

고화 피막층 형성이 있는 노심용융물의 자연대류 열전달

박래준, 김상백, 김희동
한국원자력연구소

최상민
한국과학기술원

조재선, 정창현
서울대학교

요약

원전의 중대사고 발생시 형성될수 있는 노심용융물의 고화피막층을 동반하는 용융물의 자연대류 열전달 특성에 대한 실험결과를 정밀 분석하고, 이에 대한 해석적 연구를 수행하였다. 본 연구대상 실험은 중횡비가 작은 경우와 큰 경우에 대하여 용융물을 자연대류와 강제대류로서 생각하는 조건에서 경계조건에 따른 용융물의 피막층 두께를 측정하였고, 피막층 주변의 열전달량을 측정, 분석한 것이다. 실험결과를 정밀 분석한 결과, 용융물의 고화 피막층 형성이 용융물의 자연대류 열전달양에 많은 영향을 미쳤으며, 중횡비가 큰 경우는 냉각 조건도 자연대류 열전달 양에 다소 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 고화층 두께 증가에 따른 중횡비 감소는 자연대류 열전달양 감소율을 작게하는 것으로 나타났다. 피막층 형성이 있는 용융물의 자연대류 열전달 해석 결과, 실험에서의 열손실 때문에 용융물의 고화 피막층 두께가 실험결과보다 다소 작게 나타났으며, 자연대류 열전달 흐름이 피막층 형성에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

1. 개요

원전에서 핵연료가 용융되는 중대사고 발생시 노심용융물은 사고 전개과정에 따라 원자로용기 내부의 노심과 하부 plenum, 원자로용기 외부의 원자로공동(cavity) 등에 존재하여 용융 pool이 형성될 수 있다. 노심용융물 pool을 냉각하기 위하여 냉각수를 주입할 때 용융물과 냉각수 사이의 폭발적 반응(증기폭발: steam explosion)이 발생하지 않는다면 노심용융물은 냉각수와 주변의 구조물과의 열전달로 고화(solidification)되어 pool 외곽에 피막층(crust)이 형성될 수 있다. 이와 같은 용융 pool 경계에서의 피막층은 노심용융물과 냉각수 사이의 열저항(thermal barrier) 역할을 하여 용융물의 냉각을 방해할 수 있으며[1, 2], 노심용융물의 자연대류 열전달에도 많은 영향을 미치게 된다. 따라서 노심용융물의 냉각특성을 정확하게 평가하기 위해서는 용융물과 냉각수의 초기 및 경계조건에 따른 용융물의 피막층 성장 과정과 피막층 형성에 따른 용융물 내부의 자연대류 열전달 특성을 정확하게 규명할 필요가 있다.

금속용융물 내에서 고화현상과 자연대류가 동시에 발생하는 복합 열전달 문제에 대한 연구는 적용범위는 많지만 해석의 복잡성으로 Viskanta[3] 외에는 거의 연구가 수행되지 않아 많은 연구가 필요하다. 상변화인 고화과정이 없는 순수 물질의 자연대류 열전달은 Pr수가 1보다 큰 물질에 대하여 많은 연구가 수행되었다[4, 5]. 이들 연구 결과에 의하면 밀폐된 공간에서 순수 물질의 자연대류 열전달량인 Nu수는 Ra수, Pr수, 중횡비 등의 변화에 따라 변화하며, 특히 Ra수 변화와 밀접한 관계가 있다. 따라서 자연대류 열전달이 발달될 때

Nu수는 Ra수, Pr수, 종횡비의 함수로 나타나며, 일반적으로 Ra수가 증가하고, Pr수가 증가하고, 종횡비가 감소할수록 Nu수는 증가한다고 알려져 있다. Pr수가 1보다 작은 금속용융물의 상변화인 고화과정과 자연대류가 동시에 발생하는 경우에는 고화가 자연대류 열전달량에 많은 영향을 미치며, 자연대류 열전달 형태가 용융물의 고화 과정에도 많은 영향을 미치나 연구가 거의 수행되지 않았다.

