

## IFCI 를 이용한 FARO L-14 실험 모의(ISP-39)

황문규, 김희동  
한국원자력연구소

### 요 약

본 연구에서는 IFC6.0 코드 검증과 개선점 파악을 목적으로 유럽공동체 연구소 JRC-Ispra 에서 수행한 Faro L-14 실험을 모의하였으며 이는 ISP-39 참여하에 수행하였다. ISP-39 는 용융물과 냉각재 반응 시 용융물 냉각 현상에 있어 관련 해석 코드를 검증하고 각 코드의 한계점을 파악하는데 그 목적을 두고 있다. 계산 결과 용기 내 압력상승 및 냉각재 상승에 관한 경향은 잘 모의하고 있다. 한편 절대값에 있어 실험치에 미치지 못하는 것은 냉각재와의 혼합 시 용융물의 분쇄가 실제보다 덜 예측되고 이에 따른 열전달량의 예측 미달로 인한 것으로 보이며 결국 Lagrangian 코드개발의 필요성이 확인 되었다.

### 1. 서론

가상 노심용융 사고시 노심용융물의 냉각 및 분쇄에 관한 예측은 원자로용기의 건전성에 관한 분석에 있어 필수적이다[1]. Faro L-14 실험에 관한 수치해석적 모의는 OECD/CSNI 의 Principal Working Group 2 (PWG2) 가 경수로 중대 사고 연구와 관련하여 국제 표준 문제(International Standard Problem)인 ISP-39 로 설정하였다[2].

FARO 실험 장치 크게 FARO Furnace, Test Section 인 THERMOS 그리고 Venting System 으로 나뉘어지며 실험의 목적은 고온의 핵연료 물질 용융물의 냉각 및 혼합에 관한 관찰에 있다[3,4]. 실제로  $UO_2/ZrO_2$  의 혼합용융물이 냉각재인 물과 반응하는 THERMOS Test Section(그림 1)은 10MPa/300°C 로 설계된 압력 용기가 된다. 이 용기의 내부 직경은 0.710m 이고 벽 두께는 0.045m 이다. 용융물이 가라 앉아 실제로 접촉하게 되는 bottom plate 의 두께는 0.15m 이고 용기 전체의 무게는 약  $7.0 \times 10^3$ kg 에 이른다. 용기는 총 출력 80KW 의 heater 로 가열되고 바닥을 제외한 모든 부분은 단열 처리가 되어 있다. THERMOS Test section 의 상단에는 release vessel(그림 1 참조)이 위치하는데 FARO Furnace 에서 생성된 용융물은 우선 이 release vessel 로 이송되고 일단 이송이 완료되면 FARO Furnace 와 THERMOS 용기 사이의 주 연결 밸브  $SO_2$  가 잠기고 FARO Furnace 와 THERMOS 용기가 차단 되면 THERMOS 용기 하단에 위치한 물로 낙하되게 된다. L-14 실험 시 이

물의 부피는  $0.798\text{m}^3$  이었고 바닥으로부터 높이는  $2.05\text{m}$  무게는  $623\text{ Kg}$  이었다.

## 2. IFCI 지배방정식 (Governing Equations)

IFCI 에서 사용하고 있는 방정식은 4-field 및 2-D 형식이고 cylindrical geometry 를 취하고 있는데 사실상 이 네 field 중 오직 세 field 만 이용되고 있다[5]. 첫째 field 는 가스에 이용되고 둘째 field 는 냉각재인 물로 그리고 마지막 셋째 field 는 용융물로 할당된다. 이를 각각의 field 간에는 질량교환, 열교환 및 운동량교환이 이루어 진다. 여기서 각 field 는 질량, 운동량 및 에너지 보존 원칙에 지배 받으므로 다음과 같은 방정식이 성립된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \vec{v}) - \Gamma_{jk} - \Gamma_{wk} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} v_{xk} + \vec{v}_k \cdot \nabla v_{xk} + \frac{1}{r_k} \frac{\partial \vec{r}}{\partial x} + \frac{1}{(\alpha \rho)_k} \left[ \sum_{j=1}^4 C_{xjk} (v_{xk} - v_{xj}) |v_{xk} - v_{xj}| + C_{xwk} v_{xk} |v_{xk}| + F_{xk}^v \right] + g_x = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_k \rho_k e_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k e_k \vec{v}_k) + P \left( \frac{\partial \alpha_k}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha_k \vec{v}_k \right) - \sum_{j=1}^4 \Gamma_{jk} H_k - \sum_{j=1}^4 Q_{jk} - Q_{wk} - Q_{sk} = 0$$

