'99춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

종횡비 변화와 냉각수 비등을 고려한 금속용융물의 자연대류 열전달에 대한 상관식 개발

Correlation Development of Natural Convection Heat Transfer in Consideration of Aspect Ratio Change and Coolant Boiling

박 래 준, 조 영 로, 강 경 호, 김 상 백, 김 희 동

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

조 재 선, 정 창 현

서울대학교
서울특별시 관악구 신림동 56-1

요 약

본 연구에서는 금속 용융물층에서 피막층 형성으로 종횡비가 변화하고 용융물 상부의 비등 효과를 고려하는 용융물 내부의 자연대류 열전달에 대한 새 상관식을 개발하였다. 본 상관식 개발에 이용한 실험은 냉각수의 자연대류와 강제대류로 용융물을 냉각하는 대류 냉각 실험과 냉각수의 비등으로 용융물을 냉각하는 비등 냉각 실험으로 구분하여 수행한 것이다. 실험결과에 따르면 용융물 상부의 냉각수 비등은 용융물의 자연대류 열전달 양을 증가시키는 것으로 나타났으며, 용융물의 피막층 두께 증가에 따른 Ra수의 급격한 감소는 Nu수를 급격하게 감소시켜야 하나 피막층 두께 증가에 따른 종횡비 감소가 Nu수를 급격하게 감소시키지 않는 것으로 나타났다. Ra수 변화에 대한 Nu수 변화에 대한 실험결과가 Globe와 Dropkin 상관식과 비슷하게 나타난 결과를 이용하여 $Nu = 0.051(Ra)^{1/3}(AR)^{-0.2441}(\Phi)^{0.025}$의 새 상관식을 개발하였다.

Abstract

A new correlation on natural convection heat transfer with crust formation in the molten metal pool has been developed in consideration of coolant boiling effect and of aspect ratio change by an increase in crust thickness. Two test results of the convection cooling case, natural and forced convection cooling cases, and of the boiling case were used in the present study. The experimental results have shown that the Nusselt number of the case with boiling condition in the molten metal pool is greater than that of the case with non-boiling condition at the same Rayleigh number. Even though the Rayleigh number rapidly decreases due to an increase of the crust thickness, the Nusselt number does not rapidly decrease because of the aspect ratio effect. From the experimental results, the new correlation between the Nusslet number and Rayleigh number in the molten metal pool with the crust formation has been developed as $Nu = 0.051(Ra)^{1/3}(AR)^{-0.2441}(\Phi)^{0.025}$ using Globe and Dropkin correlation.

1. 개요

원전에서 핵연료가 용융되는 중대사고 발생시 노심 용융물은 사고 전개과정에 따라 원자로용기 내의 노심과 하부 plenum, 원자로용기 외부의 원자로공동(cavity)에 존재하여 용융풀을 형성할 수 있다. 이때

형성된 용융풀은 구성성분의 밀도차이 때문에 그림 1에서 보는 바와 같이 밀도가 큰 핵연료(UO_2)와 ZrO_2 등으로 구성된 산화물 층과 밀도가 작은 철과 Zircaloy 등으로 구성된 금속물 층으로 분리될 수 있다. 이때 하부의 산화 용융물층에는 붕괴열(decay heat)의 내부 열원이 있기 때문에 내부발열의 자연대류 열전달이 발생하고, 상부의 금속 용융물층에서는 내부 열원이 없으므로 하부의 산화 용융물층으로부터 하부 가열되고 상부 냉각되는 Rayleigh-Benard 자연대류 열전달이 발생한다. 이때 용융물을 냉각하기 위하여 냉각수를 용융물 상부에 주입하면 금속 용융물층 상부가 급격히 고화되어 피막층을 형성하게 된다. 이와 같이 용융 pool 경계에서 형성된 피막층은 노심용융물과 냉각수 사이의 전도 열저항(conducting thermal barrier) 역할을 하여 용융물의 냉각을 방해할 수 있다[1, 2, 3]. 따라서 노심용융물의 냉각특성을 정확하게 평가하기 위해서는 용융물과 냉각수의 초기 및 경계조건에 따른 용융물의 피막층 형성 과정과 피막층 주변의 열전달 특성을 정확하게 규명할 필요가 있다.

노심용융물과 냉각수가 접촉할 때 형성될 수 있는 용융물의 피막층에 대해서는 노심용융물과 콘크리트 반응 및 용융물 냉각(Molten Core Concrete Interaction and Debris Coolability) 등에 관한 광의의 관점에서 많은 연구[4, 5, 6]가 수행되었으나 경계 및 초기조건에 따른 피막층의 형성과정과 이의 형성이 용융물과 냉각수 사이의 열전달에 미치는 영향 등에 대한 microscopic한 현상에 중점을 둔 연구는 거의 없다. 특히 원자로용기 내에서 노심용융 후기과정(late phase melt progression) 현상인 용융 pool 형성시 피막층 형성과 피막층의 재용융 등에 대해서는 아직 불확실성이 많기 때문에 앞으로도 많은 연구가 필요한 분야이다.

