

## 2상 유동 풀에 낙하하는 고온 구형체의 막비등 열전달

김기용\* · 방광현\*\*

Film Boiling Heat Transfer from a Hot Sphere Falling in Two-phase Pool

Ki-Yong Kim, Kwang-Hyun Bang

### Abstract

The purpose of the present study is to experimentally investigate film boiling heat transfer from a hot sphere in steam-water two-phase pool. To measure film boiling heat transfer coefficients on a sphere falling in two-phase pool, a heated sphere with a thermocouple embedded at the center is dropped in a vertical tube filled with steam-water mixture. The ranges of the experimental conditions are: sphere fall speed 0.1~0.5 m/s, average void fraction 0~25%, steam superficial velocity 0~0.25 m/s, and sphere temperature 500~700°C. The results showed that the forced convection film boiling heat transfer coefficient of the falling sphere increases as the fall speed increases. Also, it appeared that the void fraction in the pool up to 25% did not alter significantly the single phase data.

### 1. 서론

막비등(film boiling)은 액상과 고온의 표면의 온도차가 매우 클 경우 주로 작용하는 열전달 현상으로 극저온 공학, 금속공학, 등의 분야에서 주로 관여되는 열전달 모드이다. 또한 이러한 막비등 열전달은 원자로 중대사고(냉각제 상실사고와 긴급냉각수주입 실패) 시 고온의 용융물과 냉각수 반응 현상에서 주요 관심 현상<sup>(1)</sup>이다.

구형체 형상의 막비등 열전달은 단상유동 및 강제대류비등에 대하여 대부분의 연구가 진행되어 왔다. 열전달을 삼입한 구를 사용하여 Fedderking<sup>(2)</sup>과 Dhir<sup>(3)</sup>에 의하여 실험적 연구가 수행되었다. 가열된 구를 포화 또는 과냉각 액체풀에 낙하시켜 구의 온도변화율로부터 열전달율을 추론하였다. 구형체의 막비등 열전달에 대한 모델은 구 주위의 증기영역에서 속도 및 온도장을 해석하는 것으로 Epstein<sup>(4)</sup>과 Bang<sup>(5)</sup> 등에 의해 제안되었다. 2상유동 하에서의 구의 막비등에 대한 연구는

\* 한국해양대학교 대학원

\*\* 한국해양대학교 기계공학부 조교수

매우 드물며 최근에 Liu-Theofanous<sup>(6,7)</sup> 연구팀에서 2상유동 막비등 열전달 실험과 이론적 고찰이 시도되었고, 구형체에 대한 실험적 상관식과 이론적 모델을 제안하였다. 데이터는 주로 상향 기포류(upward bubbly flow)와 하향 액적류(downward droplet flow)에 대한 것이다. 포화 냉각수, 상향 기포류에 대한 Liu-Theofanous의 상관식은 아래 식(1)과 같다.

$$Nu(= \frac{hd}{k_v}) = 12.5 Re_l^{0.2} \left( \frac{\mu_l}{\mu_v} \right) \left( \frac{KR^A}{S_p} \right)^{1/4} \dots\dots\dots (1)$$

$$U_l = \frac{V_l}{1-\alpha} \quad Re_l = \frac{\rho_l U_l d}{\mu_l}$$

$$K = \frac{\rho_l}{\rho_v} \quad R = \left( \frac{\mu_v \rho_v}{\mu_l \rho_l} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

