대한기계학회 2001년도 춘계학술대회논문집 D pp. 127~132 KSME 01S414

중대사고 시 차세대 원전 관통부의 건전성에 대한 원자로 용기 외벽 냉각의 영향 평가 실험 연구

강경호*, 박래준*, 김종태*, 김상백*, 이기영**, 박종균**

An Experimental Study on Effect of External Vessel Cooling for the Penetration Integrity in the KNGR during a Severe Accident

K. H. Kang, R. J. Park, J. T. Kim, S. B. Kim, K. Y. Lee, J. K. Park

Key Words : 원자로용기 외벽냉각(External Vessel Cooling), 관통부파손(Failure of Penetration)

Abstract

An experimental study on penetration integrity of the reactor vessel has been performed under external vessel cooling during a core melt accident. In this study a series of experiments are performed for the verification of the effects of coolant in the annulus between the ICI(In-Core Instrumentation) nozzle and the thimble tube and also the effects of external vessel cooling on the integrity of the penetration using the test section including only one penetration and Al_2O_3 melt as a corium simulant. The experimental results have shown that penetration is more damaged in the case of no external vessel cooling compared with the case of external vessel cooling. It is preliminarily concluded that the external vessel cooling is very effective measure for the improvement of the penetration integrity. Also it is confirmed from the experimental results that the coolant in the annulus reduces the melt penetration distance through the annulus and enhance the integrity of the reactor vessel penetration in the end.

기호설명

X_p: 용융물의 침투 거리(m)

v_d: 용융물의 주입 속도(m/s)

d_i, d_{so}: ICI 노즐 내경(m), thimble tube 외경(m)

d_e: 용융물의 수력학적 유동 직경(m)

ρ_d, c_p: 용융물의 밀도(kg/m^3), 비열(J/kgK)

L_d, k_d: 용융물의 융해열(J/kg), 열전도도(W/mK)

T_d, T_m: 용융물의 초기 온도(K), 용융 온도(K)

ρ_{gsat}, ρ_{lsat}: 포화 수증기와 냉각수의 밀도(kg/m^3)

c_{pl}, h_{fg}: 냉각수의 비열(J/kgK), 엔탈피(J/kg)

T_{lsat}, T_{li}: 냉각수의 포화 온도(K), 초기 온도(K)

1. 서 론

원전에서 원자로 노심에 대한 정상적인 냉각 과정이 이루어지지 않아 노심손상이 발생하면 핵연료 물질이 용융되어 원자로 용기 하부 반구로 재배치된다. 노심 용융물은 3000K 이상의 고온 상태의 용융물로서 잔열(decay heat)에 의한 지속 가열로 인해 원자로 용기 하부 반구의 건전성을 위협할 수 있다. 실제 1979 년 미국 TMI-2 원전에서 핵연료 물질이 용융되어 반구 내부로 재배치되는 중대사고가 발생하였고 사고 후 조사 결과 원자로 용기 외부 표면이 1300K 이상의 고온 상태로 가열되었다[1]. 중대사고 시 원자로 용기의 파손을 방지하기 위하여 원자로 용기의 외벽을 냉각하여 노심 용융물을 원자로 용기 내부에서 냉각시키는 노내 노심 용융물 냉각 방안이 일부 원전에서 고려되고 있다[2]. 대표적으로 핀란드의 Loviisa 원전[3]과 미국의 AP600 원전[2] 및 국내에서 제작 추진 중인 한국 차세대 원전(KNGR: Korean Next Generation Reactor)[4]에서 원자로 용기 외벽 냉각 방안을 중요한 사고 관리 전략으로 채택하였다[4].

TMI-2 사고의 경우 원자로 용기 하부 반구 및 관통부 용접부가 파손되지는 않았으나 노심 용융

* 한국 원자력 연구소 열수력 안전 연구팀
** 한국 원자력 연구소 동력로 기술 개발팀

물이 관통부의 thimble tube 내부로 주입되어 약 10m 가량 침투한 후 고화 되어 thimble tube 를 포함한 관통부의 파손 가능성이 제기되었다. 특히 차세대 원전은 1400MWe 열 용량을 갖는 대형 원전으로 기존 한국 표준형 원전에 비해 열 용량이 크기 때문에 노심 용융물이 반구 내부로 주입되면 관통부의 용접부와 thimble tube 의 파손 가능성이 존재하고 원자로 용기 외벽 냉각 시 thimble tube 를 포함한 관통부 파손 현상에 대한 불확실성이 존재하므로 이에 대한 연구의 필요성이 제기된다. 이와 더불어 원자로 용기 하부 반구의 관통부는 원전 형태에 따라 다르기 때문에 개별 원전에 대한 종합적인 연구가 필수적이다.

