

https://doi.org/10.7735/ksmte.2018.27.3.262

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng. ISSN 2508-5107(Online)

Special Issue: Seoul Tech Capstone Design

소형화된 피동응축용 냉각탱크 내 온도분포와 비등현상에 관한 실험적 연구

이원석 , 송환준 , 김정우 , 박창용 **

An Experimental Study on Temperature Distribution and Boiling Phenomena in a Small-Scaled Passive Condensate Cooling Tank

Won-Seok Lee^a, Whanjoon Song^a, Jungwoo Kim^a, Chang Yong Park^{a*}

ARTICLE INFO

Article history:

Received	4	April	2018
Revised	1	June	2018
Accepted	4	June	2018

Keywords:

Boiling

Nuclear power plant

Passive auxiliary feedwater system

Passive condensate cooling tank

Stratification

Temperature distribution

ABSTRACT

An experimental study was conducted to investigate the water temperature distribution and saturated boiling phenomenon in a small-scale passive condensate cooling tank that is part of an emergency passive auxiliary feedwater system used in nuclear power plants. During the heating process using an electric heater inserted in the tank, the temperature of water was measured at 36 locations. Isothermal line contours were generated based on the experimental data. The contours indicated that the water above the heater location had a nearly uniform temperature due to free convection flow. Conversely, a strong temperature gradient was observed in the water below the heater location. The bubble departure diameters at the cylindrical heater surface were measured using images captured by a high-speed camera. The diameters were observed to be within the range of values predicted using existing correlations.

1. 서 론

일본의 후쿠시마 원전사고 이후 우리나라에서는 원자력발전의 안전문제와 높은 원자력 발전 의존도에 관한 논란이 계속되고 있다. 하지만 국가의 기저부하를 담당하는 원자력 발전을 당장 대체할 방안이 없다는 것도 당면한 현실이다. 실제 후쿠시마 원전사고이후 원전의 전면 가동중단을 선언하였던 일본은 노후 원전의 교체로 방향을 선회하고 있으며, 독일과 스위스를 제외한 대부분의 국가들이 원자력 발전과 관계된 설비증설과 기술개발에 투자하고 있다. 지금까지 발생하였던 원전사고 중 가장 심각한 경우의 하나로 간주되는 후쿠시마 원전사고는 냉각수가 공급되지 않는 상황에서

연료봉에서 핵분열이 계속되고 노심이 용용하여 결국 방사능 물질이 공기나 지하로 누출되어 발생하였다. 따라서 이러한 치명적 사고를 방지하기 위해서는 주급수 상실사고, 소형냉각재 상실사고, 증기발생기세관 파단사고 및 비냉각재 상실사고 등의 상황에서도 외부 전원의 공급 없이 원자로를 일정온도 이하로 냉각하는 피동안전 시스템(passive safety system) 기술이 필요하며, 관련 기술의 개발을 통해 원자력 발전의 안전성은 크게 향상될 수 있다. 국제원자력위원회(IAEA)에서도 이러한 기술의 필요성을 인식하여 1991년 원전의 피동안전 시스템에 관한 학술대회를 주관하였으며[1], 2004년 국제공동연구 프로젝트를 시작하였다[2]. 피동안전 시스템에 대한 설계 기준은 사고발생 시 어떠한 능동 수단이나 운전원의

Fax: +82-2-974-8270

E-mail address: cypark@seoultech.ac.kr (Chang Yong Park).

^a Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

^{*} Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6360

개입 없이 최소 72시간 동안 원자로를 안전한 상태로 유지시켜주는 것을 목표로 한다^[3]. 국내에서 피동안전 시스템에 대한 연구는 한국원자력연구원(KAERI)에 의해 다수 수행되었다^[4-10].

원전의 피동안전 시스템을 구성하는 핵심적인 부분 중 하나는 피동보조급수 시스템(passive auxiliary feedwater system)이며 관련 개략도가 Fig. 1^[4]에 제시되어 있다. 원전이 정상적으로 작 동되는 경우 Fig. 1의 증기발생기(steam generator)로 급수관 (feedwater line)을 통해 응축기에서 과냉각된 물이 펌프를 통해 공급되며, 증기발생기에서 과열증기 상태로 변한 물은 주 증기관 (main steam line)을 통해 터빈으로 공급된다. 하지만 원전에 내 부적 또는 외부적 요인에 의해 모든 전력공급이 중단되는 경우, 물을 공급하는 펌프가 작동을 멈추기 때문에, 액체상태의 물 공급 이 차단되고 증기발생기가 과열되는 문제가 발생한다. 이러한 문 제를 해결하기 위해 필요한 설비가 피동보조급수 시스템이다. 펌 프가 작동을 멈추게 되면 피동보조급수 시스템의 밸브가 열리면 서 내부의 액체상태의 물이 중력에 의해 증기발생기로 공급된다. 이러한 중력의 효과를 얻기 위해 피동 응축용 냉각탱크(PCCT: passive condensate cooling tank)와 응축 열교환기(condensation heat exchanger)는 급수관에 비해 약 20 m 이상 높은 고도에 위치 하게 된다[4]. 공급된 액체상태의 물은 증기발생기를 냉각시킨 후 과열증기 상태로 변하게 되고, 이 과열증기는 증기 공급관(steam supply line)을 통해 응축 열교환기로 유입된다. 응축 열교환기로 유입된 과열증기는 피동 응축용 냉각탱크에서 주변의 물에 의해 응축되어 액체상태로 변하고, 다시 증기발생기로 공급되어 비상 상 황에서 냉각을 수행하게 된다.

