2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

POSRV 작동 시 TEMPEST Code를 이용한 IRWST Pool 수온 분석

IRWST Pool Water Temperature Distribution Analysis During POSRV Actuation Using TEMPEST Code

문 영 태, 라 인 식, 고 희 진, 이 세 원
한국전력기술㈜
경기도 용인시 구성읍 마북리 360-9번지

요 약

차세대원전에서 POSRV(Pilot Operated Safety Relief Valve)가 작동되는 사고 시에 Sparger를 통하여 물과 공기가 방출된 후 순수 증기가 IRWST (In-containment Refueling Water Storage Tank) 내로 방출된다. Sparger 주변 수조수 온도가 낮은 경우에는 방출된 증기가 IRWST 수조내의 과냉각수와 직접 접촉응축을 통하여 안정된 방법으로 응축되어 심각한 열수력하중을 유발하지 않는다. 그러나, 수조내로의 연속적인 증기 방출은 국부 온도의 상승을 초래하여 증기응축이 불안정하게 된다. 방출된 증기기포는 응축될 때까지 특정 주기로 증기압력이 수조수 압력보다 큰 경우에는 팽창하고, 작을 경우에는 수축하여 응축진동 현상을 일으킬 수 있다. 이러한 응축진동은 IRWST 구조물에 큰 하중을 유발할 수 있다. 본 논문에서는 차세대원전의 POSRV 오작동 사고 시 TEMPEST 전산코드를 이용하여 IRWST 수조수 온도분포를 분석하였으며, 분석결과 IRWST의 국부온도가 200°F를 초과하지 않으므로 안정적인 증기응축이라는 결론을 도출할 수 있었다. 또한 차세대원전에서는 RCS 급속감압을 위한 냉각재 방출 시 IRWST의 물을 정지냉각계통이나 격납건물 살수계통의 열교환기를 이용하여 냉각할 수 있다. 현재까지 IRWST 냉각과 관련한 세부사항이 결정되지 않았으므로, 본 논문에서는 국부온도에 대한 IRWST 냉각관련 변수의 민감도 분석을 수행하여 이들에 의한 IRWST 수온에 미치는 영향을 살펴보았다.

ABSTRACT

Following air clearing, essentially pure steam is injected into the IRWST pool. Experiments indicate that the steam jet/water interface at the discharge line exit during this phase is relatively stationary when the local pool temperature is low. Thus, the condensation proceeds in a stable manner, and no significant hydrodynamic loads are experienced. Continued steam blowdown into the pool will increase the local pool temperature. The condensation rates at the turbulent steam/water interface are eventually reduced to levels below those needed to readily condense the discharged steam. At this threshold level, the condensation process may become unstable; for example, steam bubbles may be formed and shed from the pipe exit, and the bubbles oscillate and collapse, giving rise to severe pressure oscillations which are imposed on the pool boundaries. In this paper, the detail IRWST temperature during the postulated POSRV actuation is analyzed using TEMPEST code. From the results that the local pool temperature did not exceed 200 °F, it might be concluded that the steam condensation in KNGR IRWST is stable. Furthermore, during the “bleed” phase of RCS rapid depressurization, the IRWST water may be cooled by the SC or the CS heat exchangers. However, in this stage, the specifications for IRWST cooling are not fixed. Therefore, the impact of parameter changes related to IRWST cooling on local pool temperature is evaluated.

1. 서 론

차세대원전은 결정론적 측면과 확률론적 측면에서 안전성 향상을 위한 많은 설계개선 사항을 적용한 4,000 MWt급 개량형 경수로이다. 차세대원전의 주요 특징중의 하나가 공학적안전설비와 연관된 격납건물내 핵연료재장전수조 (IRWST: In-containment Refueling Water Storage Tank)이다. IRWST 계통은 핵연료재장전 운전시 재장전수조에 냉각수를 공급하며, 안전주입계통(SIS: Safety Injection System)과 격납건물살수계통(CSS: Containment Spray System)에 붕산수를 공급하는 안전기능을 수행하며, 정상운전, 설계기준사고, 전급수상실사고(TLOFW)와 같은 천이사고(Transient) 시 POSRV(Pilot Operated Safety Relief Valve)로부터 방출되는 증기를 응축하는 기능 등을 수행한다. 증기발생기 이차측 열제거 기능 상실을 동반하는 소형냉각재상실사고 또는 천이사고 시에, 4대의 POSRV가 원자로냉각재계통(RCS: Reactor Coolant System)의 과압방지 기능을 수행하고 RCS와 노심의 건전성 유지를 위하여 안전주입계통과 함께 안전감압배기계통(SDVS: Safety Depressurization and Vent System)을 이용하여 충전 및 유출 운전(Feed and Bleed Operation)을 수행한다.

IRWST 구조물에서의 열수력하중은 RCS로부터의 고온 ·고압의 유체가 SDVS 배관을 거쳐 IRWST로 방출되면서 발생한다. POSRV가 작동되면 방출된 원자로냉각재에 의해 시간에 따라 Water, 공기, 증기, 이상유체, 액체 순으로 IRWST로 방출된다.

안전감압배기계통 배관 내의 공기가 방출된 후 증기가 Sparger를 통하여 IRWST로 방출된다. IRWST 내의 국부온도가 낮은 경우에는 방출된 증기가 IRWST 수조내의 과냉각수와 직접 접촉응축을 통하여 안정된 방법으로 응축되어 심각한 열수력하중을 유발하지 않는다. 그러나, 수조내로의 연속적인 증기 방출은 국부 온도의 상승을 초래하여 증기응축이 불안정하게 된다. 방출된 증기기포는 응축될 때까지 특정 주기로 증기압력이 수조수 압력보다 큰 경우에는 팽창하고, 작을 경우에는 수축하여 응축진동 현상을 일으킬 수 있다. 이러한 응축진동은 IRWST 구조물에 큰 하중을 유발할 수 있다.[1] 증기 응축률에 따라 안정(Stable) 및 불안정(Unstable) 증기응축으로 구분한다. 불안정 증기응축으로 인하여 1972년 비등경수로인 독일의 Wurgassen원전에서 심각한 격납건물 진동이 발생하여 응축수조 라이너가 지지대와 분리, 균열 및 누설되어 운전원에 의해 원자로가 긴급 정지되는 사고가 발생하였다. 따라서, 미국 NRC는 불안정한 증기응축 현상을 원천적으로 방지하기 위해 Sparger 유형별 온도 제한치를 비등경수로 규제요건으로 설정하였다. 그러나, 가압경수로에 적용되는 관련요건이 없고, 차세대원전에서 사용하는 Sparger에 대한 온도 제한치는 아직까지 규제요건화 되어 있지 않다. 따라서, 비등경수로의 온도 요건 중 가장 보수적인 "국부 온도 200°F를 초과하지 않아야 한다."는 규제요건을 잠정적으로 차세대원전의 IRWST 온도 제한치로 설정하였다. 따라서 차세대원전의 IRWST에 대하여 증기응축에 관한 이 국부온도 요건의 만족 여부 평가가 요구되어, 설계기준사고인 POSRV 오작동 (IOPOSRV: Inadvertent Opening of Pilot Operated Safety Relief Valve) 사고에 대하여 TEMPEST 전산코드를 이용하여 IRWST 수온분포 분석을 수행하였다.