노심용융물의 피막층 형성과정에서 중요한 열전달 기구는 용융물 내부의 자연대류와 피막층 상부와 냉각수 사이의 비등이다. 동작유체의 자연대류에 대한 연구는 많이 수행되었으나 실제 노심용융물인 Pr무차원수가 1보다 작은 금속용융물에 대한 연구는 거의 없다. 용융 pool에서 피막층이 성장하면 용융물의 깊이가 감소하여 종횡비(aspect ratio)가 변화한다. 이와 같은 종횡비의 변화가 용융물 내부의 자연대류 열전달에 미치는 영향에 대한 연구도 거의 수행되지 않았으며, 일반적인 평판에서의 비등 열전달에 대해서는 많은 연구가 수행되었으나 피막층이 성장하면서 열속을 감소킬 때의 비등 열전달에 대한 연구는 거의 없어 많은 연구가 필요하다. 밀폐된 용기 하부에서의 가열과 상부에서의 냉각 형태인 Rayleigh-Benard 자연대류는 Nu수를 Ra수, Pr수, 종횡비(aspect ratio) 등의 함수로 나타낼 수 있는데 특히 그 중에서도 Ra수와 밀접한 관계가 있다고 알려져 있으며, 일반적으로 Ra수가 증가하고, Pr수가 증가하고, 종횡비가 감소할수록 Nu수는 증가한다[7, 8, 9, 10]. 용융물의 피막층 두께 증가에 따른 Ra수의 급격한 감소는 Nu수를 급격하게 감소시켜야 하나 피막층 두께 증가에 따른 용융물의 종횡비 감소가 Nu수의 변화에 영향을 미친다.

본 연구에서는 그림 2에서 보는 바와 같이 하부에서 가열하고 상부에서 냉각하여 피막층 형성이 있는 용융물의 자연대류 열전달에 대한 실험결과를 이용하여 자연대류에 대한 새 상관식을 개발하였다. 본 연구에서 사용한 실험은 냉각수의 자연대류와 강제대류로 용융물을 냉각하는 대류 냉각실험과 냉각수의 비등으로 용융물을 냉각하는 비등 냉각 실험이다. 대류냉각 실험은 냉각수로 물을 사용하였으며 용융물로는 저온용융 합금물을 사용하였고 Pr수가 1보다 작은 금속용융물의 종횡비 변화가 용융물의 자연대류 열전달에 미치는 영향을 평가하기 위하여 용융물층의 초기 종횡비가 1/6과

4/5인 두 경우에 대한 정상상태 실험을 수행한 것이다. 이 실험결과를 이용하여 용융물의 피막층 증가에 따른 종횡비 변화가 자연대류 열전달에 미치는 영향을 정량화하였다. 비등냉각 실험은 용융물 상부의 냉각수 비등이 피막층 형성이 있는 용융물 내부의 자연대류 열전달에 미치는 영향을 평가하기 위해 수행한 실험으로서 냉각수로 물을 사용하였고 용융물로는 주석을 사용하였다. 이 실험결과를 이용하여 외부 냉각수의 비등이 피막층 형성이 있는 용융물의 자연대류 열전달에 미치는 영향을 정량화하였다. 정량화한 결과를 이용하여 금속 용융물층에서 피막층 형성으로 종횡비가 변화하고 용융물 상부의 비등 효과를 고려할 수 있는 용융물 내부의 자연대류 열전달에 대한 새 상관식을 개발하였다

2. 실험내용 및 방법

본 연구에서 사용한 대류냉각 실험은 원전의 중대사고시 노심과 원자로공동(cavity) 등에서 형성될 수 있는 용융물층의 종횡비를 모사하기 위하여 초기 종횡비가 1/6과 4/5인 두 실험용기를 제작하여 실험용기 상부에 설치한 열교환기와 하부에 설치한 히터 온도를 변화시키면서 용융금속의 피막층 두께와 열전달 양을 측정하는 정상상태 실험을 수행한 것이다. 이 실험에서 사용한 용융물은 냉각수의 비등을 방지하기 위하여 용융온도가 100 ℃ 이하이고 Pr수가 1보다 작으며, 용융과 고화특성이 순수물질과 같은 성질을 가진 eutectic 물질이다. 즉, 중량비가 Bi가 50 %, Pb가 27 %, Sn이 13 %, Cd가 10% 각각 혼합되어 용융온도가 70 ℃인 저온용융 합금물을 용융물로 사용하였으며, 냉각수로는 여과한 물을 사용하였다. 이 실험의 실험장치 개략도는 그림 3이 보여주고 있으며 이 실험과 관련된 상세한 내용은 참고문헌 11에 나타나 있다.

비등냉각 실험은 용융물 상부에 주입되는 냉각수가 비등하는 조건에서 용융물의 피막층 형성과 용융물 내부의 자연대류 열전달 특성을 규명하기 위하여 수행한 것이다. 이 실험에서는 노심용융물을 모사하기 위한 물질로 상변화 온도가 232°C인 주석(Tin)을 사용하였으며, 냉각수로는 대류냉각 실험과 같이 여과한 물을 사용하였다. 이 실험에서는 실험용기 하부 바닥면에서 용융물을 가열하고 digital 펌프를 이용하여 냉각수를 용융물 상부에 직접 주입하는 강제대류 비등으로 용융물을 냉각하는 경우에 대하여 하부 바닥면의 가열조건과 주입되는 냉각수의 주입량과 주입온도를 변화시키면서 실험을 수행하였다. 이 실험의 실험장치 개략도는 그림 4가 보여주고 있으며 이 실험과 관련된 상세한 내용은 참고문헌 12에 나타나 있다. 대류냉각 실험과 비등냉각 실험의 조건들은 표 1이 비교하여 보여주고 있다.

