2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

간극 냉각 모델을 이용한 LAVA 실험과 대형 원전의 냉각 가능성 평가

Evaluations of the Coolability in the LAVA Experiments and Large Advanced Light Water Reactors(ALWR) using Gap Cooling Model

김상백, 강경호, 김종태
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

CCFL 상관식을 적용한 간극 냉각 모델을 이용하여 LAVA 실험과 대형 원전에 대하여 간극 내부에서 비등 열 전달에 의한 노심 용융물과 반구의 냉각 가능성을 평가하였다. LAVA 실험에 대한 간극을 통한 열 제거 능력 평가를 통해 30 kg 의 Al_2O_3 용융물을 주입한 실험의 경우는 2 mm 크기의 간극만 형성되어도 간극 냉각을 통해 반구가 효과적으로 냉각될 수 있으나 70 kg 의 Al_2O_3 용융물이 주입된 경우에는 3 mm 이상의 간극이 형성되지 못하면 반구 하부까지 냉각수가 침투하지 못하여 냉각 능력이 저하됨을 알 수 있었다. 간극 냉각 모델을 이용한 대형 원전에 대한 냉각 가능성 평가 결과 간극 내부에서 비등 열 전달에 의한 냉각 능력은 간극의 크기와 반구 내부로 전달되는 열 에너지의 비율 및 현열의 전달 비율에 의해 좌우된다는 사실을 알 수 있었고 열 에너지의 비율과 현열의 전달 비율을 15 %와 50 %로 각각 가정하고 3 mm 크기의 간극이 형성되면 전체 노심 용융물의 42 %가 재배치 되는 경우에도 간극 냉각을 통해 노심 용융물의 열 에너지를 충분히 제거할 수 있는 것으로 계산되었다.

Abstract

The evaluations of the in-vessel coolability using gap cooling model based on counter current flow limits(CCFL) have been performed for the LAVA experiments and large ALWR. It could be inferred from the analyses for the LAVA experiments that the vessel could effectively cooldown via heat removal throug the gap cooling even if 2mm thick gap should form between the interface of the melt and the vessel in the 30 kg Al_2O_3 melt tests. In the case of large melt mass of 70 kg Al_2O_3 melt, however, the infinite possibility of heat removal through a small size gap such as 1 to 2 mm thick couldn’t be guaranteed due to the difficulties of water ingression through the gap into the lower head vessel bottom induced by the CCFL. The sensitivity analyses for ALWR using gap cooling model indicated that the heat removal through gap cooling was capable of ensuring the RPV integrity as much as 42 % of the total core mass was relocated into the lower plenum significantly depending on the sensible heat loss and the downward heat split fraction of corium and also the gap thickness.

1. 서론

1979 년에 일어난 미국 TMI-2 원전 사고에서는 원자로 노심이 손상되어 원자로 용기 하부 반구에 용융물 풀(pool)을 형성하는 사고가 발생하였으나 원자로 하부의 냉각수에 의해 노심용융물이 냉각되어 사고가 종결되었다. TMI-2 사고 해석 결과 노심용융물과 원자로 용기 하부 반구 내벽 사이에 형성되는 간극을 통한 냉각이 유력한 냉각 기구로 제기되었다[1,2,3]. 간극 냉각 기구의 핵심은 간극 내부로 냉각수가 침투하여 비등 열 전달에 의해 노심용융물과 반구가 냉각되는 것이다. 간극 냉각에 의한 노심용융물의 냉각 기구를 사고 관리 전략으로 구체화하기 위해서는 간극 형성 기구 및 간극의 형성이 노심용융물과 반구의 냉각에 미치는 영향에 대한 고찰 그리고 간극의 분포 및 크기에 대한 정량화와 간극을 통한 열 제거 능력의 정량적인 평가가 선행되어야 한다.

한국 원자력 연구소에서는 원자로 용기 하부 반구 내부에서 노심 용융물의 냉각 기구를 규명하기 위하여 SONATA-IV(Simulation of Naturally Arrested Thermal Attack In Vessel)[4,5] 연구를 기획하여 1 단계 원리 검증 실험인 LAVA(Lower-plenum Arrested Vessel Attack) 실험[6,7]과 CHFG (Critical Heat Flux in Gap) 실험[8]을 수행하였다. LAVA 실험에서는 Al_2O_3/Fe (혹은 Al_2O_3)용융물을 이용하여 노심 용융물과 원자로 용기 하부 반구 내벽 사이에서 간극의 형성 여부와 생성 원리를 규명하고 간극의 크기를 측정하였고 간극 형성이 노심 용융물과 반구의 냉각에 미치는 영향을 분석하였으며 CHFG 실험에서는 mm 크기의 미세 간극을 인위적으로 형성시킨 후 이를 통한 노심 용융물의 냉각 특성 및 크기를 정량화 하였다.

간극 냉각의 성공 여부는 간극의 형성과 간극 내부로 냉각수 침투에 의한 열 제거에 의해 결정된다. LAVA 실험을 통해 냉각수가 존재하는 반구 내부로 고온 용융물이 유입되면 용융물과 반구 내벽 사이에서 1 ~ 3 mm 크기의 간극이 형성되는 것을 확인하였고 반구의 냉각 특성은 간극 형성과 더불어 간극 내부로 냉각수 침투와 비등 열 제거에 의해 실험 별로 상이한 결과를 나타냄을 알 수 있었다. 그리고 CHFG 실험 결과는 반구 형 미세 간극 내부에서 제거될 수 있는 최대 열 제거 양은 역류 유동 제한 현상 (CCFL : Counter Current Flow Limit)에 의해 결정된다는 사실을 알려준다. 간극 입구에서 유입되는 냉각수의 유량은 간극 내부에서 비등 열 전달에 의해 배출되는 수증기의 유량과 밀접한 관계를 맺으며 결국 냉각수 침투 거리는 유입되는 냉각수의 유량과 배출되는 수증기의 유량 사이의 상관 관계인 역류 유동 제한 현상에 의해 결정된다. 본 논문에서는 CHFG 실험에서 제시한 역류 유동 제한 현상에 관한 실험 상관식을 이용하여 LAVA 실험에서 간극을 통한 열 제거 능력을 평가하였다. 그리고 LAVA 실험 결과 분석에서 사용한 간극 냉각 모델을 대형 원전에 적용하여 간극을 통한 냉각 가능성에 대한 민감도 분석을 수행하였다.

