

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2016.40.1.001>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

냉각수 및 전기 가열 방식에 따른 요소수 해동 특성에 관한 수치해석 연구

이 승 업* · 김 만 영**

* 전북대학교 항공우주공학과

Numerical Investigation on the Urea Melting Characteristics with Coolant and Electric Heaters

Seung Yeop Lee* and Man Young Kim**

* Department of Aerospace Engineering, Chonbuk Nat'l Univ.

(Received February 22, 2015 ; Revised October 5, 2015 ; Accepted November 8, 2015)

Key Words: Urea Solution(요소수), Melting(해동), Phase Change(상변화), Coolant Heater(냉각수히터), Electric Heater(전기히터)

초록: 환원제를 이용하여 배기가스 내의 NO_x를 질소로 환원시키는 요소수 SCR 시스템은 다른 후처리 장치들 중에서 가장 효율적인 장치로 알려져 있다. 차량에 적용되는 SCR 장치는 32.5 wt%의 공융혼합물을 이용한다. 이러한 혼합물의 가장 큰 장점 중의 하나는 -11.7 °C에서 열기 때문에 추운 환경에서 응고를 피할 수 있다는 것이다. 한편, 이러한 추운 환경에서 시동시 필요한 수용액을 충분히 공급하기 위해서는 고체상을 가열해야 한다. 따라서 본 연구에서는 Fluent 상용코드를 이용하여 3차원 비정상 전산해석을 통한 냉각수 및 전기가열 방식에 따른 고체상 요소수의 시간에 따른 액상비 및 온도분포와 같은 해동 및 열전달 특성을 고찰하였다. 본 연구를 통하여 전기히터 가열 방식이 냉각수 방식보다 효율적임을 확인하였다.

Abstract: A Urea-SCR(Selective Catalytic Reactor) system, which converts nitrogen oxides into nitrogen and water in the presence of a reducing agent, creates a major exhaust gas aftertreatment system for NO_x reduction among other compounds. With regard to vehicle applications, a urea solution was chosen based on its eutectic composition of a 32.5 wt% urea-water solution. An important advantage of this eutectic composition is that its melting point of -11.7°C is sufficiently low to avoid solidification in cold environments. However, the storage tanks must be heated separately in case of low ambient temperature levels to ensure a sufficient amount of liquid is available during scheduled start ups. In this study, therefore, a numerical investigation of three-dimensional unsteady heating problems analyzed to understand the melting processes and heat transfer characteristics including liquid volume fraction, temperature distributions, and temperature profiles. The investigations were performed using Fluent 6.3 commercial software that modeled coolant and electric heater models based on a urea solution. It is shown that the melting performance with the electric heater is higher than a coolant heater and is more efficient.

- 기호설명 -

ρ : 밀도, kg/m³
 u_i : 속도, m/s
 p : 압력, Pa

μ : 동점성계수, kg/m·s
 L : 잠열, kJ/kg

1. 서론

Urea-SCR 시스템에 사용되는 요소수의 어는점 (-11 °C)이 상대적으로 높기 때문에 동절기 북유럽

† Corresponding Author, manykim@jbnu.ac.kr

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

및 북미 지역과 같은 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이하의 환경에서 동결되는 문제점을 갖고 있으며, 이러한 요소수의 물리적 특성은 SCR 장치 보급의 가장 큰 애로 사항이 되고 있다. 따라서 차량에 장착된 저장 탱크 내 요소수의 결빙을 방지하기 위한 해동 시스템을 적용하여 시동 초기 안정적인 요소수의 공급 및 분사 기술에 대한 충분한 연구가 진행되어야 한다. 하지만, 위와 같이 일정 체적 내의 물질의 용해에 관한 대부분의 연구들은 1차원 및 2차원 문제로 국한되어 상경계면과 해동 현상만으로 실험 및 수치해석이 진행되었다. 따라서 이러한 연구들을 3차원 문제에 적용하여 물질의 거동 및 해동현상에 관한 정확한 예측과 상변화에 영향을 미치는 파라미터에 대한 충분한 열전달 특성에 관한 연구가 요구된다.

