

냉각재 상실사고 후 격납건물내의 이상유동 연구

배진효*, 박만홍*, 고철균**, 이재현***
(1999년 2월 1일 접수)

A Study on the Two Phase Flow in the Floor of Containment Building after a Loss of Coolant Accident

Jin-Hyo Bae, Man Heung Park, Chul-Kyun Koh and Jae-Heon Lee

Key Words : Loss of Coolant Accident(냉각재 상실사고), Two Phase Flow(이상유동), Debris(파손물) Sump(집수조)

Abstract

The Regulatory Guide 1.82 recommends an analysis of hydraulic performance for sump of ECCS (Emergency Core Cooling System) when LOCA(Loss of Coolant Accident) occurs in a nuclear power plant. The present study deals with 3-dimensional, unsteady, turbulent and two-phase flow simulation to examine the behavior of mixture of reactor coolant and debris near the floor of containment building in conjunction with appropriate assumptions. The dispersed solid model has been adjusted to the interfacial momentum transfer between reactor coolant and debris. According to the results, the counterclockwiserecirculation zone had been formed in the region between sump and connection aisle about 376 second after LOCA occurs. The debris thickness accumulated on a sump screen periodically increases or decreases up to 2000 second, afterwards its peak decreases.

기호설명

- A: 면적
- C: 상수
- D: 확산계수
- e: 파손물 두께
- G: 난류 생성항
- k: 난류 운동에너지
- n: 해당면의 수직인 좌표계
- P: 압력
- Q: 유량
- r: 체적분율
- Re: 레이놀즈 수
- S: 생성항
- \bar{v} : 속도성분
- V: 체적
- t: 시간

그리스문자

- α : 공극률
- ϵ : 난류 운동에너지 소산율
- μ : 점성계수
- ν : 동점성계수
- χ : 비체적
- ρ : 밀도

하첨자

- 1: 첫번째 상, 연속상
- 2: 두번째 상, 분산상
- min: 최소값
- a: 공기
- INS: 단열재
- in: 유입구
- n: Nukon
- w: 냉각수

* 회원, 한국전력기술(주) 전력기술개발연구소

** 한양대학교 대학원 기계공학과

*** 회원, 한양대학교 공과대학 기계공학과

1. 서론

비상노심냉각계통(ECCS, Emergency Core Cooling

System)은 냉각재 상실사고(LOCA, Loss of Coolant Accident)후 상당 기간동안 노심이 파열되는 현상을 지연시키고, 핵연료의 용융을 방지하며, 노심을 미입제 상태로 유지되도록 하는 역할을 한다. 원자력 발전소에서 냉각재 상실사고시, 비상노심 냉각계통은 초기 주입단계에서는 핵연료 재장전수 탱크(RWT, Refueling Water Tank)로부터 냉각수를 취하며, 운전모드가 장기 재순환 모드(long term recirculation mode)로 전환되면 집수조(sump)로 부터 냉각수를 취하여, 노심을 냉각시킨다.

핵중기 공급계통에서 냉각수는 상당한 고압으로 유지되므로 냉각재 상실사고가 발생하면 파단 부위에서 고속의 제트유동이 발생한다. 이러한 고속의 제트유동은 파단 부위에 위치한 구조물들을 파손시킨다. 이때 중기발생기 근처에서 파단이 발생하면, 중기발생기를 감싸고 있는 단열재가 제트의 운동량에 의해 파편으로 발생하며,⁽¹⁾ 이러한 파편은 비상냉각수와 함께 고압안전주입(HPSI, High Pressure Safety Injection)펌프, 저압안전주입(LPSI, Low Pressure Safety Injection) 또는 살수펌프와 같은 안전관련 펌프에 유입되어 집수조로의 냉각수흐름을 방해하면 안전관련계통의 펌프성능에 치명적인 영향을 미치게 된다.

이러한 현상을 방지하기 위해서 LOCA 시 비상냉각수가 충전되는 장소인 집수조 유입구에는 파손물이 통과할 수 없도록 파손물 스크린(debris screen)을 설치한다. 원자력발전소에서 파손물 스크린 직경은 일반적으로 2.3 mm로서 파손물이 통과할 수 없을 정도로 조밀하게 제작한다. 그러나 스크린을 통해서 파손물이 통과할 수 없으므로 스크린의 전후에는 축적되는 파손물에 의하여 무시할 수 없는 수두손실이 발생하며, 이것은 안전주입펌프 유입구의 압력을 강하시켜 유효흡입수두(NPSH, Net Positive Suction Head)에 직접적인 영향이 미친다. 안전주입펌프 유입구에서의 냉각수 압력이 유효흡입수두를 만족하지 못할 경우 펌프에는 캐비테이션(cavitation) 현상이 발생하여 펌프에 치명적인 영향을 미칠 수 있다

RG(Regulatory Guide) 1.82⁽²⁾에서도 집수조 설계시 파손물이 집수조의 수력학적 특성에 미치는 영향을 원자력발전소 설계시에 반영하도록 권고하고 있다. LOCA 시 집수조 근처의 파손물 거동을 예측하기 위해서는 파손물이 혼합된 냉각수의 시간에 따른 거동을 해석하여야 한다.

본 연구에서는 집수조 설계시 보수성을 확보하고, 설계근거를 제공하기 위하여 원자력발전소에 LOCA 가 발생하였을 경우 집수조 근처에서의 파

손물 거동을 3차원, 비정상상태, 난류 및 이상 유동방정식을 해석함으로써 예측하였다.

2. 기본 가정

격납건물의 기하학적 형상, LOCA 시 발생하는 냉각수의 땅 및 파손물의 수력학적 특성이 매우 복잡하므로 다음과 같은 가정을 도입하여 이론해석을 수행하였다.

- (1) LOCA 의 발생 위치로는 설계의 보수성을 확보하기 위하여 제트의 운동량에 의하여 파손물의 생성량이 가장 많을 것으로 예측 되는 파단 부위를 선정하였다.
- (2) 파손물로는 격납건물 내 주요기기의 단열재로 사용되는 Nukon 으로 간주하였다.
- (3) LOCA 시 격납건물 내로 방출되는 냉각수는 모두 RWT 용량을 기준으로 하였다. 격납 건물로 방출되는 냉각수는 고온수이므로 일부는 격납건물 내부의 대기중으로 증발하므로 이 증발량만큼 비상냉각수 순환량에서 제외하였다.
- (4) 격납건물 내에는 집수조가 존재하는 El. 26 m 위치보다 더 낮은 구역이 존재하며, 이러한 영역에서 냉각수는 집수조를 통하여 순환되지 못하고 정체되므로 정체된 냉각수 땅 만큼을 비상냉각수 순환량에서 제외하였다.
- (5) LOCA 초기에는 각 집수조당 1대의 HPSI, LPSI 및 살수펌프가 운전되며, 장기 재순환 모드에서는 실제로 LPSI 펌프만이 가동되나 원자력 발전소 설계시 보수성을 확보하기 위하여 각 집수조당 HPSI 펌프, LPSI 펌프, 살수펌프가 각각 1대 씩 가동되는 것으로 가정하였다.