2. 간극 냉각 모델

간극을 통한 최대 열 제거량에 대한 정량화를 위해 수행한 CHFG 실험 결과를 보면 반구 형 미세 간극 내부에서 제거될 수 있는 최대 열 제거 양은 역류 유동 제한 현상 (CCFL : Counter Current Flow Limit)에 의해 결정된다는 사실을 알 수 있다. 간극 입구에서 유입되는 냉각수의 유량(j_l)은 간극 내부에서 비등 열 전달에 의해 배출되는 수증기의 유량(j_g)과 밀접한 관계를

맺으며 결국 냉각수 침투 거리는 유입되는 냉각수의 유량과 배출되는 수증기의 유량 사이의 상관관계인 역류 유동 제한 현상에 의해 결정된다. 간극 입구로 유입되는 냉각수 공급량이 수증기 배출량보다 적으면 간극 내부로 냉각수가 침투하지 못하여 효과적인 열 제거가 불가능해지며 반대로 냉각수 공급량이 수증기 배출량보다 많으면 간극 내부로 냉각수의 침투가 원활해진다. 그림 1은 노심 용융 사고 시 반구 내부에 형성되는 용융물 풀의 구조에 대한 개념도를 보여준다.

CHFG 실험에서 제시한 CCFL 상관식은 아래 식 (1)과 같다[9]. 식 (1)에서 수력학적 직경(D_h)은 간극의 평균 원주를 나타내며 r_l과 r_g 는 각각 냉각수와 수증기의 밀도를 나타낸다. 간극 내부에서 냉각수와 수증기의 질량 보전 방정식은 아래 식 (2)와 같이 표현되며 식 (1)과 (2)를 조합하면 역류 유동 제한 현상으로 결정되는 수증기의 최대 증기 속도($j_{g,max}$)를 식 (3)과 같이 구할 수 있다. 식 (3)에서 구한 최대 증기 속도를 이용하여 간극 내부에서 제거할 수 있는 최대 열 제거 양(Q_{max})을 다음 식 (4)와 같이 계산하였다. 식 (4)에서 h_{fg}와 A_{gap}은 수증기의 기화열과 간극 내부의 단면적을 나타낸다.

$$j_g^{*1/2} + 0.8\, j_l^{*1/2} = 0.31 \tag{1}$$

$$j_g^{*} = j_g \sqrt{\frac{r_g}{g D_h (r_l - r_g)}} \qquad j_l^{*} = j_l \sqrt{\frac{r_l}{g D_h (r_l - r_g)}}$$

$$r_g j_g = r_l j_l \tag{2}$$

$$j_{g,\max} = \frac{0.31^2 \sqrt{r_g g D_h (r_l - r_g)}}{r_g (1 + 0.8 \sqrt[4]{r_g / r_l})^2} \tag{3}$$

$$Q_{\max} = h_{fg}\, r_g\, A_{gap}\, j_{g,\max} \tag{4}$$

CCFL 상관식에서 수력학적 직경으로 사용한 간극의 평균 원주와 간극 내부의 단면적은 식 (5)와 (6)에서 각각 계산되며 반구 내벽과 접하는 용융물의 하부 표면적과 체적은 식 (7)과 식 (8)에서 각각 계산된다.

간극의 평균 원주, $$D_h = p\,(R_i + R_o) \tag{5}$$

간극 내부의 단면적, $$A_{gap} = p\,(R_o^2 - R_i^2) \tag{6}$$

용융물의 하부 표면적, $$A_d = 2p\,R^2(1-\cos q) \qquad (7)$$

용융물 풀의 체적, $$V = \frac{1}{3}pH^2(3R-H) \qquad (8)$$

간극 냉각 능력은 결국 식 (4)에서 계산한 간극 내부에서 최대 열 제거 양과 제거해야 할 용융물의 열 에너지 양을 비교하여 평가할 수 있다. 본 논문에서는 CHFG 실험에서 제시한 역류 유동 제한 현상에 관한 실험 상관식을 이용하여 LAVA 실험과 APR-1400 원전에 대하여 간극을 통한 열 제거 능력을 평가하였다.

3. 간극 냉각 모델을 이용한 LAVA 실험의 냉각 가능성 평가

CHFG 실험에서 제시한 CCFL 상관식을 이용하여 LAVA 실험에서 간극 내부를 통해 제거할 수 있는 최대 열 제거 양을 계산하였다. LAVA 실험은 17 기압 조건에서 30 kg 과 70 kg 의 Al_2O_3 용융물을 사용하여 실험을 수행하였다. 용융물이 냉각수와 반응하면서 실험 용기 내부의 압력이 상승하므로 간극 내부의 상태를 20 기압 포화 조건으로 가정하여 계산하였다. LAVA 실험에서 측정된 간극은 1 ~ 3 mm 크기를 나타내므로 용융물 질량과 간극의 크기를 달리하여 LAVA 실험에서 간극을 통해 제거될 수 있는 최대 열 제거 양을 계산하였다. 그림 2 는 LAVA 실험에서 용융물 질량에 대한 간극 내부의 단면적과 용융물 하부 표면 단면적의 변화를 보여준다.

그림 3 에서 용융물 질량과 간극의 크기 변화에 따른 최대 열 제거 양을 나타내었다. 그림 3 (a)는 열량(kW)으로 표시한 것이고 그림 3 (b)는 열량을 용융물의 하부 표면적으로 나눠서 열 유속(kW/m^2)으로 나타낸 것이다. 그림 3 (a)를 보면 간극의 크기가 증가할수록 제거될 수 있는 열량이 증가하며 용융물 질량이 증가할수록 간극 내부의 단면적이 증가하여 최대 열 제거 양이 증가함을 알 수 있다. 그러나 용융물 질량이 증가할수록 제거해야 할 열 에너지의 양도 증가하므로 용융물의 전체 열 에너지 양과 간극을 통해 제거할 수 있는 최대 열 제거 양에 대한 상대 평가가 이루어져야 한다.

