



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

博士學位論文

순수물질의 응고와 용융 현상에
관한 수치해석적 연구



濟州大學校 大學院

機械工學科

朴 允 範

2015年 2月

순수물질의 응고와 용융 현상에 관한 수치해석적 연구

指導教授 許 鐘 哲

朴 允 範

이 論文을 工學 博士學位 論文으로 提出함



2015年 1月

朴允範의 工學 博士學位 論文을 認准함

審査委員長 김 남 진 (印)

委 員 허 중 철 (印)

委 員 현 명 택 (印)

委 員 강 창 남 (印)

委 員 김 주 형 (印)

濟州大學校 大學院

2015年 1月

Numerical Analysis on the Solidification and Melting of the Pure Materials

Yun-Beom Park

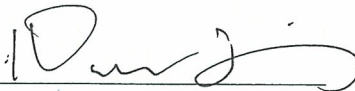
(Supervised by professor Jong-Chul Huh)

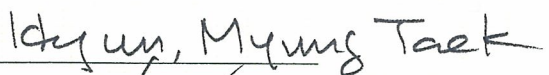
2015. 1.

This thesis has been examined and approved



Thesis director, Jong-Chul Huh, Prof. of Mechanical Engineering

Nam Jin Kim 

Myung Taek Hyun 

Chang Nam Kang 

Joo Hyung Kim 

2015. 1.

Department of Mechanical Engineering

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

LIST OF FIGURES -----	iii
LIST OF TABLES -----	v
NOMENCLATURE -----	vi
ABSTRACT -----	viii
1. 서 론 -----	1
1. 연구 배경(필요성) 및 목적 -----	1
2. 관련 연구 및 최근 동향 -----	4
3. 연구 내용 및 논문 구성 -----	8
II. 이론적 배경 -----	10
1. 자연대류 -----	10
2. 응고와 용융 -----	12
3. 응고와 용융 현상에 대한 해석 방법 -----	16
3.1 엔탈피 방법(Enthalpy Method) -----	17
3.2 등가 열용량 방법(Equivalent Heat Capacity Method) -----	23
3.3 온도-변환 모델(Temperature-Transforming Model) -----	25
4. 지배방정식 -----	28
4.1 질량 보존 방정식 -----	30
4.2 운동량 보존 방정식 -----	30
4.3 에너지 보존 방정식 -----	33

III. 사각형 캐비티 내 갈륨의 용융과정에 대한 수치해석 -----	36
1. 해석 모델 및 경계 조건 -----	36
2. 수치해석 결과 및 고찰 -----	38
2.1 시간에 따른 온도변화 -----	38
2.2 시간에 따른 속도벡터변화 -----	39
2.3 시간에 따른 상경계면의 이동 -----	40
2.4 실험데이터와 비교 검증 -----	41
IV. 저장 탱크 내 요소수의 동결과 해동에 대한 수치해석 -----	42
1. 차량용 Urea-SCR 시스템 소개 -----	42
1.1 자동차 배출가스 유해성 -----	42
1.2 자동차 배출가스 규제 -----	45
1.3 Urea-SCR 시스템 및 반응 메커니즘 -----	46
2. 저장 탱크 내 요소수의 동결과 해동에 대한 수치 해석 -----	50
2.1 수치해석 모델 및 경계조건 -----	50
2.2 결과 및 고찰 -----	61
V. 결론 -----	96
참고문헌 -----	99
요 약 문 -----	105
감사의 글 -----	107

LIST OF FIGURES

Fig. 1	One-region melting and solidification -----	12
Fig. 2	Two-region melting and solidification -----	13
Fig. 3	Solidification of a multicomponent PCM -----	14
Fig. 4	Conduction and Convection-controlled melting -----	15
Fig. 5	Conduction-controlled melting in a finite slab -----	18
Fig. 6	Enthalpy of the PCM as a function of temperature -----	18
Fig. 7	Discretization of space and time for the solution of the-region melting problem -----	20
Fig. 8	Dependence of specific heat to temperature for equivalent heat capacity model -----	24
Fig. 9	Dependence of enthalpy on temperature for phase change occurring over a range of temperature -----	26
Fig. 10	Gallium numerical calculation area & boundary conditions -----	37
Fig. 11	Contour of temperature field according to flow time(s) -----	38
Fig. 12	Contour of velocity vector according to flow time(s) -----	39
Fig. 13	the moving melt front according to flow time(s) -----	40
Fig. 14	Comparison of melt fronts calculated and experimental result for the 2-D melting of gallium -----	41
Fig. 15	Urea injection system for SCR system -----	47
Fig. 16	Schematic diagram of the urea solution at freezing model -----	51
Fig. 17	Urea injection system with coolant heating element in th storage tank -----	53
Fig. 18	Coolant heating pipe & Storage tank of the Urea-SCR system mounted on 8ℓ diesel engine vehicle -----	54
Fig. 19	Configurations of the heating pipe(VC87) -----	55

Fig. 20	Configurations of the heating pipe(VC67) -----	56
Fig. 21	Configurations of the heating pipe(VZ100) -----	57
Fig. 22	Configurations of the heating pipe(HC67-m, b) -----	58
Fig. 23	Configurations of the heating pipe(HC67-m, b) -----	59
Fig. 24	Temperature profiles of freezing phenomenon at -25°C atmosphere -----	62
Fig. 25	Melting patterns of urea solution with VC87(x=0) -----	65
Fig. 26	Melting patterns of urea solution with VC67(x=0) -----	66
Fig. 27	Melting patterns of urea solution with VZ100(x=0) -----	67
Fig. 28	Melting patterns of urea solution with HC67_m(x=0,y=0,z=0) ----	68
Fig. 29	Melting patterns of urea solution with HC67_b(x=0,y=0,z=0) ----	69
Fig. 30	Melting patterns of urea solution with HZ100_m(x=0,y=0,z=0)---	70
Fig. 31	Melting patterns of urea solution with HZ100_b(x=0,y=0,z=0)----	71
Fig. 32	Melting properties according to heat transfer area (Urea solution : -20°C, Coolant : 80°C, 200L/h) -----	77
Fig. 33	Melting properties according to coolant flow rate(VC67) (200L/h, 150L/h, 100L/h) -----	83
Fig. 34	Melting properties according to coolant flow rate(HC67) (200L/h, 150L/h, 100L/h) -----	86
Fig. 35	Melting properties according to Vertical, Horizontal install (Urea solution : -20°C, Coolant : 80°C, 200L/h) -----	92
Fig. 36	Melting properties according to position 200mm, 30mm (Conditions, Urea solution : -20°C, Coolant : 80°C, 200L/h) ----	95

LIST OF TABLES

Table 1. Gallium property -----	37
Table 2. Korea emission standard For HDD Diesel Engine(g/kWh)-----	46
Table 3. Properties of the AdBlue™ (32.5 wt% Urea) -----	49
Table 4. Specification of Coolant Heating Pipe & grid Number -----	60
Table 5. Conditions of urea solution in storage tank -----	61



NOMENCLATURE

ROMAN

A	Parameter as a function of liquid fraction
A_{mush}	Mushy region constant set, set to 1×10^5
c_p	Specific heat at constant pressure
c_{ps}	Specific heat at constant pressure, solid
$c_{p\ell}$	Specific heat at constant pressure, liquid
f	Liquid volume fraction[%]
g	Gravity
H	Total enthalpy
h	enthalpy
h_{ℓ}	enthalpy, liquid
h_s	enthalpy, solid
$h_{s\ell}$	enthalpy, at the melting point
K	Degree kelvin
L	Latent heat of the material
p	Static pressure
R_a	Rayleigh number
S_h	The energy source term
S_i	The momentum sink term
T	Temperature
T_h	Hot temperature on wall[K]
T_i	Initial temperature[K]
T_m	Melting point[K]
T_{m1}	Freezing point 1 in multi-component[K]
T_{m2}	Freezing point 2 in multi-component[K]

T_o	Surface temperature[K]
T_{ref}	Reference temperature
T_s	Solid temperature
t	Time
u	Velocity
x	Direction

GREEK

β	Thermal expansion coefficient
κ	Thermal conductivity
κ_s	Thermal conductivity, solid
κ_ℓ	Thermal conductivity, liquid
ρ	Density[kg/m ³]
ρ_ℓ	Density, liquid[kg/m ³]
ρ_{ref}	Reference density[kg/m ³]
ρ_s	Density, solid[kg/m ³]
μ	viscosity

ABSTRACT

As a field of unsteady heat transfer problem and two-phase flow, phase change problem has been an object of concern not only in academic research but also in various industrial fields. However, this is being analyzed as an approximated or simplified form due to the complexity of the problem and still remains as an important issue to solve.

In this paper, the numerical analysis method was used in analyzing the phase change problem between solid phase and liquid phase. Using the numerical analysis program, the two-dimensional phase change problem was verified and the phase change process of the object for calculation and natural convection were considered in detail. Also, the freezing and thawing phenomena of urea solution were numerically analyzed in consideration of natural convection in the Urea-SCR system, as one of promising ways of reducing NO_x of diesel vehicles that causes a three-dimensional phase change problem, and the following results were obtained.

The result of numerical analysis on the melting phenomena of pure gallium in the rectangular cavity which is a two-dimensional unsteady state corresponded relatively well with the existing study results and thus the numerical analysis method used in this study was useful in solving the coagulation and melting problem of pure material.

To solve the urea freezing problem of the Urea-SCR system installed in the H/D(Heavy Duty) diesel car for reduction of NO_x in the cold-weather area with a temperature below -20°C during the winter season, a separate thawing device is needed. In this study, using the coolant heater urea-SCR

system, as a thawing method for stably supplying liquid urea required in the early stage of cold start-up from frozen urea, the thawing phenomena of urea in the urea storage tank were numerically analyzed.

Optimal design of cooling water circulation pipe is required for securing a lot of urea within a short time, and the big heat transfer area and the coil shape rather than the zigzag shape were more favorable to the improvement of thawing performance. Also, it was more effective to horizontally install the cooling water circulation pipe near the bottom of the storage tank.

But the effect of cooling water circulation flow on thawing performance was insignificant. This result goes against researcher's expectation and came from the simplified shape of the cooling water circulation pipe.

In conclusion, it is thought that the flow path should be long and complex to obtain improved thawing performance depending on the increase in the cooling water circulation flow rate.

I. 서론

1. 연구 배경(필요성) 및 목적

상변화 과정은 물질이 열의 방출 또는 흡수를 수반하면서 하나의 상태(상, Phase)에서 다른 상태로 변화하는 과정을 말한다. 즉, 물질의 상태가 온도·압력·자기장 등 일정한 외적 조건에 따라 한 상에서 다른 상으로 변하는 현상을 말한다. 이러한 상변화 과정(Phase Change)은 관계되는 상의 종류에 따라 기체-액체, 액체-고체, 기체-고체 상변화 과정으로 나눌 수 있다. 이러한 상변화 문제는 1860년대에 Neumann의 연구에서부터 시작되어 1890년대의 Stefan의 극 지역에서 얼음의 두께 변화에 대한 연구결과를 발표한 이후, “Stefan problem”이라 불리었으며, 현재는 “Phase change” 또는 “Moving boundary”문제라고 하는 용어나 용고를 포함하는 비정상 열전달 문제로 명명되어 그 중요성과 관심이 증대되고 있다. 특히 상변화 물질(Phase Change Materials, PCM)을 이용하여 에너지를 저장하는 축열 장치의 설계, 금속의 주조 과정 및 성형 과정, 극지 개발, 원자력 발전소 안전 분석 등 다양한 분야에서 중요한 열전달 특성으로 여겨지고 있을 뿐만 아니라 자연 현상의 규명과 관계하여 활발히 연구되어 오고 있다[1].

각 분야에서의 응용 사례를 살펴보면, 먼저 에너지 저장 분야에서는 가용 에너지의 보다 효율적인 이용과 저장이 최근에 중요하게 인식되면서 상변화 물질을 이용하여 에너지를 저장하는 축열 시스템의 설계가 활발히 연구되고 있다. 잠열 축열 시스템은 열저장 밀도가 커서 저장 공간을 최소화 할 수 있으며 특히 전력 부하의 최대치를 줄이고 저렴한 심야 전력을 이용하는 측면에서 매우 유리하다. 금속 분야에서의 응용 사례를 살펴보면, 초 급속 냉각 가공 및 이를 이용한 연속 주조와 주철 제조 시에 열전달의 영향이나 유체의 흐름과 응고면의 냉각율을 조절하여 주물품의 질을 높이면서 완성시간을 단축시킬 수 있다. 또한 히트 파이프를 이용한 열 교환기도 많이 이용되고 있는데, 전자 분야에서는 컴퓨터나 노트북

등의 소형 전자 제품 등에 냉각 팬 대신에 히트 파이프를 이용한 열 교환 방식을 채택하고 있다. 그 외에도 많은 분야에 상변화 현상을 이용한 다양한 기술이 이용되고 있으며 많은 참고 자료들에 상세히 기술되어 있다[2].

상변화를 나타내는 열전달 과정은 2상 유동의 한 분야로서 물질이 에너지의 이동을 수반하면서 내부 상태가 변화하는 과정을 말한다. 이러한 상변화 과정은 고상(Solidus)과 액상(Liquidus) 사이에 있는 상경계면(Phase change interface)을 중심으로 서로 다른 열역학적 물성을 가지고 있어 열의 흡수와 방출 과정에서 미지의 속도로 유동하기 때문에 많은 가정을 포함하는 특별한 경우를 제외하고는 엄밀해가 존재하지 않는다. 초기 많은 연구에도 불구하고 하나의 상을 갖는 문제에 비하여 기본적으로 이해해야 하는 미지수가 증가할 뿐만 아니라, 상경계면에서의 열 및 물질 전달에 대한 정보가 추가로 요구되어 한정된 조건으로 국한되는 경우가 많아 아직 해결해야 할 중요한 문제로 남아있다. 또한, 실험적 측면에서도 실험 조건을 제어하여 해석에 필요한 수준까지의 현상을 정확히 측정하기 위한 센서 및 계측 장비 등의 제반 기술이 요구되기 때문에 상경계면의 비선형 경계 현상을 측정하기 어려웠다. 앞서 설명한 것처럼 대부분의 열적 특성을 갖는 장비 설계의 경우, 실험적인 결과를 근거로 수행함으로써 경제성과 안정성을 향상시키기 위해서는 기초적인 현상에 대한 정확한 판단과 상세한 해석이 요구되기 때문에 실험에서는 국소 영역에 대한 측정 및 해석 방법을 대폭 향상시켜야 한다. 최근, 상변화 과정을 포함한 열전달 해석 연구는 발전된 전자·전기 계측 장비와 반도체 제작 공정을 응용한 초정밀 가공을 통한 실험을 진행하고 시간적·공간적으로 해상도가 높은 결과들을 확보하여 보다 근본적인 연구를 시도하고 있으며 발달된 전산장비의 도움으로 2상 유동 열전달에 대한 해석에도 직접적인 수치해석 방법을 수행하고 있다[3].

한편, Urea-SCR 시스템은 넓은 온도 영역에서 NO_x의 전환율이 높고, 연비에 미치는 영향이 작기 때문에 향후, 강화되는 배기 규제 대응을 위한 가장 적합한 장치로 인정받고 있다[4]. 하지만 Urea-SCR 시스템을 적용하기 위해서는 장착될 차량의 엔진 및 제어 시스템 설계 초기에 과도 운전에 따른 전환율의 감고, NH₃ 슬립, 그리고 요소수의 안정적 공급을 위한 인프라가 구축되어야 한다[5]. 또한, Urea-SCR 시스템에 사용되는 요소수는 어는 점(-11℃)이 낮아 동절기, 북유럽과

북미 지역과 같은 -20°C 이하의 환경에서 동결되는 문제점을 갖는다. 이러한 요소수의 물리적 특성은 차량용 SCR 장치 보급의 가장 큰 애로 사항이 되고 있다 [6]. 따라서 H/D 디젤 차량에 장착된 요소수 저장 탱크 내 요소수의 결빙을 방지하기 위한 해동장치가 필요하며, 냉시동 초기에 분사에 필요한 액상 요소수를 적정 시간 내에 안정적으로 공급 가능한 기술 확보가 필요하다.

따라서 본 연구는 H/D 디젤 차량에 장착된 Urea-SCR 시스템에서 제한된 열원인 엔진 냉각수 가열 방식을 적용하여 저장 탱크 내 요소수의 결빙을 방지하고, 냉시동 초기 분사에 필요한 액상 요소수를 적정 시간 내에 안정적으로 공급 가능할 수 있는 가열원인 냉각수 순환 파이프의 최적화 설계에 필요한 기술을 확보하고자 한다. 저장 탱크 내 요소수의 상변화 과정에 대한 정확한 예측을 위해서 다양한 설계 인자들이 동결된 요소수의 해동 현상과 열전달 특성에 미치는 영향을 고찰하였다.



2. 관련 연구 및 최근 동향

고체와 액체 그리고, 기체 세 가지 상(Phase)에 대한 열전달과 유동장 해석은 오래 전부터 연구되어 온 분야이다. 이 중 두 개의 상의 같이 존재하는 경우의 문제는 공학적으로 많이 사용되는 것으로 실제 응용 분야가 많다. 만일 서로 다른 두 상 사이에 상변화가 일어난다면 두 상경계면의 이동 처리가 중요해진다. 상변화 현상이 일어나는 대표적인 문제는 고체와 액체의 상변화와 고체와 기체의 상변화이다. 이 두 문제는 모두 열에 의해서 상변화가 일어난다. 고체-액체 상변화는 고체에서 액체로의 용융(Melting) 문제와 액체에서 고체로의 응고(Solidification) 문제가 있다.

응고 및 용융 문제를 포함하는 상변화는 금속의 주조 과정, 상변화 물질을 이용하여 에너지를 저장하는 축열 장치의 설계, 원자력 발전소 사고 분석 등 다양한 분야에서 중요한 열전달 특성으로 여겨지고 있다. 이러한 상변화 과정은 상변화 과정 시 형성된 미소 구조에 의하여 최종 생산품의 강도 및 금속 성분 등이 결정되고, 상변화 과정에 수반되는 복잡한 열 및 물질 전달 현상을 실험적으로 관찰 또는 적절한 오차범위 이내로 측정하기가 용이하지 않기 때문에 이론적으로 모델링하기 위한 연구들이 여러 연구자들에 의해 수행되어 왔다.

Shamsundar et al.는 열전도 방정식과 상경계면의 에너지 방정식을 하나의 엔탈피 방정식으로 쓸 수 있음을 보였다. 이러한 상변화에 따른 상경계면이 존재하는 문제에서 상변화 온도가 일정한 순수 물질에서의 다차원 상변화 문제에 대한 엔탈피 모델을 제시하고, 넓은 영역의 Stefan수를 해결하기 위해 음해법(Implicit scheme)을 사용하였으며, Stefan수와 Fourier수의 상호관계를 표시하였다[7].

Crowley는 엔탈피 방법을 다차원의 Stefan 문제 해석에 확장 적용하였다. 그리고 사각 실린더의 응고 예제에서 실험 결과와 비교하여 해가 잘 일치함을 보였다[8].

Tacke는 엔탈피 방법에서의 진동을 없애기 위하여, 상경계면 위치를 구한 후 이 위치를 엔탈피 방법에 다시 사용하였다. 그는 격자 사이의 엔탈피 분포를 선형적으로 가정하였다. 그리고 상경계면을 포함한 계산 체적내의 총 엔탈피(Total

enthalpy)가 엔탈피 방법에서의 엔탈피와 같다는 가정으로 상경계면의 위치를 구하였다. 그는 1차원 평판(Continuously cast steel slab)의 응고에서 엔탈피 방법과 비교할 때, 진동이 없는 정확한 해를 보여주었다. 다만, 고체와 액체의 물성이 같은 경우와 1차원 응고 해석에서만 이 방법을 적용하였다[9].

상변화 시 고체-액체 상경계의 시간에 따른 거동 및 잠열의 변화를 수치 해석하는 방법들을 격자계 이동 여부로 나누어 보면 크게 고정 격자계(Fixed-grid method)를 이용하는 방법과 시간에 따라 움직이는 이동 격자계(Moving-grid method)를 이용하는 방법이 있다.

고정 격자계를 사용하는 방법들 중 많이 사용되는 것은 Voller 등이 제안한 엔탈피 방법(Enthalpy method)이다[10-17]. 엔탈피 방법은 이동하는 상 경계에서의 열 및 질량 조건들이 적절한 생성항의 정의에 의해 지배방정식에 적용되고, 액체와 고체에 모두 같은 지배 방정식을 적용할 수 있다. 따라서 정확한 상경계의 위치를 알 필요가 없으며, 계산 영역을 고정 격자로 설정하여 유체의 위치를 추적하는 운동량 방정식과 에너지 방정식의 알고리즘이 필요하지만, 격자를 재생성할 필요가 없어서 계산이 용이하기 때문에 응고 및 용융의 상변화 해석 시 가장 많이 사용되는 방법으로 알려져 있다. 또한, 비선형 경계조건에서 수치해를 구하는 중속 함수에 온도와 함께 엔탈피를 도입하여 계산의 안정성과 정확성을 높였다.

Voller & Cross는 엔탈피 방법에서 문제가 되는, 시간에 따른 해의 진동을 해결하기 위하여 상변화면의 위치를 찾고자 하였다. 그들은 총 엔탈피의 시간에 따른 변화율이 상변화면의 시간에 대한 변화율과 비례함을 이용하여 상변화면의 위치를 보다 정확하게 구할 수 있음을 보여주었다[10].

Brent et al.은 합성 물질의 용융 문제에서 고체와 액체의 중간 영역을 다공 물질로 가정하여 해석영역을 다공(Porosity)영역으로 고려한 엔탈피-다공(Enthalpy-porosity) 방법을 제시하고, 고체 및 액체를 각각 다공도(Porosity)가 0 및 1이 되도록 정의하였으며 상변화가 나타나는 동안 다공도에 의하여 잠열의 방출 또는 흡수가 고려되며 속도에 대한 조건이 운동량 방정식에 포함되도록 하였다. 사각 형상의 순수 금속 용해 문제에서 온도와 유동장을 구하였으며, 실험 결과와 잘 일치하는 결과를 보여 주었다[12].

Lacroix & Voller는 두 격자계를 이용하여 사각형의 용융 문제에서 유동장과

온도장을 계산하고 비교하였다[14]. Swaminatan & Voller는 엔탈피-다공 방법을 응고 문제에 적용하여 선형화된 온도와 엔탈피와의 상관관계로써 다양한 체적과 유한 요소에 대하여 수치해석을 수행하였다[15-16]. Voller & Peng는 엔탈피 방법을 응용하여 시간에 따라 움직이는 격자계에서의 상변화 열전달 방정식을 구하였다. 그리고 움직이는 격자계에서의 결과를 고정 격자계에서의 결과와 비교하였다[17].

고장 격자계에서 엔탈피 방법이 아닌 다른 방법을 이용한 해석도 많은 사람들에게 의해 연구되어 왔다. Poots는 경계층 이론의 근사적인 적분 방법(Approximate integral method)을 상변화 문제에 적용하였다[18]. 그리고 Bonacina et al.은 고정 격자계에서의 상변화 해석을 위하여 등가 비열(Equivalent heat capacity)을 도입하였다. 그는 액체와 고체 경계면에서의 비열은 고체와 액체의 평균 비열과 잠열을 일정 온도 구간으로 나눈 값의 합을 사용하였다. 그리하여, 1차원 응고 문제에서 해석해와 비교하여 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다[19]. Hsiao는 Bonacina et al.의 방법을 개선한 후 고정 격자계에서 상변화를 해석하였다. 온도변화 구간이 넓은 여러 격자점으로 생성된 상변화 모델에서 잠열을 절점온도의 선형 보간으로 고려하여 상변화 문제를 해석할 수 있는 알고리즘을 제시하였다[20].

이동 격자계를 이용한 방법은 해석 대상을 액체와 고체로 나누어 각각 다른 지배방정식을 적용하여 계산하는 것이다. 이 방법은 계산 영역을 이동 격자로 설정하여 경계층이 함께 움직이기 때문에 위치의 해를 구하는 특별한 알고리즘이 필요하지 않으며 경계 조건을 적용하기 쉬운 장점이 있지만, 시간에 따라 상경계면의 위치가 변하면 격자를 재 생성시켜 주어야 하는 과정 때문에 고정 격자계보다 계산시간이 오래 걸리며, 극단적이고 복잡한 상대적 위치 형태가 나타나 격자에 큰 변형 왜곡이 생기는 단점이 있으나 경계면 부근에서의 격자 밀도가 높아 정확성이 높은 장점과 경계조건을 경계면에 쉽게 적용할 수 있는 장점이 있다. Sampath는 SUPG(Streamline-Upwindy/Petrov-Galerkin) 방법을 사용하여 알루미늄과 갈륨에 대한 용융과 응고 과정에 대하여 수치 해석하였다[21].

또한 대류 성분을 동반하는 물질의 응고와 용융 과정에서도 상변화 문제가 주요 연구 대상이 되어 Gong은 SUPG 방법을 사용하여 레일리(Rayleigh)수의 변화에 따라 용융 과정에서의 자연 대류의 영향에 대하여 수치해석 하였고[22],

Sparrow et al.은 실험을 통하여 상변화 과정에 미치는 자연 대류 현상을 고찰하였다. 이들은 상변화 과정의 초기 단계를 제외하고는 자연 대류의 영향을 무시할 수 없다는 사실을 밝혀냈다[23].

Salcuden과 Adbullah는 상변화 문제에서 대류항을 무시한 경우와 포함시킨 경우로 구분하고 이 두 경우에 대하여 장·단점을 비교하고 각 모델에 대한 해동 특성에 대해 논의하였으며[24], Cao와 Chang은 자연대류를 고려하여 이동하는 열원을 갖는 3차원 모델에 적용하고 엔탈피 방법을 사용하여 유한차분법으로 해석하였다[25].

이밖에 Hale과 Viskanta 및 Gau와 Viskanta는 2차원 직각 평면에서의 상변화 온도가 일정한 순수 갈륨의 용융 현상에 대하여 시간이 지남에 따라 나타난 상경계면에 대해 실험적인 연구를 수행하였다[26-27]. Cerimele et al.은 Gau와 Viskanta의 실험 데이터와 비교하여 자연대류에 의한 영향을 고찰하였다[28].

국내에서는 대부분 순수물질의 상변화 현상에 관하여 연구하여 왔다. 유호선, 노승택은 시간의존 Boundary-Fitted 좌표계로의 좌표변환을 이용하여 용융시 액상의 자연 대류를 고려한 임의 형상에서의 2차원 상변화 문제를 해석하는 안정성 있는 수치해석 방법을 제시하였다[29]. 임장순은 상변화 물질을 이용하는 축열조에 관한 기본적인 설계 자료를 제공하기 위하여 상변화물질의 응고 및 용융 과정에 대한 대류유동 및 열전달 특성을 고찰하였다[30]. 유재석은 용융 후 응고를 동반하는 상변화 과정을 수치해석 하여 응고 과정에 용기의 열저항이 미치는 영향에 관하여 고찰하였다. 이운표는 순수물질의 상변화 해석에 미시영역을 도입하여 수치적으로 해석하였다[31]. 강관구 등은 운동량 방정식에서 온도 및 액상분율의 함수인 다공도 생성항과 부력항의 영향을 수정된 PISO(Pressure implicit with splitting of operators) 알고리즘에 적용하여 상경계면의 온도 및 액상분율의 변화에 대하여 수치적 연구를 수행하였다[32]. 김학구 등은 연료전지 자동차의 관형 전기히터 표면에 일정 열 유속을 주어 일정 가열량에 따른 융해량과 해빙과정 특성을 수치해석 하여 초기 열전달은 전도가 주를 이루지만 용융이 진행됨에 따라 대류가 중요한 요소임을 보고하였다[33].

3. 연구 내용 및 논문 구성

국내·외적으로 물질의 액체-고체 상변화에 대한 연구는 어느 한 상에서 다른 상으로 변화하는 열적 특성을 가지고 있는 문제로서, 금속의 주조 및 성형, 축열, 고속 비행체의 동체 설계, 극지방에서의 장비 설계, 연료 전지의 냉시동 성능개선 및 원자력 발전의 안전 문제 등에 많은 실험적, 수치해석적인 연구가 수행되었다. 하지만 이러한 상변화에 관한 대부분의 연구들은 2차원 문제에 국한되는 경우가 많으며 또한 자연 대류가 상변화 과정에 미치는 영향을 고찰한 연구는 많이 부족하다.

따라서 본 연구에서는 수치 해석적 방법으로 다음을 고찰하고자 한다.

- 2차원 사각형 캐비티 내 순수 갈륨의 용융 과정에 대한 열전달 특성
- H/D(Heavy duty) 디젤 차량에 장착된 Urea-SCR 시스템의 요소수의 동결 및 해동 과정에 대한 열전달 특성
- 가열원인 냉각수 순환 파이프의 설계 변수가 동결된 요소수 해동 성능에 미치는 영향

이를 통하여 자연 대류가 상변화 과정에 미치는 영향을 파악하고, 산업적으로나 학문적으로 많은 관심의 대상이 되고 있는 상변화 문제를 3차원으로 확대하여 해석할 수 있는 기반을 마련한다. 또한 H/D 디젤 차량용 Urea-SCR 시스템에서 사용되는 요소수인 AdBlue™ 32.5 wt%에 대한 3차원 비정상 동결 및 해동 과정을 해석하여 -20℃ 이하 극한 환경에서 저장 탱크 내 요소수의 결빙을 방지하고 냉시동 초기 안정적인 요소수를 확보할 수 있는 가열 시스템을 구축할 수 있는 설계 자료를 확보한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II . 는 이론적 배경으로써 상변화 과정에 미치는 자연 대류 현상과 물질의 응고와 용융 현상에 대하여 살펴보고, 상변화 현상을 해석하는 여러 가지 방법을 소개하였다. 그리고 상변화 현상에 적용할 수 있는 지배 방정식과 각 방정식에 포함된 생성항을 고찰하면서 본 연구에 사용된 수치해석 방법들에 대하여 정리하였다.

III. 에서 우선, 사각형 캐비티 내 순수갈륨의 용융과정을 수치해석 하여 Gau와 Viskanta[27]가 수행한 실험 데이터와의 비교를 통해 본 연구에 사용된 수치해석

방법의 타당성을 검증하였다. 검증된 수치해석 방법을 이용하여 냉각수 순환 가열 방식의 요소수 해동 장치에 대하여 가열원의 형상과 여러 설계 조건에 따른 요소수의 해동 특성을 고찰하였다. 그리고 본 수치 해석 결과를 Choi et al.[23]가 수행한 요소수의 실험 데이터 비교하였다[34]. 끝으로 IV. 에서 본 연구의 결론과 앞으로의 연구 방향에 대해 기술하였다.



