

냉이온수기 냉각시스템에 관한 열유동 해석

전성오* · 이상준* · 이종철** · 김윤제****

Thermal-flow Analysis of the Cooling System in the Medicated Water Electrolysis Apparatus

Seong-Oh Jeon*, Sang-Jun Lee*, Jong-Chul Lee**, Youn-Jea Kim****

Key Words : Phase change(상변화), Cooling system(냉각 시스템), CFD(전산유체역학), Enthalpy method(엔탈피 이론), Indirect heat exchanger(간접 열교환기)

ABSTRACT

Medicated water electrolysis apparatus, which electrolyzes water into acidic water and alkaline water, was in the spotlight as becoming known the effect of alkaline water. It is known as good for health as removing active oxygen in the human's body and promoting digestion. But, the customers could not get that desired water temperature because these apparatuses are directly connected with a water pipe. So, the cooling system was developed for controlling the temperature of the alkaline water. One of the typical way is to store water in water tank and control the temperature. But, in this way, storing water can be polluted impurities coming from outside. For protecting this pollution, the cooling system based on indirect heat exchange method through phase change between water and ice was developed. In this study, we have calculated efficiency of the cooling system with phase change by experiment and commercial CFD(Computational Fluid Dynamics) code, ANSYS CFX. To consider the effect of latent heat that is generated by melting ice, we have simulated two phase numerical analyses used enthalpy method and found the temperature, velocity, and ice mass distribution for calculating the efficiency of cooling. From the results of numerical analysis, we have obtained the relationship between the cooling efficiency and each design factor.

1. 서 론

냉이온수기의 냉각시스템은 일반적으로 증발기가 설치된 냉수조에 물을 저장하여 온도를 조절하는 방식이다. 이런 시스템은 냉수조 내부로 오염물질이 침투하여 2차 오염이 발생할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 물과 얼음을 열전달 매체로 하는 간접 열교환 방식의 냉각장치를 개발하게 되었는데, 저수조에 증발기를 설치하는 직접 냉각 시스템에 비해 성능과 열전달 효율이 떨어진다. 또한, 2010년도 초에 있었던 국내 S사의 냉장고 제상시스템에서 발생한 현상에서 볼 수 있듯이 증발기 외부에 결빙되는 얼음으로 인한 효율 저하 및 기기 작동에 문제가 발생할 수 있으며, 누전과 같은 문제

로 소비자에게 심각한 피해를 줄 수도 있다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 기기 안정성을 바탕으로 한 냉각 시스템의 최적 설계가 필요하다. 이를 위해 냉각 시스템의 열유동 해석을 통한 다양한 설계 변수의 데이터베이스 구축이 필수적이다.

그러나 지금까지 냉각 유닛에 관한 연구개발에서 시스템에 관한 이론적 접근이나, 사이클 해석, 열유동 해석 및 단열 열부하 해석 등의 현상학적인 접근이 아직은 미미한 실정이다. 또한 이러한 원리들의 상세한 규명 없이 냉수조 내의 온도 분포만을 제한적으로 측정하는 실험에 의존함으로써 당면한 개발 요구에 신속히 대응하는데 어려움을 겪고 있다.

해석에서 중요한 요소는 얼음의 결빙과 해빙과정을 수식으로 표현하는 방법이다. 본 연구에서는 엔탈피 방법을 사용하여 상변화를 수치적으로 표현하였다. Shamsundar와 Sparrow[1]는 상변화 온도가 일정한 물질에서의 다차원 상변화 문제에 대한 엔탈피 모델을 제시하였고, 넓은 영역의 Stefan 수를

* 성균관대학교 대학원 기계공학과
** 강릉원주대학교 기계자동차공학부
*** 성균관대학교 기계공학부
† 교신저자, E-mail : yjkim@skku.edu

해결하기 위해 내재적 기법(implicit scheme)을 사용하였으며, Stefan 수와 Fourier 수의 상호관계를 연구하였다. Voller 그룹[2~7]은 가변 시간 단계법을 적용하여 응고와 용융, 2상 영역 및 다차원 상변화 문제 등을 연구하였다. Richard와 Bahram[8]은 상변화면에 대한 방정식과 엔탈피 방법을 결합시켜 상변화 문제를 해석하였다. Hsiao [9]는 다양한 경우에 쉽게 적용할 수 있는 알고리즘을 개발하여 기존의 방법들과 비교하였으며 타당성을 입증하였다. 상변화 문제를 해석하는 방법은 이동 격자계와 고정 격자계로 나눌 수 있는데 Morgan[10]은 고정 격자계를 이용한 엔탈피 방법의 알고리즘을 개발하였다.