위에서 언급한 피동보조급수 시스템에서 본 연구의 대상은 응축 열교환기를 냉각하는 피동 응축용 냉각탱크이다. 이 냉각탱크 안에 는 액체상태의 물이 대기에 노출된 상태로 저장되어 있으며, 응축 열교환기는 이 물에 잠긴 상태로 냉각된다. 따라서 응축 열교환기

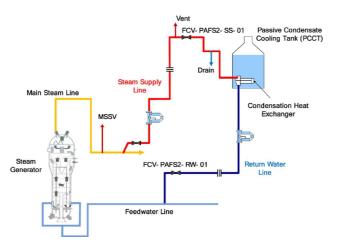


Fig. 1 Concept layout of the passive auxiliary feed water system^[4]

의 냉각이 시작되는 초기 단계에는 열교환기 주변의 물이 가열되어 상승하고 그 물이 냉각탱크 내부에서 자연대류 현상에 의해 순환되 는 형태의 유동을 갖는다. 하지만 냉각이 진행됨에 따라 응축 열교 환기 외부 표면의 물 온도가 포화온도에 도달하여 비등 현상이 발 생하기 시작한다. 비등 현상으로 인해 냉각탱크 내부의 물은 조금 씩 증발하며 대기 중으로 방출되어 수면의 높이는 감소하게 된다. 이러한 수면 높이변화에 따라 응축 열교환기 표면의 비등 현상과 물의 유동특성 또한 변하게 된다^{7]}. 이러한 복합적 효과로 인해 응 축 열교환기를 냉각시키는 피동 응축용 냉각탱크 내부에 존재하는 물의 유동특성을 예상하는 것은 매우 어려운 일이지만, 피동보조급 수 시스템의 설계 및 운용에 매우 중요하다. 따라서 이러한 유동특 성을 예측하기 위해 CUPID라 불리는 3차원 열수력 코드가 개발 되고 있다^[8,9]. 열수력 코드의 개발을 위해서는 실험 데이터와의 비 교를 통한 검증의 과정이 수행되어야 하며, 이를 위해 실제 파일럿 플랜트에서 측정한 온도 데이터와 시뮬레이션 결과를 비교를 통한 연구^[7,8]가 수행되었다. 하지만 실제 피동 응축용 냉각탱크는 매우 대형 설비이므로 이를 가동하여 정확한 측정실험을 수행하기에는 상당한 어려움이 존재한다. 따라서 이를 축소하여 실험 장치를 구 축하고 CUPID 코드 개발을 위한 검증 데이터를 제공하기 위한 연구가 존재한다. Kim et al.[10]의 연구는 응축 열교환기를 원통형 전기히터로 대체하여, 가열에 따른 물의 유동속도 분포장과 수직 난류 강도 분포를 2차원 PIV (particle image velocimetry)를 활 용하여 제시하였고, 4개 지점의 온도를 측정한 결과도 제시하였다. 하지만 코드 개발과정에서, 냉각탱크에 존재하는 냉각수 내부의 전 체적인 온도분포 변화와 원형 관 주변의 비등 현상에 대한 구체적 데이터는 코드의 예측 정확성 검증을 위해 필요한 정보임에도 불구 하고 이에 대한 실험적 연구는 부족한 상황이다.

본 연구는 이러한 기존의 연구를 보완하기 위해 수행되었다. 먼저 피동 응축용 냉각탱크를 모사한 가시화가 가능한 소형의 직육면체 수조를 제작하였다. 내부에 원통형 전기히터를 설치하여 물을채우고 가열하는 과정에서 다수의 지점에서 시간의 변화에 따른물의 온도변화를 측정하고 이를 등온선으로 표현하여 시간의 경과에 따른 온도분포 변화를 보여주었다. 이를 통해 코드 개발과정에서 검증 데이터를 제공하고자 하였다. 또한 히터 표면에서 발생하는 포화 비등(saturated boiling) 현상을 가시화하고 기포 이탈지름에 대한 실험결과를 측정하여 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 Test section

피동 응축용 냉각탱크를 모사하기 위해 가로, 세로 및 높이가 각 300×150×310 mm의 내부 치수를 갖는 수조가 제작되었으며

Fig. 2(a)에 수조의 개략도가 제시되었다. 수조의 아래와 뒤 그리고 양 옆판은 부식을 방지하기 위해 각각 두께 10 mm와 15 mm의 스테인레스 스틸 판을 사용하였으며, 앞과 윗판은 가시화를 위해 두께 8 mm의 폴리카보네이트 판을 적용하였다. 실험의 용이성을 위해 윗판은 분리가 가능한 덮개 형태로 제작하였다. 응축 열교환기를 모사하기 위해 Fig. 2(a)와 같이 바닥으로부터 높이가 100 mm인 위치에 직경이 25 mm인 원통형 전기히터를 설치하였다.