위와 같은 가정에 의하여 LOCA 후 시간에 따른 냉각수 및 파손물의 거동을 해석하기 위하여 격납건물 영역 및 집수조의 형상을 모델링 하였으며, 비상냉각수에 의한 격납건물 바닥면의 냉각수 수위, 파편물 생성량 및 밀도 등을 예측하였다

2.1 격납건물 El. 26 m 영역 모델링

본 연구에서 연구모델로 선정한 집수조가 위치하는 격납건물 El. 26 m 지점에 대한 단면도를 Fig. 1에 나타내었다.⁽³⁾ 격납건물은 반경이 22 m인 콘크리트 구조물이며, 원자로, 중기발생기 및 원자로 냉각재펌프 등 주요기기를 둘러싸고 있는 원형의 2차 차폐벽은 두께 1.22 m, 반경 14.6 m이다.

본 연구의 관심 대상인 집수조는 2차 차폐벽의 하부 원자로와 격리되어 있으며, 외벽과 2차 차폐벽사이의 환형부에 위치하고 있다. 2차 차폐벽에는

좁은 연결통로(connection aisle)가 존재하여 주요기기가 있는 영역과 집수조가 있는 영역의 두 격실을 연결하고 있다.

본 연구에서는 Fig. 1에 나타난 격납건물 EI. 26 m 영역에서 증기발생기 지지대(SG pedestal), 원자로 냉각재펌프 지지대(RCP pedestal), 원자로냉각재 펌프 윤활유 탱크(RCP lube oil tank), 원자로배수 탱크(Reactor drain tank) 및 집수조 펌프(sump pump) 등의 구조물을 해석영역에 포함하였다.

Fig. 1에 나타난 바와 같이 EI. 26 m 영역은 90°와 270°를 잇는 선을 중심으로 하여 상하대칭 형상이므로 실제 수치계산에는 90°~270°영역을 해석영역으로 선정하였다. 또한 이후의 논의의 편의를 위해 Fig. 1에서 보는 바와 같이 집수조의 네면을 각각 F1, F2, S1 및 S2 면으로 지칭하기로 한다.

집수조의 형상, 위치 및 크기에 대한 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 집수조 상부면은 밀면과 윗면의 길이가 각각 4.0 m 및 3.5 m 이고 높이가 2.75 m 인 사다리꼴의 형상을 갖는다. 본 연구에서는 집수조의 상부면을 4.0 m x 2.75 m 의 단면을 갖는 직사각형 구조로 간주하였다. 또한 EI. 26 m 지점의 하부에 위치하는 집수조 영역은 본 연구의 관심대상이 아니므로 해석 영역에서 제외하였다. 따라서 집수조의 해석영역은 파손물 스크린을 포함하는 집수조 유입구의 네면(F1, F2, S1 및 S2)으로 간주하였다.

2.2 격납건물 바닥면의 냉각수 수위 결정

LOCA 후 파단 부위에서 격납건물로 방출되는 고온의 냉각수는 격납건물 바닥에 충전된다. 이때 다음과 같은 계산과정을 거쳐 격납건물 바닥면의 수위를 결정하였다.

(1) 비상냉각수량 산정

비상노심냉각계통의 초기 안전주입 모드에서 비상냉각수는 RWT 의 냉각수를 사용하게 되는데, 총 사용 가능한 냉각수량은 RWT 용량은 73.7% 이다. 또한 RWT 에 설치된 유량계의 계기오차 9.4%를 고려하여 LOCA 후 격납용기내로 유입되는 비상냉각수 체적, V_c 를 1879 m³으로 결정하였다.⁽⁴⁾

(2) 비상냉각수 증발량 산정

격납건물내로 유입되는 비상냉각수는 고온수 이므로 상대적으로 온도가 낮은 격납건물 대기중으로 비상냉각수의 일부가 증발하게 되며 비상 냉각수의 증발량 만큼 순환 냉각수량에서 제외하여야 한다. 비상냉각수의 증발량을 결정하기 위해서

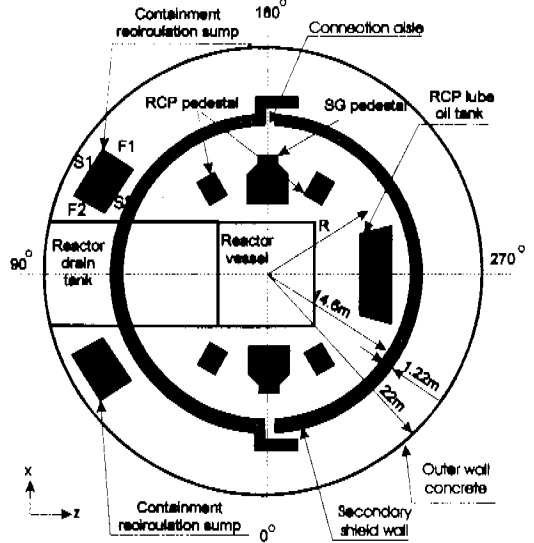


Fig. 1 Modelling of containment building at EI.26m.

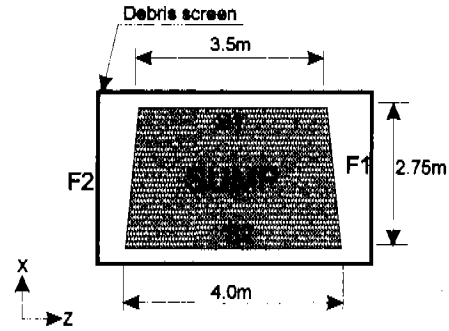


Fig. 2 Schematic diagram of top surface of sump.

는 순환 펌프의 용량, 비상냉각수 순환 소요시간, 격납건물의 체적 및 공기온도 그리고 포화수 및 포화증기의 비체적 등을 알아야 한다.

LOCA 후 설계의 보수성을 확보하기 위하여 장기 계순환모드에서 집수조 1기당 HPSI, LPSI 및 살수펌프가 각각 1대씩 가동되는 것으로 가정하여 격납건물내의 모든 순환 펌프용량을 1.37 m³/s로 결정하였다.⁽⁵⁾ 그러므로 비상냉각수 순환소요시간은 비상냉각수 체적, V_c 를 이용하면 약 1370초로 계산되며, LOCA 후 1370초에서 격납건물 공기온도는 LOCA 시 격납건물 압력 및 온도분석 결과에 의해 약 130 °C로 결정하였다⁽⁵⁾.