또한 차세대원전에서는 일차냉각재계통의 급속감압을 위한 유출단계에서 IRWST내의 물은 정지냉각계통(SCS: Shutdown Cooling System)이나 격납건물 살수계통의 열교환기를 이용하여 냉각하도록 설계되어 있다. 그러므로 IRWST 냉각과 관련한 냉각수의 방출위치, 방향 및 방출구 형태에 대한 민감도 분석을 통하여 IRWST 국부온도에 대한 영향을 평가하였다.

2. IRWST 관련 차세대원전의 설계특성

차세대원전에서 IRWST와 관련된 주요 계통 및 기기는 가압기 POSRV를 포함하는 안전감압배기계통, 정지냉각계통, 안전주입계통 및 격납건물 살수계통이 있다.

차세대원전에서 RCS의 과압방지는 원자로보호계통과 가압기의 POSRV를 이용하여 이루어진다.

POSRV는 직렬로 연결된 안전밸브와 격리밸브가 서로 접합되어 하나의 밸브 집합체를 이루고 있으며 가압기 상부에는 이러한 밸브 집합체가 네 곳의 서로 다른 위치에 설치되어 있다. 안전밸브와 격리밸브는 같은 구조로 되어 있으며 안전밸브는 U 모양의 밀봉수배관(Loop Seal)을 통해 가압기와 연결되어 있어 가압기 증기와의 직접 접촉에 의한 안전밸브 시트 손상을 방지할 수 있으며 가압기 상부에 집적되어 있는 수소 가스의 누설을 방지할 수 있다. 4개의 안전밸브 및 격리밸브의 방출관은 하나의 개방된 링(Ring) 형상의 방출헤더(Torus)에 연결되어 있어 안전밸브 개방 시 가압기 증기가 IRWST로 이송될 수 있는 유로를 형성한다. 그림1은 가압기의 POSRV에 대한 개략도이다.

안전감압배기계통은 사고 후 가압기와 원자로용기 상부로부터 비응축성기체를 배출시키기 위한 안전등급의 수단을 제공하고, 가압기 주살수와 보조살수계통 기능이 상실된 사고 시에 RCS를 감압 시킨다. 또한 전급수상실사고와 같은 설계기준외사고 시에 충전 및 유출 유로를 제공하여 RCS를 급속감압할 수 있도록 하며, 중대사고 시에 RCS를 급속감압할 수 있는 능력을 제공한다. 이 계통은 RCS 기체배기(RCGV: Reactor Coolant Gas Vent) 밸브, POSRV, 방출배관, I형 Spargers로 구성된다.

차세대원전에 적용된 Sparger는 그림 2에서와 같이 ABB-Atom사가 개발한 설계에 기준을 둔 약 6inch의 직경을 갖는 원통형태의 I형 Sparger로서 끝단과 물 표면사이에 방출배관의 유동을 완화시켜 방출압력을 감소시키기 위하여 하중감소링(LRR: Load Reduction Ring)을 갖고 있다. Sparger의 기능은 증기를 균일하게 응축하고, 증기와 IRWST 냉각수의 혼합을 증진시키며, 물과 공기 방출 시 열수력하중을 최소화하는데 있다. 차세대원전 IRWST에는 총 12개의 Sparger가 설치되어 있으며, 그림 3과 같이 이웃한 각 Sparger간의 간격은 10ft를 유지하고 있다. 각 Sparger는 5ft 길이의 방출 구멍을 갖고 있으며, 방출구멍의 중심부 위치는 바닥면으로부터 5.5ft 상부에 위치한다.

IRWST는 격납건물살수계통 작동 시 살수를 중력으로 회수하기 위하여 가능한 한 낮은 곳에 설치하였으며, IRWST의 용량과 위치를 감안하여, 격납건물 이차 차폐벽과 격납건물 내벽사이의 환형공간을 IRWST로 활용하였다. 그림 4와 같이 IRWST는 격납건물 기초층으로부터 IRWST의 천정까지 16 ft 높이의 구조로 설계하여 정상운전 시 물의 깊이는 11.5ft로서 653,100 gallon의 붕산수를 수용할 수 있도록 하였다. IRWST 바닥에는 Reg. Guide 1.82의 요건을 만족하는 debris screen이 설치된 집수정이 위치하여 안전주입계통 및 격납건물살수계통 등 안전관련 펌프의 흡입배관과 연결되도록 하였다.

