

고온 시편의 급랭 시 산화철 나노유체가 최소막비등점에 미치는 영향에 대한 실험적 연구

정찬석* · 황경섭** · 이치영***†

Experimental Study on Effect of Water-based Iron(III) Oxide Nanofluid on Minimum Film Boiling Point During Quenching of Highly Heated Test Specimen

Chan Seok Jeong* · Gyeong Seop Hwang** · Chi Young Lee***†

†Corresponding Author

Chi Young Lee
Tel : +82-51-629-6493
E-mail : cylee@pknu.ac.kr

Received : July 14, 2020
Revised : August 20, 2020
Accepted : August 21, 2020

Copyright©2020 by The Korean Society of Safety All right reserved.

Abstract : In the present experimental study, the effect of water-based iron(III) oxide nanofluid on the MFB(Minimum Film Boiling) point during quenching was investigated. As the highly heated test specimen, the cylindrical stainless steel rod was used, and as the test fluids, the water-based iron(III) oxide nanofluids of 0.001 and 0.01 vol% concentrations were prepared with the pure water. To examine the effect of location in the test specimen, the thermocouples were installed at the bottom and middle of wall, and center in the test specimen. Through a series of experiments, the experimental data about the influences of nanofluid concentrations, the number of repeated experiments, and locations in the test specimen on the reaching time to MFB point, MFBT(Minimum Film Boiling Temperature), and MHF(Minimum Heat Flux) were obtained. As a result, with increasing the concentration of nanofluid and the number of repeated experiments, the reaching time to MFB point was reduced, but the MFBT and MHF were increased. In addition, it was found that the effect of water-based iron(III) oxide nanofluid on the MFB point at the bottom of wall in the test specimen was observed to be greater than that at the middle of wall and center. In the present experimental ranges, as compared with the pure water, the water-based iron(III) oxide nanofluid showed that the maximum reduction of reaching time to MFB point was about 53.6%, and the maximum enhancements of MFBT and MHF were about 31.1% and 73.4%, respectively.

Key Words : iron(III) oxide nanofluid, minimum film boiling point, minimum film boiling temperature, minimum heat flux, quenching

1. 서론

원자력 발전소에서 배관 파단 등에 의한 냉각재상실 사고(Loss of coolant accident)가 발생할 경우 원자로 내 냉각수의 상실로 인해 핵연료봉의 온도가 급격하게 상승하게 된다. 지속적으로 핵연료봉의 온도가 상승할

경우 노심 용융과 같은 극단적인 상황이 초래될 수 있으므로 핵연료봉의 온도를 낮추기 위해 비상노심냉각 계통(Emergency core cooling system)을 통해 냉각수를 주입한다. 이때, 고온의 핵연료봉이 주입되는 저온의 냉각수와 접촉하면 고온의 핵연료봉과 저온의 냉각수 사이에서 급랭(Quenching)이 일어나면서 복잡한 과도

*부경대학교 건축·소방공학부 박사과정 (Division of Architectural and Fire Protection Engineering, Pukyong National University)

**부경대학교 건축·소방공학부 석사과정 (Division of Architectural and Fire Protection Engineering, Pukyong National University)

***부경대학교 소방공학과 교수 (Department of Fire Protection Engineering & Division of Architectural and Fire Protection Engineering, Pukyong National University)

비등 열전달(Transient boiling heat transfer) 현상이 나타나게 된다. 따라서 핵연료봉 주위에서 일어나는 과도 비등 열전달 현상에 대한 이해 및 예측을 위한 연구는 원자력 발전소의 안전성을 확보하기 위해 열수력적 관점에서 필수적으로 수행되어야 한다.

일반적으로 고온의 물체가 상대적으로 온도가 낮은 액체에 의해 빠르게 냉각되는 것을 급랭이라 하고 급랭 시 고온의 물체 주위에서는 시간에 따라 막비등(Film boiling), 천이비등(Transition boiling), 핵비등(Nucleate boiling), 단상 자연대류(Single-phase natural convection)와 같은 열전달 현상의 변화가 일어난다. 막비등 영역에서 천이비등 영역으로의 변화가 일어나는 점을 최소막비등점(MFB point; Minimum Film Boiling point)이라고 하는데 최소막비등점을 기준으로 열전달 현상이 급격하게 변화하므로 최소막비등점에서의 온도와 열유속, 즉 최소막비등온도(MFBT; Minimum Film Boiling Temperature)와 최소열유속(MHF; Minimum Heat Flux)은 급랭 열전달 현상에서 매우 중요한 연구 주제 중 하나이다.

고체와 액체의 특성은 일반적인 비등 열전달 현상에 지대한 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 액체 특성의 영향 파악을 위한 연구 중 나노유체(Nanofluid)를 이용한 다양한 비등 열전달 연구가 수행된 바 있다¹⁻⁴⁾. 이러한 나노유체를 이용한 비등 열전달 연구에서 나노유체가 급랭 시 최소막비등점에 미치는 영향에 대한 연구도 기존에 일부 수행된 바 있다⁵⁻¹¹⁾. 기존 연구결과를 토대로 볼 때 일부 나노유체는 물에 비해 최소막비등점을 가속시키는 영향이 있는 것으로 나타났다. 즉, 최소막비등점까지 도달하는 시간을 단축시키고 최소막비등온도를 상승시켰다. 이러한 원인으로 나노유체 내 급랭 시 나노입자가 고온 시편의 표면에 부착(Deposition)되어 고체 표면 조건(예를 들면, 표면 형상, 표면 젖음성, 표면 거칠기 등)에 영향을 미치기 때문으로 보고되고 있다. 그러나 나노유체 종류에 따라 동일한 조건(예를 들면, 농도 등)하에도 불구하고 최소막비등점은 다르게 나타났으며, 이러한 결과는 최소막비등점에 나노유체 종류가 지대한 영향을 미칠 수 있다는 것을 의미한다. 기존 연구⁵⁻¹¹⁾에서는 나노입자로 MWCNT(Multi-Walled Carbon Nano-Tubes)⁵⁾, alumina(Al_2O_3)⁶⁻¹⁰⁾, silica(SiO_2)⁷⁾, diamond(C)⁷⁾, silicon(Si)¹¹⁾, silicon carbide(SiC)¹¹⁾ 등을 이용하였고, 산화철(Iron(III) oxide) 나노유체에 대한 연구는 상대적으로 매우 미흡한 상황이다. 이러한 상황을 고려할 때 다양한 나노유체를 이용한 급랭 열전달 실험은 지속적으로 이루어져야 하고 특히 산화철 나노유체를 이용한 실험은 나노

유체의 적용성을 확대시킨다는 관점에서 의미가 있다고 판단된다.