$$S_p = \frac{c_{pv} \Delta T_{sp}}{h_{fg} Pr_v}$$

여기서,  $V_l$  은 액상의 겉보기 속도이다. 이 상관식에서는 기공율의 영향이 액상 겉보기 속도에 의하여 액상속도  $U_l$  에 나타난다. 그러나, 이 식에서 구가 2상 유동장에 낙하되어지는 경우는 기공율의 영향은 액상속도  $U_l$ 이 구의 낙하속도와 같기 때문에 설명할 수가 없다. Fig. 1은 Liu-Theofanous<sup>(6)</sup> 상관식과 Dhir-Purohit<sup>(3)</sup> 상관식 및 Aziz<sup>(8)</sup> 실험값을 비교한 것이다. 이것은 100℃ 포화수에서 500℃의 온도, 22 mm 직경을 가진 구의 비교를 나타내고 있다. Fig. 1에서 보여지고 있는 것처럼, Dhir-Purohit 상관식은 Liu-Theofanous 상관식보다 3배 정도 높은 열전달계수를 보여주고 있다. 이 두 상관식은 정지된 구 위로 물을 흘려 측정된 데이터를 사용해서 만든 것이다. Liu-Theofanous 상관식은 단상과 2상 유동에서 막비등 열전달계수가 유사함을 보이고 있다.

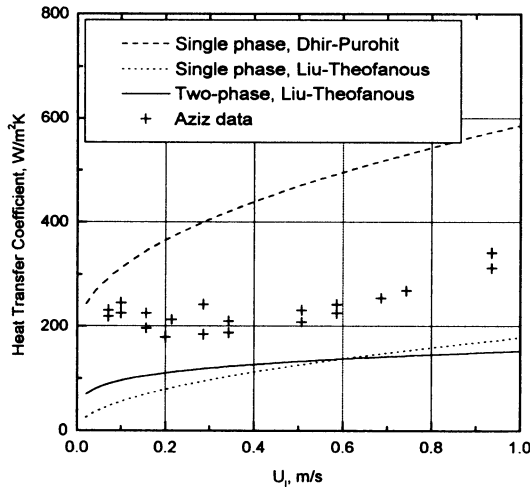


Fig. 1. Comparison of film boiling heat transfer correlations

본 연구는 물-수증기의 2상 유동 풀에 고온의 구를 낙하시켜 막비등 열전달계수를 측정하고자 하는 새로운 실험방법이다. 정지상태의 구에 유체를 흘려보내는 기존의 실험방법과는 달리 2상 유동장에 직접 고온의 구를 낙하시키는 방법으로서, 실제 고온의 구가 낙하하는 동안의 열전달량을 측정하고자 하였다.

## 2. 실험

막비등 열전달계수의 측정은 시험부 구를 전기로(furnace)에서 미리 가열한 후 물-수증기로 혼합된 수직관 내에 낙하시키면서 구 중심부에 설치된 열전대로 중심온도를 측정하는 방법을 이용하였다. 수직관 바닥에 전기히터를 설치하여 증기를 만들어 2상 유동장을 형성하였다. 이러한 방법은 물과 별도로 준비한 수증기를 혼합하는 방법보다 증기의 중간 손실이 없기 때문에 증기 유동량을 정확히 예측할 수 있는 장점이 있다. 열전달계수는 구의 중심부의 온도를 시간에 대하여 측정하여 구의 1차원 열전도 해석으로 산출하였다.

### 2.1 실험장치

실험장치는 크게 전기가열로, 수직관, 실험구, 및 데이터 취득장치(Data acquisition system)로 구성된다. 실험장치의 개략도는 Fig. 2와 같다. 전기가열로는 1 kW 용량의 실린더형 복사열 방식 히터로, 열전대 및 온도조절기 사용으로 최대 1,000°C까지 가열할 수 있다. 고온의 경우 실험부 가