한국 원자력 연구소에서는 차세대 원전에서 중대사고 시 원자로 용기 외벽 냉각을 수행하는 경우에 원자로 용기 하부 반구 관통부의 건전성을 평가하는 실험 및 해석 연구를 수행하고 있다[5]. 본 논문은 차세대 원전 관통부의 건전성 평가를 위한 연구의 첫 단계로서 상사 용융물을 이용하여 관통부 1 개를 모의한 실험 용기에서 외벽 냉각을 수행한 경우와 외벽 냉각을 수행하지 않은 경우에 대하여 관통부의 열적 거동과 파손 형태에 대한 실험 결과를 정리한 것이다.

2. 실험 내용

2.1 차세대 원전 원자로 용기 하부의 특성

차세대 원전의 원자로 용기 하부 반구는 SA508, Grade 3, Class 1 의 탄소강으로 제작되며 내부는 용접 자재 ER309L STRIP/FLUX 를 사용하여 강철(stainless steel)을 피복 용접한다. 원자로 용기 하부에는 원자로 내부의 계측을 위하여 관통부인 ICI 노즐이 설치되어 있다. ICI 노즐의 재질은 인코넬 690 (SB166)이며 노즐과 원자로 용기는 ASME 법령 2142 와 2143 에서 규정한 인코넬 690 용접봉인 수동봉(ENiCrFe-7)이나 TIG 봉(ERNiCrFe-7)을 사용하여 용접한다. ICI 노즐 내부에는 강철로 제작된 thimble tube 가 설치된다. ICI 노즐과 thimble tube 사이는 원자로 냉각재 계통의 경계로서 냉각재가 주입되어 있고 thimble tube 내부는 대기압 상태이며 계측 관들이 개별적으로 절연되어 있다.

차세대 원전 하부 반구의 내부 직경은 4.74m 이고 두께는 0.165m 이다. 그리고 관통부 ICI 노즐의 개수는 61 개이고 외부 직경은 0.0762m 이다. 본 실험에서는 차세대 원전의 하부 반구 관통부 1 개를 모의하여 실험하였으며 ICI 노즐의 직경 및 반구 두께 그리고 thimble tube 의 규격은 차세대 원전과 동일하게 설정하였다.

2.2 실험 장치

실제 차세대 원전의 하부 반구는 반구 형태를 갖지만 본 실험에서는 평판 형태를 갖는 원통형 반응 용기를 사용하여 차세대 원전 관통부의 ICI 노즐 1 개를 모의하는 실험 장치를 제작하였다. ICI 노즐은 1 개를 모의하였으나 표 1 에 보여지듯이 원자로 용기 반구의 재질과 두께 그리고 용접부의 규격 및 용접 물질의 재질은 실제 원전과 동일하게 설정하여 실험을 수행하였다.

Table 1 Dimensions of the KNGR and the Tests

	차세대 원전	실험 용기
반구 모양	반구형	평판형
반구 내부 직경	4.74m	0.218m
반구 두께	0.165m	0.165m
ICI 노즐 개수	61	1
ICI 노즐 외경	0.0762m	0.0762m
ICI 노즐 두께	0.0286m	0.0286m
환형관 두께	0.00381m	0.00381m
Thimble tube 외경	0.01143m	0.01143m

중대사고 시 저압 사고 경위를 모의하기 위하여 반응 용기 내부의 압력을 약 10 기압으로 가압하였으며 이를 위해 반응 용기를 LAVA 압력 용기[6] 내부에 장착하여 실험을 수행하였다. 그림 1 은 실험 용기의 개략도를 보여준다.

