'99 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

MELCOR 코드에 간극냉각 효과를 고려한 LAVA-4 실험 모의
Simulation of LAVA-4 Experiment with gap cooling effect in MELCOR

박종화, 김동하, 김상백, 김희동
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 305-303

서균렬
서울대학교, 원자핵공학과
서울특별시 관악구 신림동 산 56-1

요 약

하부 반구내 용융물 재배치시 벽면의 거치름과 급격한 온도차이, 그리고 용융물 외벽 피막층과 하부 반구 벽면간에 포획된 일부 냉각수의 순간 비등으로 인해, 간극이 형성될 수 있다. 이 간극은 간극내 유입된 냉각수의 비등과 재유입의 반복으로 간극과 접하고 있는 피막층과 반구 내벽면의 온도 증가를 완화, 또는 감소시켜 궁극적으로 원자로용기의 건전성을 확보할 수 있다는 측면에서 그 중요성이 부각되어 왔다. 현재 MELCOR1.8.4 내 COR 모듈내 하부반구 모델에는 간극을 모의하는 모델이 없으므로, 간극현상을 모의할 수 있도록 개념적인 간극 모델을 포함시켜, 간극이 있을 경우와 없을 경우에 LAVA-4 실험 결과를 이용하여, 그 결과를 비교 분석하여 간극의 효과를 평가하였다. 간극모델을 적용한 경우 반구벽 최대온도값이 감소되었고, 냉각속도도 빨라졌으나 급냉 후 급속한 냉각속도는 과소평가 하였다. 현재 제시된 간극모델은 간극 크기 성장에 따른 효과를 볼수 없고, 간극내 급격한 수증기 발생에 의한 간극으로의 냉각수 유입 제한 현상은 고려하지 않았다. 또한 debris 와 반구 벽으로 부터 간극내 냉각수 그리고 간극을 통해 debris 로 부터 반구 내벽으로 열전달 계수값들을 지정해 주어야 하는 제한점이 있다. 이 같은 문제점들은 계속적인 연구를 통해 보완할 예정이다.

Abstract

When the molten corium relocates into the lower plenum, a gap is expected to be formed due to the wall roughness, a large temperature difference and the strong vaporization of trapped water in a small gap between the debris and the wall. If the gap exists, this gap can play an important role in preventing the temperature increase of the debris and the wall based on this new gap cooling

mechanism. At present, MELCOR1.8.4 does not consider these gap-cooling phenomena. Therefore a conceptual gap-cooling model has been developed and implemented into the lower plenum model in MELCOR to take into account the gap effect in the lower plenum The LAVA-4 experimental data were analyzed by using MELCOR with and without "gap model". When the "gap model" is implemented, the peak temperature of the vessel wall was reduced and its cooling rate was increased. But the rapid cool-down rate after peak temperature was not estimated properly. The current "gap model" does not have a model to simulate the phenomena such as limitation of water ingression into the gap due to rapid steam generation and the effect from gap size change. Also the heat transfer coefficients used in the model should be supplied by the user. These limitations will be studied further to develop a more analytical model.

I. 서 론

노심 용융 사고시 노내 용융된 노심 물질은 궁극적으로 원자로 하부용기로 재배치 될 수 있다. 이때 냉각수로 체워진 하부반구내 재배치된 고온 노심물질의 냉각여부는 대량의 핵분열생성물을 노내 포획하고있는 원자로 용기의 건전성과 관련된 중요한 쟁점 사항이다.

하부반구내 재배치된 노심용융물은 하부 반구 내벽면 및 debris 의 거치름과 급격한 온도차이, 급냉시 부피 수축 그리고 용융물 외벽 피막층과 하부 반구 내벽면간에 포획된 일부 냉각수의 순간 비등으로 인해, 간극이 형성될 수 있다. 이간극의 중요성은 간극내 유입된 냉각수의 비등과 재유입의 반복으로 간극과 접하고 있는 피막층과 반구내벽면의 온도 증가를 완화, 또는 감소시켜 궁극적으로 원자로용기의 건전성을 확보할 수 있기 때문이다.