II. 이론적 배경

1. 자연대류

자연대류(Natural convection)는 유체의 가열로 생기는 밀도의 변화 때문에 일어나는 운동이다. 대부분의 유체의 자연대류는 부력에 의해서 발생하는데, 그 부력은 전열면 근방의 유체가 가열되어 밀도가 감소함으로써 생긴다. 만일 유체가 중력장과 같은 외력장(External forced field)에 있지 않으면 부력은 존재하지 않을 것이다. 그러나 중력장이 자연대류를 일으키게 할 수 있는 유일한 외력장은 아니다. 회전하는 유체는 원심력장에 있으며, 만일 이 유체에 접하는 면이 가열되면 자연대류가 일어난다. 이런 자연대류를 일으키는 부력은 체적력(Body force)이라고 한다. 현재까지 자연대류 열전달에 관하여 이론적으로 또는 실험적으로 매우 많은 연구가 진행되어 왔지만 상변화 문제에 수반되어 진행된 연구는 가열된 수평 원관 주위의 용해 과정을 연구한 Sparrow et al.[23]의 실험 등에서 상변화 과정에 미치는 자연대류 현상을 고찰하면서 본격적으로 이루어지기 시작했다. 이들의 연구를 통해 상변화 과정의 초기 단계(과도 상태)를 제외하고는 자연대류의 영향을 무시할 수 없다는 사실이 밝혀졌고 이러한 사실은 수치 해석을 통한 정량적인 연구들이 이루어지게 되는 계기가 되었다. 최근에는 조금 더 복잡한 형상이나 내부 유체가 물인 경우의 밀도 역전 효과를 고려한 연구들이 많이 이루어지고 있다[2].

예를 들어 보면 먼저 Kobus and Wedekind는 수평 등온 실린더를 대상으로 다양한 범위의 Rayleigh 수에 따른 열전달 현상을 실험적으로 고찰하였고[35], Wenxian and Armfield는 직사각형과 실린더 용기, 수직 배관내의 냉각에 의한 자연대류 현상을 DNS를 통하여 연구하였다[36],

Gebhart는 수직평판 자연대류 열전달 해석시 경계층의 안정성과 천이에 대하여 조사하였으며[37], Eckert & Soehngen은 자연대류에서의 부력과 점성력과의 비를 나타내는 무차원수인 Grashof수를 4×10^8 정도로 관찰하였다[38].

Lewandowski et al.은 원추형 물체를 흐르는 외부 자연대류 현상을 고찰하였다[39]. Ramaswamy & Moreno은 $Ra = 10^3 \sim 10^6$ 의 자연대류 현상을 2, 3차원 cavity에 대해 해석하였고[40], Mayne et al.은 h-adaptive 유한요소법을 이용하여 사각 캐비티 내의 자연대류 현상을 해석하였다[41].

국내에서는 많은 연구가 이루어져 고상근이 정사각형 밀폐공간내의 비정상 자연대류에 관한 연구를 진행하였으며[42], 유호선은 밀도차와 자연대류를 고려하여 다양한 조건에서 상변화 과정을 해석하였다[43].



2. 응고와 용융(Solidification & Melting)

물질의 응고 및 용융을 포함하는 상변화 과정은 주조, 연속주조, 용접, 결정성장(Crystal growth), 레이저 드릴링, 유리제조 등 재료 가공공정, 상변화 물질을 이용하여 열에너지를 저장하는 축열 시스템, 식품과 제약 처리뿐만 아니라 해양 결빙, 지각변동 등 자연현상과 밀접하게 연관되어 있다.

모든 금속 제품은 제조 과정 중에 액체 상태가 일정한 온도 범위에서 응고 과정을 거쳐 최종 제품이 완성된다. 모든 응고와 용융 과정은 상변화 물질의 특성과 초기 조건에 따라 단일 영역, 이중 영역 및 다중 영역 등 세 가지 유형으로 분류할 수 있다.

단일 성분 상변화 물질의 용융과 응고 과정은 분명한 상 경계면을 형성하면서 일정 온도(용점)에서 상변화가 일어난다. 예를 들어, 순수 물인 경우에는 0°C 에서, 그리고 순수 n-Octadecane ($\text{C}_{18}\text{H}_{38}$)인 경우에는 28°C 에서 응고와 용융 과정이 일어나고, 초기 조건에 따라서 단일 영역과 2 영역 문제로 분류된다.

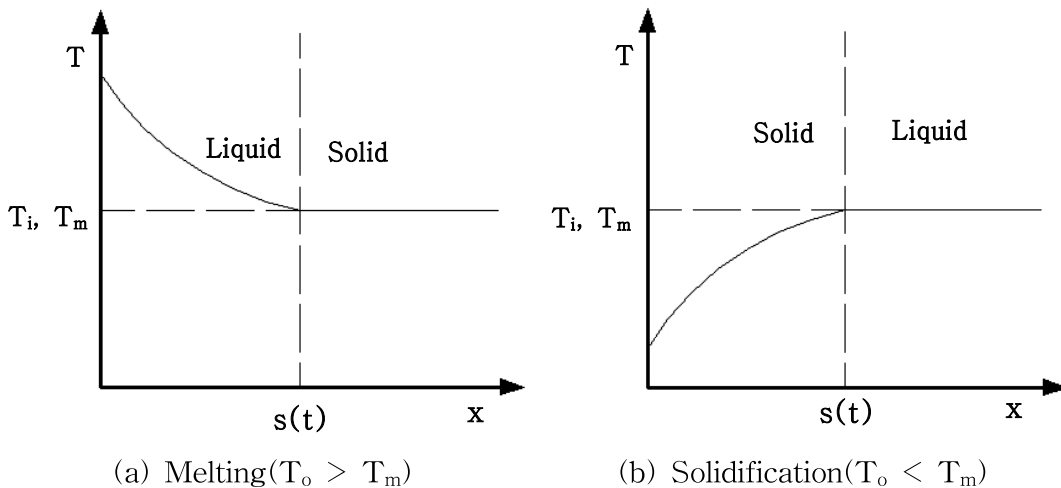


Fig. 1 One-region melting and solidification[44]

용융(또는 응고) 과정에서, 만약 상변화 물질의 초기 온도, T_i 가 용점, T_m 과

같다면, 고상(Solidus phase) 온도는 상변화 과정 동안 융점을 유지한다. 이런 경우에는, 액상(Liquid phase)에서의 온도분포만 필요하고, 다른 상의 온도는 중요하지 않다. 이와 같은 상변화 과정을 단일 영역 문제(One-region problem)라 한다. Fig. 1은 1차원, 단일 영역에 관한 응고와 용융 문제의 온도 분포를 보여준다. 표면 온도, T_0 는 용융 과정에서는 융점, T_m 보다 높고, 응고 과정에서는 낮다. 용융 과정에서, 만약 상변화 물질의 초기온도, T_i 가 융점온도 T_m 보다 낮다면, 고체와 액상의 온도분포는 Fig. 2와 같이 나타난다.

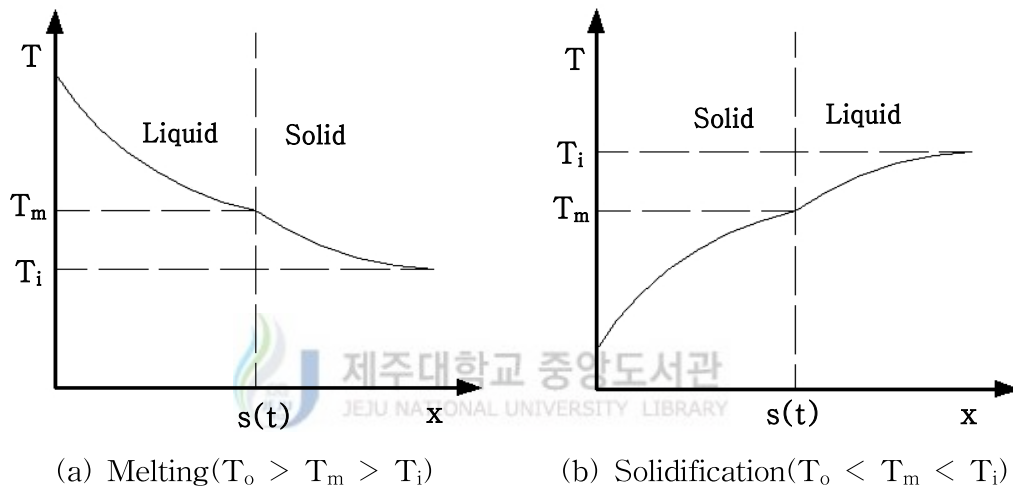


Fig. 2 Two-region melting and solidification[44]

다중 성분 상변화 물질인 경우, 고-액 상변화 과정은 일정온도 대신에 상당한 온도범위(T_{m1} , T_{m2})에 걸쳐 진행된다. 만약, 상변화 물질의 온도가 T_{m2} 보다 높으면 액상이고, T_{m1} 보다 낮으면 고상이다. 고상과 액상 사이 즉, 온도 범위가 T_{m1} 과 T_{m2} 사이에는 머시 영역(Mushy zone)이 존재한다. 이와 같은 상변화 물질의 상변화 과정을 보다 정확하게 해석하기 위해서는 액상, 고상 그리고 머시 영역에서 온도분포가 결정되어야 하기 때문에 다중 영역 문제(Multiregion problems)라 한다. Fig. 3은 다중 성분 상변화 물질의 1차원 응고 과정에서 온도 분포이고, 두 개의 상 경계면을 추적해야 한다는 것을 알 수 있다.

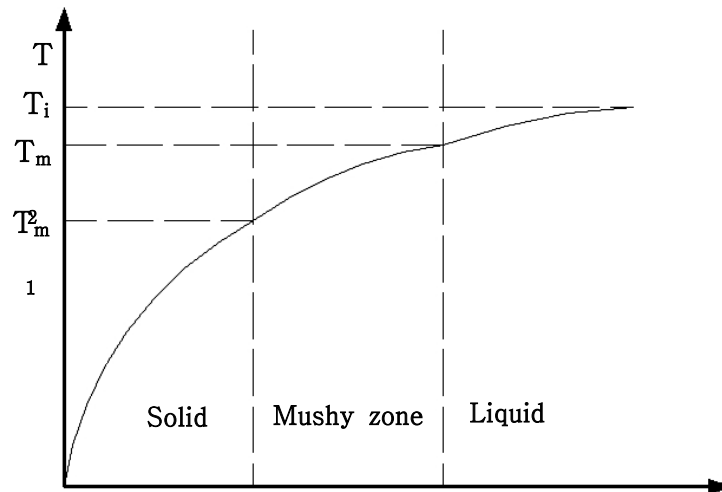
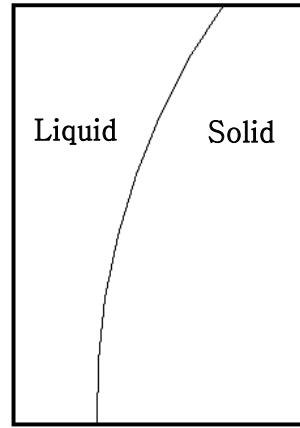
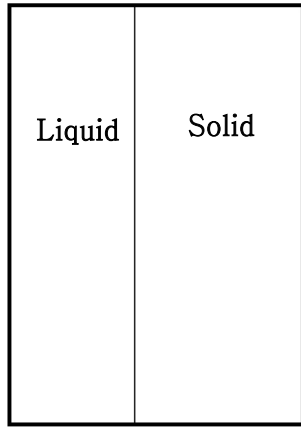


Fig. 3 Solidification of a multicomponent PCM[44]

상변화 문제에서, 고-액상 경계면의 위치는 마지막 해가 얻어질 때까지 알 수 없으며, 상변화 과정이 진행되는 동안 이동하기 때문에 이동 경계 문제(Moving boundary problems)라 하며, 항상 독립 변수로서 시간을 가지고 있다. 또한, 액상과 머시 영역에서는 온도 구배에 의한 자연 대류가 용융과 응고 과정에 큰 영향을 주지만, 연구 초기(1970년)에서는 자연대류의 영향이 중요하게 여겨지지 않았다.

Fig. 4는 사각형 캐비티 내 용융 과정에서 자연대류의 영향을 보여준다. 왼쪽 벽 온도, T_h 가 용점(T_m)보다 높고, 오른쪽 벽면 온도가 초기온도, T_i 이다($T_i \leq T_m$). 이와 같은 초기 조건에서 전도에 의해 상변화 과정이 일어난다고 보면, 상 경계면은 수직한 가열 벽면과 평행하게 이동한다. 하지만 액상에서 자연 대류의 영향을 고려해주면 상 경계면은 캐비티 상부에서 더 빠르게 이동한다. 이와 같은 현상은 가열 벽 근처에 있는 높은 온도의 액체가 상부로 이동하고, 상 경계면 근처의 차가운 유체는 아래로 이동하기 때문에 발생한다. 결과적으로 자연 대류의 영향으로 상 경계면의 모양은 경사지고, 액상에서 향상된 열전달은 용융 과정을 더 촉진시킨다. 결과적으로 상변화 시 일어나는 온도 구배에 의한 자연대류는 미세구조의 형성에 영향을 주어 순수 금속이나 합금의 강도 및 성분 등을 결정하게 된다.



(a) Conduction controlled melting (b) Convection controlled melting

Fig. 4 Conduction and Convection-controlled melting[44]

3. 응고와 용융 현상에 대한 해석 방법

상변화 과정(Phase Change Process)을 해석하려면 많은 수학적, 물리적 문제에 직면하게 되며, 이러한 문제는 크게 이동 경계와 물리량의 변화와 관련된 문제이다. 상변화 과정의 가장 큰 특징은 물리량이 다른 2가지 이상의 물질이 경계면을 중심으로 나누어져 있다는 것이다. 상 경계면에서는 매우 빠른 물질 이동이나 상변화, 유동 변화가 발생하므로 많은 연구자들이 이 문제에 대해 관심을 가져왔으며 또한 연구 목적에 따라 다양한 해석 방법이 제시되어 왔다. 일반적인 상변화 과정은 해석의 영역 내에 열전달의 진행함에 따라 상 경계면이 이동하게 되며, 이러한 상 경계면이 해의 일부로 결정되어야 하는 이동 경계 문제로서 수학적으로 비선형이므로 고전적인 Stefan 문제 등 극히 일부의 경우를 제외하고는 해석적인 해(Analytical Solution)가 존재하지 않는다[2].

일반적으로, 상변화 과정은 운동량, 열, 물질 전달이 상호 연계되어 있으며, 경계의 형태, 발달, 운동학적인 측면이 혼합되어 중요한 변수로 작용한다. 또한 상 경계면의 변화 자체도 아주 복잡하고 해석적인 방법으로는 매우 난해한 문제이기 때문에 현재에는 해석적, 수치적, 실험적인 연구가 따로 이루어지고 있다.

하지만, 많은 선행연구들에 의하여 해석적 방법으로는 극히 제한적인 경우를 제외하고, 2차원 또는 3차원 상변화 문제를 풀 수 없음을 확인하였다. 특히, 대류 열전달을 고려해주어야 하는 문제는 더욱 불가능하다. 하지만 대부분 용융과 응고 상변화 현상은 복잡한 2차원, 3차원에서 일어나고, 자연 대류까지 고려해주어야 하는 경우가 많아 수치적 방법을 사용해야 한다.

상변화 과정에서 고-액상 경계면(Solid-Liquid Interface)의 시간에 따른 거동 및 잠열(Latent Heat)의 변화를 계산할 수 있는 수치적 방법은 격자(Grid) 이동 여부에 따라 크게 시간에 따라 움직이는 이동 격자계를 이용하는 방법과 고정 격자계를 이용하는 방법이 있다.

먼저, 이동 격자계를 이용한 방법은 해석 대상을 액체와 고체로 나누어 각각 다른 지배방정식을 적용하여 계산한다. 이 방법은 계산 영역을 이동 격자로 설정하여 경계층이 함께 움직이기 때문에 위치의 해를 구하는 특별한 알고리즘이 필

요하지 않으며, 경계면 부근에서 격자 밀도가 높아 해의 정확성이 높고, 경계 조건을 경계면에 적용하기 쉬운 장점이 있다. 그러나 시간에 따라 상 경계면의 위치가 변하면서 격자를 재 생성시켜 주어야 하는 과정 때문에 고정 격자계보다 계산시간이 오래 걸리고, 극단적이고 복잡한 상대적 위치 형태가 나타나 격자에 큰 변형 왜곡이 생기는 단점이 있다.

두 번째 그룹은 고정 격자계를 이용하는 방법이다. 이 방법에서, 지배방정식은 액체와 고상을 포함하여 전체 상변화 영역에 대하여 작성한다. 상경계의 위치는 수렴된 온도분포를 얻은 후에 결정되어진다. 이 그룹에서 세 가지 중요한 방법은 엔탈피 방법(Enthalpy Method), 등가 열용량방법(Equivalent Heat Capacity Method) 그리고 온도-변환 모델(Temperature-Transforming Model)이다. 온도-변환 모델은 엔탈피 방법과 등가열용량방법의 장점을 다 가졌으며, 액상에서 자연 대류의 영향을 잘 설명할 수 있다. 이 장에서는, 고-액 상변화 문제를 해결하기 위한 다양한 고정격자 수치적 해법을 정리하였다.

3.1 엔탈피 방법(Enthalpy Method)



엔탈피 방법은 이동 상 경계면에서의 열 및 질량 조건들이 적절한 생성항의 정의에 의해 지배 방정식에 적용되고, 액상과 고상 등 그리고 상 경계면을 포함하는 모든 영역에서 같은 지배 방정식을 적용할 수 있다. 정확한 상 경계면의 위치를 알 필요가 없으며, 계산 영역을 고정 격자로 설정하여 유체의 위치를 추적하는 운동량 방정식과 에너지 방정식의 알고리즘이 필요하지만, 격자를 재 생성할 필요가 없어서 계산이 용이하기 때문에 응고 및 용융의 상변화 해석 시 가장 많이 사용하는 방법으로 알려져 있다. 또한, 비선형 경계조건에서 수치해를 구하는 종속 함수에 온도와 함께 엔탈피를 도입하여 계산의 안정성과 정확성을 높였다.

엔탈피 방법은 Fig. 5에 도시된 바와 같이 유한한 슬래브에서 열전도에 의한 용융 문제를 해결하기 위하여 도입되었다. 여기서, 액체와 고체의 밀도는 동일한 것으로 가정한다($\rho_s = \rho_\ell$). 에너지 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (1)$$

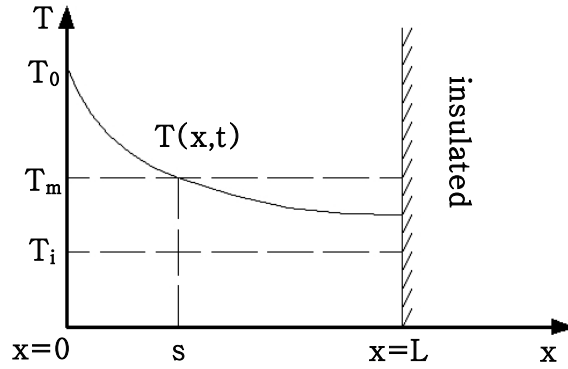


Fig. 5 Conduction-controlled melting in a finite slab[44]

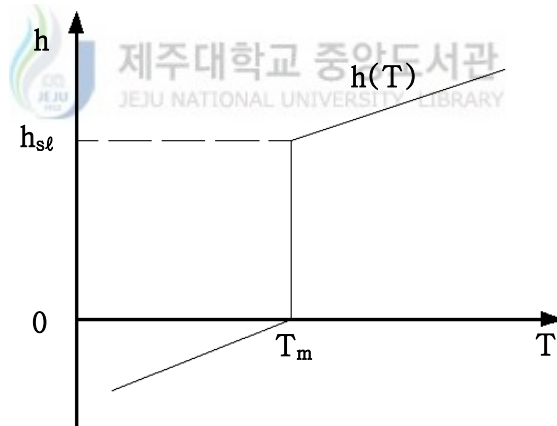


Fig. 6 Enthalpy of the PCM as a function of temperature[44]

엔탈피, h 는 온도의 함수로 다음과 같다.

$$h(T) = \begin{cases} c_{ps}(T - T_m) & T < T_m \\ c_{pl}(T - T_m) + h_{sl} & T > T_m \end{cases} \quad (2)$$

온도에 따른 엔탈피의 변화는 Fig. 6과 같이 도시화할 수 있다. 용점(Melting point)에서 고체와 액체의 엔탈피는 각각 0과 h_{sl} 같고, 잠열과 같은 크기로 엔탈피가 상승한다. 상변화 물질의 열전도율(Thermal conductivity), k 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k(T) = \begin{cases} ks & T < T_m \\ k\ell & T > T_m \end{cases} \quad (3)$$

액-고상에 대한 에너지 방정식은 식 (2)와 (3)을 식(1)에 대입하면 간단하게 얻을 수 있다. 고-액상 경계면에서 에너지 방정식은 상 경계면을 포함하는 검사체에 대한 에너지 평형을 적용하여 구할 수 있다.

식 (2)를 온도, T 에 대해서 정리하면 다음과 같다.

$$T = \begin{cases} T_m + h/c_{ps} & h \leq 0 \\ T_m & 0 < h \leq h_{sl} \\ T_m + (h - h_{sl})/c_{pl} & h \geq h_{sl} \end{cases} \quad (4)$$

용융 문제에 대한 초기, 경계 조건은 다음과 같다.

$$T(x, t) = T_i < T_m \quad t = 0 \quad (5)$$

$$T(x, t) = T_o > T_m \quad x = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial x} = 0 \quad x = L \quad (7)$$

Fig. 7에 도시된바와 같이 공간(위치)과 시간에 대한 이산화는 j 와 n 으로 표현한다. T_j^n 는 위치 $x = (j-1)\Delta x$, 시간 $t = n\Delta t$ 에서 온도이다. 식 (1)은 시간에 대해서는 전지차분과 공간에 대해서는 중심차분을 적용한 양해법(Explicit scheme)으로 다음과 같이 유도할 수 있다. 중간 격자점 $k_{j+\frac{1}{2}}$, $k_{j-\frac{1}{2}}$ 에서 열전도율은 조화평균방법(Harmonic mean method)을 사용하여 계산하면

$$k_{j+\frac{1}{2}} = \frac{2k_j k_{j+1}}{k_j + k_{j+1}} \quad (8)$$

$$k_{j-\frac{1}{2}} = \frac{2k_{j-1} k_j}{k_{j-1} + k_j} \quad (9)$$

와 같이 쓸 수 있다.

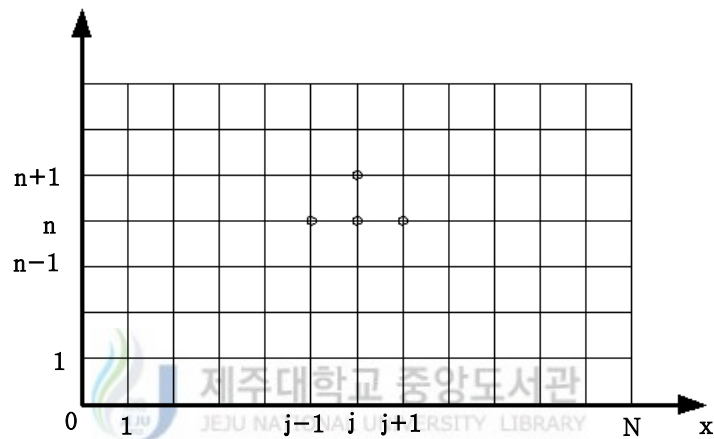


Fig. 7 Discretization of space and time for the solution of the-region melting problem[44]

식 (1)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$h_j^{n+1} = \frac{\Delta t}{\rho(\Delta x)^2} \left(k_{j+\frac{1}{2}} T_{j+1}^n + k_{j-\frac{1}{2}} T_{j-1}^n \right) + \left(h_j^n - \frac{\Delta t(k_{j+\frac{1}{2}} + k_{j-\frac{1}{2}})}{\rho(\Delta x)^2} T_j^n \right) \quad (10)$$

$$j = 2, \dots, N-1$$

(n+1)th 번째 시간 간격에서 엔탈피 분포를 구한다음, (n+1)th 시간 구역의 온도분포는 식 (4)을 사용하여 구할 수 있다.

$$T_j^{n+1} = \begin{cases} T_m + h_j^{n+1}/c_{ps} & h_j^{n+1} \leq 0 \quad (\text{solid}) \\ T_m & 0 < h_j^{n+1} < h_{s\ell} \quad (\text{interface}) \quad j=2,\dots,N-1 \\ T_m + (h_j^{n+1} - h_{s\ell})/c_{pl} & h_j^{n+1} \geq h_{s\ell} \quad (\text{liquid}) \end{cases} \quad (11)$$

초기와 경계조건을 이산화 시키면

$$T_j^o = T_i \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

$$T_1^{n+1} = T_o \quad (13)$$

$$T_N^{n+1} = T_{N-1}^{n+1} \quad (14)$$

된다.

위 식들을 이용하면 (n+1)th 시간 구역에서 고-액상 경계면은 온도분포를 이용하여 쉽게 얻을 수 있다. 예를 들어, $j = M$ 위치에서 $0 < h_M^{n+1} < h_{sl}$ 라고 하면, 강 경계면은 다음과 같다.



$$s^{n+1} = (M-1)\Delta x - \frac{\Delta x}{2} + \frac{h_M^{n+1}}{h_{sl}} \Delta x \quad (15)$$

용융과 응고 문제에서 엔탈피 방법을 이용하여 수치해를 구하는 절차는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 식 (2)를 사용하여 모든 격자, h_j^0 에서 초기 엔탈피를 결정한다.
2. 식 (10)을 사용하여 매 시간 간격마다 격자 $j = 2, \dots, N-1$ 에서 엔탈피를 구한다.
3. 식 (13), (11), 그리고 (14)을 사용하여 온도분포를 계산한다.
4. 엔탈피가 0과 $h_{s\ell}$ 사이에 있는 검사체적을 찾는다. 식 (15)을 이용하여 상 경계면을 결정한다.
5. 다음 시간 간격에서 같은 과정으로 풀어간다.

양해법을 사용하여 해를 구하는 것은 지배 방정식을 단순화하는 데에 유리하지만 안정성에 한계가 있으며, 안정성 유지하기 위하여, 다음의 노이만 안정성 기준(Neumann Stability Criterion)을 만족시켜야 한다.

$$\frac{\max(\alpha_s, \alpha_\ell)\Delta t}{(\Delta x)^2} \leq \frac{1}{2} \quad (16)$$

여기서, α_s 와 α_ℓ 는 각각 고체와 액체의 열확산율(thermal diffusivity)이다.

엔탈피 방법은 종속변수가 온도만이 아니라 엔탈피를 포함한다. 그리고 엔탈피와 온도를 포함하여 에너지방정식을 이산화 하였다. Cao and Faghri는 에너지 방정식을 하나의 엔탈피 만을 변수로 하는 비선형 방정식으로 변환하는 간단한 방법을 제시하였다. 그러므로 고-액 상변화 문제를 푼다는 것은 비선형 엔탈피 방정식을 푸는 것과 같고, 기존 알고리즘은 쉽게 몇 가지 수정만하면 적용이 가능하다. 또한, 엔탈피 변환 모델은 고정 격자계로 된 단일온도 및 넓은 온도 범위에서 일어날 수 있는 복잡한 상변화 문제를 취급할 수 있음을 보여주었다[25]. 변환된 방정식의 하나의 종속 변수 특성으로 인해, 적절한 알고리즘으로 대류와 확산항을 처리할 수 있음을 보여주었고, 문헌에 나와 있는 수치해석 결과를 비교하여 상변화 과정을 예측할 수 있음을 보여주고 있다. 엔탈피에 기반을 둔 이 모델의 장점은 상변화 경계면의 특성에 대한 분명한 관심을 갖지 않아도 된다는 것이다. 그리고 성가신 수학 계획을 수반하지 않고도 대류항과 복잡한 다차원 문제에 맞게 확장할 수 있다는 것이다.

3.2 등가 열용량 방법(Equivalent Heat Capacity Method)

고-액 상변화가 진행되는 동안, 상변화 물질은 일정한 융점온도, T_m 에서 열을 흡수하거나 방출한다. 이것은 상변화 물질이 열을 흡수하고 방출하는 동안 온도가 변화하지 않는다는 것을 의미하고, 열용량이 무한하다는 것을 의미하기도 하다. 등가 열용량 방법에서, 용융과 응고 상변화 과정은 단일온도 T_m 대신에 ($T_m - \Delta T$, $T_m + \Delta T$) 온도 범위에서 일어난다고 가정한다. 다중 성분에서, ΔT 는 상변화 온도 범위에 따라 선택될 수 있다. 잘 정의된 융점을 가진 단일 성분 요소에 대해서, ΔT 는 가능한 한 작아야 한다. 또한, 가정된 온도 범위에서 잠열을 등가 열용량으로 바꿀 수 있다. 따라서 비열은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$c_p(T) = \begin{cases} c_{ps} & T < T_m - \Delta T \\ \frac{h_{sl}}{2\Delta T} + \frac{c_{ps} + c_{pl}}{2} & T_m - \Delta T < T < T_m + \Delta T \\ c_{pl} & T > T_m + \Delta T \end{cases} \quad (17)$$



상변화 물질이 잠열, h_{sl} 을 흡수하며 용융이 진행되는 동안 온도는 $T_m - \Delta T$ 에서 $T_m + \Delta T$ 까지 변화한다고 가정한다. 응고의 과정 동안에는, 상변화 물질은 잠열을 방출하고 온도가 $T_m + \Delta T$ 에서 $T_m - \Delta T$ 까지 내려간다.