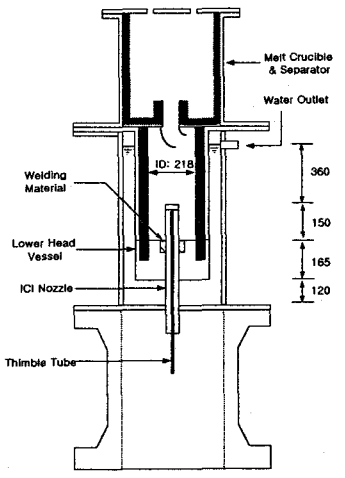

Fig. 1 Schematic Diagram of the Tests (dim:mm)

노심 용융물의 모사 체로 Al_2O_3/Fe thermite 용융물을 사용하였다. Al_2O_3/Fe thermite 용융물은 Al 분말과 Fe_2O_3 분말을 혼합하여 화학 반응에 의해 생성시키며 생성 초기 온도는 약 2700K 이다. Thermite 반응에 의해 생성되는 Al_2O_3/Fe 용융물은 Al_2O_3 용융물과 Fe 용융물의 혼합 용융물이며 용융 상태에서 Fe 용융물의 밀도는 6800 kg/m^3 로서 밀도가 2600 kg/m^3 인 Al_2O_3 용융물에 비해 두 배 이상 크다. 실제 원전 사고 시 원자로 용기 하부 반구에 주입되는 용융물의 주요 성분이 산화 용융물이므로 밀도 차이를 이용하여 성분을 분리한 후 Al_2O_3 용융물만 반응 용기 내부로 주입하였다.

본 실험의 주요 측정 인자는 반응 용기와 관통부의 온도 변화이다. Thimble tube 내부와 ICI 노즐 내부 및 반응 용기 내부의 온도는 K 형 열전대를 장착하여 측정하였다. Thimble tube 내부에는 50mm 간격으로 6 개의 K 형 열전대를 장착하였고 ICI 노즐 내부에는 양 방향에 4 개 씩 총 8 개의 K 형 열전대를 50mm 간격으로 설치하였다. 원자로 용기 하부 반구 모형인 반응 용기(LHV: Lower Head Vessel) 내부에는 동, 서, 남, 북 네 방향에 각각 4 개 씩 총 16 개의 K 형 열전대를 설치하였다. 그림 2 는 실험 용기 내부에 장착한 열전대의 측정 위치를 보여준다.

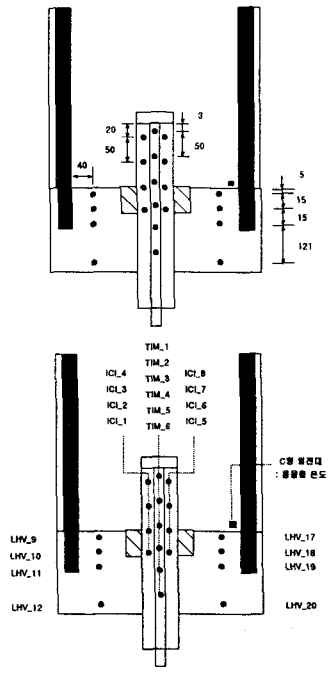

Fig. 2 Locations of the Thermocouples

2.3 실험 방법 및 조건

본 논문에서는 중대사고 시 관통부 파손에 대한 원자로 용기 외벽 냉각의 영향을 평가하기 위하여 반응 용기 외부를 냉각하지 않은 경우와 외벽 냉각을 수행한 경우를 비교하였다. 그리고 반응 용기 외부를 냉각하지 않은 경우에는 ICI 노즐과 thimble tube 사이의 환형관 내부에 냉각수가 존재하는 경우와 존재하지 않은 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 표 2 는 실험 조건을 정리한 것이다. KNGR-ICI-DRY1 실험에서는 환형관 내부에 냉각수를 주입하지 않고 실험을 수행하였고 KNGR-ICI-DRY2 실험에서는 환형관 내부에 냉각수를 주입하여 실험을 수행하였다. KNGR-ICI-1 실험에서는 KNGR-ICI-DRY1, 2 실험과 달리 반응 용기 외부에 냉각수를 주입하여 외벽 냉각이 이루어지는 조건에 대한 실험을 수행하였다.

