

냉각수 및 전기히터를 이용한 우레아 해동 특성에 관한 수치적 연구

이승엽*, 김만영*, 박윤범**, 이교우***, 강희용***, 백병준****
*전북대학교 항공우주공학과, **제주산업정보대학 자동차과
전북대학교 기계설계공학부, *전북대학교 기계시스템공학부
† e-mail: manykim@jbnu.ac.kr

A Numerical Study on Urea Melting Phenomena with Coolant and Electric Heaters

Seung Yeop Lee*, Man Young Kim*, Yun Beom Park**, Gyo Woo Lee***, Heeyoung Kang**, Byung Joon Baek****

*Department of Aerospace Engineering, Chonbuk National University

**Department of Automotive Engineering, Jeju College of Technology

***School of Mechanical Design Engineering, Chonbuk National University

****School of Mechanical System Engineering, Chonbuk National University

요 약

디젤엔진에서 발생하는 PM과 NO_x는 강화되는 배기규제의 주요 저감대상으로서 이의 저감을 위한 다양한 후처리장치가 개발되고 있다. 이중 Urea-SCR은 NO_x의 전환율이 높고 연비에 미치는 영향이 작기 때문에 NO_x저감을 위한 최선의 장치로 인식되고 있다. 하지만, 우레아 수용액의 물성치 특성으로 인하여 동절기 -20℃이하로 내려가는 지역에서 동결되는 문제점을 해결해야한다. 따라서 이러한 우레아 저장탱크에 해동 시스템을 적용하여 시동초기 우레아를 적정 시간내에 안정적으로 공급가능한 기술의 확보가 필요하다. 본 연구에서는 요소수 저장탱크 내부에 냉각수 순환 가열방식(CH)과 전기 가열방식(EH)을 이용하여 동결된 요소수의 해동현상에 대한 3차원 비정상상태 수치 해석을 수행하였다. 이를 통하여 해동 과정 중 나타난 액상분율, 온도영역 그리고 자연대류를 분석하여 각 가열 방식에 대한 해동특성을 비교하였으며 순수 갈륨 용해 실험 결과값과 수치 해석 결과값을 통하여 수치 해석 방법을 검증하였다. 결론적으로 1,000ml의 우레아 수용액이 확보되기까지의 시간은 CH의 경우, 275s, 그리고 EH의 경우, 230s임을 알 수 있었다.

1. 서 론

디젤엔진은 높은 압축비 특성을 갖는 내연기관으로 가솔린엔진에 비하여 CO₂ 배출량이 적고, 열효율이 높기 때문에 자동차, 선박 및 중장비 등 여러 분야에서 널리 적용되고 있다. 하지만 디젤엔진은 높은 수준의 PM과 NO_x가 발생하는 단점을 갖고있다. PM과 NO_x는 강화되는 배기규제의 주요 저감 대상으로써 이를 저감하기 위한 다양한 엔진기술과 더불어 배기 후처리장치의 개발이 요구되고 있다.¹⁾ PM의 경우 DPF를 활용하여 90%에 가까운 높은 저감 수준까지 도달하였지만, NO_x의 경우 EGR 기술만으로는 배기규제를 만족하기 어렵기 때문에 LNT, LNC, HC-SCR, 그리고 Urea-SCR과 같은 다양한 후처리장치가 개발되고 있다.²⁾ 이중 Urea-SCR 시스템은 배기가스의 넓은 온도영역에서 NO_x의 전환율이 매우 높지만 복잡한 시스템 구성, 분사제어, 암모니아슬립, 그리고 동절기 우레아 수용액이 결빙되는

문제점을 해결해야 한다. 여기서, Urea-SCR 시스템에 사용되는 차량용 우레아는 AdBlue와 같이 동결점이 낮은 32.5wt%의 공용혼합물이며, 동절기 약 -20℃이하로 내려가는 지역에서 우레아가 빙결되는 문제가 발생한다.³⁾ 이러한 우레아 저장탱크에 해동 시스템을 적용하여 시동 초기 분사가 가능한 액상 우레아를 적정 시간내에 안정적으로 공급 가능한 기술의 확보가 필요하다.