격납건물의 체적, V_{cont} 는 81628 m³이며, 냉각수

중발량, V_s 는 이 온도에서 포화수의 비체적, χ_ℓ 및 포화증기의 비체적, χ_g 를 이용하여 아래와 같이 구할 수 있다.

$$V_s = V_{\text{con}} \times (1/\chi_g) \times \chi_\ell = 128 \text{ m}^3 \quad (1)$$

(3) 냉각수 수위 결정

냉각수 수위는 실제로 순환 가능한 냉각수량, V_r 을 격납건물내의 냉각수가 존재하는 유효단면적, A_r 로 나누면 간단히 결정할 수 있다.

비상 냉각수 중 El. 26 m 이하 지점에 정체되어, 사용 불가능한 냉각수량, V_{un} 은 격납건물 바닥면의 수위를 계산할 때 제외시켜야 하며 V_{un} 은 관련자료⁽⁶⁻⁹⁾로부터 약 539.1 m³이다. 격납건물내에서 실제로 순환 가능한 냉각수량, V_r 은 LOCA 후 격납건물로 유입되는 비상냉각수 체적, V_i 에서 냉각수 중발량, V_s 와 사용이 불가능한 냉각수량, V_{un} 을 제한 나머지로서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_r = V_i - V_s - V_{un} = 1211 \text{ m}^3 \quad (2)$$

또한 냉각수가 존재하는 유효단면적, A_r 은 관련자료⁽⁹⁾를 참고하여 구하였다. El. 26 m 지점에서 격납건물 바닥면에는 많은 구조물들이 존재하고 있으므로, 정확한 A_r 을 구하기 위해서는 이러한 구조물들이 차지하고 있는 면적을 계산에서 소거하여야 한다. 원자력발전소 마다 약간씩 차이가 나지만 일반적인 경우, 구조물이 차지하는 면적은 약 433.05 m²이다. 격납건물 외벽의 반경은 22 m 이므로 이 영역에서 구조물이 차지하는 면적을 소거하여 구한 냉각수가 존재하는 유효단면적, A_r 은 1080 m²이다. 그러므로 LOCA 시 유출된 안전주입수가 격납 건물 바닥면에 충전되는 냉각수 수위, D_{min} 은 다음과 같이 식 (3)으로 구할 수 있다.

$$D_{min} = V_r / A_r = 1.12 \text{ m} \quad (3)$$

2.3 파편물 생성량

NUREG-0897⁽¹⁾의 실험자료에서 보는 바와 같이 상당한 운동량을 수반하는 이상 유동 제트류(two-phase jet flow)는 중기발생기 주위 영역에 수많은 단열재 파편을 생성시킨다. RG 1.82⁽²⁾에 따르면 배관 직경의 7 배에 이르는 영역까지 제트류의 영향이 미치는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 NUREG-0897⁽¹⁾에 기술된 바와 같이 원자로 냉각재계통 주배관의 용접부에서 파단이 일어나는 것으로 간주하였다. 이것은 단열재 파

편이 가장 심각하게 생성될 수 있는 조건이므로 해석결과와 보수성을 제공할 수 있다. 이 가정에 의하면 제트류에 의해 중기발생기 단열재가 가장 심각한 손상을 입을 것으로 예측되며, 이와 함께 인접한 고온관(hot leg), 저온관(cold leg) 및 밀림관(surge line)을 감싸고 있는 단열재의 일부도 파손물로 생성된다. 참고문헌⁽¹⁰⁾에 따르면 LOCA 시 파편 생성량, V_{NS} 는 약 6.1 m³으로 나타났으며, 본 연구에서도 단열재 파편 생성량을 6.1 m³으로 간주하였다.

2.4 파손물 밀도

본 연구에서는 LOCA 시 파손물을 기본가정에서 언급한 바와 같이 Nukon으로 간주하였다. Nukon은 단열재의 일종이며 공기중에서 약 30~140 kg/m³의 밀도를 가지며, 공극율, α 가 0.93으로 알려져 있다.⁽¹¹⁾

LOCA 시 Nukon은 지름 1 cm 구형의 이상적인 형태로 파손되며, 제트의 강한 운동량에 의하여 모두 냉각수에 흡수된다고 가정한다. 본 연구에서 가정한 파손물인 냉각수에 완전히 흡수된 Nukon의 밀도는 냉각수 밀도, 공기중에서 Nukon의 밀도, 순수한 Nukon만의 밀도 및 공기 밀도를 이용하여 식 (4)로부터 구하였다.

$$\rho_{nw} = \alpha\rho_w + (1-\alpha)\rho_n = \alpha\rho_w + (1-\alpha) \times \frac{\rho_{nd} - \alpha\rho_a}{1-\alpha} = 1049 \text{ kg/m}^3 \quad (4)$$

여기서, ρ_{nw} , ρ_w , ρ_{nd} , ρ_n 및 ρ_a 는 각각 냉각수에 흡수된 Nukon의 밀도, 냉각수의 밀도, 공기중에서 Nukon의 밀도, 순수한 Nukon만의 밀도 및 공기 밀도를 의미한다.

3. 이론해석 모델

3.1 지배 방정식

본 연구에서는 LOCA 시 냉각수 및 파손물의 거동을 해석하기 위하여 격납건물 바닥에는 연속상인 냉각수에 고체인 파손물이 입자의 형태인 분산상으로 존재하는 것으로 가정하였다. 연속상과 분산상이 공존하는 이상유동의 해석모델은 Euler-Lagrange⁽¹²⁾모델과 Euler-Euler⁽¹³⁾모델로 구분된다. 본 연구에서는 이상유동모델 중 Euler-Euler 모델을 사용하였다.

수치해석시 액상인 냉각수와 고상인 파손물에 대하여 각각 3 차원 비정상상태 질량보존방정식,

운동량방정식, 난류운동량 에너지, k 방정식 및 난류운동에너지 소산율, ε 방정식을 해석하였으며, 난류 모델로서는 표준 $k-\varepsilon$ 난류모델을 사용하였다.

질량보존방정식(체적분율 방정식)

$$\frac{dr_i \rho_i}{dt} + \nabla(r_i \rho_i \bar{v}_i) - D_{r,i} \nabla(r_i) = 0 \quad ; \quad i=1 \sim 2 \quad (5)$$

$$r_i = \frac{V_i}{V_c} \quad (6)$$

여기서 r_i , V_c 및 V_i 는 각각 i 번째 상의 체적분율, 고려중인 영역의 전체 체적 및 i 번째 상이 점유하고 있는 체적을 의미한다. 하첨자로 사용된 i 는 1인 경우 연속상인 냉각수물, 2인 경우 분산상인 파손물을 지칭한다.