Table 2 Experimental Conditions

	KNGR-ICI-DRY1	KNGR-ICI-DRY2	KNGR-ICI-1
용융물	Al_2O_3, 40kg	Al_2O_3, 40kg	Al_2O_3,40kg
환형관 내부	dry	wet	wet
외벽 냉각	없음	없음	있음
반응 용기 내/외부 압력	5.8 / 1.0 bar	10.1/ 1.0 bar	9.0/ 1.0 bar

모든 실험에서 Al_2O_3 용융물은 40kg 을 사용하였다. KNGR-ICI-DRY1 실험에서는 thermite 용융물을 별도의 도가니에서 생성시킨 후 용융물 분리 용기로 주입하여 용융물의 성분을 분리한 반면 KNGR-ICI-DRY2 실험과 KNGR-ICI-1 실험에서는 용융물이 이동 과정에서 열 손실되는 것을 최소화화기 위하여 용융물 도가니와 분리 용기를 일체형으로 제작하였고 실험 전에 반응 용기(LHV)를 약 90°C 까지 가열하여 초기에 용융물이 급격히 냉각되는 것을 방지하였다.

3. 실험 결과

ICI 노즐과 LHV 의 중앙 절단 단면 관측 결과를 중심으로 각 실험 별로 실험 결과를 정리하였다. 본 실험에서는 용융물 성분을 분리하여 Al_2O_3 용융물만 주입하고자 하였다. 이와 같은 방법은 thermite 용융물을 이용하여 실험을 수행할 경우에 일반적으로 사용하는 방법이지만 고온 상태에서 Fe 용융물 성분이 Al_2O_3 용융물에 용해, 석출되어

KNGR-ICI-DRY1 실험에서는 11.5kg, KNGR-ICI-DRY2 실험에서는 8.75kg 그리고 KNGR-ICI-1 실험에서는 6.54kg 의 Fe 용융물이 각각 주입되었다.

3.1 KNGR-ICI-DRY1 실험 결과

KNGR-ICI-DRY1 실험 결과 ICI 노즐의 용접부 파손으로 인한 용융물의 방출은 없었다. 그러나 Fe 용융물 상단부와 ICI 노즐 경계면(ICI_3,7 열전대 위치)에서 ICI 노즐이 파손되어 환형관 내부와 thimble tube 내부로 Fe 용융물이 주입되어 상단부에서 171mm 아래 지점까지 용융물이 존재함을 확인하였다. 그리고 반응 용기 내벽과 용접부의 용발이 발생하여 용접부의 경우는 최대 15.0mm, 반응 용기 내부는 위치에 따라 최대 12.0mm 가량 용발되었다. 그림 3 은 KNGR-ICI-DRY1 실험의 ICI 노즐 및 반응 용기의 중앙 절단 단면의 사진과 파손 위치에 대한 개략도를 보여준다.

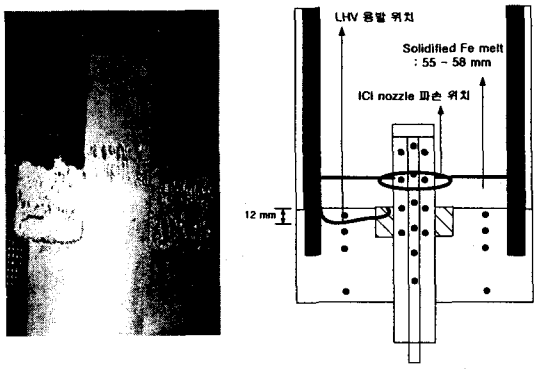

Fig. 3 Cross-sectional view of the LHV(DRY1 test)

3.2 KNGR-ICI-DRY2 실험 결과

KNGR-ICI-DRY1 실험에서와 같이 ICI 노즐의 용접부 파손으로 인한 용융물의 방출은 없었다. ICI 노즐 용접부와 반응 용기 내벽은 각각 15mm, 19mm 용발되어 KNGR0ICI-DRY1 실험과 비교하여 큰 차이는 없었다. 그러나 ICI 노즐과 thimble tube 사이의 환형관 내부에 용융물이 주입되었지만 이동 거리가 93mm 로 환형관 내부에 냉각수가 존재하지 않았던 KNGR-ICI-DRY1 실험에 비해 환형관 내부에서 용융물의 이동이 제한적이었다는 것을 알 수 있었다. 환형관 내부에 냉각수가 존재함에 따라 용융물이 냉각되어 쉽게 고화 되었기 때문에 용융물이 더 이상 이동하지 못했던 것으로 판단된다. 그림 4 는 KNGR-ICI-DRY2 실험의 ICI 노즐 및 반응 용기의 중앙 절단 단면의 사진과 파손 위치에 대한 개략도를 보여준다.

