

냉각수 순환 방식 가열원 형상에 따른 요소수 해동 특성에 관한 수치적 연구

이 승 엽¹⁾ · 김 만 영^{*1)} · 이 천 환²⁾ · 박 윤 범³⁾

전북대학교 항공우주공학과¹⁾ · 자동차부품연구원 친환경디젤하이브리드연구센터²⁾ · 제주산업정보대학 자동차과³⁾

Numerical Investigation of the Urea Melting and Heat Transfer Characteristics with Three Different Types of Coolant Heaters

Seung Yeop Lee¹⁾ · Man Young Kim^{*1)} · Chun Hwan Lee²⁾ · Yun Beom Park³⁾

¹⁾Department of Aerospace Engineering, Chonbuk National University, Jeonbuk 561-756, Korea

²⁾Diesel Hybrid R&D Center, KATECH, 74 Yongjoun-ri, Pungse-myeon, Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungnam 330-912, Korea

³⁾Department of Automotive Engineering, Jeju College of Technology, Jeju 690-714, Korea

(Received 11 November 2011 / Revised 7 December 2011 / Accepted 7 December 2011)

Abstract : Urea-SCR system, which converts nitrogen oxides to nitrogen and water in the presence of a reducing agent, usually AdBlue urea solution, is known as one of the powerful NO_x reduction systems for mobile as well as stationary applications. For its consistent and reliable operation in mobile applications, such various problems as transient injection, ammonia slip, and freezing in cold weather have to be resolved. In this work, therefore, numerical study on three-dimensional unsteady heating problems were analyzed to understand the melting and heat transfer characteristics such as urea liquid volume fraction, temperature profiles and generated natural convection behavior in urea solution by using the commercial software Fluent 6.3. After validating by comparing numerical and experimental data with pure gallium melting phenomena, numerical experiment for urea melting is conducted with three different coolant heating models named CH1, 2, and 3, respectively. Finally, it can be found that the CH3 model, in which more coolant is concentrated on the lower part of the urea tank, has relatively better melting capability than others in terms of urea quantity of 1ℓ for start-up schedule.

Key words : SCR(Selective Catalytic Reduction, 선택적촉매환원), Urea solution(요소수), Melting(해동), AdBlue(애드블루), Phase change(상변화), Coolant heater(냉각수히터)

1. 서 론

최근 강화되고 있는 배기규제에 대응하기 위하여 다양한 엔진 기술과 함께 배기 후처리장치의 개발이 요구되고 있다.¹⁾ 특히, NO_x의 경우 엔진에서의 유일한 NO_x 저감기술인 EGR만으로는 강화되고 있는 배기규제에 대응하기가 어렵기 때문에 LNT,

HC-SCR, 그리고 Urea-SCR과 같은 다양한 후처리장치의 개발이 필요하다.^{2,3)} 이 중에서 Urea-SCR 시스템은 넓은 온도영역에서 NO_x 전환율이 매우 높을 뿐만 아니라 연비에 미치는 영향이 적기 때문에 향후 배기규제 대응을 위한 가장 적합한 NO_x 후처리장치로 인식되고 있다. 하지만 많은 장점에도 불구하고 Urea-SCR 시스템은 몇가지 장애, 즉, 과도운전에 따른 전환율 감소, 암모니아 슬립, 그리고 요소수

*Corresponding author, E-mail: manykim@jbnu.ac.kr

의 안정적 공급을 위한 인프라 구축이 요구된다. 한편, Urea-SCR 시스템에 사용되는 요소수는 동절기 약 -20°C 이하로 내려가는 북유럽과 북미 지역에서 동결되는 문제가 발생한다. 따라서 이러한 요소수 저장탱크에 해당 시스템을 적용하고 시동 초기 요소수 분사에 필요한 액상 요소수를 적정 시간 내에 안정적으로 공급 가능한 기술의 확보가 필요하다.