본 연구에서는 수치적 방법을 이용하여 냉각수 순환 가열방식(이하, CH)과 전기 가열방식(이하, EH)의 해동장치에 대하여 우레아 수용액의 해동특성을 고찰하였다. 수치 해석방법은 Gau and Viskanta⁴⁾가 수행한 순수 갈륨의 용해실험 결과값과 비교하여 검증하였다. 각 가열방식에 따라 시간에 따른 액상분율, 온도, 그리고 열유동 특성을 고찰하였다. 결론적으로 1,000ml의 우레아 수용액이 확보되기까지의 시간을 비교하여 성능을 분석하였다.

2. 수치 해석

2.1. 지배방정식

본 연구에서는 고정격자계를 이용한 엔탈피 방법⁵⁾을 사용하였다. 시간에 따른 상 경계면의 이동과 온도 및 유동장을 계산하기 위하여 사용된 지배방정식은 다음과 같다.

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

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

$$- \rho g_i \beta (T - T_{ref}) + S_i$$

여기에서, ρ , u_i , p , 그리고 μ 는 각각 밀도, 속도, 압력, 그리고 점성계수를 나타내며, 부력항은 Boussinesq 근사를 이용하여 모델링하였다. 또한, S_i 는 상변화에 따른 속도 생성항으로서 아래와 같이 표현된다. 즉,

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

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

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

여기에서 A_{mush} 는 상변화 영역의 상수값이며, ϵ 은 분모가 0이 되지 않기 위한 상수값으로서 1×10^{-3} 을 대입하였다.⁶⁾

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

여기에서 H 는 현열엔탈피 $h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT$ 와 잠열에 의한 엔탈피 $\Delta H = fL$ 의 합으로 표현된다.

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

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

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

$$f = 0 \text{ if } T \leq T_s \quad (7.1)$$

$$f = 1 \text{ if } T \geq T_l \quad (7.2)$$

$$f = \frac{T - T_s}{T_l - T_s} \text{ if } T_s < T < T_l \quad (7.3)$$

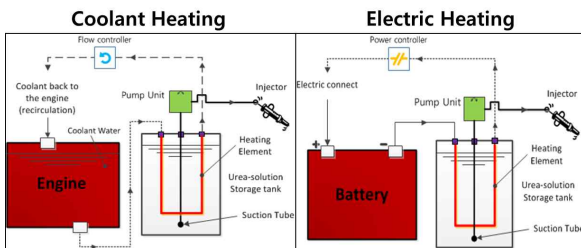
여기에서 $f = 0$ 은 고체상태, $f = 1$ 액체상태, 그리고 $0 < f < 1$ 은 상변화 영역을 의미한다.

2.2 수치 해석 방법 및 모델

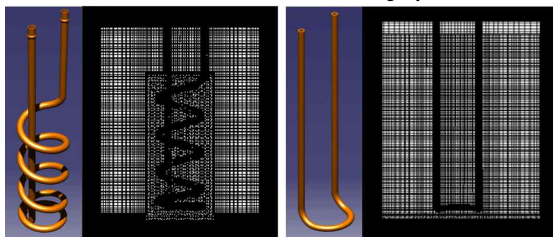
본 연구에서 상용 소프트웨어 Fluent 6.3를 이용하여 3차원 비정상상태 전산해석⁶⁾을 수행하였다. 모든 수치 해석은 2차풍상차분법(Second order upwind scheme)과 고정격자계(Fixed grids)를 이용하였다. 또한, 유동 및 온도장을 구하기 위한 운동량 방정식과 에너지 방정식의 연결성은 PISO 알고리즘을 사용하였다. 우레아의 온도에 따른 밀도와 비열의 변화^{3,7)}는 Polynomial-Linear 보간법을 통하여 계산하였다. 이와함께, 본 연구에 사용된 우레아(AdBlue 32.5wt%)의 물성치⁷⁾를 Table 1에 나타내었다. 한편, 사용된 CH 및 EH 가열모델, 그리고 격자계를 위의 Fig. 1에 도시하였다. 저장탱크 내부에 채워진 우레아의 체적은 약 44l(=333×333×396mm³)이고, CH와 EH 모델의 전열면적은 각각 0.069m², 0.033m²이다. 또한, 사용된 격자는 CH 모델의 경우 36만개, 그리고 EH 모델의 경우 12만개의 격자를 사용하였다. 탱크 벽면은 모두 단열조건으로 가정하였으며 결빙된 우레아의 초기온도는 -30℃로 설정하였다. 여기서 CH 모델의 파이프 내부 작동유체는 물로써 순환 유량 0.0555kg/s, 그리고 투입온도 70℃이며, EH 모델의 전기코일은 발열온도 70℃로 설정하였다.