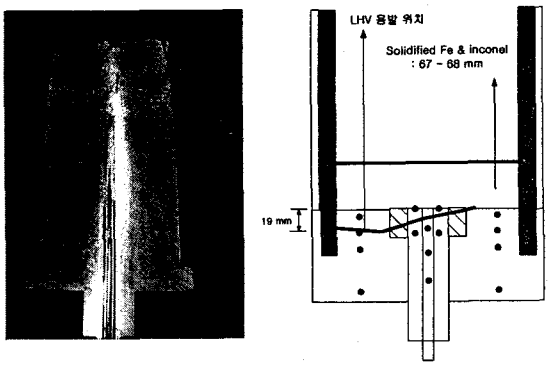

Fig. 4 Cross-sectional view of the LHV(DRY2 test)

3.3 KNGR-ICI-1 실험 결과

KNGR-ICI-1 실험에서도 ICI 노즐의 용접부 파손으로 인한 용융물의 방출은 없었고 ICI 노즐이 파손되어 용융물이 환형관 내부로 주입되었다. 그러나 용융물의 이동 거리가 55mm 로 이전 실험에 비해 짧았고 반응 용기 내벽은 약 6mm 용발 되었으나 ICI 노즐의 용접부는 거의 용발되지 않았다. 이 같은 실험 결과는 KNGR-ICI-1 실험에서 반응 용기 외부에서 냉각을 수행하였기 때문에 KNGR-ICI-DRY1, 2 실험에 비해 ICI 노즐 및 반응 용기가 효과적으로 냉각되었다는 것을 의미한다. 그림 5 는 KNGR-ICI-1 실험의 ICI 노즐 및 반응 용기의 중앙 절단 단면의 사진과 파손 위치에 대한 개략도를 보여준다.

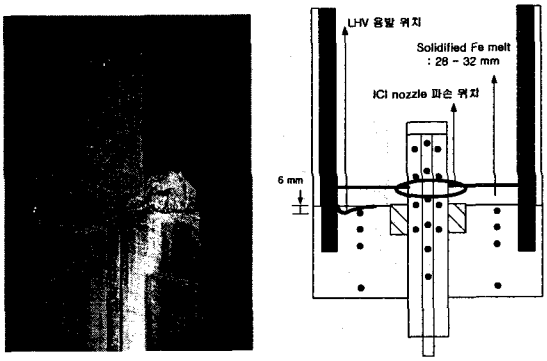

Fig. 5 Cross-sectional view of the LHV(ICI-1 test)

4. 실험 결과 분석

ICI 노즐과 thimble tube 사이의 환형관 내부에 냉각수의 유무 및 반응 용기에서 외벽 냉각 수행 여부에 대한 영향을 중심으로 실험 결과를 분석하였다.

4.1 환형관 내부 냉각수의 영향

ICI 노즐과 thimble tube 사이의 환형관 내부에 냉각수 유무에 따른 용융물의 침투 거리는 MBF (Modified Bulk Freezing) 모델[1]을 이용하여 계산하였다. MBF 모델은 환형관 내부에 냉각수가 존재하는 경우는 식 (1)과 같이 표현되며 환형관 내부에 냉각수가 존재하지 않는 경우는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\frac{X_p}{d_i - d_{so}} = 0.25Pe\frac{\left[\rho_d\{c_p(T_d - T_m) + L_d\} - \left(\frac{1}{x} - 1\right)A\right]}{\rho_d c_p (T_d - T_i)B} \quad (1)$$

$$\frac{X_p}{d_i - d_{so}} = 0.25Pe\frac{c_p[(T_d - T_m) + L_d]}{c_p(T_d - T_i)B} \quad (2)$$

여기서, $A = \rho_{lsat} c_{pl}(T_{lsat} - T_{li}) + \rho_{gsat} h_{fg}$

$$B = 5.25 + 0.0188 Pe^{0.8}\left(\frac{d_i}{d_{so}}\right)^{0.3}$$

$Pe = d_e v_d \rho_d c_p / k_d$ (Pe 무차원 수)

식 (1)에서 x 는 환형관 내부에 주입되는 용융물의 면적 분율이며 본 연구에서는 환형관 내부에 용융물이 1/2 과 1/4 의 면적 분율을 차지하고 주입된다고 가정하여 계산하였다. 표 3 은 환형관 내부에서 용융물 침투 거리에 대한 실험 결과와 MBF 모델을 이용한 계산 결과를 비교한 것이다.

