

# 냉각수 순환 가열 방식을 이용한 요소수의 동결 및 해동 특성에 관한 수치적 연구

이승엽\* · 김남일\* · 박윤범\*\* · 김만영\*†

\* 전북대학교 항공우주공학과, \*\*제주산업정보대학 자동차과

## Numerical Investigation of Urea Freezing and Melting Characteristics Using Coolant Heater

Seung Yeop Lee\*, Nam Il Kim\*, Yun Beom Park\*\* and Man Young Kim\*†

\*Dept. of Aerospace Engineering, Chounbuk Nat'l Univ.

\*\*Dept. of Automotive Engineering, Jeju College of Technology

(Received June 12, 2012 ; Revised July 3, 2013 ; Accepted July 5, 2013)

**Key Words:** Urea solution(요소수), Heat transfer(열전달), Freezing(동결), Melting(해동), Phase change(상변화), Coolant(냉각수)

**초록:** Urea-SCR은 동절기, 북유럽과 북미지역과 같은 -20°C이하의 환경에서 요소수가 동결되는 문제점을 해결해야 한다. 따라서 이러한 요소수 저장탱크에 해동 시스템을 적용하여 시동 초기, 요소수를 적정 시간 내 분사하기 위한 기술의 확보가 필요하다. 본 연구에서는 저장탱크 내 요소수의 동결현상과 냉각수 순환 가열방식을 적용한 해동현상에 대하여 상용 소프트웨어인 Fluent 6.3을 이용하여 3차원 비정상상태 수치해석을 수행하였다. 이를 통하여 요소수의 동결 및 해동과정 중 나타난 온도분포, 상경계면, 그리고 액상분율을 분석하여 열전달 특성을 고찰하였다. 결론적으로 요소수의 동결은 저장탱크 벽면으로부터 중심부로 이루어졌으며, 해동현상은 순환 파이프와 인접할수록 요소수의 상변화가 빠르게 진행하였다. 또한, 냉각수의 70°C, 200ℓ/h 조건에서 1ℓ의 액상 요소수를 얻는데 약 190초의 시간이 필요하였다.

**Abstract:** Urea-SCR technology is known as one of the powerful NO<sub>x</sub> reduction systems for vehicles as well as stationary applications. For its consistent and reliable operation in vehicle applications, however, the freezing and melting of the urea solution in cold environments have to be resolved. In this study, therefore, a numerical study of three-dimensional unsteady problems was analyzed to understand the urea freezing and heating phenomena and heat transfer characteristics in terms of urea liquid volume fraction, temperature profiles, and phase change behavior in urea solutions with time by using the commercial software Fluent 6.3. As a result, it was found that the freezing phenomenon proceeds with a phase change from the tank wall to the center, whereas the melting phenomenon occurs faster in the upper part of the storage tank by natural convection and in the adjacent part of the coolant pipe than in other parts. Furthermore, approximately 190 s were required to obtain 1L of urea solution using a 4-coiled coolant heater under conditions of 70°C and 200 L/h.

### 1. 서 론

기후변화에 관한 협약 이후, 전 세계적으로 온실가스 저감에 대한 배기규제를 마련하고 지속적으로 강화시키고 있다. 이에 따라 수송용 엔진 개발 분야에서 저배기, 고효율 및 저탄소 배출을

위해 연료 개선 기술, 최적엔진 설계 기술, 실린더 내 연소 제어기술과 LNT, HC-SCR, 그리고 Urea-SCR과 같은 후처리 장치 개발 등 다양한 분야의 연구가 진행되고 있다.<sup>(1)</sup> 이러한 연구는 가솔린 엔진에 비해 상대적으로 높은 열효율을 갖는 디젤 엔진에서 주도적으로 이루어지고 있다. 하지만, 디젤 엔진의 압축착화방식은 높은 수준의 입자상 물질(Particulate matter, PM)과 질소 산화물(Nitrogen oxides, NO<sub>x</sub>)을 배출하는 단점을 갖고

†Corresponding Author, manykim@jbnu.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

있으며, 이는 강화되는 배기규제의 주요 저감 대상 물질이다.<sup>(2)</sup> 입자상 물질은 DPF(Diesel particulate filter)를 이용하여 저감율 90%에 가까운 높은 수준까지 저감시킬 수 있지만 질소산화물의 경우, EGR(Exhaust gas recirculation) 기술만으로 배기규제를 만족할 수 없기 때문에 앞서 설명한 다양한 후처리 장치의 촉매 기술 연구가 진행되고 있다. 이 중 Urea-SCR 시스템은 배기가스의 넓은 온도 영역에서 NO<sub>x</sub>의 전환율이 높기 때문에 배기규제를 만족시킬 수 있는 촉매 기술로 인정받고 있다.<sup>(3)</sup> 하지만 Urea-SCR 시스템을 적용하기 위해서는 장착될 차량의 엔진 및 제어 시스템 설계 초기에 과도 운전에서 따른 전환율의 감소, NH<sub>3</sub> 슬립, 그리고 요소수의 안정적 공급을 위한 인프라가 구축되어야 한다.<sup>(4)</sup> 한편, Urea-SCR 시스템에 사용되는 요소수는 동절기 약 -20℃ 이하의 환경을 갖는 북유럽과 북미 지역에서 동결되는 문제가 발생한다. 따라서 이러한 요소수 저장 탱크에 해동 시스템을 적용하고 시동 초기 분사에 필요한 액상 요소수를 적정 시간 내에 안정적으로 공급 가능한 기술의 확보가 필요하다.