원전에서 핵연료가 용융하는 중대사고 발생시 형성될 수 있는 금속용융물층의 냉각수에 의한 냉각특성을 규명하기 위하여 합금용융물 pool을 형성시키고 이를 냉각수의 자연대류와 강제대류를 통하여 냉각·고화되어 피막층을 형성할 때 피막층 형성과정, 피막층 두께, 피막층 주변의 열전달 특성 등을 규명하기 위한 정상상태 실험을 수행하여 그 결과를 발표하였다[6, 7]. 이 실험에서는 용융물층의 깊이를 달리하여 종횡비가 각각 1/6과 4/5인 두 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 고화 피막층 형성이 있는 금속물의 자연대류 열전달 특성을 규명하기 위하여 실험결과를 정밀 분석하여 기존에 개발된 상관식들과 비교·평가하였다. 또한 용융물의 자연대류와 고화 과정에 대한 지배방정식을 설정하고 피막층 형성이 있는 용융물층의 자연대류에 열전달양인 Ra수 변화에 대한 Nu수 변화, 피막층 두께, 온도분포에 대한 실험결과를 검증하고 평가하였다.

2. 실험 결과 및 고찰

본 연구에서 정밀 분석한 실험장치 및 결과는 이미 발표[6, 7]하였으므로 본 항에서는 용융물의 자연대류 측면에서 실험결과를 정밀·분석하였다. 밀폐된 공간에서 자연대류 열전달은 밀도차이에 따른 부력(buoyance force)으로 발생하며 가열방법에 따라 하부가열과 내부발열로 구분할 수 있다. 하부가열 문제인 Rayleigh-Benard 자연대류는 지금까지 많은 실험적 연구가 많이 수행되었다. 이들 대부분의 결과들은 밀폐된 공간에서 상변화는 고려하지 않고 동작유체의 순수 자연대류에 대하여 실험하였으며 다음과 같은 상관식으로 발표되었다.

$$Nu = a Ra^b$$

위 상관식에서 Nu수는 밀폐된 용기 사이의 열전달계수와 깊이로 정의되며 Ra수는 용기 상부와 하부의 온도차이로 정의된다. 상관식에서 a와 b는 각 실험결과에서 정의되는 상수인데 이들에 대해서는 이미 정리하여 발표[7]하였으므로 여기서는 생략한다.

본 연구에서는 피막층 형성이 있는 금속 용융물의 자연대류 열전달 특성을 규명하기 위하여 금속 용융물층의 자연대류 열전달량을 기존에 개발된 상관식들과 비교·분석하였다. 본 비교·분석에서는 용융물 상부에 형성된 피막층의 영향을 평가하기 위하여 피막층의 존재여부에 대하여 구분하여 비교하였으며, 종횡비 영향을 평가하기 위하여 용융물층의 종횡비가 작은 경우와 큰 경우에 대하여 구분하여 비교·분석하였다.

그림 1은 Ra수 증가에 따른 Nu수 변화에 대한 기존의 하부가열 자연대류 열전달 상관식 값들과 종횡비가 작은 경우의 자연대류 냉각에 대한 비교 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 Ra수가 증가함에 따라 Nu수가 증가하는 것으로 나타났으며, Pr수가 1보다 작은 금속용융물을 사용한 Globe와 Dropkin[8] 및 Rossby 상관식[9] 값들이 비금속물질을 사용하여 개발한 상관식 값들보다 다소 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 Pr수가 0.017인 저온용융 금속을 사용한 본 실험결과는 Pr수가 0.024인 수은을 사용한

Globe와 Dropkin 및 Rossby 상관식과 비슷하게 나타나고 있다. 그러나 정밀하게 비교하면 현재의 실험결과가 Globe와 Dropkin 및 Rossby 상관식 값들보다 피막층이 형성된 경우는 약 20 %, 형성되지 않는 경우는 약 30 % 높게 나타나고 있다. 그림 2는 강제대류 냉각에 대한 비교 결과를 보여주고 있는데 실험결과는 Globe와 Dropkin 및 Rossby 상관식 값들과 비슷하게 나타나고 있으며, 정밀하게 비교하면 피막층이 형성된 경우는 약 21 %, 피막층이 형성되지 않은 경우는 약 31 % 높게 나타나고 있다. 따라서 피막층이 형성된 경우는 피막층이 열저항 역할을 하기 때문에 피막층이 형성되지 않은 결과보다 열전달량이 작게 나타났으며, 자연대류와 강제대류 냉각 때의 열전달량은 큰차이를 보이지 않았다.