식 (5)의 세번째 항은 분산상의 불규칙 운동에 대한 난류 확산항을 의미하며, 내부 확산계수, D , 은 유체의 종류 점성계수, ν 와 난류 동점성계수, ν_t 의 합수로서 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{cases} D_{r,1} = \rho_1(\nu + \nu_t) & ; \text{for continuum phase} \\ D_{r,2} = \rho_2(\nu + \nu_t) & ; \text{for dispersed phase} \end{cases} \quad (7)$$

i 번째 상의 운동량 보존방정식

$$\frac{dr_i \rho_i \bar{v}_{i,j}}{dt} + \bar{v}_{i,j} \cdot \nabla(r_i \rho_i \bar{v}_{i,j}) = -r_i \frac{dp_i}{dx_i} \quad (8)$$

$$+ r_i D_{\phi,i} \nabla^2 \bar{v}_{i,j} + D_{r,i} \bar{v}_{i,j} \nabla^2 r_i + S_{\phi}$$

여기서, i 는 1~2 그리고 j 는 1~3의 값을 가지며, $\bar{v}_{i,j}$ 는 i 번째 상에 관련된 속도벡터의 j 방향 속도 성분을 의미한다. S_{ϕ} 는 각 상간의 운동량 전달에 따른 생성항이며, $D_{\phi,i}$ 는 확산계수로서 다음과 같다.

$$\begin{cases} D_{\phi,1} = \rho_1(\nu + \nu_t) & ; \text{for continuum phase} \\ D_{\phi,2} = \rho_2(\nu + \nu_t) & ; \text{for dispersed phase} \end{cases} \quad (9)$$

난류 운동에너지 방정식

$$\begin{aligned} \frac{dr_1 \rho_1 k}{dt} + \nabla r_1 \rho_1 \bar{v}_1 k &= r_1 \left(\mu_1 + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla^2 k \\ + \left(\mu_1 + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) k \nabla^2 r_1 &+ r_1 (G - C_2 \rho \varepsilon) \end{aligned} \quad (10)$$

난류 운동에너지 소산율 방정식

$$\begin{aligned} \frac{dr_1 \rho_1 \varepsilon}{dt} + \nabla r_1 \rho_1 \bar{v}_1 \varepsilon &= r_1 \left(\mu_1 + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla^2 \varepsilon \\ + \left(\mu_1 + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \varepsilon \nabla^2 r_1 &+ r_1 \frac{\varepsilon}{k} [C_1 G - C_2 \rho \varepsilon] \end{aligned} \quad (11)$$

난류점성계수, μ_t , 난류 생성항, G 및 난류상수, C_1 , C_2 , C_μ , σ_k , σ_ε 의 값은 표준 $k-\varepsilon$ 난류모델에서 다음과 같다.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad G = \mu_t \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} C_1 &= 1.44, C_2 = 1.92, C_\mu = 0.09, \\ \sigma_k &= 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3 \end{aligned} \quad (13)$$

3.2 운동량 전달

두개의 상이 공존하는 문제에 있어서 각 상에 속한 물질은 다른 상과 운동량을 교환한다. 이러한 운동량 전달과정은 크게 항력, 양력 및 압력 불균형항으로 표현된다. 본 연구에서는 액상과 고상간의 이상유동 문제를 다루고 있으므로 양력 및 압력 생성항은 지배 방정식에 포함시키지 않았으며, 액상과 고상간의 중요한 운동량 전달 기구인 항력항만을 고려하였다. 액상과 고상간의 항력에 의한 운동량 전달량, S_{ϕ} 는 아래식으로 표현된다.

$$S_c = \frac{3}{4} \frac{C_d}{D_p} \cdot \rho_c \cdot r_c \cdot r_d \cdot |\bar{v}_{slip}| \cdot (\bar{v}_d - \bar{v}_c) \quad (14)$$

$$S_d = \frac{3}{4} \frac{C_d}{D_p} \cdot \rho_c \cdot r_c \cdot r_d \cdot |\bar{v}_{slip}| \cdot (\bar{v}_c - \bar{v}_d) \quad (15)$$

여기서 S_c , S_d , C_d , D_p , ρ_c , r_c , r_d , \bar{v}_{slip} , \bar{v}_c 및 \bar{v}_d 는 각각 연속상의 운동량 생성항, 분산상의 운동량 생성항, 항력계수, 입자직경, 연속상의 밀도, 연속상의 체적분율, 분산상의 체적분율, 상대속도, 연속상의 속도 및 분산상의 속도를 의미한다.

항력계수, C_d 는 Clift 등⁽¹⁴⁾이 제안한 상관관계식으로부터 구하였다. 그는 아래와 같이 파손물 입자 직경과 파손물 속도를 기준으로 한 Reynolds 수의 크기에 따라 항력계수를 산정하였다.

$$\begin{aligned} C_d &= \frac{24 \times (1 + 0.15 \times \text{Re}^{0.687})}{\text{Re}} + \frac{0.42}{1 + \frac{42,500}{\text{Re}^{1.16}}} \\ &\text{for } \text{Re} < 3.38 \times 10^5 \end{aligned} \quad (16)$$

$$C_d = 29.78 - (5.3 \times \log_{10} Re) \quad \text{for } 3.38 \times 10^3 < Re < 4.0 \times 10^5 \quad (17)$$

$$C_d = 0.1 \times \log_{10} Re - 0.49 \quad \text{for } 4.0 \times 10^5 < Re < 1.0 \times 10^6 \quad (18)$$

$$C_d = 0.19 - \frac{8.0 \times 10^4}{Re} \quad \text{for } Re > 1.0 \times 10^6 \quad (19)$$

Reynolds 수는 입자의 직경과 상대속도를 기준으로 하여 식 (20)과 같이 정의하였다.

$$Re = \frac{\bar{v}_{slip} \times D_p}{\nu} \quad (20)$$

3.3 초기조건

2차 차폐벽 안쪽영역($R < 14.6$ m)에서 파손물은 균일하게 존재하며, 파손물의 초기 체적분율은 식 (21)과 같이 냉각재상실 사고시 생성된 파손물량, V_{INS} 로부터 구하였다. 계산 초기단계에서 냉각수는 정체되어 있으며, 2차 차폐벽 바깥쪽과 외벽 안쪽영역($15.8 \text{ m} < R < 22 \text{ m}$)에 파손물은 존재하지 않는 것으로 가정하였다. 상기한 가정을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$r_2 = \frac{V_{INS}}{A_r \times D_{min}} \quad (21)$$

2차 차폐벽 안쪽영역($R < 14.6$ m):

$$\begin{aligned} u=v=w=k=\epsilon=0 \\ r_2 = 1.387 \times 10^{-2} \\ r_1 = 1 - r_2 = 0.986 \end{aligned} \quad (22)$$

2차 차폐벽 바깥영역($15.8 \text{ m} < R < 22 \text{ m}$):

$$\begin{aligned} u=v=w=k=\epsilon=0 \\ r_1 = 1.0 \\ r_2 = 0 \end{aligned} \quad (23)$$