머시 영역($T_m - \Delta T < T < T_m + \Delta T$)에서 등가비열은 잠열과 현열의 효과를 포함한다. 등가 열용량 방법에서 비열과 온도와의 관계는 Fig. 8에 나타냈다. 전도에 의한 3차원 상변화 문제에서, 상변화 물질 전 영역의 에너지 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (18)$$

식 (18)에서 열전도율은 온도, T 의 함수이며, 선형으로 변한다고 가정하면 식 (19)로 표현할 수 있다.

$$k(T) = \begin{cases} k_s & T < T_m - \Delta T \\ k_s + \frac{k_\ell - k_s}{2\Delta T} (T - T_m + \Delta T) & \Delta T < T < T_m + \Delta T \\ k_\ell & T > T_m + \Delta T \end{cases} \quad (19)$$

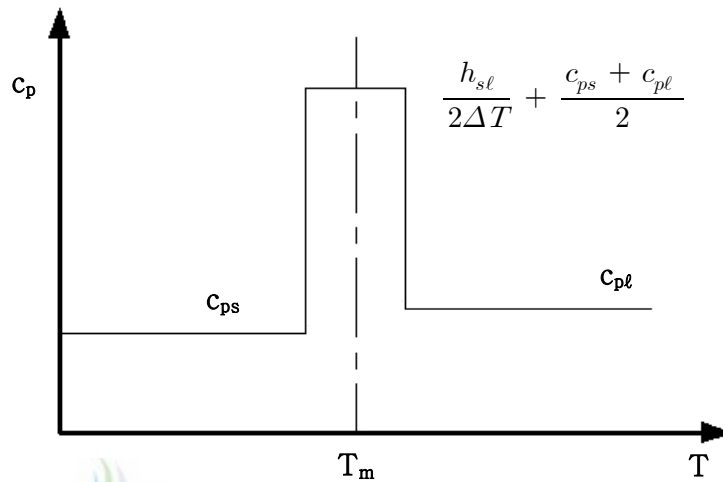


Fig. 8 Dependence of specific heat to temperature for equivalent heat capacity model[44]

등가 열용량 모델의 장점은 단순함이다. 식 (18)은 단순히 비선형 열전도 방정식이며, 단순한 전도가 주를 이루는 고-액 상변화 문제를 해결하는데 충분하다. 그러나 많은 선행연구에서는 시간 단계, Δt , 격자 크기, (Δx , Δy , Δz) 그리고 상변화 온도 범위, ΔT 을 결정하는데 어려움이 있으며, 이들 변수들을 적절하게 선택할 수 없다면, 예측된 상 경계면의 위치와 온도는 약간 비현실적으로 진동할 수 있다고 발표하였다. 따라서 등가 열용량 모델은 제한적으로 간단한 상변화 문제를 풀기 위하여 사용되지만, 엔탈피 모델처럼 널리 사용되지는 않는다.

3.3 온도-변환 모델(Temperature-Transforming Model)

Cao 와 Faghri(1990)가 제안한 온도-변환 모델은 엔탈피 및 등가 열용량 모델의 장점을 결합한 것이다. 전도에 의해 이루어지는 3차원 상변화 문제에서 엔탈피 방정식은 다음과 같다.

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (20)$$

온도 범위, $(T_m - \Delta T, T_m + \Delta T)$ 에서 상변화가 일어나는 동안 비열은 각각의 상에서 일정하다고 가정한다. 엔탈피와 온도의 상관 관계는 Fig. 9와 같고, 다음 식으로 표현된다.

$$h(T) = \begin{cases} c_{ps}(T - T_m) + c_{ps} \Delta T & T < T_m - \Delta T \\ \left(\frac{c_{ps} + c_{pl}}{2} + \frac{h_{sl}}{2\Delta T} \right) (T - T_m) + \frac{c_{ps} + c_{pl}}{2} \Delta T + \frac{h_{sl}}{2} & T_m - \Delta T < T < T_m + \Delta T \\ c_{pl}(T - T_m) + c_{ps} \Delta T + h_{sl} & T > T_m + \Delta T \end{cases} \quad (21)$$

그리고 더시 영역에서 비열을

$$c_m = \frac{c_{ps} + c_{pl}}{2} \quad (22)$$

라 하면, 식(21)은 다음과 같고,

$$h(T) = \begin{cases} c_{ps}(T - T_m) + c_{ps} \Delta T & T < T_m - \Delta T \\ \left(c_m + \frac{h_{sl}}{2\Delta T} \right) (T - T_m) + c_m \Delta T + \frac{h_{sl}}{2} & T_m - \Delta T < T < T_m + \Delta T \\ c_{pl}(T - T_m) + c_{ps} \Delta T + h_{sl} & T > T_m + \Delta T \end{cases} \quad (23)$$

위 식(23)은 다시 다음과 같이 단순식으로 고쳐 쓸 수 있다.

$$h(T) = c_p(T)(T - T_m) + b(T) \quad (24)$$

여기서, $c_p(T)$ 와 $b(T)$ 는 식(23)에서 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$c_p(T) = \begin{cases} c_{ps} & T < T_m - \Delta T \\ c_m + \frac{h_{sl}}{2\Delta T} & T_m - \Delta T < T < T_m + \Delta T \\ c_{pl} & T > T_m + \Delta T \end{cases} \quad (25)$$

$$b(T) = \begin{cases} c_{ps} \Delta T & T < T_m - \Delta T \\ c_m \Delta T + \frac{h_{sl}}{2} & T_m - \Delta T < T < T_m + \Delta T \\ c_{ps} \Delta T + c_{pl} & T > T_m + \Delta T \end{cases} \quad (26)$$

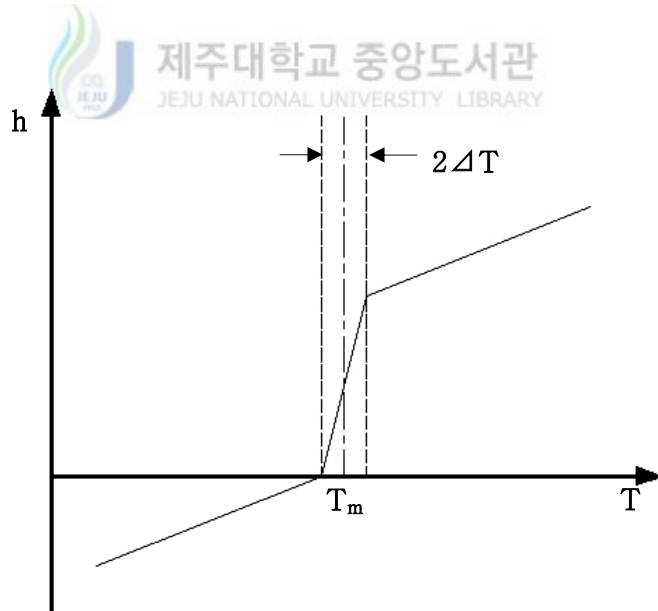


Fig. 9 Dependence of enthalpy on temperature for phase change occurring over a range of temperature[44]

식 (24)을 식 (20)에 대입하여 식 (27)을 구한다.

$$\rho \frac{\partial(c_p T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \rho \frac{\partial b}{\partial t} \quad (27)$$

여기서, k 는 열전도도이고, 온도의 함수로써 식 (19)로 얻어진다. 에너지 방정식은 단일 종속변수, T 를 사용하여 비선형 방정식으로 변환된다. 상변화 문제의 비선형은 상 경계면에서 많은 양의 열이 흡수 또는 방출되기 때문이지만, 상 경계면에서 어느 정도 떨어져 있는 액상 또는 고상에서는 식 (27)처럼 선형 방정식으로 변환시킬 수 있다.

온도-변환 모델과 등가 열용량 모델은 해석 방법에 큰 차이가 있지만, 식 (27)과 식 (18)을 비교해보면, 등가 열용량 모델은 $\partial b / \partial t = 0$ 와 c_p 가 변위와 시간의 독립 변수일 경우, 식 (27) 특별한 경우임을 알 수 있다. 이것은 등가 열용량 모델이 최적의 격자 크기 및 시간 간격을 결정하기가 쉽지 않으며, 종종 물리적으로 비현실적인 진동형 결과를 생성하는 근본적인 이유이다. 따라서 $\partial b / \partial t = 0$ 와 $\partial(c_p T) / \partial t = c_p \partial T / \partial t$ 를 만족시키기 위하여, 시간 간격을 충분히 작게 설정하고, 어려운 기준이지만 c_p 와 b 는 시간과 위치 변수들에 무관해야 한다.

온도-변환 모델은 시간 간격 및 격자 크기의 제한을 제거하고, 넓은 온도 범위에서 발생하는 다중 성분 상변화 물질의 상변화 현상을 최적의 방법으로 해결할 수 있다.

식 (27)을 풀기위해 많은 수치해법들이 제시되었다. Patankar은 Stefan 문제에 온도-변환 모델을 사용하여 정확도를 입증하였다[45]. Cao와 Faghri 그리고 Zhang and Faghri은 이 방법을 이용하여 다양한 다중 성분과 단일 성분 상변화 물질의 상변화 문제를 해결하였다[25].

4. 지배방정식

일반적으로 2상 유동을 해석하기 위한 지배 방정식은 기체-액체, 액체-고체, 고체-기체 등 2상 유동의 종류에 따라 다르게 전개되어 진다. 단상 유동(Single phase flow)의 경우와는 달리 2가지의 방식의 전개가 요구되기 때문에, 먼저 각각의 상에 대한 특성을 고려해야 하고 동시에 2상이 공존하는 혼합물의 특성도 고려해야 하기 때문이다. 전자는 각각의 상에 대한 물성과 각각의 상에 대한 속도 등을 고려하는 데 주안점을 두고 있으며, 후자는 혼합물의 물성을 결정하고 속도 등을 결정하는 데 그 목적이 있다. 대부분의 상변화를 수반하는 유동의 경우에는 각각의 상이 가지는 속도와 물성이 큰 차이가 있어서 수치적이나 실험적인 해석에 매우 중요한 부분이 된다. 이런 경우에는 유동 양식에 적합한 수학적 지배 방정식을 유도하기 보다는 각 유동 양식에 적합한 수학적 모델이 별도로 제시되고 있다. 그러나 고체-액체 상변화 문제(Solid-liquid phase change problem)에서는 고상의 속도를 무시할 수 있으므로 일반적인 수학적 모델을 유도할 수 있다.

혼합물의 응고와 용해과정을 기술하는 수학적인 모델은 단순화된 형태로 시작되어 최근에는 상호 결합된 유체유동, 열 및 물질전달을 취급할 수 있는 체계화된 형태로 발전하고 있다. 2상이 공존하는 머시영역을 기술하는 방법에 따라 다양한 모델들이 제시되어 있으며 각각에 대한 접근 방법, 기본 특징 등에 관해서는 문헌[24]에서 잘 요약되어 있다.

모델에 따라 개념적인 차이는 있으나 공식화된 결과 즉 일반화된 보존 방정식은 본질적으로 유사한 형태이다. 보존 방정식은 아래 기술될 고체-액체 2상 혼합물에 대한 일반화된 질량보존, 운동량보존, 그리고 에너지 보존식으로 구성되며 기본적인 유도과정은 많은 문헌에서 쉽게 찾아볼 수 있다.

본 연구에서는 고정 격자계를 이용한 엔탈피-다공도 방법을 적용하여 고체-액체 2상변화 열전달 과정에서 나타나는 유체의 상변화 문제를 해석한다.

이 방법은 고체와 액체의 상태변화에 따른 상경계면을 액상 체적 분율(Liquid volume fraction)이 0(고상)과 1(액상)사이의 값을 갖는 머시 영역으로 나타나며,

온도와 엔탈피를 통해 계산된다. 머시 영역은 상변화 과정의 과도 영역으로 다공성 물질(Pseudo porous media)로 간주한다. 그러므로 머시 영역내의 액상의 속도와 압력과의 관계는 다공성 물질에서 일반적으로 사용되는 Darcy 법칙을 이용하여 나타낼 수 있다. 상기와 같이 상경계면의 이동과 온도 및 유동장을 계산하기 위하여 다음과 같은 지배방정식을 사용하였다.

이 절에서는 응고와 용융 상변화 과정에 대한 수치해석을 수행하기 위해 기초가 되는 수학적 표현인 물리량 보존 방정식을 도입하고, 물질의 상변화를 수치 해석하는 데 필요한 보존 방정식의 종류에 따라 적절한 물리량과 플럭스 벡터, 그리고 생성항을 대입하여 각각의 종속 변수에 대한 보존 방정식을 얻고자 한다.

물질의 상변화 과정에서 열 및 유동 현상을 고려할 때, 우리들이 알고 싶은 물리량은 온도, 속도, 농도 등으로 때로는 이것들 모두를, 때로는 그 일부를 알면 충분한 경우도 있다. 이를 위해서는 이들 물성치에 상당하는 엔탈피, 운동량, 질량 분율을 종속변수로 하는 평형식을 고려할 필요가 있으며, 이 평형식들은 일반적으로 미분방정식으로 나타내어진다. 이들 미분방정식은 종속변수를 Φ 로 두어 다양한 표현방식이 있으나 여기에서는 텐서표현을 사용하여 다음과 같은 일반형 수송방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \vec{V}_j \Phi) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x_j}) + S \quad (28)$$

위식에서 보는 바와 같이 일반형 수송(미분)방정식은 비정상항(Unsteady term), 대류항(Convection term), 확산항(Diffusion term), 그리고 생성항으로 구성되어 있다. 한편, 위식에서 Γ 는 확산계수(Diffusion coefficient)라 불리나, 이 Γ 와 생성항 S 의 명칭은 반드시 각 항의 실제 물리적 의미와는 대응하지 않는다. 따라서 온도, 속도 성분과 같은 여러 가지 종속변수 Φ 의 의미에 대응시켜 이들 변수들 각각에 관한 확산계수 Γ 와 생성항 S 에 대하여 적절한 의미가 부여되어야 한다. 또한, 형식상의 확산항에 적합하지 않는 것은 무엇이든 생성항의 일부분으로 처리하는 것이 가능하며, 확산계수 Γ 는 필요하다면 0으로 둘 수도 있다.

따라서 식 (28)의 각 항에 보존 방정식의 종류에 따라 적절한 일반 물리량과 확산유속 그리고 생성항을 대입하면 각각의 종속변수에 대한 보존 방정식을 얻을 수 있다.

4. 1 질량 보존 방정식

식 1-1로 나타낼 수 있는 일반형 미분 방정식에서 $\phi = 1$, $\Gamma = S = 0$ 을 대입하여 두 개의 상이 존재하는 혼합물에 대한 질량 보존 방정식을 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \vec{V}_j) = 0 \quad (29)$$

여기서, 혼합물의 밀도는 다음과 같다.



$$\rho = \rho_s + \rho_s \quad (30)$$

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

4.2 운동량 보존 방정식

상변화 문제에 대한 운동량 보존 방정식은 식 1-1에 $\phi = \vec{V}$, $\Gamma = \mu$ 을 대입하면 다음과 같이 얻을 수 있다. 여기에서 생성항 S는 응력, 체적력 그리고 서로 다른 상의 상호작용에 의한 운동량 생성을 의미한다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u\Phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v\Phi) = \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial y}) + S \quad (31)$$

여기서, 확산계수, Γ 는 점도(Viscosity) μ 이다.

자연대류의 영향을 고려하는 상변화 문제에서는 유체 중에서 외력장(중력장 또

는 원심력장)에 수직인 면내에서 온도 및 농도의 차이에 의해 밀도의 불균형이 있는 경우에 이것이 부력의 차로 되고, 이 불균형을 없애기 위해 유동이 지속적으로 발생한다. 이와 같은 유동은 유속이 느리기 때문에 밀도가 일정한 비압축성 유동으로 가정하고 온도변화에 의한 밀도차 효과는 부력항에만 작용한다고 생각하는 Boussinesq 근사를 채택해 해석한다.

2차원 문제에서 질량 보존 방정식과 체적력 X, Y를 포함시킨 운동량 보존 방정식은

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (32)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + X \quad (33)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + Y \quad (34)$$

로 주어진다. 체적력은 중력만 존재한다고 가정하면,

$$X = 0, \quad Y = -(\rho - \rho_{ref})g = (\rho_{ref} - \rho)g \quad (35)$$

로 된다.

밀도차 $(\rho_{ref} - \rho)$ 는 다음과 같이 체적팽창계수(coefficient of volumetric thermal expansion) β 를 사용해서 표현할 수 있다.

$$\beta = \frac{1}{(1/\rho)} \left[\frac{\partial(1/\rho)}{\partial T} \right] = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \approx \frac{1}{\rho} \frac{\rho_{ref} - \rho}{T - T_{ref}} \quad (36)$$

따라서 식 (35)의 부력 항은 다음과 같이 변형된다.

$$(\rho_{ref} - \rho)g = \rho g \beta (T - T_{ref}) \quad (37)$$

g = 중력가속도(Gravitational acceleration)

ρ_{ref} = 기준밀도(Reference density)

T_{ref} = 기준온도(Reference temperature)

β = 체적팽창계수(coefficient of volumetric thermal expansion)

2차원 상변화 문제에 있어서 운동량 보존 방정식은

x 방향의

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (38)$$

y 방향의

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho g \beta (T - T_{ref}) + S \quad (39)$$

로 고쳐 쓸 수 있다.

여기에서 ρ , $u(v)$, p 그리고 μ 는 각각 밀도, 속도, 압력, 그리고 점성계수를 나타내며, 부력 항은 Boussinesq 근사를 이용하였다. 또한, S 는 상태변화에 의한 속도 생성항으로서 아래와 같이 표현된다.

$$S = \frac{(1 - \beta)^2}{(\beta^3 + \epsilon)} A_{mush} (\vec{v} - \vec{v}_p) \quad (40)$$

여기서 A_{mush} 는 상변화 과정에서 액상과 고상이 섞여있는 영역, 즉 머시 영역의 움직임 결정하는 상수 값으로 일반적으로 $10^4 \sim 10^7$ 이 사용되어진다. 이때 ϵ

는 분모가 0이 되지 않기 위한 상수로서 1×10^{-3} 을 적용하였다. \vec{v}_p 는 연속주조 공정에서 응고된 물질이 영역 밖으로 인출되는 속도를 의미한다. 응고된 물질이 인출되지 않는 경우에는 $\vec{v}_p = 0$ 이다.

4.3 에너지 보존 방정식

일반적으로 열을 동반한 유동은 Navier-Stokes 방정식과 에너지 방정식을 연결시켜 푸는 자연 대류 문제와 운동량 방정식의 수렴해가 얻어진 후에 에너지 방정식을 분리하여 푸는 강제 대류 문제로 나누어진다. 전자는 부력 등이 유동의 큰 원동력이 되어 있는 경우이며, 후자는 주류가 존재하고 그것에 대하여 관 벽면 등으로부터 열이 가해지는 경우 등이다. 강제 대류 문제는 본 연구에서 다루지 않으나 운동량 방정식의 해를 얻은 후 에너지 방정식을 구하기 때문에 수치 계산적으로는 비교적 다루기 쉬운 문제이다. 그러나 물리적으로는 난류 열전달 문제 등이 수반되어 난류 모델 등이 검토가 필요하다.

물질의 상변화 문제에서는 운동에너지가 열 등의 내부에너지와 비교하여 무시할 수 있는 저속류라는 가정을 함으로써 종속 변수 Φ 로서 엔탈피를 H 를 취할 수 있고, 각각의 상에 대한 에너지 보존 방정식은 일반 물리량 보존 방정식 식

1-1에 $\Phi = H$, $\Gamma = \frac{\kappa}{C}$, $S = S_h$ 을 대입하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \vec{V}_j H) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\kappa \frac{\partial T}{\partial x_j}) + S_h \quad (41)$$

여기서,

H = 엔탈피

ρ = 밀도

\vec{V} = 유동속도

S_h = 생성항

위 식에서 엔탈피 H 는 현열 엔탈피(sensible) h 와 잠열에 의한 엔탈피 ΔH 와

의 합이며, 각각의 엔탈피는 다음과 같이 표현된다.

$$H = C_p T$$

$$H = h + \Delta H \quad (42)$$

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (43)$$

따라서 식 (41)은 다음과 같이 된다.

$$\rho C \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + S_h \quad (44)$$

여기서, C_p 은 정압비열을 나타낸다. 또한 생성항 S_h 는 상변화할 때 잠열의 방출 및 흡수를 나타내는 항으로, 다음과 같이 나타내어진다.



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

$$S_h = \frac{\partial(\rho \Delta H)}{\partial T} \quad (45)$$

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

$$\begin{aligned}
 f &= 0 && \text{if } T < T_{solidus} \\
 f &= 1 && \text{if } T > T_{liquidus} \\
 f &= \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}} && \text{if } T_{solidus} < T < T_{liquidus}
 \end{aligned} \quad (46)$$

여기에서 $f = 0$ 은 고상, $f = 1$ 은 액상, 그리고 $0 < f < 1$ 은 상변화 과정의 상태인 머시영역(Mushy zone)을 의미한다.

그리고 식 (42) 잠열에 의한 엔탈피 ΔH 는 액상분율 f 를 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta H = fL \quad (47)$$

h_{ref} = 참조 엔탈피(Reference enthalpy)

T_{ref} = 참조 온도(Reference temperature)

c_p = 정압비열(Specific heat capacity)

T_{solidus} = 고상온도(Solidus temperature)

T_{liquidus} = 액상온도(Liquidus temperature)

f = 액상분율(Liquid fraction)

L : 용해잠열(Latent heat of the material)

응고 및 용융을 포함하는 열 유동을 지배하는 방정식은 질량 보존 방정식, 운동량 보존 방정식 및 에너지 보존 방정식이며, 이러한 유동에서는 상변화 및 중력의 영향이 매우 중요하다. 복잡한 상변화 현상에 적용되는 지배방정식을 단순화하기 위한 가정들을 정리하면 다음과 같다.

* 본 연구의 해석을 위해 사용된 가정은 다음과 같다.

- ① 액체는 비압축성이며 뉴턴 유체로써 층류 유동이다.
- ② 온도변화에 의한 밀도차 효과는 부력항에만 작용하고 각 상에서 물성치는 일정한 값을 가진다.
- ③ 응고되어 있는 고체의 속도는 0 값을 가진다.
- ④ 각각의 상은 고립계(isolated system)이며 연속적이다.
- ⑤ 각각의 상은 서로 화학적 반응을 하지 않는다.
- ⑥ 혼합물은 각각의 지배방정식과 유사한 형태로 기술된다.

Ⅲ. 사각형 캐비티 내 순수 갈륨의 용융에 대한 수치해석

1. 해석 모델 및 경계 조건

순수 물질의 상변화 열전달 과정에 관한 대부분의 기존의 연구들은 주로 2차원 문제를 다루고 있다. 이는 특별히 3차원적인 효과가 중요시되는 경우가 지금껏 별로 없었다는 것도 하나의 이유이긴 하지만, 반복 계산에 의한 해의 수렴이 쉽지 않은 에너지 방정식의 특징에 기인한다. 특히, 2차원 사각형 캐비티(Rectangular cavity) 내의 자연 대류 현상과 상변화 과정의 해석 문제는 에너지 방정식을 다루는 거의 모든 경우에 있어서 프로그램 검증의 대상이 된다[2].

특히, 순수 갈륨은 상변화가 상온과 유사한 29.78°C에서 등온 과정 진행되어, 고-액상 경계면을 실험적으로 추적하기 용이하고 실험치도 풍부하다. 따라서 본 연구에서는 사각형 캐비티에서 한쪽 벽면의 높은 온도로 인한 자연 대류가 순수 갈륨의 용융 과정에 미치는 영향에 대하여 수치해석하고 Gau and Viskanta[27]의 실험 연구와 비교하여 제안된 수치해석 방법의 타당성을 검증하였다.

Fig. 10은 계산영역, 경계조건 및 격자를 보여준다. 해석모델은 가로 8.89cm, 세로 6.35cm으로 응고 상태의 순수 갈륨으로 초기 온도, T_{int} 28.3°C이고, 용융을 위해 가해지는 뜨거운 쪽 벽면 온도, T_{hot} 는 38°C이다. 갈륨의 물성치는 전체 온도장의 범위가 10°C정도(28.3~38°C)이기 때문에 32°C일 때의 물성치로 일정하다고 가정되었고, Table 1.에 정리하였다. 격자생성 프로그램을 이용하여 동일한 조건에서 격자를 생성하였다. 격자수는 2,240(56×40)개이다.

각 보존 방정식의 공간 이산화(Spatial Discretization)는 유한체적법(Finite Volume Method, FVM)과 2차 풍상 차분법(Second order upwind scheme)을 적용하였으며, 초기 및 외부 경계조건을 설정하여 고정 격자계를 이용한 엔탈피 방법을 사용하였다. 그리고 비정상상태의 압력-속도 연결은 PISO 알고리즘을 이용하였다.

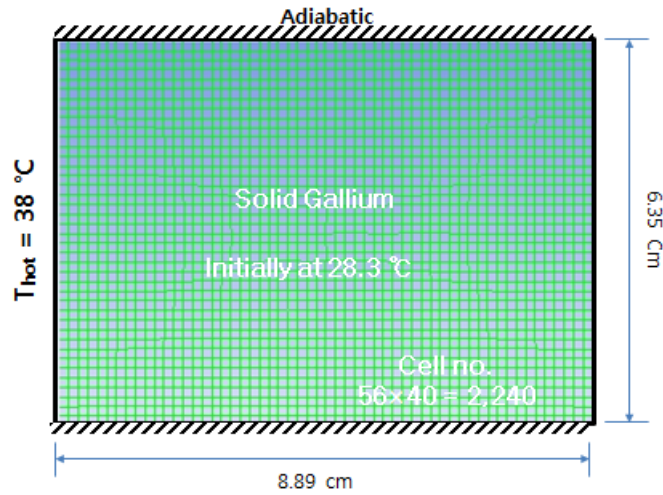


Fig. 10 Gallium numerical calculation area & boundary conditions



Table 1. Gallium property

Density(liquid) [kg/m ³]	6093
Reference density [kg/m ³]	6095
Reference temperature, T _{ref} [°C]	29.78
Volumetric thermal expansion coefficient of liquid, β [1/K]	1.2*10 ⁻⁴
Thermal conductivity, k [W/m]	32
Melting point [°C]	29.78
Latent heat of fusion, L [J/kg]	80160
Specific heat capacity, C [J/kg • K]	381.5
Dynamic viscosity, μ [kg/m • s]	1.81*10 ⁻³
Prandtl number, Pr	2.16*10 ⁻²

2. 수치해석 결과 및 고찰

2.1 시간에 따른 온도변화

Fig. 11은 2분, 10분, 17분, 그리고 19분의 시간이 경과하였을 때의 온도분포를 보여주고 있다. 시간이 경과함에 따라 고온 영역이 상단부 오른쪽으로 확대되고 있음을 확인할 수 있고, 상대적으로 높은 온도가 분포되어 있는 상단부에서는 열 전달이 주로 자연 대류에 의해 진행되고, 하단부에서는 전도가 주로 일어나고 있다.

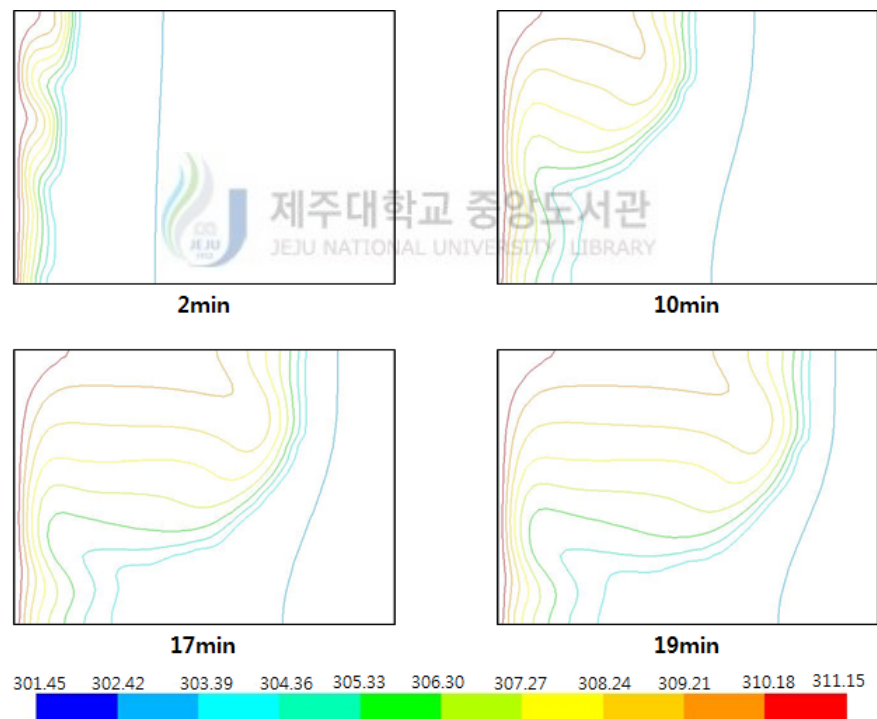


Fig. 11 Contours of temperature field according to flow time(s)

2.2 시간에 따른 속도벡터변화

Fig. 12는 2분, 10분, 17분, 그리고 19분의 시간이 경과하였을 때의 속도벡터 변화를 보여주고 있다. 그림과 같이 2분경과 시에는 열이 가해지는 벽면의 중간 부분에서 두 개의 순환대류가 일어나는 것을 확인할 수 있다. 또한, 시간이 지남에 따라 온도차에 의한 부력으로 저속의 유동이 고-액상 경계면의 상단부와 오른쪽으로 이동하고 있음을 확인할 수 있다. 한편, 열이 가해진 뒤 10분 이후에는 상부에서 가로축으로 하나의 순환대류가 점점 넓어지는 것을 확인할 수 있다.