현재까지 이같은 간극현상에 관한 연구는 간극내 임계열속의 측정 및 이론적인 모델 개발에 관하여 수행되어왔다[1]. 그러나 간극에의한 노심용융물의 영향을 종합적으로 판단할 수 있는 구체적인 실험결과[2]는 매우 제한적이었다. 현재 한국 원자력 연구소에서는 이같은 용융물 재배치시 간극의 형성 여부와 그 크기 성장 및 debris 의 냉각방식에 관한 연구를 위해 일련의 LAVA 실험 program 을 수행중이다[3]. 이중 4 번째 실험인 LAVA-4 실험은 냉각이 매우 빠르게 진행된 실험으로, 기존 MELCOR 코드의 모델로는 실험해석이 불가능 하다고 판단되었다. 따라서 성공적으로 실험해석을 위해서는 간극모델을 포함할 필요가 있다고 판단되었다.

현재 MELCOR1.8.4 COR 모듈내 하부반구 모델에는 간극을 모의하는 모델이 없기 때문에, 간극현상을 모의할 수 있도록, 모델을 개발, 포함시켰다. 개발된 간극모델은 일정크기의 균일 간극내 유입된 냉각수 비등시 반구내벽과 debris 로부터 동시에 일정양의 열을 제거할 수 있다는 개념을 기본으로 개발하였다. 단 간극비등시 제거될 수

있는 총열량크기를 간극내 임계열속에 관한 Monde 실험 상관식[4] 값으로 제한하였다. 개발된 모델의 효과를 평가하기 위해 간극이 있을 경우와 없을 경우 LAVA-4 실험 모의 결과를 분석하였다.

II 본 론

II.1 MELCOR 코드용 간극모델 소개

MELCOR 코드 COR 모듈의 하부 반구 모델에서는 하부 반구관련 부품별(예; 하부반구 외벽면층 1 개, 하부반구 내면층 3 개, 하부 반구 내벽면층 1 개, 맨바닥 debris 층 1 개)로 열전달 균형식들을 구성한후, 각방정식들에 포함된 열속들을 부품별 관련 온도 및 열전달 계수, 비열 등으로 표현한후, 부품별 온도에 따라 행열 형태로 정리하여 동시에 각 부품들에 대한 온도를 구하도록 모델되어 있다[5,6].

그러나 MELCOR1.8.4 코드에는 간극 냉각 현상(Gap Cooling Phenomena)을 모의하는 모델이 없다. 만일 간극이 존재할 경우 이미 구성된 각 부품별 열전달 균형식 중 간극 존재에 의해서 영향을 받을 것으로 판단되는 방정식은 하부용기 내벽층과 debris 바닥층 부품관련 열전달 균형식들로 판단된다. 특히 맨 바닥의 debris(파편층)외벽과 하부반구 안쪽층이 간극내 냉각수 비등시 열이 손실될 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 이 같은 간극영향을 고려하여 맨바닥의 debris 층과 하부반구 내벽면에 대한 열전달 균형 방정식을 재구성하였다.

debris 바닥: $$C_{p,d}(T_d^n - T_d^o) = (q_s - q_{d,h} - q_{d,v} - q_{d,d})\Delta t$$

하부반구 안쪽벽면: $$C_{p,h,n}(T_{h,n}^n - T_{h,n}^o) = (q_{n-1,n} + q_{d,h} - q_{hv})\Delta t$$

하부반구 내부벽 : $$C_{p,h,i}(T_{h,i}^n - T_{h,i}^o) = (q_{i-1,i} - q_{i,i+1})\Delta t$$

하부반구외벽면: $$C_{p,h,1}(T_{h,1}^n - T_{h,1}^o) = (-q_{h,c} - q_{1,2})\Delta t$$

위식에서 Cp,d 는 특정 요소 d 의 총열용량으로 $M_d*c_{p,d}$ 를 나타내며 위의식 아래 첨자들은 다음과 같다. s 는 debris 내 열발생을 나타내지만 LAVA-4 실험 경우 열발생이 없으므로 무시된다. d 는 debris, h 는 하부반구, n 은 반구내면층, v 는 반구내 냉각수, i 는 반구내벽층 및 반구 외벽층을 제외한 반구 내부의 층, 1 은 반구외면층, c 는 cavity 를 각각 나타낸다. 따라서 위식의 각 열량관련 변수들의 의미는 다음과 같다. q_{dh} 는 debris 에서 반구내벽으로 열전달량, q_{dv} 는 debris 에서 반구내 냉각수로의 열전달량, q_{dd} 는 각 debris cell 간 전도 열량, . $q_{n-1,n}$ 은 반구 내부층 n-1 로부터 반구 내벽층 n 으로의 열전달량, $q_{i-1,i}$ 및 $q_{i,i+1}$ 은 반구 내벽층 및 외벽층을 제외한 내부층 i 를 중심으로 유입과 유출되는 열량을 각각 나타낸다. q_{hc} 는 반구 외벽층으로 부터 cavity 로의 열전달량, q_{12} 는 반구 내외벽(1) 에서 내부로의 열전달량을 나타낸다. 한편 이 연구에서의 간극모델은 LAVA-4 실험 해석시 간극효과를 모의할 목적으로 개발하였기 때문에 유입관은 없는 것