그림 3은 종횡비가 큰 경우의 자연대류 냉각에 대한 비교 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 현재의 실험결과는 Globe와 Dropkin 및 Rossby 상관 관계식 값들과 비슷하게 나타나고 있으며, 정밀하게 비교하면 피막층이 형성된 경우는 약 8 % 높게 나타나고 피막층이 형성되지 않는 경우는 약 15 % 높게 나타나고 있다. 종횡비가 작은 경우인 그림 1과 비교하면 종횡비가 큰 경우의 Nu수가 종횡비가 작은 경우보다 다소 Globe와 Dropkin 및 Rossby 상관식 값들에 더 비슷하게 나타났다. 그림 4는 강제대류 냉각에 대한 비교 결과를 보여주고 있는데 피막층이 형성된 경우는 약 11 % 높게 나타났으며, 피막층이 형성되지 않은 경우는 약 17 % 높게 나타나 피막층의 열저항 역할을 확인할 수 있다. 또한 종횡비가 작은 경우는 강제대류와 자연대류 냉각차이가 거의 나타나지 않았으나 종횡비가 큰 경우는 Ra수가 크기 때문에 차이가 다소 크게 나타났다. 그림 1에서 4에서 보는 바와 같이 본 실험결과는 Globe와 Dropkin 상관식 값들과 비슷하게 나타났으며, 종횡비가 큰 경우가 종횡비가 작은 경우보다 더 비슷하게 나타났다. 이는 용융물층의 종횡비가 자연대류 열전달량에 영향을 미쳤기 때문이다. 즉, 종횡비가 작은 경우가 종횡비가 큰 경우보다 자연대류 열전달량에 영향을 더 많이 주어 Nu수가 크게 나타났다.

3. 해석 결과 및 고찰

본 연구에서는 실험결과를 검증하고 분석하기 위한 해석적 연구를 수행하였다. 본 연구에서 사용한 기본 방정식은 연속 방정식, 운동량 방정식, 에너지 보존 방정식에 기초하여 유한차분법을 이용하여 풀이하였으며, 상변화는 엔탈피 방정식을 이용하여 해석하였다. 기본적인 방정식과 해석과정은 참고문헌 [10]에 상세히 나타나 있다. 본 연구에서는 종횡비가 작은 경우와 종횡비가 큰 경우에 대하여 하부 설정온도가 80 °C와 75 °C 인 경우에 대하여 각각 해석을 수행하여 실험결과와 비교 분석하였다. 그림 5는 종횡비가 작은 경우에 용융물 하부 설정온도가 80 °C, 냉각수 상부 설정온도가 40 °C인 경우에 대한 용융물층의 온도분포, 속도분포, 고화층 두께에 대한 해석결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 용융물층과 냉각수층에는 Rayleigh-Benard 자연대류 열전달 흐름이 나타났으며, 이와 같은 흐름이 용융물의 온도분포 및 피막층 두께변화에 많은 영향을 미쳤다. 즉, 상향류 흐름이 나타난 지역의 피막층 두께가 작게 나타났고, 하향류 흐름이 나타난 지역의 피막층 두께가 크게 나타났다. 표 1은 종횡비가 작은 경우에 대한 실험결과와 해석결과를 비교하여 보여주고 있다. 표에서 보는 바와 같이 실험결과는 실험수행중 약 10 %의 열손실이 있었기 때문에 해석결과보다 피막층 두께가 크게 나타났다. 이에 따라 해석결과는 용융물 높이로 정의되는 Ra수와 Nu수가 크게 나타났다. 표 2는 종횡비가 큰 경우에 대한 비교결과를 보여주고 있는데 종횡비가 작은 경우와 비슷한 경향을 보여주고 있다.

그림 6과 7은 중형비가 작고 큰 경우에 대하여 용융물층의 온도변화에 대한 실험결과와 해석결과를 비교하여 보여주고 있다. 실험에서 약 10 % 열손실 때문에 피막층 두께에 대한 실험값이 해석값보다 더 크게 나타났기 때문에 그림에서 보는 바와 같이 해석결과가 실험결과보다 조금 높게 나타나고 있다.

4. 결론

고화 피막층 형성이 있는 용융물의 자연대류 열전달 특성을 규명하기 위하여 실험결과를 정밀 분석하였으며, 피막층 형성이 있는 용융물의 자연대류에 대한 해석적 연구를 수행하여 실험결과를 검증하고 평가한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 금속용융물의 Ra수에 대한 자연대류 열전달량인 Nu수 변화에 대한 실험결과는 비금속 유체를 사용한 결과들에 비해 낮게 나타났으며, Globe와 Dropkin 상관식 값들과 거의 일치하였다. 또한 피막층이 형성된 경우의 Nu수가 피막층이 형성되지 않은 경우의 Nu수보다 작게 나타나 피막층의 열저항 역할을 확인하였다.
- 중형비가 작은 경우가 중형비가 큰 경우보다 Ra수 변화에 대한 Nu수가 크게 나타났으며, 중형비가 큰 경우는 강제대류 냉각때의 자연대류 열전달량이 자연대류 냉각 때의 열전달량보다 조금 작게 나타났다.
- 피막층 형성이 있는 용융물의 자연대류에 대한 해석적 연구를 수행한 결과 피막층 두께, 용융물의 온도분포, Ra수 변화에 대한 Nu수 등은 실험결과와 조금 차이를 보여 주었다.
- 금속 용융물의 고화를 동반하는 자연대류 열전달을 모의할 때는 고화 피막층 두께가 변화할 때 용융물층의 중형비가 변화하기 때문에 중형비를 고려한 상관식을 사용해야 한다. 따라서 중형비를 고려한 자연대류 열전달 상관식 개발이 필요함을 밝혔다.