요소수 저장탱크와 같이 일정 체적내의 가열원에 의한 물질의 응고 및 용융에 대한 상 변화 연구의 경우 Voller et al.⁴⁾가 제안한 엔탈피 방법이 주로 사용되고 있다. 즉, 엔탈피 방법은 이동격자계 방법⁵⁾과 달리 고정격자계를 사용하여 상 변화에 따른 잠열 및 물질의 거동을 각 보존방정식의 생성항으로 처리하여 해당현상을 분석하는 방법으로서 상 변화에 따른 유체/고체 경계면이 존재하는 문제에 효율적으로 적용되고 있다. 한편, Kang et al.⁶⁾은 PISO 알고리즘을 이용하여 상 변화 경계면의 온도 및 액상분율의 변화를 고찰하였고, Kim et al.⁷⁾은 연료전지 자동차의 물탱크 해동과정에 대하여 초기 열전달은 전도가 주를 이루지만, 용해가 이뤄지면서 대류가 중요한 요소가 됨을 보고하였다. 한편, Hwang et al.⁸⁾은 요소수 해동을 위한 열원으로서 지그재그 및 코일형의 냉각수 가열방식을 적용하여 전산해석을 통한 요소수 해동현상을 고찰하였고, Choi et al.⁹⁾은 히터를 이용한 요소수 해동특성에 관한 실험적 연구를 수행하였다. 최근, Stefan¹⁰⁾은 I-Type 형태의 전기 가열방식 열원을 이용한 요소수 해동현상을 고찰하였는데, 열원에 의한 초기 해동 및 이후 자연대류에 의한 열전달 현상을 분석하였다.

본 연구에서는 수치적 방법을 이용하여 냉각수 순환 가열방식의 요소수 해동장치에 대하여 가열원의 형상에 따른 요소수의 해동특성을 고찰하였다. 아래에서는 우선 요소수 해동현상의 해석을 위한 지배방정식을 설명한 후 Gau and Viskanta¹¹⁾가 수행한 순수 갈륨의 용해 실험 데이터와의 비교를 통하여 본 연구에 사용된 수치적 방법을 검증하였다. 본 논문에서는 각 가열원의 형상이 변경됨에 따라 시간에 따른 요소수 탱크 내의 온도, 액상분율, 그리고 열유동 특성을 고찰하였다. 최종적으로 시동 초기 NO_x 저감을 위한 에 필요한 시간을 비교함으로써

본 연구에서 도입된 세가지 냉각수 가열모델의 성능을 분석하였다.

2. 수치해석

2.1 지배방정식

본 연구에서는 고정격자계를 이용한 엔탈피 방법^{4,12)}을 사용하였다. 시간에 따른 상변화 현상과 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, u_i , p , ρ , 그리고 μ 는 각각 속도, 압력, 밀도, 그리고 점성계수를 나타내며, 부력항은 Boussinesq 근사¹³⁾를 이용하여 모델링하였다. 한편, S_i 는 상변화에 따른 속도 생성항을 나타내는 것으로서 아래의 식과 같이 표현된다. 즉,

$$S_i = Au_i \quad (3)$$

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

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

여기에서 A_{mush} 는 상변화 영역에서의 상수값으로서 본 연구에서는 1×10^5 으로 설정하였다.¹⁴⁾ 한편, 에너지 방정식은 다음의 식으로 표현된다.

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

여기에서 H 는 현열엔탈피 $h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT$ 와 잠열에 의한 엔탈피 변화 $\Delta H = fL$ 의 합으로 표현된다. 여기에서 L 은 용해잠열이다. 한편, 생성항 S_h 는 다음과 같이 표현된다. 즉,

$$S_h = \frac{\partial(\rho \Delta H)}{\partial t} \quad (6)$$

한편, 상변화에 의한 운동량 및 에너지 방정식의

생성항을 구하기 위한 액상분율 f 는 다음과 같이 온도에 따른 함수로 표현된다.⁴⁾ 즉,

$$T \leq T_s \text{ 일 때, } f = 0 \tag{7a}$$

$$T \geq T_l \text{ 일 때, } f = 1 \tag{7b}$$

$$T_s < T < T_l \text{ 일 때, } f = \frac{T - T_s}{T_l - T_s} \tag{7c}$$

여기에서 $f=0$ 은 고체상, $f=1$ 은 액체상, 그리고 $0 < f < 1$ 은 상 변화가 일어나고 있는 포화영역 (mushy region)을 나타낸다.