[Table 1] Properties of the AdBlue 32.5wt%

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]	1095.6
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



(a) Schematic of the urea heating systems

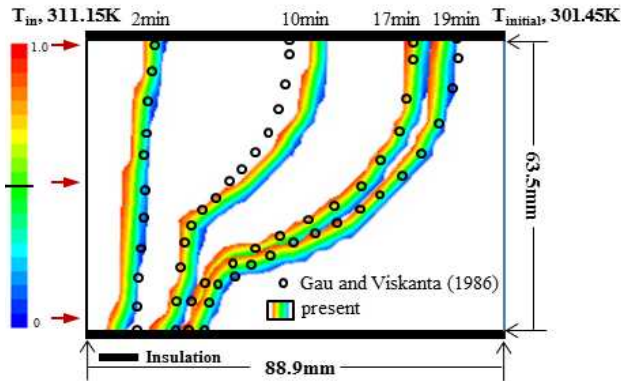


(b) Heater and mesh systems

[Fig. 1] Schematic of the urea heating and mesh systems

[Table 2] Properties of the pure Gallium

Density, liquid, ρ_l [kg/m ³]	6,093
Dynamic viscosity, μ_l [kg/m·s]	1.8x10 ⁻³
Reference density, ρ_{ref} [kg/m ³]	6095
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]	1.2x10 ⁻⁴
Thermal conductivity, k [W/m·K]	32



[Fig. 2] Comparison of mushy region between experimental and numerical data for melting of the pure Gallium