3. 피막층 형성이 있는 용융물의 자연대류 상관식 개발

본 연구에서 사용한 실험의 결과들은 참고문헌 11과 12에 상세히 나타나 있다. 용융물내 온도분포에 대한 실험결과는 용융물 내부의 자연대류가 피막층 형성에 많은 영향을 미치기 때문에 본 연구에서는 용융물 내부의 자연대류 열전달에 대한 실험결과를 상세히 분석하였다. 밀폐된 용기 내의 Rayleigh-Benard 자연대류는 지금까지 많은 실험적 연구가 수행되었으나 이들 대부분의 연구들은 상변화는 고려하지 않고 동작유체의 순수 자연대류에 대하여 실험하였다[13-17]. 이들 대부분의 수행결과는 다음과 같은 상관식으로 발표되었다.

$$Nu = a\ Ra^b \tag{1}$$

위의 상관식에서 Nu수는 밀폐된 용기 사이의 열전달계수와 깊이로 정의되며, Ra수는 용기 상부와 하부의 온도차이로 정의되며 기존 실험 결과들은 표 2가 보여주고 있다. 표에서 보는 바와 같이 Globe와 Dropkin 및 Rossby 상관식이 Pr수가 1보다 작은 수은의 용융금속물을 사용하여 개발한 상관식이다. 밀폐된 용융물층에서 자연대류 열전달이 발달될때 용융물 내부의 유동과 온도는 Ra수, Pr수, 종횡비의 함수로 나타난다. 일반적으로 Ra수가 증가하고, Pr수가 증가하고, 종횡비가 감소할수록 Nu수는 증가한다.

본 연구에서는 실험결과를 검증하기 위하여 용융물층에 대하여 기존에 발표된 상관식과 비교.분석하였다. 본 연구에서 용융물 상부의 냉각수층은 용융물의 피막층이 용융물과 냉각수 사이의 열저항 역할을 하여 일반적인 하부가열 자연대류 열전달 현상인 Ra수를 증가시키면 Nu수가 증가하는 결과가 도출되지 않았기 때문에 기존에 발표된 상관식과의 비교.검토를 수행하지 않았다. 또한 용융물 상부에 형성된 피막층의 영향을 평가하기 위하여 피막층의 존재여부에 대하여 구분하여 비교하였으며, 종횡비 영향을 평가하기 위하여 용융물층의 종횡비가 작은 경우와 종횡비가 큰 경우에 대하여 구분하여 비교.분석하였다.

그림 5는 Ra수 증가에 따른 Nu수 변화에 대한 기존의 하부가열 자연대류 열전달 상관식들과 종횡비가 큰 자연대류 냉각시 피막층 형성유무에 대한 실험결과를 비교하여 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 Ra수가 증가함에 따라 Nu수가 증가하는 것으로 나타났으며, Pr수가 1보다 작은 금속용융물을 사용한 Globe와 Dropkin 및 Rossby 상관식들이 비금속물질을 사용하여 개발한 상관식들보다 다소 낮게 나타나고 있다. Pr수가 0.017인 저온용융금속을 사용한 본 연구에서의 실험결과는 Pr수가 0.024인 수은을 사용한 Globe와 Dropkin 및 Rossby 상관식 값들과 비슷하게 나타나고 있다. 그러나 정밀하게 비교하여 보면 현재의 피막층이 형성된 실험결과가 Globe와 Dropkin 및 Rossby 상관식 값들보다 약 8 % 높게 나타나고 있으며, 피막층이 형성되지 않은 경우는 15 % 높게 나타나고 있다. 피막층이 형성된 경우의 Nu수가 피막층이 형성되지 않은 경우보다 다소 Globe와 Dropkin 상관식보다 높게 나타난 것은 용융물의 피막층이 용융물과 냉각수 사이의 열전달에 전도 열저항 역할을 했기 때문이다.

그림 6은 Ra수 증가에 따른 Nu수 변화에 대한 Globe와 Dropkin 상관식과 종횡비가 큰 자연대류 냉각시 피막층 형성유무에 대한 실험결과를 비교하여 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 현재의 실험결과는 자연대류 냉각 때와 같이 Globe와 Dropkin 상관식과 비슷하게 나타나고 있다. 그러나 정밀하게 비교하면 피막층이 형성된 경우는 약 11 %, 피막층이 형성되지 않은 경우는 약 17 % 높게 나타나 피막층의 전도 열저항 역할을 확인할 수 있었다. 자연대류 냉각과 비교하여 보면 강제대류 냉각 때의 Nu수가 더 높게 나타나 강제대류 냉각이 자연대류 냉각보다 열전달양을 다소 증대시킨 것을 알 수 있다.

그림 7은 Ra수 증가에 따른 Nu수 변화에 대한 Globe와 Dropkin 상관식과 모든 경우의 실험결과와 비교하여 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 종횡비가 작은 경우의 실험결과는 종회비가 큰 경우에서와 같이 Globe와 Dropkin 상관식과 비슷하게 나타나고 있다. 그러나 정밀하게 비교하면

자연대류 냉각시 피막층이 형성된 경우는 약 20 %, 피막층이 형성되지 않은 경우는 약 30 % 높게 나타나고 강제대류 냉각시 피막층이 형성된 경우는 약 21 %, 피막층이 형성되지 않은 경우는 약 31 % 높게 각각 나타나 피막층의 전도 열저항 역할을 확인할 수 있었다. 종횡비가 작은 경우와 큰 경우를 비교하여 보면 종횡비가 작은 경우가 종횡비가 큰 경우보다 Nu수가 높게 나타나 종횡비가 작은 것이 자연대류 열전달 양을 더 많게 하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 용융물의 피막층 형성을 동반하는 자연대류 열전달 현상을 모의할 때는 피막층 두께 증가에 따르는 용융물층의 종횡비 감소효과를 반영한 상관식을 사용해야 한다는 중요한 결과를 도출하였다.