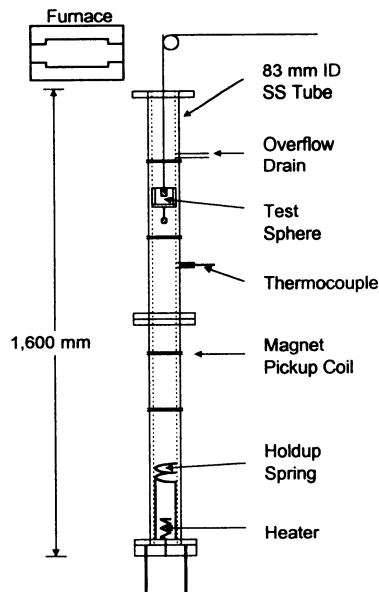


Fig. 2. Experimental apparatus

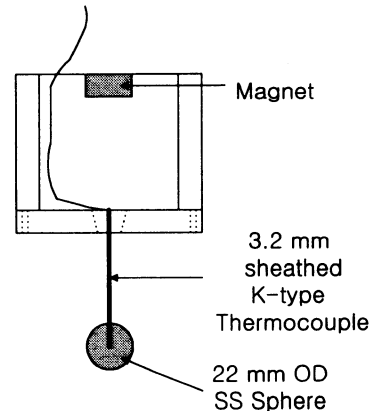


Fig. 3. Test sphere assembly

열시 구형체 표면의 부식을 최소화하기 위하여 전기로 측면에서 아르곤 가스를 주입할 수 있도록 하였다. 이 전기가열로에서 실험구는 원하는 초기 온도까지 가열된다.

수직관은 물-수증기 2상유동장을 형성하여 실험구가 낙하하는 부분으로 내경 83 mm 스테인레스 관으로 제작하였으며, 800 mm 길이 두 개를 플랜지로 연결하여 전체 길이는 1,600 mm이다. 수직관 하부 플랜지에는 물 가열 및 수증기 발생을 위해 2 kW 용량의 전기히터를 설치하였다. 그리고 수직관의 열손실을 최소화하기 위하여 유리섬유로 단열을 하였다. 또한 수직관 바닥에 실험구가 낙하시 안전하게 정지하도록 스프링을 설치하였다. 수직관 상부에서 200 mm 지점에 수증기 발생에 따른 배수관을 설치하였으며, 이 위치가 폴의 수면이 된다. 물의 온도는 수직관 중간부분에서 T-type 열전대를 설치하여 측정, 조절하였다. 수직관 내에서 실험구 낙하시 실험구의 낙하속도를 측정하기 위하여 수직관 외부 4 지점에 wire coil을 설치하였으며, 실험구에 부착된 영구자석이 이 4개의 coil 들을 각각 통과할 때 생기는 전기신호를 증폭, 측정함으로써 실험구의 속도를 산출하였다. Coil의 설치 간격은 폴 수면에서부터 각각 300, 400, 200 mm이다.

실험구는 직경 22 mm, SS 304 구를 중심까지 정확히 드릴링하여 외경 3.2 mm 스테인레스 관으로 피복된 K-type 열전대를 삽입하고 고온용 시멘트를 사용하여 밀봉하였으며, 이 열전대로 구의 중심부 온도를 측정하였다. Fig. 3은 실험구의 개략도이다. 열전대가 장착된 구는 외경 80mm 실린더 모양의 지지대에 부착하여 수직관 내부에서 수직 강하하기 용이하도록 하였으며, 낙하속도를 측정하기 위하여 영구자석을 부착하였다. 이 영구자석은 관이 스테인레스이어서 자장을 차단하지 않으므로 수직관 외부에 설치된 wire coil을 지날 때 전기신호를 발생시킨다. 한편, 실험구의 낙하속도는 지지대에 줄을 묶어서 도르레를 이용하여 다른 쪽 끝의 무게의 변화에 따라 자유낙하를 시키는 방법으로 속도를 조절하였다.

Wire coil의 전기신호와 2개의 열전대 시그널은 Keithley사 System 500과 PC 및 Labtect사의 NOTEBOOK.pro 소프트웨어를 이용하여 취득, 저장되었다. 증기 발생용 히터의 전력은 변압기를 이용하여 조정하였으며, 디지털 전력계를 사용하여 전력량을 측정하였다. 수직관내 2상 유동의 기공율은 수증기 발생으로 인해 수직관에서 넘치는 물량을 측정하여 평균기공율로 하는 것과 전기저항센서를 사용하여 국부 기공율을 측정하는 두가지 방법으로 측정하여 비교하였다.