참고문헌

1. M. 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. C. Beckermann, R. Viskanta, "Effect of Solid Subcooling on Natural Convection Melting of a Pure Metal," J. of Heat Transfer, Vol. 111, pp. 416-424, 1989
4. 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
5. M. Keyhani et al., "The Aspect Ratio Effect on Natural Convection in an Enclosure with Protruding Heat Sources, J. of Heat Transfer, Vol. 113, pp. 883 - 891, 1991
6. R. J. Park, S. J. Lee, S. K. Sim, and K. J. Yoo, "Crust Formation and Its Effect on the Molten Pool Coolability," Proc. of the 7th Int. Mtg. NURETH7, NUREG/CP-0142, Vol. 3, pp. 1863-1880, Saratoga Springs, New York, Sept. 10-15, 1995
7. R. J. Park, S. B. Kim, H. D. Kim, and S. M. Choi, "Crust Formation and Its Effect on Heat Transfer in the Molten Metal Pool," ARS 1997 Int. Meeting, Orlando, Florida, June 1-4, 1997
8. S. Globe and D. Dropkin, "Natural Convection Heat Transfer in Liquid Confined by Two Horizontal Plates and Heated From Below," J. of Heat Transfer, Vol. 97, pp. 24-30, 1975
9. H. T. Rossby, "A Study of Benard Convection with and without rotation," J. of Fluid Mech., Vol. 36, pp. 309-335, 1969
10. J. S. Cho, C. H. Cheung, R. J. Park, and S. B. Kim, "Heat Transfer and Solidification of the Molten Metal with Overlying Coolant," ANS 1997 Annual Meeting, Orlando, Florida, June 1-5, 1997

표 1. 중형비가 작은 경우의 열전달양에 대한 실험결과와 해석결과의 비교

Bottom Surface	Top Surface	Heat Flux (W/m ²)		Rayleigh Number		Nusselt Number		Crust Thickness (cm)	
		Exp. Data	Analytical Results	Exp. Data	Analytical Results	Exp. Data	Analytical Results	Exp. Data	Analytical Results
Temp. (°C)	Temp. (°C)								
80	50	1.08E4	8.86E3	1.20E5	1.76E5	2.9	2.7	2.38	1.70
80	40	1.12E4	8.99E3	5.29E4	8.53E4	2.3	2.2	3.61	2.94
80	30	1.43E4	9.41E3	2.95E4	6.57E4	2.4	2.1	4.30	3.32
80	25	1.50E4	1.00E4	2.01E4	4.90E4	2.2	2.0	4.68	3.71

표 2. 중형비가 큰 경우의 열전달양에 대한 실험결과와 해석결과의 비교

Bottom Surface	Top Surface	Heat Flux (W/m ²)		Rayleigh Number		Nusselt Number		Crust Thickness (cm)	
		Exp. Data	Analytical Results	Exp. Data	Analytical Results	Exp. Data	Analytical Results	Exp. Data	Analytical Results
Temp. (°C)	Temp. (°C)								
75	50	3.32E3	3.36E3	1.44E6	2.32E6	5.4	6.7	4.74	2.72
75	40	3.49E3	3.76E3	9.52E5	1.81E6	4.8	6.4	7.16	4.09
75	30	4.08E3	4.18E3	3.52E5	7.67E5	4.0	5.3	10.78	8.06

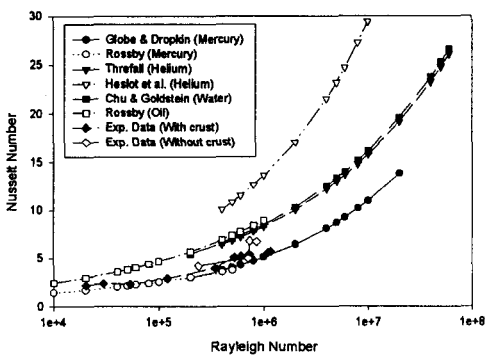


그림 1. 실험결과와 기존 상관식과의 비교
(작은 중형비 및 자연대류 냉각)

