

울진 3,4호기 캐비티 모형에서 고압분출사고시 용융물 방출에 관한 연구

홍성완, 김희동, 진영호

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

본 논문에서는 고압분출 사고시 격납용기 하중 완화를 위해 국내 원전에서 채택하고 있는 캐비티내 나포체적이 용융물 방출 분율에 미치는 효과를 분석하기 위한 방법을 제시하고, 이를 울진 3,4호기 캐비티 모형에 적용하였다. 이를 위해 용융물 방출을 예측을 위해 이미 개발된 Kim's 상관식에 고온 상사물을 모의하기 위한 방정식을 도출하여 고온 실험에 적용하였다. 또한, SNL에서 실험자료를 정리하면서 얻은 결과와 나포체적을 가진 캐비티를 대상으로 국내에서 수행된 실험결과를 이용하여 나포체적 해석을 위한 방안을 제시하였다. Kim's 상관식에 고온 상사물 모델을 위한 방정식과 나포체적 해석 방안을 적용 개선하여 울진 3,4호기와 이와 유사한 캐비티모형에서 용융물 방출 분율을 예측하였다.

1. 서론

본 논문에서는 DCH 발생시 격납용기 하중 완화를 위해 국내에서 처음으로 채택한 나포체적(Capture Volume)을 가진 원자로 하부 공동(캐비티 : Cavity)에서 나포체적이 용융물 방출 분율에 미치는 효과를 분석하였다. Tutu 등은 나포체적과 유사한 개념인 retention chamber 및 reflector vane 등을 캐비티 내부에 설치하여 용융물 방출이 매우 줄어든다는 것을 실험적으로 증명하였으며, 국내에서도 울진 3,4호기를 기준으로 여러가지 캐비티 모형에서 대해 실험이 수행된바 있으나 용융물 방출을 예측하기 위한 해석적 노력은 거의 이루어지지 않았다.

여기에서는 국내에서 개발된 Kim's 상관식[1]과 저온상사물을 사용한 나포체적이 있는 캐비티 모형에 대한 실험결과[2]를 이용하여 나포체적이 있는 캐비티로부터 용융물 방출을 예측 할 수 있는 방법을 제시하였다. 이를 위해 Kim's 상관식에서 고온 상사물을 모의할 수 있도록 하여 저온 및 고온 상사물을 이용한 실험에 적용하였고, SNL의 실험자료 정리 결과[3]를 토대로 나포 체적 해석방안을 제시하였다. 고온 상사물 모델을 위한 방정식과 나포체적 해석방안을 보완하여 개선된 Kim's 상관식으로 울진 3,4 호기 및 이와 유사한 캐비티모형에서 용융물 방출 분율을 예측하였다.

2. 해석 모델

캐비티로 부터 방출되는 노심 용융물 분율의 예측은 소규모 실험장치에서 상사물질을 이용한 실험결과로부터 얻은 실험 상관식 등을 사용하며 최근 Kim[1]은 이를 좀더 일반화하여 캐비티의 특성길이, 캐비티 내부 가스 유로 단면적과 같은 캐비티 기하학적 특성을 고려한 상관식을 제시하였다. 그러나 나포체적을 가진 캐비티에서는 Kim's 상관식에서 정의한 용융물 입자의 유로를 따라가는 특성길이의 정의가 용이하지 않으며, 고온 상사물에 의한 밀도 변화, 특히, 캐비티 내부에서의 용융물 산화로 인한 가스 밀도 변화와 속도 변화의 영향 등이 고려되지 않아 나포체적을 갖는 실제 캐비티에서 일어나는 고온 노심 용융물 방출 분율을 예측하기 위해서는 보완이 필요하다.

나포체적의 크기를 달리한 저온 상사물에서의 실험결과에 의하면 그림 1.a에서 보여주고 있는 것처럼 나포 체적이 클수록 같은 량의 노심 용융물이 캐비티 밖으로 방출될 때의 압력은 증가한다. 그러나 SNL 결과[3]는 실험 자료를 용융물의 50%가 방출될 때 필요한 압력인 P_{50} 을 사용하여 정규화(normalized)하면 그림 1.b에서처럼 나포체적의 크기와 무관하게 하나의 곡선으로 나타낼 수 있다.

즉, 나포체적 크기에 따른 압력의 비는

$$\frac{P_0}{P_{50,0}} = \frac{P_i}{P_{50,i}} \quad (1)$$

여기서 P_i 는 나포체적이 용융물 체적의 i 배일 때 원자로 내부 압력으로 일정하게 나타남을 알 수 있었으며, 따라서 나포체적의 크기에 따라 증가하는 압력은

$$P_i = f_{p,cap} * P_0 \quad (2)$$

로 표현할 수 있다.