3. 결과 및 고찰

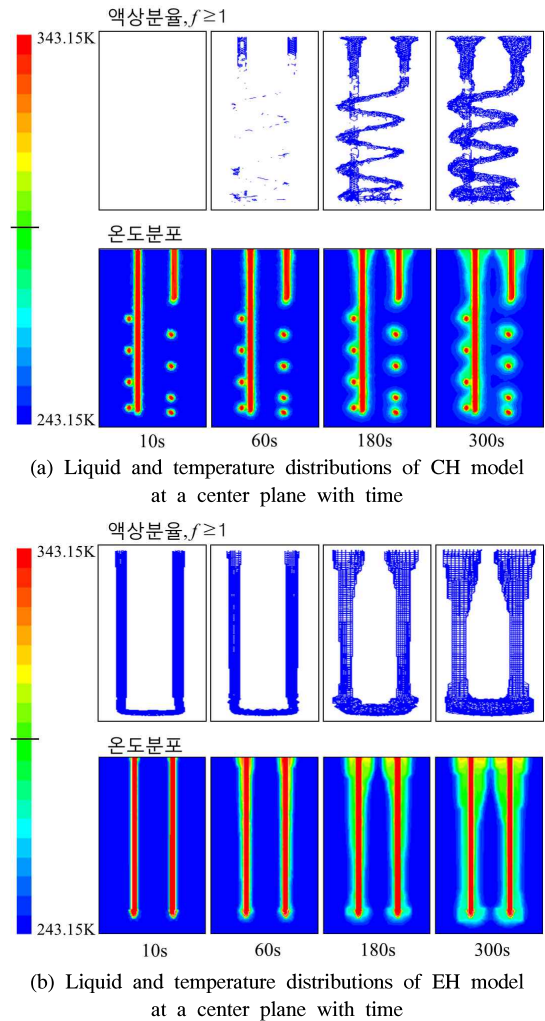
3.1. 수치 해석의 검증

우선, 본 수치 해석 방법을 검증하기 위하여 Gau and Viskanta⁴⁾가 수행한 순수 갈륨의 용해 현상을 해석하였다. 저장용기 내부를 해석하기 위하여 가로 88.9mm와 세로 63.5mm의 사각 평면에서 37×26의 격자계를 사용하였다. 순수 갈륨의 초기온도는 301.45K이며 t>0 이후 좌측 벽면을 311.15K로 승온시켜 순수 갈륨의 용해현상에 대한 2차원 비정상상태 해석을 수행하였다. 본 수치해석에 적용된 순수 갈륨의 물성치⁵⁾는 Table 2에 나와있다. Fig. 2는 시간에 따른 순수 갈륨의 상 경계면을 Gau and Viskanta⁴⁾의 실험결과와 함께 도시한 것이다. 열원에 의하여 갈륨이 용해되고 시간이 지남에 따라 상 경계면이 점점 우측으로 이동하고 있음을 알 수 있다. 또한, 본 수치 해석 결과는 Gau and Viskanta⁴⁾의 실험결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

3.2. 결빙된 우레아 수용액의 해동 현상

CH 그리고 EH 가열모델을 사용하여 시간에 따른 우레아의 액상분율과 온도의 변화를 Fig. 3에 도시하였다. Fig. 3(a)는 CH 모델의 결과로서 10s일 때 보이지 않던 액상분율은 60s일 때 냉각수 순환 파이프

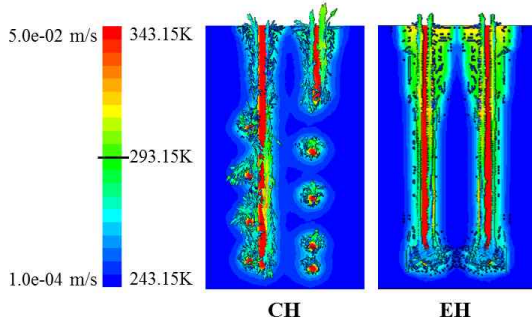
프 주변으로 미세하게 나타나며 시간이 점차 증가하



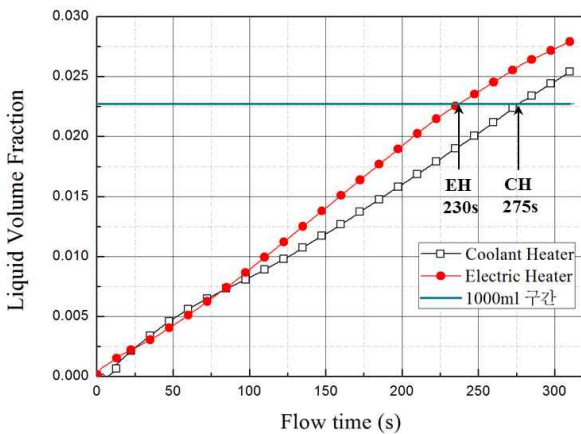
[Fig. 3] Liquid and temperature distribution of CH and EH model

면서 순환 파이프 형상과 비슷하게 생성된다. 반면, Fig. 3(b)의 EH 모델의 경우 10s일 때 전기코일 형상과 매우 비슷한 액상 분율을 나타내어 CH 모델보다 빠르게 액상 분율이 변화하고 있음을 알 수 있다. CH 모델의 경우, 파이프가 서로 인접한 부분, 그리고 EH 모델의 경우 전기코일 하단의 U자부분에서 보다 많은 해동이 일어나고 있을 뿐만 아니라, 용해된 우레아 수용액의 자연대류 현상에 의하여 저장탱크 상부에서 그 외 부분보다 많은 해동이 일어나고 있음을 알 수 있다. 한편, 온도분포는 가열원인 순환파이프와 전기코일 주변의 온도가 먼저 상승하고 시간이 지남에 따라 고온영역이 점차 증가하고 있으며, 용해된 우레아 수용액의 자연대류 현상에 의하여 가열원 상부에서 보다 높은 온도가 분포하고 있음을 알 수 있다. Fig. 4는 t=300s일 때 우레아 수