## 2.2 실험데이터 처리

실험부로부터의 열손실은 히터의 전력을 미세 조정하면서 물의 온도가 비등온도에서 감소하지 않으면서 증기도 발생하지 않는 전력량( $Q_{loss}$ )으로 측정하였으며, 이렇게 측정한 열손실은 1% 이내 오차의 정확도를 보였다. 따라서 증기 발생량과 증기 걸보기 속도는 식(3)과 식(4)에 의해 구하였다.

$$\dot{m} = (Q_{heater} - Q_{loss}) / h_{fg} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$V_s = \dot{m}_s / \rho_s A_c \quad \dots\dots\dots (4)$$

수직관내 실험구의 낙하속도는 자기장 pickup coil 시그널을 분석함으로써 얻을 수 있다. 시그널은 영구자석이 coil을 통과할 때마다 사인함수 모양의 파형이 형성되며, 파형의 부호가 변화 할 때

가 영구자석이 coil을 통과할 때이다. 인접 coil간의 거리를 알고, 영구자석의 통과 시간을 측정할 수 있으므로 낙하속도가 계산되어 진다.

열전달계수는 열전대로 구의 중심부 온도를 측정하여 산출하였다. 구 내에서의 온도 분포는 1차원 천이 전도열전달로 가정할 경우 다음의 식에 의해 지배된다.

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \dots\dots\dots (5)$$

이 식의 무차원 온도의 해는 무차원 변수 Biot 수와 Fourier 수로 표시된다.

$$\theta = \frac{T - T_w}{T_i - T_w} = f(\eta, Bi, Fo) \dots\dots\dots (6)$$

$$\eta = \frac{r}{R}, \quad Bi = \frac{hR}{k}, \quad Fo = \frac{at}{R^2}$$

측정된 실험구 중심온도 및 시간을 무차원 온도  $\theta_0$  및 Fo 수로 계산하여 이 값을 만족하는 Bi 수를 찾으면 낙하동안의 평균 열전달계수를 구할 수 있다.

$$h = kBi/R \dots\dots\dots (7)$$

이 과정의 전도방정식의 해는 Mills<sup>(9)</sup>의 계산 프로그램을 이용하였다.

### 3. 실험결과 및 검토

실험의 열전달계수 측정 방법의 타당성을 검토하기 위해 우선 구의 자연대류 조건에 대한 실험을 수행하였다. 상온 상태의 구를 항온수조 내 일정한 온도(80℃)의 물에 순간적으로 담그고 그

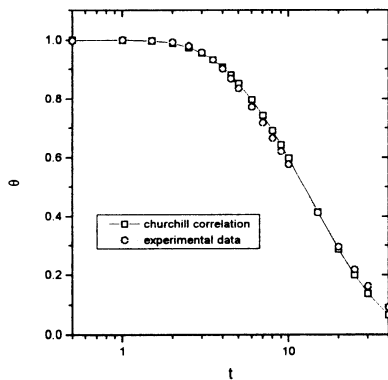


Fig. 4. Benchmark of heat transfer coefficient measurement (natural convection)

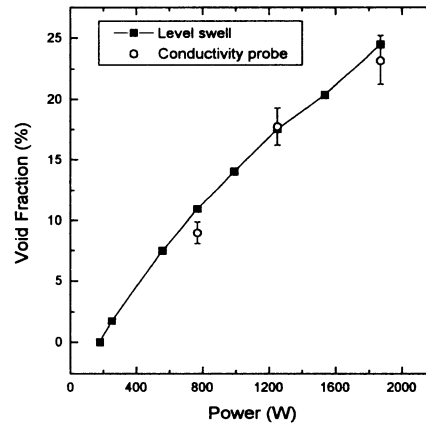


Fig. 5. Average void fraction

안에서 움직임 없는 상태를 유지하였다. 그리고 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 측정된 구의 중심 온도와 구 주위의 자연대류에 대한 Churchill의 상관식<sup>(9)</sup>을 이용하여 계산한 구 중심온도를 비교한 결과 측정치와 예측치가 잘 일치함을 보여주고 있다. 따라서 이는 본 실험 방법으로 구의 열전달 계수를 측정하는 것이 적절하다는 것을 보여주고 있다.