SNL의 실험 결과[4]에 의하면 고압 분출(HPME:High Pressure Melt Ejection)이 진행되는 동안 원자로 내부에서 산화되지 못한 금속은 캐비티로 방출되어 캐비티내에서 급속히 산화되며, 이러한 산화는 캐비티 내부 온도 상승 과 가스 밀도를 변화시켜 용융물 방출 분율에 많은 영향을 미침을 보여주고 있다. 따라서 원자로 내부의 하나의 가스에 대해서만 취급하는 Kim's 상관식을 고온 상사물 및 상용발전소에 적용하기 위해 HPME가 진행되는 동안 캐비티내에 수소 등 여러가지 가스가 존재하는 경우를 모델하도록 하였다. 캐비티 내부에 수소가 존재하는 경우 가스밀도(ρ_n) 및 캐비티 내부온도가 T_0 에서 T_{cv} 로 증가로 인한 가스속도(v_n) 변화를 모의하기 위해 다음과 같은 방정식을 유도하였다.

$$\rho_n = (T_0/T_{cv}) * (MW_{cv}/(18.081536)) * \rho_R \quad (3)$$

$$v_n = v_0 * (T_{cv}/T_0) \quad (4)$$

여기서

P_0 : HPME 발생시 원자로 내부 압력, $P_{50,0}$: 나포체적이 없을 때 용융물의 50%가 방출되는 압력

$P_{50,i}$: 나포체적이 i 배일 때 용융물 50%가 방출되는 압력, $f_{p,cap}$: 나포체적 효과로 인한 압력 증가 인자.

앞서 밝힌 바와 같이 실험에 의하면 나포체적이 있는 경우 같은 분율의 노심용융물을 방출되기 위해서는 더 높은 압력이 필요하며 이러한 압력 증가는 일정한 비율로 표현할 수 있다. 나포체적이 있을 경우의 캐비티 내부에서의 가스 속도는 내부 압력에 비례하므로 가스 속도를 계산하기 위해 다음과 같은 속도 증배 계수를 정의 하였다.

$$f_{vel,i} = P_{50,0}/P_{50,i} = P_0/P_i \quad (5)$$

또한, 위의 상관식을 나포체적을 가진 실험 결과에 적용하였을 때 속도 증배 계수는 캐비티내 나포체적 크기에 따라 다음과 같이 선형적으로 증가함을 알 수 있었다.

$$f_{vel} = -0.1i + 1.0 \quad (6)$$

여기서 i 는 용융물 체적에 대한 나포 체적의 체적분율, 나포체적이 없는 경우 $i=0$

캐비티내 용융물 입자 속도는 Kim's 상관식에서는 blowdown 시작시 가스 속도와 용융물 방출이 끝나는 시점에서의 가스속도를 평균하여 계산하고 있으나 여기서는 용융물 입자의 속도를 수치적분법(용융물 방출이 일어나는 시간을 10개의 구간으로 나누어 이들 각 구간에서의 가스 속도를 평균)을 사용하였다.

3. 상관식 검증

Kim's 상관식은 이미 그의 논문에서 저온상사물을 사용한 여러 실험과 검증이 이루어 졌다. 앞 절에서 설명하였듯이 용융물 입자속도를 계산하는 방법을 달리하고 Kim's 상관식을 사용하여 용융물 상사물로 물을 사용한 고리 1,2호기 및 modified 영광 3,4호기, 용융물 상사물로 wood metal을 사용한 영광 1,2 호기, 그리고 추가로 BNL에서 용융물 상사물로 wood metal을 사용한 Surry 캐비티 모형에 적용하였다. 예상했던 대로 국내 및 BNL에서 수행한 실험을 잘 예측하였다. 또한, 캐비티 내에서의 밀도 및 가스 온도 변화를 고려하였을 때의 모델을 검증하기 위해 고온 상사물(Thermite)로 SNL에서 실험(LFP Test)과 비교하였다. HPME동안 캐비티내에서 가스 온도는 용융물(실제 HPME 동안 용융물의 온도는 시간에 따라 변화 함)과 driving 가스 온도의 대략적인 평균 온도인 1100 K를 가정하였다. 표1은 LFP test의 계산을 위해 사용된 값 및 용융물 방출 분율의 실험치와 모델의 예측치를 비교하여 보여주고 있다. LFP-1A의 경우 캐비티 내부에서 가스 물 분율이 측정되지 않아 임의로 가스 물 분율이 가정되었기 때문에 용융물 방출분율 실험과 비교가 어렵지만 나머지 실험에 대해서는 최고 10% 정도 실험과 차이를 보이고 있다. 이러한 결과는 캐비티 내부의 가스 온도에 대한 측정된 자료가 있어야만 정확한 해석을 할 수 있겠으나 비교적 실험과 큰 차이를 보이지 않고 있다.