고체영역과 벽면:

$$u=v=w=k=\epsilon=0, \quad \frac{\partial r_1}{\partial n} = \frac{\partial r_2}{\partial n} = 0 \quad (24)$$

3.4 경계조건

냉각수 유입구는 2차 차폐벽 안쪽($R < 14.6$ m)의 상부면($y=0$)으로 설정하였다. 이것은 LOCA 시 체트에 의한 냉각수의 분출현상을 간단히 모사하기 위하여 도입된 가정이다. 장기 재순환모드로 전환

되었을 경우에 HPSI와 LPSI 펌프에 의해 순환되는 물은 다시 파단 부위에서 방출되는 것으로 간주하여 바닥면의 수위는 변하지 않는 것으로 가정하였다. 비상냉각수 유입구의 입구속도는 순환되는 냉각수량을 대해 2차 차폐벽 안쪽 면적으로 나누어 균일하게 유입되는 것으로 가정하였다. 유출구는 집수조의 네면(F1, F2, S1 및 S2면)이며, 파손물은 집수조를 통과하지 못하고 집수조 스크린에 모두 축적되는 것으로 간주하였다. 상기한 가정을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

바닥면 수위:

$$D_{min} = 1.12 \text{ m} \quad (25)$$

유입구 2차차폐벽 안쪽($R < 14.6$ m)의 상부면($y=0$):

$$\begin{aligned} v_m = Q_m / A_m = 0.002 \text{ m/s} \\ r_1 = 1.0, \quad r_2 = 0 \\ k_m = (0.02 \times v_m)^2 \\ \epsilon_m = 0.1643 \times k_m^{1.5} / (0.09 \times D_h) \end{aligned} \quad (26)$$

유출구:

$$u=v=w=0, \quad r_1=1, \quad r_2=0, \quad \frac{\partial k}{\partial n} = \frac{\partial \epsilon}{\partial n} = 0 \quad (27)$$

고체영역과 벽면:

$$u=v=w=k=\epsilon=0, \quad \frac{\partial r_1}{\partial n} = \frac{\partial r_2}{\partial n} = 0 \quad (28)$$

여기서 D_h 는 수력직경을 나타낸다.

3.5 수치해석 방법

본 연구에서는 집수조 근처의 파손물 거동을 해석하기 위하여 상용 CFD 코드인 PHOENICS를 사용하였다. 수치계산 시 대류항의 차분 도식으로는 해외 정확도는 다소 떨어지지만 안정된 해를 구할 수 있는 하이브리드 도식(hybrid scheme)을 사용하였으며, 압력장을 얻기 위해서는 IPSA(Inter-Phase Slip Algorithm)⁽¹³⁾ 알고리즘을 사용하였다. IPSA 알고리즘은 이상유동에서 체적분율 방정식과 운동량 방정식을 조합하여 압력장을 얻어내는 수치적 방법이며, 단상유동에서의 SIMPLE 방법과 유사하다.

좌표계로는 정계밀착 좌표계를 사용하였으며, 속도성분으로는 공변속도 성분(covariant component)이 적용되었다. 계산에 사용된 격자의 수는 x, y 및 z 방향으로 각각 $48 \times 3 \times 76$ 개이다. 파손물의 거동을 해석한 시간은 0~3600 초 구간이며 이 구간을 400 등분하였다. 계산의 초기에는 물리량의 변동이 심하므로 좀 더 작은 시간간격을 사용하였다. 대수방

정식의 매트릭스 해법으로서 압력방정식에 대해서는 SIP(Strongly Implicit Procedure), 속도변수에 대해서는 TDMA를 사용하였다. 본 수치계산에서는 속도장 및 난류량이 수렴조건을 만족시키기 위해서 각 시간단계에서 약 80회의 반복계산을 수행하였으며, IBM Pentium II 266 MHz에서 약 6일 정도의 계산시간이 소요되었다.

4. 결과 및 고찰

집수조 스크린에 퇴적되는 파손물 체적, $V_{n,i}$ 는 계산결과로서 얻어진 파손물 체적분율, r_2 를 적분하여 식 (29)와 같이 얻을 수 있다.

$$V_{n,i} = \sum_{cell} [cell\ volume \times r_2] \quad (29)$$

여기서 i 는 1~4의 값을 가지며, 각 값은 각각 F1($i=1$), F2($i=2$), S1($i=3$) 및 S2($i=4$)면을 지칭한다.

집수조 각 면에서의 유출속도, v_i 는 식 (30)과 같이 각 면으로부터 유출되는 유량, Q_i 로부터 산출하였으며, 파손물 두께, e_i 는 식 (31)와 같이 식 (29)로부터 구하여진 파손물의 체적을 집수조 유출구 면적으로 나누어 구하였다.

$$v_i = \frac{Q_i}{A_i} \quad (30)$$

$$e_i = \frac{V_{n,i}}{A_i} \quad (31)$$

4.1 속도 분포

LOCA 후 시간에 따른 냉각수 거동을 고찰하기 위해서 시간단계 37초, 90초, 222초, 376초, 637초 및 1513초에서 격납건물 바닥면에 인접한 면에서의 냉각수 속도벡터를 Fig. 3에 도시하였다. 시간 37초가 지난 후 냉각수 속도분포인 Fig. 3(a)에서 격납건물 2차 차폐벽 안쪽에 위치한 냉각수가 연결통로를 통과하고 있는 것을 볼 수 있다. 연결통로를 지난 속도벡터의 상부와 하부에서 각각 1개씩 작은 크기의 재순환 영역이 관찰되고 있다. Fig. 3(b)의 시간 90초에서는 37초에서 나타났던 2개의 재순환영역이 좀 더 크게 발달하며, 상부의 재순환 영역은 반시계 방향으로 하부의 재순환영역은 시계방향으로 회전한다.

Fig. 3(c)의 시간 222초에서 계산영역의 유일한

유출구인 집수조는 그림의 좌측에 위치하므로 그림의 우측보다는 유출구가 위치한 좌측 영역으로 향하는 유동이 훨씬 빨리 발달하고 있다. 계산초기에 2차 차폐벽 안쪽에 존재하던 냉각수가 집수조에 도달하고 있으며, F1면으로 약간 편향되는 속도벡터를 보인다. Fig. 3(d)의 시간 376초에서 집수조를 통하여 유출되지 못한 냉각수가 집수조를 경유하여 다시 연결통로 쪽으로 향하는 속도분포가 관찰된다. 시간 37초에서 연결통로 상부에 나타났던 작은 크기의 재순환영역은 시간 376초 이후에서는 집수조와 연결통로 사이에서 반시계 방향으로 회전하는 하나의 커다란 재순환영역을 형성하는 것이 관찰된다.