본 연구에서는 전산유체역학(CFD)을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 냉수조 내부의 열유동 특성을 파악하여, 냉각 시스템의 성능 향상을 위한 최적 설계에 대해 고찰하였다. 컴퓨터 시뮬레이션의 타당성 검증과 수치해석에 필요한 데이터 확보를 위해 실험을 통하여 냉수조 내부와 얼음의 온도를 측정하였다. 컴퓨터 시뮬레이션은 범용 상용코드인 ANSYS CFX ver. 12를 이용하였다. 측정된 실험 데이터와 수치해석 결과를 비교하여 신뢰성을 검증한 뒤, 냉각 시스템을 구성하는 설계 인자들을 도출하여, 각각의 경우에 대하여 수치해석을 실시하였다.

2. 실험

냉수조 내부 온도와 증발기 및 음용수관의 입출구 온도를 측정하기 위해서 T/C (thermocouple)를 장착하였다. Figure 1 과 같이 냉수조 내부유동에 직접적인 영향을 받지 않는 12개의 지점과, 증발기와 음용수관 입구와 출구 표면에 T/C를 부착하였다. 또한 공급되는 물의 온도를 20 °C, 유량을 1.6 L/min 로 고정하였고, 펌프의 가동결과 증발기를 이용하여 온도를 조절할 수 있는 항온항습기를 설치하였다.

증발기 주위에 일정량 이상의 얼음이 얼어 증발기 가동이 중지된 뒤, 냉수조 내부 얼음의 두께와 형태를 분석하였다. 분석 후 약 3분간 1.6 L/min의 냉각된 이온수를 토출하면서, 각 부분의 온도를 1초 간격으로 수집하여 기록하였다.

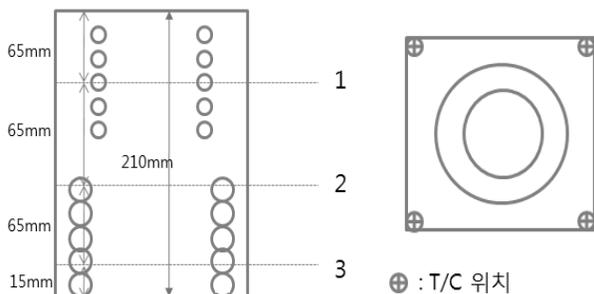


Fig. 1 Measuring points in cooling tank

3. 수치 해석

3.1 지배방정식

이상 유동(two-phase flow) 해석에 필요한 3차원 경계면 고착좌표계를 사용하는 Navier-Stokes 방정식과 상변화 계산에 필요한 엔탈피 방정식을 적용하였다. 상변화가 있는 이상 유동을 해석하기 위해 사용된 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식은 각각 다음과 같다 [11].

-연속방정식:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma_\alpha \rho_\alpha) + \nabla \cdot (\gamma_\alpha \rho_\alpha \overline{U_\alpha}) = -\Gamma_\alpha \quad (1)$$

여기서 γ_α 는 α 상의 체적분율이고, ρ_α 는 밀도이다. Γ_α 는 상변화에 따른 단위체적당 질량변화량을 나타내며, 이것은 다음과 같이 표현된다.

$$\Gamma_\alpha = \sum_{\beta=1}^{N_p} \Gamma_{\alpha\beta} = \sum_{\beta=1}^{N_p} \Gamma_{\alpha\beta}^+ - \Gamma_{\beta\alpha}^+ \quad (2)$$

여기서 $\Gamma_{\alpha\beta}^+ > 0$ 은 β 상에서 α 상으로 단위체적당 정방향 질량 흐름을 뜻한다.