한편, 고온 시편의 형상으로는 구형^{7,8)}, 원형봉^{5,6,8,9)}, 튜브(Tube)¹⁰⁾, 금속선(Metal wire)¹¹⁾ 등을 이용하였다. 기존에 구형이나 원형봉을 이용한 연구의 경우 대부분 시편의 한 위치(예를 들면, 시편의 중앙)에 열전대를 설치하여 시간에 따른 온도 곡선을 도출하였다. 하지만 급랭 시 열전달 현상은 시편의 형상에 영향을 받을 수 있고 해당 시편에서 위치에 따라 증기막 거동 등이 변화하여 달라질 가능성이 있다. 특히 길이가 긴 원형봉과 같은 고온 시편의 경우 시편의 모서리 근처 하부와 시편의 벽면 중간에서의 증기막 붕괴 현상이 달라질 수 있다. 또한, 나노유체를 이용할 경우 나노유체의 영향이 시편 위치에 따라 달라질 가능성이 있다. 그럼에도 불구하고 시편의 위치에 따른 최소막비등점의 차이 및 그에 대한 나노유체의 영향을 평가한 연구는 찾아보기 힘든 상황이다. 따라서 원형봉 형태의 경우 다양한 위치에 열전대를 설치하여 나노유체가 해당 위치에서의 최소막비등점에 미치는 영향에 대해 세부적인 연구가 이루어질 필요가 있다.

본 연구에서는 기존에 연구가 미흡했던 산화철 나노유체를 이용하여 고온 시편 내 급랭 시 산화철 나노유체가 최소막비등점에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 고온 시편으로는 길이가 긴 금속 원형봉을 이용하였으며, 해당 원형봉에 위치가 다른 3개의 열전대를 설치하여 시편의 위치에 따른 나노유체의 영향을 검토하였다. 실험데이터를 토대로 산화철 나노유체가 최소막비등점(즉, 최소막비등점에 도달하는 시간, 최소막비등온도 및 최소열유속)에 미치는 영향을 측정하고 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1에 본 연구에서 이용한 실험장치 및 시편의 개략도를 나타내었다. 해당 실험장치는 Lee와 Kim¹²⁾의 연구에서 활용한 실험장치로, 시편(Test specimen)으로 구성된 시험부, 전기로 및 전기로 제어장치, 에어슬라이드(Airslide) 및 공기압축기로 구성된 시편 이송장치, 가열판(Hotplate), 비이커(Beaker), 데이터수집장치 등으로 구성되어 있다.

시편은 스테인리스강(Stainless steel) 재질로 지름 11.98 mm, 길이 120 mm 크기의 원형봉(Cylindrical rod) 형태이다. 시편의 위치에 따른 온도를 측정하기 위하여 시편의 중심부에 깊이 75 mm, 시편의 벽면 근처에 깊이

71 mm와 깊이 117 mm인 3개의 구멍을 가공하였고, 해당 구멍에 0.5 mm 직경의 K-type 열전대를 삽입하였다. 참고로 실험결과에서 시편 중심, 시편 벽면의 중간, 시편 벽면의 하부에 설치된 열전대는 각각 Fig. 2의 TC_{cen_mid} , TC_{wall_mid} , TC_{wall_bot} 를 나타낸다. 이렇게 구성된 시편을 지름 12.7 mm, 길이 900 mm의 스테인리스강 튜브(Stainless steel tube)에 관이음부품을 이용하여 연결하고 시편이 연결된 스테인리스강 튜브를 에어슬라이드에 고정하였다. 에어슬라이드는 공기압축기와 조절기에 의해 상하로 이동 가능하다. 시편 및 전기로 하부에는 시편 급랭을 위한 액체풀(Liquid pool) 구성을 위해 비이커를 준비하였고, 액체풀 가열을 위하여 가열판을 이용하였다. 비이커에는 액체풀 온도 측정을 위해 K-type 열전대를 설치하였으며 실험에서 측정된 모든 온도 데이터(즉, 시편 중심, 시편 벽면의 중간, 시편 벽면의 하부, 액체풀)는 데이터수집장치(Data Translation, DT9828)와 노트북을 이용하여 18.75 Hz의 수집 속도로 저장하였다.

한편, 시편 급랭을 위한 액체 경우, 물(Pure water)과 산화철 나노입자가 물에 포함된 산화철 나노유체(Water-based iron(III) oxide nanofluid, Sigma-Aldrich)를 이용하였다. 산화철 나노유체 내 입자의 크기는 약 84 nm이다. 산화철 나노유체는 기존 연구¹³⁾를 토대로 다음과 같이 준비하였다. 원하는 농도의 산화철 나노유체를 만들기 위해 미리 계산한 혼합량을 토대로 원하는 농도(0.001 vol%, 0.01 vol%)가 되도록 나노유체와 물을 비이커에 함께 넣은 후 초음파분산기(Sonicator)를 이용하여 60분 동안 분산시켰다. 최종적으로 실험을 위한 유체로 물, 물을 기본으로 하는 농도 0.001 vol% 및 0.01 vol%의 산화철 나노유체를 준비하여 실험하였다.