냉각수 침투 거리에 따른 반구의 냉각 특성을 확인하기 위하여 70 kg 의 Al_2O_3 용융물이 주입된 경우에 대하여 용융물 침투 거리와 간극 크기에 따른 제거해야 할 용융물의 열 에너지와 간극을 통해 제거할 수 있는 최대 열 제거 양을 비교하였다. 간극을 통해 제거해야 할 용융물의 열 에너지의 양은 재배치 과정에서 손실되는 열 에너지의 분율($f_{relocation}$) 반구 내부로 전달되는 열 에너지의 분율(f_{dn})을 고려하여 계산하였다. 용융물 재배치 과정에 대한 LAVA 실험 분석 결과를 이용하여 전체 용융물 에너지의 35 % 가 재배치 과정 중 냉각수에 의해 제거된 후 용융물 풀을 형성한다고 가정하였다. 반구 내부에 형성된 용융물 풀은 상부의 냉각수에 의해 일부분 냉각되고 나머지 열 에너지는 반구 내부로 전달된다. 반구 내부로 전달되는 열 에너지의 분율을 식 (9)와 (10)을 이용하여 계산하였다. 내부 발열이 없는 반구 형 용융물 풀에서 자연 대류에 의해 상부와 하부로 전달되는 열 전달 비율은 식 (9)의 *Nu* 수 상관식으로 표현되며 이를 이용하여 용융물 풀의 상부와 하부로 전달되는 열 에너지 양을 식 (10)에서 계산하였다[10]. 계산 결과 LAVA

실험에서 용융물 풀의 열 에너지의 35 %가 반구 내부로 전달되었다. 그리고 LAVA 실험에서 나타난 바와 같이 반구가 초기에 냉각되는데 소요되는 시간(Dt, 250 초)을 고려하여 간극을 통해 제거해야 할 열 에너지의 양을 식 (11)을 이용하여 계산하였다. 식 (11)에서 M_{pool}과 $E_{thermite}$는 용융물의 질량과 thermite 반응 열(3978 kJ/kg)을 각각 나타낸다.

$$Nu_{up} = 0.25Ra^{0.304} \quad (9a)$$

$$Nu_{dn} = 0.472Ra^{0.22}\left(\frac{H}{R}\right)^{0.317} \quad (9b)$$

$$Q_{up} = \frac{Nu_{up}k}{H_d}\Delta T \cdot A_{up} \quad (10a)$$

$$Q_{dn} = \frac{Nu_{dn}k}{H_d}\Delta T \cdot A_{dn} \quad (10b)$$

$$Q = (1 - f_{relocation}) \cdot f_{dn} \cdot \Delta t \cdot M_{pool} \cdot E_{thermite} \quad (11)$$

그림 4는 70 kg의 Al_2O_3 용융물 실험에 대하여 제거해야 할 열 에너지의 양과 간극을 통해 제거할 수 있는 최대 열 에너지 양의 관계를 보여준다. 그림 4를 보면 1 mm와 2 mm 크기의 간극이 형성된 경우에는 반구 상단부 끝에서 각각 70°, 55° 위치까지는 냉각수가 침투하여 열 제거가 이루어질 수 있으나 그 아래 부분에서는 최대 열 제거 양보다 제거해야 할 용융물의 열 에너지가 커서 효과적인 냉각이 이루어질 수 없음을 알 수 있다. 그러나 3 mm 크기의 간극이 반구 내벽에 고르게 분포하면 70 kg의 Al_2O_3 용융물이 주입된 경우에 간극 냉각을 통해 전체 열 에너지를 제거할 수 있는 것으로 나타났다.

그림 5는 30 kg의 Al_2O_3 용융물이 주입된 경우에 대한 제거해야 할 열 에너지의 양과 간극을 통해 제거할 수 있는 최대 열 에너지 양의 관계를 보여준다. 그림 5를 보면 1 mm 크기의 간극이 형성된 경우에는 반구 상단부 끝에서 각각 43° 위치까지는 냉각수가 침투하여 열 제거가 이루어질 수 있으나 그 아래 부분에서는 최대 열 제거 양보다 제거해야 할 용융물의 열 에너지가 커서 효과적인 냉각이 이루어질 수 없음을 알 수 있다. 그러나 2 mm 크기의 간극이 반구 내벽에 고르게 분포하면 30 kg의 Al_2O_3 용융물이 주입된 경우에 간극 냉각을 통해 전체 열 에너지를 제거할 수 있는 것으로 나타났다.

4. 간극 냉각 모델을 이용한 대형 원전의 냉각 가능성 평가

LAVA 실험 결과 분석에서 사용한 CCFL 상관식을 이용한 간극 냉각 모델을 대형 원전에 적용하여 간극을 통한 노심용융물의 냉각 가능성에 대한 민감도 분석을 수행하였다. LAVA 실험의

경우는 내부 발열이 없는 Al_2O_3 용융물을 사용하였으나 실제 노심 용융물은 내부 발열이 있으므로 노심 용융물의 열 에너지를 계산할 때 내부 발열에 의한 decay heat 와 현열(sensible heat)을 함께 고려해야 한다. 제거해야 할 노심 용융물의 열 에너지 양을 식 (12)를 이용하여 계산하였다.

$$Q(kW) = F_{LHV}\left[Q_{decay} \cdot V_P + fM_P c_p \frac{\Delta T}{\Delta t}\right] \qquad (12)$$

대형 원전의 냉각 가능성 평가 계산에서 사용한 노심 용융물의 기하학적 구조와 물성치는 표 1 에 정리하였다. 단위 체적 당 노심 용융물의 decay heat 는 MAAP4 코드를 이용한 large LOCA (0.5 ft^2 파단) 사고 해석 결과에서 제시한 값을 사용하였다[11]. 반구 내부로 전달되는 열 에너지의 분율(F_{LHV})과 현열의 전달 비율(f)을 변화시켜서 이에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 반구 내부로 전달되는 열 에너지의 분율은 mini-ACOPO 실험[12]에서 제시한 용융물 풀 내부의 자연대류 열 전달에 관한 실험 상관식의 계산 결과인 60 %와 COPO 실험 상관식[10]의 계산 결과인 15 % 그리고 FAI 실험[13]에서 사용한 30 %를 각각 적용하여 이에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 현열의 전달 비율은 50 %와 100 %를 적용하여 계산하였고 노심 용융물의 냉각율은 1 K/s 로 가정하였다.