Fig. 3(e)의 시간 637초에서는 연결통로를 지난 냉각수가 그림의 좌측과 우측으로 완전히 양분되어 대부분의 냉각수는 좌측으로 나머지는 우측으로 향하는 것을 관찰할 수 있다. 시간 1513초에서의 속도분포는 Fig. 3(f)와 같이 637초에서의 유동과 유사하게 나타나므로 637초이후의 냉각수 거동은 정상상태의 유동으로 근접하는 것으로 간주할 수 있다.

4.2 파손물 거동

Fig. 4에는 속도벡터를 도시한 동일한 시간대에 격납건물 바닥면에 인접한 면에서의 파손물 체적분율, r_2 를 도시하였다. Fig. 4(a)의 시간 37초에서 초기에 2차 차폐벽 안쪽에서 0.014의 체적분율을 보이던 파손물이 좁은 연결통로를 지나면서 2차 차폐벽과 외벽사이의 영역으로 유입되기 시작한다. 증기발생기 상부에서는 초기에 2차 차폐벽 안쪽에 위치하던 파손물이 좁은 연결통로 쪽으로 이동하면서 국부적으로 높은 파손물 체적분율 값을 나타낸다. Fig. 4(b)의 시간 90초에서는 2차 차폐벽과 외벽사이의 영역에서 시간 37초에서 보이던 파손물 영역이 3~4배정도 확장된 것을 볼 수 있다.

Fig. 4(c)의 시간 222초에서는 연결통로 상부와 외벽사이의 영역에서 버섯모양의 파손물 영역이 관찰된다. 또한 파손물이 집수조에 처음으로 도달하고 있으며, 연결통로를 기준하여 좌측영역에서 우측영역에 비하여 넓은 파손물 영역이 관찰된다. 연결통로를 지난 파손물은 연결통로를 지날 때의 관성력의 영향으로 외벽 쪽으로 보다 치우치며 이로 인해 외벽에 인접한 영역에서 보다 높은 파손물 체적분율이 관찰된다. Fig. 4(d)의 시간 376초에서는 집수조의 내면으로 냉각수가 근접하며, 이때 집수조 영역에는 국부적으로 파손물이 퇴적되어 최고 0.103의 파손물 체적분율이 관찰된다. 2차 차폐벽 안쪽영역에서는 y 방향 상부면에서 지속적으로

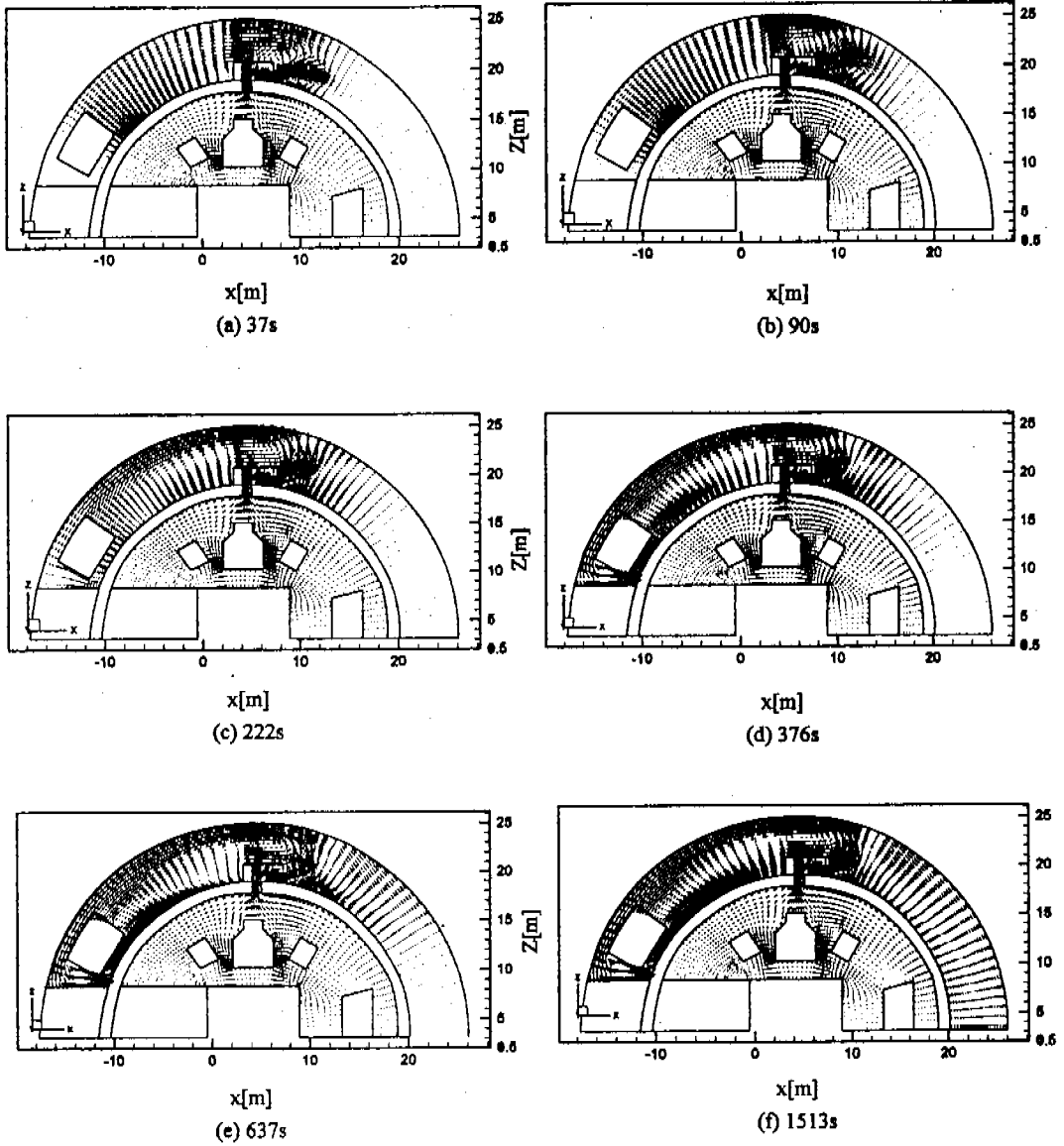


Fig. 3 Velocity vector around a floor of containment building after LOCA.