Kang 등⁽³⁾은 PISO(Pressure Implicit with Splitting of Operator) 알고리즘을 이용하여 상 변화 경계면의 온도 및 액상분율의 변화를 고찰하였고, Kim 등⁽⁴⁾은 물탱크 해동과정에 대하여 초기 열전달은 전도가 주를 이루지만, 용해가 이뤄지면서 대류가 중요한 요소가 됨을 보고하였다. 한편, Hwang 등⁽⁵⁾은 요소수 해동을 위해 지그재그 및 코일형의 냉각수 가열방식을 적용하여 전산해석을 통한 해동현상을 고찰하였고, Choi 등⁽⁶⁾은 히터를 이용한 요소수 해동특성에 관한 실험적 연구를 수행하였다. 최근, Stefan⁽⁷⁾은 I-Type 형태의 전기가열방식 열원을 이용한 요소수 해동현상을 고찰하여 열원에 의한 초기 해동 및 이후 자연대류에 의한 열전달 현상을 분석하였다.

본 연구에서는 이러한 선행 연구들을 기초로 하여 차량용 Urea-SCR 시스템에 사용되는 요소수인 AdBlueTM 32.5 wt%에 대한 비정상 3차원 해동 모델을 설정하여 요소수의 해동 특성에 관한 전산해석을 수행하였다. 본 수치해석에 사용된 수치해석 모델은 Gau and Viskanta⁽⁸⁾가 수행한 순수 갈륨의 용해 실험데이터와 비교하여 검증하였다. 이와 같이 수치해의 검증을 거친 후, 약 40 ℓ의 일정 체적을 갖는 저장 탱크 내 요소수(Urea solution)의 냉각수 순환 가열 방식(Coolant heater) 및 전기 가열 방식(Electric heater)을 적용한 해동 현상에 대하여 고찰하고, 이 방법들의 해동 성능을 비교하고자 한다.

2. 수치해석

2.1 지배방정식

본 연구에서는 일정한 체적을 갖는 저장 탱크

내 요소수의 동결 및 해동현상에 관해서 고정 격자계를 이용한 Enthalpy porosity 방법⁽¹⁾을 사용하였고 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \rho g_i \beta (T - T_{ref}) + S_i \quad (2)$$

여기에서 부력항은 Boussinesq 근사를 이용하였다. 또한, S_i 는 상변화에 의한 속도 생성항으로서 아래와 같이 표현된다.

$$S_i = A u_i \quad (3)$$

여기에서 A 는 다음과 같이 액상 분율 f 의 함수로 표현되는 매개변수이다.

$$A = A_{\mu sh} (1-f)^2 / (f^3 + \epsilon) S_i = A u_i \quad (4)$$

위의 $A_{\mu sh}$ 는 상변화 영역(Mushy region)의 상수이며, ϵ 는 분모가 0이 되지 않기 위한 상수로서 1×10^{-3} 을 대입하였다.⁽⁹⁾

한편, 에너지 보존 방정식은 다음과 같다.

$$\rho \left(\frac{\partial H}{\partial t} + u_j \frac{\partial H}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + S_h S_i = A u_i \quad (5)$$

여기에서 H 는 현열엔탈피 h 와 잠열에 의한 엔탈피 ΔH 와의 합으로서 $H = h + \Delta H$ 로 표현되며, 각각의 엔탈피는 아래와 같이 표현된다. 즉,

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (6a)$$

$$\Delta H = f L \quad (6b)$$

또한, 생성항 S_h 는 다음과 같이 표현된다.

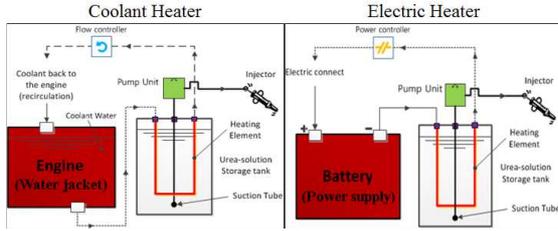
$$S_h = \frac{\partial(\rho \Delta H)}{\partial t} \quad (7)$$

한편, 물질의 상변화에 의한 운동량 및 에너지 방정식의 생성항을 구하기 위한 액상 분율 f 는 온도에 따라 다음과 같이 표현된다.