사용된 히터는 두 종류로 길이가 50 mm인 가열용량 350 W의 히터, 또는 길이 100 mm, 가열용량 670 W의 히터가 설치되어 각 용량과 길이별 내부의 온도분포 차이를 측정하고자 하였다. 내부 물 온도를 측정하기 위해 격자를 갖는 알루미늄 구조를 가공하여 히터의 중심의 위치에서 25 mm 뒤에 가공된 홈에 밀어 넣어고정시켰다. 격자가 교차하는 지점에 구멍을 가공하고 여기에 T-type 열전대를 고정하였다. 열전대의 접점을 측정 위치인 앞쪽으로 외팔보 형태로 돌출시켜 세로 방향의 중심 단면에서 물의 온

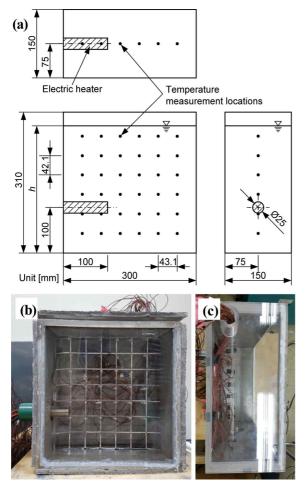


Fig. 2 (a) Schematics of the test section with a 670 W electric heater, (b) picture of a frontal view of the test section with a 350 W electric heater, (c) top view of the test section

도를 측정하였다. 돌출시킨 열전대는 수조 내부의 유속이 빠르지 않기 때문에 고정된 상태로 설치된 위치에서의 온도를 측정하는 것이 가능하였다. 열전대 고정이 완료된 실험부의 정면과 윗면에서 바라본 사진이 Fig. 2(b)와 2(c)에 각각 제시되었다. 물의 온도는 중심단면의 36개 지점에서 동시에 측정되었으며, 각 측정 위치는 Fig. 2(a)의 검은 색 점들로 표현되었다. 측정에 사용된 열전대는 실험에 앞서 ±0.2℃의 정확도를 갖도록 보정되었으며, 연결된 데이터 수집장치를 통해 2.4초당 1개의 데이터 군이 수집되도록 하였다. FIg. 2에서 h는 물의 깊이로 초기에는 300 mm의 깊이로 실험을 시작하였다. 히터가 소비하는 전력은 측정값의 ±0.2%의 오차를 갖는 전력계로 측정되었다.

히터 표면에서 비등 현상을 관찰하기 위해 가시화 실험이 수행되었다. 가시화를 위한 광원은 LED 램프를 사용하였으며 초고속 카메라는 Vision Research 사의 Phantom Miro 110 모델이었다. 본 연구에서는 초당 2,000 프레임으로 쵤영 하였으며, 가시화된 영상자료는 영상처리 전용 프로그램(PCC (Phantom Camera Control) ver. 2.5)을 활용하여 분석되었다. 가시화를 통해 히터 표면에서 발생하는 기포의 이탈지름(bubble departure diameter)을 측정하였다.

고체 표면의 거칠기는 비등 현상에서 중요한 변수이다. 본 실험에서는 670 W의 용량을 갖는 히터의 표면 거칠기는 Mitutoyo사의 Profiler(Surftest SJ-400, 최소 해상도 0.005 µm)를 사용하여측정되었다. 히터의 중앙부에서 120° 간격으로 약 1 cm 길이의축 방향에 대해 probe를 이동시키며 측정하였다. 세 지점의 평균거칠기는 각각 0.34, 0.45, 0.32 µm로, 산술평균하면 그 값은 0.37 µm였다.

2.2 실험과정 중 열손실

히터를 사용한 물의 가열과정 중 물의 온도분포에 관한 측정은 실험장치의 주변으로 두께 20 mm의 발포 단열재로 단열한 후 수행하였다. 하지만 주변으로 열손실이 발생하기 때문에 전기히터를 통해 가열되는 물의 평균온도 변화율과 전기히터가 소비한 전력량의 비교를 통해 열손실률을 계산하였다. Fig. 3은 시간의 경과에따른 실험장치 내 물의 평균온도 변화를 보여주고 있다. 물에 공급된 열공급률은 물의 질량과 평균비열 Fig. 3의 평균온도 변화율의곱으로 계산된다. 계산 결과, 단상 조건에서 350 W 히터를 사용하는 경우 가해진 열의 약 19.2%, 670 W로 가열되는 경우 공급된열의 18.6%가 손실되고 있음을 확인하였다. Fig. 3에서 온도의 변화율은 시간의 경과에따라 조금씩 감소하고 있음을 보여주며 이는평균 수온의 상승으로 인하여 주변과의 온도차가 증가하고 이에따른 열손실의 증가에 기인한다고 할 수 있다. 670 W 히터를 사용한 가열 조건에서 수온의 평균온도 90°C 이상에서는 온도의 증가

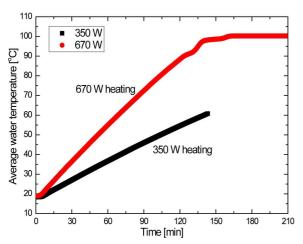


Fig. 3 Change of average water temperature with time lapse

가 일정하지 않고 약간의 흔들림을 보여주고 있는데, 이는 물 내부 온도분포가 변화하기 때문으로 판단된다. Fig. 3이 보여주는 것과 같이 350 W의 히터를 사용하여 가열하는 경우 비등현상까지 상당한 시간이 소용될 것으로 예측되어 670 W의 히터를 사용하여 대부분의 실험을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 물 내부 온도분포 변화

실험장치 설명에서 기술하였던 것과 같이 수조 내부의 36개 지점에서 물의 온도를 측정하였으며, 이를 활용하여 등온선을 생성하였다. 350 W의 히터를 사용한 수소 내부의 온도분포는 Fig. 4에 제시되어 있다. Fig. 4에서 높이 100 mm 지점에 도시된 검은색 사각형은 히터의 윤곽을 의미한다. Fig. 4는 히터 상부에 위치한물의 온도는 자연대류 현상에 의해 비교적 균일하게 유지되는 반면히터 주변과 그 아래의 부분은 낮은 온도를 형성하고 있음을 보여준다. 또한 히터의 아래 부분에 위치한 낮은 수온의 영역은 가열시간이 140분 이상 지속된 이후에도 존재하고 있었다.