$$F_{xk}^v = \alpha_k \bar{\rho}_L C_{vm} \left[ \frac{\partial v_{xk}}{\partial t} - \bar{\alpha}_2 \frac{\partial v_{x2}}{\partial t} - \bar{\alpha}_3 \frac{\partial v_{x3}}{\partial t} - \bar{\alpha}_4 \frac{\partial v_{x4}}{\partial t} \right]$$

여기서 마지막 방정식은 둘째 방정식인 운동량 보존식에서의 Virtual Mass 를  $C_{vm}$  값은 다음과 같다[6]

$$C_{vm} = 4 \sqrt{\bar{\alpha}_1^3 \bar{\alpha}_L \frac{\rho_1}{\rho_L}}$$

## 3. 모의 방법

초기조건 및 경계조건 설정에 있어 IFCI 6.0은 비교적 다양한 선택의 여지가 있으나 경계면에서의 유체속도는 구조물의 최 외곽에서만 설정할 수 있는 제약이 있다. 예를 들면 Faro 실험과 같이 용융물이 일단 release vessel에 전송되고 다시 냉각재로 낙하 시킬 경우 release vessel의 출구는 전체 THERMOS 압력용기 내부에 위치하기 때문에 그 속도를 입력자료에서 설정할 수가 없다. 본 연구에서는 이러한 제약을 극복하기 위해 전체 수치해석 모의 시 THERMOS 압력용기의 구조를 변경하였다. 즉 release vessel의 출구를 전체 구조물의 경계로 옮기기 위해 출구상단에 위치하는 가스의 체적을 출구하단 가스 체적의 측면으로 이동 하였다.

Faro 실험 과 같이 비교적 완만한 압력상승의 경우 이와 같이 가스가 차지하고 있는 구조물의 변형은 그 체적치를 유지시킬 경우 실제적으로 영향이 없다고 할 수 있다. 그림 2는 THERMOS 압력용기의 모의를 위해 Nodalization한 형태를 보여주고 있다. 모의 시 사용된 축 방향의 셀 수는 30개였고 반경방향으로 THERMOS 용기는 모두 7개 그리고 기타 Venting 장치가 차지하는 셀은 2개였다. 용융물 출구의 직경은 실제 실험치인 0.092 m 보다 조금 큰 0.10142m가 설정되었다. 이는 출구 하단에 위치한 셀의 크기를 실제값으로 주었을 경우 용융물 방출 시 셀 전체가 용융물에 포함되어 수치해석적으로 불안정해지는 현상을 방지할 목적이었다고 사실상 용융물 출구 위치는 하부 냉각재로부터 1m 정도 떨어져 있으므로 이로 인한 계산결과에 의 영향은 없을 것이다. 그림에서  $h_1$ 은 냉각재의 높이이고  $h_2$ 는 냉각재 상단으로부터 release vessel의 출구까지의 높이로 용융물이 가스중 자유낙하하는 거리가 된다. 반경  $r_1$ 은 THERMOS 압력용기 내부 반경치이고 앞에서 언급한 release vessel 출구 상부의 가스체적은 그림에서  $v_2$  으로 표시되었다. 또  $v_2$ '는 분리기 (Separator)와 이 분리기로 연결하는 라인의 체적을 모의한다. 그림에서  $v_3$ 로 표시된 체적은 나머지 부분과 단절되 있으므로 사실상 모의에는 포함되지 않는다. Faro L-14 실험 모의시 주요 변수치는 다음과 같다.