Table 3 Penetration Length of Melt in the Annulus

침투 거리 (cm)	MBF 모델 계산			실험	
	dry	wet		DRY1	DRY2
		x=1/2	x=1/4		
	26.4	24.0	19.1	17.1	9.3

표 3 을 보면 MBF 모델 계산 결과에 비해 실험에서 용융물의 침투 거리가 작았음을 알 수 있다. 이 같은 차이는 MBF 모델이 환형관 내부에서 노심 용융물이 모두 고화 되었을 때 용융물의 이동이 정지한다는 가정아래 용융물의 침투 거리를 보수적으로 계산하기 때문에 발생한 것으로 생각된다. 또한 본 연구에서는 실험 후 절단을 통해 환형관 내부에서 용융물의 침투 거리를 확인하였는데 표 3 에 정리한 용융물의 침투 거리는 연속되는 고화 용융물이 존재하는 거리를 나타낸 것이며 연속되는 고화 용융물 하단에도 환형관 일부분에 고화 용융물이 존재하는 경우도 있었으나 계산 값과 비교할 때 이 부분은 제외하였다. 실험 측정값과 계산 값에 차이는 존재하지만 환형관 내부에 냉각수가 용융물의 침투 거리에 영향을 미친다는 사실을 확인할 수 있었다.

4.2 반응 용기 외벽 냉각의 영향

본 실험에서 thermite 용융물에 의한 열적 부하가 반응 용기 내부를 통과하는데 소요되는 시간 (thermal wave penetration time constant)은 약 250 초이다. 이 이후에 측정한 반응 용기 내부의 냉각율을 보면 외벽 냉각을 수행한 KNGR-ICI-1 실험의 경우가 KNGR-ICI-DRY2 실험에 비해 약 4 배 이상 높은 것을 알 수 있고 반응 용기 내벽의 용발도 적게 측정되었다.

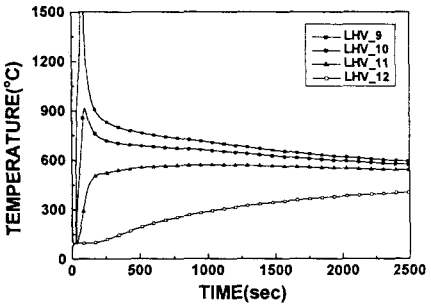

Fig. 6 Temperatures of the LHV(DRY2 test)

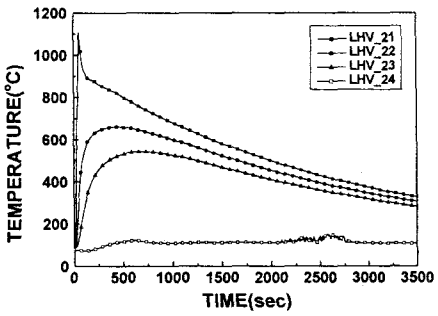

Fig. 7 Temperatures of the LHV(ICI-1 test)

그림 6 과 7 은 KNGR-ICI-DRY2 실험과 KNGR-ICI-1 실험에서 용융물의 제트(jet)가 직접 접촉하여 온도가 높게 상승한 부분의 반응 용기 내부의 온도 변화를 각각 보여준다. 반응 용기 내부의 냉각율 뿐만 아니라 반응 용기 하단부의 온도(LHV_12 & 24 열전대)를 보면 KNGR-ICI-DRY2 실험의 경우 300 ℃ 이상 지속적으로 가열된 반면 KNGR-ICI-1 실험에서는 120 ℃ 전후의 온도 값을 나타내었다.