일정 체적 내 물질의 응고와 용융에 대한 상변화 연구에서는 Voller 등<sup>(5)</sup>가 제안한 엔탈피 방법이 주로 사용되고 있다. 즉, 엔탈피 방법은 이동격자계 방법<sup>(6)</sup>과 달리 고정격자계 방법을 사용하여 상변화에 따른 잠열 및 물질의 거동을 각 보존 방정식의 생성항으로 처리하여 해동현상을 분석하는 방법으로 상변화에 따른 유체/고체 경계면이 존재하는 문제에 효율적으로 적용되고 있다. 한편, Kang 등<sup>(7)</sup>은 PISO 알고리즘을 이용하여 상변화 경계면의 온도 및 액상 분율의 변화에 대한 연구를 수행하였으며, Jana 등<sup>(8)</sup>은 Czochralski 반응기 내부에서 발생한 물질의 응고와 용융과정에서 수정(Crystal)의 성장 및 소멸에 대한 해석연구를 수행하였다. 최근, Wiesche<sup>(9)</sup>는 해동된 요소수의 열전달 현상에 의해 발생하는 자연대류에 대한 실험 및 해석연구를 수행하였고, Lee 등<sup>(10)</sup>은 동결된 요소수의 냉각수 순환 가열원 형상에 따른 우레아 수용액의 해동특성에 관한 연구를 수행하였다. 한편, Choi 등<sup>(11)</sup>은 냉각수 가열방식을 이용하여 전열 면적과 유량 조건에 따른 요소수 해동 및 동결에 관한 실험적 연구를 수행하였다. 하지만, 본 연구와 같이 요소수(Urea solution)의 응고 및 해동 현상에 관하여 수치해석 연구는

미비한 실정이다. 따라서 수치해석을 통한 저장 탱크 내 효율적인 해동시스템 구축을 위해서는 가열원 및 제반 파라미터가 고려된 열전달 해석이 선행되어야 한다.

본 연구에서는 수치적 방법을 이용하여 디젤엔진 차량에 장착된 요소수 저장 탱크 내의 동결 현상 및 냉각수 순환 가열방식에 의한 해동 현상을 고찰하였다. 동결 및 해동 현상에 대하여 Choi 등<sup>(11)</sup>가 수행한 요소수의 동결 실험데이터와 Gau and Viskanta<sup>(12)</sup>가 수행한 순수 갈륨의 용해 실험데이터를 비교하여 본 연구에 사용된 수치적 방법을 검증한 후, 시간에 따른 요소수 저장 탱크 내의 온도, 액상분율, 그리고 상변화 경계면에 대하여 분석하였으며, Urea-SCR 시스템에서 분사에 필요한 액상 요소수를 안정적으로 공급하기 위한 흡입 튜브의 최적 위치를 고찰하였다.

## 2. 수치해석

### 2.1 지배방정식

본 연구에서는 Voller 등<sup>(5)</sup>가 제안한 고정격자계를 이용한 엔탈피 방법을 사용하였다. 물질의 비정상상태에 대한 고체와 액체의 상태변화에 따른 상 경계면의 이동과 온도 및 유동장을 계산하기 위하여 사용된 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  $\rho$ ,  $u_i$ ,  $p$ , 그리고  $\mu$ 는 각각 밀도, 속도, 압력, 그리고 점성계수를 나타내며, 부력항은 Boussinesq 근사를 이용하였다. 또한,  $S_i$ 는 상변화에 의한 속도 생성항으로써 아래와 같이 표현된다. 즉,

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

여기에서  $A$ 는 다음과 같이 액상분율  $f$ 의 함수로 표현되는 매개변수이다. 즉,

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

위의  $A_{mush}$ 는 상변화 영역의 상수 값이며,  $\epsilon$ 은 분모가 0이 되지 않기 위한 상수로서  $1 \times 10^{-3}$ 을 대

입하였다.<sup>(14)</sup>

한편, 에너지 보존 방정식은 다음과 같다.

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

여기에서  $H$ 는 현열엔탈피  $h$ 와 잠열에 의한 엔탈피  $\Delta H$ 와의 합으로써  $H = h + \Delta H$ 으로 표현되며, 각각의 엔탈피는 아래와 같다.