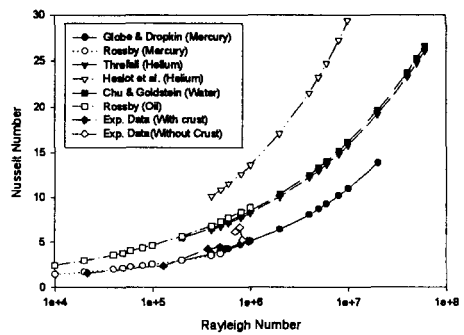


그림 2. 실험결과와 기존 상관식과의 비교
(작은 중형비 및 강제대류 냉각)

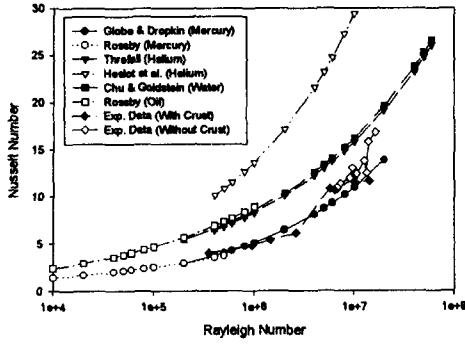


그림 3. 실험결과와 기존 상관식과의 비교
(큰 종횡비 및 자연대류 냉각)

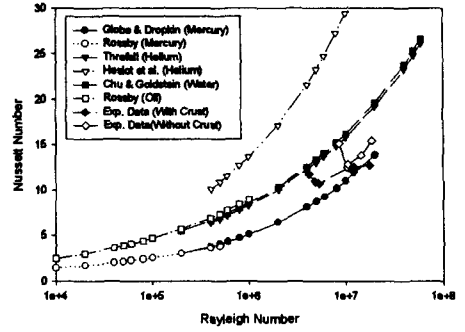


그림 4. 실험결과와 기존 상관식과의 비교
(큰 종횡비 및 강제대류 냉각)

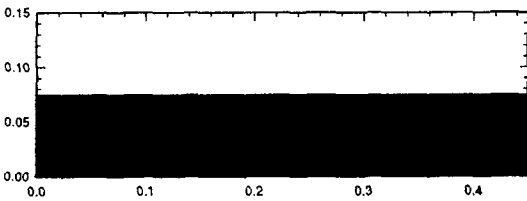
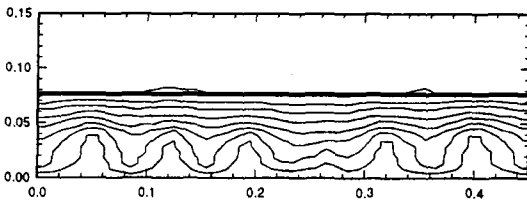
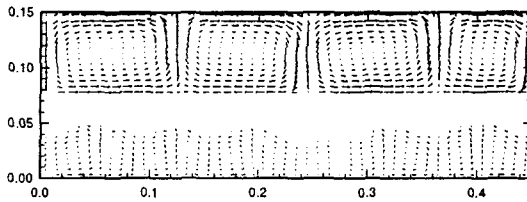


그림 5. 실험용기 내의 온도분포, 속도 분포,
피막층 두께에 대한 해석 결과

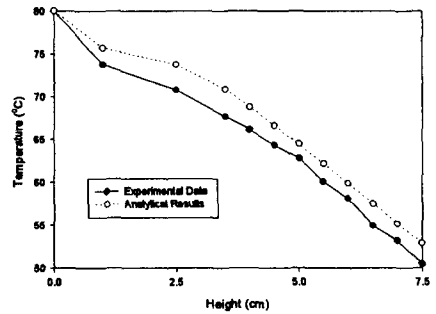


그림 6. 용융물의 온도 분포에 대한 실험
결과와 해석 결과의 비교
(작은 종횡비 및 자연대류 냉각)

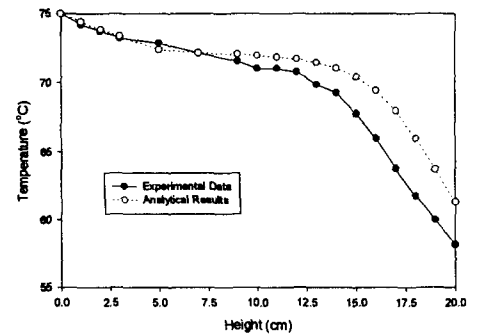


그림 7. 용융물의 온도 분포에 대한 실험
결과와 해석 결과의 비교
(큰 종횡비 및 자연대류 냉각)