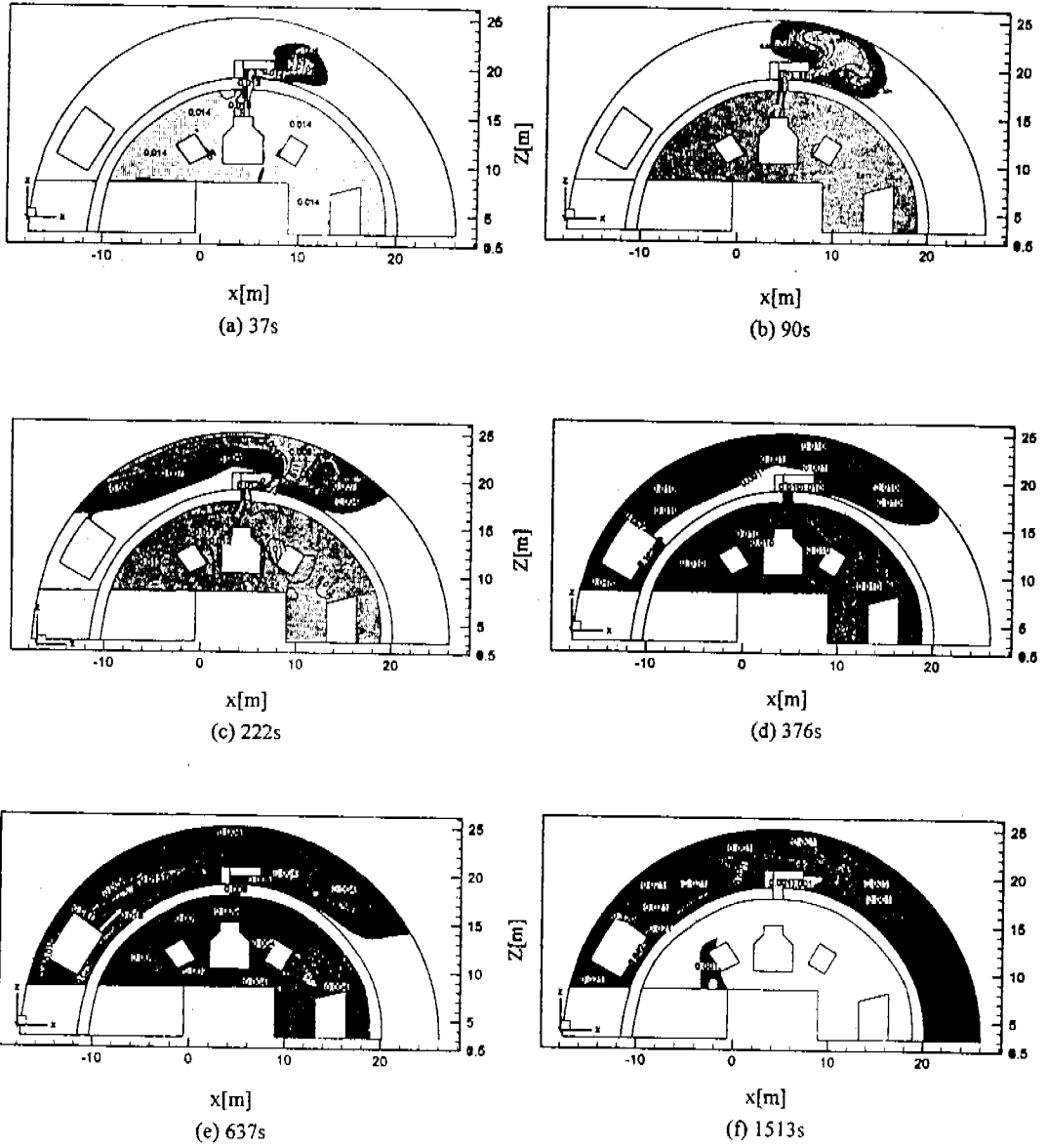


Fig. 4 Volume fraction of debris around containment building after LOCA.

로 파손물이 함유되지 않은 냉각수가 유입되고, 냉각수는 연결통로를 통하여 이탈하므로 이 영역에서 계산 초기에 0.014의 파손물 체적분율을 보이던 파손물 체적분율이 0.01로 감소되어 있는 것이 관찰된다.

Fig. 4(e)의 시간 637초에서는 집수조를 경유한 파손물 집합체가 연결통로 쪽으로 이동한 것이 관찰되며, 이로부터 연결통로를 떠난 파손물이 집수조를 경유하여 연결통로에 다시 도달하는 한 주기는 약 600초 정도가 소요되는 것으로 추정할 수 있다. 대부분의 영역에서 파손물이 관찰되며, 연결통로 구조물 근처와 연결통로 우측영역의 일부 영역에서 파손물이 존재하지 않는 것을 살펴볼 수 있다. 또한 집수조 S2면의 하부영역에서 연결통로 쪽으로 극부적인 높은 파손물 체적분율이 관찰되는 것으로 미루어 파손물의 집합체가 냉각수의 흐름에 따라 집합체를 이루어 유동하는 것으로 사료된다. 연결통로 우측영역에서는 대부분의 시간단계에서 낮은 파손물 체적분율이 관찰되며 이것은 상기한 바와 같이 집수조가 그림의 좌측에 위치하기 때문이다.

Fig. 4(f)의 시간 1513초에서는 2차 차폐벽 안쪽 영역에서 파손물 흔적이 거의 나타나지 않는다. 이로부터 계산의 초기에 2차 차폐벽 안쪽영역에만 위치하던 파손물이 시간이 경과함에 따라 2차 차폐벽과 외벽사이의 영역으로 모두 이동하는 것으로 유추할 수 있다. 또한 속도벡터분포가 정상상태에 근접하는 시간인 1513초에서도 집수조와 연결통로 사이의 영역에서 파손물 체적분율이 0.021로서 초기 체적분율 0.013보다 높은 것으로 미루어 이 영역에 존재하는 파손물은 집수조와 연결통로 사이의 재순환 영역에서 고립되어 집수조 영역으로 도달하지 못하는 것으로 사료된다.

4.3 시간에 따른 집수조 수력학적 거동

집수조 네면을 통과하는 냉각수 유출속도를 정량적으로 고찰하기 위하여 Fig. 5에는 식 (30)으로 정의된 시간에 따른 집수조 네면에서의 평균 유출속도분포를 보여준다. 시간 200~400초에서 네면을 통과하는 유출 속도값이 크게 변화하고 있다. 이것은 시간 200~400초에서 전술한 속도분포 및 파손물 체적분율 분포에서 알 수 있듯이 시간 200초에서 집수조에 처음으로 냉각수가 도달하며, 시간 400초에서 집수조를 경유한 냉각수가 집수조를 떠나기 때문이다. 약 400초이후부터는 F1면에서 가장 높은 유출속도를 보이며 F2면, S1면 및 S2면의 순서로 냉각수 유출속도가 크게 나타나는 것을

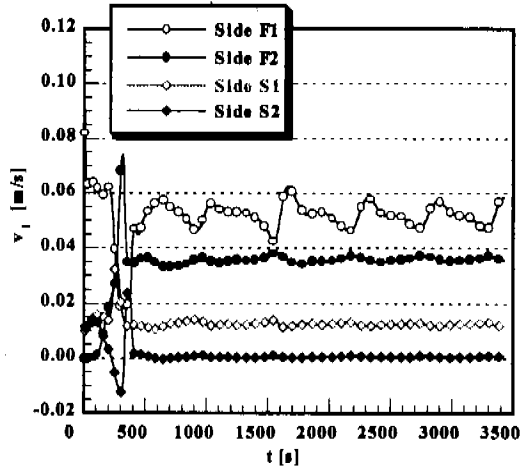


Fig. 5 Outlet velocity at the four surfaces of sump along the time after LOCA.