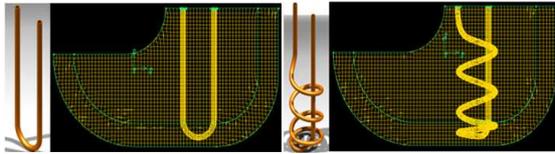
$$T \leq T_s \text{ 일 때, } f = 0 \quad (8a)$$

$$T \geq T_l \text{ 일 때, } f = 1 \quad (8b)$$

$$T_s < T < T_l \text{ 일 때, } f = \frac{T - T_s}{T_l - T_s} \quad (8c)$$



(a) Schematic of the urea heating systems



(b) Coolant and electric heating pipes and mesh systems

Fig. 1 The schematics of the urea heating and mesh systems of coolant and electric heaters

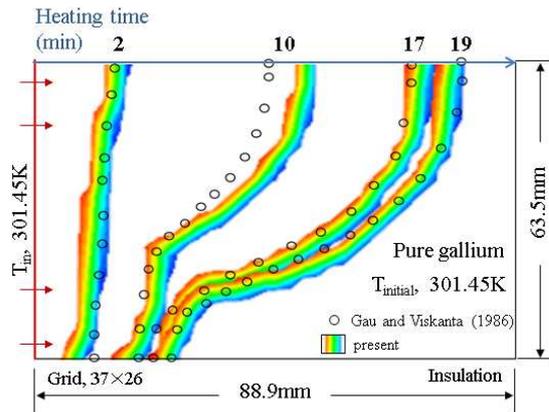


Fig. 2 Comparison for phase change boundary with experimental data for the pure Gallium

여기에서 $f=0$ 는 고체상태, $f=1$ 은 액체상태, 그리고 $0 < f < 1$ 은 상변화 과정인 상태의 Mushy region을 의미한다.

2.2 수치해석 모델

본 연구에서 사용된 요소수 분사 시스템, 냉각수 순환 및 전기가열 모델, 그리고 사용된 격자계를 Fig. 1에 도시하였다. 요소수 저장탱크의 용량은 약 40 ℓ (=550×515×300 mm³)이고, 파이프의 전열면적은 각각 0.0071 m² 그리고 0.0166 m²이다. 한편, 각 가열 모델별로 39만개 및 44만개의 격자를 생성하였고, Fluent 6.3⁽⁹⁾을 이용하여 전산해석을 수행하였다. 탱크 벽면은 모두 단열로 가정하였으며 내부에 결빙된 요소수(AdBlue 32.5 wt%)의 초기 온도는 -30 ℃로 설정하였다. 요소수의 상변화과정에서 나타나는 온도에 따른 비열

Table 1 Properties of the pure Gallium⁽¹⁸⁾

| | |
|--|----------------------|
| Density, liquid, ρ_l [kg/m ³] | 6,093 |
| Dynamic viscosity, μ_l [kg/ms] | 1.8×10^{-3} |
| Reference density, ρ_{ref} [kg/m ³] | 6,095 |
| Reference temperature, T_{ref} [K] | 302.93 |
| Melting point [K] | 302.93 |
| Latent heat, L [kJ/kg] | 801.60 |
| Specific heat, c_p [J/kgK] | 318.5 |
| Thermal expansion coefficient, β [1/K] | 1.2×10^{-4} |
| Thermal conductivity, k [W/mK] | 32 |

과 밀도의 변화는 주어진 구간에서 선형적으로 변한다고 가정하였다.^(6,10) 한편, 냉각수 순환 파이프의 재질은 STS 316으로서 열전도율은 16.3 W/m·K 그리고 비열은 500 J/kg·K으로 설정하였다. 또한 엔진에서의 냉각수는 온도조절장치로서미스터(thermistors)와 라디에이터(radiator)를 이용하여 약 80 ℃의 온도를 유지하고 펌프에 의해 순환된다. 이 때문에 냉각수로 가정한 작동유체인 물의 투입온도는 70 ℃, 순환 유량은 0.056 kg/s로 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수치해 검증