$H_1=2.016m$	$(\Delta h)_1=0.1008m$	$r_1=0.355m$	$(\Delta r)_1=0.05071m$	$V_1=0.798m^3$
$h_2=1.035m$	$(\Delta h)_2=0.1035m$	$r_2=0.6287m$	$(\Delta r)_2=0.09123m$	$V_2=0.4098m^3$
$h_3=0.414m$		$r_3=0.8921m$	$(\Delta r)_3=0.1317m$	$V_2'=0.3502m^3$
				$V_2''=0.521m^3$

용융물이 release vessel (그림 2 참조)로부터 낙하하는 속도는 용융물의 입수속도를 결정하고 이 입수속도는 냉각재 내에서 용융물의 분쇄현상 진행의 결정에 있어 중요 인자가 된다. Faro 실험의 경우 가시화 측정이 이루어 지지 않았고 결국 그 속도에 관한 실험자료는 존재하지 않는다. 용융물 낙하속도는 용융물의 물성치와 release vessel의 형태에 의해 결정되는데 다음의 식으로 그 속도를 예측할 수 있다.

$$I\rho_{melt} \frac{dv_{melt}}{dt} = \rho_{melt}gh_{melt} - k\rho_{melt} \frac{v_{melt}^2}{2}$$

- 여기서  $I$ 는 용융물의 Inertia  
 $\rho_{melt}$ 는 용융물 밀도  
 $v_{melt}$ 는 용융물 속도  
 $h_{melt}$ 는 release vessel 내에서의 용융물의 높이가 된다.

이 방정식의 해를 구하면 그림 3 과 같은 속도 변화가 얻어진다.

#### 4. 결과 및 고찰

대부분의 증기폭발관련 분석코드가 그러하듯이 IFCI의 경우도 용융물 Jet를 직접 모의하지 못하고 초기에 구(droplet) 형태로 존재 한다고 가정한다. 입력자료에는 이 구의 초기값을 지정하도록 되어 있는데 실제 실험 시 0.092 m의 직경으로 추측되는 용융물 Jet는 계산 시 0.09 m 그리고 0.03 m 의 값으로 모의 하였고 이 두 경우를 각각 Case-A 및 Case-B로 지칭하기로 한다.

그림4 는 THERMOS 용기 내부의 압력상승을 보여준다. 그림에 나타나 있듯이 전체적으로 압력 상승이 시작되는 시점은 실험 계측치와 유사하고 상승포화가 되는 시점 또한 매우 유사하여 전반적인 추의를 잘 모의하고 있다. 그러나 상승률에 있어 실험치에 못 미치고 또 실험 계측 시 압력 상승치는 약 28 bar에 이르나 IFCI 모의 시에는 Case-A의 경우 12 bar 혹은 Case-B에서는 15 bar 정도의 압력상승을 보여 전반적으로 증기발생 정도를 낮게 예측하는 것으로 나타났다.

그림 5에서는 THERMOS 용기 높이 400mm 의 중앙(축위치)에서의 냉각재 온도변화를 보여 주는데 Case-A 및 Case-B 두 경우 모두 그 추세 및 절대량에 있어 실험치와 매우 근접한 계산결과를 보여 주고 있다. 특히 이 위치는 냉각재의 초기 높이가 약 2m 이었으므로 용융물이 약 1.6 m 정도 냉각재와 열전달 반응을 하며 낙하 한 후의 지점이고, 실험치와 매우 유사한 온도 상승기점은 용융물의 이동위치를 잘 모의하고 있음을 보여 준다. 이런 추세는 그림6에서 보듯이 높이 800mm의 중앙에서의 물온도 비교시에도 매우 근접한 계산치를 보여주고 있다. 반면 그림 7 의 경우 냉각재 온도 측정 높이는 400 mm로 그림 5의 경우와 같으나 축방향의 중앙부가 아니라 이로부터 150mm 외곽지점에 관한 자료이다. 그림에서 보듯이 실험자료는 각도 90° 및 270° 두 지점에서 측정되었고 이 들에 관한 계측치는 실험 시 의도했던 바와 같이 angular symmetry 인 경우 유사치를 보여야 하나 약 4초 까지는 상당히 상이한 값을 보이고 있다. 역시 수치해석 모의결과와는 그 추의 및 절대값에서 비교적 유사한 결과를 보이고 있다. 다만 앞서 논의한 용기 중앙부의 경우보다 모의 후반부에서 계산치는 비교적 낮은 온도값을 보이고 있다. 그림 8은 그림 7과 유사한 경우 이나 온도 측정높이가 400mm 대신 800mm인 지점에 관한 변화를 보이고 있다. 역시 전체적인 변화 추의는 비슷하나 전반적으로 실험치 보다 낮은 온도예측을 보이고 있다. 이 경우 높이 400mm경우와는 달리 실험치에서 90°자료와 270°자료가 상대적으로 비슷해 angular symmetry를 보여주고 있다.