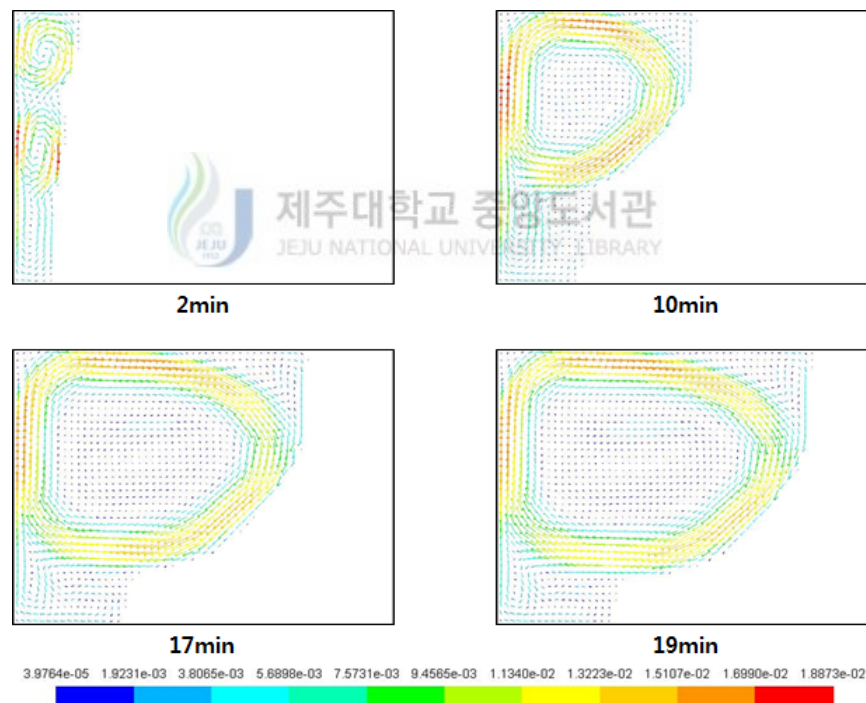


Fig. 12 Contours of velocity vector according to flow time(s)

2.3 시간에 따른 상경계면의 이동

Fig. 13은 2분, 10분, 17분, 그리고 19분의 시간이 경과하였을 때의 액상 체적 분율을 보여주고 있다. 용융 초기에는 T_{hot} 에서 전달되는 열원이 균일하게 전달되어 세로축에 거의 수평으로 녹는다. 하지만 시간이 지남에 따라 자연 대류가 미치는 영향이 증가하여 고-액상 경계면의 상단부는 오른쪽으로 하단부는 왼쪽으로 휘는 경향을 보이고 있다. 이는 용융된 액상영역의 온도차에 의한 밀도 불균형과 부력으로 상단부로 저속의 유동이 발생하게 되고, 상단부에서 고-액상 경계면의 오른쪽으로 이동하여 경계면을 따라 하단부로 내려오므로 열전달이 상단부에서 더 활발해지기 때문이다.

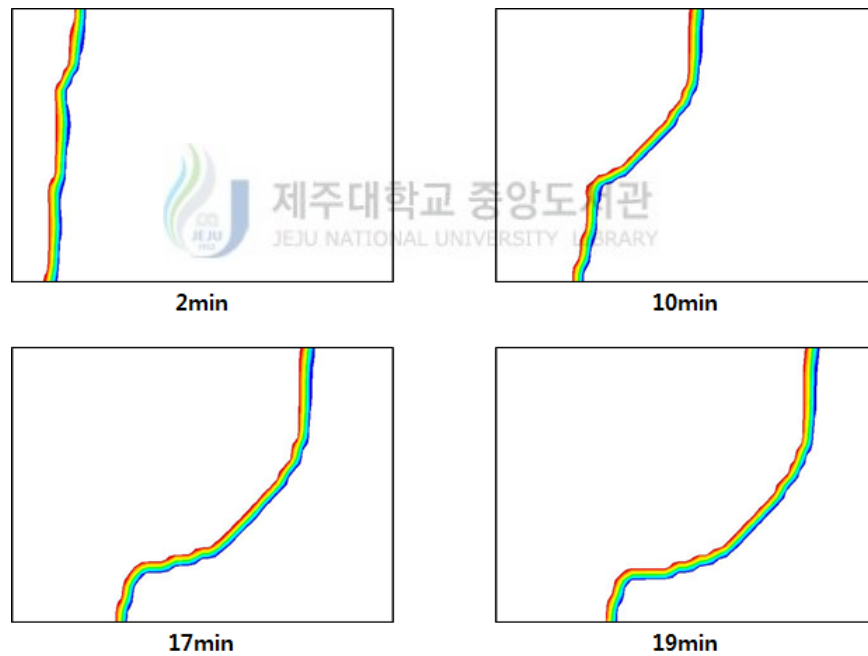


Fig. 13 The moving melt front according to flow time(s)

2.4 실험데이터와 비교 검증

Fig. 14는 각각 2분, 10분, 17분 그리고 19분에 해당하는 고-액상 경계면의 이동을 Gau and Viskanta(1986)가 수행한 실험 결과와 수치해석 결과를 비교한 그림이다. 여기서 원형의 점은 시간의 경과에 따른 실험값을 보여주고, 여러 색으로 이루어진 부분은 수치해석 결과의 머시의 영역으로 표현되었다.

각 시간의 지남에 따른 액체와 고체의 표면을 연결한 선인 고-액상 경계면에 대한 실험 결과와 수치해석 결과는 일부 비교 시간에서 약간의 오차를 보이고 있으나 대체적으로 실험 결과와 거의 유사한 경향을 보이고 있다. 특히 2분과 17분일 때의 고-액상 경계면의 이동은 거의 일치한다. 따라서 본 연구에서 제안한 수치해석의 방법이 매우 타당함을 알 수 있다.

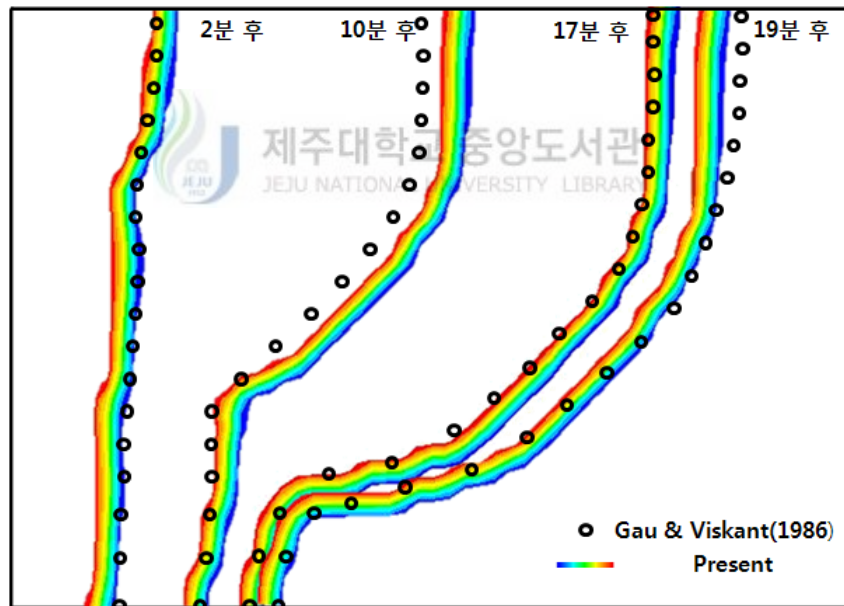


Fig. 14 Comparison of melt fronts calculated and experimental result for the 2-D melting of pure gallium

Ⅲ. 저장 탱크 내 요소수의 동결과 해동에 대한 수치해석

본 장에서는 순수물질의 응고와 용융 현상에 관한 연구로써 H/D 디젤 차량에 장착된 Urea-SCR 시스템에서 촉매제로 사용되는 요소수의 동결과 해동 과정에 수반되는 열전달 특성을 수치 해석적 방법으로 고찰하였다.

Urea-SCR 시스템은 디젤 차량의 질소산화물(NOx) 저감을 위해 가장 적합한 배기후처리 장치로 평가되고 있지만 환원제인 암모니아(NH₃)를 생성하기 위하여 사용되는 요소수(Urea solution)는 공융혼합물(Eutectic mixture)인 AdBlue™ 32.5wt%로써 동결점(-11℃)로 낮아 -20℃ 이하의 환경에서 쉽게 동결되는 문제점을 갖고 있다. 이를 해결하기 위해 냉시동 초기에 엔진에 제한된 열원을 이용하여 요소수를 Urea-SCR 시스템이 요구하는 최소량을 확보할 수 있는 별도의 가열장치에 대한 충분한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 H/D 디젤 엔진 내 제한된 열원을 이용하여 짧은 시간에 SCR 시스템의 분사에 필요한 적정량의 해동된 요소수를 확보할 수 있는 냉각수 순환 가열 파이프 형상과 가열 과정의 각종 설계 변수에 따른 요소수 저장 탱크 내 동결된 요소수의 해동 특성을 고찰하였다.

이를 위해 우선, 제안된 수치해석 방법을 직사각형 캐비티 내의 갈륨에 대한 자연 대류와 상변화 과정 해석을 통하여 그 타당성을 검증하였다. 그리고 요소수 저장 탱크 내 요소수의 동결 과정과 제안된 냉각수 순환 가열 파이프들의 형상과 설치방법·위치 그리고 냉각수 공급 유량의 변화 등이 요소수 해동 현상에 미치는 영향을 분석하여 Urea-SCR 시스템에서 분사에 필요한 액상 요소수를 안정적으로 공급할 수 있는 가열장치의 최적의 설계 자료를 확보하고자 한다.

1. 차량용 Urea-SCR 시스템 소개

1.1 자동차 배출가스 유해성

20세기 중반까지는 지구상에 존재하는 내연기관의 대수가 매우 제한적이어서 이로 인한 배출가스 문제가 그리 심각하지 않았으나, 인류의 급격한 증가와 발전 시설 및 공장 그리고 자동차는 그 수가 급격하게 증가하면서 대기오염 물질의 주요 공급원으로 등장하게 되었다. 지구환경에 대한 사회적인 관심과 요구가 더욱 커져가고 있는 오늘날 자동차로부터 배출되는 유해물질의 저감은 중요한 과제로 인식되고 있다.

자동차에서 배출되는 오염물질은 자동차의 종류와 사용 연료 등에 따라 차이가 있으며, 배출원에 따라 배기관에서 발생하는 배기가스, 엔진 크랭크 케이스에서 발생하는 블로바이 가스 및 연료 탱크나 스토틀 바디에서 발생하는 증발가스 등 3종류로 나눌 수 있으나 여기서는 기관으로부터 연소된 뒤 배기관으로부터 배출되는 배기가스를 설명한다.

자동차의 배기가스는 연소를 통하여 일어나게 되고 실린더 내에서 일어나는 연소는 수많은 화학 반응을 일으키기 때문에 그 수는 셀 수 없을 정도로 많지만 오늘날 우리가 주목하고 규제를 해야 하는 대상은 크게 다섯 가지 정도를 꼽을 수 있다.

- HC (Unburned Hydro Carbon) → 연료의 주성분으로 미연소된 연료가 배출될 때 생성된다. 저 농도에서는 호흡기 계통을 자극하는 정도이지만 알데히드로 산화되면 눈, 점막, 피부 등을 심하게 자극하며 알데히드가 다시 산화될 때 생성되는 과산화물은 광화학 스모그의 원인 물질이다. 장기간 흡입 시 백혈병의 원인이 될 수 있으며 염색체 변이를 일으켜 호드킨스병과 림프종과 같은 병의 원인이 될 수도 있다.

- NOx (Oxides of Nitrogen) → NOx는 실린더 내의 온도 차이 때문에 생성

되며, NO가 대부분 차지하지만 NO₂에 의한 유해성이 더 심각하여 규제가 매우 엄중해 지고 있다. 이 가스는 대기 중으로 방출되어 오존을 형성하는데 작용하고 동시에 탄화수소와 반응하여 광화학 스모그의 원인이 된다. 호흡시 체내에 침투한 NO₂는 점막분비물에 흡착되어 강한 질산을 형성하여 호흡기 질환을 유발한다.

- CO (Carbon Monoxide) → 무색, 무취인 일산화탄소 가스는 전체 배출량의 80%이상이 자동차에서 배출 되는데 헤모글로빈과의 결합력이 산소의 300배 이상 커서 신체 조직의 저산소증을 유발한다. 가연성이므로 배출을 통하여 에너지의 손실이 동시에 발생하게 되고, 시동과 급가속시에 많이 발생하게 되며 연료가 혼합이 잘 안되었거나 국부적으로 농후한 혼합기에서 불완전연소가 일어나 일산화탄소가 발생된다.

- PM(Particulate Material) → 주로 디젤 자동차에서 발생되는데, 연소 기간에 실린더 내에 연료가 많은 구역에서 발생하는 고체 탄소 매연입자를 함유하고 있다. 매연의 입자는 원형의 고체 탄소 덩어리로 구성되어 있으며 입자의 크기가 물질의 성격에 큰 영향을 미치는데, 대기 중에 존재할 때는 시정장애를 일으키기도 하고, 일부 미세한 흡입분진은 인체의 폐나 호흡기에 들어가 치명적인 피해를 입히기도 한다. 또 식물의 잎에 쌓이면 햇빛을 막아 탄소동화작용을 방해하여 생육에 나쁜 영향을 준다. 해로운 화학적 성분이 식물에 침전되면 이들 식물을 먹이로 하는 동물에도 피해를 주는 등 간접적 피해를 일으킨다.

- SO_x- 연료 중에 황성분이 산소와 결합하여 이루어진 화합물로서 대기 중의 수분과 결합 시에 아황산가스를 만들어 내고 산성비의 원인 물질이 된다.

1.2 자동차 배출가스 규제

90년대 들어 지구환경문제가 범세계적 관심사로 등장하면서 선진국을 중심으로 환경규제가 강화되고 있다. 이는 산업의 발전에 따른 지구온난화, 오존층 파괴, 산성비 등 대기오염의 악화와 지구환경파괴에 대한 우려에서 비롯된 것으로 배기가스 규제, 연비규제, 프레온가스 규제 등을 중심으로 더욱 확대되는 추세를 보이고 있다. 지구 온난화를 비롯한 대기 오염 등의 환경 문제는 실천적인 노력을 통해 극복해야 한다는 각성에 따라, 보다 엄격한 규제가 요구된다 하겠다. 이에 따라 최근 자동차 배출가스 규제도 점차 강화되고 있는 추세이다. 자동차 배출가스 규제에서 제시하는 유해가스는 CO, HC, NO_x, 그리고 PM이며, 각 차종과 적용 시기 등에 따른 주행거리별 배출량으로 규제된다. 디젤 자동차는 가솔린 자동차에 비해 NO_x와 PM의 대응 기술이 주요 기술 개발 대상이 되는데, 이는 HC나 CO에 비해 상대적으로 어려운 기술이며, 또한 압축착화 방식에 의한 확산 연소와 희박한 산소분위기의 연소특성으로 인하여 PM과 NO_x 배출량이 상대적으로 많은 것이 문제이다[46].

자동차의 생산과 수요가 많은 미국, 일본, 유럽연합 등의 국가에서는 자동차에서 배출되는 환경오염 물질과 지구의 온난화 가스 배출에 대한 규제를 강화하고 있다. 디젤 차량은 상당한 배기가스 오염물질을 배출하므로 유럽연합을 중심으로 NO_x와 PM에 대한 배출량을 제한하며 그 기준을 점차 강화하고 있다. 1992년 일반 승용차 및 경트럭을 대상으로 EURO I이 처음 시행된 이후 단계적으로 강화돼, 2009년부터는 EURO V를 적용하고 있다. EURO VI는 2013년에 도입되어 우리나라는 1년 유예기간을 거쳐 2015년부터 적용될 예정이다.

Table 2.은 대한민국의 H/D 경유 자동차에서 배출되는 주요 환경오염 물질에 대한 규제기준을 나타낸다. 대형 디젤 차량인 경우 NO_x을 EURO V(2.0kWh)의 20%수준인 0.4g/kWh까지만 허용한다.

Table 2. Korea emission standard for H/D Diesel Engine.(g/kWh)

Year	CO	THC	NOx	PM	TEST
2001 (Euro II)	4	1.1	7	0.15	ESC & ELR
2003 (Euro III)	2.1	0.66	5	0.1	
2006 (Euro IV)	1.5	0.46	3.5	0.02	
2009 (Euro V)			2		
2014 (Euro VI)		0.13	0.4	0.01	

1.3 Urea-SCR 시스템 및 반응 메커니즘

오늘날 알려진 모든 형태의 내연 기관 중에서 에너지 효율이 가장 좋은 디젤 엔진은 압축착화 방식에 의한 연소 특성으로 가솔린 엔진에 비해 CO와 HC 배출량이 적은 반면, 소음과 진동이 심하고 입자상 물질(Particulate matter, PM)과 질소산화물(Nitrogen oxides, NOx)이 다량 배출되는 문제점을 가지고 있으며, 이는 강화되는 배기 규제의 주요 저감 대상 물질이다[4].

디젤 엔진은 초회박 영역의 과잉 산소 분위기에서 운전되기 때문에 O₂와 NOx 등 산화성 물질(Oxidizing agent)이 HC나 CO 등 환원성 물질(Reducing agent)보다 많이 들어 있으며, 산화성 물질과 환원성 물질 사이에 양적 균형이 이루어지지 않기 때문에 삼원촉매를 사용하여 배기가스에 들어 있는 NOx를 환원시켜 제거하기가 매우 어렵다. PM의 경우, 현재 개발된 DPF(Diesel particulate filter) 기술을 이용하여 저감률이 90%에 가까운 수준까지 도달하였지만, NOx의 경우, EGR 기술만으로 배기규제를 만족시킬 수 없기 때문에 산화와 환원에 필요한 부가적인 후처리 장치의 다양한 촉매 기술에 대한 연구가 진행되고 있다.

최근, NOx 저감을 위한 다양한 후처리 기술들이 활발히 연구되고 있다. 이 가운데 추가적인 환원제 공급을 필요로 하는 SCR(Selective Catalyst Reduction:선택적 촉매 환원)장치는 매연여과장치에서 한 단계 업그레이드된 것으로 PM과 NOx를 동시에 획기적으로 줄일 수 있는 기술이다. 사용되는 환원제의 종류에 따라 Urea-SCR, HC-SCR로 분류된다.

이 중 Urea-SCR 시스템은 배출가스 저감장치의 전단에 요소수를 분사하여 생성된 NH₃가 NOx 성분과 선택적으로 반응하며 NOx를 질소와 물로 환원시키는

방법이다. Urea-SCR 시스템의 개략도를 Fig. 15에 나타냈으며, 넓은 온도 영역에서 NOx의 전환율이 높기 때문에 강화되는 Euro-6 배기 규제를 만족시킬 수 있는 촉매 기술로 인정받고 있다. 환원제로 주입되는 암모니아는 냄새가 나는 유독성 물질이기 때문에 차량에 장착된 SCR의 경우에는 비독성이면서 비교적 냄새가 적은 요소수(Urea solution), 암모니아수, 암모니아 가스 등 다양한 형태로 공급할 수 있는데 가장 많이 쓰이는 요소수는 “AdBlue™” 상표의 물질로써 Urea(CO(NH₂)₂) 용액을 물에 희석시킨 용액이다.

이 장치는 NOx 전환율이 우수하고, DeNOx 촉매와 같이 경유연료 분사가 없어 연비 및 출력 저하가 없다. 하지만 Urea-SCR 시스템을 차량에 적용하기 위해서는 장착될 차량의 엔진 및 제어 시스템 초기에 과도 운전으로 인한 전환율의 감소와 대기로 암모니아가 방출되는 슬립 현상 등의 문제를 해결해야 한다. 또한 추가적인 환원제(AdBlue™)와 환원제 공급 시스템이 필요하며, 충전을 위한 인프라 구축이 요구된다[5]. 또한 환원제로 사용되는 요소수는 어느 점이 -11℃로 극지방과 같은 추운 지역에서 적용하려면 요소수 저장 탱크 내부에 가열 시스템을 반드시 적용해야만 한다. 이러한 어려움이 존재하지만, 다른 NOx 저감 기술에 비해 시스템의 구성이 단순하며 안정적으로 높은 NOx 저감 효율을 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다[47].

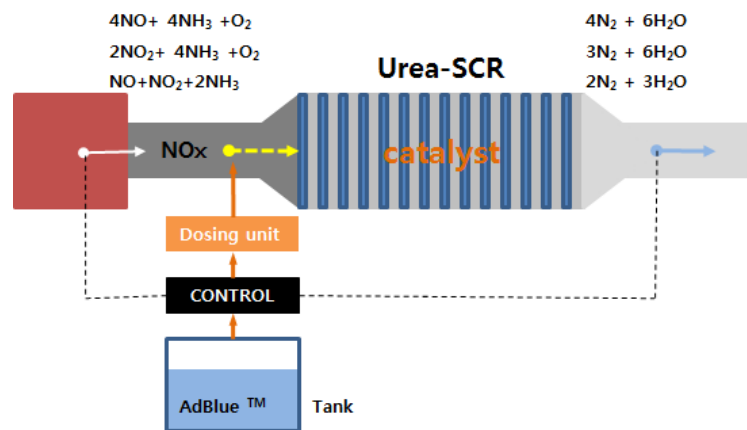
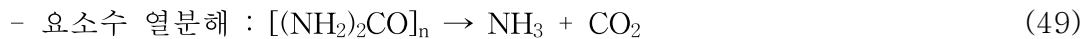
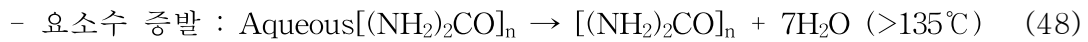


Fig. 15 Urea injection system for SCR system

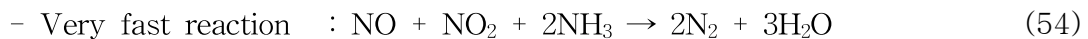
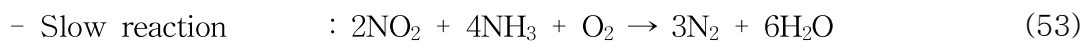
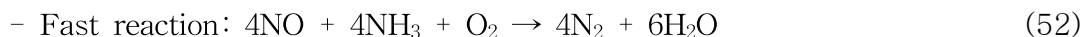
Urea-SCR 시스템에서 인젝터를 통해 배기관으로 분사된 요소수는 175℃ 정도의 온도에서부터 분해가 시작된다. 하지만 요소수는 SCR 촉매의 반응시간과 배출가스의 온도에서 완벽하게 분해되지 못한다. 330℃에서 요소수의 약 20% 정도가 기체 상태의 HNCO와 NH₃로 분해되고 400℃ 이상에서는 약 50% 정도만 분해된다[48].

Urea-SCR 시스템은 요소수를 SCR 촉매에 분사한 후 미립화된 액상 요소수가 열분해, 가수분해 과정을 거치면서 NH₃가 생성되는 원리이며, 이 과정에 대한 식은 아래와 같다.



열분해와 가수분해 과정을 거쳐 생성된 NH₃는 환원체로서 NO_x와 환원반응을 통하여 N₂와 H₂O로 변환된다.

NH₃에 의한 NO_x의 정화 경로는 다음 3가지로 잘 알려져 있으며, 그 중 식 (52) 반응식이 가장 빠른 특성을 보이고 있기 때문에, SCR 촉매 전단 DOC를 전치시켜 NO를 NO₂로 산화시킴으로써 반응온도를 낮추고 반응률을 높이는 부가적인 효과를 얻을 수 있다.



한편, 차량용 Urea-SCR 시스템에 사용되는 환원제인 요소수의 기본 물성치는 Table 3.와 같다.

32.5wt% AdBlueTM은 (NH₂)₂CO와 H₂O가 혼합된 공용 혼합물(eutectic

mixture)이다. 어는 점(freezing point)이 -11.4°C 이고, 밀도는 20°C 에서 $1.087\sim 1.093\text{kg/m}^3$ 이다. 요소수의 농도가 높아질수록 액상 내부의 결정화가 진행되며 농도가 묽어질수록 어는 점이 더욱 낮아지게 된다. 이러한 물리적 특성으로 인하여 요소수 인프라 구축은 차량용 SCR 장치 보급의 가장 큰 애로 사항이 되고 있다. 따라서 암모니아의 함량이 높고, 어는 점 낮으며, 환경적으로 안전한 물질에 대한 연구 개발을 통해 문제점을 극복하고자 하는 노력이 요구된다. 또한, 차량에 장착된 저장 탱크 내 요소수의 상태를 모니터링 할 수 있는 센서를 부착하고, 결빙을 방지하기 위한 해동 시스템을 적용하여 시동 초기, 안정적인 요소수의 공급 및 분사 기술에 대한 충분한 연구가 진행되어야 한다.

Table 3. Properties of the AdBlueTM (32.5 wt% Urea)

Density, solid, ρ_s [kg/m^3]	1,010
Density, liquid, ρ_ℓ [kg/m^3]	1090
Dynamic viscosity, μ_ℓ [kg/ms]	1.4
Reference density, ρ_{ref} [kg/m^3]	1095.6
Reference temperature, T_{ref} [K]	283.16
Melting temperature, T_m [K]	261.46
Latent heat, L [kJ/kg]	1.6
Thermal expansion coefficient, β [1/K]	4.5×10^{-4}
Thermal conductivity, k [W/(mK)]	0.57

2. 저장 탱크 내 요소수의 동결과 해동에 대한 수치해석

일정 체적을 갖는 저장 탱크 내 요소수의 동결 및 해동 현상을 고찰하기 위하여 각 수치해석 모델의 형상은 단순화하여 설계하였고, 격자생성 프로그램을 이용하여 동일한 조건에서 격자를 생성하였다. 각 보존 방정식의 공간 이산화는 유한체적법과 2차 풍상 차분법을 적용하였으며, 요소수의 온도에 따른 밀도와 비열의 변화는 Polynomial-linear 보간법을 통해 계산하였다.

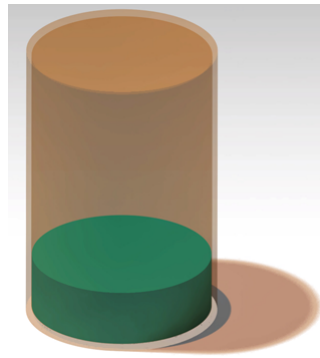
모든 해석 모델의 초기 및 외부 경계조건을 설정하여 고정 격자계를 이용한 Enthalpy-porosity 방법을 적용한 Solidification & Melting 해석모델을 사용하였으며, 비정상상태의 압력-속도 연결은 PISO 알고리즘을 이용하였다.

2.1 수치해석 모델 및 경계조건

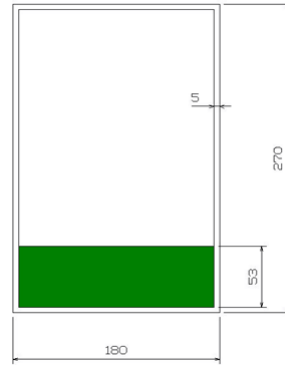
2.1.1 동결 모델

본 연구에서는 수치해석 시 복잡한 형상의 요소수 저장 탱크를 사용하게 되면 격자 생성 및 해석 시간 증가에 원인이 되므로 저장 탱크의 형상을 단순화하고, 요소수 저장 탱크의 20% 정도 채워진 요소수에 대하여 전산해석을 수행하여 일정 체적을 갖는 저장 탱크 내 요소수가 자연대류에 의해 동결되는 과정을 고찰하였다.

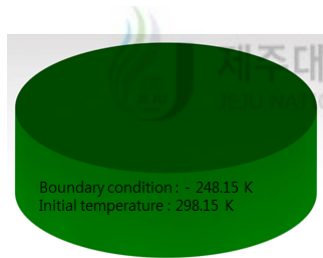
탱크 벽면의 두께는 5mm로 설정하였으며, 재질은 STS316으로 열전도율이 $16.3 \text{ W/m}^2\text{K}$, 냉동고 내 공기와의 대류 열전달 계수는 $3\text{W/m}^2\text{K}$ 그리고 비열은 $500\text{J/kg}^{\circ}\text{K}$ 로 설정하였다. 동결 온도는 -25°C 로 가정하여 요소수 저장 탱크의 모든 벽면에서 일정한 온도 조건을 갖도록 하였다. 동결 모델의 형상 및 경계조건을 Fig. 16에 도시하였다.



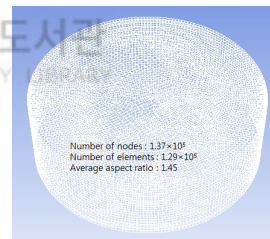
(a) Urea storage tank



(b) Dimension



(c) Analysis area



(d) Mesh

Fig. 16 Schematic diagram of the urea solution at freezing model

2.1.2 해동 모델

극지방과 같은 추운 지역에서 H/D 디젤 차량에 장착된 Urea-SCR 시스템이 냉시동 초기에 요구하는 최소량을 확보하기 위하여 저장 탱크 내부의 가열원으로 엔진 냉각수를 이용한다. 본 연구에서 적용한 Urea-SCR 분산 시스템의 개략도를 Fig. 17에 도시하였으며, 8ℓ 급 디젤 엔진 차량의 Urea-SCR 시스템에 장착된 요소수 저장 탱크와 냉각수 순환 가열 파이프는 Fig. 18에 나타냈다.

수치해석 시 복잡한 형상은 격자 생성 및 해석 시간 증가에 영향을 미치므로 요소수 저장 탱크는 직육면체 형상으로 전체 60ℓ 중 80%의 요소수가 채워진 약 48ℓ의 계산영역과 공기 접촉부분을 제외하여 모델링하였다. 요소수 저장 탱크 벽면 두께는 5mm, 재질은 STS316으로 열전도율이 16.3 W/m²K, 냉동고 내 공기와의 대류 열전달 계수는 3W/m²K 그리고 비열은 500J/kg²K이며, 요소수 저장 탱크 벽면 외부는 -20℃의 일정한 온도 조건으로 설정하였다.

냉각수 순환 파이프는 저장 탱크 내에 장착하는 방법에 따라 수직형(Vertical)과 수평형(Horizontal)으로 구분하였으며 각각 코일(Coil)과 지그재그(Zigzag)로 형상을 설계하였다. 각각의 냉각수 순환 가열 파이프는 설치 방법, 형상 그리고 설치 위치에 따라 명명하였으며, Fig. 19~23에 도시하였다. 파이프의 직경은 12.0mm, 두께는 1mm, 그리고 재질은 STS316으로 열전도율이 16.3 W/m²K, 비열은 500J/kg²K로 설정하였다.

열원으로 작용하는 냉각수는 엔진 내부를 순환하며 온도조절장치인 서모스탯 밸브와 라디에이터에 의해 80℃의 온도로 유지되고 펌프에 의해 순환된다. 냉각수 순환 파이프를 순환하는 작동유체인 냉각수의 어는 점은 -40℃, 순환 온도는 80℃, 그리고 유량은 50L/H(0.0277kg/s), 100L/H(0.0416kg/s) 그리고 200L/H(0.0555kg/s)로 설정하였다.

냉각수 순환 가열 방식에 의해 동결된 요소수의 해동 현상을 고찰하기 위한 계산 영역은 요소수 저장 탱크 내부의 공기부분은 제외되었으며, 냉각수 순환 가열 파이프를 포함하여 모델별로 똑같은 설정 값으로 격자를 생성하였다. Table 3.은 각 모델별 체적(m³), 전열 면적(m²) 그리고 생성된 격자수를 나타내었다. 한편, 요소수 저장 탱크 벽면은 모두 단열로 가정하였으며, 내부에 완전히 결빙된 48ℓ 요소수의 초기 온도는 요소수 저장 탱크 외부 벽면온도와 같은 -20℃이다.