본 실험결과에 따르면 용융물의 피막층이 증가하면 Ra수가 급격히 감소하고 종횡비도 감소하며 종횡비 변화에 따라 용융물의 자연대류 열전달양도 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 Globe와 Dropkin 상관식을 기초로하여 피막층 두께 변화에 따른 종횡비 변화를 고려한 새 상관관계를 다음과 같이 도출하였다.

$$Nu = 0.051(Ra)^{1/3} AR^{e} \tag{2}$$

- 종횡비가 작은 경우 : e = - 0.0736 (0.086 < AR < 0.167)
- 종횡비가 큰 경우 : e = - 0.2441 (0.369 < AR < 0.759)

본 분석에서는 Pr 수에 대한 평가는 생략하였는데 이는 Pr 수가 낮은 액체금속 물질들은 Nu 수와 $Nu \propto Pr^{0.074}$의 관계로 같은 비례 관계가 있음이 Globe 와 Dropkin 에 의해 밝혀졌으며, Pr 수가 Globe와 Dropkin이 사용한 수은보다 다소 차이가 나도 Nu 수에 미치는 영향은 아주 미미하다. 따라서 본 연구에서 사용한 저온용융합금물의 Pr 수는 Globe와 Dropkin 상관식에서 제시하는 유효한 Pr 수 영역내에 포함되므로 Pr 수가 미치는 영향을 평가하지 않았다.

비등냉각 실험 결과인 그림 8에서 보는 바와 같이 냉각수 비등이 Nu수 증가에 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 냉각수 비등조건이 자연대류 열전달양에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 이때 비등냉각 실험은 대류냉각 실험의 종횡비가 큰 경우와 거의 같기 때문에 종횡비가 큰 경우만 고려하였다. 냉각수 비등이 자연대류 열전달양에 미치는 영향을 평가하기 위하여 다음과 같이 표시되는 상관관계를 제시하였다.

$$Nu = 0.051(Ra)^{1/3}(AR)^{-0.2441}\,\Phi^{n} \tag{3}$$

(3) 식에서 냉각수 비등의 효과는 Φ^{n} 로 표시하였다. 새로운 인자 Φ 는 실험용기의 하부 가열온도와 상부 냉각수와의 온도 차이와 피막층과 냉각수의 계면온도와 상부냉각수 온도의 차이의 비를 표현하였다. (3) 식에서 적당한 n 값을 결정하기 위해 냉각수층에서 비등이 일어나는 본 실험결과를 바탕으로 정량적 평가를 하였다. 그결과, n는 0.025로 나타나 다음과 같은 상관식을 개발하였다.

$$Nu = 0.051(Ra)^{1/3}(AR)^{-0.2441}(\Phi)^{0.025} \tag{4}$$

위에서 제시한 새로운 자연대류 열전달 상관식은 Pr수가 낮은 물질에 대해서 하부에서 가열되고 상부 냉각수에 의해 피막층이 형성될 때 액체상태로 있는 용융물의 내부에서 일어나는 자연대류 열전달 현상에 대해 적용될 수 있다.

4. 결론

원전의 중대사고 발생시 형성될 수 있는 노심용융물의 피막층 형성과 피막층이 용융물과 냉각수 사이의 열전달에 미치는 영향을 규명하기 위하여 용융물을 냉각수의 대류로 냉각하는 경우와 비등으로 냉각하는 경우로 구분하고 실험과 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 용융물의 자연대류에 관한 대류냉각 실험결과는 기존의 Globe와 Dropkin 상관식과 거의 같게 나타났으며, 피막층 증가에 따른 종횡비 변화가 열전달양에 매우 많은 영향을 미쳤다.
- 용융물의 피막층 두께 증가에 따른 Ra수의 급격한 감소는 Nu수를 급격하게 감소시켜야 하나 피막층 두께 증가에 따른 종횡비 감소가 Nu수를 다소 증가시키기 때문에 Nu수가 급격하게 감소되지 않는 것으로 나타났다.
- 비등냉각 실험을 수행한 결과 냉각수의 비등이 용융물의 자연대류 열전달양을 증가시켜 기존의 Globe와 Dropkin 상관식에 비하여 Nu수가 다소 높게 나타났다.
- Ra수 변화에 대한 Nu수 변화가 실험결과가 Globe와 Dropkin 상관식과 비슷하게 나타난 결과를 이용하여 용융물층의 종횡비 변화와 냉각수 비등효과를 고려한 새 상관식 $Nu = 0.051(Ra)^{1/3}(AR)^{-0.2441}(\Phi)^{0.025}$을 개발하였다.
- 본 연구에서 개발한 상관식은 상부의 냉각수가 비등하고 용융물의 피막층 증가에 따른 종횡비가 변하는 용융물층의 자연대류 열전달 해석에 중요하게 사용될수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 과제의 일환으로 수행하였습니다.