4. 여러가지 캐비티 모형에서 용융물 방출 분율 계산

그림 2.a는 울진 3,4호기 캐비티 제원을 그림 2.b는 용융물 방출 분율을 계산하기 위한 울진 캐비티 모형을 기준으로 6가지의 캐비티 모형을 보여주고 있다. 본 해석에서는 노심용융물이 캐비티

섬프(Sump)로 흘러 들어 가는 것을 막기 위해 캐비티 바닥에 설치한 턱과 격납건물 (86 ft)에서 캐비티로 들어가는 보수용 출입문(Door)은 고려하지 않았다. 그림 2.b에서 캐비티 모형 1은 울진 3,4호기 캐비티 모형에서 나포체적과 용융물 방출을 억제할 목적으로 설치한 턱(Overhang)이 없는 영광 3,4호기 캐비티 모형과 같은 경우이며, 캐비티 모형 2는 현재 캐비티 설계대로 울진 3,4호기 나포체적과 턱이 있는 경우이고, 캐비티 모형 3은 나포체적만 있고 턱을 제거한 경우이고, 캐비티 모형 4는 나포체적은 없고 턱만 설치한 경우이다. 캐비티 모형 5와 6은 턱을 없애고 나포체적이 용융물 체적이 1배, 2배라고 각각 가정한 경우이다. 표 2는 사고 경위와 관계없이 본 계산에서 공통적으로 사용한 값들인데, 이들 값은 대표적인 S₂D 사고에서 인용된 것으로 사고 경위에 따라 크게 달라지지 않는 값들이다. 표 3은 나포체적 계산을 위해 사용되는 변수들로 사고 경위에 따라 달라지며 MAAP 코드로 계산한 값을, 표 4는 5개의 사고 경위에 대해 그림 2.b의 여러 가지 캐비티 모형에서의 용융물 방출 분율을 보여 주고 있다.

전원상실사고(SBO) 경위처럼 일차측 압력이 매우 높을 때와 SLOCA4와 같이 일차측 압력이 매우 낮을 때에는 캐비티 모형에 관계없이 용융물 방출 분율은 거의 차이를 보이지 않았다. 그러나 DCH 발생 가능성이 보통인 일차측 압력이 1,000-2,000psi(6.7MPa - 13.4 MPa)에서는 캐비티 모형에 따라 용융물 방출 분율은 많은 차이를 보인다. 즉, 나포체적과 용융물 방출을 억제할 목적으로 만든 턱이 있는 울진 3,4호기와 동일한 캐비티 모형을 가진 경우(캐비티 모형 2) 오히려 캐비티 모형 1과 같이 나포체적도 없고, 턱도 없는 경우보다 용융물 방출이 잘 이루어 졌다. 한편, 나포체적만 있고, 턱이 없는 경우(캐비티 모형 3)는 나포체적이 없을 때보다 용융물 방출이 약 1 % 정도 밖에 줄지 않는다. 한편, 나포체적을 설치하지 않고, 용융물 방출 방지 턱만의 설치는 오히려 용융물 방출을 증가시켰다(캐비티 모형 4). 이러한 결과는 국내에서 수행된 소규모 실험 결과도 일치한다. 또한, 울진 3,4호기 캐비티 모형에서 용융물 방출을 억제 목적으로 설치하였던 턱을 제거하고 나포체적이 용융물 체적의 1배를 가정한 캐비티(캐비티 모형 5)는 울진 3,4 호기 캐비티 모형보다 DCH 발생이 보통인 압력(1,000 -2,000 psi)에서 용융물 방출이 10-15 %, 나포체적이 용융물 체적의 2배인 경우(캐비티 모형 6)는 15-20 % 용융물 방출이 감소하였다.