본 해석 방법의 검증을 위하여 Gau and Viskanta⁽⁸⁾가 수행한 순수 갈륨에 대한 용해 실험을 분석하였다. 88.9mm×63.5mm(길이×높이)의 직각 평면에 37×26의 격자를 생성하여 순수 갈륨의 초기 온도를 301.45 K으로 설정하였다. 좌측 벽면 이외 모든 면은 단열로 가정하였고, 좌측 벽면의 온도를 311.15 K으로 승온시켰을 때 나타난 순수 갈륨의 용해 현상에 대한 비정상상태 수치해석을 수행하였으며, 본 수치해석에 사용된 순수 갈륨의 물성치⁽⁸⁾를 Table 1에 나타냈다.

승온 이후 경과 시간에 따른 순수 갈륨의 고체/액체 상경계면을 Gau and Viskanta⁽⁸⁾의 실험 결과와 함께 Fig. 2에 도시하였다. 좌측 열원에 의한 순수 갈륨의 용해가 일어나며, 시간이 경과함에 따라 용해된 액체 갈륨의 자연 대류 현상에 의하여 상경계면의 이동은 상부에서 더욱 빠르게 우측으로 이동하고 있음을 알 수 있다. 또한, 본

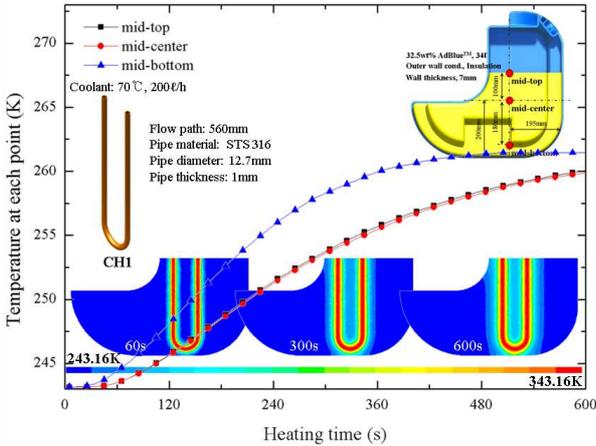


Fig. 3 Temperature distributions and profiles of melting interfaces for the case of CH1 model

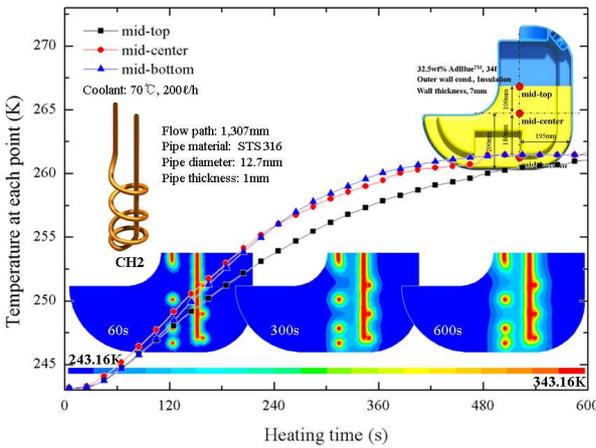


Fig. 4 Temperature distributions and profiles of melting interfaces for the case of CH2 model

수치 해석 결과는 Gau and Viskanta⁽⁸⁾의 실험 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

3.2 냉각수 순환 가열 방식

서로 다른 형상을 갖는 냉각수 순환 파이프 CH1과 CH2 모델에서 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 동결된 요소수의 해동 현상에 대한 시간에 따른 온도 변화를 Figs. 3과 4에 도시하였다. 여기에서, CH1과 CH2에 적용된 순환 파이프의 길이는 각각 560 mm 그리고 1,307 mm로서 냉각수가 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, 200 l/h 의 조건에서 나타난 각 임의의 지점의 온도 변화와 저장 탱크 단면에서의 온도 분포를 나타냈다. 냉각수 순환 가열 방식의 모든 모델에서 열원으로 작용하는 냉각수 순환 파이프의 온도가 먼저 상승한 후, 시간이 지남에 따라 순환 파이프 주변으로 고온 영역이 점차 확장되고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 가열 시간이 경과함에 따라 mid-top, mid-center, 그리고 mid-bottom 지점에서의 온도가