간극 내부의 조건과 간극의 크기는 LAVA 실험 해석 조건과 동일한 조건을 설정하여 노심 용융물의 질량 비율과 간극의 크기에 따른 간극 내부에서 CCFL 현상에 의해 결정되는 최대 열 제거 양을 계산하였다. 노심 용융물의 질량 비율과 간극 크기에 따른 노심 용융물과 간극의 기하학적 구조에 대한 계산 결과를 표 2 에 정리하였고 노심 용융물의 질량 비율과 간극 크기의 변화에 따른 최대 열 제거 양에 대한 계산 결과와 제거해야 할 노심 용융물의 열 에너지에 대한 계산 결과는 표 3 과 4 에 각각 정리하였다. 그림 6 은 대형 원전에서 노심 용융물의 질량 비율과 간극의 크기에 따른 간극 냉각을 통해 제거할 수 있는 최대 열 에너지 양과 제거해야 할 노심 용융물의 열 에너지 양의 관계를 보여준다. 그림 6 을 보면 간극 내부에서 비등 열 전달에 의한 냉각 능력은 간극의 크기와 반구 내부로 전달되는 열 에너지의 비율 및 현열의 전달 비율에 의해 좌우된다는 사실을 알 수 있다. 반구 내부로 전달되는 열 에너지의 비율을 60 %로 가정하고 현열의 전달 비율을 50 %로 가정한 경우는 3 mm 크기의 간극이 형성되어도 노심 용융물의 열 에너지를 간극 냉각으로 제거할 수 있는 가능성이 거의 없는 것으로 계산되었다. 반면 반구 내부로 전달되는 열 에너지의 비율과 현열의 전달 비율을 15 %와 50 %로 각각 가정하고 3 mm 크기의 간극이 형성되면 전체 노심 용융물의 42 %가 재배치 되는 경우에도 간극 냉각을 통해 노심 용융물의 열 에너지를 충분히 제거할 수 있는 것으로 계산되었다.

5. 결론

CCFL 상관식을 적용한 간극 냉각 모델을 이용하여 LAVA 실험과 대형 원전에 대하여 간극 내부에서 비등 열 전달에 의한 노심 용융물과 반구의 냉각 가능성을 평가하였다. LAVA 실험에서 용융물의 열 에너지 양과 간극을 통해 제거할 수 있는 최대 열량을 비교해 보면 30 kg 의 Al_2O_3 용융물을 주입한 실험의 경우는 2 mm 크기의 간극만 형성되어도 간극 냉각을 통해 반구가

효과적으로 냉각될 수 있음을 알 수 있었다. 반면 70 kg 의 Al_2O_3 용융물이 주입된 경우에는 3 mm 이상의 간극이 형성되지 못하면 반구 하부까지 냉각수가 침투하지 못할 가능성이 있다. 용융물 질량이 증가하여 냉각수 침투 거리가 증가하는 경우에는 제거해야 할 용융물의 열 에너지가 증가하여 간극 내부에서 비등 열 전달에 의해 충분한 열 제거가 이루어지지 못할 가능성을 확인하였다. 간극 냉각 모델을 이용한 대형 원전에 대한 냉각 가능성 평가 결과 간극 내부에서 비등 열 전달에 의한 냉각 능력은 간극의 크기와 반구 내부로 전달되는 열 에너지의 비율 및 현열의 전달 비율에 의해 좌우된다는 사실을 알 수 있었고 열 에너지의 비율과 현열의 전달 비율을 15 %와 50 %로 각각 가정하고 3 mm 크기의 간극이 형성되면 전체 노심 용융물의 42 %가 재배치 되는 경우에도 간극 냉각을 통해 노심 용융물의 열 에너지를 충분히 제거할 수 있는 것으로 계산되었다.

LAVA 실험과 대형 원전에 대한 간극 냉각 가능성을 평가한 결과 노심 용융물의 질량 비율과 간극 크기에 의해 좌우되지만 간극 냉각을 통한 노심 용융물의 냉각 가능성을 확인할 수 있었다. 그러나 LAVA 실험에서 용융물 질량과 간극 크기에 따른 간극 냉각 특성에 대한 결론을 내리기에 앞서 용융물 재배치 과정 중 손실되는 에너지의 분율과 반구 내부로 전달되는 열 전달 비율 그리고 반구가 냉각되는데 소요되는 시간 등 계산 수행 과정에서 사용한 가정들에 대한 민감도 분석을 수행할 필요성이 있으며 간극 침투 거리가 간극 냉각 특성에 미치는 영향에 대한 정밀한 분석이 요구된다. 대형 원전에 대한 간극 냉각 가능성 평가에 있어서도 노심 용융물의 냉각율 및 반구 내부로 전달되는 열 에너지의 비율 그리고 현열의 전달 비율 등에 대한 추가적인 민감도 분석이 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 과제의 일환으로 수행하였습니다.

참고 문헌

1. J. R. Wolf et. al., TMI - 2 Vessel Investigation Project Integration Report, NUREG/CR 6197 (EGG - 2734), 1994
2. L.A. Stickler, et al., Calculations to Estimate the Margin to Failure in the TMI-2 Vessel, NUREG/CR-6196(EGG 2733), 1994
3. J.L. Rempe, et al., INEL Phase I Debris Cooling Tests and Analyses, INEL-95/0242, 1995
4. S. B. Kim et.al., Recent Progress in SONATA-IV Project, OECD/NEA CSNI PWG-2, The Third Mtg. Of TG-DCC, Rockville, MD, USA, May 9-10, 1997
5. K. Y. Suh et al., SONATA-IV Simulation Of Naturally Arrested Thermal Attack In-Vessel, Proc. Int. Conf. on PSA Methodology and Applications, pp. 453-460, Seoul, November 26-30, 1995
6. K. H. Kang et al., Experimental Investigations on In-Vessel Debris Coolability through Inhererent Cooling Mechanisms, OECD/CSNI Workshop on In-Vessel Core Debris Retention and Coolability, Garching, Germany, March 3-6, 1998
7. S. B. Kim et al., Major Results of In-Vessel Corium Cooling in the SONATA-IV Experimental Program, RASPLAV Seminar-2000, Munich, Germany, 14-15 Nov., 2000
8. J. H. Jeong et al., Experimental Study on CHF in a Hemispherical Narrow Gap, OECD/CSNI Workshop on

In-Vessel Core Debris Retention and Coolability, Garching, Germany, March 3-6, 1998

9. 이승진 외, 대형 환상관의 좁은 간극에서 역류 유동 제한 현상 연구, 2000 년 춘계 원자력 학회 학술 발표 대회, 고리, 한국, 2000 년 5 월 26 일 – 27 일

10. Yu Maruyama, et al., Experimental Study on In-Vessel Debris Coolability in ALPHA Program, Nuclear Engineering and Design 187(1999), 241 - 254