으로 가정하였고, 간극크기 변화에 따른 효과는 없는것으로 가정하였다. 또한 간극내 냉각수는 비등과 동시에 재유입되는 것으로 가정하였다.

먼저 바닥 debris 층에 관한 열전달 균형식중 간극 형성으로 인해 변형되어야할 변수는 q_{dh} , 즉 바닥 debris 층으로 부터 하부반구 내벽 쪽으로의 열량이다. 원래 모델에의하면 q_{dh} 의크기는 간극이 없을 경우 debris 바닥층과 하부용기 내벽면 각각의 온도차이, debris 표면적과 사용자가 입력으로 지정하는 열전달 계수값의 곱으로 계산된다. 그러나 간극이 존재할 경우는 바닥 debris 층 외벽을 통한 간극으로의 열량이 간극내 유입된 냉각수로 전달됨과 동시에 여분의 열량이 간극을 통해 하부용기로 전달되는 것으로 가정하였다. 이같이 간극내 냉각수 유입 과정은 계속적으로 debris 가 완전히 냉각될 때까지 반복되는 것으로 가정하였다. 따라서 debris 바닥층으로부터 간극 및 반구쪽으로 손실되는 열량은 다음과 같다.

$$q_{dh} = \begin{bmatrix} \text{debris 로 부터 간극내} \\ \text{유입된 냉각수로} \\ \text{열손실양} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{debris 로부터} \\ \text{하부용기 내벽면} \\ \text{으로의 열전달양} \end{bmatrix} = h_{dw}A_d(T_d^n - T_w) + h_{gap}A_d(T_d^n - T_{h,n}^n)$$

위식중 h_{dw} 는 debris 로부터 간극내 냉각수와 열전달계수, A_d 는 특정 ring 의 간극과 접하고있는 debris 표면적, h_{gap} 은 간극을 통한 열전달계수, T_w 는 간극내 유입된 냉각수 온도를 나타낸다. 오른쪽 식에서 첫째 항은 고온의 debris 바닥면으로 부터 유입된 냉각수로 손실되는 열량을 나타내며 두번째 항은 예를들면 간극내 수증기가 체워진 경우(K_s/δ) 나 복사열전달(예: $\varepsilon\sigma(T_s^2+T^2sat)(Ts+Tsat)$을 포함해서 debris 로 부터 반구 안쪽 면으로 이상유체를 통해 반구벽쪽으로 손실되는 열량이다.

반면에 하부용기 내벽면과 간극 사이에서 열전달양 q_{dh} 는 다음과 같다.

$$q_{dh} = \begin{bmatrix} \text{debris 로 부터} \\ \text{하부용기 내벽면} \\ \text{으로의 열전달량} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{반구 내면으로 부터} \\ \text{간극내 유입된} \\ \text{냉각수로 열손실량} \end{bmatrix} = h_{gap}A_d(T_d^n - T_{h,n}^n) - h_{hw}A_h(T_{h,n}^n - T_w)$$

위식에서 h_{hw} 는 반구 내벽면으로부터 간극내 유입된 냉각수로의 열전달 계수, A_h 는 특정 ring 에 debris 와 접하고있는 반구내벽 표면적을 나타낸다. 오른쪽 첫째항은 debris 로 부터 이상유체로 체워진 간극을 통해 내벽면으로 유입되는 열량을 나타내며, 두번째항은 반구 내벽면으로 부터 간극내 유입된 냉각수로 손실되는 열량을 나타낸다. 따라서 궁극적으로 반구 내벽면층은 이 차이 만큼의 열량변화에 의해서 온도가 변화하게 된다.