2.2 실험방법

급랭 실험은 다음과 같은 방법으로 수행하였다. 정밀 전자저울을 이용하여 원하는 양의 액체(물 또는 산화철 나노유체)를 비이커에 넣은 후 가열판을 이용하여 해당 액체풀의 온도가 포화온도가 되도록 가열하였다. 한편, 시편의 가열을 위하여 전기로를 700°C까지 서서히 가열하였고, 전기로의 온도와 액체풀이 원하는 온도가 되면 에어슬라이드를 이용하여 시편을 전기로 내에 위치시켰다. 데이터수집장치와 노트북으로 전송되는 시편의 온도가 650°C가 되면 에어슬라이드를 작동시켜서 고온의 시편을 포화온도의 액체풀에 수직으로 빠르게 떨어뜨렸고, 이를 통해 시간에 따른 온도 변화 데이터를 수집하였다. 나노유체 내 급랭 시 반복횟수의 영향을 파악하기 위하여 나노유체 내에서 급랭이

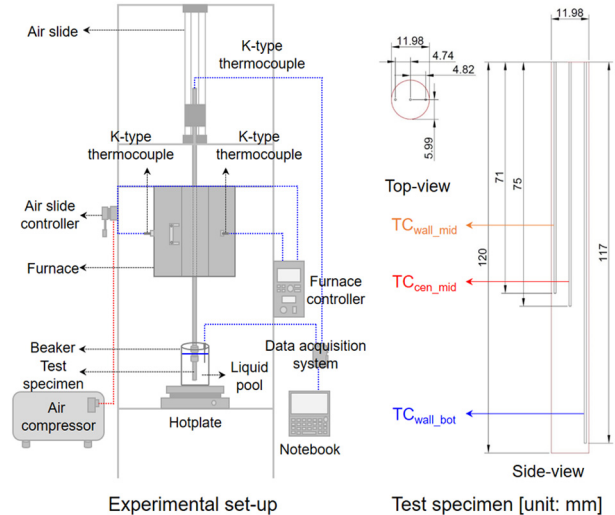


Fig. 1. Schematic diagrams of experimental set-up and test specimen.

일어난 시편을 세척하지 않고(즉, 나노유체 내 급랭 실험에 의해 나노입자가 시편에 부착되어 있는 조건에서) 동일한 농도의 나노유체에 3회 반복적으로 떨어뜨려 온도 데이터를 획득하였다. 이때, 액체풀의 조건(예를 들면, 급랭을 위한 액체의 양 및 산화철 나노유체의 농도 등)을 일정하게 유지시키기 위하여 해당 나노유체에서 1회의 급랭 실험이 끝날 때마다 동일한 조건의 새로운 나노유체 액체풀로 교체하여 실험을 수행하였다. 본 논문에서는 동일한 산화철 나노유체 농도 조건에서의 1번째 실험을 Test#1, 2번째 실험을 Test#2, 3번째 실험을 Test#3로 명명하였다.

3. 실험결과 및 분석

Fig. 2에 물에서 급랭되고 있는 시편의 시간에 따른 전형적인 온도 변화 곡선(예)을 나타내었다. 온도 측정 위치는 시편 벽면의 중간(TC_{wall_mid} in Fig. 1)이다. 약 650°C의 초기온도에서 시간이 흐름에 따라 온도가 지속적으로 감소하였고, 해당 구간은 막비등 열전달 영역으로 판단된다. 약 51 sec에서 시간에 따른 온도가 급격하게 변화하는 것이 관찰되었으며, 이러한 급격한 온도 변화는 해당 시점에서의 열전달 영역이 막비등 영역에서 천이비등 영역으로 변화되기 때문이다. 막비등 열전달 영역에서는 고온의 고체 표면과 주위 액체가 열전도도가 비교적 낮은 증기막에 의해 분리되어 있으므로 시간에 따른 온도 변화가 비교적 천천히 나타나는 반면, 천이비등 열전달 영역에서는 증기막이 붕괴되어 주위 액체가 뜨거운 표면과 접촉하게 되므로 시간에 따른 온도 감소가 급격하게 나타나게 된다. 천

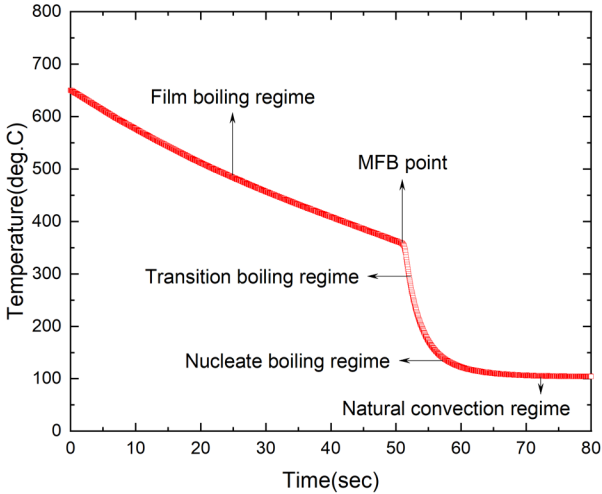


Fig. 2. Exemplified temporal temperature curve for TC_{wall_mid} during quenching in pure water.

이비등 열전달 영역에서 핵비등 열전달 영역으로 변화한 이후 시간에 따른 온도 변화가 다시 한번 급격하게 변화하여 온도가 천천히 감소하게 되는데 이는 핵비등 열전달 영역이 종료되고 자연대류 열전달 영역으로 변화되기 때문이다.

Fig. 3에 물과 0.01 vol% 농도의 산화철 나노유체 내에서 고온의 시편이 급랭 될 때 시편 벽면의 중간에서 측정된 시간에 따른 온도 곡선(예)을 비교하여 나타내었다. 0.01 vol% 농도의 산화철 나노유체 온도 곡선의 경우 해당 나노유체 조건의 3번째 실험(즉, Test#3)에 대한 결과 곡선이다. 물에 비해 0.01 vol% 농도의 산화철 나노유체에서의 Test#3 경우가 급랭 곡선이 확연히 왼쪽으로 이동한 것을 확인할 수 있었고 이는 급랭이 빠른 시간에 완료됨을 의미한다. 또한, 막비등 열전달 영역에서 천이비등 열전달 영역으로 변화하는 최소막비등온도가 더 높은 것으로 측정되었다.