이러한 온도 성층화 현상은 물의 밀도차에 의한 것이다. 히터에 의해 가열된 물의 온도는 주변보다 높아 밀도가 낮기 때문에 부력에 의해 상승하게 된다. 이러한 유동의 상승은 Fig. 4에서 히터보다 높은 위치의 왼쪽 벽면 근처에서 발생되지만, 본 실험에서 열전대의 위치가 히터의 길이를 고려할 때 벽면에서 충분히 가깝지 않아측정이 어려웠음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 길이가 2배인 히터에 관한 추가적인 실험을 수행하여 유동상승을 측정하였으며 이러한 결과는 Fig. 5에 제시되어 있다.

부력에 의한 자연대류 현상은 히터보다 높은 곳에 위치한 물의 온도차가 크지 않도록 유지하는 역할을 한다. 하지만 히터보다 아 래 부분에 위치한 물의 온도는 낮고 밀도가 높기 때문에 순환하지

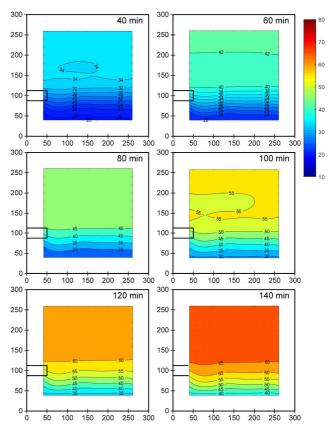


Fig. 4 Water temperature contours by the 350 W electric heater with time lapse

않게 된다. 또한 히터보다 높은 부분에 위치한 물의 온도가 상승함에 따라, 히터와 유사한 높이에 존재하는 경계면 온도는 증가하지만 그 아래에 존재하는 물에서는 유동이 발생하지 않고 온도의 성층화가 심해지는 현상을 보여주게 된다. 이러한 현상은 Fig. 4의가열 후 80분이 경과한 상태에서 등온선의 분포를 통해 알 수 있다. 수조 하부에 존재하는 물에서 온도 성층화는 계속되지만 상부 온도의 상승에 의해 물 내부에서 전도 현상이 발생하여, 가열 시간의증가에 따라 물의 온도는 지속적으로 상승하고 있음을 보여준다.

Fig. 5는 길이가 100 mm이고 용량이 670 W의 전기히터를 이용하여 물을 가열한 후 36개 지점의 온도 데이터를 활용하여 생성된 등은선을 보여주고 있다. Fig. 5에서 높이 100 mm 지점에 길이 100 mm의 검은 사각형은 사용된 히터의 윤곽을 나타낸다.

Fig. 5는 수조 내부 물 온도 분포에 대해 가열을 시작한 후 36분부터 총 7분 48초 동안의 수조 내부의 물 온도 분포변화를 등온선으로 보여주고 있다. 먼저 가열 후 36분이 경과시점에서 히터의중심부에서 가열된 물이 히터의 바로 위에 위치하고 있음을 알수 있다. 히터의 끝 부분은 발열소자가 존재하지 않기 때문에 가열은 주로 히터의 원통 표면에서 발생하게 되며 이러한 현상은 비등현상이 일어나는 경우에도 동일하게 발생하였다. 히터 상부의 물은 주변보다 더 낮은 밀도를 갖게 되고 그 결과 부력에 의해 상승

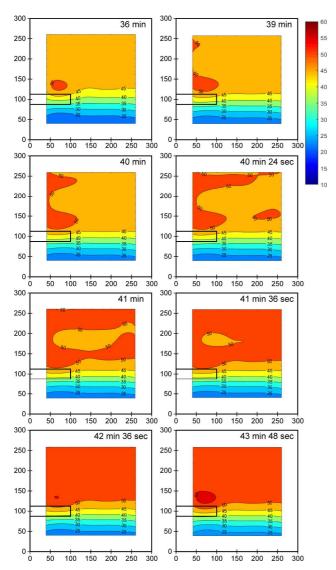


Fig. 5 Water temperature contours by the 670 W electric heater with time lapse from 36 min to 43 min 48 sec

하게 된다. 이 물은 왼쪽 수직 벽면 근처에서 상승하여, 수면의 표면 근처를 흐르다가 고온의 물이 시계방향으로 순환하는 유동 효과에 의해 오른쪽 벽면 부근에서 벽을 따라 하강하게 된다. 이러한 현상은 Fig. 5의 가열 후 40분에서 41분 사이의 등온선을 통해확인할 수 있다. Fig. 5의 가열 후 41분 36초 경과한 시점에서 등온선을 살펴보면 자연대류 현상에 의한 시계방향의 유동에 의해 수조의 상부 중심의 온도가 주변보다 낮은 영역이 존재함을 알 수 있다. 하지만 유체의 확산과 열전도 등의 효과에 의해 결국수조 상부는 거의 균일한 온도로 유지되고, 다시 히터의 상부에서 주변보다 높은 온도를 갖는 물이 발생하면서 설명하였던 순환이 반복된다. 이러한 대류 순환의 주기는 Fig. 5의 조건에서 약 8분이었다.