그런데 위식들에서 유입된 유체의 온도(T_w)는 항상 429.15 K 로 일정한 것으로 가정하였고, 값을 모르는 열전달 계수값 h_{gap}, h_{dw}, , h_{hw}, 는 사용자가 지정 하도록 하였다. 그러나 이 열전달 계수 값들은 간극내 비등에 의한 임계 열속에 관한 실험 측정치를 기본으로 하여, 간극내 냉각수 비등시 debris 로 부터의 열 손실양과 하부반구로부터 열 손실양의 합이 측정치를 초과하지 못하도록 하였다. 만일 간극내의 냉각수로 전달된 열량의 합이 실험 측정치에 의한 임계열속값 보다 작을 경우는 q_{dw}, q_{hw} 에대한 앞의 식들을 그대로 사용하고, 만일 실험 측정치보다 더 클경우는 아래와 같이 Monde 상관식에 의한 임계값으로 제한한다.

$$q_{dw} \triangleq h_{dw} A_d (T_d^n - T_w)$$
$$q_{hw} \triangleq h_{hw} A_h (T_{h,n}^n - T_w)$$
$$q(\mathrm{Monde}) = C\, h_{fg} \sqrt{\rho_g}\, \sqrt[4]{g\sigma(\rho_f - \rho_g)}$$
$$\text{단} \quad C = 0.16 \left[1 + 6.7 * 10^{-4} \left(\frac{\rho_f}{\rho_g}\right)^{0.6} \left(\frac{\lambda_{gap}}{d}\right)\right]^{-1}$$

debris 및 반구내벽으로부터 간극내 유입된 냉각수로의 열손실량을 위와 같이 정의할때 각각의 열전달양은 아래와 같이 수정된다.

$$q_{dw} = \frac{q_{dw}}{q_{dw} + q_{hw}} * q(\mathrm{Monde})$$
$$q_{hw} = \frac{q_{hw}}{q_{dw} + q_{hw}} * q(\mathrm{Monde})$$

위에서 언급한 q_{dh} 에관한 식들을 debris 와 하부반구 내벽면 경우, 각각의 열전달 균형식들에 대입하여 정리하면 각각 아래과 같이 정리된다.

<u>바닥 debris 층 경우</u>

$$C_{p,d}(T_d^n - T_d^o) = \left[q_s - h_{gap} A_d (T_d^n - T_{h,n}^n) - q_{dw} - q_{d,d} - q_{d,v}\right] \Delta t$$
$$\Rightarrow \quad -h_{gap} A_d \Delta t * T_{h,n}^n + (C_{p,d} + h_{gap} A_d \Delta t + h_{dw} A_d \Delta t) * T_d^n$$
$$= C_{p,d} T_d^o + (q_s + h_{dw} A_d T_w - q_{d,d} - q_{d,v}) \Delta t$$

<u>반구내면층 경우</u>

$$C_{p,h,n}(T^{n}_{h,n} - T^{o}_{h,n}) = \left[q_{n-1,n} + h_{gap}A_{d}(T^{n}_{d} - T^{n}_{h,n}) - q_{hw} - q_{h,v}\right]\Delta t$$

$$\Rightarrow \quad -\frac{A_{h}K_{n}}{\Delta Z_{n-1}}\Delta t T^{n}_{h,n-1} + (C_{p,h,n} + \frac{A_{h}K_{n}}{\Delta Z_{n-1}}\Delta t + h_{hw}A_{h}\Delta t + h_{gap}A_{d}\Delta t)T^{n}_{h,n} - h_{gap}A_{d}\Delta t\ T^{n}_{d}$$
$$= C_{p,h,n}T^{o}_{h,n} + h_{hw}A_{h}T_{w}\Delta t - q_{d,v}\Delta t$$

상부첨자 n 은 다음 step 에서의 변수값을, o 는 이미 알고있는 변수값을 나타낸다. 위의 식에서 오른쪽은 이미 알고있는 값들이고 왼쪽은 각 부품의 온도별로 정리하였다. 따라서 최종적으로 하부 용기내 관련 부품들의 온도를 구하기 위한 행열식은 아래와 같이 재구성 되어지며, 결과적인 행열의 형태는 전형적인 Tri-diagonal 형태로 이는 Thomas algorithm[8] 등을 적용, 모든 부품별 온도 값들을 구할 수 있다.