상승하고 있다. 한편, 각 모델에 따른 임의의 지점에 대한 온도 변화는 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다. Fig. 3에서는 mid-top과 mid-center 지점에서의 온도 변화는 거의 동일하게 나타나며, mid-bottom 지점에서 가장 빠른 온도 상승을 확인할 수 있다. 이는 순환 파이프가 절곡되어 있는 하단부와 mid-bottom 지점과의 가까운 거리에 위치하고 있기 때문에, mid-top과 mid-center 지점에서보다 요소수의 상변화 과정이 빠르게 진행됨을 알 수 있다. Fig. 4는 요소수 저장 탱크 내부의 서로 다른 세 위치에 대한 온도 변화를 나타낸 것으로서, 온도 변화는 mid-bottom 지점에서 가장 느리게 나타나고 있음을 알 수 있다. 즉, 냉각수 순환 파이프가 권선 형태를 갖고 있어 열원으로 작용하는 파이프와 인접하고 중심에 위치한 mid-center와 mid-bottom 지점에서의 온도 상승이 빠르게 나타난다.

3.3 전기 가열 방식

전기 가열 방식을 적용한 전기 코일의 형상에 따라 EH1과 EH2 모델의 해동 특성을 고찰하였으며, 앞선 모델에 냉각수 순환 가열 방식 대신 전기 가열 방식을 적용하여 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 동결된 요소수의 해동 현상에 대한 가열 시간에 따른 온도 변화를 Figs. 5와 6에 도시하였다. 여기에서 EH1 그리고 EH2 모델에서 전기 코일의 길이는 각각 559 mm 그리고 1,307 mm로서 24V, 200W 급 전기히터에 대한 경계 조건을 단순히 설정하여 전열 온도 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 조건에서 저장 탱크 내 각 임의의 지점에 대한 온도 변화와 저장 탱크 단면에서의 온도 분포를 나타냈다. 전기 가열 방식의 모든 모델에서 저장 탱크 내 열원으로 작용하는 전기 코일 부근에서 온도가 상승하여 고온의 영역이 점차적으로 확장되고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 가열 시간이 경과함에 따라 mid-top, mid-center, 그리고 mid-bottom 지점의 순서로 온도가 상승하고 있다. 한편, 각 모델에 따른 임의의 지점에 대한 온도 변화는 서로 다르게 나타나고 있다. 즉, Fig. 5에서 mid-top과 mid-center 지점에서의 온도 변화는 거의 동일하고, mid-bottom 지점에서 가장 높은 온도를 확인할 수 있다. 이는 mid-bottom 지점과 전기 코일의 하단부가 가까운 거리에 위치하고 있기 때문에 다른 부분보다 요소수의 해동이 빠르게 진행되었기 때문으로 판단한다.

한편, Fig. 6에서 나타난 온도 변화를 살펴보면, 4권선 형태를 갖는 EH2 모델의 경우 전기 코일이

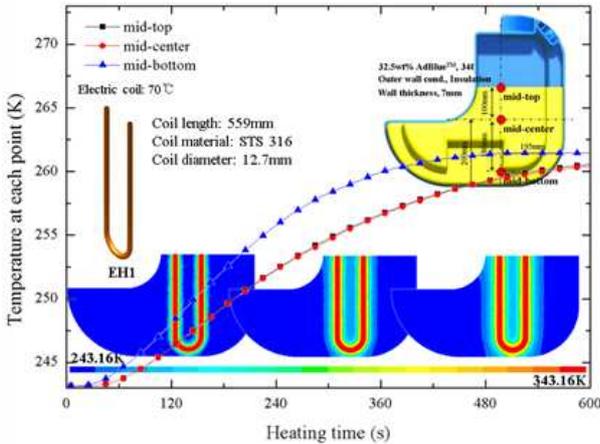


Fig. 5 Temperature distributions and profiles of melting interface for the case of EH1 model