-운동량방정식:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial t}(\gamma_\alpha \rho_\alpha \overline{U_\alpha}) + \nabla \cdot (\gamma_\alpha (\rho_\alpha \overline{U_\alpha U_\alpha})) \\ &= -\gamma_\alpha \nabla p_\alpha + \nabla \cdot (\gamma_\alpha \tau_\alpha) + \sum_{\beta=1}^{N_p} (\Gamma_{\alpha\beta}^+ U_\beta - \Gamma_{\beta\alpha}^+ U_\alpha) \end{aligned} \quad (3)$$

위 식에서 τ 는 전단응력의 텐서(tensor)를 나타내는 항이고, $(\Gamma_{\alpha\beta}^+ U_\beta - \Gamma_{\beta\alpha}^+ U_\alpha)$ 은 각 상의 질량 변화에 의한 운동량 변화를 나타낸다.

-에너지방정식:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial t}(\gamma_\alpha \rho_\alpha h_{\alpha,tot}) - \gamma_\alpha \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma_\alpha \rho_\alpha \overline{U_\alpha h_{\alpha,tot}}) \\ &= \nabla \cdot (\gamma_\alpha \lambda_\alpha \nabla T_\alpha) + \gamma_\alpha \nabla \cdot (\overline{U_\alpha} \cdot \tau_\alpha) + Q_\alpha \\ &+ \sum_{\beta=1}^{N_p} (\Gamma_{\alpha\beta}^+ h_{\beta s,tot} - \Gamma_{\beta\alpha}^+ U_{\alpha s,tot}) \end{aligned} \quad (4)$$

위 식에서 $h_{\alpha,tot}$ 는 α 상의 전엔탈피(total enthalpy)로 $h_{tot} = h + \frac{1}{2} U^2$ 과 같으며, λ_α 는 α 상의 열전도율 (thermal conductivity)을 뜻한다. 엔탈피와 열전도율은 온도만의 함수로 표현했으며, Q_α 는 α 상에서 다른 상으로의 열전달량을 뜻하며, 본 논문에서는 얼음에서 물로 용해되는 용해열이 적용된다.

$\Gamma_{\alpha\beta}^+ h_{\beta s,tot} - \Gamma_{\beta\alpha}^+ U_{\alpha s,tot}$ 는 상변화로 인한 질량변화에 의해

나타나지는 열전달량을 나타낸다.

물의 용해과정을 고찰하기 위해서는 상변화 문제를 수치적으로 해석하여야 하는데, 본 논문에서는 엔탈피 방법에 기초하여 각 상에서의 열전달 관계식을 이용하여 물의 용해과정에 대한 해석을 수행하였다. 우선, β 상과의 접촉면에서 α 상의 현열량 (sensible heat flux)은 다음 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$q_\alpha = h_\alpha (T_s - T_a) \quad (5)$$

또한, α 상에서 β 상으로의 현열량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_\beta = h_\beta (T_s - T_\beta) \quad (6)$$

위 식에서, h_α 와 h_β 는 α 상과 β 상의 상대적인 열전달계수 (heat transfer coefficients)를 뜻한다. 여기서 계면의 온도는 두 상의 열적 평형을 고려한 온도이고 $T_s = T_{sat}$ 라고 하면, 현열량은 $q_\alpha + q_\beta = 0$ 로 열평형을 이루게 된다. 이 때, 상변화에 의한 물질전달과 현열량을 고려한 α 상과 β 상에서의 총 열평형 방정식은 각각 식 (7)과 (8)로 나타낼 수 있다.

$$Q_\alpha = q_\alpha + \dot{m}_{\alpha\beta} H_{\alpha s} \quad (7)$$

$$Q_\beta = q_\beta - \dot{m}_{\alpha\beta} H_{\beta s} \quad (8)$$

$\dot{m}_{\alpha\beta}$ 는 α 에서 β 상으로 물질전달량(mass flux)을 나타낸 것이며, $H_{\alpha s}$ 와 $H_{\beta s}$ 는 계면에서 상변화가 일어날 때의 엔탈피를 뜻한다. 이러한 엔탈피는 질량유량과 잠열(latent heat) 값의 상관식(9~11)에 의해 결정된다.