11. J. W. Park et al., An Investigation of Thermal Margin for External Reactor Vessel Cooling(ERVC) in Large Advanced Light Water Reactors(ALWR), Proceedings of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, Kwangju, Korea, May 1997

12. T. G. Theofanous et al., In-Vessel Coolability and Retention of a Core Melt, DOE/!D-10460, 1995

13. R.H. Henry, et al., An Experimental Investigation of Possible In-Vessel Cooling Mechanisms, CSARP Meeting, Bethesda, Maryland, May 5-8, 1997

표 1. 노심용융물의 기하학적 구조와 물성치

Decay Heat	26 MW
Melt Mass (M_{pool})	159.87 ton
Decay Heat per Unit Volume (Q)	1.65 MW/ m^3
Radius of Lower Head Vessel (R)	2.37 m
Cooling Rate of Melt ($\Delta T / \Delta t$)	1 K/sec
Density (r)	8450 kg/m^3
Conductivity (k)	5.3 W/m K
Specific Heat (c_p)	510 J/kg K
Vol. Thermal Expansion Coefficient (b)	1.05 x 10^{-4} 1/K
Thermal Diffusivity (a)	1.23 x 10^{-6} m^2/sec
Viscosity (m)	5.3 x 10^{-3} Pa·s
Kinematic Viscosity (n)	6.27 x 10^{-7} m^2/sec
Composition	90 % UO_2 + 10 % ZrO_2

표 2. 노심용융물 및 간극의 기하학적 구조에 대한 계산 결과

Ratio (%)	**Mass (kg)**	**Volume (m^3)**	**Height(m) &** q	**Radius (m)**	S_{dn} **(m^2)**	A_{gap} **(1mm)**	A_{gap} **(2mm)**	A_{gap} **(3mm)**
5 %	7993.5	0.946	0.366, 32.27	1.265	5.451	0.00795	0.01588	0.02382
10 %	15987.0	1.892	0.524, 38.84	1.486	7.803	0.00933	0.01866	0.02798
15 %	23980.5	2.838	0.648, 43.4	1.628	9.6497	0.01023	0.02045	0.03066
20 %	31974.0	3.784	0.754, 47.01	1.734	11.2274	0.01089	0.02178	0.03266
25 %	39967.5	4.730	0.850, 50.11	1.8184	12.6587	0.01142	0.02284	0.03425
30 %	47961.0	5.676	0.937, 52.8	1.8878	13.9545	0.01186	0.02371	0.03556
35 %	55954.5	6.622	1.019, 55.25	1.9473	15.1757	0.01223	0.02446	0.03668
40 %	63948.0	7.568	1.096, 57.48	1.9984	16.3192	0.01255	0.02510	0.03764
45 %	71941.5	8.514	1.170, 59.58	2.0437	17.4224	0.01284	0.02567	0.03849
50 %	79935.0	9.460	1.241, 61.55	2.0838	18.4792	0.01309	0.02617	0.03925
55 %	87928.5	10.406	1.308, 63.38	2.1188	19.4787	0.01331	0.02661	0.03991
60 %	95922.0	11.352	1.375, 65.18	2.1511	20.4775	0.01351	0.02702	0.04052
65 %	103915.5	12.298	1.439, 66.87	2.1795	21.4287	0.01369	0.02738	0.04105
70 %	111909.0	13.244	1.502, 68.52	2.2054	22.3689	0.01385	0.02770	0.04154
75 %	119902.5	14.190	1.563, 70.09	2.2283	23.2735	0.01399	0.02799	0.04197
80 %	127896.0	15.136	1.623, 71.63	2.2492	24.1697	0.01413	0.02825	0.04237
85 %	135889.5	16.082	1.682, 73.12	2.2679	25.0443	0.01425	0.02849	0.04272
90 %	143883.0	17.028	1.740, 74.58	2.2847	25.9081	0.01435	0.02870	0.04304
95 %	151876.5	17.974	1.797, 76.0	2.2996	26.7541	0.01445	0.02889	0.04332
100 %	159870.0	18.920	1.854, 77.42	2.3131	27.6053	0.01453	0.02905	0.04357

표 3. 간극 냉각에 의한 최대 열 제거량에 대한 계산 결과

Melt Ratio (%)	$D_h(m)$			$j_{g,\max}(m/\sec)$			$Q_{\max}(kW)$		
	1mm	2mm	3mm	1mm	2mm	3mm	1mm	2mm	3mm
5 %	7.9451	7.9419	7.9388	4.8552	4.8542	4.8533	732.7	1463.3	2194.5
10 %	9.3337	9.3305	9.3274	5.2624	5.2615	5.2607	932.0	1863.7	2794.1
15 %	10.2259	10.2227	10.2196	5.5082	5.5073	5.5065	1069.7	2137.9	3204.8
20 %	10.8919	10.8888	10.8856	5.6847	5.6839	5.6831	1175.2	2350.0	3523.4
25 %	11.4222	11.4191	11.4159	5.8215	5.8207	5.8199	1262.0	2523.6	3783.8
30 %	11.8583	11.8551	11.8520	5.9316	5.9308	5.9300	1335.4	2669.3	4002.9
35 %	12.2321	12.2290	12.2258	6.0243	6.0236	6.0228	1398.6	2796.9	4193.6
40 %	12.5532	12.5500	12.5469	6.1029	6.1021	6.1014	1453.9	2907.4	4359.5
45 %	12.8378	12.8347	12.8315	6.1717	6.1710	6.1702	1504.3	3007.0	4508.2
50 %	13.0898	13.0866	13.0835	6.2320	6.2312	6.2305	1548.5	3095.5	4642.2
55 %	13.3097	13.3065	13.3034	6.2841	6.2833	6.2826	1587.7	3173.9	4759.7
60 %	13.5126	13.5095	13.5064	6.3318	6.3311	6.3304	1623.8	3247.3	4869.2
65 %	13.6911	13.6879	13.6848	6.3735	6.3728	6.3720	1656.3	3312.2	4965.3
70 %	13.8538	13.8507	13.8475	6.4113	6.4105	6.4098	1685.6	3370.8	5054.4
75 %	13.9977	13.9945	13.9914	6.4445	6.4437	6.4430	1711.5	3423.7	5133.1
80 %	14.219	14.1259	14.1227	6.4746	6.4739	6.4732	1736.7	3471.7	5206.4
85 %	14.2465	14.2434	14.2402	6.5015	6.5008	6.5001	1758.7	3515.7	5271.2
90 %	14.3521	14.3489	14.3458	6.5255	6.5248	6.5241	1777.6	3554.7	5330.3
95 %	14.4457	14.4425	14.4394	6.5468	6.5461	6.5454	1795.8	3589.9	5382.5
100 %	14.5305	14.5274	14.5242	6.5660	6.5653	6.5646	1811.0	3620.4	5429.4