기호설명

a : 상수
AR : 종횡비(= l /c)
b : 상수
c : 용융물층 가로 길이, m
c_p : 정압 비열, J/(kg.K)
d : 용융물층 초기 높이, m
e : 상수
g : 중력가속도, m/s^2
h : 열전달계수, $W/(m^2K)$
k : 열전도도, W/(mK)
l : 용융물층 높이(= d-t), m
n : 상수
Nu : Nusselt 수 (= hl/k)
Pr : Prandtl 수(= ν/α)
Ra : Rayleigh 수 (= $g\beta\Delta T l^3/(\alpha\nu)$)

t : 피막층 두께, m
T : 온도, ℃
T_b : 용융물 하부 온도, ℃
T_c : 냉각수 온도, ℃
T_s : 용융물층과 냉각수가 접촉하는 용융물의 표면온도, ℃
ΔT : 용융물층 상.하부 온도차이, ℃

그리스문자
α : 열확산계수(= $k/(\rho c_p)$), m^2/s
β : 체적팽창계수, 1/K
ν : 동점성계수, m^2/s
ρ : 밀도, kg/m^3
Φ : 무차원수 $((T_b - T_c)/(T_s - T_c))$

참고문헌

1. Epstein, "The MACE Internally-Heated Corium Pool: Was It a Thermal Oscillator ?," ANS Proceedings : '92 National Heat Transfer Conference, August 12, 1992
2. J. M. Bonnet et al., "Coolability of Corium Spread on to Concrete Under Water, the PERCOLA Model," ANS Proceedings: '92 National Heat Transfer Conference, August 12, 1992
3. B. Cheung et al., "Periodic Growth and Decay of a Frozen Crust over a Heat Generating Liquid Layer," Trans. of ASME, J. of Heat Transfer, Vol. 103, pp. 369-375, May 1981
4. R. E. Blose et al., "SWISS: Sustained Heated Metallic Melt/Concrete Interactions with Overlying Water Pool," NUREG/CR-4727, July 1987
5. K. M. Nho, J. H. Kim, S. B. Kim, K. Y. Shin, and M. Chung, "An Experimental Study on the Transient Interaction Between High Temperature Termite Melt and Concrete, J. of KNS, **29**, 336-347, 1997
6. B. Spencer et al., "Status of Melt Attack and Coolability Experiment(MACE)," CSARP Spring Meeting , Bethesda, Maryland, May 3-7, 1993
7. R. Viskanta, "Heat Transfer During Melting and Solidification of Metals," J. of Heat Transfer, Vol. 110, pp. 1205-1218, 1988
8. Lia et al., "Pure Material Melting and Solidification with Liquid Phase Buoyancy and Surface Tension Force," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 36, No. 2, pp. 411-422, 1993
9. A. Bejan et al., "The Prandtl Number Effect on the Transition in Natural Convection Along a Vertical Surface," J. of Heat Transfer, Vol. 112, pp. 787 – 790, 1990
10. M. keyhani etal., "The Prandtl Number Effect on Natural Convection in an Enclosure with Proturding Hest Sources," J. of Heat Transfer, Vol. 113, pp.883-891, 1991
11. 박 래 준, "용융금속의 고화층 형성과 고화층이 분리된 두 수평 유체층 사이의 열전달에 미치는 영향," 한국과학기술원, 기계공학과 박사학위 논문, 1998년 5월
12. 조 재 선, "비등하는 냉각수가 고온의 액체금속 자연대류 열전달과 고화층 형성이 미치는 영향용융금속의 고화층 형성에 미치는 영향," 서울대학교, 원자핵공학과 박사학위 논문, 1999년 2월

13. S. Globe and D. Dropkin, "Natural Convection Heat Transfer in Liquid Confined by Two Horizontal Plates and Heated From Below," Trans. of ASME, J. of Heat Transfer, Vol. 97, pp. 24-30, 1959
14. H. T. Rossby, "A Study of Benard Convection with and without rotation," J. of Fluid Mech., Vol. 36, pp. 309-335, 1969
15. D. C. Threlfall, "Free Convection in Low-Temperature Gaseous Helium," J. of Fluid Mech., Vol. 67, pp. 17-28, 1975
16. F. Heslot, B. Castaing, and A. Libchabre, "Transitions to Turbulence in Helium Gas," Phys. Rev., A36, pp. 5870-5873, 1987
17. T. Y. Chu, and R. J. Goldstein, "Turbulent Convection in a Horizontal Layer of Water," J. of Fluid Mech., Vol. 60, pp. 141-160, 1973

표 1. 대류냉각 실험과 비등냉각 실험의 실험조건 비교

	Natural Convection Case		Boiling Case
	Low Aspect Ratio Case	High Aspect Ratio Case	
Test Section Geometry (X x Y x Z)	450 x 150 x 150 (mm x mm x mm)	250 x 150 x 350 (mm x mm x mm)	250 x 250 x 350 (mm x mm x mm)
Height of the metal layer	75 (mm)	200 (mm)	200 (mm)
Height of the coolant layer	75 (mm)	150 (mm)	150 (mm)
Metal material	Wood' s metal	Wood' s metal	Tin
Coolant material	Water	Water	Water
Ra range in the metal pool	10^4 - 10^6	10^5 - 10^7	10^6 - 10^8
Teflon bar locations	(X/2, Y/2), (3/4X, Y/2)	(X/4, Y/2), (X/2, Y/2), (3/4X, Y/2)	(X/4, Y/2), (X/2, Y/2), (3/4X, Y/2)
Heater capacity	3 (kW)	4 (kW)	19.8 (kW)

표 2. 기존에 개발된 하부가열 상부냉각 자연대류 상관식

	Working Fluid	a	b	Ra Range	Pr
Globe & Dropkin	Mercury	0.051	1/3	$1.51x10^5$<Ra < $6.76x10^8$	0.022
Rossby	Mercury	0.147	0.247	$2.0x10^4$ < Ra < $5.0x10^5$	0.024
Threlfall	Gas Helium	0.173	0.280	$4.0x10^5$ < Ra < $2.0x10^6$	0.8
Heslot et al.	Gas Helium	0.096	0.353	$3.0x10^5$ < Ra < $4.0x10^7$	0.8
Chu & Goldstein	Water	0.183	0.278	$2.76x10^5$< Ra < $1.05x10^8$.	6