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

$$\Delta H = fL \quad (6b)$$

여기서,  $L$ 은 용해잠열을 나타낸다. 한편, 생성항  $S_h$ 는 다음과 같이 표현된다. 즉,

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

한편, 물질의 상변화에 의한 운동량 및 에너지 방정식의 생성항을 구하기 위한 액상분율  $f$ 는 온도에 따라 다음과 같이 표현된다.<sup>(5)</sup> 즉,

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

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

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

여기에서  $f = 0$ 은 고체상태,  $f = 1$  액체상태, 그리고  $0 < f < 1$ 은 상변화 과정인 상태를 의미한다.

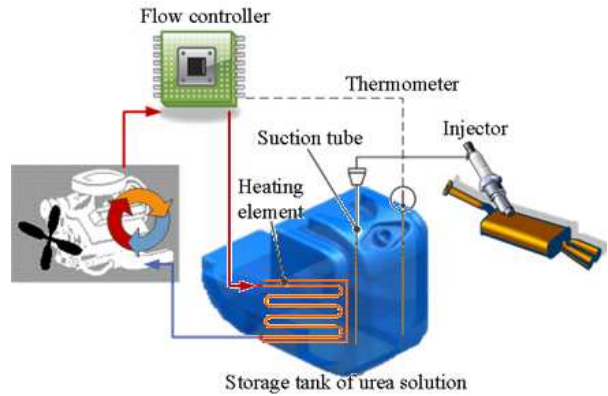
## 2.2 수치해석 모델

본 연구에서는 상용 소프트웨어 Fluent 6.3을 사용하여 3차원 비정상상태 전산해석을 수행하였다.<sup>(13)</sup> 수치해석은 2차 풍상차분법(Second order upwind scheme)과 고정 격자계(Fixed grid)를 이용하였다. 또한, 온도 및 유동장을 구하기 위한 에너지 방정식과 운동량 방정식의 연결은 PISO 알고리즘을 사용하였으며, 요소수의 온도에 따른 밀도와 비열의 변화<sup>(14)</sup>는 Polynomial-Linear 보간법을 통하여 계산하였다.

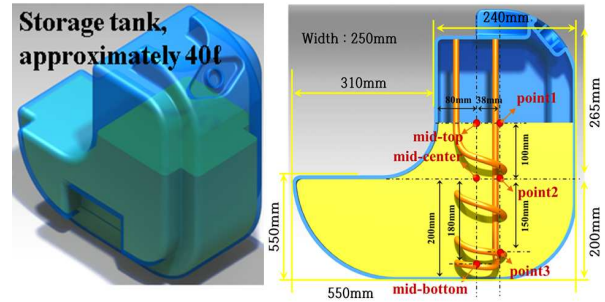
한편, 본 연구에 적용한 Urea-SCR 분사 시스템의 개략도와 요소수 저장 탱크 및 냉각수 순환 가열모델을 Fig. 1에 도시하였다. 8ℓ 급 디젤엔진 차량에 장착된 요소수 저장 탱크의 전체 체적은 약 40ℓ를 갖는다. 동결 모델은 저장 탱크 내 요소수의 동결과정에서 나타나는 부피팽창에 의한 문제점을 방지하고자 15%의 안전여유를 고려하

**Table 1** Properties data for 32.5wt% AdBlue™<sup>(14)</sup>

Density, solid, $\rho_s$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1,010
Density, liquid, $\rho_l$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1,090
Dynamic viscosity, $\mu_l$ [kg/m·s]	1.4
Reference density, $\rho_{ref}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1,095.6
Reference temperature, $T_{ref}$ [K]	283.16
Freezing/Melting point [K]	262.16
Latent heat, $L$ [kJ/kg]	152.86
Thermal expansion coefficient, $\beta$ [1/K]	$4.5 \times 10^{-4}$
Thermal conductivity, $k$ [W/m·k]	0.57



(a) Urea injection system with heating element in the tank



(b) Urea storage tank and coolant heater

**Fig. 1** Schematics of the Urea-SCR system and coolant heater adopted in this work

여 저장 탱크 체적에 85%가 채워진 약 34ℓ의 요소수에 대하여 저장 탱크 벽면 외부를 -30℃의 일정한 온도 조건으로 설정하였다.