표 4. 제거해야 할 노심용융물의 열 에너지에 대한 계산 결과

Mass Ratio (%)	**A** F_{LHV} **:60%,** f**: 100 %**	**B** F_{LHV} **:60%,** f**: 50 %**	**C** F_{LHV} **:30%,** f**: 50 %**	**D** F_{LHV} **:15%,** f**: 50 %**
5 %	3382.6	2159.6	1079.8	539.9
10 %	6765.1	4319.1	2159.6	1079.8
15 %	10147.7	6478.6	3239.4	1619.7
20 %	13530.2	8638.2	4319.2	2159.6
25 %	16912.8	10797.7	5398.8	2699.4
30 %	20295.3	12957.3	6478.6	3239.3
35 %	23677.9	15116.8	7558.4	3779.2
40 %	27060.4	17276.4	8638.2	4319.1
45 %	30443.0	19435.9	9718.0	4859.0
50 %	33825.5	21595.5	10797.8	5398.9
55 %	37208.1	23755.0	11877.6	5938.8
60 %	40590.6	25914.6	12957.2	6478.6
65 %	43973.2	28074.1	14037.0	7018.5
70 %	47355.7	30233.6	15116.8	7558.4
75 %	50738.3	32393.2	16196.6	8098.3
80 %	54120.8	34552.7	17276.4	8638.2
85 %	57503.4	36712.3	18356.2	9178.1
90 %	60885.9	38871.8	19436.0	9718.0
95 %	64268.5	41031.4	20515.6	10257.8
100 %	67651.0	43190.9	21595.4	10797.7

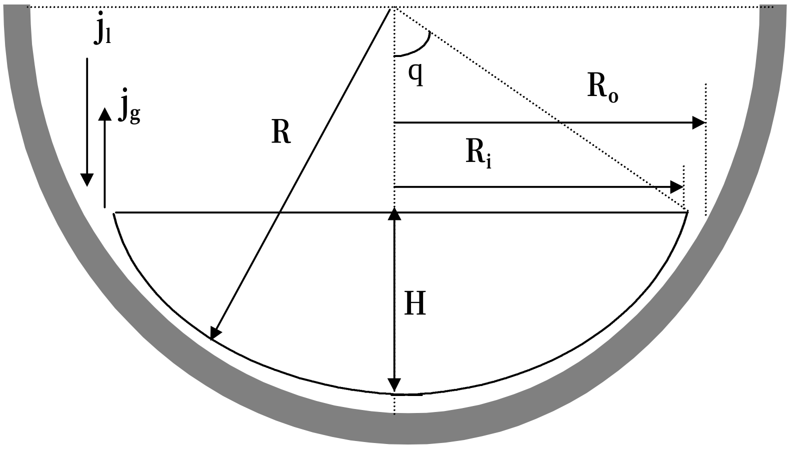
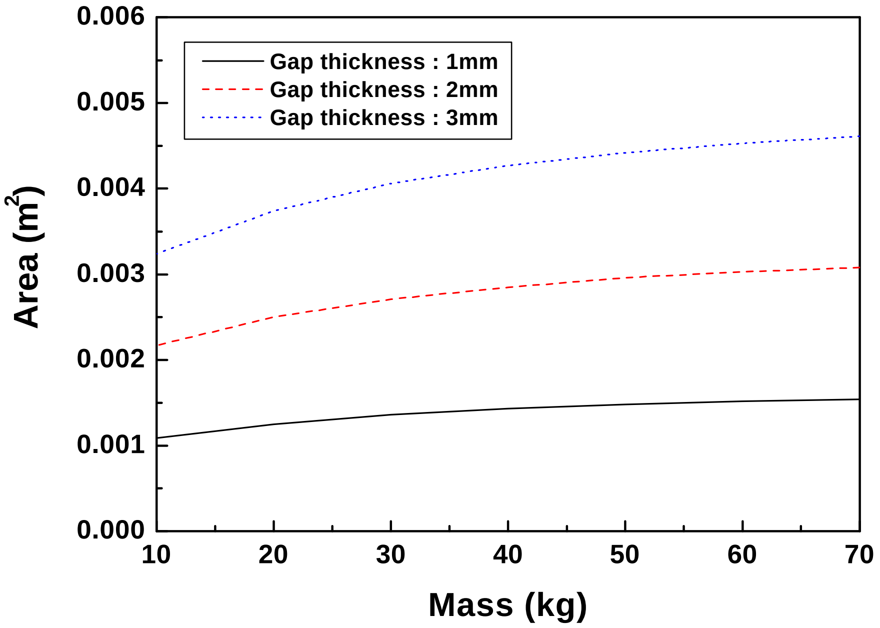
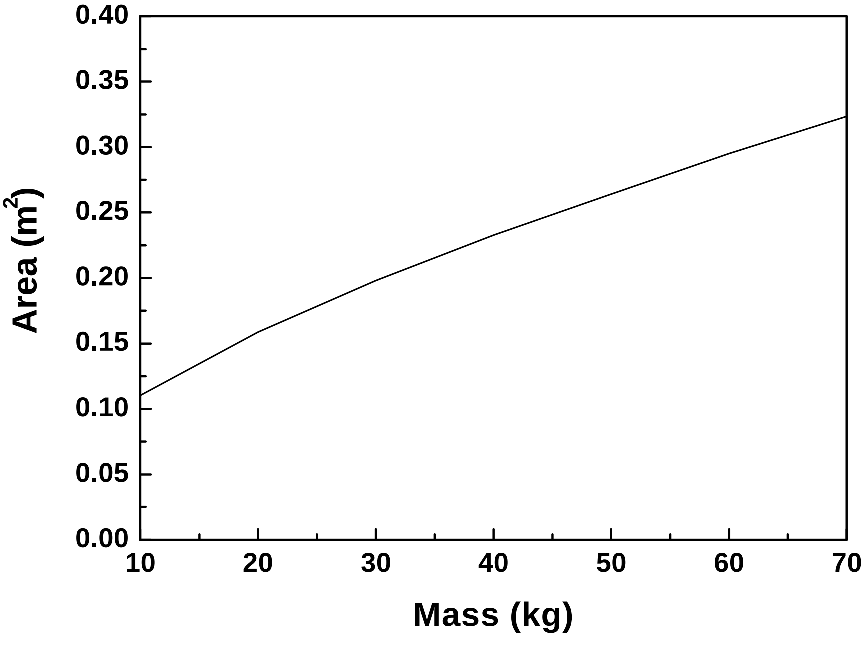