본 연구에서는 막비등 열전달 영역에서 천이비등 열전달 영역으로의 변화가 일어나는 지점, 즉, 막비등 열전달 영역이 종료되는 지점인 최소막비등점에 관심을 가지고 연구를 수행하였다. Fig. 2나 Fig. 3과 같은 급랭 곡선으로부터 식(1)에 나타낸 에너지 평형식(Energy balance equation)을 이용하여 온도와 열유속 관계의 곡선을 도출하였다.

$$\ddot{q} = -\rho c \frac{V}{A} \frac{d\Delta T}{dt} \quad (1)$$

위 식에서 \ddot{q} 은 열유속, ρ , c , V , A 는 고체 시편의 밀도, 비열, 부피, 표면적을 나타낸다. 또한 ΔT 는 고체

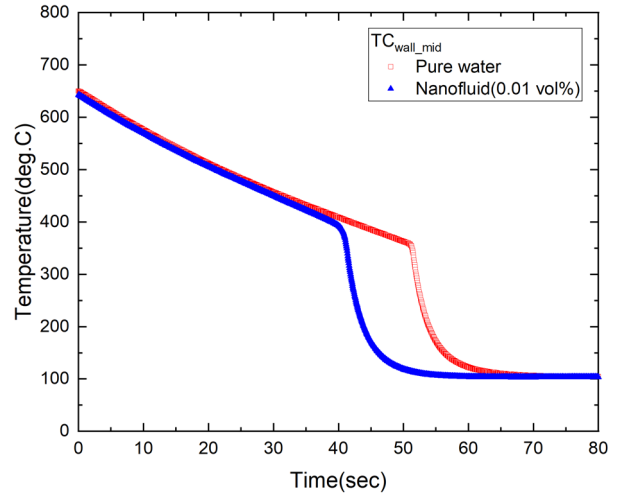


Fig. 3. Comparison of temporal temperature curves for TC_{wall_mid} during quenching in pure water and water-based iron(III) oxide in concentration of 0.01 vol%(Test#3).

시편의 온도와 액체의 온도 간 차이, t 는 시간을 의미한다. 시간과 온도 간 곡선(즉, 급랭 곡선) 및 식(1)을 이용하여 온도와 열유속 간 곡선을 도출하였으며, 해당 곡선들을 이용하여 최소막비등점에 도달하는 시간(즉, 막비등 영역이 지속되는 시간), 최소막비등점에서의 온도(최소막비등온도) 및 열유속(최소열유속)을 결정하였다. 기존 연구^{12,14,15}를 토대로 볼 때, 막비등 열전달 영역에서는 일반적으로 집중계 해석(Lumped system analysis) 방법의 적용이 가능하고, 시간에 따른 온도 변화 곡선과 식(1)을 이용하여 온도와 열유속 간 관계 곡선을 도출하여 최소막비등온도 및 최소열유속을 결정하는 것이 가능한 것으로 알려져 있다. Fig. 2의 급랭 곡선으로부터 식(1)을 이용하여 도출한 최소막비

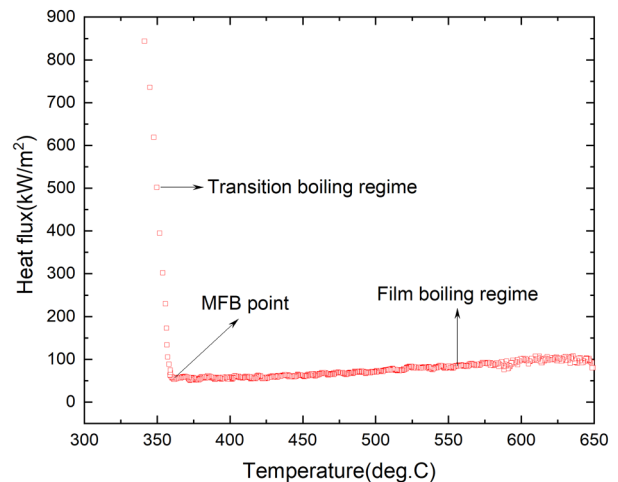


Fig. 4. Exemplified curve of temperature and heat flux near MFB point obtained from Fig. 2.

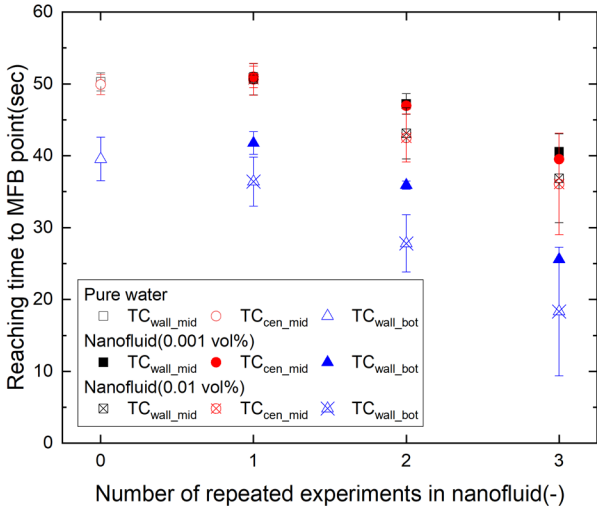


Fig. 5. Effects of concentration and repeated experiments in water-based iron(III) oxide nanofluids on reaching time to MFB point.

등점 부근에서의 온도와 열유속 간 곡선(예)을 Fig. 4에 나타내었다. 한편, 본 연구에서의 불확도(Uncertainty) 분석¹⁶⁾ 결과, 온도와 열유속은 각각 약 1%와 8.6% 이내로 평가되었다.