$$\vec{A} \bullet \vec{X} = \vec{B}$$

$$\vec{A} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0.0 & 0.0 & & & & & 0.0 \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & 0.0 & 0.0 & & & & 0.0 \\ 0.0 & A_{32} & A_{33} & A_{34} & 0.0 & 0.0 & & & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & A_{43} & A_{44} & A_{45} & 0.0 & & & 0.0 \\ & & \bullet & & & & & & \\ & & & & \bullet & & & & \\ & & & & & \bullet & & & \\ & & & & 0.0 & A_{n-1,n-2} & A_{n-1,n-1} & A_{n-1,n} & 0.0 \\ & & & & & 0.0 & A_{n,n-1} & A_{n,n} & A_{n,n+1} \\ & & & & & & 0.0 & A_{n+1,n} & A_{n+1,n+1} \end{bmatrix}$$

궁극적으로 위의 행열 $\vec{A}$ 의 하부 반구 내면과 바닥 debris 층에 대한 관련 계수값들은 아래와 같다.

$$A_{n,n-1} = -\frac{A_{h}K_{n}}{\Delta Z_{n-1}}\Delta t$$

$$A_{n,n} = C_{p,h,n} + \frac{A_{h}K_{n}}{\Delta Z_{n-1}}\Delta t + h_{gap}A_{d}\Delta t + h_{hw}A_{h}\Delta t$$

$$A_{n,n+1} = -h_{gap}A_{d}\Delta t$$

$$b_{n} = C_{p,h,n}T^{o}_{h,n} + h_{hw}A_{h}T_{w}\Delta t - q_{d,v}\Delta t$$

그리고 바닥위치, debris층 경우

$$A_{n+1,n} = -h_{gap} A_d \Delta t$$
$$A_{n+1,n+1} = C_{p,d} + h_{gap} A_d \Delta t + h_{dw} A_d \Delta t$$
$$b_{n+1} = C_{p,d} T_d^o + (q_s + h_{dw} A_d T_w - q_{dd} - q_{dv}) \Delta t$$

$$\vec{X} = \begin{bmatrix} T_{h,1} \\ T_{h,2} \\ \\ \\ T_{h,n} \\ T_d \end{bmatrix} \qquad \vec{B} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \\ \\ b_n \\ b_{n+1} \end{bmatrix}$$

II.2 간극모델 유무에 따른 계산 결과

그림 1과 2는 간극 모델을 포함한 경우와 포함하지 않은 경우의 하부반구 중앙의 내벽 면과 이와 접하고 있는 중앙 바닥 위치의 debris 층의 온도 변화들을 보여주고 있다. 또한 간극모델 적용시 간극내 비등에 의해 반구 벽과 debris로 부터 제거될 수 있는 총 열량에 관한 측정치와 가정식들을 기준으로 하여 debris로 부터 간극내 냉각수로의 열전달계수값(h_{dw})에 대한 민감도 계산을 수행하였다. 첫째 경우는 R. Henry에 의해 주장되는 간극내 막비등시 물입자를 통한 열 제거양에 관한 식[9]과 Monde 실험상관식에 의한 제거양을 이용하여 반구벽으로 부터 냉각수로의 열전달 계수값을 100 W/㎡K로 가정하고, debris로 부터 냉각수로의 열전달 계수값을 각각 계산하여 수행한 민감도 분석 결과를 보여주고 있다. debris로 부터 간극내 유입된 냉각수로의 열전달 계수값은 R. Henry와 Monde 상관식 경우 각각 270, 500~1100 W/㎡K 로 예측되었다.

반구 내벽 측정치는 용융물 재배치후 온도가 계속적으로 급격히 증가되지 못하고 중간에 급속하게 냉각됨을 보여주었고 debris 온도 측정치는 LAVA-3 실험 측정치[8]와 비교할 때 냉각속도가 다소 느리게 진행되었다. 이는 debris로 부터 하부 반구 쪽으로의 열전달이 간극 저항으로 인해 감소되었기 때문인것으로 판단된다.

간극 모델이 적용되지 않은 경우 반구내벽 최대온도를 과대평가(약 470K) 하였고 이후 벽면의 냉각속도도 매우 느리게 예측하였다. 그러나 debris 경우는 냉각이 다소 빠르게 진행되는 것으로 예측되었다.

간극모델이 적용된 경우, 계산에 의한 하부반구 벽면 온도는 최대 온도값이 측정치와 유사하게 예측되었고, 이후의 냉각 속도도 빨라져서, 측정치와 같은 냉각 현상을 유사

하게 보여주었다. 그러나 반구벽면의 급냉 현상은 예측할 수 없었다. Debris 경우 냉각 속도가 측정치보다 빠르게 진행되어, 온도가 과소 평가되었다. .