Fig. 5는 히터보다 높게 위치한 물에서는 자연대류에 의한 유동이 발생하고 있지만, 히터 아래 부분에 존재하는 물은 상대적으로

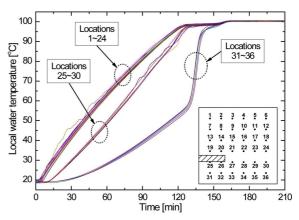


Fig. 6 Local water temperatures by the 670 W electric heater at 36 locations in the water tank with time lapse

온도가 낮고 밀도가 높아, 대류현상이 거의 발생하고 있지 않음을 보여준다. 그 결과 상부의 대류유동에 의한 유체의 혼합이 수조의 하부에는 발생하지 않으며, 온도 성층화가 유지되고 있었다.

Fig. 6은 가열 과정 중 열전대가 위치하였던 각 지점에서 시간경과에 따라 측정한 물의 온도 값을 보여준다. 온도는 크게 3개 영역으로 구분할 수 있는데 히터보다 높은 지점에 위치한 수온의 온도 영역(1번~24번 지점), 히터 바로 아래에 위치한 온도영역(25번~30번 지점), 마지막으로 가장 아래에 위치한 온도영역(31번~36번 지점)이다.

1번~24번 영역의 경우 위에서 언급하였던 것과 같이 자연대류 현상으로 인해 분명한 높이 차가 존재함에도 비교적 균일한 온도를 유지하고 있었다. 히터의 바로 아래 부분에 위치한 25번~30번 지점의 경우 히터 상부에 존재하는 물의 온도에 비해 온도 성층화의 영향으로 낮은 온도를 갖고 있음을 보여준다. 이러한 온도의 차이는 점점 감소하여 125분에 온도변화의 기울기가 급격히 감소하고 140분 정도가 되면 상부의 자연대류 영역(1번~24번 지점)과 거의 동일한 온도를 갖게 된다.

31번~36번 지점의 경우 130분까지 다른 지점의 온도에 비해 확연히 낮은 온도를 유지하고 있다가 갑자기 온도가 상승하기 시작하여 142분까지 매우 빠르게 상부의 온도에 접근한다. 이후 154분에 모든 지점의 온도는 거의 같아지며 이후 온도가 조금씩 상승하여 163분에는 모든 지점이 100°C에 도달하는 결과를 얻게 된다. 한가지 주목할 점은 130분~142분 사이의 시간에서, 동일한 높이를 갖는 지점에서의 온도차가 최대 10°C 정도 발생하고 있으며 이러한 현상이 약 12분 정도 지속되고 있다는 점이다. 이와 같은 국부적 수온의 변화는 수조 내부의 전체의 온도분포의 관점에서 분석이 필요함을 의미하며, 이를 위해 Fig. 7과 같은 시간별 수조내부의 온도분포를 등온선을 생성하였다.

Fig. 7에서 가열시작 후 126분이 경과한 조건의 등온선을 보면, 히터보다 위에 위치한 물의 온도는 거의 일정한 반면 그 아래 부분

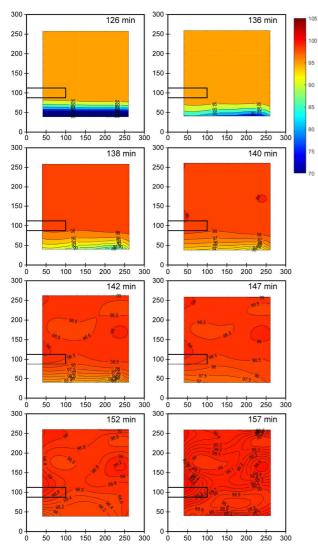


Fig. 7 Water temperature contours by the 670 W electric heater for showing stratification disappearance with time lapse from 126 min to 157 min

에는 온도의 성층화가 분명하게 존재하고 있음을 보여주고 있다. 136분이 경과한 상황에서는 31번~36번 지점이 동일한 높이임에도 온도의 차이가 존재하는 상태임을 Fig. 6을 통해 알 수 있으며, 이때 Fig, 7의 등온선은 126분의 등온선과 비교하여 완전한 수평은 아니지만 온도 성층화가 존재하고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 6에서 가열 후 130분~142분 구간에서 31번~36번 지점의 온도가상부의 수온에 빠르게 접근하고 있음을 알 수 있으며 이에 상응하는 시간에서 Fig. 7의 등온선은 어느 정도 수평을 이루는 상태에서 깊이 방향으로 온도의 차이가 감소하고 있음을 보여준다. 이러한 130분~142분 구간의 등온선을 통해, 수조하부에서 존재하였던 온도 성층화의 소멸은 대류 현상이 아닌 물 내부에서의 열전도 현상에 의해 발생하였음을 알 수 있다. 이러한 온도 성층화 현상은 가열후 147분 정도 경과한 시점에서 거의 소멸하고 있음을 보여주며, 가열 후 157분 경과된 상태에서 등온선은 수조 하부의 온도 성층화

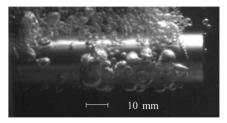


Fig. 8 Sample image of the saturated boiling at the surface of the 670 W electric heater (2,000 fps)

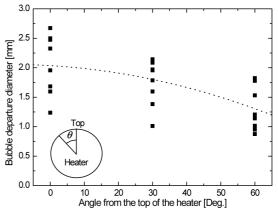


Fig. 9 The change of bubble departure diameter with respect to the location at the 670 W electric heater surface

가 완전히 소멸되어 내부의 온도가 거의 균일하게 유지되고 있음을 보여준다.