각 조건에서의 반복 실험을 통해 얻은 측정데이터로부터 최소막비등점에 도달하는 시간, 최소막비등온도, 최소열유속에 대한 데이터를 정리하여 Figs. 5-7에 각각 나타내었다.

Fig. 5에 산화철 나노유체의 농도와 나노유체를 이용한 반복실험 횟수가 최소막비등점에 도달하는 시간에 미치는 영향을 나타내었다. 물의 경우(즉, Number of repeated experiments in nanofluid=0), 시편의 중심 및 시편의 벽면 중간에서 측정된 최소막비등점 도달 시간이 평균적으로 각각 약 49.9 sec와 약 50.3 sec로 거의 동일한 것으로 나타났으나, 시편의 벽면 하부에서는 약 39.5 sec로 최소막비등점 도달 시간이 더 빠른 것으로 측정되었다. 이러한 경향은 모든 나노유체의 농도 및 반복실험에서도 동일하게 나타났다. 이는 시편의 하부에서부터 증기막의 붕괴가 시작되어 시간이 지남에 따라 급랭전선(Quench front)이 상부로 이동하기 때문이다. 한편, 나노유체를 이용한 1번째 실험(Test#1)의 경우 최소막비등점에 도달하는 시간에 대한 농도의 영향은 비교적 미미하였으며, 물의 실험결과와 큰 차이는 없는 것으로 측정되었다. 그러나 반복실험 횟수가 증가함에 따라 최소막비등점에 도달하는 시간이 짧아지는 경향이 나타났고, 나노유체의 농도가 높은 경우가 낮은 경우에 비해 최소막비등점에 도달하는 시간이 짧은 것으로 나타났다. 즉, 나노유체의 농도와 반복실험

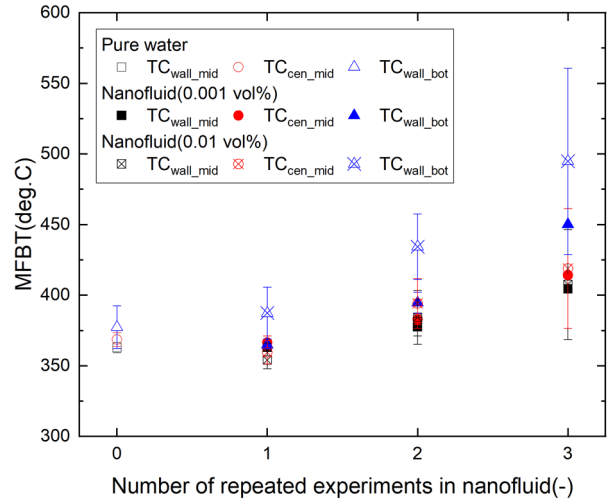


Fig. 6. Effects of concentration and repeated experiments in water-based iron(III) oxide nanofluids on MFBT.

횟수의증가에 의해 최소막비등점에 도달하는 시간이 단축되는 경향이 관찰되었다. 산화철 나노유체 농도가 0.01 vol%인 3번째 실험(Test#3)에서 시편 중심, 시편 벽면의 중간 및 하부에서의 최소막비등점 도달 시간은 약 36.1, 36.9, 18.3 sec로 나타났다. 또한, 2가지 농도의 나노유체에서 모두 반복횟수에 대한 최소막비등점까지의 도달시간 감소율이 시편의 벽면 중간이나 중심보다 시편의 벽면 하부에서 더 급격한 것처럼 관찰되었다.

Fig. 6에 산화철 나노유체의 농도와 나노유체 내 반복실험 횟수가 최소막비등온도에 미치는 영향을 물과 비교하여 나타내었다. 나노유체 내 반복실험 횟수가 0인 경우는 산화철 나노입자가 함유되지 않은 물을 이용한 실험결과를 나타낸다. 물을 이용한 실험에서, 시편 중심, 시편 벽면의 중간 및 하부에서 측정된 최소막비등온도는 평균적으로 각각 약 368.6, 362.8, 377.3°C로 시편 하부에서 약간 높게 측정되었다. 2가지 농도의 나노유체에서 1번째 실험(Test#1)의 결과는 실험데이터의 표준편차를 고려하였을 때 물의 실험결과와 큰 차이는 없는 것으로 판단된다. 그러나 나노유체에서 반복실험 횟수가 증가함에 따라 모든 지점에서의 최소막비등온도가 증가하는 것으로 나타났고, 나노유체 농도가 0.01 vol%인 경우가 0.001 vol%인 경우보다 최소막비등온도가 높은 것으로 나타났다. 또한, 2가지 농도의 나노유체에서 모두 시편의 벽면 하부에서 측정된 최소막비등온도가 시편의 중심 또는 벽면 중간보다 높은 것으로 관찰되었고, 반복횟수에 따른 최소막비등온도 증가율도 시편의 벽면 하부에서 더 큰 것으로 측정되었다. 나노유체 농도가 0.01 vol%에서 3번째 실험(Test#3)의 경우, 시편 중심, 시편 벽면의 중간 및 하부

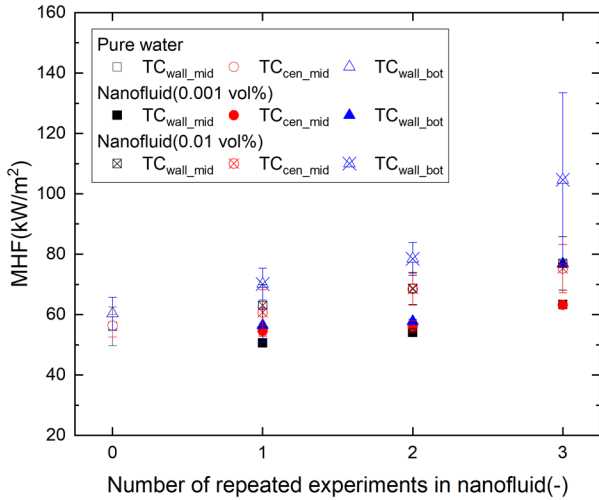


Fig. 7. Effects of concentration and repeated experiments in water-based iron(III) oxide nanofluids on MHF.