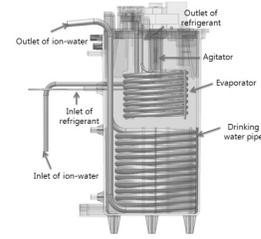
$$\dot{m}_{\alpha\beta} > 0 \Rightarrow H_{\alpha s} = H_{\alpha sat}, H_{\beta s} = H_\beta \quad (9)$$

$$\dot{m}_{\alpha\beta} < 0 \Rightarrow H_{\alpha s} = H_\alpha, H_{\beta s} = H_{\beta sat} \quad (10)$$

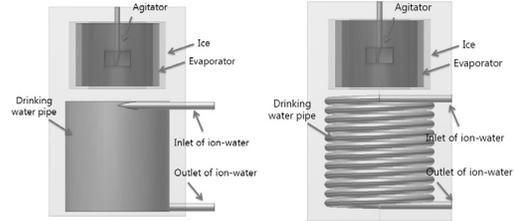
$$L = H_{\beta sat} - H_{\alpha sat} \quad (11)$$

3.2 해석모델 및 격자계

해석 모델은 국내 M사의 냉이온수기에 장착된 냉수조를 사용하여 모델링 하였으며, 그 형상은 Fig. 2(a)에 도시하였다. 실제 모델을 해석하는 것이 비효율적이고, 격자문제와 수치해석의 편리성을 도모하기 위하여 3-D CAD 프로그램 중 하나인 Inventor를 사용하여, 냉수조, 증발기, 음용수관, 교반기, 그리고 얼음 부분으로 간략화 하였다. 음용수관 증발기의 코일 형상으로 인해, 격자의 질과 개수의 문제가 발생하여 증발기와 음용수관 본래의 코일 형상을 원통(cylinder) 형상으로 간략화 하였다(Fig. 2(b) 참조). 또 다른 모델로 증발기는 원통형, 음용수관은 코일 형상으로 만든 반체 모델



(a) Structure of the Cooling tank



(b) cylinder model

(c) half model

Fig. 2 Configuration of the numerical model

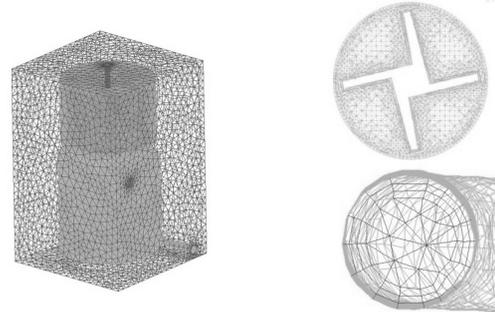


Fig. 3 Grid system of the half model

(half model) (Fig. 2(c) 참조)로 간략화하였으며, 각 모델의 타당성을 검토하였다.

교반기 내의 회전 유동 현상은 MRF (Multiple Rotating Frames) 방법을 이용하여 계산하였는데, 교반기 전체를 포함하는 유동영역을 생성하였다. MRF 방법은 회전에 의한 영향을 해석하고자 할 때 사용하는 방법으로 실제로 물체를 회전시키지 않고 실제 회전에 영향을 받는 유체격자에 회전을 주어 계산하는 방법으로 교반기와 같이 임펠러를 가진 경우에는 임펠러와 임펠러 사이의 유체격자에 회전을 주어 계산하는 방법이다.

CFD 해석을 위해 해석 대상인 냉각 유닛의 격자계를 생성하기 위하여 ANSYS ICEM CFD 프로그램을 사용하였다. 해석 대상의 형상이 복잡하여 Octree 기법을 사용하여 사면체 구조의 격자를 생성하였다. 열전달이 발생하는 경계층에 격자를 집중시키기 위해, 프리즘(prism) 기법을 이용하여 경계층 3단 이상의 육면체 격자 구조를 생성하였다. 총 격자수는 컴퓨터의 최대 해석 범위인 200만개로 조정하여 Fig. 3과 같이 생성하였다.

3.3 해석모델 및 격자계

이온수의 냉각 과정 시 냉수조 내부와 이온수의 열유동 해석을 수행하기 위하여 상용 CFD 코드인 ANSYS CFX ver. 12를 사용하였다. 냉각 시스템은 초기 냉수조 내부에 물을 유입시킨 후, 증발기 파이프 주위로 얼음이 일정량 이상 생성될 때까지 증발기와 교반기가 작동한다. 일정량의 얼음이 생성되면 증발기와 교반기는 동작을 멈추게 된다. 소비자가 냉각수 출수버튼을 누르면 냉각된 이온수가 출수되고, 이때 교반기만 1600 rpm으로 회전하면서 냉수조 내부에 강제유동을 유발시킨다(Fig. 4 참조).