또한, 저장 탱크의 규격(가로×세로×높이)은 약 550mm×250mm×465mm를 갖으며, 벽면의 두께는 7mm, 재질은 일반적으로 압출 성형품에 널리 사용되는 합성수지인 폴리프로필렌으로 가정하여 열전도율은 0.12W/m·K, 비열은 2J/kg·K로 설정하였다. 이와 함께, 가열 모델로는 저장 탱크 내부

에 4권선 형태의 냉각수 순환 파이프를 열원으로 사용하였고, 결빙된 34ℓ 요소수의 초기 온도는 -30℃, 저장 탱크 벽면은 모두 단열로 가정하였다. 냉각수 순환 파이프의 전열 면적은 약 0.0166m<sup>2</sup> (Ø12.7×1,307mm)이고 두께는 1mm, 재질은 STS 316으로서 열전도율은 16.3W/m·K, 그리고 비열은 500J/kg·K로 설정하였다. 한편, 냉각수로 가정한 물(Freezing point: -60℃)의 투입온도는 70℃, 순환 유량은 200ℓ/h로 설정하였다. 또한, 위의 요소수의 동결 및 해동에 대한 수치해석을 수행하기 위하여 각각 140만개와 720만개의 격자를 사용하였다. 한편, 요소수로 사용된 32.5wt% AdBlue™의 물성치<sup>(14)</sup>를 Table 1에 나타냈다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 수치해석의 검증

본 수치해석 방법을 검증하기 위하여 Choi 등<sup>(11)</sup>이 수행한 동결 실험데이터와 Gau and Viskanta<sup>(12)</sup>가 수행한 순수갈륨 용해 실험데이터를 분석하였다. Choi 등<sup>(11)</sup>은 온도센서가 부착된 저장 탱크에 33.44ℓ의 AdBlue™를 채워 -30℃의 일정한 온도가 유지되는 냉동고에 넣어 요소수를 동결시키는 실험을 수행하여, 부착된 모든 온도 센서에서 -30℃가 될 때까지의 동결 시간을 측정하였다. 한편, 본 수치해석은 34ℓ의 요소수에 대하여 저장 탱크 외부 벽면은 외기 -30℃ 대류 조건으로 설정하여 시간이 지남에 따라 나타난 저장 탱크 내부의 온도 데이터를 Choi 등<sup>(11)</sup>의 실험결과와 함께 Fig. 2에 도시하였다.

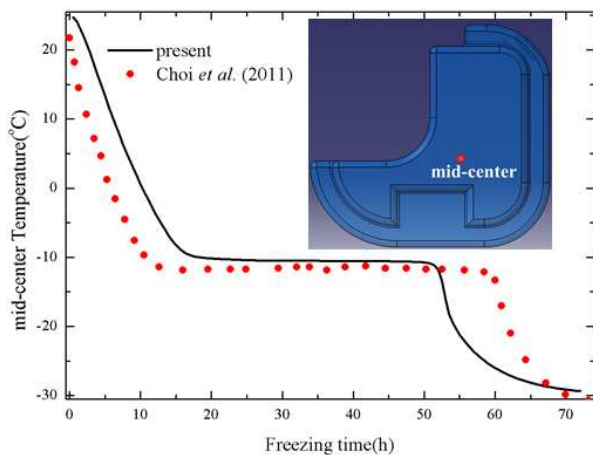


Fig. 2 Comparison of temperature profiles at mid-center for freezing phenomena in 34ℓ urea solution

동일한 온도 측정 위치 mid-center지점에서의 온도변화는 동결점인 -11℃까지 급격한 온도 하강이 이뤄지며, 상변화 과정에서의 일정한 온도가 유지되는 것을 확인 할 수 있다. 또한, 본 수치해석 결과는 Choi 등<sup>(11)</sup>의 실험결과와 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

한편, 순수 갈륨의 용해 현상에 대한 2차원 비정상상태 해석을 수행하기 위하여 Fig. 3과 같이 가로 88.9mm, 세로 63.5mm의 직각 평면에서 37×26의 격자를 생성하였으며, 본 수치해석에 적용한 순수 갈륨에 대한 물성치<sup>(12)</sup>를 Table 2에 나타냈다. 갈륨의 초기온도  $T_{initial}$ 는 301.45K이며, 좌측 벽면의 온도  $T_{in}$ 를 311.15K으로 승온 시켰을 때 나타나는 상 경계면을 Gau and Viskanta<sup>(12)</sup>가 수행한 실험데이터와 함께 도시하였다. 좌측 열원에 의하여 순수갈륨에서 용해 현상이 나타나며 시간이 지남에 따라 용해되는 갈륨의 상 경계면이 우측으로 이동하고 있음을 알 수 있다. 또한 본 수치해석의 결과는 Gau and Viskanta<sup>(12)</sup>가 수행한 실험데이터와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Table 2 Properties of the pure Gallium<sup>(12)</sup>

Density, liquid, $\rho_l$ [kg/m <sup>3</sup> ]	6,093
Dynamic viscosity, $\mu_l$ [kg/m·s]	1.8x10 <sup>-3</sup>
Reference density, $\rho_{ref}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	6,095
Reference temperature, $T_{ref}$ [K]	302.93
Latent heat, $L$ [kJ/kg]	801.60
Melting point [K]	302.93
Specific heat, $c_p$ [J/kg·K]	381.5
Thermal expansion coefficient, $\beta$ [1/K]	1.2x10 <sup>-4</sup>
Thermal conductivity, $k$ [W/m·K]	32