그림 1. 노심 용융 사고 시 반구 내부에 형성되는 용융물 풀의 구조에 대한 개념도

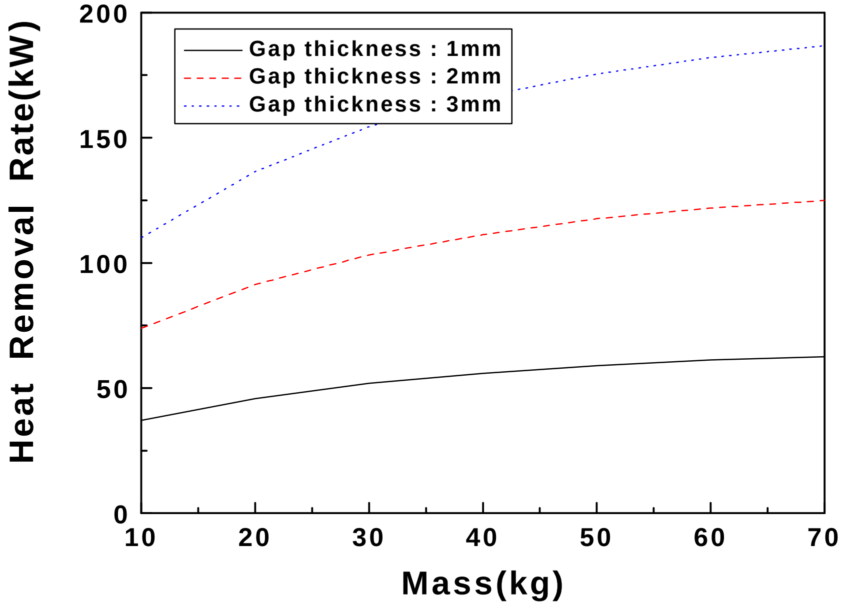


(a) 간극 내부 단면적의 변화

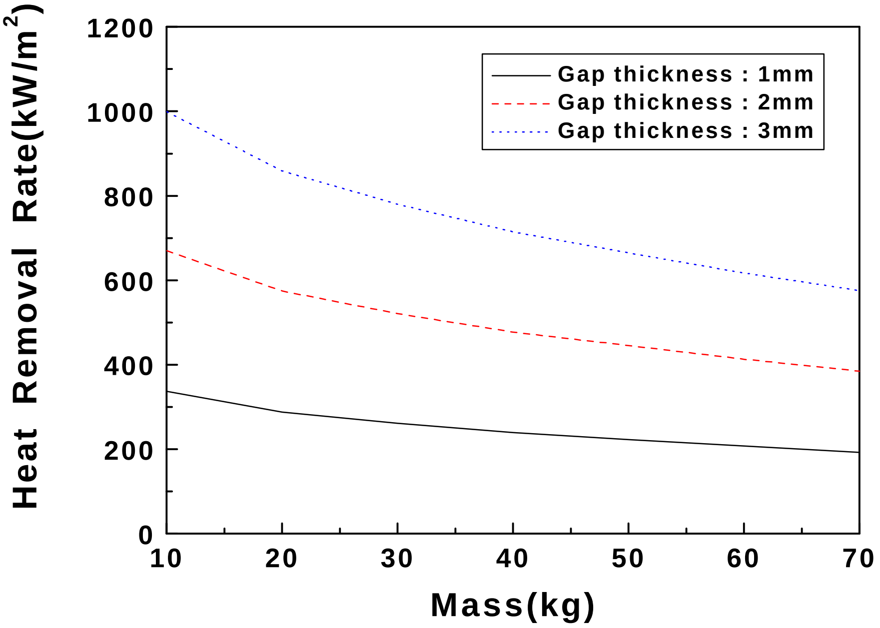


(b) 용융물 하부 표면 단면적의 변화

그림 2. LAVA 실험에서 용융물 질량에 대한 간극 내부 단면적과 용융물 하부 표면적의 변화



(a) 열량의 변화



(b) 열 유속의 변화

그림 3. LAVA 실험에서 용융물 질량 및 간극 크기의 변화에 따른 최대 열 제거 양의 분포