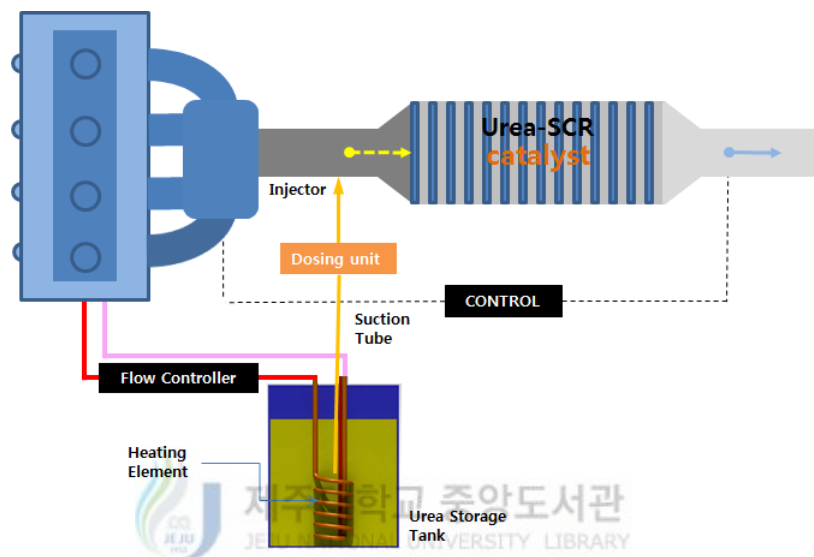
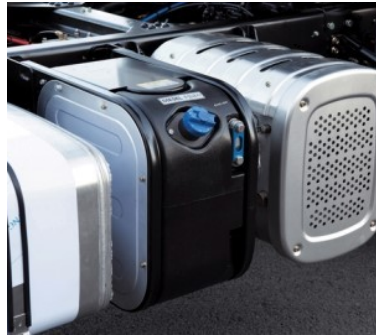


Fig. 17 Urea injection system with coolant heating element in th storage tank



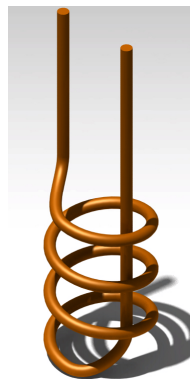
(a) Urea solution storage tank(60 ℓ)



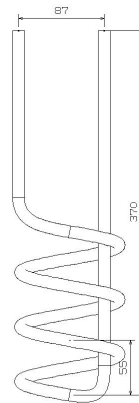
<http://www.alibabagroup.com/en/global/home>

(b) Coolant heating pipe(5winding)

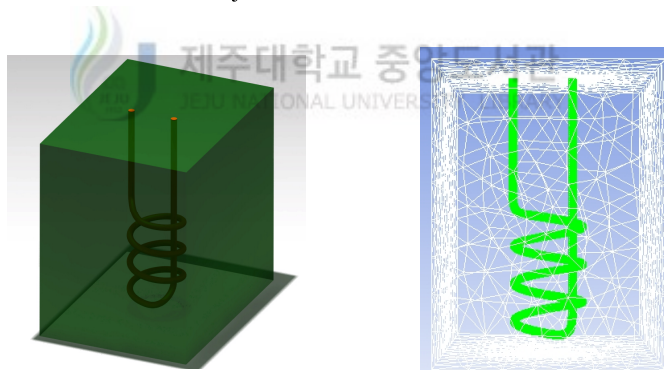
Fig. 18 Coolant heating pipe & Storage tank of the Urea-SCR system mounted on 8 ℓ diesel engine vehicle



(a) Geometry



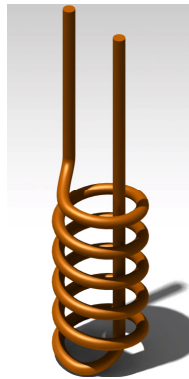
(b) Dimension(mm)



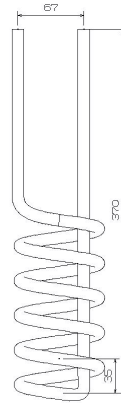
(c) Analysis area

(d) Meshing

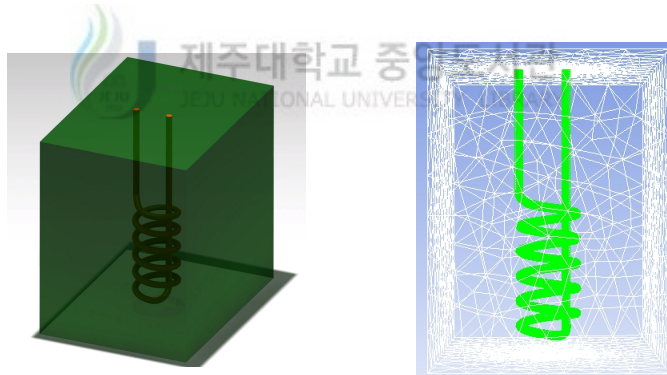
Fig. 19 Configurations of the heating pipe(VC87)



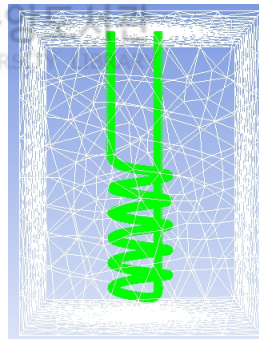
(a) Geometry



(b) Dimension(mm)

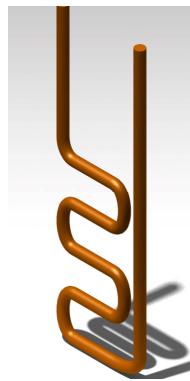


(c) Analysis area

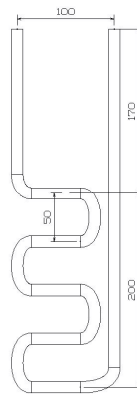


(d) Meshing

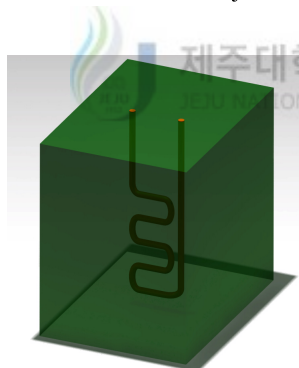
Fig. 20 Configurations of the heating pipe(VC67)



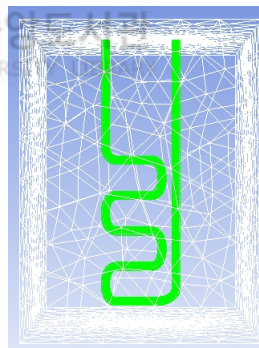
(a) Geometry



(b) Dimension(mm)

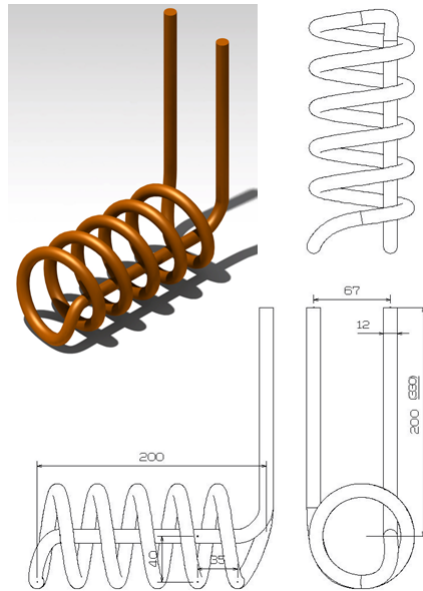


(c) Analysis area



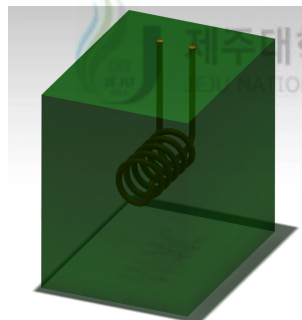
(d) Meshing

Fig. 21 Configurations of the heating pipe(VZ100)

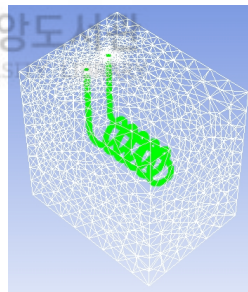


(a) Geometry

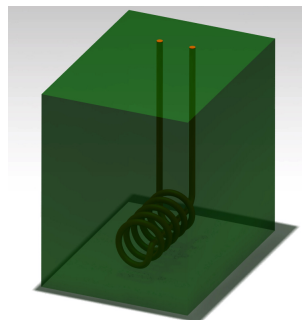
(b) Dimension(mm)



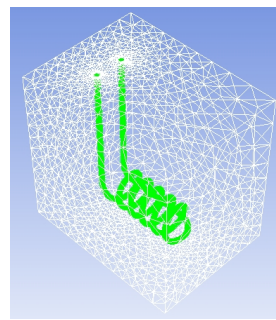
(c) Analysis area(middle)



(d) Meshing(middle)

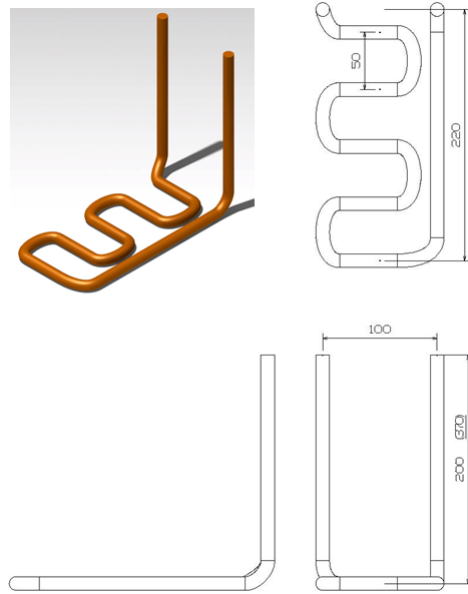


(e) Analysis area(bottom)



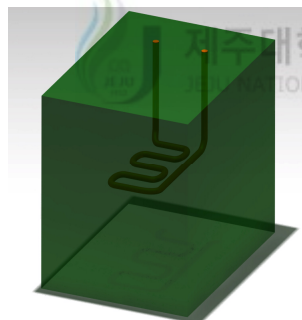
(f) Meshing(bottom)

Fig. 22 Configurations of the heating pipe(HC67-m, b)

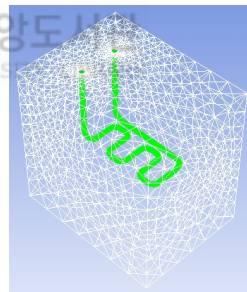


(a) Geometry

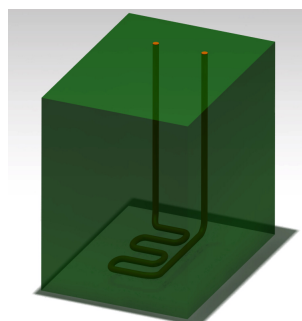
(b) Dimension(mm)



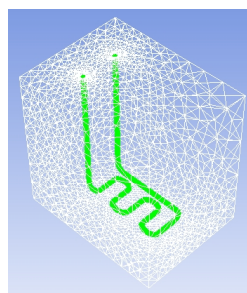
(c) Analysis area(middle)



(d) Meshing(middle)



(e) Analysis area(bottom)



(f) Meshing(bottom)

Fig. 23 Configurations of the heating pipe(HC67-m, b)

Table 4. Specification of Coolant Heating Pipe & grid Number

Name	Heating pipe			Tank	Total
	Volume(m ³)	Area(m ²)	cells	cells	
VC87	1.851e-4	0.062	11,592	401,213	412,805
VC67	2.174e-4	0.073	11,840	407,329	419,169
VZ100	1.224e-4	0.041	6,308	281,953	288,261
HC67_m	2.228e-4	0.074	13,938	422,123	436,061
HC67_b	2.522e-4	0.084	11,577	478,919	490,496
HZ100_m	1.312e-4	0.044	8,234	309,822	318,056
HZ100_b	1.677e-4	0.057	10,626	389,383	400,009



2.2 결과 및 고찰

본 연구에서는 동결 모델은 Choi et al.이 수행한 동결 실험과 동일한 형상과 조건에서 전산해석을 수행하였고, 해동 모델은 8ℓ 급 디젤 엔진 차량에 장착된 Urea-SCR 시스템의 요소수 저장 탱크 내 48ℓ 요소수의 해동 현상 및 열전달 특성을 고찰하였다. -20℃로 완전히 동결된 요소수에 다양한 형상의 냉각수 순환 파이프와 조건에 따른 온도 변화, 액상 체적 분율 그리고 고-액상 경계면의 이동에 대한 경로를 비교 분석하였다. 또한, 이러한 결과를 바탕으로 일정 시간 내 Urea-SCR 시스템에 필요한 해동된 액상 요소수의 양을 확인하고, 안정적으로 공급하기 위한 최적의 해동 장치를 고안한다.

2.2.1 동결 과정의 열전달 특성

Choi et al.은 요소수 저장 탱크 내 요소수의 동결 현상 및 열전달 특성을 파악하기 위하여 상온에서 최대 -30℃까지 제어할 수 있는 냉동고에 요소수 1L를 초기 온도 25℃ 조건에서 요소수 저장 탱크 내부 임의의 위치에 온도 센서를 삽입하여 온도 센서가 -25℃에 도달할 때까지 경과 시간에 따른 온도 변화를 측정하고 열전달 특성을 파악하였다.

본 연구에서는 Choi et al.가 수행한 실험과 동일한 형상을 모델링하고 동일한 조건에서 3차원 비정상상태 전산해석을 수행하였다. 요소수 저장 탱크 밑바닥에서 25mm 위치에서 측정된 온도와 Choi et al.가 요소수 저장 탱크 표면에서 측정된 온도 데이터를 비교 분석하였다. Table 5.에 Choi et al.의 동결 실험 조건과 본 동결 모델의 경계 조건을 나타냈다.

Table 5. Conditions of urea solution in storage tank

	Choi et al.[23]	Numerical analysis
Urea solution	32.5wt% AdBlue™	32.5wt% AdBlue™
Total volume(ℓ)	1	1.35
Initial temperature(℃)		25
Wall material	Poly-propylene	STS316
Wall thickness(mm)		1
Way to freeze	in refrigerator	direct to outer wall

Fig. 24는 시간이 지남에 따라 나타난 요소수 저장 탱크 내 중심(Center)와 표면(Surface)의 온도와 액상 체적 분율의 변화를 나타낸다. 저장 탱크 내 요소수의 동결은 저장 탱크 외부와의 대류 열전달을 거쳐 탱크 벽면을 냉각하여 액상 요소수의 현열과 고-액 상변화에 따른 잠열, 그리고 고상 요소수의 현열을 방출하며 요소수 표면으로부터 중심을 향하여 서서히 일어난다. 동결된 요소수는 열전도가 지배적으로 작용하며, 고상으로 둘러싸인 내부의 액상은 상경계면과의 온도차로 인하여 자연대류가 발생하며 열이 상경계면으로 이동하게 된다. 동결 시작 이후, 요소수는 -11.7°C 까지 급격한 온도 변화를 보여주고 있다. 두 지점이 요소수 동결 온도(-11.7°C)에 도달하는 시간은 8h로 비슷하게 진행되었고, 동결점에 도달하고 난 이후, 저장 탱크 내 요소수의 온도는 일정하게 유지되고 있다. 이 변곡점에서 액상 요소수가 고체 상태로 상변화하고 있음을 알 수 있으며, 표면에서 가장 빠르게, 중심방향으로 서서히 상변화가 진행되고 있음을 확인할 수 있다. 또한 저장 탱크 내 요소수가 모두 동결되는데 약 33h이 소요되었으며, 이 시간 이후로는 온도가 급격히 낮아져 외부 설정 조건인 -25°C 에서 열평형이 이루어질 것으로 예측할 수 있다.

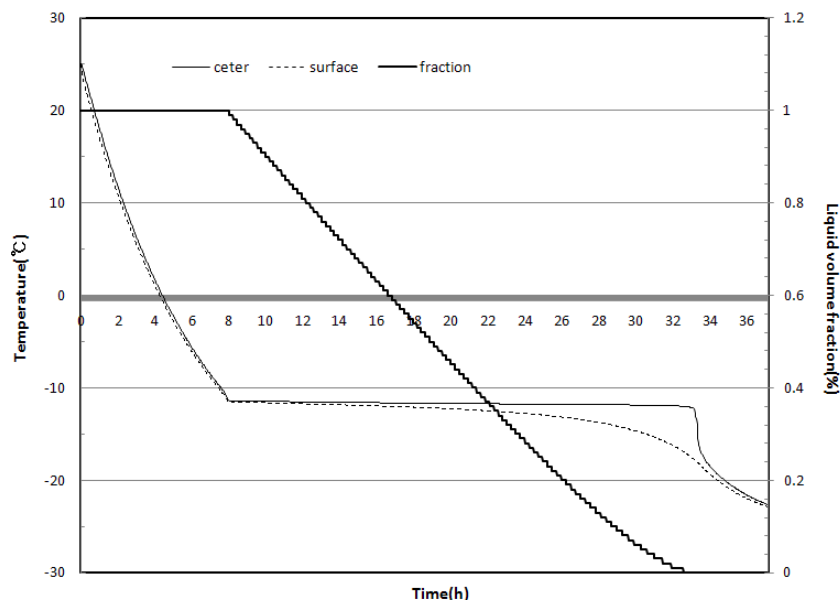


Fig. 24 Temperature profiles of freezing phenomenon at -25°C atmosphere

2.2.2 해동 과정의 열전달 특성

8ℓ급 디젤 엔진 차량에 장착된 Urea-SCR 시스템의 요소수 저장 탱크 내 8ℓ 요소수의 해동 현상 및 열전달 특성을 파악하기 위하여 동일한 크기의 요소수 저장 탱크 내에서 -20℃로 완전히 동결된 요소수에 코일과 지그재그 형상의 냉각수 순환 파이프와 수직·수평의 설치 방법과 위치 따른 온도, 고-액상 경계면의 이동 그리고 유동 속도의 변화에 대하여 비교 분석하여 해동 과정에 대한 열전달 특성을 고찰하였다. 그리고 동일한 시간이 경과된 후에 특정 지점의 온도 변화와 해동된 요소수 양을 비교함으로써 냉각수 순환 파이프의 해동 성능을 비교 분석하였다.

요소수 저장 탱크 내 열원으로 작용하는 80℃ 냉각수가 0.0555m/s(200L/h)의 유속으로 파이프 입구에서 출구로 순환하면서 파이프 외부 면을 통해 동결된 요소수에 열전달이 이루어진다. 출구 측은 일정한 정압 조건을 부여하였다.

Fig. 25~27은 냉각수 순환 파이프의 형상이 코일형으로 전열 면적이 다른 VC87과 VC67과 지그재그형인 VZ100을 수직 방향으로 설치하여 경과된 시간에 따른 x축에 수직한 단면에서 요소수 저장 탱크 내 온도 분포, 액상 체적 분유 그리고 유동 속도의 변화를 보여주고 있다.

Fig. 28~29은 냉각수 순환 파이프의 형상이 코일형으로 코일 중심이 요소수 저장 탱크의 바닥으로부터 70mm, 200mm 위치에 HC67_m, HC67_b를 수평 방향으로 설치하여 경과된 시간에 따른 x, y, z 축에 수직한 단면에서 요소수 저장 탱크 내 온도 분포, 액상 체적 분유 그리고 유동 속도의 변화를 보여주고 있다.

Fig. 30~31은 냉각수 순환 파이프의 형상이 지그재그 형으로 파이프 중심이 요소수 저장 탱크의 바닥으로부터 70mm, 200mm 위치에 HZ100_m, HZ100_b를 수평방향으로 설치하여 경과된 시간에 따른 x, y, z 축에 수직한 단면에서 요소수 저장 탱크 내 온도 분포, 액상 체적 분유 그리고 유동 속도의 변화를 보여주고 있다.

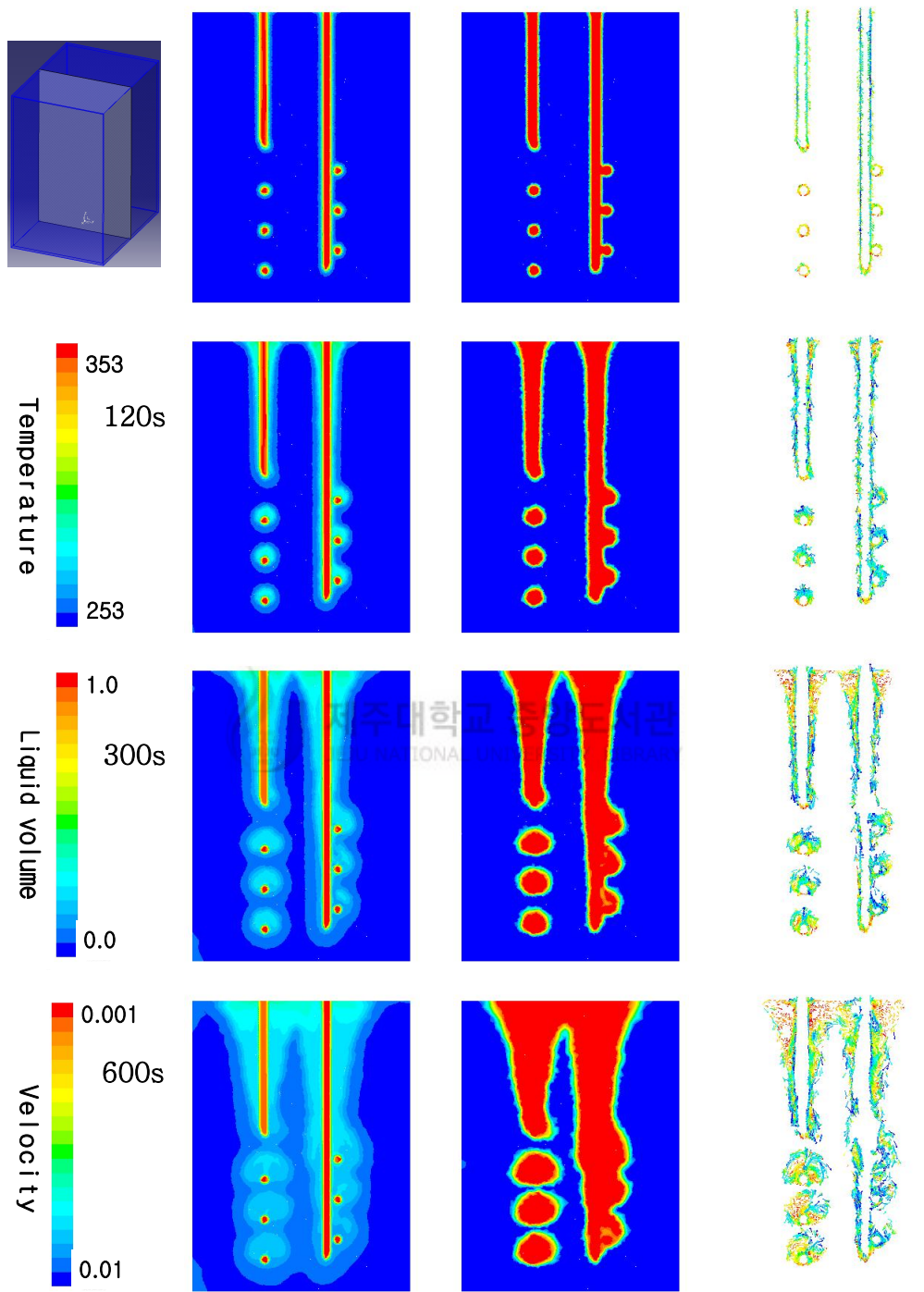
모든 그림에서 열원으로 작용하는 냉각수가 순환하면서 해동이 이루어지므로 냉각수 순환 파이프의 온도가 먼저 상승한 후, 시간이 지남에 따라 순환 파이프 주변으로 고온의 영역이 점차 확장되고 있음을 확인할 수 있다.

그림에서 알 수 있듯이 해동 과정 초기에는 상대적으로 뜨거운 냉각수가 순환

하며 해동이 냉각수 순환 파이프 주변에서 동일하게 진행되는 것으로 보아 열전도가 주로 해동에 영향을 미치는 것으로 판단되지만, 시간이 흐름에 따라 고상에서 액상으로 바뀌는 영역이 증가함에 따라 열전도보다는 상대적으로 자연 대류가 해동에 더 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 그리고 부력에 의한 자연 대류 열전달의 효과로 상부와 코일이 집중되어 있는 부분에서 많은 양의 요소수가 녹는 것을 확인할 수 있다.

냉각수 순환 파이프 형상에 따른 해동 특성을 살펴보면, 해동 과정이 코일 형과 지그재그 형에서 유사하지만 전열면적의 제약으로 Urea-SCR 시스템에는 코일 형이 유리할 것으로 판단된다.

설치 방법에 따른 해동 특성을 살펴보면 냉각수 순환 파이프를 수평으로 설치한 것이 수직으로 설치한 것보다 해동이 활발하게 이루어지고 있음을 알 수 있으며, 수평 방향으로 설치하더라도 설치 위치에 따라 해동 특성이 달라질 수 있을 것으로 판단된다. 해동은 시간이 경과함에 따라 열원에서 상부 방향으로 활발하게 진행되지만 하부 방향으로 거의 이루어지고 있지 않다. 이는 액상으로 바뀐 요소수가 온도 상승에 의한 밀도 변화로 부력이 발생하며 상부 방향으로 지속적으로 유동이 이루어지고 있는 것에 기인하는 것으로 판단된다. 따라서 Urea-SCR 시스템의 요소수 저장 탱크에 히터를 장착할 경우, 수평방향으로 바닥에 근접하여 설치하는 것이 효과적인 해동 방법이라는 것을 알 수 있다.