증기 발생량은 전력량으로부터 예측하였고, 여기서 측정한 열손실량은 178 W 이었다. 전력량에 따른 증기 발생량으로 구한 평균 기공율 Fig. 5와 같다. 본 실험에서 최대 기공율은 25%, 최대 증기 걸보기 속도는 0.23 m/s 이다. 따라서 기공율로 볼 때 유동장은 기포류(bubbly flow) 영역이라고 볼 수 있다. 또한 국소 기공율을 전기저항센서를 이용하여 측정하였으며, 전력량으로 구한 평균 기공율과 국소 기공율의 비교를 Fig. 5에 보여주고 있으며, 이 값들이 잘 일치함을 볼 수 있다.

전기저항센서의 시그널을 이용하여 가장 큰 기포 크기를 추정해 볼 수 있다. 기포가 probe를 통과하는 가장 긴 시간은 0.08 s 이고, 이것은 다른 기공율에서도 일정하였다. 정체된 액체 내에서 기포의 최종 속도를 식<sup>(8)</sup>의 방정식에 의하여 추정해 볼 수 있다.<sup>(11)</sup>

$$V_{\infty} = 1.53 \left( \frac{g\sigma}{\rho_f} \right)^{0.25} \dots\dots\dots (8)$$

물 속에서  $V_{\infty} \sim 0.24$  m/s의 증기 기포에 대하여, 가장 큰 기포의 직경은 20mm 정도로 예측되었다.

구의 낙하속도 측정을 위한 pickup coil 시그널은 Fig. 6에 도시한 바와 같다. 네 개의 코일을 통과하기 때문에 신호는 4개의 파형을 가진다. 첫 번째 파형은 증기-물 유동장 내로 들어가는 구의 시간이며, 마지막 파형은 구가 완충스프링을 치기 바로 직전의 시간이다. 이러한 파형 신호들을 이용하여 구의 낙하속도를 계산하였다. 구의 낙하속도는 초기에 만 조금 빠르고 나머지 구간에서는 거의 일정함을 보였다. 본 실험에서 구의 낙하속도의 범위는 0.1~0.5 m/s이다.