본 논문에서는 냉각 시스템에서 중요한 출수과정 시 냉수조 내부에 대한 열유동 해석을 수행하였다. 실제 실험을 통해 냉수조 내부 물의 온도, 이온수의 유출입 온도, 증발기 주위의 얼음 두께를 측정하여 초기조건에 적용시켰다. 해석 초기 조건은 일정량의 얼음이 생성된 상태를 초기 조건으로 가정하였으며, 냉수조의 평균온도는 0 °C, 음용수관 내부의 이온수 온도는 14.6 °C, 얼음은 2 cm 두께로 증발기 주위에 생성되어 있고, 초기 온도는 증발기 주변에는 -3 °C로 얼음과 물의 접촉면은 0 °C로 반지름에 따라 온도가 선형분포를 이룬다고 가정하였다. 이온수는 20 °C의 온도로 1.6 L/min의 유량으로 유입되고, 출구는 대기압 조건으로 가정하였으며, 교반기의 회전수는 1600 rpm으로 고정하였다. 음용수관은 두께 0.6 mm의 SUS306 경계면 조건을 주어, 열전도 저항값을 주었다. 작동을 하지 않는 증발기와 냉수조 외부 표면은 단열조건으로 가정하였다.

냉수조 내부는 물과 얼음만 존재한다고 가정하였으며, 이온수의 모든 물성치도 물과 동일하게 가정하였다. 총 3분간의 과도해석을 수행하였으며, 계산횟수는 2000번으로 해석 시간을 단축하기 위해 초기 열유동 변화가 심한 구간에서는 시간 간격을 짧게, 변화가 거의 없는 구간은 시간 간격을 크게 하여 과도해석을 수행하였다. 난류모델은 SST(Shear Stress Transport) 모델을 사용하였다. 온도가 종속변수인 물성치는 CFX 프로그램에 있는 UDF(user defined function)를 이용하여 입력하였다.

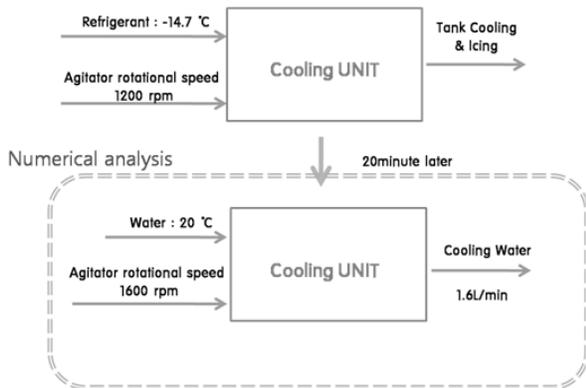


Fig. 4 Schematic diagram of the cooling system

4. 결과 및 고찰

4.1 수치해석 모델 타당성 검증

제안된 수치해석 방법과 원통 모델과 반체 모델의 타당성을 검증하기 위하여 냉수조 내부 온도와 음용수관 출구 온도를 비교하였다. 실험과 수치해석을 통한 냉수조 내부 온도 평균을 비교하여 Fig. 5에 도시하였다. 또한, 실험과 수치해석을 통한 음용수관 출구 온도를 Fig. 6에 도시하였다. 두 수치해석 모델은 실험값과 경향은 비슷하게 나타났지만, 실험값과 수치해석 결과와의 최대 상대오차는 반체 모델이 약 20%, 원통 모델이 약 50% 정도로 반체 모델이 원통 모델에 비해 좀 더 실험값과 근접한 것을 확인할 수 있다. 오차 원인으로는 얼음 용해시간의 차이와 증발기 코일 형태를 원통으로 모델링했기 때문이다. 하지만 오차의 크기나 결과값의 경향으로 보아, 본 논문에서 제안한 반체 모델과 수치해석 기법이 신뢰성을 갖는 것을 확인할 수 있다.