2.2 수치 해석 모델

본 연구에서 사용된 요소수 분사 시스템, 냉각수 순환가열 모델, 그리고 사용된 격자체를 Fig. 1에 도시하였다. 요소수 저장탱크의 용량은 44 ℓ (= 333 × 333 × 396 mm³)이고, CH1, CH2, 그리고 CH3로 명명된 냉각수 순환 가열 파이프의 전열면적은 각각 0.034m², 0.069m², 0.052m²이다. 한편, 각 가열 모델별로 36만개, 39만개, 그리고 31만개의 격자를 생성하였고, Fluent 6.3¹⁴⁾을 이용하여 전산해석을 수행하였다. 탱크 벽면은 모두 단열로 가정하였

Table 1 Properties of the AdBlue 32.5wt% used in this work

| | |
|--|----------|
| Density, solid, ρ_s [kg/m ³] | 1,010 |
| Density, liquid, ρ_l [kg/m ³] | 1,090 |
| Dynamic viscosity, μ_l [kg/m·s] | 1.4 |
| Reference density, ρ_{ref} [kg/m ³] | 1,095.6 |
| Reference temperature, T_{ref} [K] | 283.15 |
| Melting point [K] | 262.15 |
| Latent heat, L [kJ/kg] | 152.86 |
| Thermal expansion coefficient, β [1/K] | 4.5x10-4 |
| Thermal conductivity, k [W/m·K] | 0.57 |

으며 내부에 결빙된 요소수(AdBlue 32.5wt%)의 초기 온도는 -30℃로 설정하였다. 요소수의 상변화 과정에서 나타나는 온도에 따른 비열과 밀도의 변화는 주어진 구간에서 선형적으로 변한다고 가정하였다.^{9,15)} 이와 함께, 본 연구에 사용된 요소수의 열물성치¹⁵⁾를 Table 1에 나타내었다. 한편, 냉각수 순환 파이프의 재질은 STS 316으로서 열전도율은 16.3 W/m·K, 그리고 비열은 500 J/kg·K로 설정하였다. 또한 엔진에서의 냉각수는 온도조절장치로서 미스터와 라디에이터를 이용하여 약 80℃의 온도를 유지하고 펌프에 의해 순환된다. 이 때문에 냉각수로 가정한 작동유체인 물의 투입온도는 70℃, 순환 유량은 0.056kg/s로 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수치 해석의 검증

본 해석방법의 검증을 위하여 Gau and Viskanta¹¹⁾가 수행한 순수 갈륨의 용해 과정을 분석하였다. Fig. 2와 같이 가로 88.9mm와 세로 63.5mm의 직각 평면에서 37×26의 격자를 생성하여 초기 온도 $T_{initial} = 301.45\text{K}$ 이고 $t > 0$ 이후 좌측 벽면의 온도를 순간적으로 $T_{in} = 311.15\text{K}$ 로 승온시켰을 때 고체 순수갈륨의 용해 현상에 대한 2차원 비정상 상태 해석을 수행하였다. 한편, 본 수치해석에 사용된 순수 갈륨의 물성치¹⁶⁻¹⁸⁾를 Table 2에 나타내었다.

시간에 따른 순수 갈륨의 고체-액체 상경계면을 Gau and Viskanta¹¹⁾의 실험결과와 함께 Fig. 3에 도시하였다. 좌측 열원에 의한 갈륨의 용해가 일어나 시간이 지남에 따라 용해된 액체 갈륨 내부의 자연대