(a) Temperature (b) Liquid fraction (c) Velocity

Fig. 25 Melting patterns of urea solution with VC87(x=0)

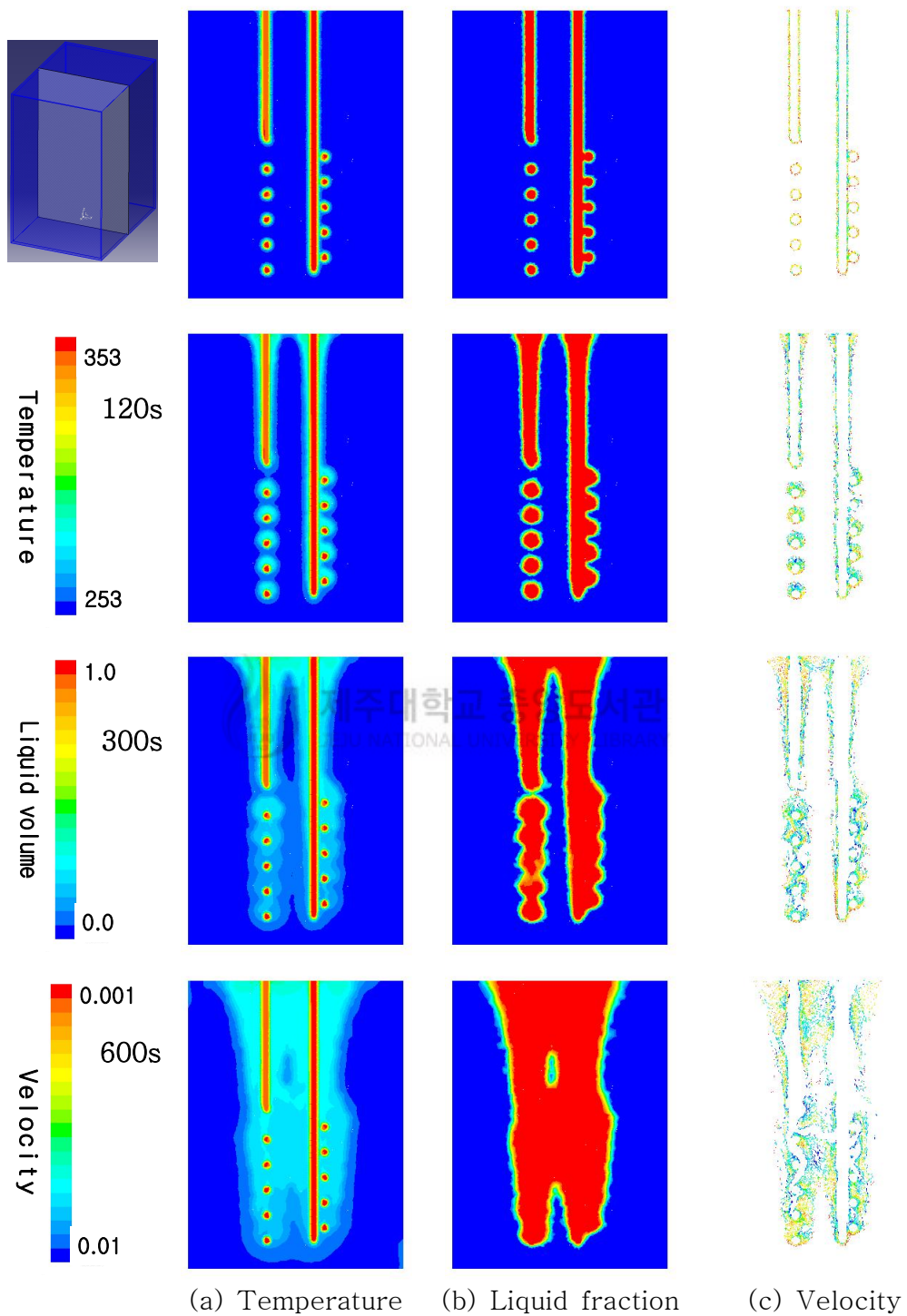
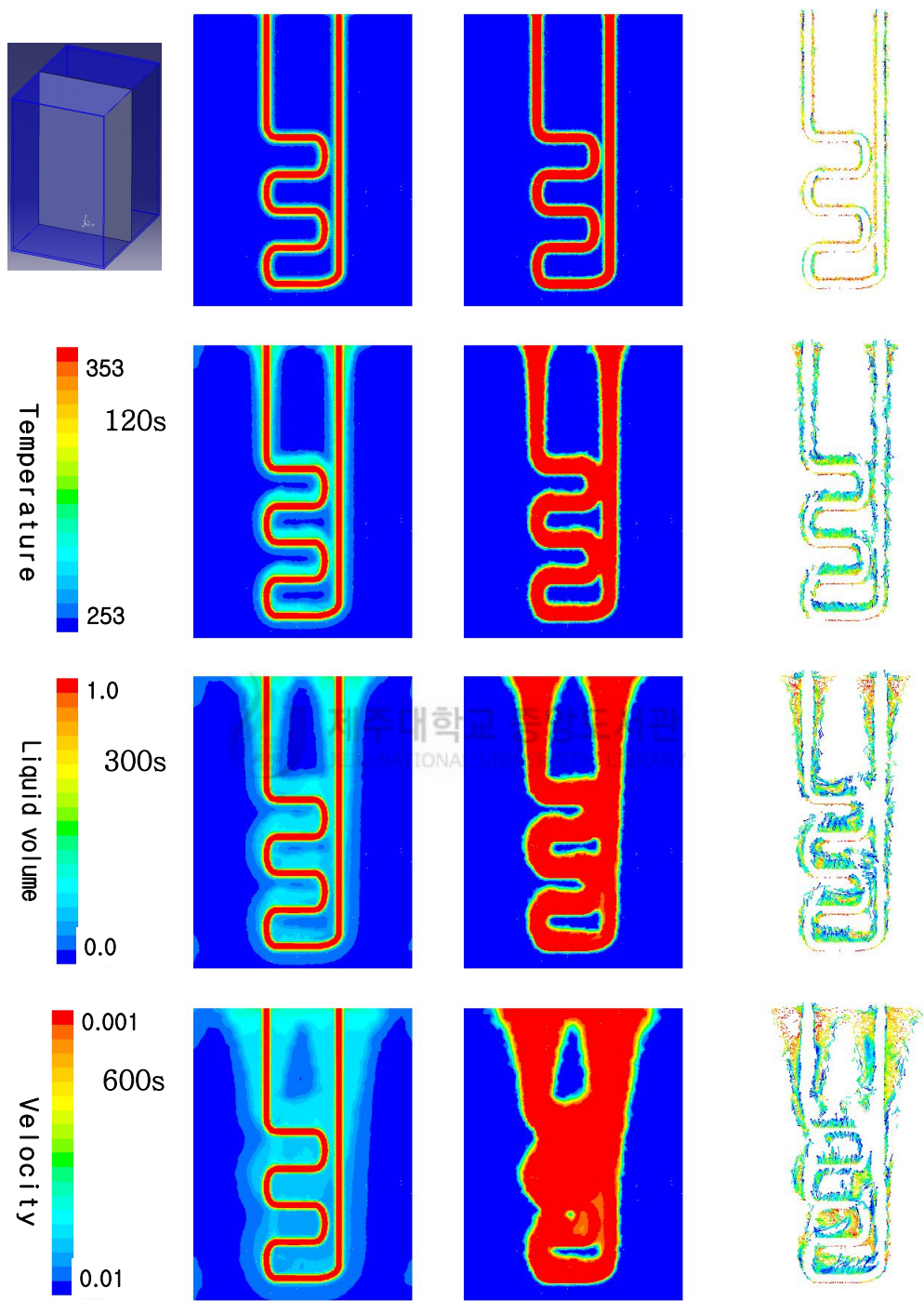


Fig. 26 Melting patterns of urea solution with VC67(x=0)



(a) Temperature (b) Liquid fraction (c) Velocity

Fig. 27 Melting patterns of urea solution with VZ100(x=0)

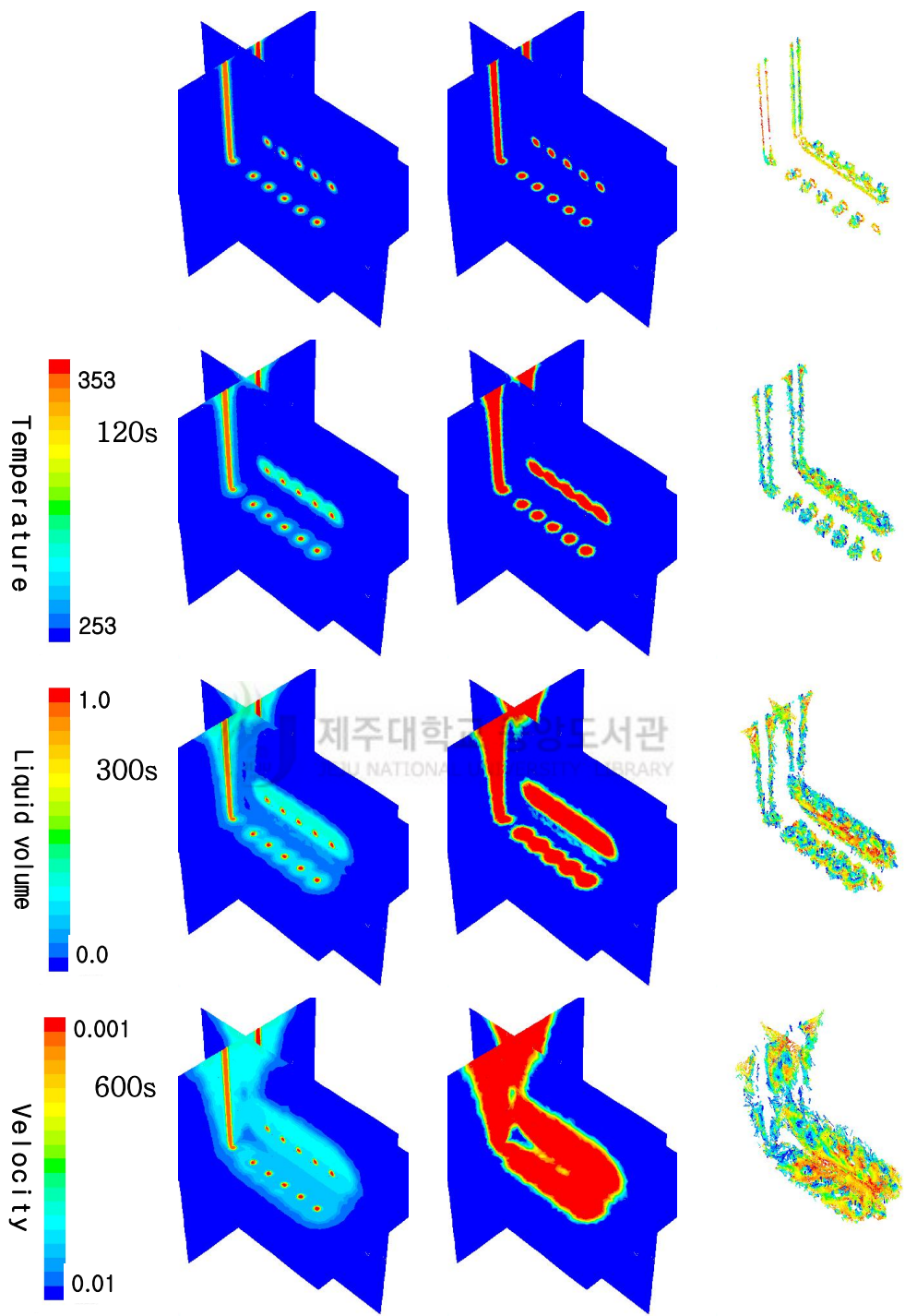


Fig. 28 Melting patterns of urea solution with HC67_m(x=0,y=0,z=0)

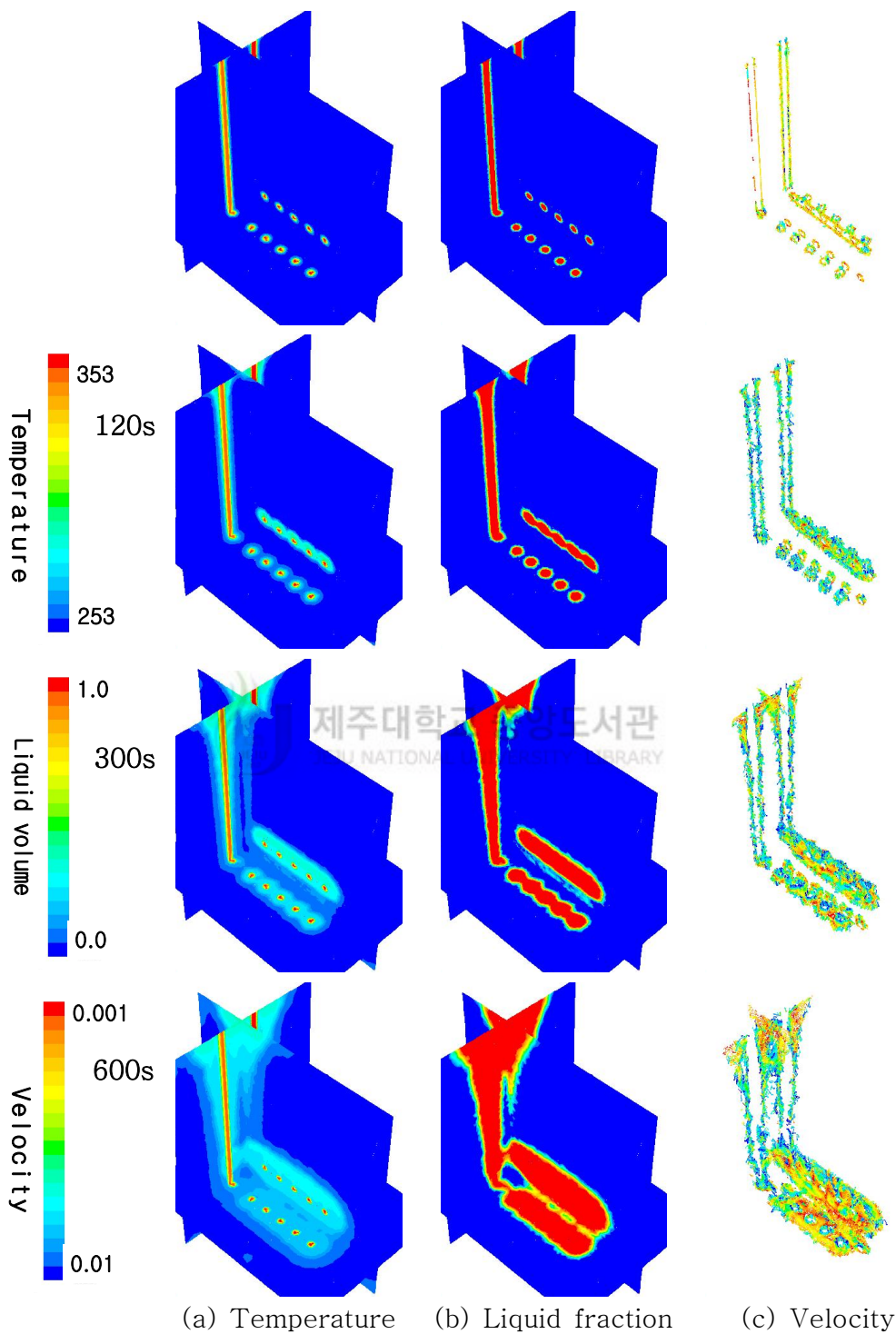


Fig. 29 Melting patterns of urea solution with HC67_b(x=0,y=0,z=0)

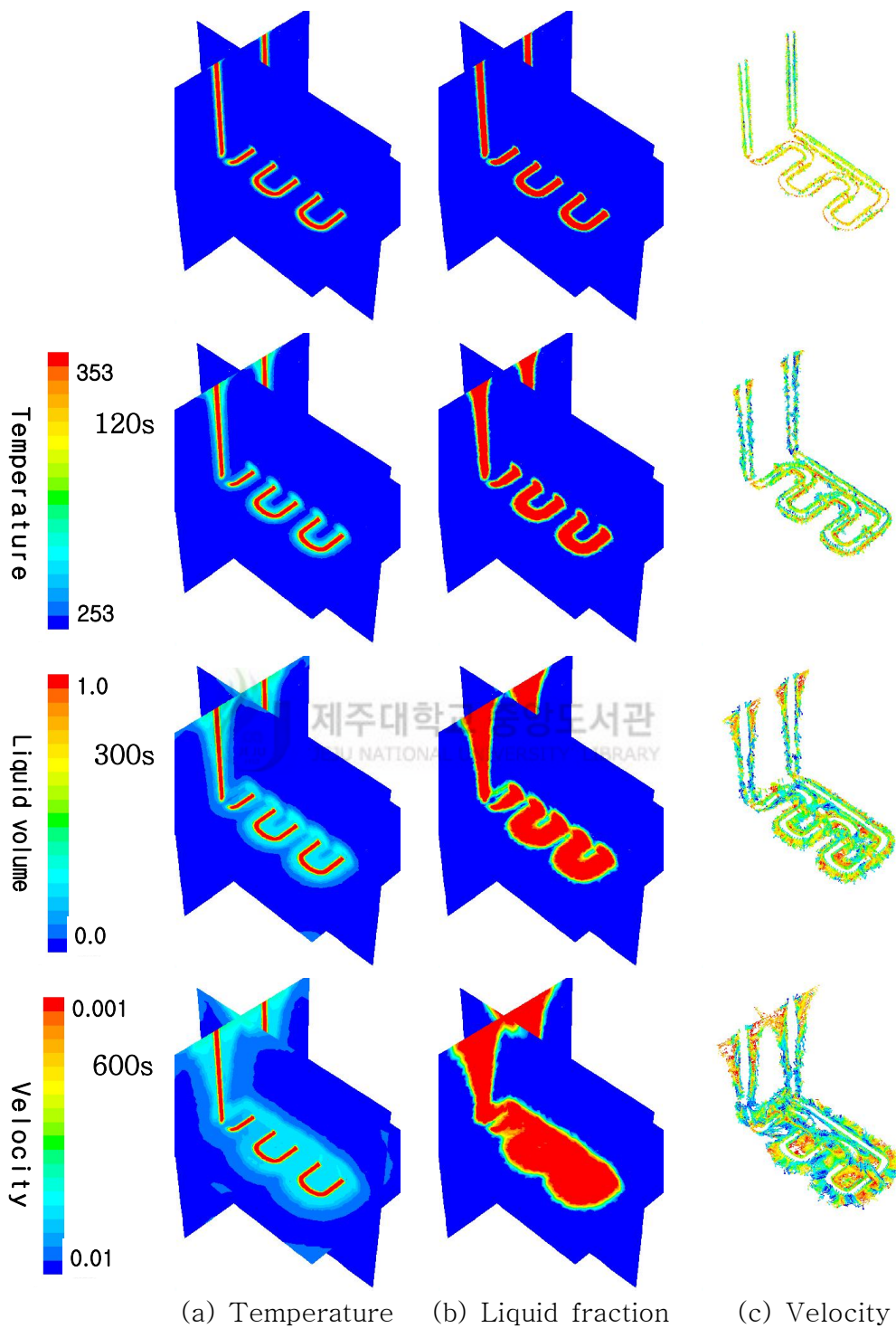


Fig. 30 Melting patterns of urea solution with $HZ100_m(x=0, y=0, z=0)$

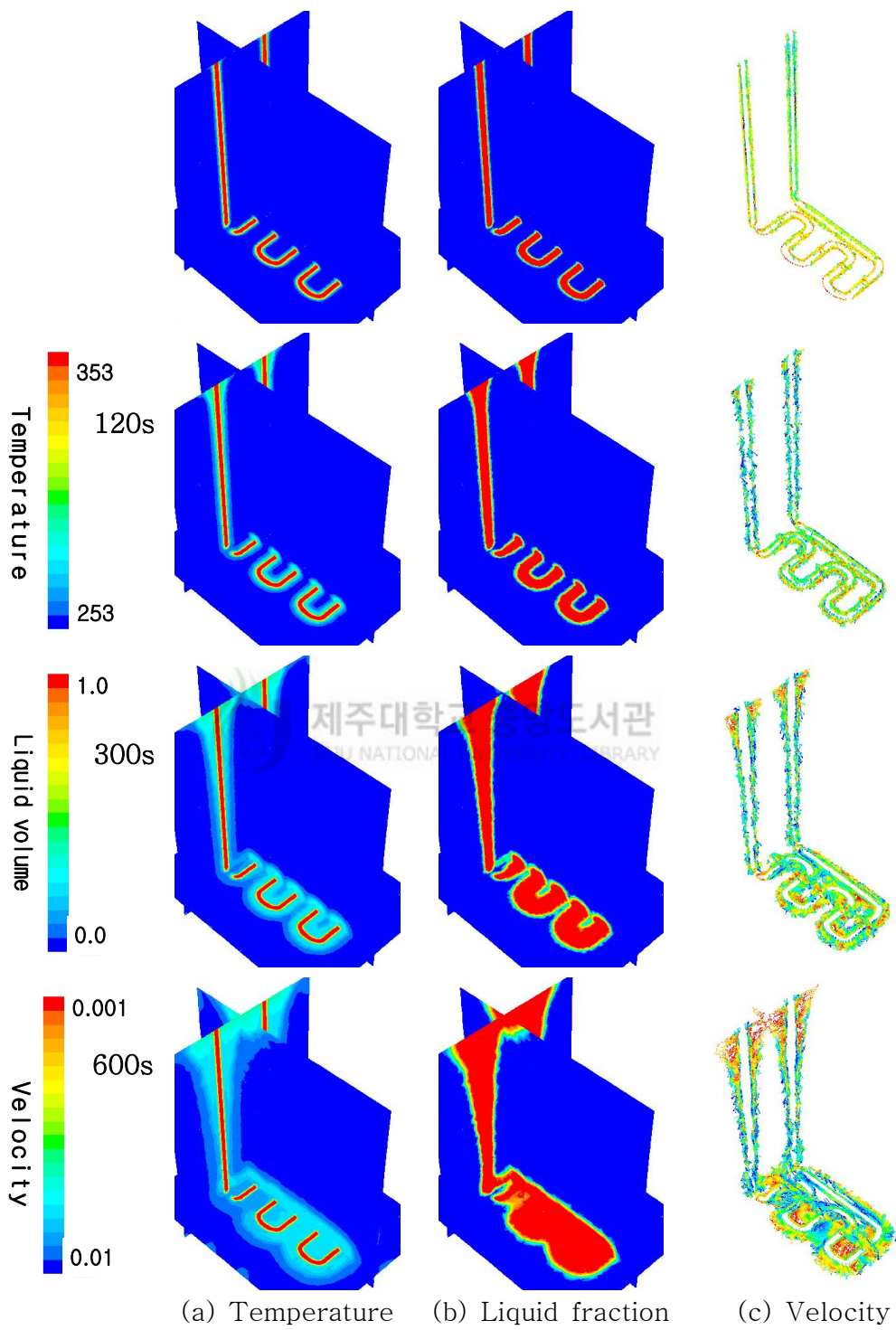


Fig. 31 Melting patterns of urea solution with HZ100_b($x=0,y=0,z=0$)

2.2.3 냉각수 순환 파이프의 면적이 해동에 미치는 영향

냉각수 순환 파이프 VC87과 VC67은 같은 코일형상으로 요소수 저장 탱크 내에 수직으로 설치하여 동결된 요소수를 해동시킨다. 냉각수 입구와 출구, 코일 피치의 간격 그리고 권선수를 다르게 하여 전열 면적을 각각 0.062m^2 과 0.073m^2 로 조정하였다. VC67은 입구와 출구 폭이 67mm로 VC87보다 20mm가 짧고, 피치 간격을 35mm로 짧게 하여 코일을 두 번 더 감아 전열면적을 0.011m^2 정도 넓게 하였다.

Fig. 32은 냉각수 순환 파이프의 면적이 동결된 요소수의 해동 과정에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 요소수가 -20°C 로 동결된 초기 상태에서 각각의 모델에 냉각수 입구 온도 80°C , 순환 유량 200 L/h 의 동일 조건으로 수치 해석한 결과이다. 열전달량은 식 (55)과 같이 계산하였다.

$$Q = \dot{m}c_p \Delta T \quad (55)$$

$$\dot{m} = 200\text{ L/h}$$

$$c_p = 4182\text{ J/kgK}$$

$$\Delta T = \text{Inlet Temperature} - \text{Outlet Temperature}$$

요소수 저장 탱크 내 요소수의 해동 과정은 가열원인 냉각수 순환 파이프로부터 결빙된 요소수로 열전달이 진행되고 이에 따른 요소수의 상변화가 발생한다. 따라서 냉각수 순환 파이프의 전열 면적이 넓을수록 더 많은 열전달이 이루어질 것이라 판단된다.

Fig. 32 (a)는 VC67과 VC87 냉각수 순환 파이프 중심부에서 저장 탱크의 바닥으로부터 55mm, 155mm 그리고 255mm 위치에서 온도 변화를 나타냈다. VC87은 600s까지 모든 위치의 온도가 꾸준히 상승하고 있지만 상변화 온도(-11°C)에는 아직 도달하지 못하였고, VC67은 모든 위치의 온도가 꾸준히 상승하다 약 480s 부근에서 155mm와 255mm 위치의 온도가 급격히 상승하고 있는데 상변화가 시작되는 것으로 판단된다. 하지만 바닥에 가까운 55mm 위치 온도는 600s까지도 상변화 온도(-11°C)에 도달하지 못하였다. VC87은 VC67 보다 피치 간 거리와 입구와 출구 사이 거리가 크고, 전열 면적이 작아 동결된 요소수에 많

은 영향을 미치지 못하는 것으로 판단된다. 또한, 저장 탱크 바닥에서 255mm, 155mm 그리고 55mm 순으로 상변화가 일어나고 있는 것은 자연 대류의 영향으로 상승 유동으로 인한 결과이다.

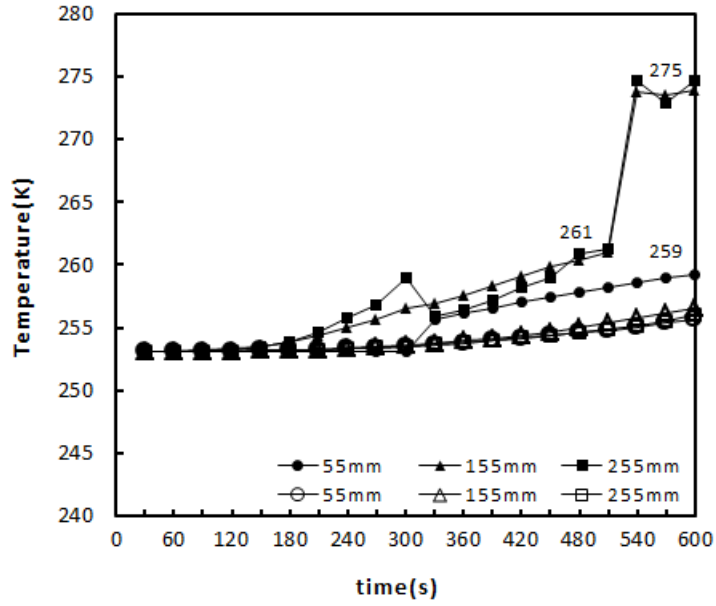
Fig. 32 (b)는 VC67과 VC87 냉각수 순환 파이프 입구와 출구 온도차를 나타냈다. 전열 면적이 클수록 입구와 출구 온도차가 클 것이라 판단되며, VC67과 VC87은 각각 온도차가 평균 7°C와 5°C를 유지하며 해동이 이루어지고 있다. 따라서 Fig. 32 (c)처럼 VC67이 평균 열전달량이 1666W로 평균 열전달량이 1182W인 VC87보다 약 485W가 커 많은 열에너지가 동결된 요소수로 전달되는 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 32 (d)는 시간 경과에 따른 액상 체적 분율(Liquid volume fraction, %)을 나타낸다. 여기서, 액상 체적 분율은 요소수 저장 탱크의 전체 체적에서 해동된 액상 요소수가 차지하는 체적비를 나타내는 것이다. 시간이 경과할수록 액상 체적 분율이 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있으며, 1ℓ의 해동된 액상 요소수를 얻는데 소요된 시간은 VC87은 약 180초, VC67은 약 155초 정도가 걸렸다. 해동 초기에는 전열 면적에 따른 효과가 뚜렷하게 관찰되지 않지만 시간이 경과할수록 전열 면적이 넓은 VC67이 더 많은 요소수를 해동하는 것을 확인할 수 있으며, 시간이 경과할수록 자연 대류의 영향은 더 커질 것으로 판단된다. Fig. 32 (e)는 전 시간 구간에서 열전달량 증가율과 액상 체적 증가율을 비교한 것으로 냉각수 순환 파이프의 상대적인 효율성을 비교 분석하는데 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 전 시간 구간에서 전열 면적 증가 대비 열전달량 증가는 VC67이 VC87보다 평균 2.3배가 높아 해동에 더 효과적인 것으로 판단된다. 이는 냉각수 순환 파이프의 입구와 출구 사이의 간격, 코일 피치사이의 간격 그리고 감기 코일의 위치에 따라 해동에 영향을 준 것이라 판단된다. 따라서 Urea-SCR 시스템의 동결된 요소수 해동에 냉각수 순환 파이프 가열 방식을 적용하고자 할 때에 냉각수 순환 파이프의 설계를 최적화해야 하는 이유이며, 향후 연구에 있어서 고찰해 볼 필요가 있다.

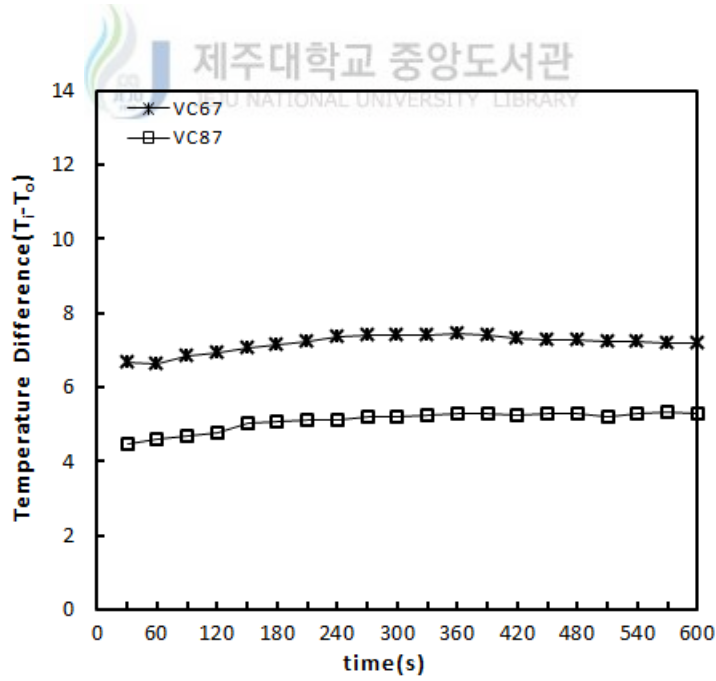
결과적으로 요소수 1ℓ를 확보하는데 필요한 시간은 VC87은 180s, VC67은 155s가 걸리는 것으로 봐서 냉각수 순환 파이프의 전열 면적이 요소수 저장 탱크 내 동결된 요소수를 해동시키는데 많은 영향을 주고 있음을 확인하였다. 또

한, 코일 형일 경우 피치간 거리와 냉각수 입구와 출구 사이의 거리도 해동에 영향을 줄 것으로 판단되며, 따라서 성능 향상을 위하여 냉각수 순환 파이프 최적 설계가 필요하다.

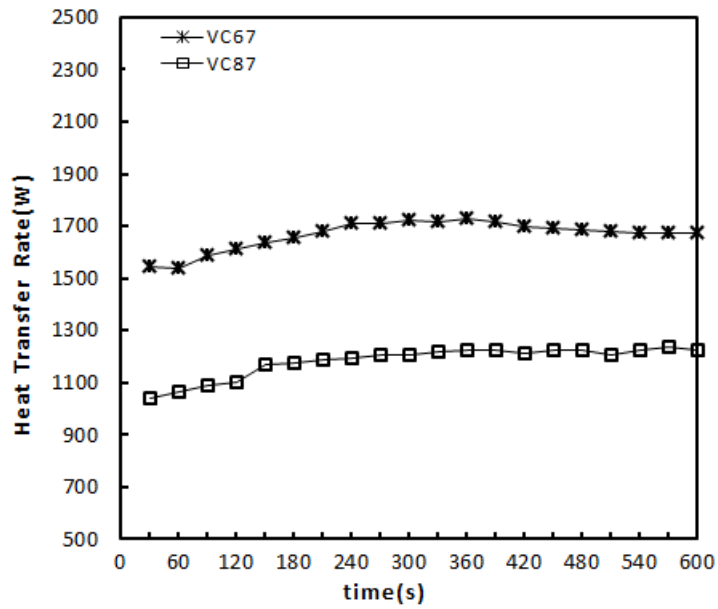




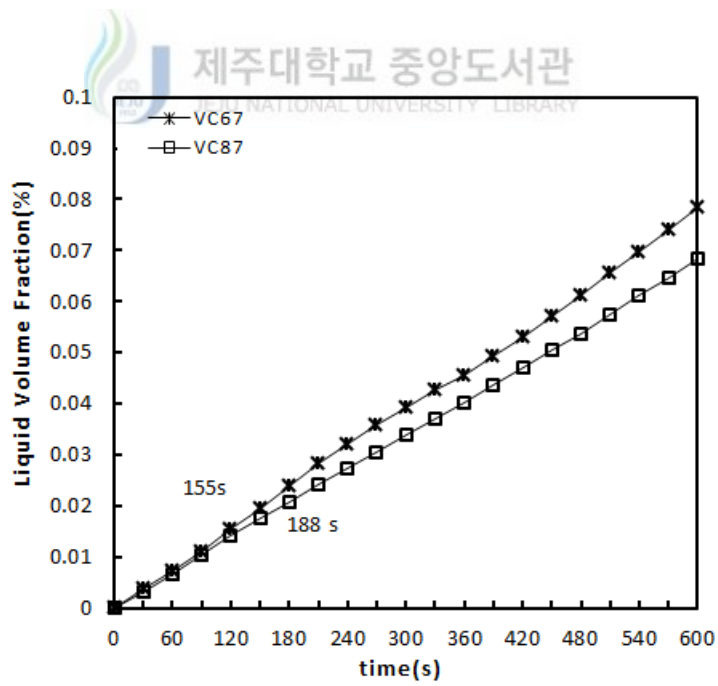
(a) Temperature profiles



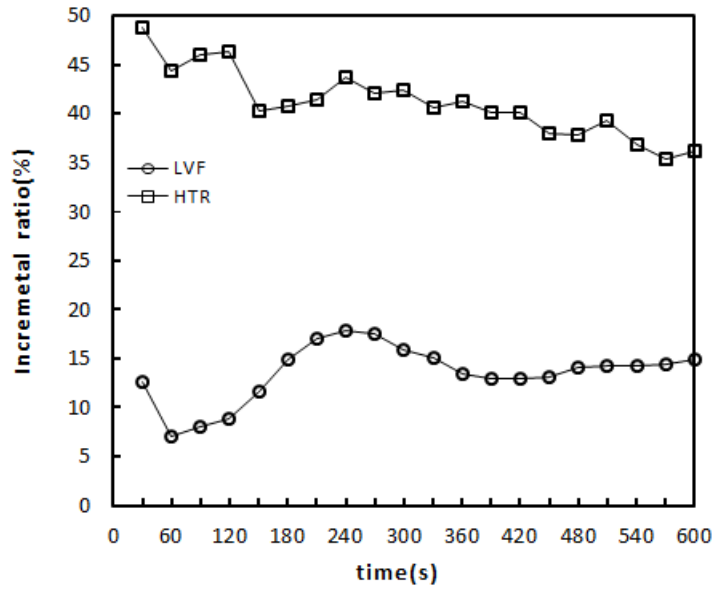
(b) Temperature difference between inlet and outlet



(c) Heat transfer rate(W)



(d) Liquid volume fraction(%)



(e) Incremental ratio

Fig. 32 Melting properties according to heat transfer area
 (Urea solution : -20°C, Coolant : 80°C, 200L/h)

2.2.4 냉각수 순환 유량이 해동에 미치는 영향

냉각수 순환 유량에 따른 요소수 저장 탱크 내 동결된 요소수의 해동 과정을 고찰하였다. 이를 위하여 코일형으로 설치방법이 다른 VC67과 HC67에 유량 100L/h, 150L/h 그리고 200L/h로 순환시켜 -20°C 로 동결된 요소수를 해동하여 시간에 따른 열전달 특성을 고찰하였다. 냉각수 순환 파이프의 입구 온도는 80°C 이다.