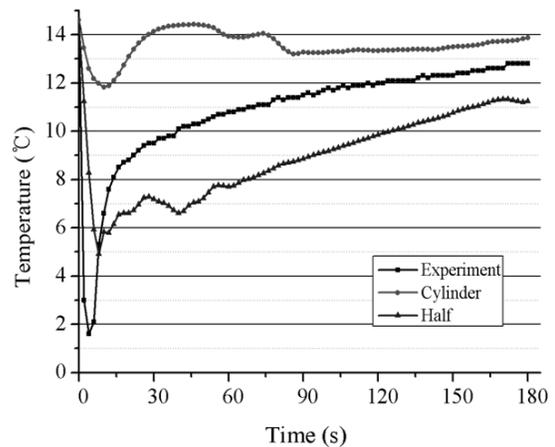


Fig. 5 The average cooling tank temperature for simulation and experiment

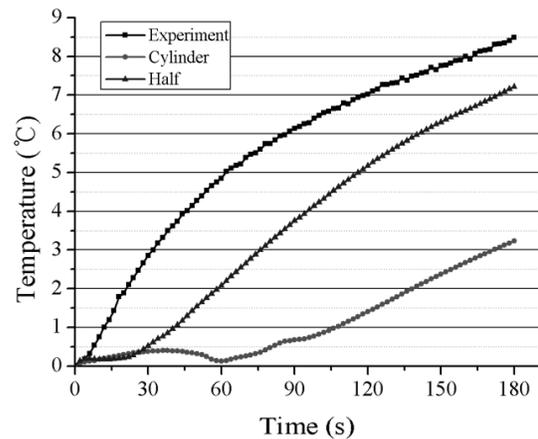


Fig. 6 The average outlet temperature for simulation and experiment

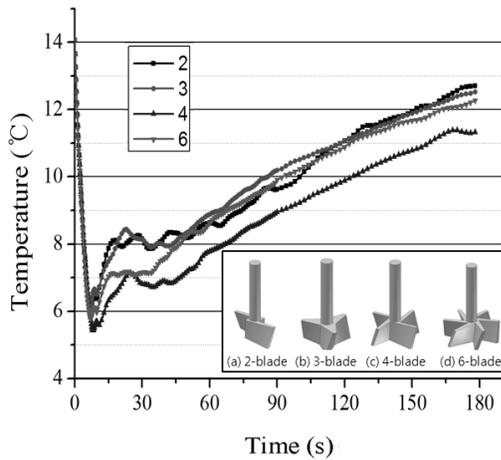


Fig. 7 The average outlet temperature for various numbers of blades during the cooling process

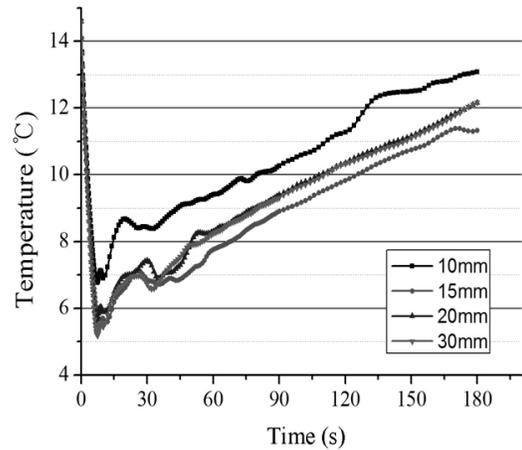


Fig. 8 The average outlet temperature for various values of the blade length

4.2 블레이드 개수 변화

냉각 시스템을 구성하는 설계 요소 중 하나인 교반기는 냉수조 내부에 강제 대류 현상과 얼음의 해빙 시간에 영향을 준다. 이로 인해, 냉수조 내부의 유동 형태 및 음용수관의 대류 계수를 결정한다. 본 연구에서는 교반기 블레이드의 종류, 크기, 개수와 교반기의 회전수와 냉각 효율간의 상관관계를 고찰하였다.

블레이드 개수는 2, 3, 4, 6개로 모델링 하여 수치해석을 수행하였다. 각 모델의 격자수는 200만개로 고정하였으며, 다른 경계조건들은 일정하다고 가정하였다. 음용수관의 입구 온도가 고정되어 있어 냉각 효율은 음용수관의 출구 온도에 의해 결정된다. Figure 7은 3분 동안의 각기 다른 블레이드 수 일 때의 출구 온도를 나타낸 것이다. 블레이드 수가 2개와 3개일 경우 온도 분포가 비슷한 것을 알 수 있다. 또한 블레이드 수가 6개일 때 20~60초를 제외한 부분의 온도 분포는 블레이드가 2개일 때와 비슷한 경향을 나타내었다. 블레이드 수가 4개일 때, 평균온도가 가장 낮기 때문에 냉각 효율이 최대인 것을 알 수 있다.