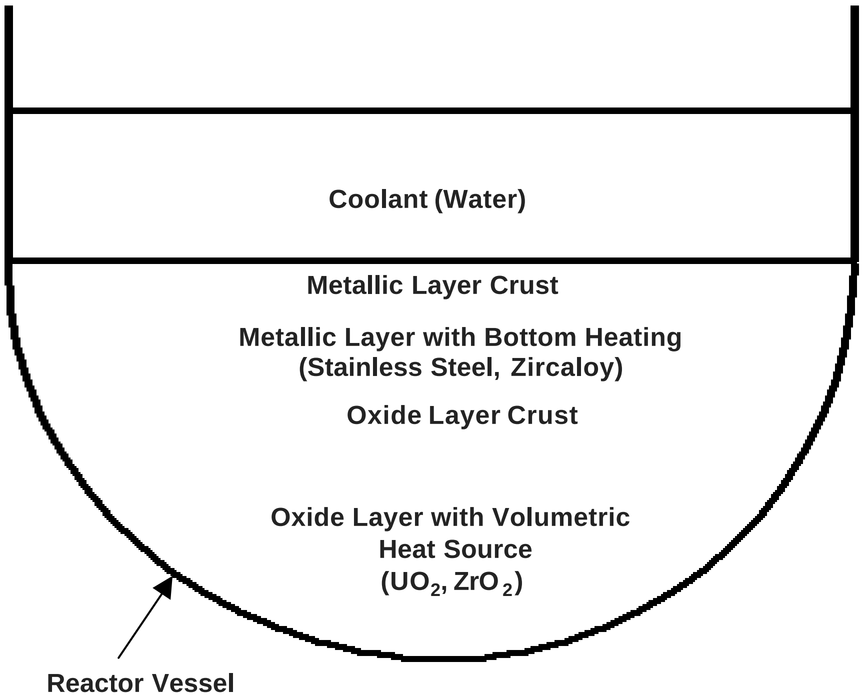

그림 1. 중대사고시 노심용융물이 원자로용기 하부에 형성된 모습

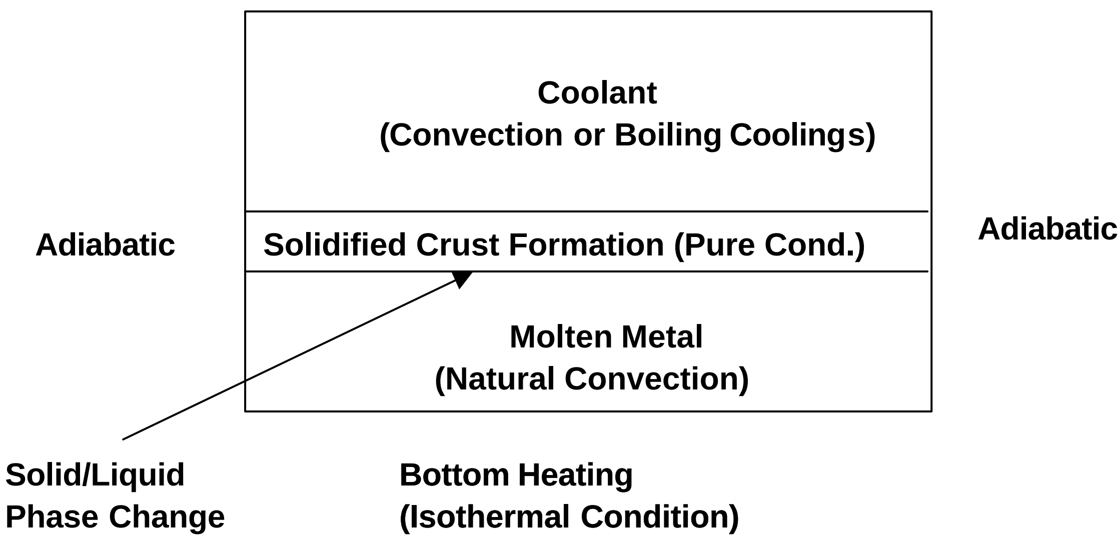

그림 2. 피막층 형성이 있는 노심용융물의 자연대류 열전달에 대한 문제 정의

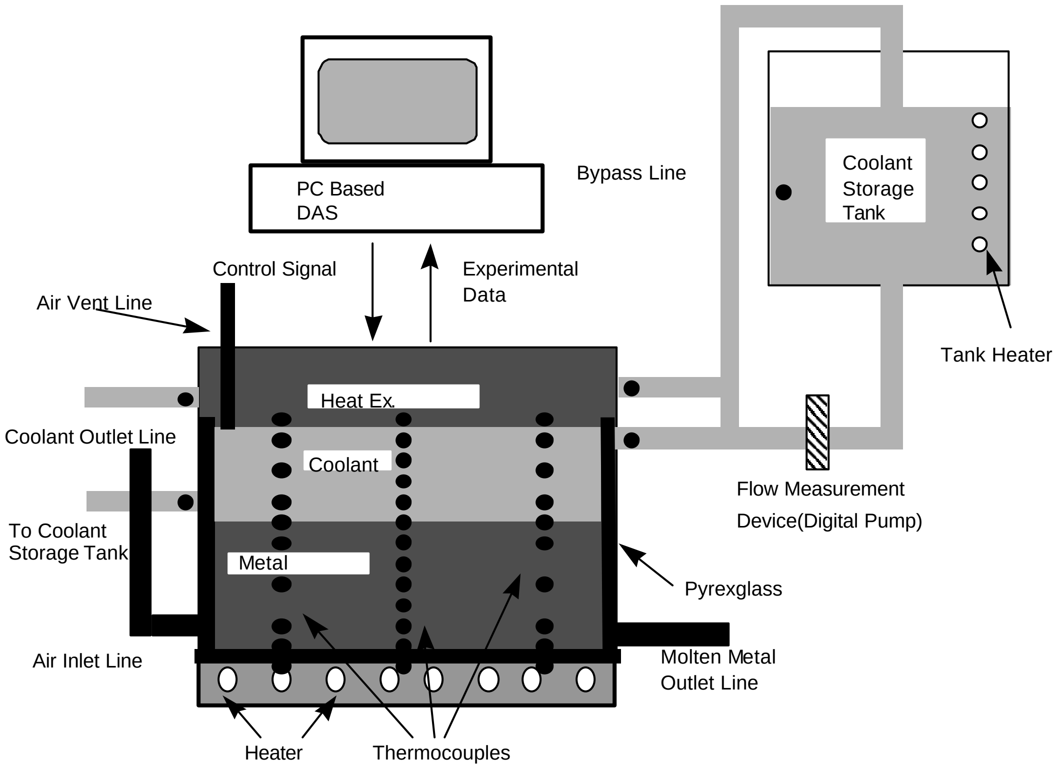

그림 3. 종횡비가 큰 대류냉각 실험장치의 개략도