3.2 포화 비등상태에서 히터 표면의 기포 이탈지름

히터가 수조의 내부를 지속적으로 가열하게 되면 수조의 내부는 Fig. 6에서 보여주는 것과 같이 포화온도에 도달하게 되어 균일한 온도를 유지하게 되고, 히터의 표면에서 포화 비등이 발생하게 된다. 기존의 포화비등 연구는 평면에서 발생하는 현상에 관한 것이 대부분이나, 본 연구는 원통형의 전기 히터 표면에서 포화 비등이 발생하므로 이에 대한 가시화 연구를 수행하였다. Fig. 8은 본 연구에서 측정된 비등 현상에 대한 가시화 이미지의 예를 보여준다.

비등현상에서 발열된 고체 표면에 의해 가열된 액체가 기체로 상변화 하면서 기체의 크기가 일정 크기 이상이 되면 부력에 의해 표면에서 기포가 분리되어 상승하게 되는데, 이때의 기포 지름을 기포 이탈지름(bubble departure diameter)이라 한다. 본 연구에서는 히터 표면의 위치에 따른 기포의 이탈지름 변화를 고속 카메라의 이미지를 활용하여 분석하였다. Fig. 9에서 보여주는 것과 같이 정면에서 보았을 때, 히터의 수직 상부 표면을 θ 가 0°인 지점으로 정의하였으며, θ 가 0°, 30°, 그리고 60°인 지점에서 각각 10개의 기포 이탈 지름을 측정하여 그 평균을 통해 각도의 변화에 따른 기포 이탈지름 변화를 고찰하였다. θ 가 90° 이상이 되면 Fig. 8에서 보는 것과 같이 기포가 생성된 후 히터 표면을 따라 이동하면서

표면에서 지속적인 열을 공급받아 그 크기가 커지며, 또한 2개 이상의 기포가 결합하는 현상이 발생하여 기포의 이탈지름을 측정하는 것이 물리적으로 큰 의미를 갖기 어려울 것으로 판단되었다. 기포는 거의 원형을 이루거나 타원의 형상을 갖고 있었으며, 타원형기포의 지름은 [(장축길이)×(단축길이)]1/2의 공식을 활용하여 계산하였다. Fig. 9는 측정된 기포의 지름 결과를 보여준다.

Fig. 9에서 각 표면의 위치 분명하게 알 수 있는 사실은 $\theta = 0^\circ$, 30°, 그리고 60°인 지점에서 기포 이탈지름의 평균값이 각각 2.03 6, 1.802, 그리고 1.305 mm로 점점 감소하고 있다는 점이다. 이러 한 현상의 원인으로는 크게 두 가지를 고려할 수 있다. 먼저 위치 변화에 따른 표면장력 효과의 변화이다. 기포의 이탈을 결정하는 물리적 현상은 매우 다양하며 Fig. 10에 이러한 요인들이 제시되었 다. Fig. 10에서 성장하는 기포는 밀도차에 의한 부력 (F_b) 을 갖게 되며 기포가 표면에서 분리되도록 하는 힘으로 작용한다. 반면에 기포가 표면에 부착되어 있도록 하여 분리를 방해하는 힘들이 존재 하는데 이러한 힘에는 증기에 의한 관성력(F_m), 기포 주변의 관성 력 (F_i) , 기포 팽창에 따른 항력 (F_d) , 그리고 표면장력 (F_s) 이다. 분리 를 방해하는 힘 중 가장 큰 영향은 표면장력에 의한 것이다. Fig. 10에서 기포는 수평한 표면에서 이탈하는 경우를 보여주기 때문에 기포분리를 방해하는 표면장력은 $[\pi D_s \sigma \sin(C_t)]$ 로 표현된다. 하지 만 Fig. 9에서 θ 가 증가함에 따라 Fig. 10에서 표면은 기울기를 갖게 되고 이에 따라 기포분리를 방해하는 표면장력의 크기는 달라 진다. 또한 Fig. 9의 θ 변화에 따라 접촉각(C_i)은 기포형상 변화에 의해 일정하지 않게 된다. 이러한 θ 변화에 따른 부력과 표면장력 의 상호 작용력 변화에 의해 Fig. 9와 같은 기포 이탈지름 변화가 발생한 것으로 판단된다. 또한 히터의 하부(90°< θ < 270°)에서 발생한 대부분의 기포들이 히터의 상부(-90°< θ < 90°)에서 분리 되는데, 이때 표면에서 발생하는 와류에 의해 상대적으로 크기가 작은 기포도 분리되는 효과가 발생할 수 있다고 예측된다. Fig. 9의 결과에 관한 정확한 원인을 밝히기 위해서는 추가적인 연구가 필요 할 것이다.

본 연구에서 측정된 기포 크기의 타당성을 평가하기 위해 기존의 연구에서 제시된 기포 이탈지름 예측 상관식의 결과와 본 연구에서

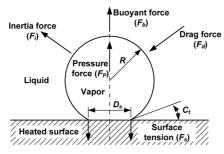


Fig. 10 Different force of single bubble on a solid surface

측정된 이탈지름을 비교하였다. Table 1은 비교에 사용된 상관식을 요약하여 제시하고 있다.

Table 1의 몇몇 상관식은 표면의 과열온도를 요구하고 있다. 표면의 과열온도를 구하기 위해 먼저 실험결과를 이용하여 표면의 열유속을 구하였고, 계산된 열유속은 90.54 kW/m² 였다. 열유속 계산을 위한 기준 면적은 Fig. 8에서 비등이 발생하는 표면을 고려하여 계산하였다. 이 열유속 값을 활용하여 기존의 상관식[16-18]에 대입하면 표면의 과열온도를 구할 수 있으며, 상관식은 Table 2에 요약되어 제시되어 있다. Rohsenow^[16], Borishansky^[17], Stephan and Abdelsalam^[18] 상관식에 의한 과열온도 예측값은 각각 13.37°C, 10.08°C, 그리고 10.99°C 였다. 본 연구에서는 세 상관식의 산술 평균값 11.48°C를 활용하여 표면의 과열온도를 정하고 이를 기포 이탈지름 상관식에 대입하였다.