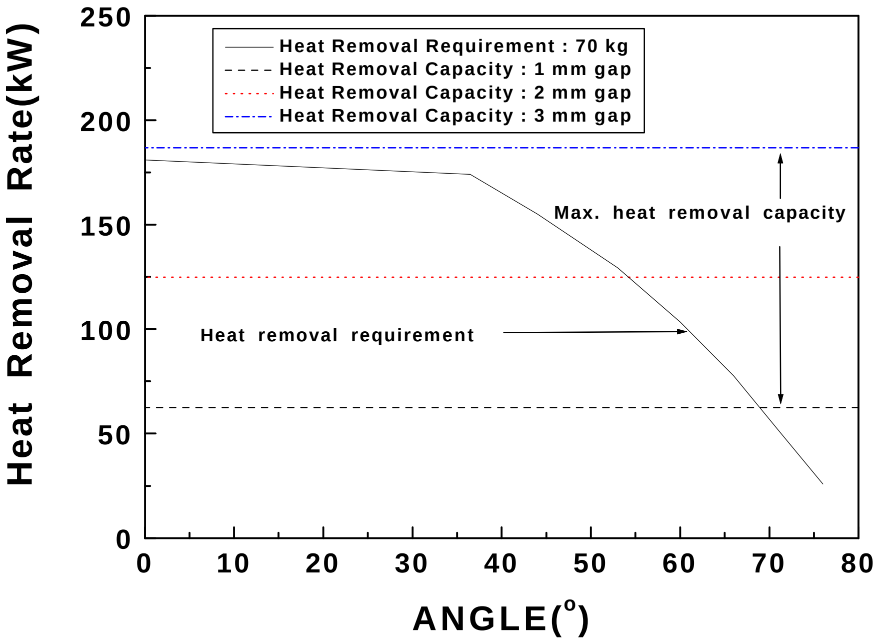


그림 4. LAVA 실험에서 70 kg Al_2O_3 용융물이 주입된 경우에 간극을 통한 최대 열 제거 능력

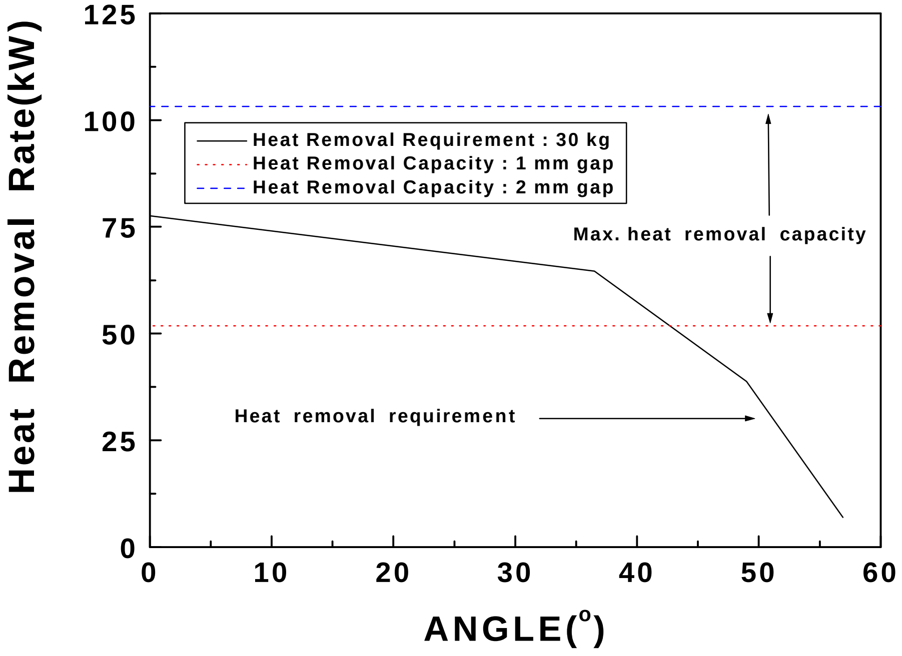


그림 5. LAVA 실험에서 30 kg Al_2O_3 용융물이 주입된 경우에 간극을 통한 최대 열 제거 능력

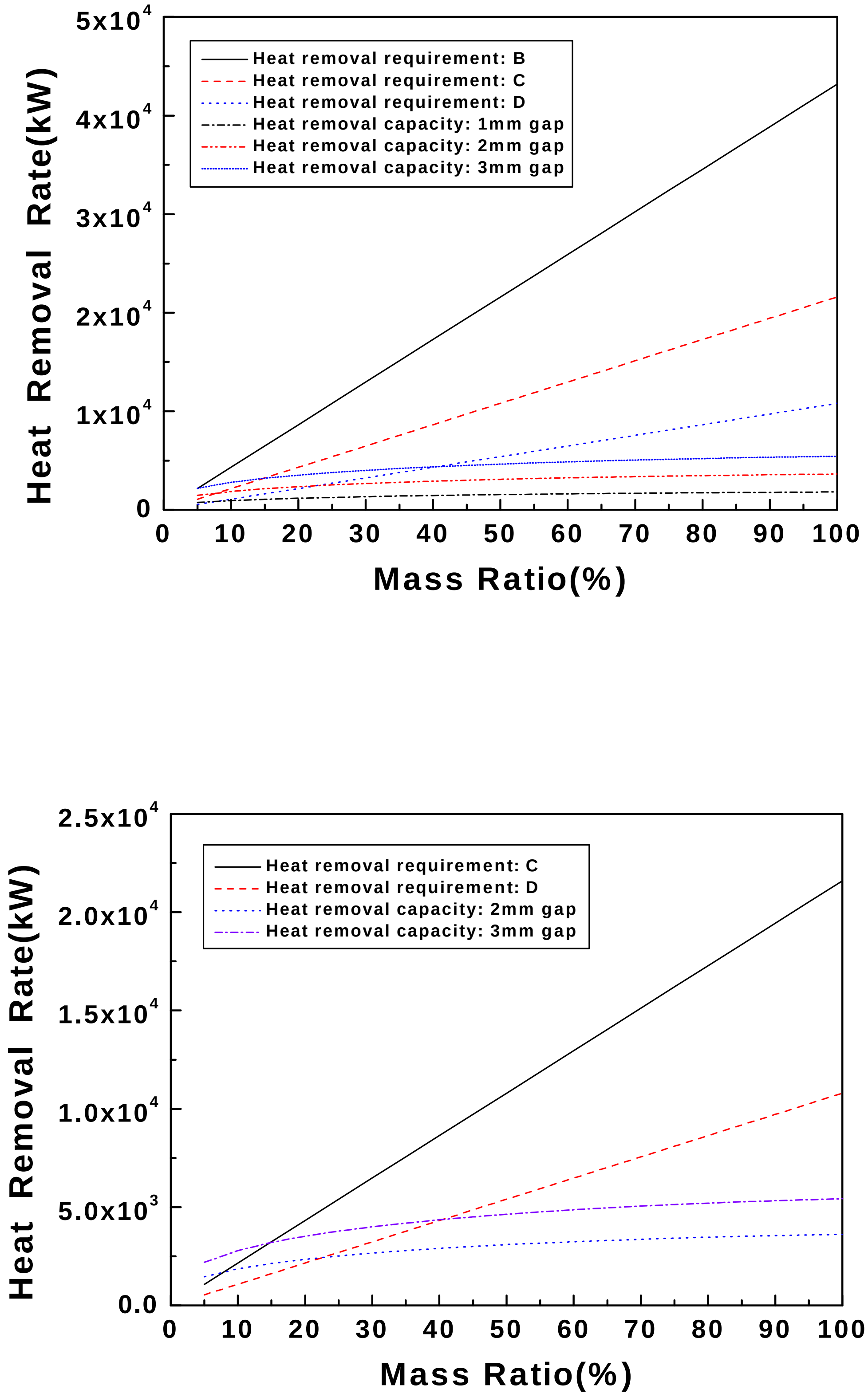


그림 6. 대형 원전에 대한 최대 열제거 양과 제거해야 할 노심용융물의 열 에너지 비교