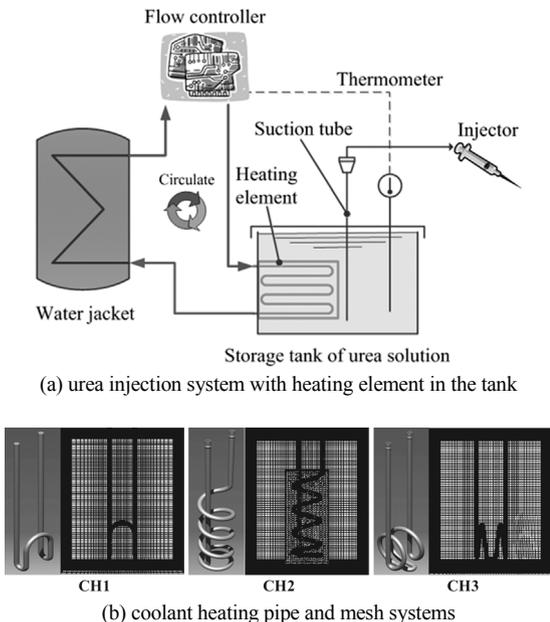


Fig. 1 Schematics of the urea injection and mesh systems

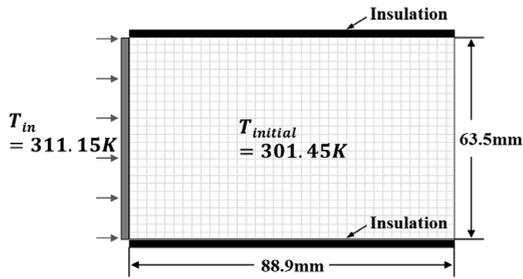


Fig. 2 Schematic of the calculation domain and the boundary conditions for the simulation of pure Gallium melting

Table 2 Properties of the pure Gallium

| | |
|--|----------------------|
| Density, liquid, ρ_l [kg/m ³] | 6,093 |
| Dynamic viscosity, μ_l [kg/m·s] | 1.8×10^{-3} |
| Reference density, ρ_{ref} [kg/m ³] | 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, β [1/K] | 1.2×10^{-4} |
| Thermal conductivity, k [W/m·K] | 32 |

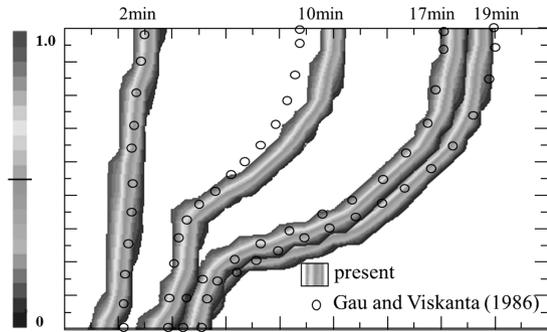
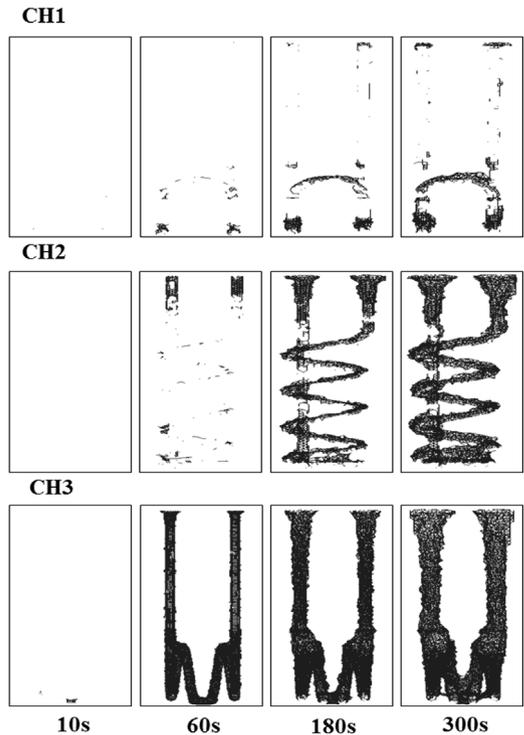


Fig. 3 Comparison of liquid fractions for melting of the pure Gallium

류현상에 의한 열전달에 의하여 액체-고상 경계면이 점점 우측으로 이동하고 있음을 알 수 있다. 또한, 본 수치해석 결과는 Gau and Viskanta¹¹⁾의 실험 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

3.2 냉각수 순환 가열 방식의 해동 현상

Fig. 4는 각 냉각수 순환방식 가열모델을 적용하여 초기에 결빙된 요소수의 시간에 따른 액상분의 변화를 도시한 것이다. 세가지 모델 모두 10s일 때는