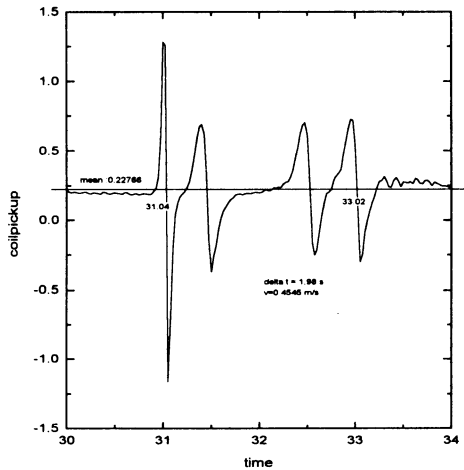


Fig. 6. Coil pickup signal for measuring sphere falling speed

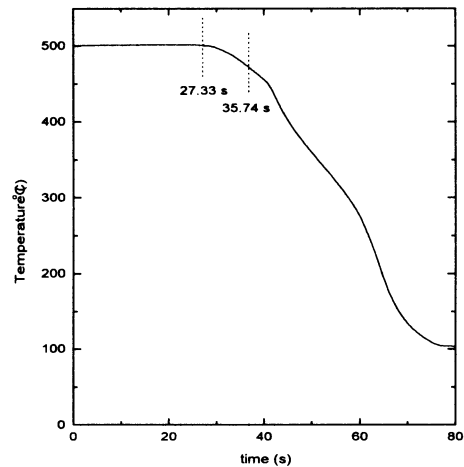


Fig. 7. Illustration of sphere center temperature trace during the fall

실험에서 측정된 구의 중심온도의 변화는 Fig. 7과 같은 모양을 나타내고, 첫 번째와 마지막 pickup coil을 통과하는 구의 위치도 함께 표시하고 있다. 이 시간 동안 비등 모드는 강제대류 막비등 상태이고, 마지막 코일 신호 후의 모드는 구가 하부의 스프링 위에 정지되어 있는 풀비등 상태이다. 구의 속도와 기공율을 변화시킨 각각의 실험에서 얻은 온도 곡선을 구가 낙하하는 시간동안에 대해 분석하여 강제대류 막비등 열전달 계수를 구하였다.

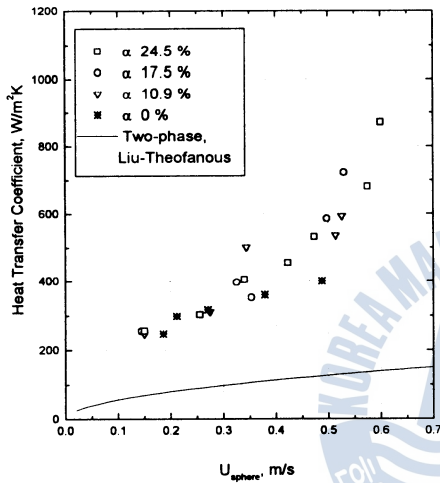


Fig. 8. Heat transfer coefficient vs. sphere velocity ( $T_i = 500^\circ\text{C}$ )

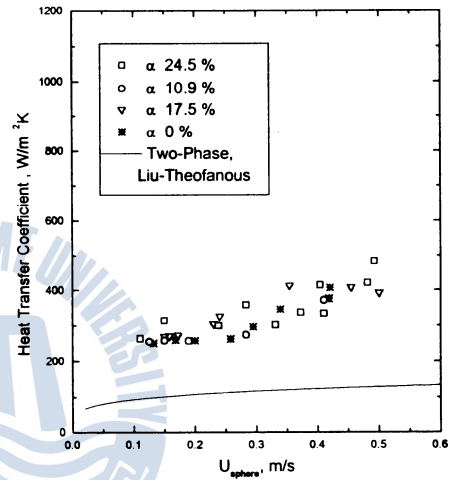


Fig. 9. Heat transfer coefficient vs. sphere velocity ( $T_i = 700^\circ\text{C}$ )

Fig. 8과 Fig. 9는 여러 가지 기공율에서의 막비등 열전달계수의 변화를 구의 초기온도  $500^\circ\text{C}$ 와  $700^\circ\text{C}$ 의 경우에 대해 보이고 있다. 구의 속도가 클수록 열전달계수가 증가하는 경향을 보여주고 있으며, 이는 다른 상관식과 동일한 경향이다. 풀의 기공율에 따른 막비등 열전달계수의 변화는 본 실험의 실험 범위 내에서는 거의 없는 것으로 보이고 있다. 한편, Liu-Theofanous의 상관식과 비교해 볼 때 열전달계수의 차가 매우 큼을 볼 수 있다.