대부분의 기존 상관식은 평판 조건에서 기포 이탈지름을 예측하고 있다. 본 실험은 원통형 히터 표면에서 기포 이탈지름을 관찰하

Table 1 Bubble departure diameter correlation

Authors	Correlations		
Zuber ^[11]	$Bo^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma}\right]^{\frac{1}{6}} \left[\frac{6k_l(T_{wall} - T_{sat})}{q^{\prime\prime}}\right]^{\frac{1}{3}}$		
Ruckenstein ^[12]	$Bo^{rac{1}{2}} = \left[rac{3\pi^2 ho_llpha_l^2g^{1/2}(ho_l- ho_v)^{1/2}}{\sigma^{3/2}} ight]^{rac{1}{3}}Ja^{rac{4}{3}}$		
Cole ^[13]	$Bo^{1/2} = 0.04 Ja$		
Borishanskiy et al.[14]	$D_d = 5.0 \times 10^5 \bigg(\frac{P}{P_{crit}}\bigg)^{-0.46} \bigg(\frac{k_B T_{crit}}{P_{crit} M}\bigg)^{1/3}$		
Jensen and Memmel ^[15]	$Bo^{1/2} = 0.19(1.8 + 10^5 K_1)^{2/3}$		
	$K_1 = \left(\frac{J\!a}{\operatorname{Pr}_l}\right) \!\! \left[\frac{\mu_l^2}{g\rho_l(\rho_l\!-\!\rho_v)}\right] \!\! \left[\frac{g(\rho_l\!-\!\rho_v)}{\sigma}\right]^{3/2}$		

Bo = $[g(\rho_l-\rho_v)D_d^2]/\sigma$; Ja = $\rho_l C_{P,l} (T_{wall}-T_{sat})]/(\rho_v h_{lv})$;

 D_d : departure diameter; g: gravity acceleration; k: thermal conductivity; k_B : Boltzmann constant; M: molecular weight; P: pressure; Pr: Prandtl number; $q^{''}$: heat flux; T: temperature; a: thermal diffusivity; ρ : density; μ : viscosity; σ : surface tension,

(subscript) crit: critical; l: liquid; sat: saturation; v: vapor

Table 2 Correlations for the relation between heat flux (q") and the wall superheat temperature $(T_W - T_{sat})$

Authors	Correlations		
Rohsenow ^[16]	$\begin{split} & \left[q''/\left(\mu_l h_{lv}\right)\right] \left\{\sigma/[g(\rho_l-\rho_v)]\right\}^{1/2} \\ & = \left(\frac{1}{0.0132}\right)^{1/0.33} \Pr_l^{\left(\frac{-1.7}{0.33}\right)} \left\{\frac{C_{P,l}[T_W - T_{sat}]}{h_{lv}}\right\}^{\frac{1}{0.33}} \end{split}$		
Borishansky ^[17]	$\begin{split} q'' &= (0.1011 P_{crit}^{0.69})^{3.33} [T_W - T_{sat}]^{3.33} [F(P_{red})]^{3.33} \\ &F(P_{red}) = 1.8 P_{red}^{0.17} + 4 P_{red}^{1.2} + 10 P_{red}^{10} \end{split}$		
Stephan and Adelsalam ^[18]	$q'' = 3.8[T_W \!- T_{sat}]^{1/0.327}$		

 C_P : specific heat at constant pressure; h_h : latent heat of vaporization; $P_{red} = P/P_{crit}$, (subscript) W: wall

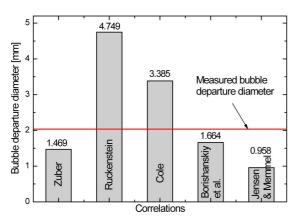


Fig. 11 The change of bubble departure diameter with respect to the location at the heater surface with 90.54 kW/m² heat flux

였으며 θ =0°인 지점이 평판에서의 비등 현상과 가장 유사하다고 판단되어, 해당 지점의 평균 기포 이탈지름 2.036 mm와 예측값의 비교를 수행하였다. Fig. 11은 측정된 기포 이탈지름과 예측값의 비교 결과이다. 비교에 사용된 Zuber^[11], Ruckenstein^[12], Cole^[13], Borishanskiy *et al.*^[14], Jensen and Memmel^[15] 상관식과 측정된 기포 이탈지름의 차이는 각각 -38.6%, 57.1%, 39.9%, -22.6%, -112.5%로 정확한 예측을 보여주는 상관식은 존재하지 않았다. 측정된 기포이탈지름이 예측 상관식과 비교하여 다소 크거나 작은 경향을 보이고 있지만, 비교를 통해 기존의 연구결과 범위에 본 연구의 측정값이 존재하고 있어 가시화 연구가 적절하게 이루어졌음을 확인하였다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 원전의 피동보조급수 시스템에서 냉각효과를 제공하는 피동 응축용 냉각탱크를 모사하기 위한 소형화된 수조를 제작하고, 삽입된 히터를 통해 가열하며, 내부 물 온도의 분포 측정 및 포화비등 현상 가시화를 수행하였다. 히터 위치를 기준으로 상부에 존재하는 물에서는 히터에 의해 가열된 물이 낮은 밀도에 의해 상승하며 수면을 따라 이동하고, 반대편 벽면을 따라 하강하는 자유대류 유동이 발생하고 있었다. 이러한 자유대류 유동의 존재는 측정된 물의 온도를 활용한 등온선을 활용하여 가시화될 수 있었다. 히터보다 낮은 위치에 존재하는 물에서는 밀도차에 의해 유동이 거의 발생하지 않아 온도 성층화 현상이 발생하고 있음을 등온 선을 통해 확인할 수 있었다. 이러한 온도 성층화 현상은 수조 내부의 온도가 포화온도에 접근함에 따라 소멸하였으며, 성승화의 소멸은 유동현상이 아닌 물 내부에서의 전도 현상에 기인하였다.