용액의 온도분포와 속도를 중첩하여 나타낸 것으로서 전술한 우레아 해동특성 및 용해된 우레아 수용액의 자연대류 현상을 확인 할 수 있다.



[Fig. 4] Temperature and velocity vector profiles at 300s



[Fig. 5] Comparison of the liquid volume fraction with time for CH and EH heater models

앞서 언급한 것처럼 저장탱크 내부의 해동 과정은 가열원인 냉각수 순환 파이프와 전기코일에서 결빙된 요소수로 열전달이 진행되고 이에 따라 물질의 상변화가 발생한다. 또한 상변화된 우레아 수용액은 가열원 및 주변에 인접한 상변화 과정에 있는 우레아 수용액과의 열전달을 거쳐 온도변화가 나타나고 자연대류가 발생하였다. 한편, 연속적인 등은 가열을 하는 EH 모델은 CH 모델보다 높은 전열량을 갖는 것으로 사료된다. Fig. 5는 시간에 따른 우레아 수용액의 액상체적분율의 변화를 보여주고 있다. 여기서 액상체적분율은 우레아 저장탱크 전체 체적에서 용해된 우레아가 차지하는 부피비로서 시간이 지남에 따라 그 값이 점차 증가하고 있음을 알 수 있다. 한편, 시동 초기 우레아 분사에 필요한 우레아 수용액의 확보 여부를 판단하기 위하여 액상체적분율이 0.0227인 지점, 즉 용해된 우레아 수용액이 1,000ml 가 되는 지점에 도달하는 시간을 비교하였을 때 EH 모델은 230s, 그리고 CH 모델은 275s로서 EH 모델이 CH 모델보다 해동능력이 우수함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 전산해석방법을 사용하여 냉각수 순환 가열 모델(CH 모델)과 전기 가열 모델(EH 모델)에 의한 결빙된 우레아의 해동특성을 고찰하였다. 가열 방식 및 가열원의 형상에 따라 우레아 수용액의 해동 현상과 열전달특성이 차이를 보임을 확인하였다. 최종적으로 300s일 때 EH 모델과 CH 모델의 해동량은 각각 1,118, 그리고 1,096ml로서 EH 모델의 해동능력이 우수함을 알 수 있었다.

후기

본 연구는 환경부 Global-Top Project 친환경자동차 기술개발사업단 및 국토해양부 「하늘 프로젝트」의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] M. Y. Kim, "Performance Prediction of SCR-DeNO_x System for Reduction of Diesel Engine NO_x Emission," Transactions of the KSAE, Vol.11, No.3, pp.71-76, 2003.
- [2] C. Kim, G. B. Cho, D. S. Kim, Y. Jeong, K. O. Oh, B. S. Shin, and M. Y. Kim, "A Study on the NO_x Reduction Performance of a Metal foam SCR Catalyst," Transactions of the KSAE, Vol.3, pp.701-706, 2009.
- [3] B. C. Choi, C. K. Seo, and K. J. Myong, "Freezing and Melting Phenomena of Urea-water Solution for Diesel Vehicle SCR system," Transaction of the Korean Society for Power System Engineering, Vol.4, No.13, pp.5-10, 2009.
- [4] 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.
- [5] C. R. Swaminathan and V. R. Voller, "A General Enthalpy Method for Modeling Solidification Processes," Transaction of Metallurgical, Vol.23B, pp.651-664, 1992.
- [6] Ansys Inc., Fluent, Release 12.0 User's Guide, 2009.
- [7] The Chemical Company, BASF, "AdBlue," Technical Leaflet manual, 2006