$f=1$, Melted urea solution

Fig. 4 Liquid distributions at center plane with time

액상이 거의 보이지 않지만 시간이 점차 증가하여 60s일 때 CH2와 CH3의 경우 냉각수 순환 파이프 근처에 미세한 양의 액상을 관찰할 수 있다. 한편, CH3 모델의 경우 60s의 시간이 경과한 시점에서 냉각수 순환 파이프와 인접한 부분의 요소수는 전반적으로 모두 해동되었음을 확인할 수 있다. 또한, 시간이 지남에 따라 세가지 모델 모두 냉각수 열원에 의하여 파이프가 서로 인접해 있는 부분, 그리고 용해된 요소수의 자연대류에 의하여 저장탱크의 상부에서 보다 많은 해동이 일어나고 있음을 알 수 있다. 한편, 각 시간에서의 온도분포를 Fig. 5에 도시하였다. 열원으로 작용하는 냉각수 순환 파이프 주변의 온도가 먼저 상승한 후 시간이 지남에 따라 고온영역이 점차 증가하고 있으며 용해된 요소수 내부의 자연대류 현상에 의하여 파이프의 위쪽에 보다 높은 온도가 분포하고 있다. Fig. 6은 요소수 탱크 내부의 속도 분포를 나타낸 것으로서, 냉각수 파이프 주변의 용해된 요소수의 유동 및 자연대류 현상을 관찰할 수

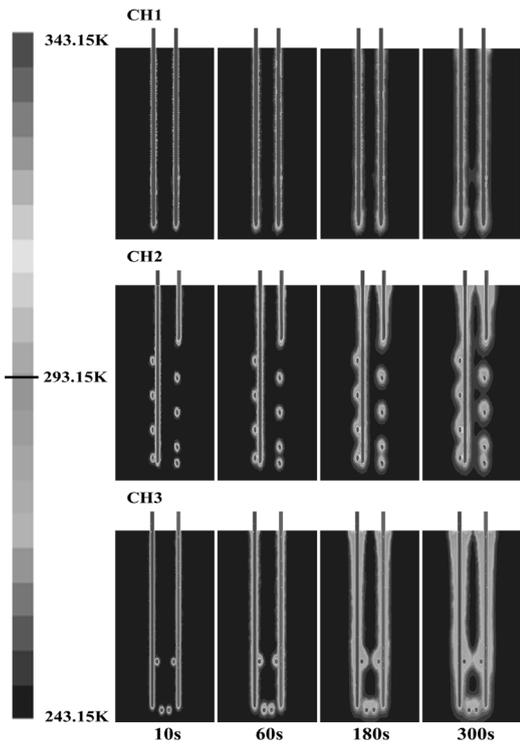


Fig. 5 Temperature distributions at center plane with time

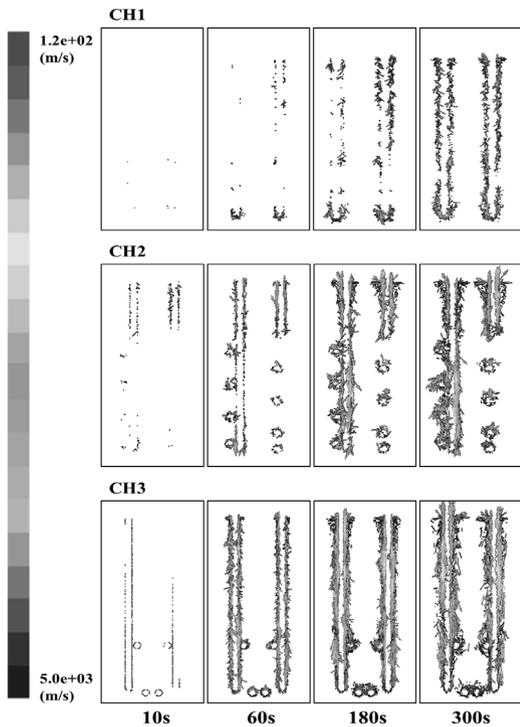


Fig. 6 Velocity vectors at center plane with time

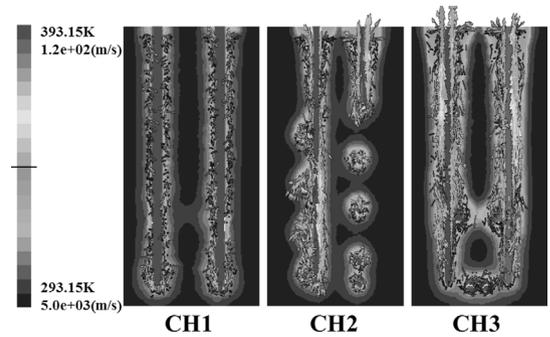


Fig. 7 Combined temperature and velocity vectors at 300s

있다. 한편, 세가지 서로 다른 형태의 냉각수 순환 파이프 모델을 비교할 경우, CH1 모델보다는 CH2와 CH3 모델에서 보다 많은 해동이 일어나고 있음을 알 수 있다. Fig. 7은 300s일 때 온도분포와 속도를 중첩하여 나타낸 것으로서 전술한 해동 특성 및 융해된 요소수 내에서의 자연대류현상을 확인할 수 있다.