그림 8 은 KNGR-ICI-1 실험에서 반구 하단부(외벽에서 4mm 내부)의 온도와 냉각수의 온도 변화를 보여준다. LHV_16 열전대 위치에서는 500 초 부근의 실험 초기에는 Leidenfrost 온도를 넘어 부분적인 막 비등 상태를 300 초 간 보이다가 핵 비등 상태를 유지하였으며 LHV_24 열전대 위치에서는 핵 비등 상태를 유지하다가 냉각수 온도가 급격히 상승하는 시점에 부분적인 막 비등 상태를 보인 후 천이 되어 다시 핵 비등 상태를 나타내었다. 부분적으로 열적 부하가 집중되어 반응 용기 외벽에서 순간적인 막 비등 상태를 나타내었지만 전체적으로 핵 비등에 의해 반응 용기 외벽이 효과적으로 냉각되었음을 확인할 수 있었다.

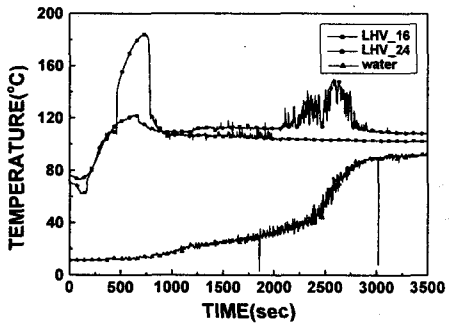

Fig. 8 Temperatures of the LHV surface and water

5. 결 론

차세대 원전에서 중대사고 시 원자로 용기 외벽 냉각을 수행하는 경우에 원자로 용기 하부 반구 관통부의 건전성을 평가하고자 수행 중인 실험의 1 단계 결과를 분석하였다. 노심 용융물의 모사체로 Al_2O_3 thermite 용융물을 이용하여 관통부 1 개를 모의한 반응 용기에서 외벽 냉각을 수행한 경우와 외벽 냉각을 수행하지 않은 경우에 대한 관통부 및 반응 용기의 열적 거동과 용발 형태를 분석하였다. 이와 더불어 외벽 냉각을 수행하지 않는 경우에 ICI 노즐과 thimble tube 사이의 환형관 내부에 냉각수의 유무가 용융물의 침투 거리에 미치는 영향을 고찰하였다. 실험 결과 반응 용기 외벽을 냉각하는 경우가 외벽 냉각을 수행하지 않은 경우에 비해 반응 용기 내부의 냉각 율이 4 배 이상 높고 반응 용기 내벽의 용발 정도도 낮게 나타났음을 알 수 있었다. 외벽 냉각을 수행한 경우 반응 용기 외벽에서 순간적인 막 비등 상태를 보였지만 전체적으로 핵 비등에 의해 반응 용기 외벽이 효과적으로 냉각되었음을 확인할 수 있었다. 외벽 냉각을 수행하지 않은 실험에서는 ICI 노즐과 thimble tube 사이의 환형관 내부에 냉각수가 존재하는 경우에 용융물의 침투 거리가 1/2 로 짧았으며 MBF 모델을 이용한 계산 결과도 실험 결과와 유사한 경향을 나타내었다.

ICI 노즐 용접부와 반응 용기 내벽에서 용발 정도의 차이가 있었으나 현재 까지 수행한 실험에서 용접부 파손에 의한 용융물의 외부 분출은 발생하지 않았다. 본 연구에서는 차세대 원전의 관통부 건전성에 대한 외벽 냉각의 효과를 다각적으로 분석하기 위하여 용융물의 질량과 반응 용기의 형태 및 반응 용기 내부에 냉각수가 존재하는 경우에 대한 추가적인 실험을 수행할 계획이다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 과제의 일환으로 수행하였습니다.

참고문헌

(1) J. L. Rempe et. al., Light Water Reactor Lower Head Failure Analysis, NUREG/CR-5642, 1993
(2) T. G. Theofanous et. al., In-Vessel Coolability and Retention of a Core Melt, DOE/ID-10460, 1995
(3) O. Kymalainean et. al., In-Vessel Retention of Corium at the Loviisa Plant, Nuc. Eng. & Des., 169, 1997
(4) 한전 전력연구원, 차세대 원전 중대사고 관리를 위한 In-Vessel Retention Workshop, 1998
(5) 민병태 외, 원자로용기 외벽냉각 시 관통부 파손평가에 대한 기술 현황 분석, KAERI/AR-566/2000
(6) 강경호 외, 간극을 통한 노내 노심용융물 냉각 방안에 관한 실험 연구, KAERI/TR-1334/99