에서 측정된 최소막비등온도는 평균적으로 각각 약 418.9, 407.5, 494.8°C로 측정되었다. 이러한 결과를 토대로 볼 때, 나노유체의 농도 및 반복실험 횟수의 증가는 최소막비등온도를 증가시키고 위치별 최소막비등온도의 차이 또한 증가시키는 것으로 판단된다. 즉, 막비등 열전달 영역에서 천이비등 열전달 영역으로의 변화가 더 높은 온도에서 이루어지고 위치별 변화 온도 간 차이를 증가시키는 영향이 있는 것으로 나타났다.

Fig. 7에 산화철 나노유체의 농도와 나노유체 내 반복실험 횟수가 최소열유속에 미치는 영향을 물과 비교하여 나타내었다. 전체적인 경향은 Fig. 6에 나타난 최소막비등온도와 유사하게 나타났다. 물의 경우 시편 중심, 시편 벽면의 중간 및 하부에서 측정된 최소열유속은 각각 약 56.34, 56.14, 60.35 kW/m²으로 시편 하부에서 약간 크게 측정되었고, 산화철 나노유체의 농도와 나노유체 내에서의 반복실험 횟수가 증가함에 따라 최소열유속이 증가하는 경향이 관찰되었다. 나노유체 농도가 0.01 vol%에서 3번째 실험(Test#3)의 경우, 시편 중심, 시편 벽면의 중간 및 하부에서 측정된 최소열유속은 평균적으로 각각 약 75.27, 76.99, 104.65 kW/m²으로 나타났다.

산화철 나노유체의 영향을 보다 정량적으로 평가하기 위하여 Figs. 8-10에 최소막비등점에 도달하는 시간, 최소막비등온도, 최소열유속에 대해 시편의 각 측정 위치에서 물의 실험결과와 산화철 나노유체의 실험결과 간 차이(Diff)를 아래 식(2)를 이용하여 각각 나타내었다.

$$Diff = \left| \frac{(Exp_{NF} - Exp_w)}{Exp_w} \right| \times 100 [\%] \quad (2)$$

여기서, Exp_{NF} 와 Exp_w 는 나노유체와 물을 이용한 실험결과를 나타낸다.

Fig. 8에 물과 산화철 나노유체에서의 실험 간 최소막비등점 도달시간의 차이를 나타내었고, Fig. 5에 나타난 바와 같이 나노유체를 이용한 결과가 물을 이용한 결과에 비해 최소막비등점에 도달하는 시간이 빠르므로 Fig. 8에서의 시간 차이 증가는 물을 기준으로 나노유체에 의해 최소막비등점에 도달하는 시간이 얼마나 단축되는지를 의미한다.

산화철 나노유체를 이용한 1번째 실험(Test#1)에서는 모든 측정 지점에서 나노유체와 물과의 차이가 약 10% 이내로 나타났다. 나노유체에서의 반복실험 횟수가 증가함에 따라 물과 나노유체 간 최소막비등점 도달 시간 차이가 증가하였고, 농도가 높은 경우가 낮은 경우에 비해 최소막비등점 도달 시간 차이가 크게 나타났다. 특히, 모든 농도 조건에서 시편 벽면 하부에서의 차이가 시편 중심이나 시편 벽면 중간보다 크게 나타났다. 한편, 시편 벽면 중간 및 시편 중심에서는 나노유체에 의한 최소막비등점 도달시간 단축이 거의 유사한 것으로 관찰되었다.

산화철 나노유체에서의 3번째 실험(Test#3)의 경우 최소막비등점까지의 도달시간이 물에 비해 농도가 0.001 vol%인 경우 시편의 벽면 하부, 벽면 중간, 시편 중심에서 각각 약 35.3%, 19.4%, 20.8%, 농도가 0.01 vol%인 경우 각각 약 53.6%, 26.7%, 27.7% 정도 단축되는 것으로 나타났다.

Fig. 9와 Fig. 10에 최소막비등온도와 최소열유속에 대해 시편의 각 측정 위치에서의 물의 실험결과와 산화철

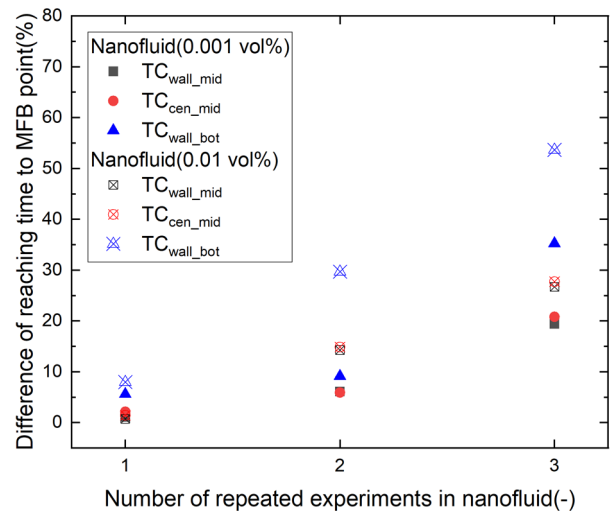


Fig. 8. Difference of reaching time to MFB point between pure water and water-based iron(III) oxide nanofluids.

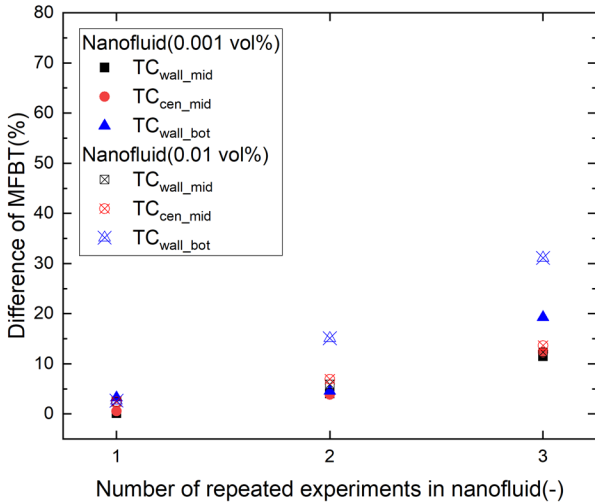


Fig. 9. Difference of MFBT between pure water and water-based iron(III) oxide nanofluids.