III 결 론

LAVA-4 실험을 모의하기 위하여 MELCOR1.8.4 하부반구 모델에 간극현상을 모의할 수 있도록 모델을 개발, 첨가하였고, 이를 이용하여 간극내 비등에 의한 하부반구 및 debris 의 냉각현상을 재현하였다. 해석결과 하부반구 벽의 최대온도는 잘 예측되었지만 최대온도 도달후의 냉각율을 실험결과 보다 완만하게 예측하였다. 이같은 급격한 냉각 현상은 간극 효과이외의 다른 방식에 의해 냉각이 가속된 것으로 판단되며, 가능한 현상으로는 debris 자체내부로의 균열(Crack)형성을 꼽을 수 있다.

현재 제시된 간극모델의 제한점은 간극 크기 성장에 따른 효과를 볼수 없고, 간극내 급격한 수증기 발생에 의한 간극으로의 냉각수 유입 제한 현상은 고려하지 않았으며 유입관은 없는 것으로 가정하였다. 또한 debris 로부터 냉각수, 반구벽으로부터 냉각수 그리고 간극을 통한 열전달 계수값들을 사용자가 지정해야 하는 문제점이 있다. 이같은 문제는 실험자료를 통해서나, 또는 손계산을 통한 모델개발을 통해 추후 보완할 예정이다.

IV 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었다.

참 고 문 헌

1. Kune Y. Suh, Robert E. Henry,” Integral Analysis of Debris Material and Heat Transport in Reactor Vessel Lower Plenum ”, Nuclear Engineering and Design 151 (1994) 203-221.
2. R.E.Henry, R.J.Hammersley,"Quenching of Mellow Surfaces in a Narrow Annular Gap", 5th international Simulation Methods in Nuclear Engineering, Montreal, Canada, Sept 1996.
3. H.D.Kim, S.B.Kim,”Overview of severe accident research and SONATA-IV phase-I experiment at KAERI” ,CSARP, Bethesda MD, May 4-7 1998.
4. M. Monde,” Critical Heat Flux During Natural Convective Boiling in Vertical Rectangular Channels Submerged in Saturated Liquid ”, ASME,300 vol.104.May 1982.
5. “ MELCOR computer code manual : NUREG/CR-6119, vol 1&2,July 1997.
6. “ MELCOR source program list”, corlhd.f, corcnv.f, dgefs.f
7. Suhas V. Patankar,” Numerical Heat Transfer and Fluid Flow ”, pp52-54, Hemisphere

publishing corp,1980.

8. **박종화**, **조성원**, **김동하 외**,"MELCOR **코드를 이용한** LAVA-3 **실험해석**", **한국 원자력학회**, 99 **춘계학술발표회**, 1999 5. 28~29.