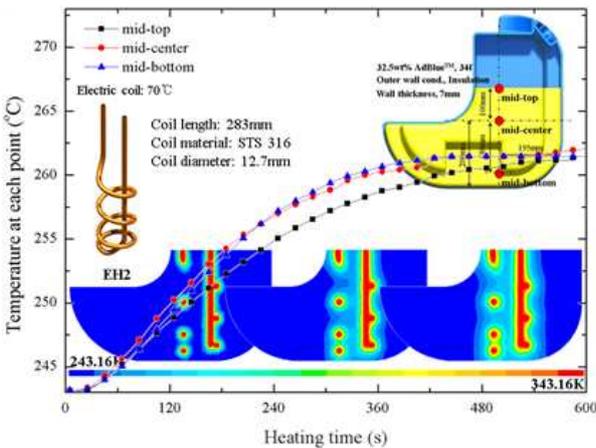


Fig. 6 Temperature distributions and profiles of melting interface for the case of EH2 model

서로 인접한 부분에서 더욱 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한, 전기 코일의 전열면은 저장 탱크 상부보다 하부에 집중되어있기 때문에 mid-top 지점보다 mid-bottom 지점에서 높게 나타났다. 또한, 전기 코일의 권선 중심에 위치한 mid-center 지점은 mid-bottom 지점과 비슷한 온도 변화를 확인할 수 있다.

3.4 해동 특성 비교

전기 코일을 이용하여 단시간에 요소수 저장 탱크 내 온도를 상승시킬 수 있는 유리한 장점을 지닌 전기 가열 방식을 적용하기 위하여 냉각수 순환 가열 방식과 비교하였고, Table 2에 위의 모델에 대한 제원 및 조건을 나타내었다.

Fig. 7은 가열 시간에 따른 저장 탱크 내 요소수의 온도 변화를 나타낸 것이다. 동일 면적을 갖는 냉각수 순환 가열 방식인 CH2 모델보다

Table 2 Conditions of coolant heaters and electric heaters for comparison about melting phenomena at urea solution

| Shape | Model | Heat transfer area (m ²) | Heating condition |
|---------------------|-------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| U type | CH1 | 0.0071 | Coolant recirculation, 70°C, 200ℓ/h |
| | EH1 | | Constant, 70°C@24V, 200W |
| 4 winding wire type | CH2 | 0.0166 | Coolant recirculation, 70°C, 200ℓ/h |
| | EH2 | | Constant, 70°C@24V, 200W |

전기 가열 방식을 갖는 EH2 모델에서 더 높은 온도 변화를 나타낸다. 즉, EH2 모델의 경우 가열 시작 이후 600초일 때 동결된 요소수의 평균 온도는 -24.46 °C로서 가열 이전인 -30 °C보다 5.54 °C 상승하였고 가장 낮은 온도 변화가 나타난 CH1 모델에서는 2.83 °C 상승하여 EH2 모델과 약 2배의 온도 차이를 보였다. 또한, 가열 시간이 경과함에 따라 CH2와 EH2 모델의 요소수에 나타난 온도차는 120초일 때 0.87 °C이며 이후 점차적으로 증가하여 600초일 때 2.13 °C로 확인하였다. 한편, CH1과 EH1의 요소수에 나타난 온도차는 120초, 360초, 그리고 600초일 때 각각 0.16 °C, 0.22 °C, 그리고 0.27 °C로 나타났다. 이는 가열 초기, 열원에 의한 동결된 요소수의 온도 변화가 클수록 가열 시간이 경과함에 따라 해동 성능이 더욱 증가됨을 알 수 있었다.