4.3. 블레이드 크기 변화

블레이드 크기는 냉수조 내부의 강제 순환 유동과 얼음의 해빙시간과 연관이 있는 설계 요소이다. 수평방향으로 크기가 증가하면 얼음과의 충돌이 일어나기 때문에 수직방향으로만 크기를 증가시켰다. 수직방향으로 10, 15, 20, 그리고 30 mm로 블레이드 길이를 변화시켜 해석을 수행하였다. 격자수는 200만개로 고정하였으며, 각각의 경우에 대하여 3분 동안의 출구 온도를 Fig. 8에 도시하였다. 10 mm를 제외하고는 모든 경우 유사한 경향이 나타나는 것을 알 수 있는데, 15 mm일 때 온도가 가장 낮게 나타나 냉각 효율이 좋다는 것을 유추할 수 있다.

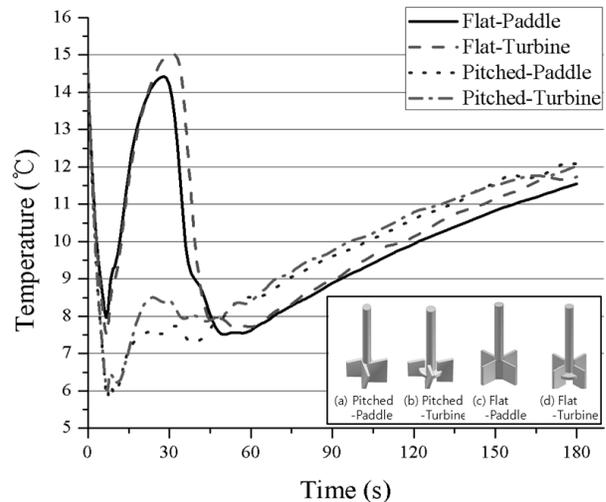


Fig. 9 The average outlet temperature for various types of agitator

4.4 교반기 형태

교반기의 형태는 냉수조 내부의 순환영역과 유동방향을 결정하는 중요한 요소이다. 냉수조에 사용될 수 있는 소형 교반기로는 플랫 터빈(plat-turbine), 플랫 패들(plat-paddle), 피치 터빈(pitched-turbine), 그리고 피치 패들(pitched-paddle)이 있다[12]. 총 4가지 형태에 대하여 수치해석을 수행하였다. 모든 경계조건은 동일하게 가정하였다. Figure 9에 각각의 교반기 형태에 따른 3분간의 온도 분포를 도시하였다. 플랫 패들과 플랫 터빈의 경우 30초 동안 온도가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 음용수관 영역과 얼음 영역의 순환이 제대로 일어나지 않아 증발기 주위 얼음이 제대로 녹지 않아 온도가 증가한 것으로 보인다. 또한, 피치 터빈일 때 온도가 가장 낮게 나타나는 것을 알 수 있는데, 냉각 효율이 가장 좋다고 할 수 있다.

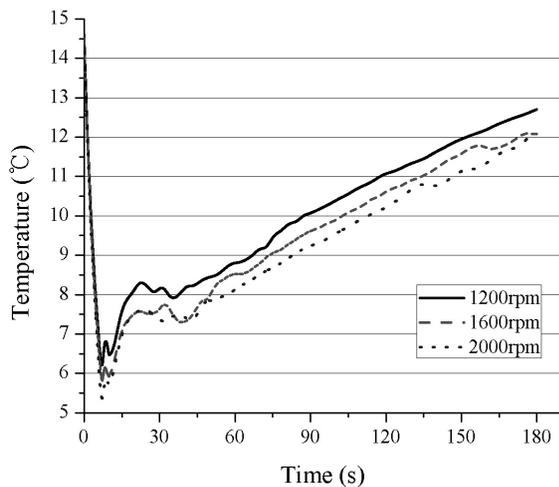


Fig. 10 The average outlet temperature for various values of the revolution velocity of the agitator