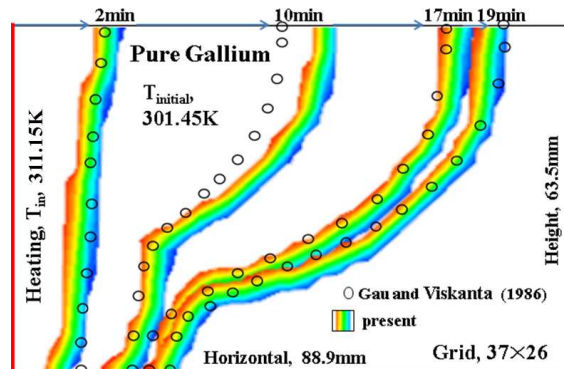


Fig. 3 Schematic of the calculated domain and comparison of liquid fraction for phase change of the pure Gallium



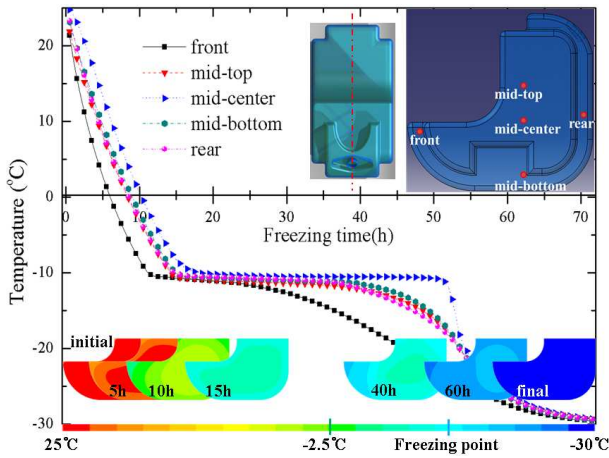
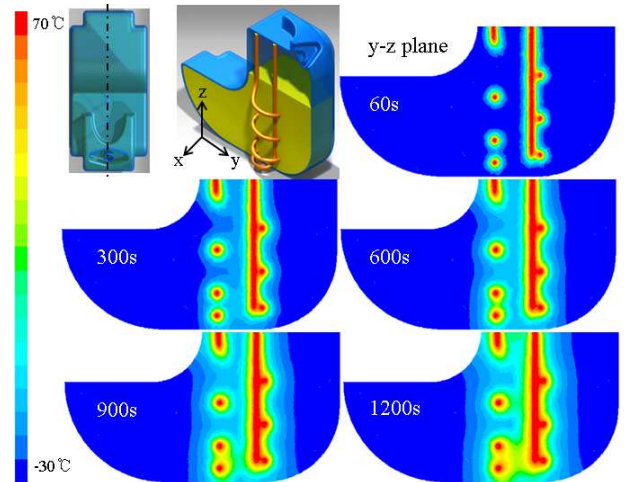


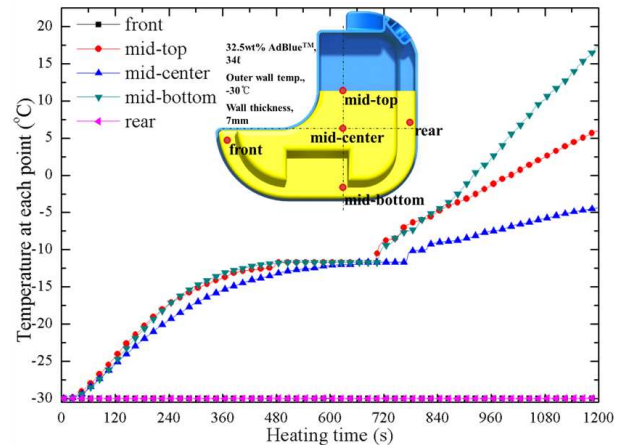
Fig. 4 Temperature profiles of freezing phenomena in urea solution

### 3.2 저장 탱크 내 요소수의 동결 특성

요소수 저장 탱크의 동결 현상 및 열전달 특성을 파악하기 위하여 저장 탱크 외부의 온도를  $-30^{\circ}\text{C}$ 로 설정하여 34ℓ의 요소수가 완전히 동결될 때까지의 시간에 따른 각 위치에서의 온도분포를 분석하였다. Fig. 4는 시간이 지남에 따라 나타난 요소수 저장 탱크 내의 각 지점에 대한 온도변화를 보여주고 있다. 냉각 시작 이후, 요소수는 약  $-11^{\circ}\text{C}$ 까지 급격한 온도변화를 보여준다. 이때, front, mid-top, mid-center, mid-bottom, 그리고 rear 지점에서  $-11^{\circ}\text{C}$ 에 도달하기까지의 냉각시간은 각각 12h, 14h, 18h, 14h, 그리고 15h으로서 front에서 가장 빠르고 mid-center에서 가장 느리게 나타났다. 요소수의 동결온도인  $-11^{\circ}\text{C}$ 에 도달하고 난 이후, 각 위치에서 일정한 온도를 유지하는데, 이 때 액상의 요소수가 고체 상태로 상변화하고 있음을 알 수 있다. 일정한 온도를 유지하는 상변화 과정이 이루어진 시간은 각 front, mid-top, mid-center, mid-bottom, 그리고 rear 지점에서 각각 12h, 19h, 23h, 22h, 그리고 21h으로서 front 지점에서 가장 빠르고 mid-center 지점에서 가장 느리게 진행되는 것을 확인하였다. 또한, 50시간 이후로는 동결된 요소수의 열전달에 의하여 외부 온도 조건인  $-30^{\circ}\text{C}$ 까지 낮아져 열평형이 이루어지는 것을 알 수 있었다. 저장 탱크 내 요소수의 동결 과정은 저장 탱크 외부와의 대류열전달을 거쳐 탱크 벽면 그리고 동결된 요소수와 열전도에 의하여 진행되며 이는 저장 탱크 내 요소수가 벽면부터 중심부로 동결 현상이 이루어지는 것을 확인할 수 있다.