앞서 언급한 것처럼 저장탱크 내부의 해동 과정은 가열원인 냉각수 순환 파이프로부터 결빙된 요소수로 열전달이 진행되고 이에 따른 물질의 상변화가 발생한다. 또한 상변화 된 액상의 요소수도 가열원과 주변에 인접한 상변화 과정에 있는 요소수와의 열전달을 거쳐 온도 변화가 나타나고 자연 대류가 발생하였다. 세 가지 형상의 냉각수 순환 파이프의 해동특성을 비교하기 위하여 순환 파이프에 투입된 유체의 입구와 출구의 온도차 ΔT 를 Fig. 8에 도시하였다. 여기에서 입출구의 온도차는 요소수 저장 탱크 내부의 동결된 요소수에 공급되는 에너지를 의미하며 해동 특성을 비교할 수 있는 중요한 결과 값 중 하나이다. 10s일 때, CH1, 2, 그리고 3 모델 모두 가장 높은 ΔT 를 갖는데, 이는 가열원과 -30°C 로 동결된 요소수의 온도차가 가장 크기 때문에 이때에 가장 많은 열에너지가 전달되는 것을 의미한다. 한편, CH2와 3 모델의 경우 120s에서 온도차가 가장 낮아지고 이후 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 시간이 지남에 따라 해동영역이 증가하기 때문으로 사료된다. 한편, 순환 파이프 형상에 따른 ΔT 를 비교하면, CH3 모델의 경우 CH1 및 2 모델보다 높은 값을 나타내므로 동결된 요소수와의 열전달량이 보다 크기 때문에 시간이 지남에 따라 더

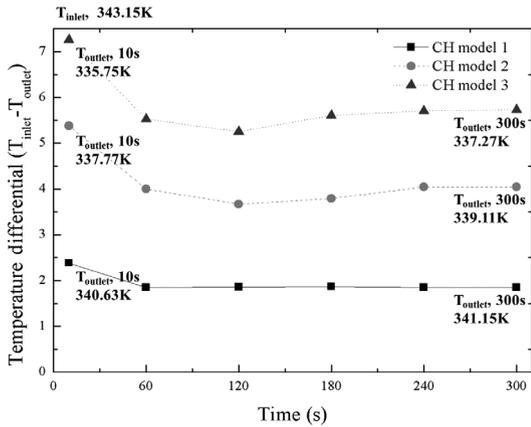


Fig. 8 Temperature difference between inlet and outlet of the coolant pipes with time

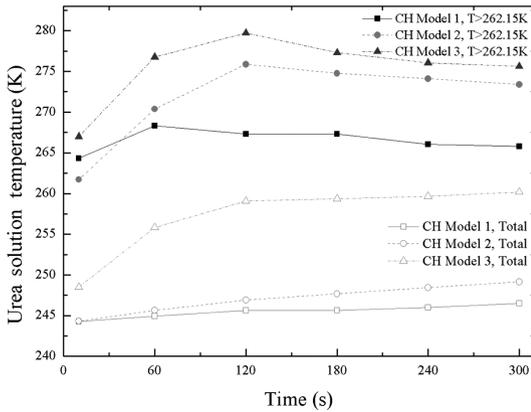


Fig. 9 Average temperature of urea solution in storage tank for three different heating models with time

많은 양의 요소수를 해동할 것으로 사료된다. Fig. 9는 요소수 저장탱크 내부평균 온도와 상변화 된 액상 요소수 평균 온도를 나타낸 것이다. 저장탱크 내부의 평균 온도는 CH1, 2, 그리고 3 모델 모두 시간이 지남에 따라 점차적으로 상승하고 있으며, 특히, CH3 모델의 경우 온도가 가장 높음을 알 수 있다. 이와 함께, Fig. 9 상단에 나타낸 액상 요소수의 온도 역시 CH3 모델일 때 가장 높게 나타나고 있다. 한편, 입구와 출구의 온도차 ΔT 가 가장 낮은 시간인 120s 일 때 Fig. 9에서 액상 요소수의 온도가 가장 높게 나타나는 구간으로서 가열원과 요소수의 온도차가 낮기 때문에 열전달량이 감소할 것으로 사료된다. 이러한 열전달 특성을 파악하기 위하여 시간에 따른 열전달량을 Fig. 10에 나타내었다. 이때 전열량은