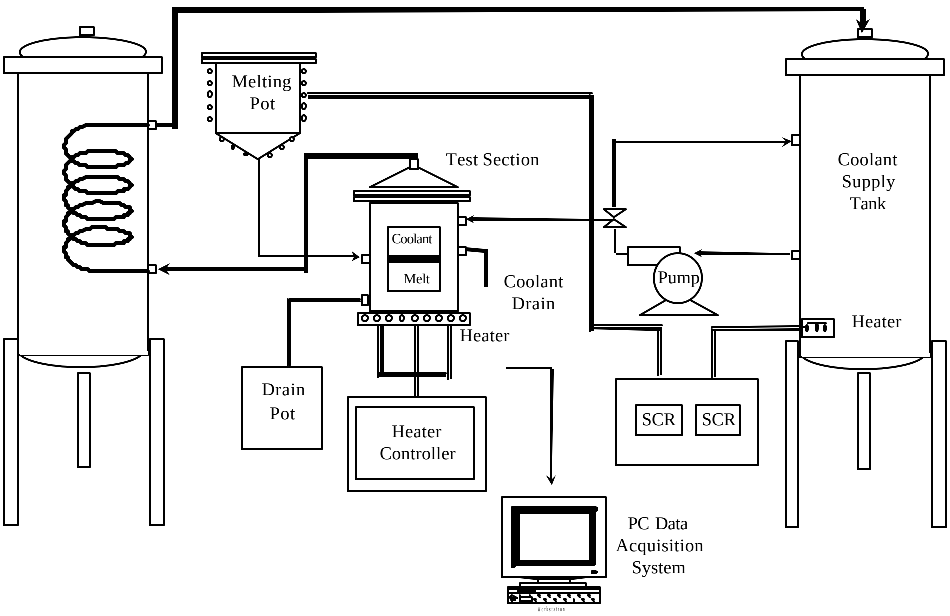

그림 4. 비등냉각 실험장치의 개략도

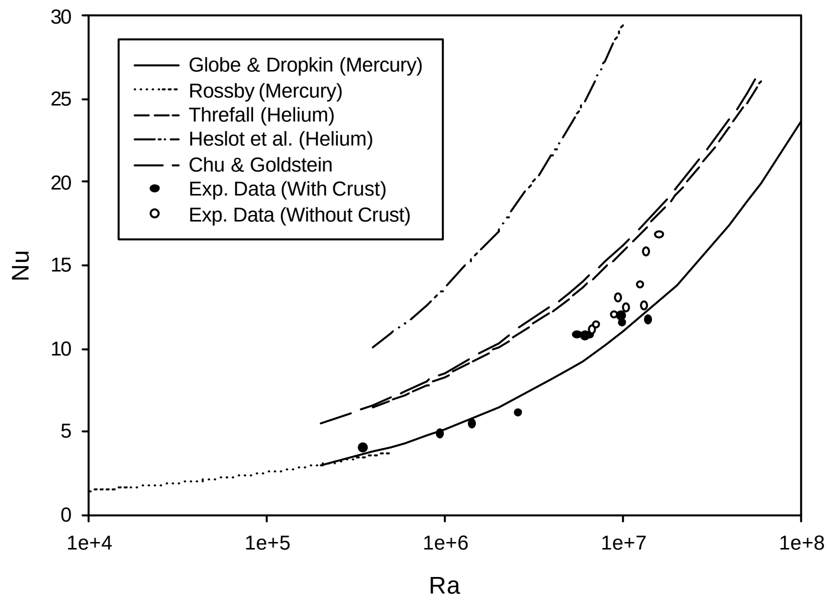

그림 5. 종횡비가 큰 자연대류 냉각시 용융물의 피막층 형성 유무에 따른 대류냉각 실험결과와 다른 상관식 비교

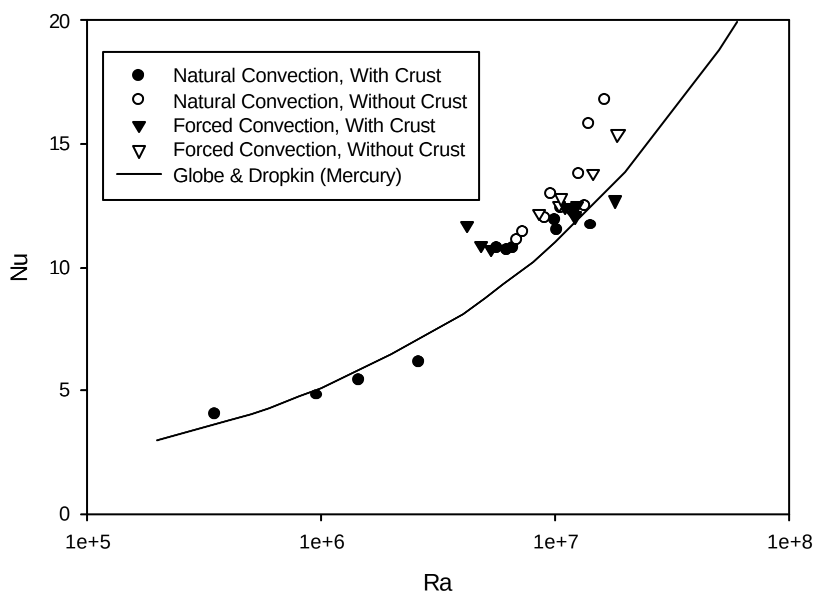