## 5. 결론

FARO L-14 실험에 대한 모의 결과 용융물의 냉각 및 증기발생으로 인한 압력상승은 실험 시 상승치의 약 60%에 해당하는 값을 보여 용융물로 부터의 열전달은 실제보다 적게 예측하나 압력상승의 경향 및 상승기점등 전반적인 경향은 매우 유사했다. 특히 물온도에 관한 예측은 중앙부에서 그 경향 및 크기에서 실험치에 근접했으며 주변부에서는 중앙부의 경우보다 실험치에 덜 미쳐 반경방향 열전달에 관한 보안의 필요성이 확인 되었다. 또 IFCI 코드의 경우 Eulerian 형식으로 용융물의 크기를 추적하기가 용이하지 않아 Lagrangian 방식의 코드개발에 관한 중요성 또한 발견 되었다.

## 6. 참고문헌

1. T.G. Theofanous, et. al. "Lower Head Integrity under In-Vessel Steam Explosion Loads," DOE/ID-10541 June 1996.
2. A. Annunziato, et. al. "OECD/CSNI International Standard Problem No. 39 on FARO Test L-14 Reference Specification," JRC, Ispra Technical Note No. I.96.64 April 1996.
3. D. Magallon, G. Leva, "FARO LWR Program Test L-14 Data Report," JRC, Ispra Technical Note No. I.96.25 Feb. 1996
4. F. J. Davis. M.F. Young, "Integrated Fuel-Coolant Interaction (IFCI 6.0) Code User's Manual," NUREG/CR-6211, Sandia National Lab, April 1994
5. H.C. No and M.S. Kazimi, "Effect of Virtual Mass on the Mathematical Characteristics and Numerical Stability of the Two-Phase Model," Nucl. Sci. & Eng. 89 pp197-206

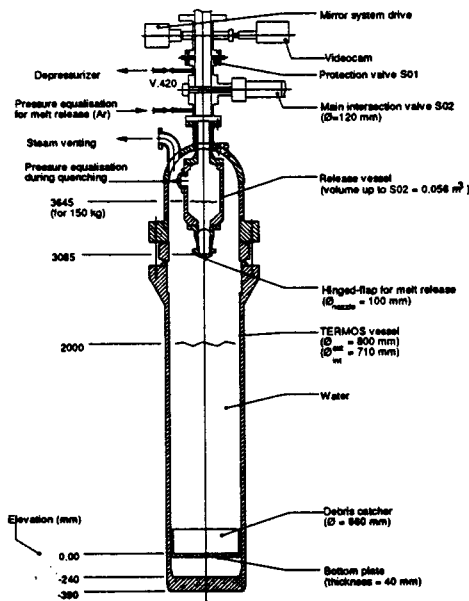


그림 1 FARO Test Section ( THERMOS 압력용기)