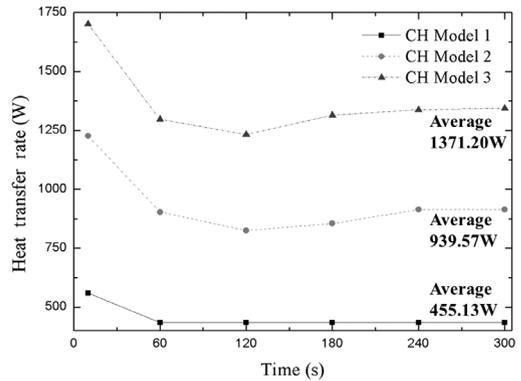


Fig. 10 Heat transfer rate of the coolant heaters with time for three different heater models

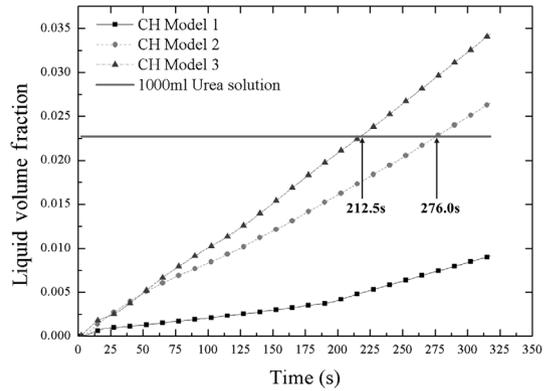


Fig. 11 Comparison of the liquid volume fraction with time for three different heater models

$q = mc_p \Delta T$ 로 계산하였다. 여기에서 냉각수의 순환 유량, $m = 0.056 \text{ kg/s}$, c_p 는 70°C 에서의 비열, 그리고 ΔT 는 냉각수 히터 입구와 출구의 온도차를 나타낸다. Fig. 10을 살펴보면, CH3 모델의 경우 평균 1371.20W 로 가장 많은 열이 전달되고 있으며, 투입 유체의 온도차 ΔT 가 가장 낮은 CH1 모델은 평균 455.13W 로서 열전달량이 가장 적음을 알 수 있다.

Fig. 11은 시간에 따른 세가지 히팅 모델의 액상 분율의 변화를 보여주고 있다. 여기에서 액상체적 분율은 요소수 용기 전체 체적에서 액상이 차지하는 부피비를 나타내는 것으로서, 시간이 지남에 따라 액상 체적분율이 점점 증가하고 있음을 알 수 있다. 한편, 시동초기의 요소수 분사에 필요한 액상 요소수의 최소량 확보여부를 판단하기 위하여 액상 체적분율이 0.0227 인 지점, 즉 액상 요소수의 체적