9. Robert E. Henry,"Mechanism for Cooling debris in the RPV lower head",OECD-CSNI special MT, Stockholm,Sweden,1994.

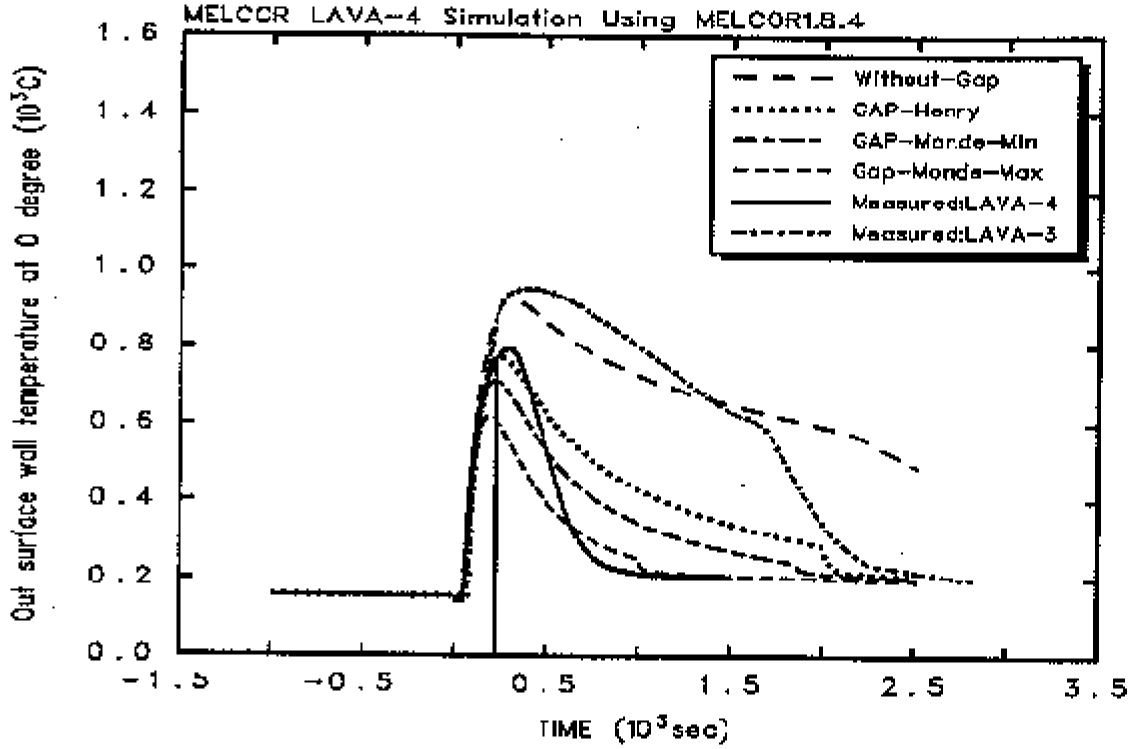

그림 1 LAVA-4 실험 경우 반구 외벽 온도

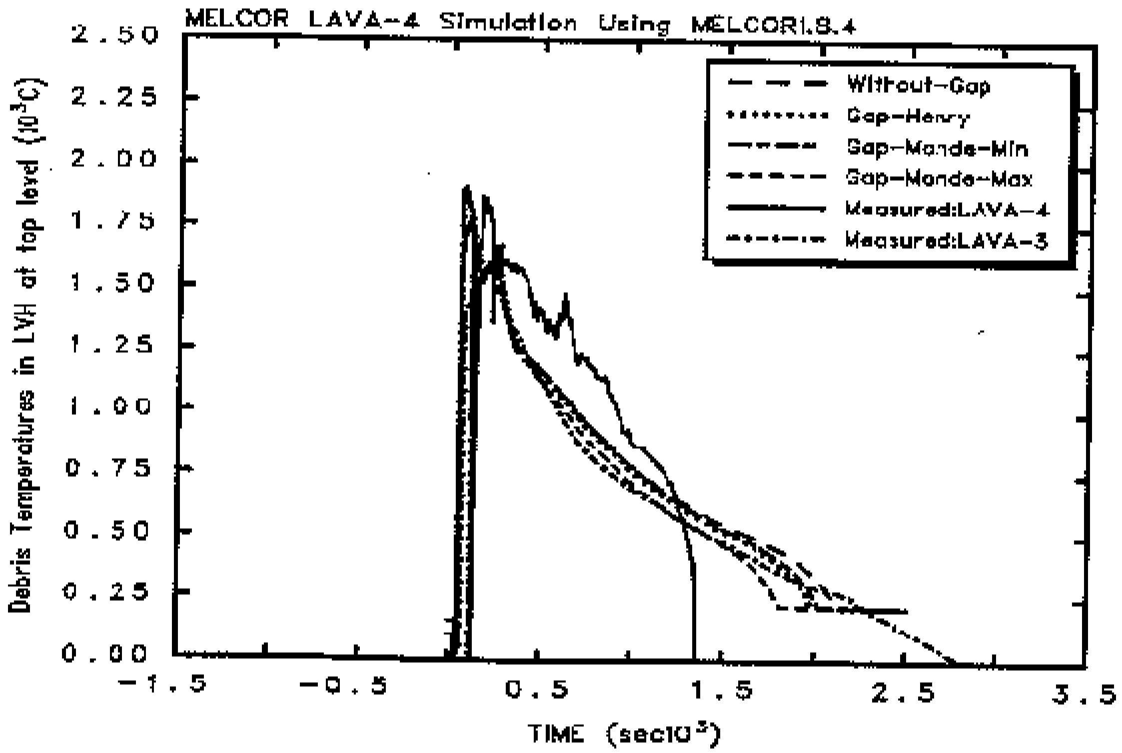

그림 2 LAVA-4 실험 경우 상부 debris 온도