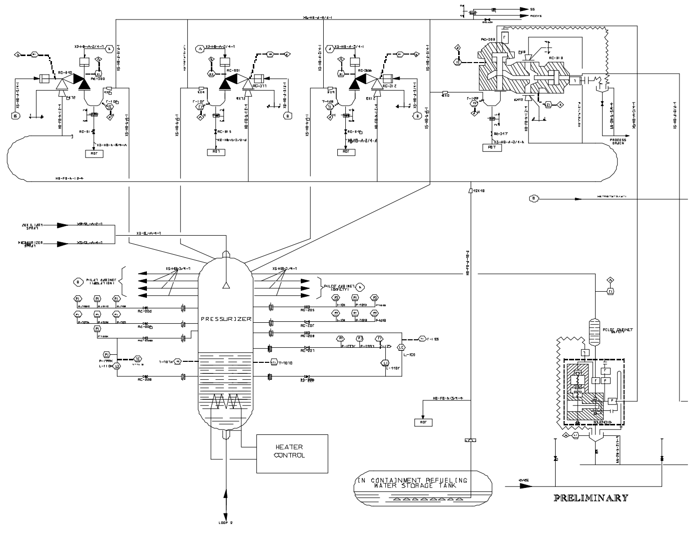


그림 1. 가압기 POSRVs 개략도

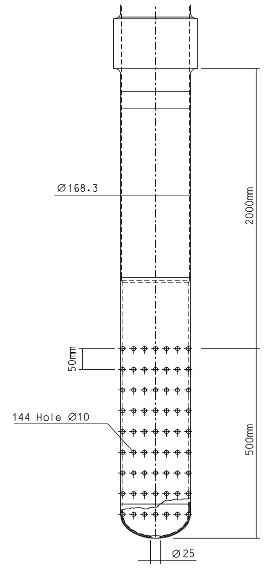


그림 2 차세대원전 IRWST Sparger

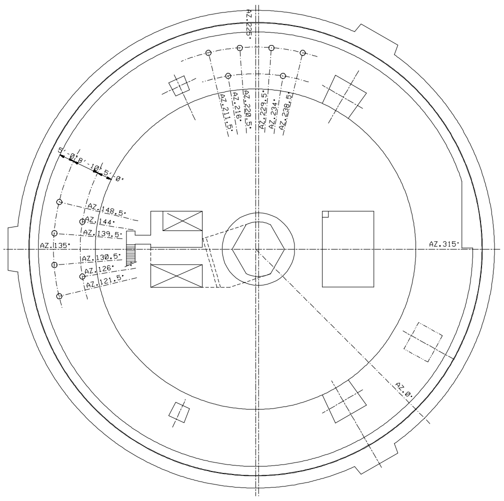


그림 3. **차세대원전** IRWST **평면도**

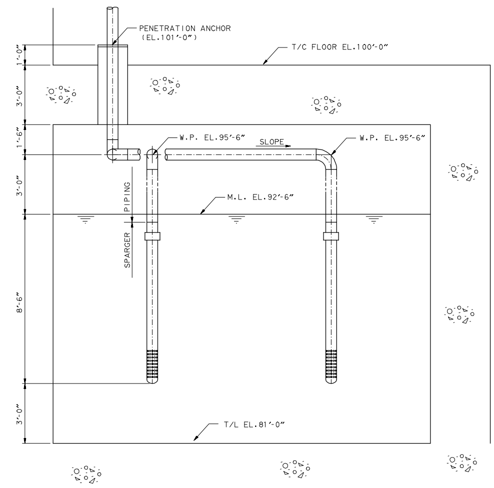


그림 4. **차세대원전** IRWST **입면도**

3. IRWST 수온 분포 분석

가. 차세대원전 증기 응축 지역 모델

본 분석에서 사용된 TEMPEST 전산코드는 상변화를 묘사할 수 없다. 그러므로 TEMPEST를 이용하여 IRWST의 수온분포 분석을 수행하기 위하여서는 Sparger를 통하여 방출되는 증기원 대신에 증기응축 경계(SCRB: Steam Condensation Region Boundary)에서의 적절한 수원(Source)과 수침원(Sink)에 대한 모델을 구성하여야 한다. 이 증기응축 분석은 SCRB에서의 경계조건을 얻고 Sparger를 통하여 방출되는 증기가 응축되는 지역으로 포획되는 물의 유량을 결정하기 위함이다. 증기응축지역은 I형 Sparger와 응축 지역을 포함하는 제어체적으로 정의한다. 응축지역 결정은 다음의 3단계로 구분된다. 첫째, I형 Sparger 출구에서의 열수력학적 조건 결정, 두 번째로 응축지역을 결정하고, 마지막으로 질량과 에너지 보존법칙을 사용하여 SCRB에서의 경계조건을 계산한다.

1) I형 Sparger 출구에서의 열수력학적 조건

IRWST 수조에서의 온도분포를 보수적으로 평가하기 위하여, I형 Sparger 출구에서의 엔탈피 조건은 방출배관에서의 열손실을 무시하고 POSRV에서의 조건과 동일하다고 가정한다. I형 Sparger 출구에서의 질량 및 에너지 방출량은 그림 5와 같다. 7.43ft의 물속에 있는 Sparger 중심에서의 정압은 3.2 psid의 수두차를 고려하여 설정하였다.

2) 증기응축지역 결정

NEDO-21061에 기술된 바에 의하면 상대적으로 높은 증기 유량과 작은 유로면적 조건에서는, 감압풀에서의 증기 제트가 대략 직경이 방출배관 직경의 2배가 되고 길이가 방출배관 직경의 8배가 된다. 따라서 증기 응축지역의 길이는 Sparger 구멍의 8배로 결정하였다.

3) SCRB에서의 경계조건

SCRB에서의 경계조건은 응축지역 경계에 걸쳐 질량 및 에너지 방정식으로 구할 수 있다. 응축지역으로 유입되는 전체 물의 질량 및 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} - \dot{m}_{s/w}$$

$$\dot{m}_{s/w} h_{s/w} + \dot{m}_{in} h_{in} = \dot{m}_{s/w} h_{s/w} + (\dot{m}_{out} - \dot{m}_{s/w}) h_{in} = \dot{m}_{out} h_{out}$$

여기서, $\dot{m}_{in}$, h_{in} = Sparger를 통하여 방출되는 증기가 응축되는 응축지역으로 유입되는 물의 유량 및 엔탈피

$\dot{m}_{out}$, h_{out} = 응축지역에서 빠져나가는 물의 유량 및 엔탈피

$\dot{m}_{s/w}$, $h_{s/w}$ = Sparger를 통하여 응축지역으로 방출되는 증기와 증기-물 혼합물의 유량 및 엔탈피

IRWST 수조의 온도분포 분석의 간편성과 보수성을 위하여, 응축지역에서 나가는 물의 엔탈피는 수두를 고려한 수조 압력에서의 포화수의 엔탈피로, 응축지역으로 유입되는 물의 엔탈피는 수조내의 초기 조건에서의 물의 엔탈피로 가정하였다. 응축지역을 빠져나가는 물의 유량과 유로면적, 응축지역으로 유입되는 유로면적은 다음 식으로 계산된다.

$$\dot{m}_{out} = \dot{m}_{s/w} \frac{h_{s/w} - h_{in}}{h_{out} - h_{in}},$$

$$A_{out} = pDH, \quad A_{in} = A_{top} + A_{bot}$$

출구와 입구에서의 속도는 6개의 Spargers 유로면적으로 유량을 나눈 값과 물의 밀도에 의해 계산한다.