(a) Temperature distributions at center plane with time



(b) Temperature profiles of melting phenomena with time  
Fig. 5 Heat transfer characteristics of melting phenomena in 34 ℓ urea solution tank

### 3.3 냉각수 순환 가열방식의 해동 특성

Fig. 5는 냉각수 순환 파이프를 적용하여 냉각수  $70^{\circ}\text{C}$  및  $200\text{ℓ/h}$  조건에서  $-30^{\circ}\text{C}$ 로 동결된 요소수의 해동현상에 대한 시간에 따른 온도변화를 도시한 것이다. Fig. 5(a)를 살펴보면, 저장 탱크 내 열원으로 작용하는 냉각수로 인하여 순환 파이프의 온도가 먼저 상승한 후, 시간이 지남에 따라 순환 파이프 주변으로 고온의 영역이 점차 확장되고 있음을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 5(b)에서 확인할 수 있듯이 시간이 지남에 따라 나타난 front, mid-top, mid-center, mid-bottom, 그리고 rear 지점에서의 온도변화로써 가열 시작 이후, mid-top, mid-center, mid-bottom 지점에서는 동결점인  $-11^{\circ}\text{C}$ 까지 급격한 온도변화가 이루어지고 있다. 한편, 저장 탱크의 하부 지점인 mid-bottom에서 1200초일 때의 온도는  $17.5^{\circ}\text{C}$ 로 가장 높게 나타

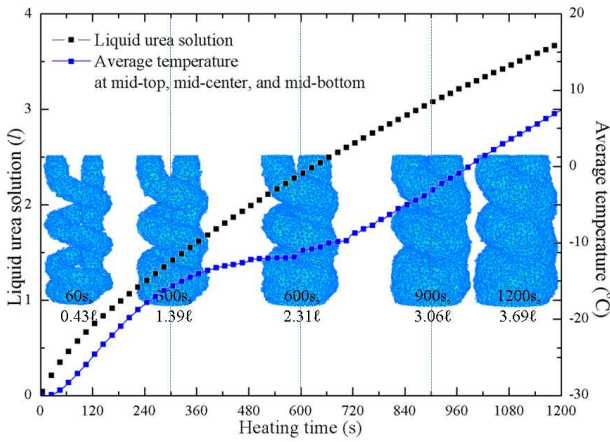
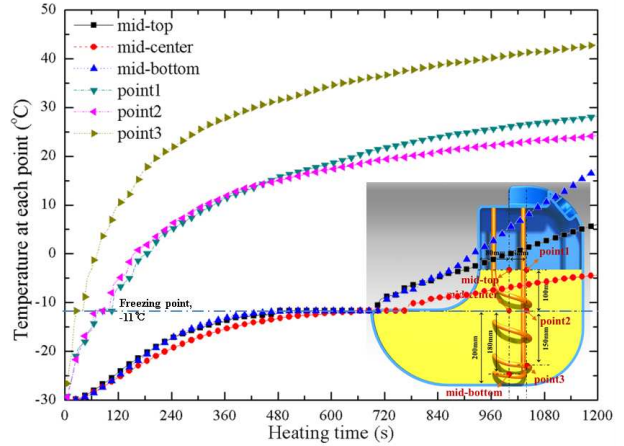
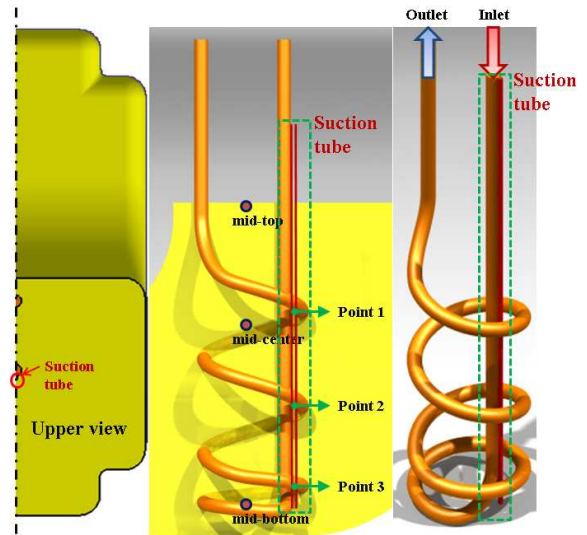