5. 결론

본 논문에서는 Kim's 상관식을 일부 보완.개선하여 고온 상사물 및 나포체적이 있는 경우 용융물 방출분율을 예측할 수 있는 모델 방법을 도출하여 검증하였다. 또한, 실험 자료를 토대로한 나포체적 해석을 위한 상관식을 제시하였으며, 이를 이용하여 울진 3,4호기 캐비티 모형에 적용하여 첫째, 울진 3,4 호기와 같은 캐비티 모형에서는 용융물 방출 억제를 위해 설치하였던 턱(Overhang)이 용융물 방출을 증가시켰다. 둘째, Overhang을 제거 한다 해도 나포체적이 용융물 체적에 비해 매우 작기 때문에 나포체적은 용융물 방출을 크게 줄지 않았다. 셋째, Overhang을 제거하고 나포체적이

용융물 체적의 1배를 가정한 캐비티는 울진 3,4 호기 캐비티 모형보다 DCH 발생이 보통인 압력(1000-2000 psi)에서 용융물 방출이 10-15 %, 2배인 경우는 15-20 % 용융물 방출이 감소하였다.

본 논문에서는 캐비티 바닥에 설치한 턱 및 보수용 출입문에 대한 효과가 현재 모델의 한계로 고려되지 못하였는데, 이들에 대한 효과가 고려되어야 울진 3,4 호기 캐비티 모형이 용융물 방출에 미치는 효과를 정확히 분석할 수 있다.

References

1. S.B. Kim, "Experimental Study of Geometric Effect on the Debris Dispersal Phenomenon in a Reactor Cavity during Postulated High Pressure Melt Ejection Scenario", 1995. KAIST
2. S.B. Kim et al., "Improvement of Reactor Cavity for Mitigation of Direct Containment Heating.", SARJ-94, Tokyo, Japan, Oct. 31- Nov. 1, 1994,
3. D.C Williams et al., " Assessment of Cavity Dispersal Correlation for Possible Implementation in the CONTAIN code", SAND94-0015, Feb. 1996.
4. M. D. Allen et al., "Experiments to Investigate the Effect of Flight Path on Direct Containment Heating(DCH) in the Surtsey Test Facility", NUREG/CR-5728, SNL, Oct. 1991.

표1. LFP 모의를 위한 조건 및 용융방출 분율 비교

		Test Serious(LFP)					
Parameters		1A	1B	2A	2B	2C	8A
Po(MPa)		3.7	2.6	3.0	3.6	3.3	2.6
Do(cm)		6.41	3.5	3.5	5.97	8.57	3.5
H ₂ OV (mole)		262	180	229	249	246	188
H ₂ Produced (mole)		235.3	128.2	151.4	154.2	184.4	139.3
Mole Fraction in Cavity	H ₂	N/A	0.28	0.29	0.33	0.11	0.31
	H ₂ O	N/A	0.40	0.43	0.53	0.15	0.42
	CO	N/A	0.11	0.9	0.8	0.4	0.20
	Ar	N/A	0.21	0.19	0.6	0.70	0.7
DF(Exp.)		72.5	20.9	48.4	61.6	62.0	39.3
DF(Cal.)		76.6	22.5	45.4	72.5	69.0	35.8

표2. 본 계산에 사용한 값들

Definition	Value
Vessel Diameter(Cm)	40
Surface Tension of the Debris (N/m ²)	0.973
Debris Density(kg/m ³)	7,698
Debris Viscosity(Pa.s)	1.59 E-3
Cross-sectional Area of the Cavity(m ²)	그림 2.a
Volume of the Primary System(m ³)	302.4
Characteristic Length of the Cavity(m)	26.28

표 3. 사고 경위에 따른 MAAP 계산 결과에 의한 DCH 발생 초기조건들

Parameter	Sequence				
	SBO	SLOCA1	SLOCA2	SLOCA3	SLOCA4
Break Size (ft ²)		0.01	0.0011	0.0012	0.0023
Gas Temp in RCS(K)	892	796	788	943	884
RCS Pressure(MPa)	15.67	11.22	8.98	6.45	3.88
Corium Temp RV(K)	2687	2720	2724	2727	2791
Corium Volume(m ³)	16.89	16.89	16.89	16.89	16.89
Corium Mass in RV(x10E4kg)	14.32	14.32	14.34	14.35	14.32
Pressure in Cavity (x10E5 Pa)	5.74	2.7	2.7	2.7	2.7
Gas Temp in Cavity(K)	946	420	420	450	450
Steam Mole Fraction in Cavity at VF	0.2	1.0	1.0	0.95	0.95
H ₂ Mole Fraction in Cavity at VF	0.8	0.0	0.0	0.05	0.05