한편, 가열 시간에 따른 요소수의 액상 체적 분율과 동일 면적 당 해동된 액상 요소수의 양 (cc/mm²)을 Fig. 8에 도시하였다. Fig. 8에 나타낸 바와 같이 가열 시간이 경과함에 따라 저장 탱크 내 동결된 요소수의 온도 상승과 함께 액상 체적 분율은 증가하였으며, 동일한 70 °C의 가열 온도 조건에서 전열 면적이 상대적으로 넓은 CH2와 EH2 모델이 요소수를 가장 빠르게 해동하였다. 가열 시작 이후 1 ℓ의 액상 요소수를 얻는데 필요한 시간은 CH2와 EH2 모델의 경우 각각 150초와 185초 그리고 CH1과 EH1 모델의 경우 각각 445초와 525초가 소요되었다. 600초의 가열

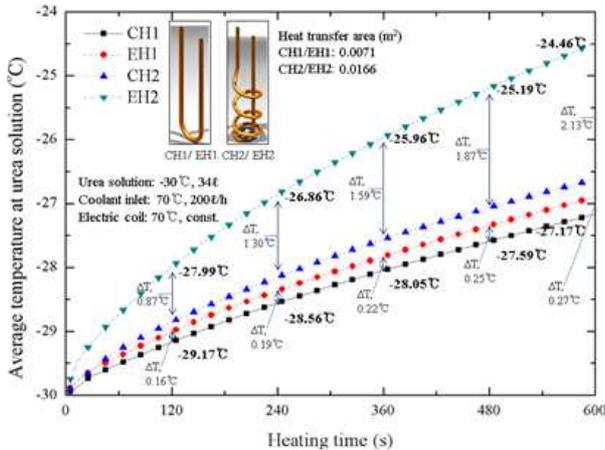


Fig. 7 Comparison of average temperature with heating time for coolant and electric heater models at urea solution

시간 동안 CH1과 EH1 모델은 1.11 ℓ와 1.24 ℓ, 그리고 CH2와 EH2 모델은 2.32 ℓ와 2.55 ℓ의 액상 요소수가 해동되었으며, 앞서 설명한 바와 같이 동일한 가열 온도 조건에서 전열 면적을 증가시키므로서 해동 성능의 향상을 기대할 수 있었다. 또한, 위의 모델에 대하여 전열 면적(mm²) 당 해동된 액상 요소수의 해동 효율을 비교하였다. 전기 가열 방식인 EH1와 EH2 모델에서 냉각수 순환 가열 방식인 CH1과 CH2 모델보다 더 높게 나타났으며, 가열 시간이 경과함에 따라 해동된 액상 요소수의 양이 증가함을 확인하였다. 가열 이후, 120초와 360초 일 때, EH1 모델의 경우는 각각 0.0578 cc와 0.121 cc로서 가장 많은 양의 요소수를 해동하였고, CH2 모델의 경우는 0.0441 cc 및 0.096 cc로 가장 적게 요소수를 해동하였다. 이는 연속적인 등온 가열을 갖는 EH 모델이 CH 모델보다 높은 전열량을 갖기 때문인 것으로 사료되며, Figs. 7과 8에서 나타난 가열 시간에 따른 온도 및 액상 체적 분율의 변화로서 전기 가열 방식이 냉각수 순환 가열 방식보다 더욱 많은 양의 요소수를 해동시킬 것으로 판단된다.

결과적으로 Figs. 7과 8을 통해 가열 초기 열원에 의한 동결된 요소수의 온도 변화가 클수록 더욱 빠른 요소수의 상 변화 과정이 진행되어 액상 체적 분율이 증가하였다. 이는 해동 과정에서 상 변화된 액상 요소수의 대류 열전달에 의한 열에너지의 확산에 기인하는 것으로 사료된다. 따라서 전열 면적을 증가시키거나 전기 가열 방식의 연속적인 등온 가열을 함으로써 해동 성능을 향상시켜 보다 짧은 시간에 해동된 액상 요소수의