알 수 있다. F1면과 F2면은 유동에 직접적으로 노출되는 면이므로 다른 영역에 비하여 유출속도가 크게 나타나며, S1면과 S2면은 유동에 평행한 면이므로 그 반대의 유출속도가 나타난다. 시간 400초 이후에서는 유출 속도 값의 변화가 그다지 크지 않으며, 일정한 형태의 분포를 보이고 있다. F1면에서의 유출속도는 시간 400~500초마다 주기적으로 증감하는 경향을 나타낸다.

식 (31)로 정의된 집수조 네면에 퇴적되는 파손물 두께를 정량적으로 고찰하기 위하여 시간에 따른 집수조 네면에서의 파손물 퇴적두께를 Fig. 6에 나타내었다. 시간 200~400초에서 네면에 퇴적되는 파손물 두께가 선형적으로 증가하며, 400초 이후에 파손물 두께는 주기적으로 증감하는 경향을 나타낸다. 이것은 집수조 네면에서의 유출속도를 나타낸 Fig. 4 언급한 바와 같이 약 200초에서 집수조에 처음으로 냉각수가 도달하며, 약 400초에서 집수조를 경유한 냉각수가 집수조를 떠나기 때문이다. 시간 200~400초에서 유출 속도분포의 급격한 변화와 파손물 퇴적두께의 선형적인 증가를 고려해 볼 때 본 계산의 타당성을 검증할 수 있다. 네면에서의 파손물 퇴적두께가 주기적으로 증감하는 경향을 보이지만 특히 F1면에서의 파손물 두께의 변화폭이 가장 크게 나타난다. F1면에서는 800초, 1400초, 2000초, 2600초 및 3200초 등 600초를 주기로 파손물 두께가 크게 나타나며, 이때 나머지 영역에서는 이와는 반대의 경향을 보인다. 이것은 집수조에 퇴적되어 있던 파손물이 집수조와 연결통로를 1회 일주하는 데에 약 600초의 시간이 소

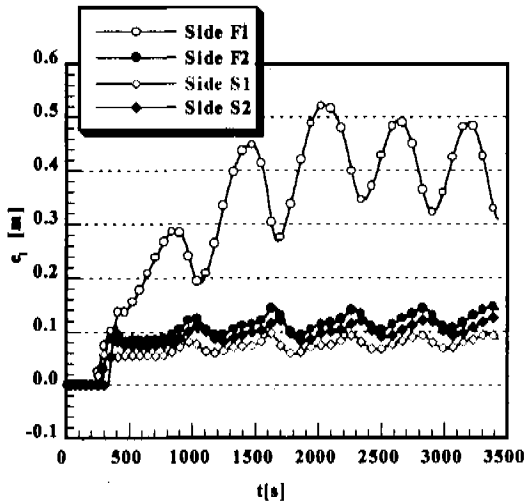


Fig. 6 Debris thickness at the four surfaces of sump along the time after LOCA.

요되며, 파손물이 이러한 과정을 계속하여 반복하기 때문이다. 시간 약 2200 초에서 파손물 퇴적두께가 최고치를 보이며 그 이후에도 주기적으로 증감하는 경향을 보이지만 2200 초 이후에는 파손물 퇴적두께의 최고치가 감소하므로 집수조에 퇴적되는 파손물 두께의 최고치는 약 0.52 m 가 될 것으로 예측할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 원자력발전소에서 LOCA 가 발생하였을 경우, 격납건물내의 집수조 근처에서의 파손물에 대한 3 차원, 비정상, 난류 및 이상유동에 대해 이론적으로 해석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) LOCA 시 시간 376 초이후에서 냉각수는 집수조와 연결통로 사이에서 반시계 방향으로 회전하는 하나의 커다란 재순환 영역을 형성한다.
- (2) 연결통로를 떠난 파손물이 집수조를 경유하여 연결통로에 다시 도달하는 한 주기가 이루어지는 시간은 약 600 초가 소요된다.

(3) 집수조와 연결통로 사이의 영역에서 파손물의 일부는 재순환 영역에 고립되어 집수조 영역으로 도달하지 못한다.

(4) 시간 약 2200 초에서 F1 면에서의 파손물 퇴적 두께가 최고치를 보이며 그 이후에도 주기적으로 증감하는 경향을 보이지만 2200 초 이후에는 파손물 퇴적두께의 최고치가 감소하며 집수조에 퇴적되는 파손물 두께의 최고치는 약 0.52 m 이다.

참고문헌

- (1) NUREG 0897,1985, "Containment Emergency Sump Performance," Rev. 1.
- (2) NRC Regulatory Guide 1.82, 1996, "Water Sources for Long Term Recirculation Cooling Following a LOCA," Rev. 2.
 - 1) Korea Power Engineering Company, "KOPEC General Arrangement Containment Building El. 86-0" Drawing," 9-311-P186-001, Rev. 0.
- (4) Korea Power Engineering Company, "System Description for Chemical Volume and Control System for Ulchin Nuclear Power Plant Units 5&6."
- (5) Korea Power Engineering Company, "System Description for Safety Injection System for Ulchin Nuclear Power Plant Units 5&6."
- (6) Korea Power Engineering Company, "Steam Generator Primary Nozzles," 9-191-Z175-012.
- (7) Korea Power Engineering Company, "Steam Generator Interfaces," 9-161-Z-175-023.
- (8) Korea Power Engineering Company, "KOPEC Containment Building Area Piping Drawings," 9-311-P190-010/020/030/040.
- (9) Korea Power Engineering Company, "Containment Building Concrete Outline Dimensional Control plan Drawing," 9-311-C118-001, Rev.1.
- (10) Korea Power Engineering Company, 1997, "Calculation Sheet," 9-411-N4371-004.
- (11) Kaviany M., 1991, *Principles of Heat Transfer in Porous Media*, Springer-Verlag, New York, pp. 20~20.
- (12) 구본기, 김상수, 1998, "열전조기내에서 슬러지 입자의 증발현상에 관한 수치해석 연구," 대한기계학회 논문집(B) 제 22 권 8 호, pp.1064~1072
- (13) D. B. Spalding, 1992, *Advanced Seminar on Two-Phase and Free Surface Flow*, CHAM, London.
- (14) Clift R., Grace J. R. and Weber M. E., 1978, *Bubbles, Drops and Particles*, Academic Press, pp. 111~114