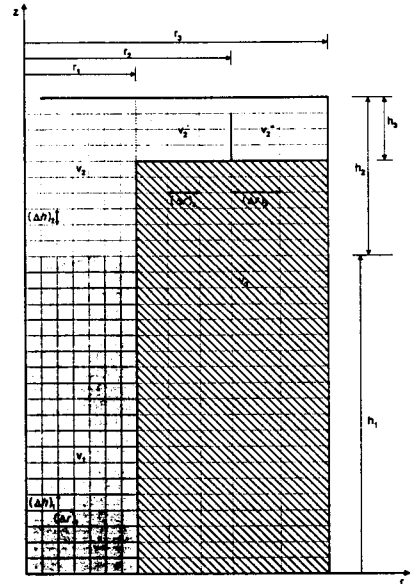


그림 2 THERMOS 용기 Nodalization

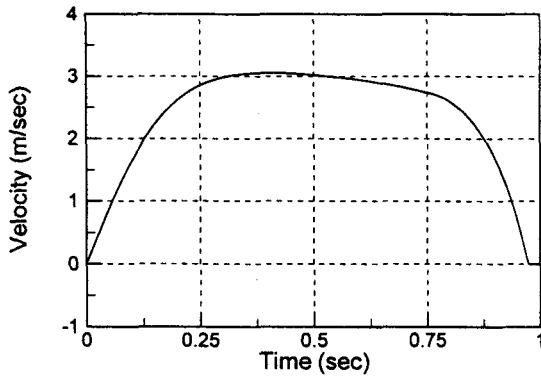


그림 3 Release Vessel Nozzle에서의 용융물 낙하속도

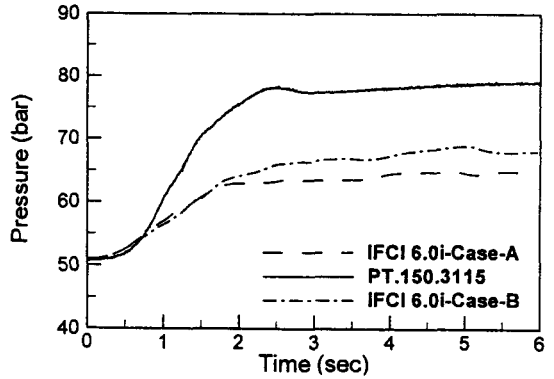


그림 4 Steam Dome에서의 압력변화

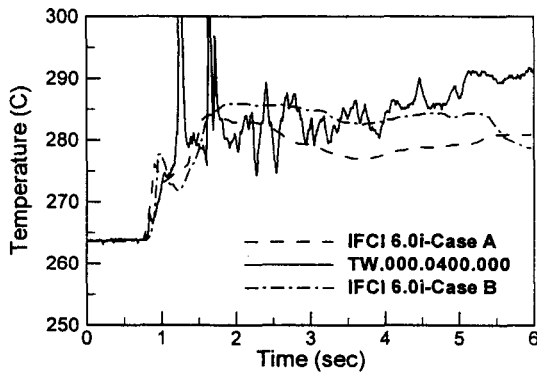


그림 5 THERMOS 용기 중앙부 냉각재 온도(높이 400mm)

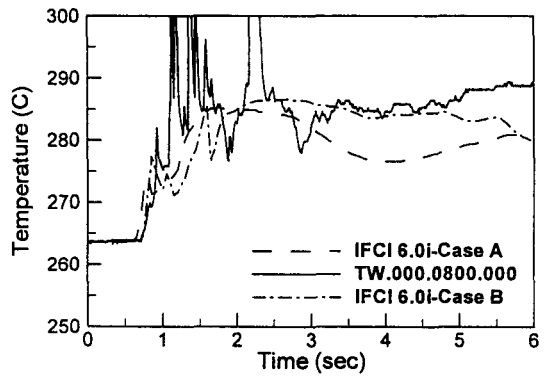


그림 6 THERMOS 용기 중앙부 냉각재 온도(높이 800mm)

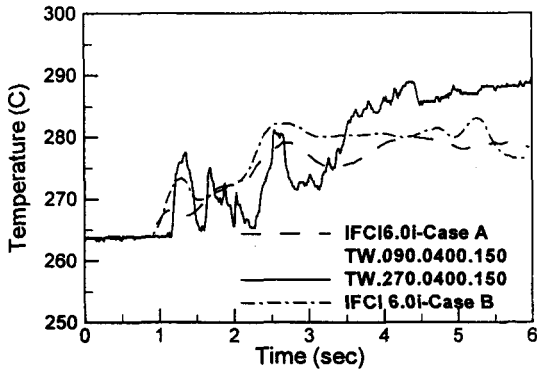


그림 7 THERMOS 용기 주변부 냉각재 온도(높이 400mm)

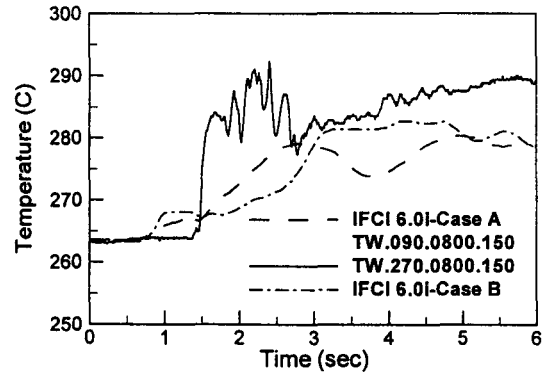


그림 8 THERMOS 용기 주변부 냉각재 온도(높이 800mm)