나. TEMPEST 모델링

TEMPEST는 단상 또는 상변화가 없는 다상 유동에 대한 유동장(온도, 압력, 속도 등)을 다차원 해석하는 3차원 해석코드이며, 난류모델, 완전 음해법, 비압축성 유동을 적용할 수 있으며, 시간 간격이 자동 조절되며 수치해석 안전성이 뛰어난 코드이다.[2] TEMPEST의 수치해법은 semi-implicit, 유한체적 방법론을 근거로 하여, 비압축성 유동장에서 3차원 질량, 운동량, 에너지 보존에 관한 시간종속 방정식을 풀기 위하여 사용된다. 코드 활용사례로는 액체 금속냉각로 열수력 거동, 경수로 저온관 및 하향 유로(Downcommer)의 열수력 거동, 사용후 핵연료 저장시설의 냉각성능 해석, 격납건물 내 격실에서의 수소 이동 특성 연구 (비교실험), 밀폐형 공간(Plenum)에서의 혼합특성 분석 등이 있다.

TEMPEST에서 사용되는 운동량, 열, 질량 이송에 관한 지배방정식은 질량, 운동량, 에너지 보존법칙에 근거한다. 열역학적 상태와 요소 상관식은 다음의 형태를 갖도록 요구된다.

$$r = f(P, T, C_i)$$

여기서, ρ는 밀도, P는 압력, T는 온도, C_i는 i번째 요소의 부분 밀도이다. 부가적으로 시간 종속적인 매질의 성질을 정의하는데 필요한 다른 상관식이 요구된다. 실험상관식은 특정 상황을 규정하는 drag 계수, film 계수, 다른 상관식을 묘사하기 위하여 필요하다. TEMPEST에서 난류는 Newtonian, 등방성 유효 viscosity, μ_T를 사용하여 묘사된다. Prandtl-Kolmogorov 가설이 k-ε 난류모델을 통한 유효 viscosity를 속도와 길이에 연관시키기 위하여 사용되었다. 난류 운동에서의 이송 방정식(k)과 난류 운동에너지의 dissipation(ε)을 풀어 유효 난류 viscosity, μ_T를 결정한다. [3, 4]

TEMPEST 전산코드에서 SCRB에서의 물의 흐름은 속도항 대신에 셀의 체적확산도를 사용하여 묘사된다. 체적생성항 E(N)은 벡터곱$(\vec{V} \cdot \vec{n})$의 부호표시에 따라 체적내로 유입되는 흐름은 음의 표시인 –E(N)으로, 밖으로의 흐름은 양인 +E(N)으로 표시한다. SCRB에서 들어가고 나가는 유로는 다음과 같이 TEMPEST에서 묘사된다.

$$E(N)_{out} = \frac{\dot{V}_{out}}{V_{cell}} = \frac{\dot{m}_{out}}{r_{out} V_{cell}}, \quad E(N)_{in} = \frac{\dot{V}_{in}}{V_{cell}} = \frac{\dot{m}_{in}}{r_{in} V_{cell}}$$

상기 식으로 그림 6과 같은 입력을 얻을 수 있다.