포화 비등현상의 가시화 연구에서는 히터 표면의 위치에 따라 기포 이탈지름이 달라지고 있음을 보여주었으며, 수직상부의 기포 이탈지름이 주변보다 컸다. 측정된 이탈지름은 기존의 관련 상관식들의 예측값 범위 내에 존재하여, 본 연구에서 측정이 적절히 이루어졌음을 검증할 수 있었다.

후 기

본 연구는 서울과학기술대학교 교내학술연구비 지원으로 수행되 었으며 이에 감사드립니다.

References

- International Atomic Energy Agency, 1991, The Safety of Nuclear Power: Strategy for the Future, Proc. of an IAEA Conf., Vienna.
- [2] International Atomic Energy Agency, 2009, Passive Safety Systems and Natural Circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants, IAEA-TECDOC-1624.
- [3] Moon, J. H., Kim, W. S., Kim, Y. I., Kim, M. J., Lee, H. J., 2016, A Conceptual Study of an Air-cooled Heat Exchanger for an Integral Reactor, The KSFM Journal of Fluid Machinery 19(2) 49-54.
- [4] Bae, B.-U., Kim, S., Park, Y.-S., Kang, K.-H., 2014, Integral Effect Test and Code Analysis on the Cooling Performance of the PAFS (Passive Auxiliary Feedwater System) During an FLB (Feedwater Line Break) Accident, Nuclear Engineering and Design 275 249-263.
- [5] Cho, Y.-J., Bae, S.-W., Bae, B.-U., Kim, S., Kang K.-H., Yun, B.-J., 2012, Analytical Studies of the Heat Removal Capability of a Passive Auxiliary Feedwater System (PAFS), Nuclear Engineering and Design 248 306-316.
- [6] Kim, S., Bae, B.-U., Cho, Y.-J., Park, Y.-S., Kang, K.-H., Yun, B.-J., 2013, An Experimental Study on the Validation of Cooling Capability for the Passive Auxiliary Feedwater System(PAFS) Condensation Heat Exchanger, Nuclear Engineering and Design 260 54-63.
- [7] Jeon, S.-S., Hong, S.-J., Cho, H.-K., Park, G.-C., 2015, Prediction of Nucleate Boiling Heat Transfer on Horizontal U-shaped Heat Exchanger Submerged in a Pool of Water Using MARS Code, Nuclear Engineering and Design 295 317-337.
- [8] Cho, H. K., Cho, Y. J., Yoon, H. Y., 2014, Heat Structure Coupling of CUPID and MARS for the Multi-scale Simulation of the Passive Auxiliary Feedwater System, Nuclear Engineering and Design 273 459-468.
- [9] Park, I. K., Yoon, H. Y., Park, H. B., 2018, Numerical Approach to Siphon Break Phenomena in a Research Reactor Pool Using the

- CUPID Code, Nuclear Engineering and Design 326 133-142.
- [10] Kim, S., Kim, D. E., Ryu, S. U., Lee, S. T., Euh, D.-J., 2014, Experimental Investigation on the Natural Convection Flow in Pool Boiling, Nuclear Engineering and Design 280 349-361.
- [11] Zuber, N., 1959, Hydrodynamic Aspect of Boiling Heat Transfer, U.S. AEC Report AECU 4439, June.
- [12] Ruckenstein, E., 1963, Physical Model for Nucleate Heat Transfer from a Horizontal Surface, Appli. Mech. Rev. 16, Rev. 6055.
- [13] Cole, R., 1967, Bubble Frequencies and Departure Volumes at Subatmospheric Pressure, AIChE J. 13 779-783.
- [14] Borishanskiy, V. M., Danilova, G. N., Gotovskiy, M. A., Borishanskiy, A. V., Danilova, G. P., Kupriyanova, A. V., 1981, Correlation of Data on Heat Transfer in, and Elementary Characteristics of the Nucleate Boiling Mechanism, Heat

- Transfer-Sov. Res. 13 100-116.
- [15] Jensen, M. K., Memmel, G. J., 1986, Evaluation of Bubble Departure Diameter Correlations, Proc. Eighth Int. Heat Transfer Conf., 4 1907-1912.
- [16] Rohsenow, W. M., 1962, A Method of Correlation Heat Transfer Data for Surface Boiling of Liquids, Trans. ASME 84 969.
- [17] Borishansky, V. M., 1969, Corelation of Effect of Pressure on the Critical Heat Flux and Heat Transfer Rates Using the Theory of Thermodynamic Similarity, In Problems of Heat Transfer and Hydraulics of Two-Phase Media, Pergamon Press, New York, 16-37.
- [18] Stephan, K., Abdelsalam, M., 1980, Heat-transfer Correlations for Natural Convection Boiling, Int. J. Heat Mass Transfer 23, 73-87.