Fig. 33 (a)~(f)은 VC67을 적용한 요소수 저장 탱크 내 top, middle 그리고 bottom 지점에서의 온도 변화, 입·출구 온도 차, 열전달량 그리고 액상 체적 분율을 도시하였다. 그리고 Fig. 34(a)~(f)은 HC67을 적용한 upper, inner 그리고 lower 지점에서의 온도 변화, 입·출구 온도 차, 열전달량 그리고 액상 체적 분율을 도시하였다.

Fig. 33 (a)~(c)는 VC67의 각 유량 변화에 따른 top, middle, 그리고 bottom에서의 온도변화를 나타냈다. top, middle 그리고 bottom의 위치는 요소수 저장 탱크 바닥에서 위쪽 방향으로 각각 255mm, 155mm 그리고 55mm 떨어진 지점이다. 각 지점의 온도 변화는 모든 유량에서 비슷한 경향을 보이고 있으며, 냉각수 순환 파이프 주변 온도에서 먼저 상승한 후 부력의 영향으로 위 방향으로 열전달이 일어나 온도가 점차 상승하였다.

모든 지점에서 온도가 꾸준히 상승하다 약 480s 부근에서 middle과 top 위치의 온도가 상변화 온도(-11°C)에서 급격히 상승하며 상변화가 시작되는 과정이라 판단된다. 급격한 온도 상승 후 액상은 주변 동결 요소수의 온도 차로 인한 대류 현상이 일어나고 있으며, 가열된 액체의 열량이 주변 동결 요소수로 열손실이 진행되어 약 1°C 로 열평형을 이루고 있다. 하지만 냉각수 순환 파이프 밑부분인 bottom 위치에서는 600s까지도 상변화 온도(-11°C)에 도달하지 못하였다. Fig. 33 (d)와 (e)는 냉각수 순환 파이프 입구와 출구 온도차와 열전달량을 나타냈다. 순환 유량이 적을수록 온도차가 크지만 냉각수 유량의 영향으로 동결된 요소수에 전달되는 열량은 냉각수 유량이 클수록 높게 나타났다. 이것은 유량이 적을수록 낮은 유속으로 인하여 냉각수 순환 파이프 내에서 체류 시간이 길어지기 때문에 입구와 출구 온도차가 큰 것이며, 하지만 유량이 많을수록 동일 시간 동안에 동결된 요소수로 전달되는 단위 시간당 총열량은 커지게 되는 것이다. 하지만

그 차이가 크지 않으며, 이는 Fig. 33 (f)의 액상 체적 분율(Liquid volume fraction, LVF)도 비슷한 양상을 보이는 이유이다. 액상 체적 분율은 시간이 경과함에 따라 선형적으로 증가하고 있으며, 1L(LVF, 0.02%) 해동량을 얻는 걸리는 시간은 200L/h, 150L/h 그리고 100L/h가 각각 약 155s, 약 155s 그리고 165s 정도가 소요되었다. 또한, 유량이 증가할수록 해동량이 증가할 것이라는 당초 예상과 다른 결과로써 600s까지는 냉각수 순환 유량이 해동에 미치는 영향이 미비한 것으로 판단된다. 하지만 유량이 많을수록 냉각수 순환 파이프 내 체류시간이 짧아지며 공급 열량과 해동량이 많아지고 있기 때문에 시간이 경과될수록 유량 증가에 따른 차이가 더 커질 것으로 예상된다. 따라서 수직으로 설치한 VC67 냉각수 순환 파이프를 이용하여 짧은 시간에 많은 해동량은 얻기 위해서는 많은 유량을 순환시키는 것이 유리할 것으로 판단된다.

Fig. 34 (a)~(c)는 수평방향으로 설치한 HC67의 각 유량 변화에 따른 upper, inner, 그리고 lower에서의 온도변화를 나타냈다. upper 위치는 냉각수 순환 파이프 상부 외벽에서 위쪽 방향으로 9mm 떨어진 지점이며, inner는 냉각수 순환 파이프 중심이며, lower는 냉각수 순환 파이프 하부 외벽에서 아래 방향으로 9mm 떨어진 지점이다.

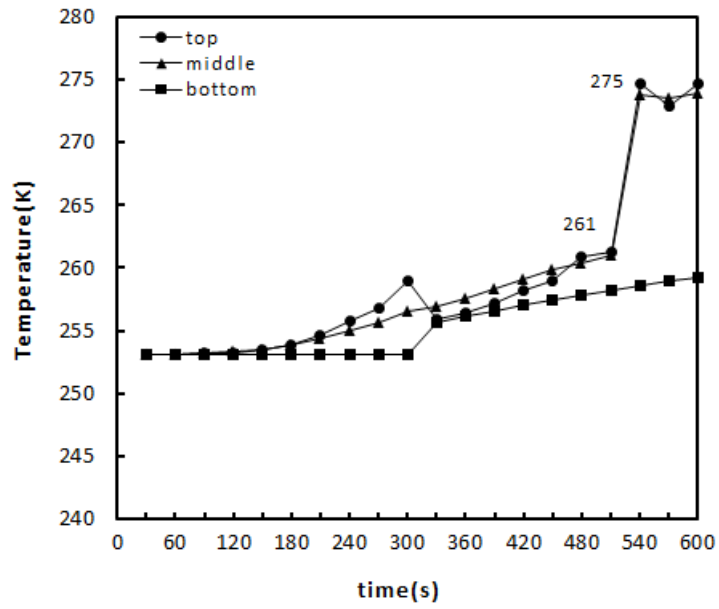
온도 변화는 모든 유량에서 비슷한 경향을 보이고 있으며, 냉각수 순환 파이프 주변 온도에서 먼저 상승한 후 부력의 영향으로 위 방향으로 열전달이 일어나 온도가 점차 상승하였다.

upper 지점인 경우 약 120s에서 온도가 상변화 온도(-11℃)에서 12℃까지 급격히 상승하며 상변화가 시작되는 과정이며, 이후에 다시 3℃까지 하강한다. 이는 해동된 요소수가 주변의 녹지 않은 요소수로 공급되는 열보다 많은 열을 빼앗겼기 때문이라 판단된다. inner 지점인 경우에는 약 330s 부근에서 온도가 -2℃까지 상승하며 상변화가 일어나고 있으며, 이후 주변의 동결된 요소수와 열전달이 이루어지며 열평형을 이루고 있다. 하지만 냉각수 순환 파이프 하부에 위치한 lower 지점에서는 600s까지도 상변화 온도(-11℃)에 도달하지 못하였다.

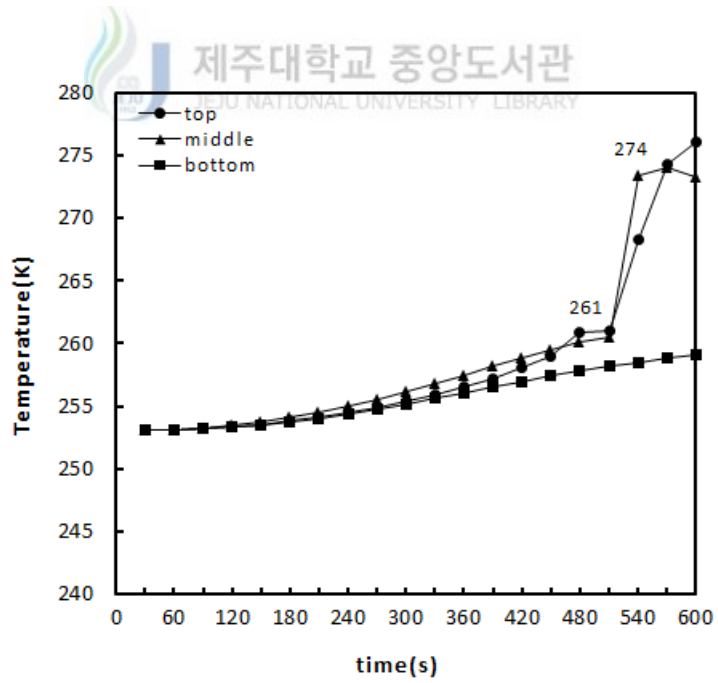
Fig. 34 (d)와 (e)는 냉각수 순환 파이프 입구와 출구 온도차와 열전달량을 나타냈다. 해동이 시작되고 60s까지 온도차가 작아지다가 다시 커지는 변곡점을 가

진 형태이다. 이것은 초기에 열전도에 의해 많은 양의 열이 전달되다가 냉각수 순환파이프 주위가 해동되면서 열전도와 동시에 액체에 의한 자연 대류 현상이 일어나 열전달이 적어지기 때문이다. 200L/h인 경우 해동 초기에는 온도차가 7.6℃까지 올라갔다가 60s에는 7.3℃까지 내려가고, 다시 증가하여 약 8℃을 유지하고 있고, 150L/h인 경우 해동 초기에는 온도차가 10.1℃까지 올라갔다가 60s에는 9.4℃까지 내려가고, 다시 증가하여 약 10.6℃를 유지하고 있고, 100L/h인 경우 해동 초기에는 온도차가 14.7℃까지 올라갔다가 60s에는 13.5℃까지 내려가고, 다시 증가하여 약 15.3℃를 유지하며 해동되고 있다.

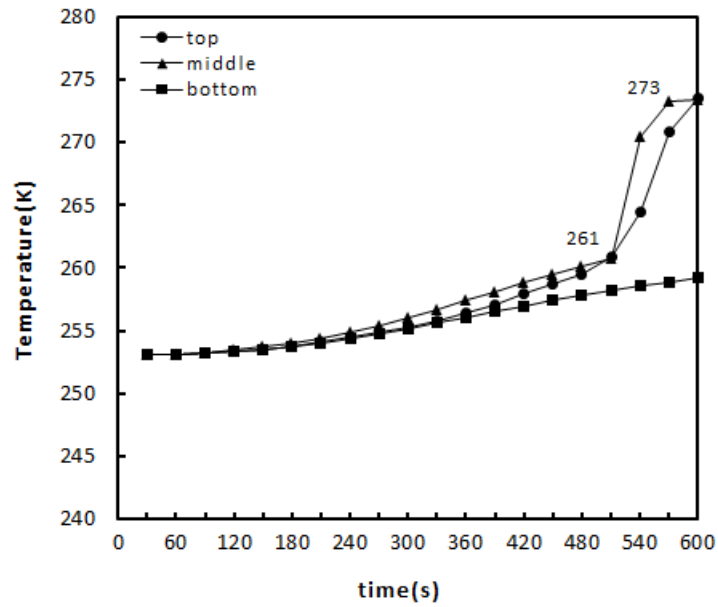
냉각수 순환 유량이 적을수록 온도차가 크지만 냉각수 유량의 영향으로 동결된 요소수에 전달되는 열량은 냉각수 유량이 클수록 높게 나타났다. 이것은 유량이 적을수록 낮은 유속으로 인하여 냉각수 순환 파이프 내에서 체류 시간이 길어지기 때문에 입구와 출구 온도차가 큰 것이며, 하지만 유량이 많을수록 동일 시간 동안에 동결된 요소수로 전달되는 단위 시간당 총열량은 커지게 되는 것이다. 하지만 그 차이가 크지 않으며, 이는 Fig. 34 (f)의 액상 체적 분율(Liquid volume fraction, LVF)도 비슷한 양상을 보이는 이유이다. 액상 체적 분율은 시간이 경과함에 따라 선형적으로 증가하고 있으며, 1L(LVF, 0.02%) 해동량을 얻는 걸리는 시간은 200L/h, 150L/h 그리고 100L/h가 각각 약 140s, 약 140s 그리고 145s 정도가 소요되었다. HC67 모델에서도 냉각수 순환 유량이 증가할수록 해동량이 증가할 것이라는 당초 예상과 다른 결과로써 냉각수 순환 유량이 해동에 미치는 영향이 미비한 것으로 판단된다. 하지만 유량이 많을수록 냉각수 순환 파이프 내 체류시간이 짧아지며 공급 열량과 해동량이 많아지고 있기 때문에 시간이 경과될수록 유량 증가에 따른 차이가 더 커질 것으로 예상된다. 따라서 수평으로 설치한 HC67 냉각수 순환 파이프를 이용하여 짧은 시간에 많은 해동량은 얻기 위해서는 많은 유량을 순환시키는 것이 유리할 것으로 판단된다.



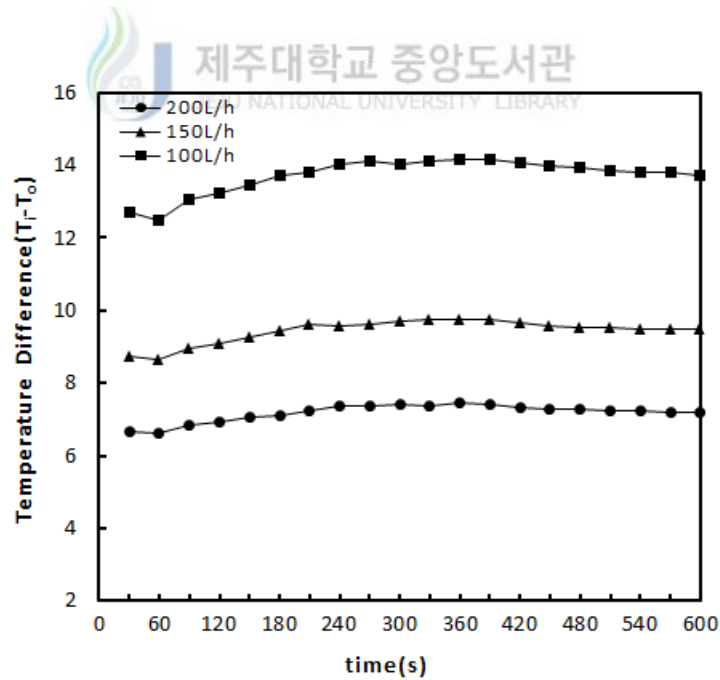
(a) Temperature profiles, coolant flow rate : 200L/h



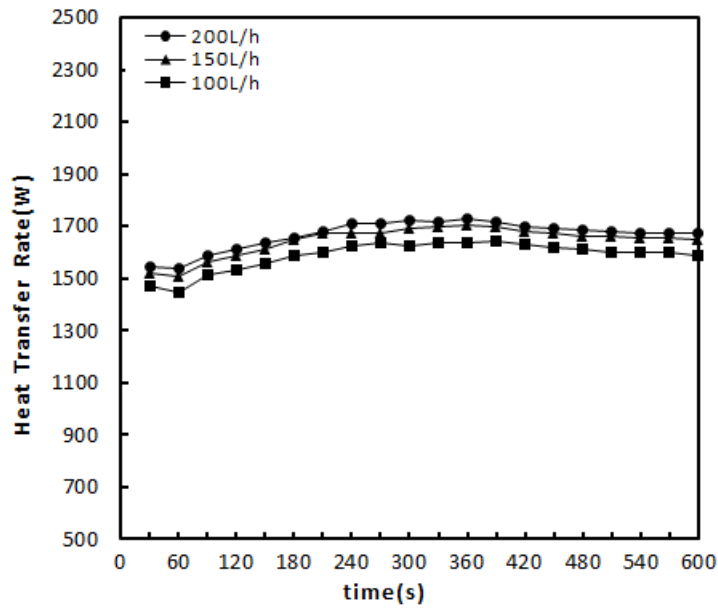
(b) Temperature profiles, coolant flow rate 150L/h



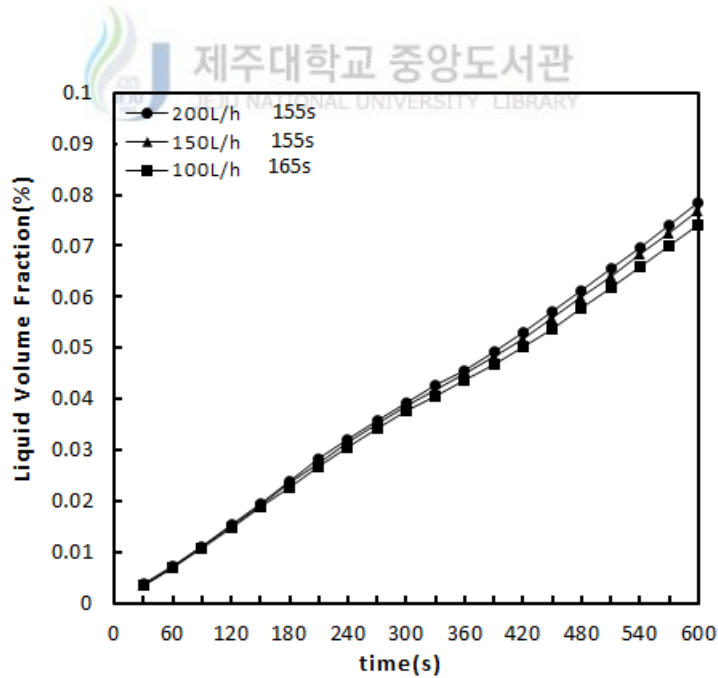
(c) Temperature profiles, coolant flow rate : 100L/h



(d) Temperature difference with various flow rate

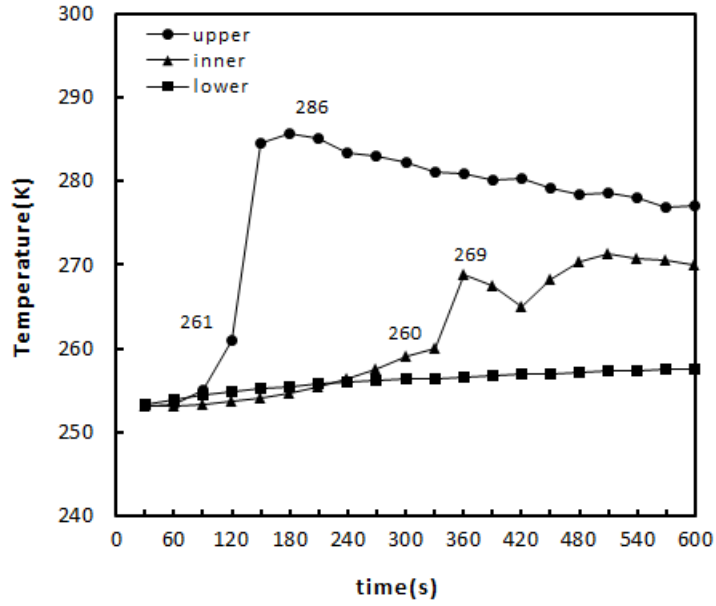


(e) Heat transfer rate(W) with various flow rate

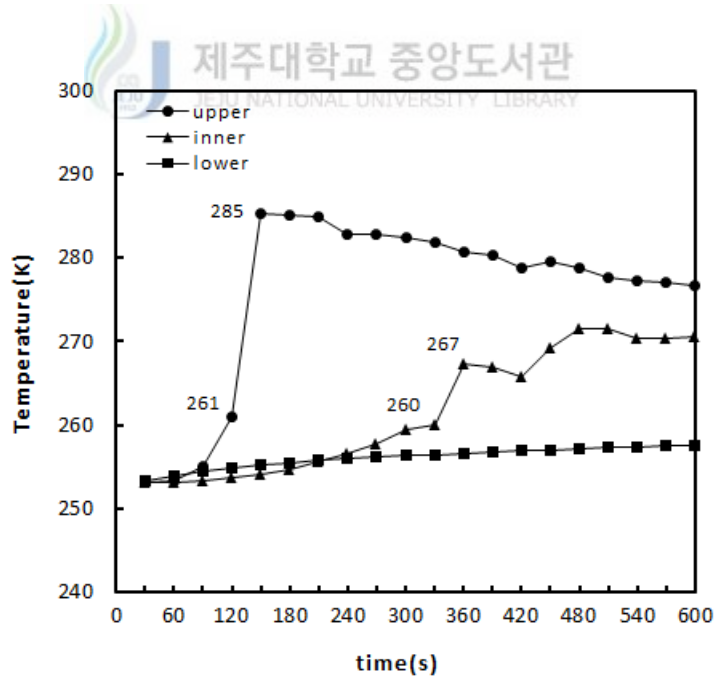


(f) Liquid volume fraction(%) with various flow rate

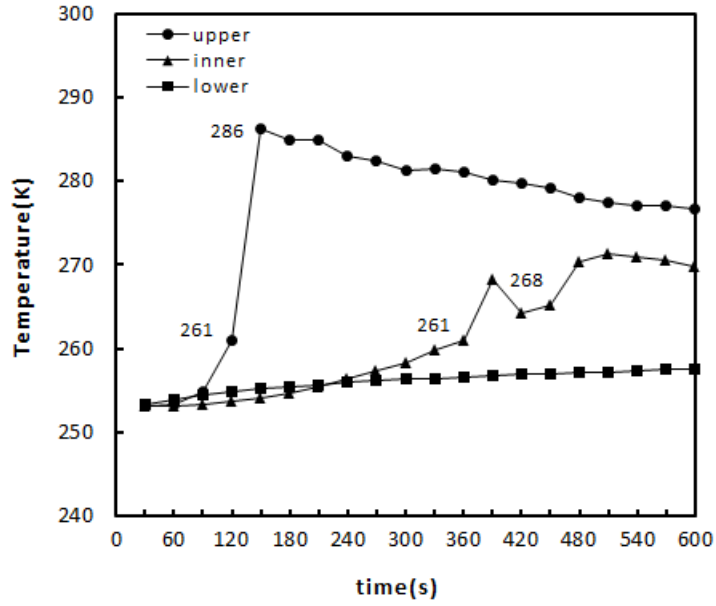
Fig. 33 Melting properties according to coolant flow rate(VC67)
 (Urea solution : -20°C , Coolant : 80°C , 200L/h, 150L/h, 100L/h)



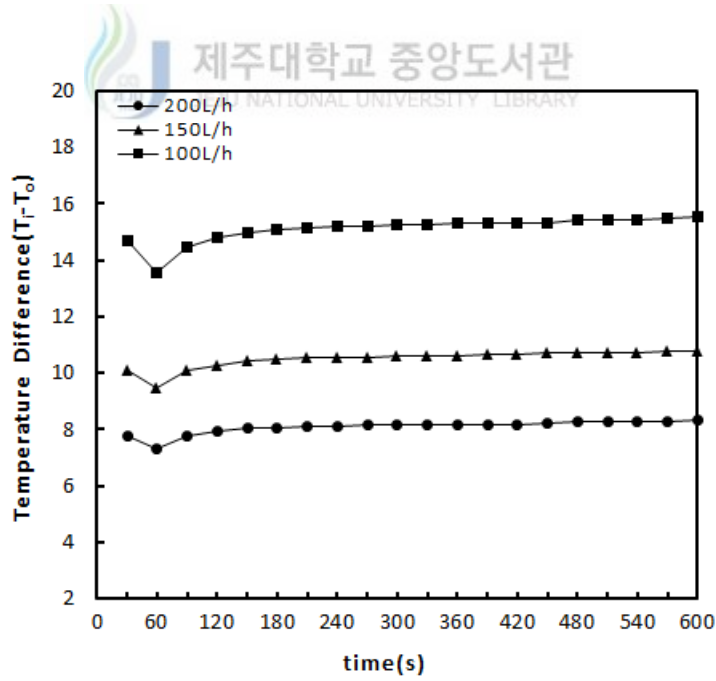
(a) Temperature profiles, coolant flow rate : 200L/h



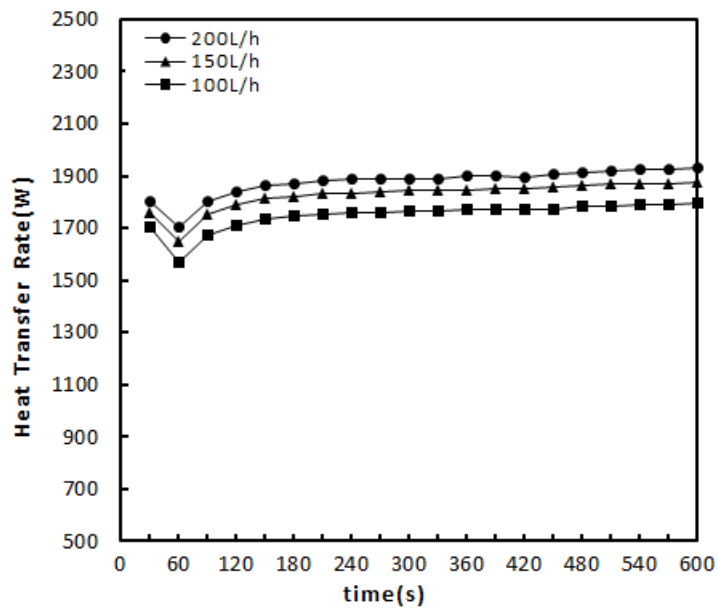
(b) Temperature profiles, coolant flow rate : 150L/h



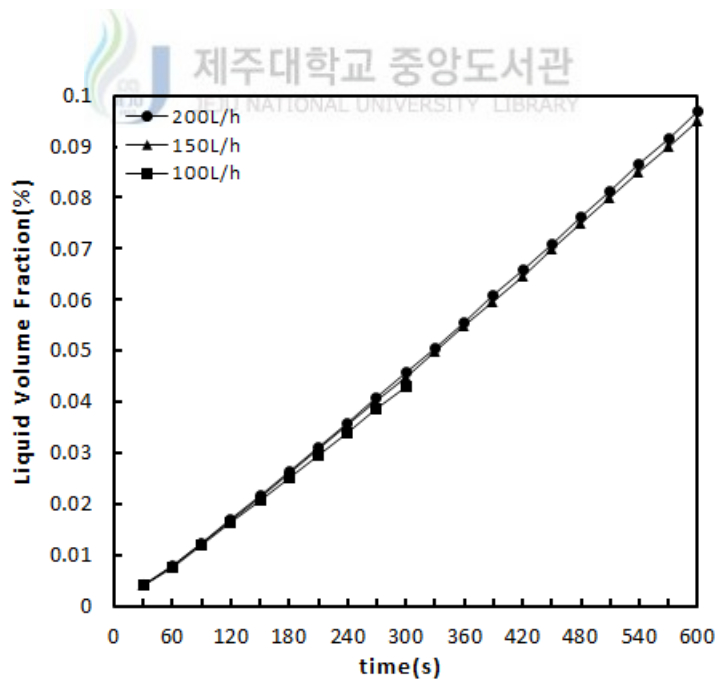
(c) Temperature profiles, coolant flow rate : 100L/h



(d) Temperature difference with various flow rate



(e) Heat transfer rate(W) with various flow rate



(f) Liquid volume fraction(%) with various flow rate

Fig. 34 Melting properties according to coolant flow rate(HC67)
 (Urea solution : -20°C , Coolant : 80°C , 200L/h, 150L/h, 100L/h)

2.2.5 냉각수 순환 파이프의 설치 방법 및 위치가 해동에 미치는 영향

동일한 용량의 가열원이라 할지라도 탱크 내에 장착하는 방법이 수직 혹은 수평방향에 따라 해동 특성이 달라 질 수 있다. 냉각수 순환 파이프의 설치 방법에 따른 해동 특성을 파악하기 위하여 동일한 크기의 요소수 저장 탱크 내에 코일형으로 수직으로 설치한 VC67과 수평으로 설치한 HC67_m을 비교 고찰하였으며, 또한 지그재그 형으로 수직으로 설치한 VZ100과 수평으로 설치한 HZ100_m을 적용하였을 때 해동 성능을 비교하였다. VC67과 HC67_m은 전열 면적이 각각 0.073m^2 과 0.074m^2 이고, VZ100과 HZ100_m의 전열 면적은 0.041m^2 , 0.044m^2 이다. 요소수 저장 탱크 내 48ℓ 의 요소수를 -20°C 로 동결시킨 후, 엔진 내 열원인 냉각수를 80°C , 유량 $200\ell/\text{h}$ 의 동일 조건에서 해동 성능을 비교하였다.

Fig. 35 (a)~(d)는 요소수 저장 탱크 내에 냉각수 순환 파이프 VC67과 VZ100을 저장 탱크 바닥에서 30mm 위쪽 방향으로 수직 설치하였고, HC67_m과 HZ100_m을 요소수 저장 탱크 바닥에서 200mm 위치에 수평 설치하여 해동하는 경우 시간 경과에 따른 냉각수 순환 파이프 입·출구 온도차, 열전달량, 액상 체적 분율(Liquid volume fraction, LVF) 그리고 열전달량 증가율과 LVF 증가율을 비교하여 도시하였다.