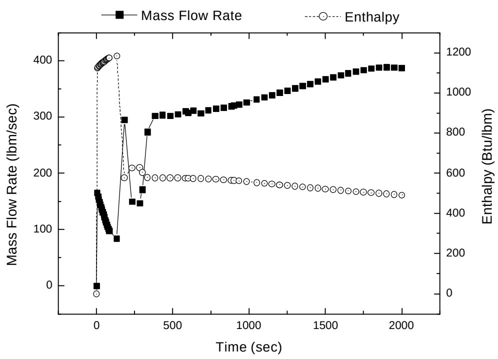


그림 5. IOPOSRV시 질량 및 엔탈피 방출량

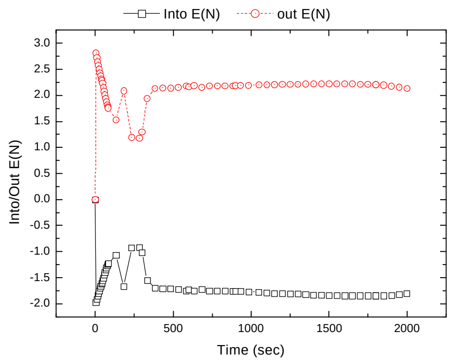


그림 6. SCRB에서의 셀의 체적확산도

다. 설계기준사고 모델링 및 IRWST 냉각계통 관련 민감도 분석

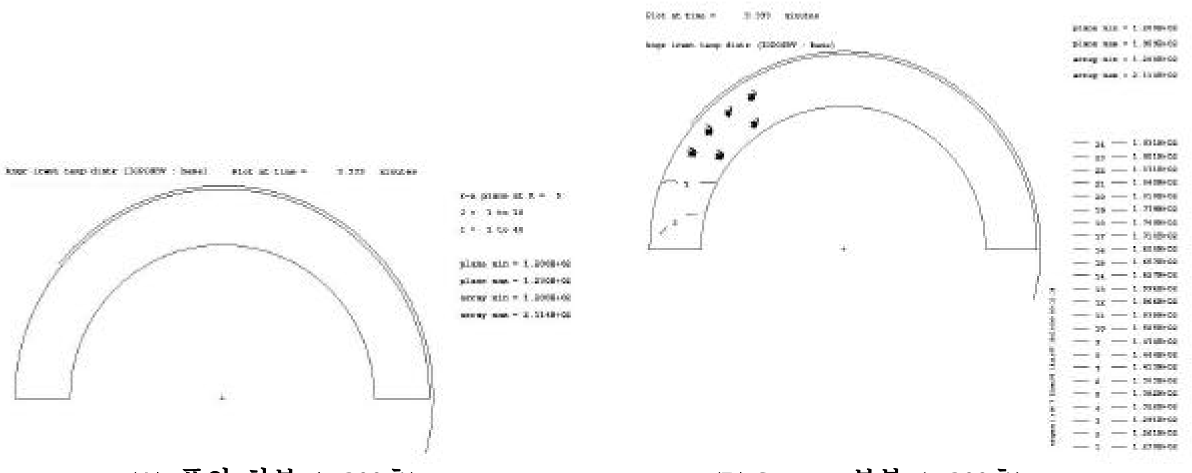
본 분석에서는 설계기준사고인 하나의 POSRV 오작동 사고에 대하여 TEMPEST 전산코드를 이용하여 IRWST 수온분포 분석을 수행하였다. 현재의 차세대원전 IRWST는 그림 3에서 볼 수 있듯이 수조와 Sparger 설계가 거의 대칭형이기 때문에 계산 시간의 최적화를 위하여 환원형인 IRWST의 절반을 TEMPEST 모델의 제어체적으로 모델링 하였다. 그림 8은 분석에서 고려한 IRWST의 형태로서, 반경반향으로 18개, 원주방향으로 48개, 수직방향으로 17개의 노드로 나누어 분석을 수행하였다. 본 논문에서의 질량 및 엔탈피 방출량은 2대의 안전주입펌프와 정지냉각계통의 1개 계열을 고려하여 방출면적이 0.133768 ft^{2}인 POSRV 1개 계열이 오작동되는 사고를 가정하여 계산되어진 값이다. 동 사고경위에서 기준사고로서 IRWST의 냉각이 이루어 지지 않는 경우를 고려하였으며, 이 때의 전반적인 온도 분포는 그림 7과 같다. 그림 7은 전체 사고기간인 2,000초 동안에 200초, 600초, 1400초 및 2000초에 대한 각각의 Sparger 위치, 하부 및 상부에서의 풀의 온도 분포를 보여주고 있다. 그림 7의 풀의 하부, Sparer 부분, 풀의 상부는 각각 IRWST 바닥면으로부터 2.125 ft, 4.39 ft, 9.6 ft 높이에서의 위치이다. 그림에서와 같이 풀의 하부에서의 온도는 분석 종료 시점인 2,000초에서도 최대 온도가 155 °F로서 하부 방향으로의 온도 전파 영향은 미미하고, Sparger를 통하여 방출된 유체는 부력효과에 의하여 상부방향으로 더 높은 온도분포를 갖고 있음을 알 수 있다. 또한 상부와 하부의 온도분포를 살펴보면 약 10 °F 내외의 온도차를 보이며 전반적으로 잘 혼합되고 있음을 알 수 있다.

현 단계에서는 차세대원전의 IRWST의 냉각관련 계통의 세부사항이 결정되어 있지않다. 설계기준 사고 시 IRWST의 냉각을 묘사하기 위해서는 냉각수 방출배관의 형태, 위치, 유량 등의 자료가 필요하다. 본 분석에서는 이들의 일반적인 값을 사용하여 7가지 경우로 나누어 냉각계통을 묘사하여 냉각효과를 살펴보았다. 각각의 경우에 대한 입력자료는 표 1에 주어져있다. 1, 2 및 3의 경우는 Ramshead 형태의 방출배관이 IRWST내의 원주방향 위치에 따른 효과를 분석하기 위하여 선택되었으며, 4와 5의 경우는 물속에서의 깊이에 따른 영향을, 6과 7은 방출 방향에 대한 영향을 살펴보기 위하여 선택하였다. 각각의 경우에 대한 방출위치는 그림 8에, 깊이는 그림 9에, 방출배관의 형태는 그림 10에 주어져 있다. 이 들에 대한 국부온도에 대한 정의는 SCRB에 접한 상부셀에서의 온도로서, 그림 8의 각 Sparger A, B, C, D, E 및 F 지점에서의 시간에 따른 온도 변화가 그림 11에서 그림 16에 주어져 있다. 그림 11에서 그림 16의 그래프에서 볼 수 있듯이 모든 사고 경우에서 IRWST의 국부온도 제한요건인 200 °F를 초과하지 않음을 알 수 있으며, 또한 모든 냉각

이 이루어 지는 경우가 냉각이 이루어지지 않는 기준사고 경우에 비하여 국부온도가 낮게 유지됨을 보여주고 있다. Sparger의 원주방향 위치에 대한 영향을 살펴보기 위한 1, 2 및 3의 경우에서는 Sparger에서 멀리 떨어진 위치인 3의 경우에서 E와 F 지점을 제외하고 국부온도가 가장 낮다. 이것은 Sparger에서 멀리 떨어진 곳에 존재하는 수조수에 유동을 촉진시켜 전체적인 수조수 혼합이 원활히 이루어지게 함으로 나타난 결과로 판단된다. 또한 Sparer 잠김깊이에 따른 영향은 각각의 Sparger 지점에 따라 약간의 차이를 보이고 있으나 전반적으로 그 영향이 미세하다. 냉각수 배관의 방출형태는 Ramshead 형태보다는 6의 경우에서와 같이 직선배관 형태로서 Sparger 방향으로 냉각수를 방출하는 형태가 약간 낮은 국부온도를 유지하고 있다.

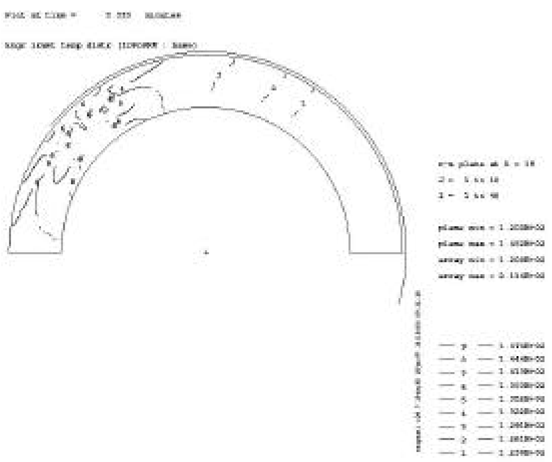
표 1. 각 경우에 따른 IRWST 냉각관련 입력 변수

경우	배관형태	방출구 위치			냉각수 유량 [gpm]	방출배관 직경 [inch]
		높이 [ft]	반경 [ft]	원주방향각도[°]		
1	Ramshead	3 ~ 4.14	70.03	135	5,000	10
2	Ramshead	3 ~ 4.14	70.03	90	5,000	10
3	Ramshead	3 ~ 4.14	70.03	45	5,000	10
4	Ramshead	0 ~ 1	70.03	135	5,000	10
5	Ramshead	7.8 ~ 9	70.03	135	5,000	10
6	Straight Pipe	3 ~ 4.14	70.03	135	5,000	10
7	Straight Pipe	3 ~ 4.14	70.03	135	5,000	10