Fig. 1에서 볼 수 있듯이 Liu-Theofanous 상관식은 Dhir-Purohit 상관식보다 낮게 예측하고 있으며, 본 연구의 실험 결과는 Dhir-Purohit 상관식에 더 접근하고 있다. Liu-Theofanous는 정지한 구에 유체를 흘려보내 측정된 것이고, 본 연구는 2상유동 풀에 구를 낙하시켜 측정된 것으로 써, 기공율은 막비등 열전달계수에 큰 영향을 주지 않고, 속도의 변화는 큰 영향을 주는 것으로 보여진다. 상관식 간의 또는 실험데이터와의 이러한 차이는 주로 실험 방법의 차이에 기인한 오차로 볼 수 있으며, 특히 열전달계수를 구의 내부 온도를 측정된 후 역 열전달 해법에 의해 구하는 방법에 있어 실제 구형체 막비등 열전달은 유동 후단의 wake 발생으로 1차원적인 처리가 정확하지는 않다고 볼 수 있다. 따라서 보다 정확한 열전달계수를 측정하기 위해서는 이러한 오차 요인이 없는 새로운 측정기법의 개발이 요구되고 있다.

## 4. 결론

본 연구의 목적은 물-수증기 2상 유동장에서 고온의 구를 낙하시켜 막비등 열전달에 관하여 실험적으로 연구하는 것이다. 2상 유동장에서 낙하하는 구의 막비등 열전달계수를 측정하기 위해서 중심부에 열전대를 삽입한 가열된 구를 물과 증기가 혼합된 수직관 내부로 낙하시켰다. 선행 연구자들이 주로 정지된 구에 유체를 흘러보내는 방법으로 실험을 수행한 반면에 본 연구는 가열된 구를 만들어 낙하시키는 방법으로써 유일한 것이다.

구의 낙하속도는 수직관에 분포되어 있는 pickup coil과 영구자석을 사용하여 측정하였다. 실험 조건의 범위는 구 낙하속도 0.1~0.5 m/s, 평균기공율 0~25 %, 겉보기 증기속도 0~0.25 m/s, 구 온도 500~700℃이다. 막비등 열전달계수는 구의 낙하속도 증가에 따라 증가하였으며, 25% 정도의 기공율은 단상인 물의 경우에 비해 막비등 열전달계수를 크게 변화시키지 않음을 보였다.

### 후기

본 연구는 '97 과학기술부 원자력기초연구사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

1. Bang, K. H. Park, I. G., and Park, G. C., 1997, "TRACER-II: A Complete Computational Model for Mixing and Propagation of Vapor Explosions," Proc. of OECD/CSNI FCI Specialists Mtg., Tokai-Mura, Japan, pp. 804-816, May.
2. Frederking, T. H. K., and Clark, J. A., 1963, "Natural Convection Film Boiling on a Sphere," Adv. Cryog. Eng., Vol. 8, pp. 501-506.
3. Dhir, V. K., and Purohit, G. P., 1978, "Subcooled Film Boiling Heat Transfer from Spheres," Nucl. Eng. Design, Vol. 47, pp. 49-66.
4. Epstein, M., and Hauser, G. M., 1980, "Subcooled Forced Convection Film Boiling in the Forward Stagnation Region of a Sphere or Cylinder," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 23, pp. 197~189.
5. Bang, K. H., 1994, "Numerical Prediction of Forced Convection Film Boiling Heat Transfer From a Sphere," Int. J. Heat & Mass Transfer, Vol. 37, pp. 2415~2424.
6. Liu, C. and Theofanous, T. G., 1995, "Film Boiling on Spheres in Single and Two-phase Flows, Part I: Experimental Studies," ANS Proceedings, National Heat Transfer Conf., Portland, August, pp. 34~47.



7. Liu, C. and Theofanous, T. G., 1995, "Film Boiling on Spheres in Single and Two-phase Flows, Part II: A Theoretical Study," ANS Proceedings, National Heat Transfer Conf., Portland, August, pp. 48~61.
8. Aziz, S., 1989, "Forced Convection Film Boiling on Sphere," Ph.D Thesis, University of Oxford.
9. Mills, A. F., 1992, *Heat Transfer*, Irwin.
10. Incropera, F. P., and DeWitt, D. P. 1996, *Introduction to Heat Transfer*, 3rd ed., Wiley
11. Wallis, G. B., 1969, *One-dimensional Two-phase Flow*, McGraw-Hill.