Fig. 6 Average temperature and liquid fraction for melting phenomena in 34ℓ urea solution tank

나며 탱크 중심부의 mid-center 지점보다 탱크 상부인 mid-top 지점에서 높은 온도를 보였다. 이는 하부에 집중된 순환파이프로 인한 mid-bottom의 급격한 온도변화와 더불어 상부로 치중된 액상 요소수의 대류열전달 영향으로 mid-center보다 mid-top의 온도상승이 더 높게 나타남을 확인할 수 있다. 반면, 순환 파이프와 멀리 떨어져있는 front와 rear지점의 온도변화는 가열 시작 이후 거의 나타나지 않았다. 또한, 저장 탱크 내 요소수의 온도변화는 해동된 액상 요소수의 자연대류 현상에 의한 탱크 상부와 순환 파이프가 서로 인접한 부분에서 보다 높은 온도분포를 나타내고 있다. 한편, 동결된 요소수의 가열 시간에 따른 저장 탱크 내부의 평균 온도 및 상 경계면의 변화와 액상 요소수의 양을 Fig. 6에 도시하였다. 가열 시작 이후, 요소수 저장 탱크 내부의 온도는 점차 상승하며, 액상 요소수의 양도 증가하는 것을 확인할 수 있다. 상 경계면의 경우, 60초일 때는 순환 파이프 형상과 비슷한 상 경계면이 발달하였으며, 시간이 지남에 따라 순환 파이프가 서로 인접한 부분과 하부에서 보다 넓은 상 경계면을 보였다. 이는 열원으로 작용하는 순환 파이프가 서로 인접하고 저장 탱크 하부에 집중되어 주변 요소수의 온도변화가 빠르고 해동된 액상 요소수의 자연대류 현상에 의한 것으로 판단할 수 있다. 해동된 액상 요소수의 경우, 300, 600, 900, 그리고 1,200초로 경과함에 따라 각각 1.39, 2.31, 3.06, 그리고 3.69ℓ로 나타났다. 위의 Fig. 5(a)와 같이 저장 탱크 내 요소수의 온도분포에 따른 상 경계면의 변화는 비슷한 경향을 보였다. 앞서



(a) Temperature profiles at each point in center plane



(b) Location of temperature point and suction tube

Fig. 7 Temperature profiles at each point and the optimum location for suction tube at storage tank

언급한 것처럼, 저장 탱크 내부의 해동 과정은 열원인 냉각수 순환 파이프로부터 동결된 요소수의 열전달이 진행되며 이에 따른 동결된 요소수에서 상변화가 발생한다. 또한, 상변화 된 요소수의 자연 대류 및 열원이 인접한 부분에서 더욱 확장되는 것을 알 수 있다. 따라서 Urea -SCR 시스템에서 요소수 분사에 필요한 흡입튜브의 최적 위치는 저장 탱크 내에서 동일한 가열 시간 동안 온도변화 및 상변화 과정이 빠르게 일어나야 한다. 이에 대하여 앞서 설명한 것과 같이 순환 파이프가 서로 인접한 위치로서 임의의 지점에 대한 온도변화를 Fig. 7(a)에 나타냈으며, 각 지점의 위치를 Fig. 7(b)에 도시하였다. Fig. 7(a)의 Point

1, Point 2, 그리고 Point 3의 온도는 가열 시작 이후 급격한 온도변화가 나타나며 60초일 때 Point 3 지점은  $-3^{\circ}\text{C}$ 까지 온도가 상승하였다. 또한, mid-top, mid-center, 그리고 mid-bottom 지점의 온도가 동결점( $-11^{\circ}\text{C}$ )에 도달한 약 700초일 때, Point 1, 2, 그리고 3 지점의 온도는 모두 동결점보다 높은 각각  $21.3$ ,  $19.1$ , 그리고  $36^{\circ}\text{C}$ 까지 상승하였다. 이를 통하여 냉각수 순환 파이프 중심에 위치한 mid-top, mid-center, 그리고 mid-bottom 지점보다 순환 파이프와 인접한 Point 1, 2, 그리고 3 지점의 온도가 빠르게 상승하는 것을 확인할 수 있었다.