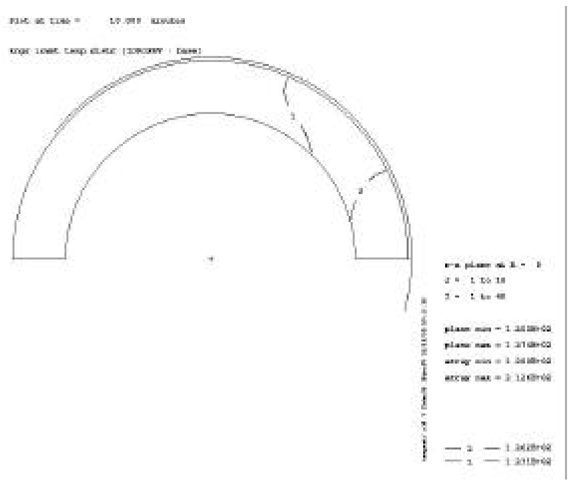


(A) 풀의 하부 (t=200초) (B) Sparger 부분 (t=200초)

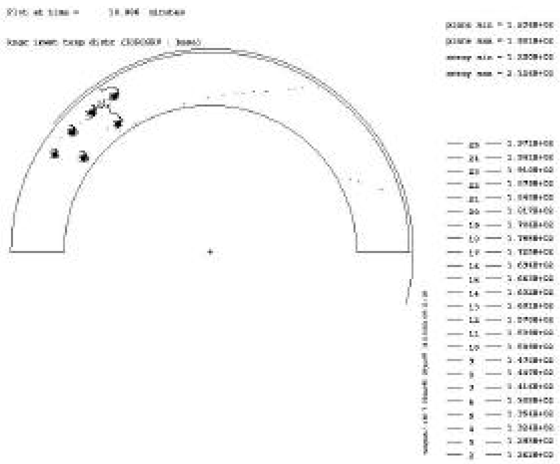
그림 7. IOPOSRV 시 IRWST 수조수내의 물의 온도 분포 (계속)



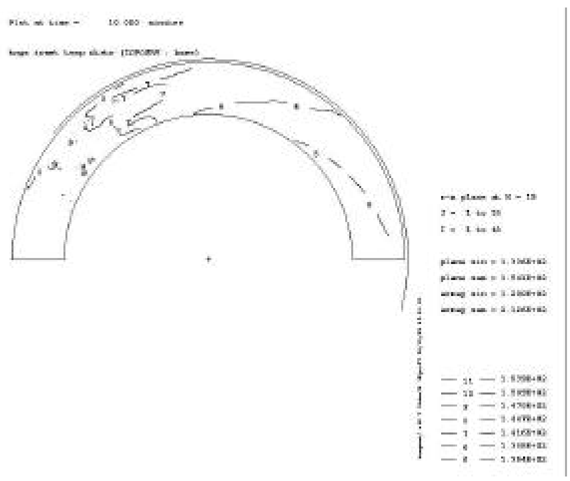
(C) **풀의 상부** (t=200**초**)



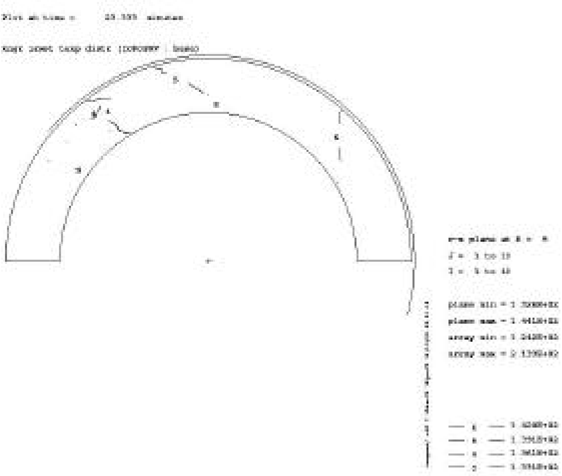
(D) **풀의 하부** (t=600**초**)



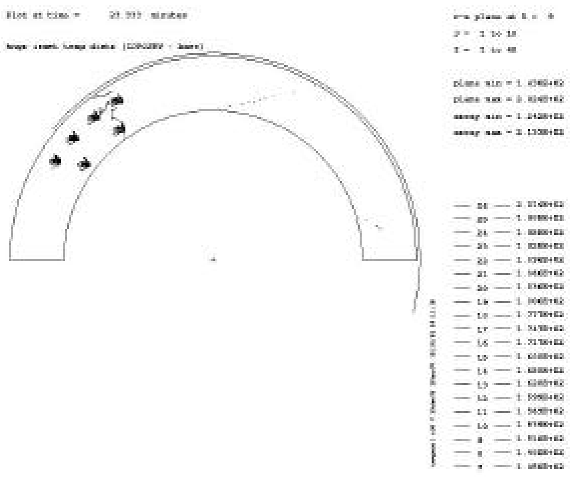
(E) Sparger **부분** (t=600**초**)



(F) **풀의 상부** (t=600**초**)

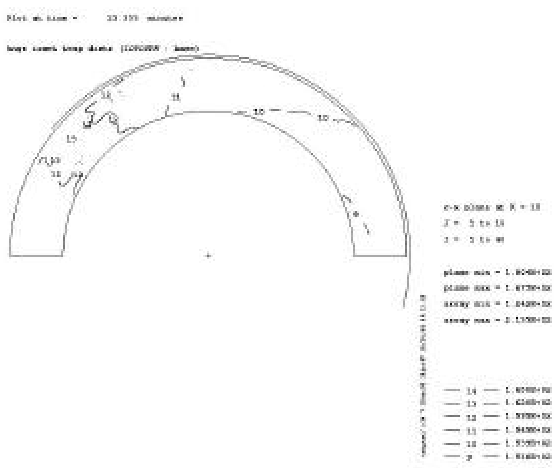


(G) **풀의 하부** (t=1400**초**)