4.5 교반기 회전수

교반기 회전수 조절을 통하여 순환 속도와 얼음의 해빙 시간을 조절할 수 있다. 본 연구에서는 교반기 회전수를 1200, 1600, 그리고 2000 rpm으로 변화시키면서 열유동 해석을 수행하였다. 다른 경계조건과 격자수는 동일하게 고정하였다. Figure 10에 3분 동안의 회전수에 따른 온도 분포를 도시하였는데, 경향이 비슷한 것을 확인할 수 있다. 또한 회전수가 증가할수록, 평균 온도가 내려간다는 것을 알 수 있는데, 이는 회전수의 증가가 증발기 주위의 얼음 해빙시간을 낮추고, 냉수조 내부 순환유동을 더 촉진시키기 때문이다. 따라서 교반기 회전수가 2000 rpm일 때 온도가 가장 낮게 나타났으며, 냉각 효율이 가장 좋다고 할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 수치해석과 실험을 통해 간접냉각 시스템이 사용된 냉이온수기의 냉각 시스템 설계 요소와 냉각 효율 간의 상관관계를 고찰하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 수치해석과 실험결과의 상대오차는 약 20% 정도를 나타냈는데, 이는 증발기 코일 형태를 원통 형태로 간략화한 것과 상변화를 거시적인 관점의 엔탈피 방법을 사용한 것이 오차의 원인으로 판단된다. 그러나 오차 크거나 경향을 보았을 때 수치해석의 타당성을 검증할 수 있었다.
- 2) 블레이드 개수와 길이는 유동 형태와 냉각 효율에 영향을 미친다. 블레이드 수가 4개일 때, 그리고 블레이드 길이가 15 mm 일 때 효율이 가장 좋은 것으로 나타났다.

3) 교반기 속도와 형태는 냉수조 내부 유동 형태를 결정하는 요소이다. 피치 터빈일 때, 그리고 회전수 2000 rpm일 때 가장 효율이 좋은 것으로 나타났다.

참고문헌

- (1) Shamsundar, N. and Sparrow, E. M., 1975, "Analysis of Multidimensional Conduction Phase Change via Enthalpy Model," J. of Heat Transfer, pp. 333~340.
- (2) Voller, V. R. and Cross, M., 1983, "An Explicit Numerical Method to Track a Moving Phase Change Front," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 26, pp. 147~150.
- (3) Voller, V. R. and Cross, M., 1981, "Accurate Solution of Moving Boundary Problem" Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 25, pp. 545~556
- (4) Lacrox, M. and Voller, V. R., 1990, "Finite difference solutions of solidification phase change problem: transformed versus fixed grids," Numerical Heat Transfer, Part B, Vol. 17, pp. 25~41
- (5) Voller, V. R. and Prakash, C., 1987, "A fixed grid numerical modeling methodology for convection/ diffusion mushy region phase change problems," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 30, pp. 1709~1719.
- (6) Brent, A. D., Voller, V. R. and Reid, K. J., 1988, "Enthalpy-Porosity technique for modeling convection-diffusion phase change: Application to the melting of a pure metal." Numerical Heat Transfer, Vol. 13-1, pp. 295~318.
- (7) Voller, V. R., 1990, "Fast implicit finite-difference method for the analysis of phase change problems," Numerical Heat Transfer, Part B, Vol. 17, pp.155~169.
- (8) Richard, G. and Barhram, N., 1990, "Comparison of one-Dimensional Interface-Following and Enthalpy Methods for The Numerical Solution of Phase Change," Numerical Heat Transfer, Part B, Vol. 18, pp. 169~187.
- (9) Hsiao, J. N., 1985, "An Efficient Algorithm for Finite-Difference Analysis of Heat Transfer with Melting and Solidification," Numerical heat Transfer, Vol. 8, pp. 653~666.
- (10) Morgan, K., 1981, "A numerical analysis of freezing and melting with convection," Comp. Methods Appl. Eng, Vol. 28 pp. 275~284.
- (11) ANSYS CFX ver.12 User's Guide, 2009, ANSYS Inc.,
- (12) Paul, E. L. Atiemo-Obeng, V. A. and Kresta, S. M., 2004, Handbook of Industrial Mixing, John Wiley & Sons, New Jersey.