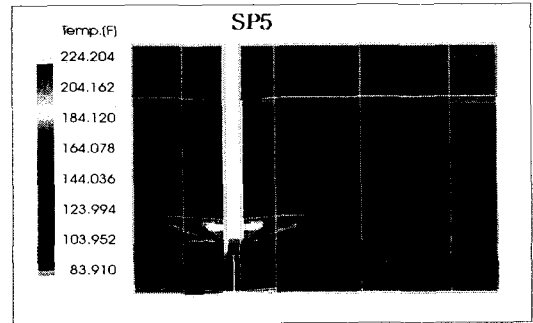


Fig.14. Temp. Distribution around SP5 at 7sec. (Cut Surface in Radial Direction)

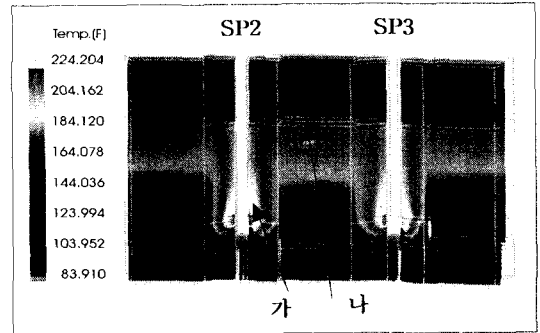


Fig.15. Temp. Distribution around SP5 at 50sec. (Cut Surface in Radial Direction)

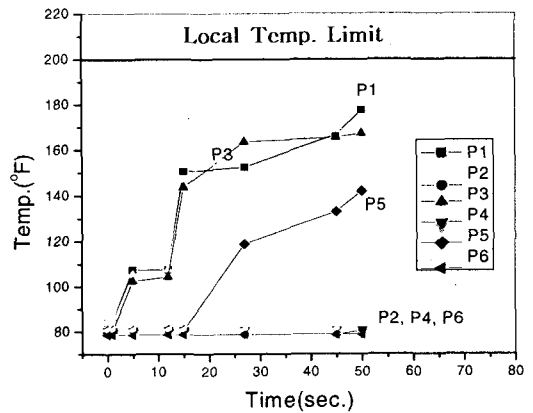


Fig.16. Local Temp. Variation in IRWST Pool

4. 결론 및 향후 보완사항

APR1400 안전감압배기계통 및 IRWST의 설계가 불안정 증기응축 관련 온도요건을 만족하는지를 조사하기 위해서 안전감압계통의 설계기준사고인 IOPOSRV시 냉각재가 이상유체형태로 sparger를 통하여 IRWST로 방출 될 때의 IRWST내 열수력적 현상을 범용 전산유체코드인 CFX4.3를 사용하여 과도상태로 약 50초간 해석하였다. 전산해석을 통하여 증기가 sparger를 통해서 방출될 때의 유동형상은 부력이 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다. 또한 IOPOSRV 개시 후 약 50초까지는 IRWST 수조내의 sparger discharge head 주변의 온도가 수조온도 요건인 200°F를 초과하지 않음을 확인하였다. 특히 discharge head 밑부분에서의 온도는 방출된 응축수가 부력효과에 의하여 대부분 위로 상승하기 때문에 거의 상승하지 않는 것으로 나타났다. 또한 discharger head 바로 윗부분의 온도는 다른 지점에 비해서 가장 많이 상승하지만 IOPOSRV 개시 후 시간이 지나면서 온도상승 기울기가 상당히 줄어들기 때문에 국부 온도요건을 넘기까지는 상당히 시간이 걸릴 것으로 판단된다. 이와 같은 계산결과를 좀더 보완하면 불안정한 증기응축을 방지하기 위해서 IRWST Pool를 냉각시키는 시점을 제안하는 근거를 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1)U.S NRC, 1981, "Suppression Pool Temperature Limits for BWR Containments", NUREG-0783
- (2)한국전력기술주식회사, 1999 "IRWST Thermal Hydraulic Load Analysis Report", N-001-END461-201
- (3)Y. Y. Bae etc, 1999, "Numerical Simulation of Unsteady Flow Through Pipe Including Sparger", Proceedings of the 3rd ASME/JSME Joint Fluids Eng. Conference
- (4)Y. Y. Bae etc, 2000, "Analysis on Flow Transients in a Pipe with Sparger and Load Reduction Ring", Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol. 27, No. 8, pp.1131-1142

- (5)I. E. Idelchik, 1986, Handbook of Hydraulic Resistance, 2nd ed., Hemisphere Publishing Corporation
- (6)D. H. Cook, 1994, "Pressure Suppression Pool Thermal Mixing", NUREG-3471, ORNL/TM-8906
- (7)AEA Technology, 2000, CFX4.3 Manual