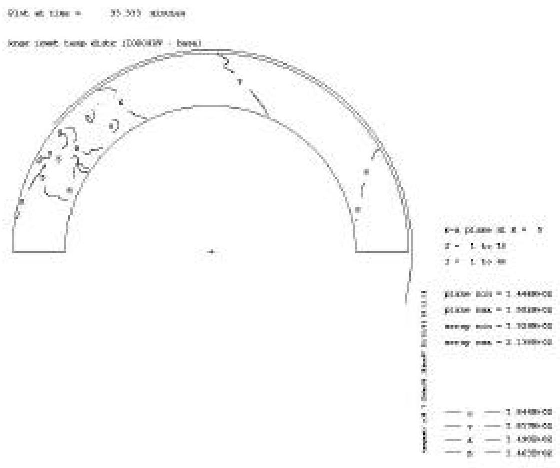


(H) Sparger **부분** (t=1400**초**)

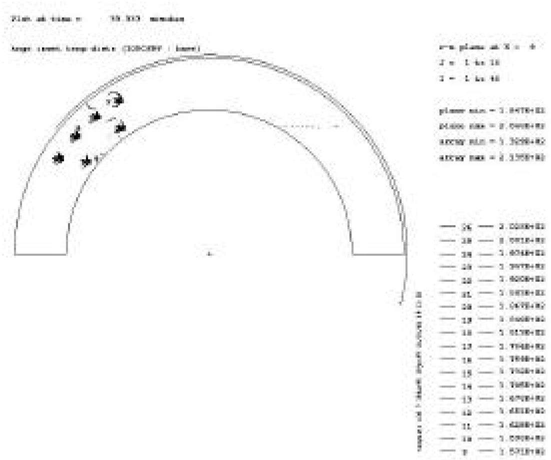
그림 7. IOPOSRV **시** IRWST **수조수내의 물의 온도 분포** (**계속**)



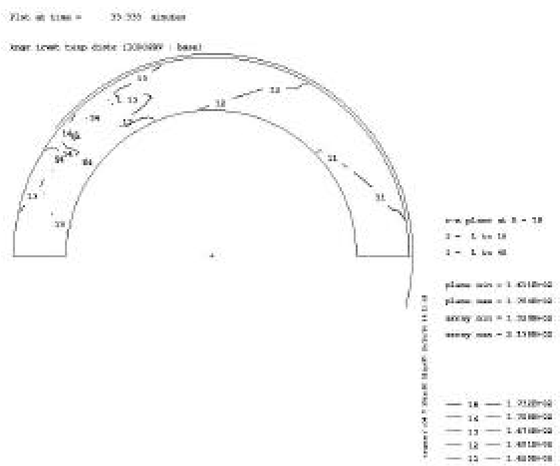
(I) 풀의 상부 (t=1400초)



(J) 풀의 하부 (t=2000초)



(K) Sparger 부분 (t=2000초)



(L) 풀의 상부 (t=2000초)

그림 7. IOPOSRV 시 IRWST 수조수내의 물의 온도 분포

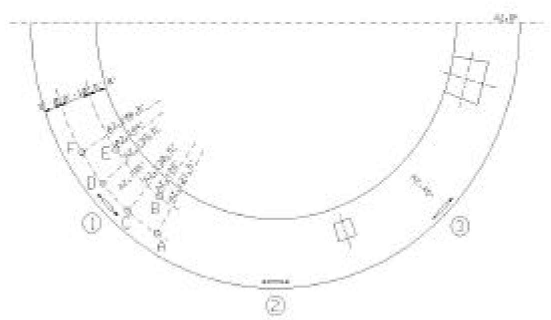


그림 8. 1,2,3 경우의 냉각수 방출 위치

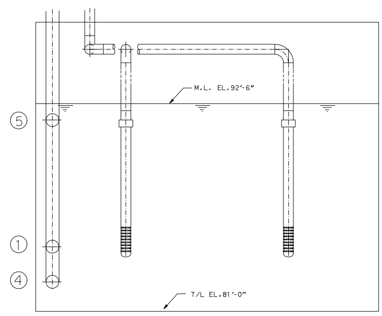
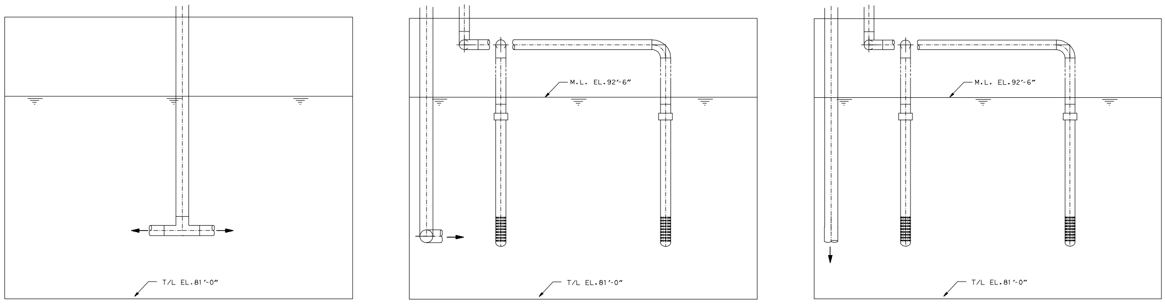