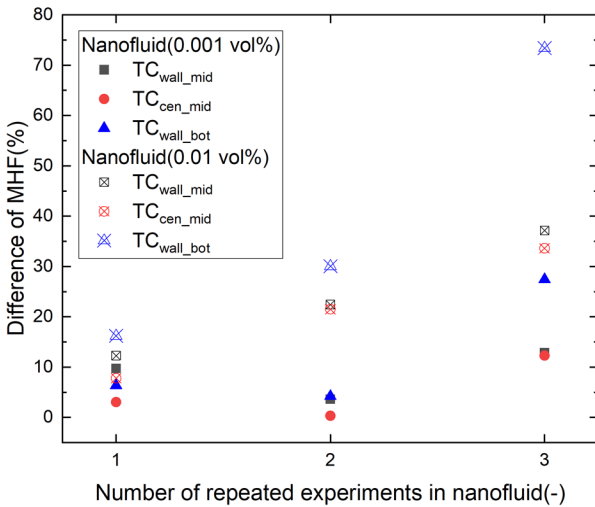


Fig. 10. Difference of MHF between pure water and water-based iron(III) oxide nanofluids.

나노유체의 실험결과 간 차이를 식(2)를 이용하여 계산한 결과를 각각 나타내었다. Fig. 6과 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 나노유체의 농도와 반복 실험 횟수의 증가에 따라 물에 비해 나노유체에서의 최소막비등온도와 최소열유속이 증가하였으므로, Fig. 9와 Fig. 10에 나타낸 차이는 물에 비해 나노유체에서 최소막비등온도와 최소열유속이 얼마나 증대되는지를 나타내는 척도이다.

산화철 나노유체의 농도와 반복실험에 대한 물과 나노유체 간 최소막비등온도와 최소열유속 차이(즉, 나노유체에 의한 증대)의 경향은 전체적으로 유사하였다. 즉, 나노유체 농도와 반복실험 횟수가 증가함에 따라 나노유체에 의한 최소막비등온도와 최소열유속의 증대가 증가하는 경향이 나타났으며, 시편의 중심이나

벽면 중간보다 시편 벽면 하부에서의 증대가 큰 것으로 관찰되었다.

최소막비등온도의 경우 나노유체에서의 3번째 실험 (Test#3)은 물에 비해 시편의 벽면 하부, 벽면 중간, 중심에서 농도가 0.001 vol%일 때 각각 약 19.3%, 11.5%, 12.3%, 농도가 0.01 vol%일 때 각각 약 31.1%, 12.3%, 13.6% 증대되는 것으로 나타났다. 한편, 최소열유속의 경우 동일한 조건과 측정 위치에서 나노유체 농도가 0.001 vol%일 때 각각 약 27.4%, 12.9%, 12.3%, 농도가 0.01 vol%일 때 각각 약 73.4%, 37.1%, 33.6% 증대되는 것으로 측정되었다.

본 연구를 통해 산화철 나노유체는 최소막비등점에 도달하는 시간을 단축시키고 최소막비등온도 및 최소열유속을 증대시키는 경향이 있는 것으로 나타났다. 특히 농도와 반복실험 횟수가 증가함에 따라 나노유체가 최소막비등점에 미치는 영향이 증대되는 것으로 관찰되었다. 서론에서 언급한 바와 같이 기존 연구결과를 토대로 볼 때, 이러한 경향이 나타난 이유는 나노유체 내 나노입자가 고체 시편의 표면에 부착되고, 반복실험 횟수가 증가함에 따라 고체 시편 표면에 부착되는 나노입자가 증가하여 고체 시편 표면의 조건을 변화시키기 때문으로 판단된다. 한편, 측정 위치 별 결과의 경우, 시편의 벽면 하부가 시편 벽면 중간이나 중심보다 나노유체가 최소막비등점에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다. 이러한 경향이 나타난 이유 중 하나는 일반적으로 해당 지점(즉, 수직 원형봉의 하부 지점)에서 형성되는 증기막 두께가 다른 부분에 비해 비교적 얇고⁸⁾, 이 경우 고체 표면에 부착된 나노입자가 얇은 두께로 형성된 증기막의 붕괴를 촉진시키는 역할을 하기 때문으로 판단된다.

본 연구에서는 기존에 연구가 미흡하였던 산화철 나노유체를 이용하여 산화철 나노유체가 급랭 열전달, 특히 최소막비등점에 미치는 영향(최소막비등점에 도달하는 시간, 최소막비등온도, 최소열유속)에 대해 선행적으로 검토하였고, 본 연구를 통해 산화철 나노유체가 최소막비등점에 지대한 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 하지만, 산화철 나노유체와 급랭 열전달 간 상관관계에 대해 보다 명확하고 체계적인 검토를 위해서는 향후 고체 표면에 부착된 산화철 나노입자에 의한 고체 표면 특성 변화 측정 및 이에 대한 분석, 그리고 다른 나노유체와의 영향 평가 비교 등이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 물, 물을 기본으로 한 농도 0.001

vol% 및 0.01 vol%의 산화철 나노유체를 이용하여 산화철 나노유체가 최소막비등점에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 시편으로 수직 금속 원형봉을 이용하였고, 위치에 따른 영향 파악을 위해 원형봉의 벽면 하부, 벽면 중간, 중심에 열전대를 설치하였다. 다양한 조건에서의 실험을 통해 산화철 나노유체의 농도, 반복실험 횟수, 측정 위치에 따른 최소막비등점 도달 시간, 최소막비등점에서의 온도(최소막비등온도)와 열유속(최소열유속)을 측정하고 분석하였다. 본 연구를 통해 얻은 주요 결과를 아래에 정리하였다.