표 4. 사고 경위 및 캐비티 모형에 따른 용융물 방출

	P _o (MPa)	T _{cv} (K)	XH ₂	Dispersed Fraction from Cavity(%)					
				캐비티 모형1	캐비티 모형2	캐비티 모형3	캐비티 모형4	캐비티 모형5	캐비티 모형6
SBO	15.67	2000	0.8	78.4	78.9	78.3	79.0	77.8	76.8
SLOCA1	11.22	2000	0.0	67.4	71.5	66.5	72.2	63.2	57.5
SLOCA2	8.98	2000	0.0	55.8	63.2	54.5	64.4	49.6	42.0
SLOCA3	6.45	2000	0.05	21.2	31.5	20.2	33.1	16.2	11.8
SLOCA4	3.88	2000	0.05	2.21	4.94	2.05	5.35	1.57	1.07

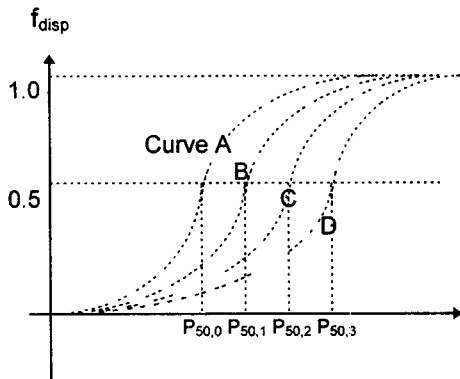


그림 1.a

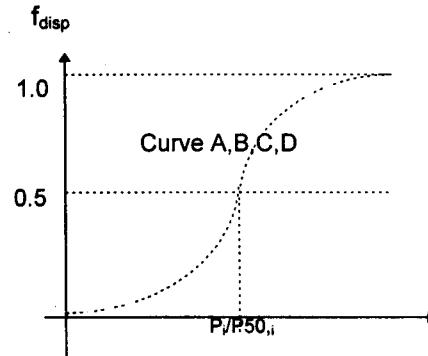


그림 1.b

- Curve A: 나포체적이 없는 캐비티 모형에서 용융물 방출 분율 곡선
- Curve B: 나포체적이 용융물 체적의 1배일 때 용융물 방출 분율 곡선
- Curve C: 나포체적이 용융물 체적의 2배일 때 용융물 방출 분율 곡선
- Curve D: 나포체적이 용융물 체적의 3배일 때 용융물 방출 분율 곡선

그림 1. 국내 실험 결과를 토대로 한 나포체적 유무에 따른 용융물 방출 곡선(그림 1.a) 및 용융물의 50%가 방출되는 압력을 가지고 normalized 할 때 용융물 방출 곡선(그림 1.b)

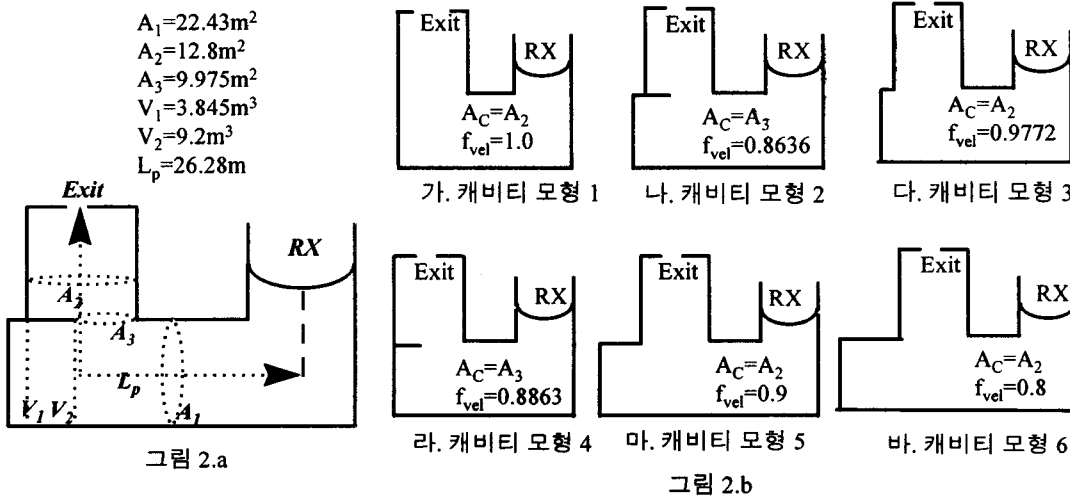


그림 2.a

그림 2.b

그림 2. 울진 3,4호기 캐비티 제원 및 HPME 동안 용융물 방출량을 비교하기 위한 캐비티 모형 들