그림 9. 1,4,5 경우에서의 방출배관 잠김깊이



(A) 경우 1 (B) 경우 6 (C) 경우 7

그림 10. 방출배관 형태

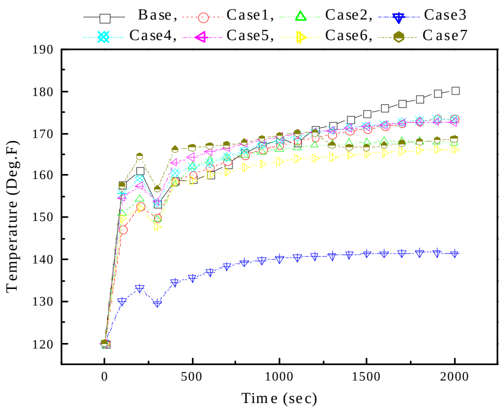


그림 11. A지점에서의 시간에 따른 풀의 온도

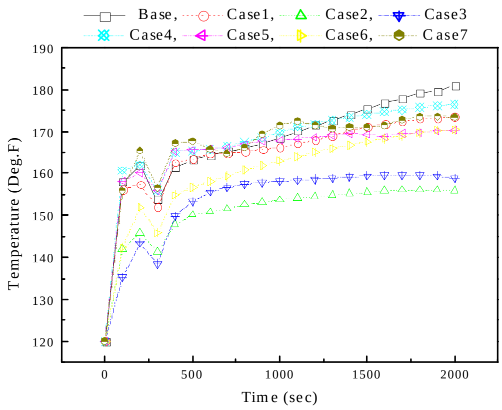


그림 12. B지점에서의 시간에 따른 풀의 온도

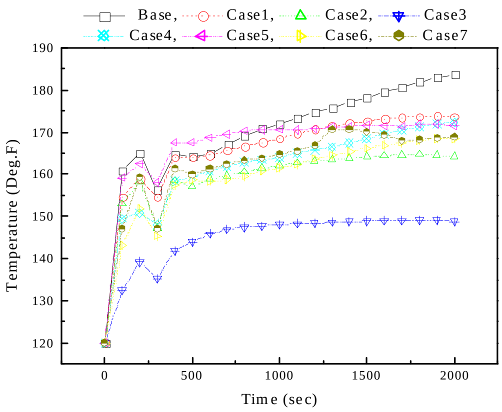


그림 13. C지점에서의 시간에 따른 풀의 온도

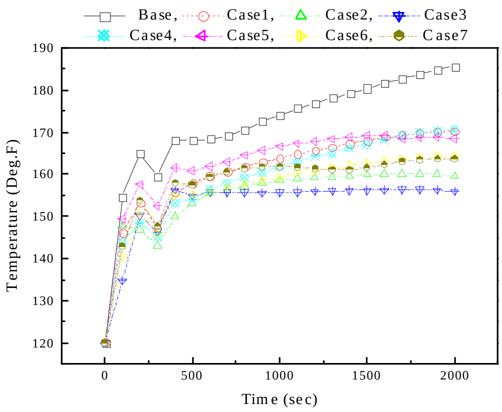
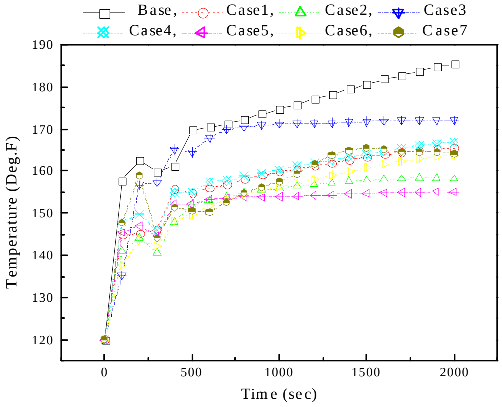


그림 14. D지점에서의 시간에 따른 풀의 온도



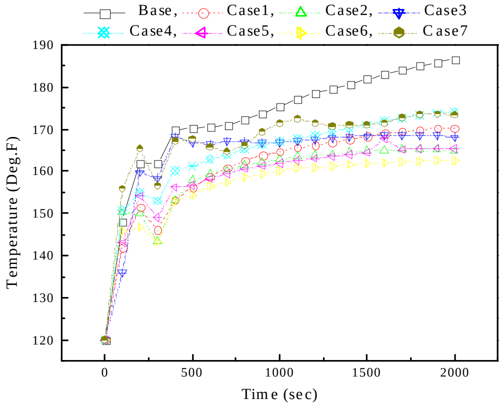


그림 15. E지점에서의 시간에 따른 풀의 온도　　그림 16. F지점에서의 시간에 따른 풀의 온도

4. 결론 및 토의

차세대원전의 IRWST의 설계가 국부온도 제한요건을 만족하는지를 평가하기 위하여 안전감압 배기계통의 설계기준사고인 IOPOSRV시 가압기 내의 유체가 Sparger를 통하여 이상유체의 형태로 2,000초 동안 IRWST로 방출되는 사고에 대하여 TEMPEST 전산코드를 사용하여 IRWST내의 물의 온도분포를 분석하였다. 분석을 통하여 설계기준사고 시에는 IRWST의 물의 냉각이 이루어 지지 않는 경우에도 IRWST의 국부온도가 온도 제한 요건인 200°F를 초과하지 않았다. 또한 온도분포 분석을 통하여 판단할 때 방출된 유체의 유동현상은 부력과 방출된 유체간의 상호작용에 많은 영향을 받음을 확인하였다. 그러나 2,000초가 경과되어서도 Sparger를 통한 증기의 방출이 계속되는 경우에는 IRWST의 냉각이 이루어 지지 않는다면 IRWST내의 물의 국부온도가 200°F를 초과할 수 있으리라 판단된다. 또한 IRWST의 냉각을 위하여 냉각수를 주입하는 경우에 냉각수에 의한 직접적인 냉각보다는 IRWST내의 유동에 영향을 미쳐 물의 혼합을 촉진시켜 물의 온도를 낮추어 주고 있다. 본 분석결과를 통하여 온도 분포 측면에서는 추후 IRWST의 냉각계통 설계 시 IRWST 물의 혼합을 증진시키는 방향으로 설계가 이루어져야 한다고 판단된다. 향후 보완할 사항으로는 냉각계통의 설계가 확정되었을 경우 이들에 대한 정확한 값을 입력으로 하여 재분석이 이루어져야 하며 응축영역 모델에 대하여 개선이 필요할 것으로 판단된다.

5. 참고 문헌

[1] U.S.NRC, “Suppression Pool Temperature Limits for BWR Containments”, NUREG-0783, Nov. 1981.

[2] D.S. Trent, L.L. Eyler, “A Computer Program for Three-dimensional Time-dependent Computational Fluid Dynamics and Hydrothermal Analysis”, PNL-4348, Battelle, Pacific Northwest Laboratories, Nov. 1997

[3] Launder, B.E., and D.B. Spalding, 1972, “Mathematical Models of Turbulence”, Academic Press, Cambridge, England.

[4] O. Kwon, "A Velocity and Length Scale Approach to k-ε, Modeling", Journal of Heat Transfer, Vol. 118, Nov. 1996.