1) 산화철 나노유체의 농도가 증가함에 따라, 일정한 농도에서 반복실험 횟수가 증가함에 따라 최소막비등점에 도달하는 시간은 단축되고, 최소막비등온도 및 최소열유속은 증가하는 경향이 관찰되었다. 또한 시편의 위치에 따라 나노유체가 최소막비등점에 미치는 영향이 차이가 있는 것으로 나타났다.

2) 본 실험조건에서 최소막비등점 도달 시간의 단축, 최소막비등온도 및 최소열유속 증가의 최대치는 산화철 농도가 가장 높은 0.01 vol% 조건에서 반복실험 횟수가 가장 많은 3번째 실험(Test#3)에서 나타났다.

3) 농도 0.01 vol%의 산화철 나노유체에서 3번째 실험(Test#3) 결과, 물을 이용한 실험에 비해 시편의 벽면 하부, 벽면 중간, 중심에서 최소막비등점 도달 시간은 각각 약 53.6%, 26.7%, 27.7% 단축되었고, 최소막비등온도의 경우 각각 약 31.1%, 12.3%, 13.6%, 최소열유속의 경우 각각 약 73.4%, 37.1%, 33.6% 증대되는 것으로 측정되었다.

4) 측정 위치 영향의 경우, 시편의 벽면 하부가 시편의 벽면 중간이나 중심에 비해 산화철 나노유체가 최소막비등점에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다. 즉, 시편의 벽면 중간이나 중심에 비해 시편의 벽면 하부에서 물에 비해 산화철 나노유체에 의한 최소막비등점 도달 시간의 단축, 최소막비등온도 및 최소열유속의 증대가 큰 것으로 측정되었다.

감사의 글: 이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2019년)에 의하여 연구되었음.

References

- 1) S. Yao and Z. Teng, "Effect of Nanofluids on Boiling Heat Transfer Performance", *Appl. Sci.*, Vol. 9, No. 14, 2818, 2019.
- 2) G. Liang and I. Mudawar, "Review of Pool Boiling

- Enhancement with Additives and Nanofluids", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 124, pp. 423-453, 2018.
- 3) J. Barber, D. Brutin and L. Tadrist, "A Review on Boiling Heat Transfer Enhancement with Nanofluids", *Nanoscale Res. Lett.*, Vol. 280, pp. 1-16, 2011.
- 4) J. Buongiorno and L. W. Hu, "Nanofluid Heat Transfer Enhancement for Nuclear Reactor Applications", *Proceedings of the ASME 2009 2nd Micro/Nanoscale Heat & Mass Transfer International Conference*, 2009.
- 5) H. H. Khoshmehr, A. Saboonchi and M. B. Shafii, "The Quenching of Silver Rod in Boiling Carbon Nano Tube-water Nanofluid", *Int. J. Therm. Sci.*, Vol. 75, pp. 95-104, 2014.
- 6) A. Dasgupta, A. S. Chinchole, P. P. Kulkarni, D. K. Chandraker and A. K. Nayak, "Quenching of a Heated Rod: Physical Phenomena, Heat Transfer, and Effect of Nanofluids", *J. Heat Transfer*, Vol. 138, pp. 1-7, 2016.
- 7) H. D. Kim, G. Dewitt, T. Mckrell, J. Buongiorno and L. W. Hu, "On the Quenching of Steel and Zircaloy Spheres in Water-based Nanofluids with Alumina, Silica and Diamond Nanoparticles", *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 35, pp. 427-438, 2009.
- 8) H. D. Kim, J. Buongiorno, L. W. Hu and T. Mckrell, "Nanoparticle Deposition Effects on the Minimum Heat Flux Point and Quench Front Speed During Quenching in Water-based Alumina Nanofluids", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 1542-1553, 2010.
- 9) N. Patra, V. Gupta, R. Singh, R. S. Singh, P. Ghosh and A. Nayak, "An Experimental Analysis of Quenching of Continuously Heated Vertical Rod with Aqueous Al₂O₃ Nanofluid", *Resource-Efficient Technologies*, Vol. 3, pp. 378-384, 2017.
- 10) G. Paul, P. K. Das and I. Manna, "Assessment of the Process of Boiling Heat Transfer During Rewetting of a Vertical Tube Bottom Flooded by Alumina Nanofluid", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 94, pp. 390-402, 2016.
- 11) S. Y. Chun, I. C. Bang, Y. J. Choo and C. H. Song, "Heat Transfer Characteristics of Si and SiC Nanofluids During a Rapid Quenching and Nanoparticles Deposition Effects", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 54, pp. 1217-1223, 2011.
- 12) C. Y. Lee and J. H. Kim, "Investigation on Minimum Film Boiling Point of Highly Heated Vertical Metal Rod in Aqueous Surfactant Solution", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 41, No. 9, pp. 597-603, 2017.
- 13) L. Colla, L. Fedele, M. Scattolini and S. bobbo, "Water-based Fe₂O₃ Nanofluid Characterization: Thermal

- Conductivity and Viscosity Measurements and Correlation”, *Adv. Mech. Eng.*, Vol. 2012, pp. 1-8, 2012.
- 14) L. W. Fan, J. Q. Li, D. Y. Li, L. Zhang and Z. T. Yu, “Regulated Transient Pool Boiling of Water During Quenching on Nanostructured Surfaces with Modified Wettability from Superhydrophilic to Superhydrophobic,” *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 76, pp. 81-89, 2014.
- 15) S. W. Lee, S. M. Kim, S. D. Park and I. C. Bang, “Study on the Cooling Performance of Sea Salt Solution During Reflood Heat Transfer in a Long Vertical Tube”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 60, pp. 105-113, 2013.
- 16) J. P. Holman, “*Experimental Methods for Engineers*”, McGraw Hill, pp. 51-62, 2001.