이 1,000 ml가 되는 지점에 도달하는 시간을 비교해 보면, CH2 모델은 276.0s, 그리고 CH3 모델은 212.5s가 소요되고 있음을 알 수 있다. 한편, CH1 모델은 CH2 및 3 모델과 동일조건임에도 불구하고 열전달 특성이 현저히 떨어짐을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 전산해석을 활용하여 세가지의 서로 다른 냉각수 순환 가열방식 모델에 의한 요소수의 해동 및 열전달 특성을 고찰하였다. 가열초기 냉각수 열원의 전도 열전달에 의한 요소수의 확보 이후 자연대류에 의하여 해동현상이 진전되고 있음을 확인하였다. 이와 함께, 각 모델의 전열량과 해동특성의 관계를 분석하였다. 특히, 시동 초기 NO_x 저감을 위한 요소수 1ℓ를 확보하는데 필요한 시간의 경우 본 연구에서 도입된 CH1, CH2, 그리고 CH3 모델에서 각각 609.3s, 276.0s, 그리고 212.5s로서 평균 열전달량이 1371.20 W로 가장 높은 CH3 모델부터 경과시간이 작게 나타남을 알 수 있었다. 또한, t=300s 일 때의 해동량은 각각 369, 1,096, 그리고 1,419ml로서 하부에 냉각수 순환을 집중시킨 CH3 모델의 해동능력이 가장 우수함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 환경부 Global-Top Project 친환경자동차기술개발사업단 및 국토해양부 「하늘프로젝트」의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- 1) J. H. Kim, M. Y. Kim and H. G. Kim, "NO₂-Assisted Soot Regeneration Behavior in a Diesel Particulate Filter with Heavy-duty Diesel Exhaust Gases," Numer. Heat Transfer, Part A, Vol.58, pp.725-739, 2010.
- 2) M. Y. Kim, "Performance Prediction of SCR-DeNO_x System for Reduction of Diesel Engine NO_x Emission," Transactions of KSAE, Vol.11, No.3, pp.71-76, 2003.
- 3) B. Yun, C. Kim, M. Y. Kim, G. Cho, H. Kim and Y. Jeong, "Numerical Modeling of Vanadia-Based Commercial Urea-SCR plus DOC System for Heavy-duty Diesel Exhaust After Treatment System," Transactions of KSAE, Vol.18, No.2, pp.24-30, 2010.
- 4) C. R. Swaminathan and V. R. Voller, "A General Enthalpy Method for Modeling Solidification Processes," Transaction of Metallurgical, Vol.23(B), pp.651-664, 1992.
- 5) Y. D. Hong and C. K. Park, "Numerical Analysis on Phase-change of Pure Water by Using Moving Grid," Fall Conference Proceedings, KSME, pp.1906-1911, 2002.
- 6) K. G. Kang, H. S. Ryou and N. K. Hur, "Numerical Analysis of Solidification and Melting Phase Change Using Modified PISO Algorithm," Transactions of KSCFE, Vol.3, No.8, pp.12-20, 2003.
- 7) H. K. Kim, S. Jeong, N. Hur, T. Lim and Y. S. Park, "Numerical Analysis of Melting Process in a Water Tank for Fuel-cell Vehicle," Transactions of SAREK, Vol.19, No.8, pp.585-592, 2007.
- 8) J. Hwang, H. Heo and C. Lee, "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, 2010.
- 9) B. C. Choi, C. K. Seo and K. J. Myong, "Freezing and Melting Phenomena of Urea-water Solution for Diesel Vehicle SCR system," Transactions of KSPSE, Vol.4, No.13, pp.5-10, 2009.
- 10) W. Stefan, "Numerical Heat Transfer and Thermal Engineering of AdBlue(SCR) Tanks for Combustion Engine Emission Reduction," Applied Thermal Engineering, Vol.27, pp.1790-1798, 2007.
- 11) C. Gau, and R. Viskanta, "Melting and Solidification of a Pure Metal on a Vertical Wall," Journal of Heat Transfer, Vol.108, pp.174-181, 1986.
- 12) A. D. Brent, V. R. Voller and K. J. Reid, "The Enthalpy-porosity Technique for Modeling Convection-diffusion Phase Change: Applicat-

- ion to The Melting of a Pure Metal,” Numer. Heat Transfer, Vol.13, pp.295-318, 1988.
- 13) M. Sathiyamoorthy and A. Chamkha, “Effect of Magnetic Field on Natural Convection Flow in a Liquid Gallium filled Square Cavity for Linearly heated side Wall(s),” Int. J. Thermal Sciences, Vol.49, pp.1856-1856, 2010.
- 14) Fluent, Release 12.0 User’s Guide, 2009.
- 15) M. Egal, T. Budtova and P. Navard, “The Dissolution of Microcrystalline Cellulose in Sodium Hydroxide-Urea Aqueous Solution,” Cellulose, Vol.15, pp.361-370, 2008.
- 16) M. M. Cerimele, D. Mansutti and F. Pistella, “Numerical Modelling of Liquid/Solid Phase Transitions Analysis of a Gallium Melting Test,” Computers & Fluids, Vol.31, pp.437-451, 2002.
- 17) B. Xu, B. Q. Li and D. E. Stock, “An Experimental Study of Thermally induced Convection of Molten Gallium in Magnetic Fields,” Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.49, pp.2009-2019, 2006.
- 18) S. Kim, M. C. Kim and B. Lee, “Numerical Analysis of Convection-driven Melting and Solidification in a Rectangular Enclosure,” J. Ind. Eng. Chemistry, Vol.8, No.2, pp.185-190, 2002.