그림 6. 종횡비가 큰 강제대류 냉각시 용융물의 피막층 형성 유무에 따른 대류냉각 실험결과와 다른 상관식 비교

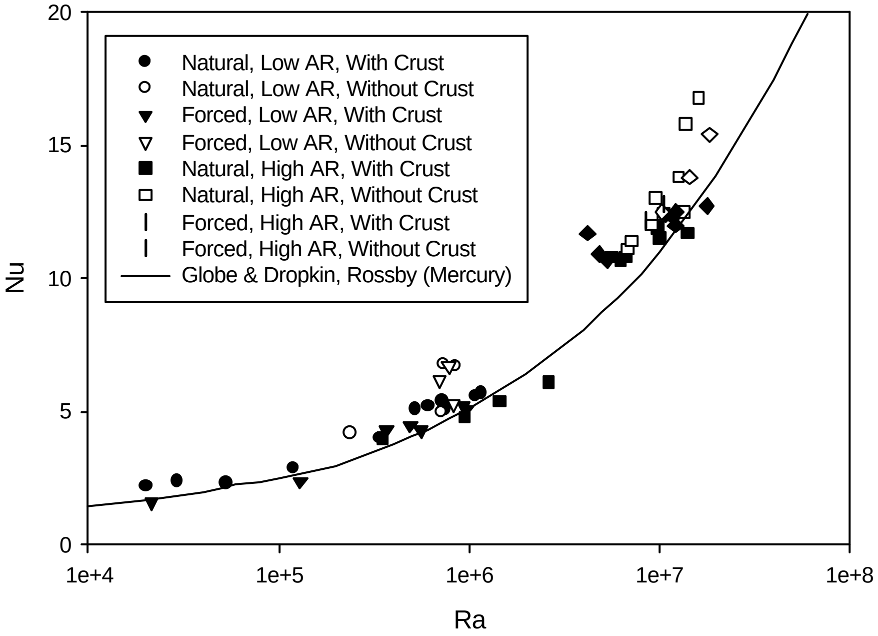

그림 7. 종횡비가 작은 대류 냉각시 용융물의 피막층 형성 유무에 따른 대류냉각 실험결과와 Globe & Dropkin 상관식 비교

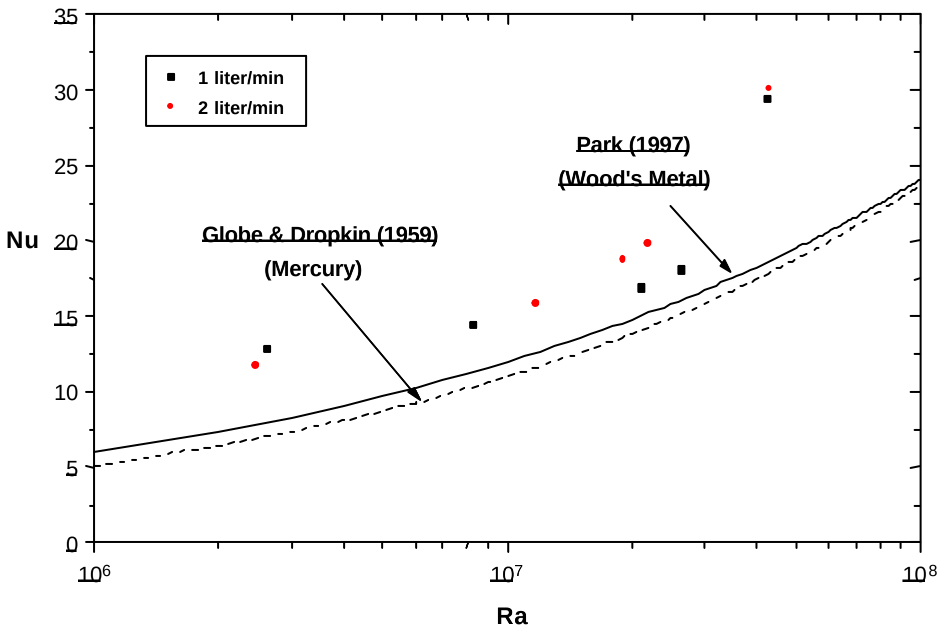

그림 8. 비등냉각 실험결과와 기존 상관식들과의 비교