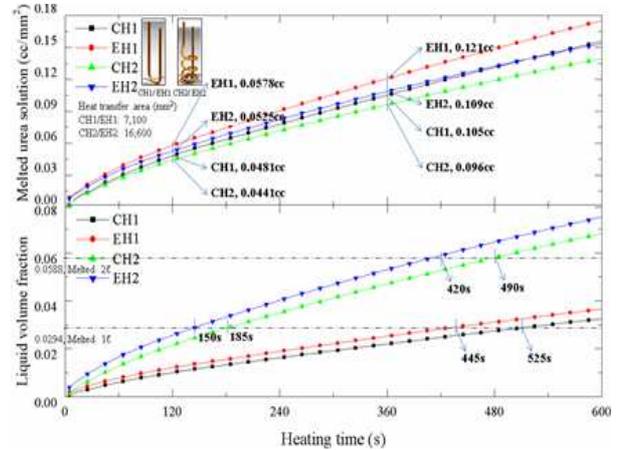


Fig. 8 Comparison of liquid volume fraction and melted urea solution with heating time for coolant and electric heater models

양을 증가시킬 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 전산해석방법을 사용하여 냉각수 순환 가열 모델(CH 모델)과 전기 가열 모델(EH 모델)에 의한 결빙된 요소수의 해동특성을 고찰하였으며, 두 모델의 해동 성능을 비교하였다. 가열 방식 및 가열원의 형상에 따라 수용액의 해동 현상과 열전달특성이 차이를 보임을 확인하였다. 전열면적의 증가는 해동 성능의 증가를 초래하고, 연속적인 등온 가열을 하는 전기 가열 방식이 냉각수 순환 가열 방식보다 높은 전열량을 갖기 때문에, 동일한 전열 면적 당 해동된 액상 요소수의 양은 전기 가열 방식이 냉각수 순환 가열방식보다 증가함으로써 더 높은 해동 성능을 나타낸다. 한편, 가장 좋은 해동 성능을 갖는 EH2 모델의 경우, 600초일 때, 5.54 °C의 온도 상승을 나타내고, 2.55 ℓ의 액상 요소수가 해동되었다.

후 기

본 연구는 환경부 Global-Top Project 친환경자동차기술개발사업단 및 2014년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 과학기술국제화사업 연구(2011-0030065)에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

- (1) Swaminathan, C. R. and Voller, V. R., 1992, "A

- General Enthalpy Method for Modeling Solidification Processes,” *Transaction of Metallurgical*, Vol.23(B), pp. 651~664.
- (2) Hong, Y. D. and Park, C. K., 2002, “Numerical Analysis on Phase-change of Pure Water by Using Moving Grid,” *Fall Conference Proceedings, KSME*, pp. 1906~1911.
- (3) Kang, K. G., Ryou, H. S. and Hur, N. K., 2003, “Numerical Analysis of Solidification and Melting Phase Change Using Modified PISO Algorithm,” *Transactions of KSCFE*, Vol. 3, No. 8, pp. 12~20.
- (4) Kim, H. K., Jeong, S., Hur, N., Lim, T. and Park, Y. S., 2007, “Numerical Analysis of Melting Process in a Water Tank for Fuel-cell Vehicle,” *Transactions of SAREK*, Vol. 19, No. 8, pp. 585~592.
- (5) Hwang, J., Heo, H. and Lee, C., 2010, “The Thawing Characteristics of Frozen Urea Solution for Heating System Design of Urea-SCR System on Commercial Heavy Duty Vehicle,” *Annual Conference Proceedings, KSAE*, pp. 1065~1069.
- (6) Choi, B. C., Seo, C. K. and Myong, K. J., 2009, “Freezing and Melting Phenomena of Ureawater Solution for Diesel Vehicle SCR System,” *Transactions of KSPSE*, Vol. 4, No. 13, pp. 5~10.
- (7) Stefan, W., 2007, “Numerical Heat Transfer and Thermal Engineering of AdBlue(SCR) Tanks for Combustion Engine Emission Reduction,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 27, pp. 1790~1798.
- (8) Gau, C. and Viskanta, R., 1986, “Melting and Solidification of a Pure Metal on a Vertical Wall,” *Journal of Heat Transfer*, Vol. 108, pp. 174~181.
- (9) Ansys Inc., Release 12.0 User’s Guide, Fluent, 2009.
- (10) Egal, M., Budtova, T. and Navard, P., 2008, “The Dissolution of Microcrystalline Cellulose in Sodium Hydroxide-Urea Aqueous Solution,” *Cellulose*, Vol. 15, pp. 361~370.