따라서 저장 탱크 내 요소수는 열원으로 작용한 순환 파이프와의 거리가 가까울수록 온도변화가 빠르게 진행되는 것을 확인하였다. 또한, 앞서 언급한 것과 같이 흡입튜브는 Fig. 7(b)에 나타낸 위치 즉, 열원으로 작용하는 냉각수가 투입되는 입구로부터 저장 탱크 하부로 이어지는 순환 파이프와의 밀접한 위치에 삽입하는 것이 유리하다. 이로써 냉각수 순환 가열 방식 열원을 이용하여 시동 초기, 해동된 액상 요소수를 최단 시간에 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 전산해석을 통하여 요소수의 동결, 냉각수 순환 가열 방식에 의한 해동 특성 및 요소수 흡입 튜브의 최적 위치에 대하여 고찰하였다.  $34\text{l}$ 의 요소수를  $-30^{\circ}\text{C}$ 로 완전히 동결하는데 약 72시간이 소요되었으며, 동결 과정은 저장 탱크 벽면으로부터 중심부로 진행되었다. 또한, 4권선 냉각수 순환 파이프를 이용한 요소수의 해동 현상은 순환 파이프가 서로 인접한 부분과 해동된 액상 요소수의 자연대류에 의한 저장 탱크 상부에서 그 외 부분보다 빠르게 진행하였으며, 냉각수의  $70^{\circ}\text{C}$  및  $200\text{l/h}$  조건에서  $1\text{l}$  요소수를 해동하는데 약 190초의 시간이 필요하였다. 한편, Urea-SCR 시스템에서 액상 요소수의 공급을 원활히 하기 위한 흡입튜브의 위치는 요소수의 온도변화와 상변화 과정이 빠르게 진행되는 순환 파이프와 밀접한 곳에 삽입하는 것이 유리하다.

#### 후 기

본 연구는 환경부 Global-Top Project 친환경자동차기술개발사업단 및 2011년도 정부(교육과학

기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 과학기술국제화사업(2011-0030065)의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Kim, M. Y., 2003, "Performance Prediction of SCR-DeNO<sub>x</sub> System for Reduction of Diesel Engine NO<sub>x</sub> Emission," *Trans. of the KSAE*, Vol. 11, No. 3, pp. 71~76.
- (2) Kim, J. H., Kim, M. Y., and Kim, H. G., 2010, "NO<sub>2</sub>-Assisted Soot Regeneration Behavior in A Diesel Particulate Filter with Heavy-Duty Diesel Exhaust Gases," *Numerical Heat Transfer(A)*, Vol. 58, pp. 725~739.
- (3) Yun, B., Kim, C., Kim, M. Y., Cho, G., Kim, H., and Jeong, Y., 2010, "Numerical Modeling of Vanadia-based Commercial Urea-SCR plus DOC System for Heavy-Duty Diesel Exhaust Aftertreatment System," *Trans. of the KSAE*, Vol. 18, No. 2, pp. 24~30.
- (4) Jeong, S. J. and Lee, C. H., 2008, "A Study on the Injection Characteristics of Urea Solution to Improve DeNO<sub>x</sub> Performance of Urea-SCR Catalyst in a Heavy Duty Diesel Engine," *Trans. of the KSAE*, Vol. 16, No. 4, pp. 163~172.
- (5) Swaminathan, C. R. and Voller, V. R., 1992, "A General Enthalpy Method for Modeling Solidification Processes," *Metallurgical Transactions(B)*, Vol. 23, pp. 651~664.
- (6) Hong, Y. D. and Park, C. K., 2002, "Numerical Analysis on Phase-Change of Pure Water by Using Moving Grid," *Proceedings of the KSME 2002 Fall Conf.*, pp. 1906~1911.
- (7) Kang, K. G., Ryou, H. S., and Hur, N. K., 2003, "Numerical Analysis of Solidification and Melting Phase Change Using Modified PISO Algorithm," *Trans. of the KSCFE*, Vol. 3, No. 8, pp. 12~20.
- (8) Jana, S., Ray, S., and Durst, F., 2007, "A Numerical method to Compute Solidification and Melting Processes," *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 27, pp. 93~119.
- (9) Wieche, S., 2007, "Numerical Heat Transfer and Thermal Engineering of AdBlue (SCR) Tanks

- for Combustion Engine Emission Reduction,” *Applied Thermal Eng.*, Vol. 27, pp. 1790~1798.
- (10) Lee, S. Y., Kim, M. Y., Lee, C. H. and Park, Y. B., 2012, “Numerical Investigation of the Urea Melting and Heat Transfer Characteristics with Three Different Types of Coolant Heaters,” *Trans. of the KSAE*, Vol. 20, No. 4, pp. 125~132.
- (11) Choi, B. C., Kim, Y. K. and Kim, H. N., 2011, “Frozen and Melting Characteristics of Urea aqueous Solution for Urea-SCR System by Circulation of Engine Coolant,” *Trans. of the KSPSE*, Vol. 4, No. 15, pp. 42~47.
- (12) 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.
- (13) Ansys Inc., 2009, *Release 12.0 User's Guide*, Fluent.
- (14) BASF Co., 2006, *Technical Leaflet Manual*, AdBlue™.