Fig. 35 (a)와 (b)는 냉각수 순환 파이프 입구와 출구 온도차와 열전달량을 나타냈다. 동일한 코일 형상으로 전열 면적의 크기가 비슷한 VC67과 HC67_m은 냉각수 입·출구의 온도차가 평균 7°C 로 비슷하게 유지하고 있음을 알 수 있고, 지그재그 형상인 HZ100_m은 평균 4.4°C 로 평균 3.9°C 인 VZ100보다 0.5°C 가 높아 더 많은 양의 열이 전달되고 있음을 알 수 있다.

Fig 35 (c)는 액상 체적 분율(Liquid volume fraction, LVF)을 도시한 것으로 시간이 경과함에 따라 선형적으로 증가하고 있으며, 1L(LVF, 0.02%) 해동량을 얻는 걸리는 시간은 코일형인 VC67, HC67_m은 비슷하게 약 155s 정도가 소요되었고, 지그재그형인 VZ100, HZ100_m은 각각 약 290s, 약 250s 정도가 소요되었다. 또한, 해동 초기 비슷한 경향을 보이다가 시간이 경과할수록 수평으로 설치한 모델의 상승폭이 더 커지고 있다. 이는 수평으로 설치한 경우가 수직으로 설치한 경우보다 자연 대류의 영향을 크게 받아 시간이 경과할수록 더 많은 양의 해동된 요소수를 얻을 수 있음을 의미한다. 따라서 냉각수 순환 파이프 형상

에 관계없이 수평으로 설치하는 것이 해동에 유리할 것으로 판단된다.

Fig. 35 (d)는 같은 시간 경과에서 열전달률 증가율(Incremental Ratio of Heat transfer rate)과 액상 체적 분율 증가율(Incremental Ratio of Liquid volume fraction)을 도시하였다. 전열 면적에 비례하여 증가하는 열전달률이 해동 과정에 얼마나 영향을 주었는지 판단할 수 있는 결과로서 냉각수 순환 파이프의 성능을 평가할 수 있는 중요한 근거가 된다. 즉, 넓은 전열 면적으로 전열량이 크다고 해서 더 많은 해동량을 얻을 수 있는 것이 아니며, 짧은 시간에 더 많은 해동된 요소수를 얻기 위해서는 냉각수 순환 파이프의 최적설계가 필요한 이유이다.

해동 초기에는 열전달 증가율이 액상 체적 분율 증가율보다 높게 나타나고, 지그재그 형은 150s에서, 코일 형은 210s에서부터 액상 체적 분율 증가율이 역전되었다. 이것으로써 수평으로 설치했을 때 시간이 경과할수록 자연 대류의 영향이 점차 증가할 것으로 판단된다.

요소수 저장 탱크 내 냉각수 순환 파이프를 수평으로 설치하는 것이 수직으로 설치하는 것보다 해동에 유리하지만 수평 방향으로 설치했다라도 요소수 저장 탱크의 수직 위치에 따라 해동 특성이 달라질 수 있다. 설치 위치에 따른 해동 특성을 파악하기 위하여 코일 형과 지그재그형의 냉각수 순환 파이프 모델을 요소수 저장 탱크의 바닥에서 30mm, 200mm 위치에 설치하여 고찰하였다.

코일 형은 HC67_m(200mm), HC67_b(30mm)이고, 지그재그 형은 HZ100_m(200mm), HZ100_b(30mm)이다. 전열 면적은 각각 0.074m^2 , 0.084m^2 , 0.044m^2 그리고 0.057m^2 로, 바닥에서 30mm 지점까지 수직 방향의 전열 면적이 증가한 만큼 각 코일 형상에서 HC67_b와 HZ100_b가 크다.

Fig. 36 (a)~(f)는 요소수 저장 탱크 내에 냉각수 순환 파이프를 저장 탱크 바닥에서 30mm와 200mm 위쪽 방향으로 수평 설치하여 해동하는 경우 시간 경과에 따른 냉각수 순환 파이프 입·출구 온도차, 열전달률, 액상 체적 분율(Liquid volume fraction, LVF) 그리고 열전달률 증가율과 LVF 증가율을 비교하여 도시하였다. 요소수 저장 탱크 내 요소수는 -20°C 로 동결되어 있으며 냉각수 순환 유량은 200L/h, 입구 온도는 80°C 로 순환하는 것으로 설정하였다.

Fig. 36 (a)는 코일 중심선에서 위쪽 방향으로 55mm 높은 지점(upper)과 중심선상(inner) 그리고 아래 방향으로 55mm 낮은 지점(lower)의 온도 분포를 나타

내었다. 설치 위치에 관계없이 동일한 온도변화를 보이고 있으며, 해동 순서는 upper, inner, lower 순이다. HC67_m의 upper 지점의 온도는 120s에서 상변화가 이루어지며 약 13℃까지 급격하게 상승하였다가 이후 약 3℃까지 하강하였다. inner 지점의 온도는 코일의 중심으로 약 360s가 경과하여 상변화가 일어나고 있으며, 약 -3℃까지 상승하고 이후 일정한 온도를 유지하고 있다. lower는 코일 하부 외벽에서 아래 방향으로 9mm 떨어진 위치의 온도로서 600s 시간 경과까지 요소수 해동이 거의 일어나고 있지 않음을 알 수 있다. 이는 부력에 의한 자연 대류의 영향으로 해동이 가열원인 냉각수 순환 파이프 주위의 상층부 방향으로 유동과 함께 진행되고 있으며, 하부 방향으로 진행되기 쉽지 않음을 의미한다.

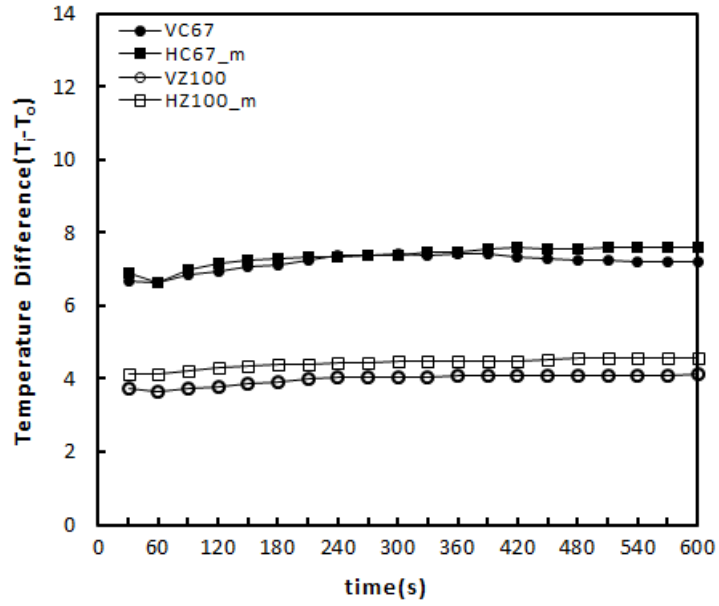
Fig. 36 (b)는 지그재그 형을 수평으로 설치했을 때 요소수 저장 탱크 내 온도 분포를 나타내었다. 코일 중심선에서 위쪽 방향으로 20mm 높은 지점(upper)과 중심선상(inner) 그리고 아래 방향으로 20mm 낮은 지점(lower)의 온도변화이다. 설치 위치에 관계없이 동일한 온도변화를 보이고 있으며, 해동 순서는 inner, upper, lower 순이다. HZ100_m의 inner 지점이 가장 먼저 온도가 상승하고, 약 300s에서 상변화가 이루어지며 약 0℃까지 상승하였다가 이후 약 -3℃까지 하강하였다. 다음으로 upper 지점의 온도가 상승하며 약 390s가 경과하여 상변화가 일어나고 있으며, 약 2℃까지 상승하고 이후 일정한 온도를 유지하고 있다. lower는 코일 하부 외벽에서 아래 방향으로 14mm 떨어진 위치의 온도로서 600s 시간 경과까지 요소수 해동이 거의 일어나고 있지 않음을 알 수 있다. 이는 부력에 의한 자연 대류의 영향으로 해동이 가열원인 냉각수 순환 파이프 주위의 상층부 방향으로 유동과 함께 진행되고 있으며, 하부 방향으로 진행되기 쉽지 않음을 의미한다.

Fig. 36 (c)은 냉각수 입·출구 온도차를 도시한 것으로 저장 탱크 바닥에서 200mm 위쪽 방향으로 수평 설치한 HC67_m, HZ100_m은 각각 평균 7.4℃, 4.5℃ 이고, 바닥에서 30mm 위쪽 방향으로 수평 설치한 HC67_b, HZ100_b는 평균 8.0℃, 5.5℃를 꾸준히 유지하고 있다. Fig. 36 (d)는 온도가 경과함에 따른 열전달량(W)을 도시한 것으로 온도차에 따른 변화와 동일한 변화를 보이고 있다.

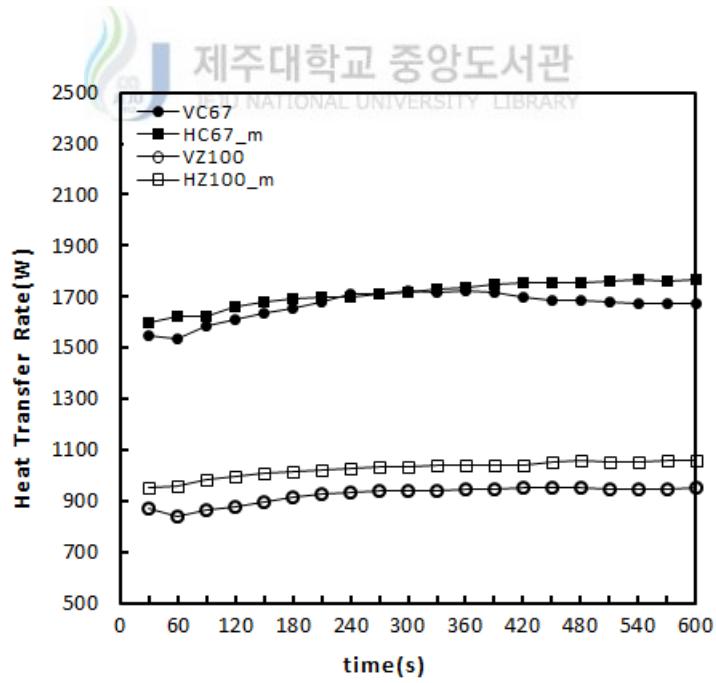
Fig. 36 (e)는 시간 경과에 따른 액상 체적 분율(Liquid volume fraction, LVF)을 도시한 것으로서 모든 모델이 시간 경과에 따라 선형적으로 증가하고 있으며,

1L(LVF, 0.02%) 해동량을 얻는 걸리는 시간은 HC67_m, HZ100_m은 각각 약 155s, 250s 정도가 소요되었고, HC67_b, HZ100_b는 각각 약 140s, 205s 정도가 소요되어 하부에 설치하는 것이 해동에 유리하게 작용하고 있음을 알 수 있고, 시간이 경과할수록 더 차이가 생길 것으로 판단된다. 또한, 해동을 위해서는 요소수 저장 탱크 바닥의 동결된 요소수도 해동시켜야 하기 때문에 바닥 쪽으로 설치하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

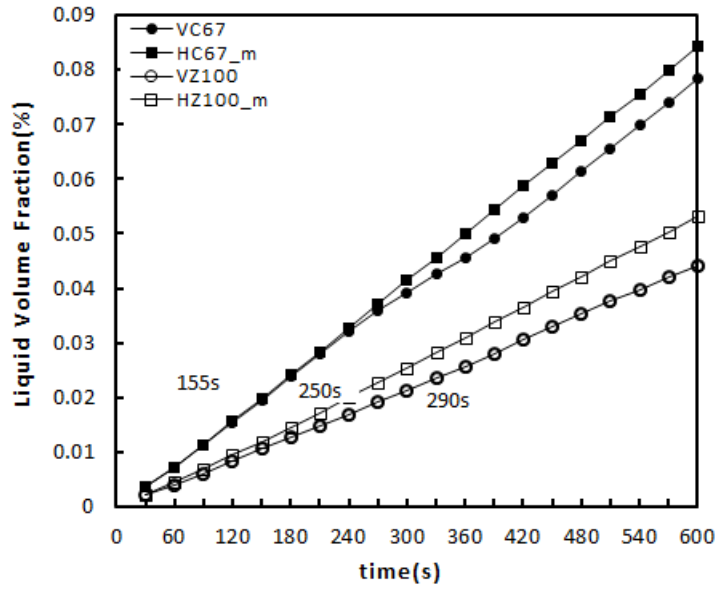




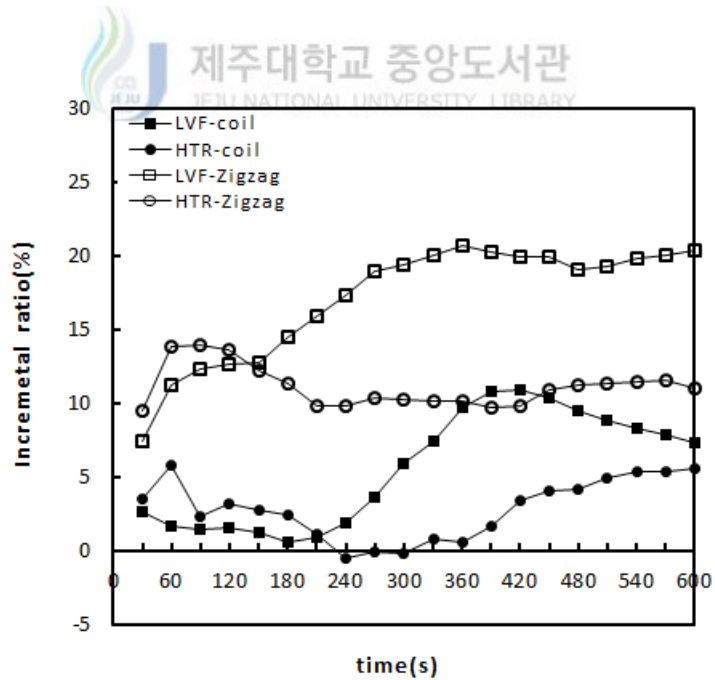
(a) Temperature difference between inlet and outlet



(b) Heat transfer rate(W)

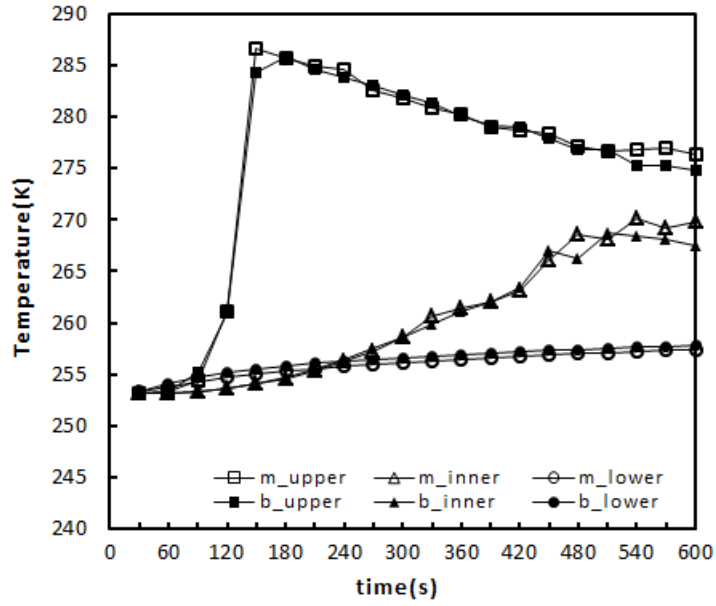


(c) Liquid volume fraction(%)

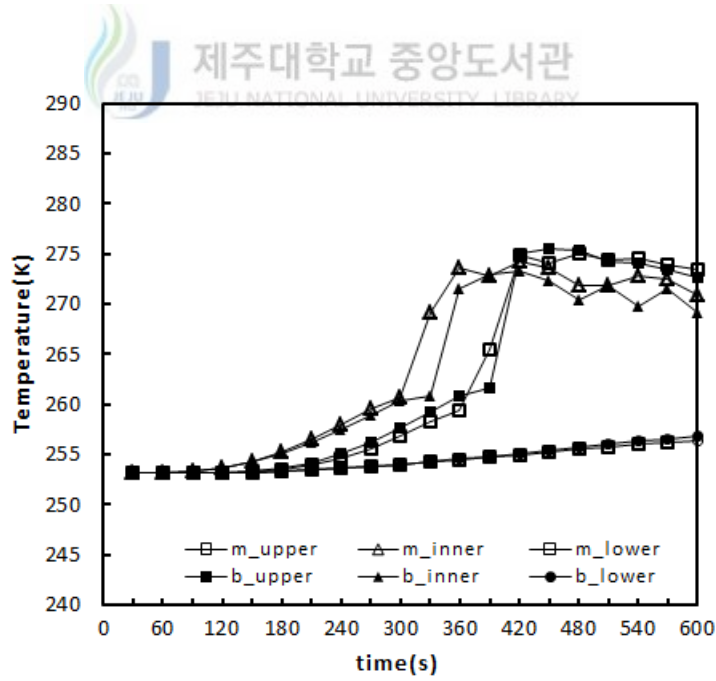


(d) Incremental ratio

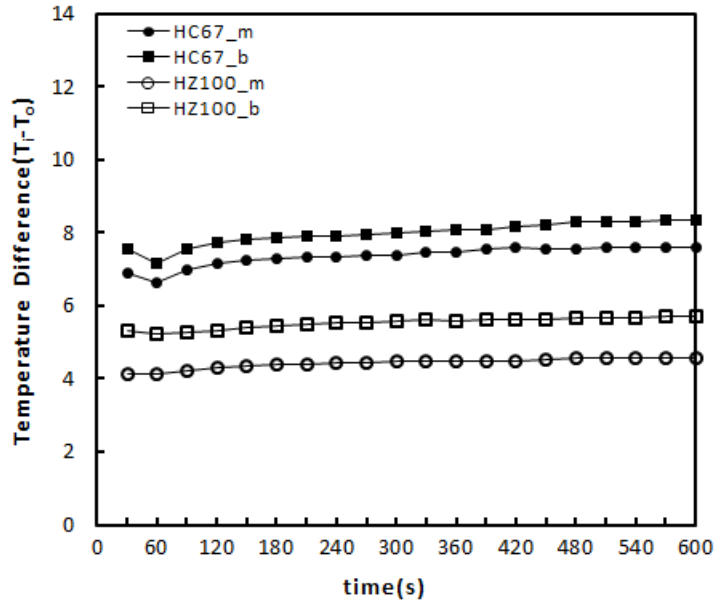
Fig. 35 Melting properties according to installation Vertical, Horizontal
(Urea solution : -20°C , Coolant : 80°C , 200L/h)



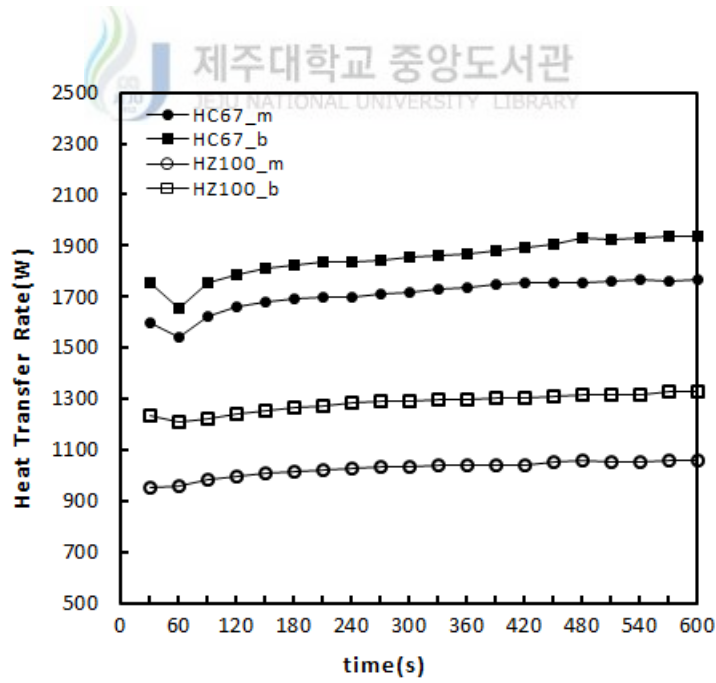
(a) Temperature profiles with HC67_m and HC67_b



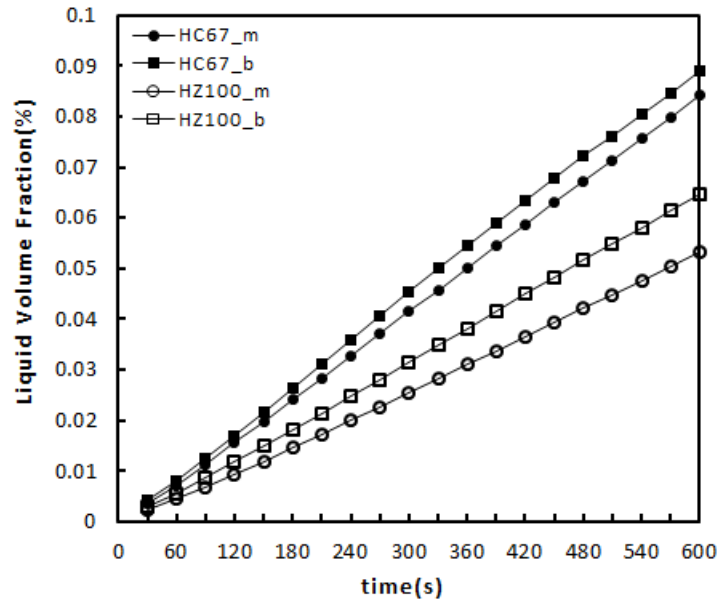
(b) Temperature profiles with HZ100_m and HZ100_b



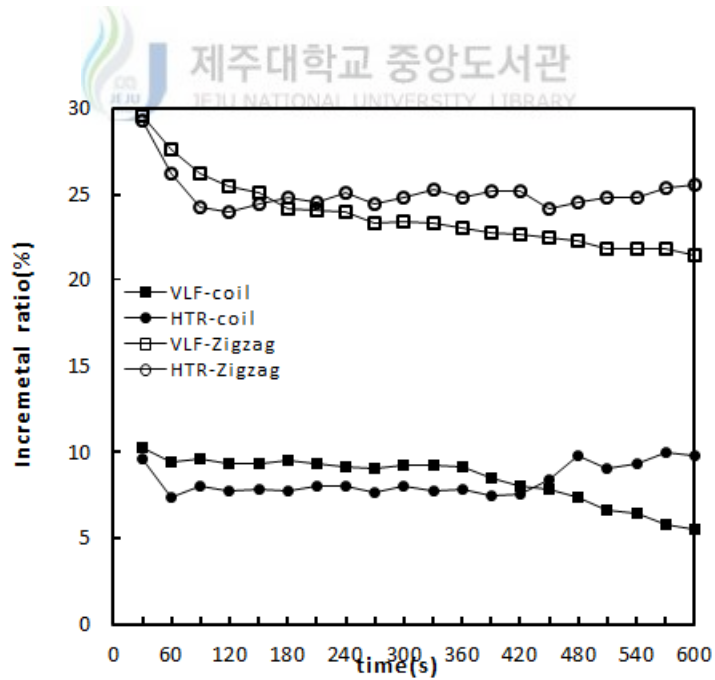
(c) Temperature difference



(d) Heat transfer rate(W)



(e) Liquid volume fraction(%)



(f) Incremental ratio

Fig. 36 Melting properties according to position 200mm, 30mm
(Conditions, Urea solution : -20°C , Coolant : 80°C , 200L/h)

V. 결론

본 연구에서는 우선, 수치 해석 방법을 검증하기 위하여 사각형 캐비티 내의 순수 갈륨의 용융 현상을 수치 해석하여 Gau & Viskanta가 수행한 실험 결과와 잘 일치하고 있음을 확인하였다.

다음으로, Urea-SCR 시스템에 사용하는 요소수인 32.5wt% AdBlue™에 대한 3차원 비정상 상태의 전산해석을 수행하여 저장 탱크 내 요소수의 동결 현상에 대한 열전달 특성을 고찰하였다. 그리고 요소수 저장 탱크 내 동결된 요소수를 해동시키기 위한 가열원으로 냉각수 순환 방식을 이용하였고, 냉각수 순환 파이프의 형상, 면적, 유량 및 설치방법 및 위치가 해동에 미치는 영향을 가열 시간 경과에 따른 저장 탱크 내 온도 분포 변화, 열전달량 그리고 액상 체적 분율 (Liquid volume fraction)을 이용하여 고찰하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.



- 요소수 저장 탱크 내 동결된 요소수는 냉각수 순환 파이프의 온도가 먼저 상승한 후, 시간이 지남에 따라 순환 파이프 주변으로 온도가 상승하는 영역이 점차 확장되고 있음을 확인하였다. 가열 초기에는 상대적으로 뜨거운 냉각수가 순환하며 해동이 냉각수 순환 파이프 주변에서 동일하게 진행되는 것으로 보아 열전도가 주로 해동에 영향을 미치는 것으로 판단되지만, 고상에서 액상으로 바뀌는 영역이 증가함에 따라 열전도보다는 상대적으로 자연 대류가 해동에 더 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 그리고 부력에 의한 자연 대류 열전달의 효과로 상층부와 코일이 집중되어 있는 부분에서 더 많은 양의 요소수가 해동되는 것을 확인할 수 있었다.
- 냉각수 순환 파이프 형상에 따른 해동 특성을 살펴보면, 해동 과정은 코일 형과 지그재그 형에서 유사하게 진행되지만 지그재그 형보다는 전열 면적

에 대한 제약을 덜 받는 코일 형이 요소수 저장 탱크 내 동결된 요소수를 해동시키는데 유리하다.

- 냉각수 순환 파이프의 전열 면적이 증가할수록 해동 성능이 향상되었다. 또한, 코일 형이 경우 피치간 거리와 냉각수 입구와 출구 사이의 거리도 해동에 영향을 줄 것으로 판단되며, 따라서 해동 성능을 향상시키기 위해서는 냉각수 순환 파이프 최적설계가 필요하다.
- 순환 유량이 적을수록 입구와 출구 온도차가 크고, 냉각수 유량이 클수록 동결된 요소수에 전달되는 전열량은 높게 나타났다. 이것은 유량이 적을수록 낮은 유속으로 냉각수 순환 파이프 내에서 체류하는 시간이 길어지기 때문에 입구와 출구 온도차가 큰 것이며, 유량이 많을수록 동일 시간 동안에 동결된 요소수로 전달되는 단위 시간당 총열량은 커진다. 하지만 순환유량에 따른 해동성능은 예상했던 결과와 다르게 미비하였다. 이는 사용된 냉각수 순환 파이프의 형상이 단순했기 때문에 생긴 결과이며, 순환유량에 따라 향상된 해동 성능을 얻기 위해서는 유동 경로가 보다 길고 복잡한 형상이어야 된다고 판단된다.
- 설치 방법에 따른 해동 특성을 살펴보면 냉각수 순환 파이프를 수평방향으로 설치한 것이 수직방향으로 설치하는 것보다 해동이 활발하게 이루어지고 있음을 확인하였다. 또한, 수평방향으로 설치하더라도 설치 위치에 따라 해동 특성이 달라질 수 있을 것으로 판단된다. 시간이 흐를수록 해동은 가열원에서 상부 방향으로 활발하게 진행되지만 하부 방향으로 거의 이루어지고 있지 않다. 이는 액상으로 바뀐 요소수가 온도 상승에 의한 밀도 변화로 부력이 발생하면서 상부 방향으로 지속적으로 유동이 이루어지고 있기 때문이다. 따라서 Urea-SCR 시스템의 요소수 저장 탱크에 가열원을 장착할 경우, 수평방향으로 바닥에 근접하여 설치하는 것이 효과적인 해동 방법이라는 것을 알 수 있다.

- 요소수 저장 탱크의 전체 체적에서 해동된 액상 요소수가 차지하는 체적비를 나타내는 액상 체적 분율(Liquid volume fraction, %)은 선형적으로 증가하고 코일 형이 지그재그 형 보다, 수직방향보다 수평방향으로 설치하는 것이, 그리고 저장탱크 바닥에서 근접한 위치에 설치하는 것이 증가 기울기가 크고, 시간이 경과할수록 차이는 더 커질 것으로 판단된다. 이는 해동량이 많아질수록 액상에 의한 자연 대류 열전달이 활발해진 이유이다.

참고문헌

- [1] 김무근, "밀도차와 자연 대류를 고려한 수직 원관 주위에서의 빙축열과정 해석", 서울대학교 대학원 기계공학과, 박사학위논문, 1991.
- [2] 정기호, "유한체적법을 이용한 자연대류 현상과 상변화 과정의 수치적 해석", 부산대학교 대학원 항공우주공학과, 박사학위논문, 2003.
- [3] 이승엽, "냉각수 및 전기히터를 이용한 요소수의 동결 및 해동 현상에 따른 열전달 특성에 관한 수치적 연구", 석사학위논문, 2012.
- [4] Yun, B., Kim, C., Kim, M. Y., Cho, G., Kim, H., and Jeong, Y., "Numerical Modeling of Vandia-based Commercial Urea-SCR plus Aftertreatment System", Trans. of the KSAF, Vol. 18, No. 2, pp.24~30, 2010.
- [5] Jeong, S. J. and Lee, C. H., "A Study on the Injection Characteristics of Urea Solution to Improve DeNO_x Performance of Urea-SCR Catalyst in a Heavy Duty Diesel Engine", Trans. of the KSAE, Vol. 16, no. 4, pp.163~172, 2008.
- [6] "AdBlue", BASF, 2006. manual.
- [7] Shamsundar, N. and Sparrow, E. M., "Analysis of Multidimensional Conduction Phase Change Via Enthalpy Model", Journal of Heat Transfer, pp.333-340, 1975.
- [8] Crowley, A. B., "Numerical Solution of Stefan Problem", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 21, pp.215-219, 1978.
- [9] Tacke, K. H., "Discretization of the Explicit Enthalpy Method for Planar Phase Change", Int. J. for Numerical Methods in Eng., Vol. 21, pp.543-554, 1985.

- [10] V. R. Voller, and M. Cross, "An Explicit Numerical Method to Track a Moving Phase Change Front", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 26, No. 1, pp.147-150, 1983.
- [11] Voller, V. R. and Prankash, C., "A fixed grid numerical modeling methodology for convection/diffusion mushy region phase change problem", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 30, pp.1709~1719, 1987.
- [12] Brent, A. D., Voller, V. R., and Reid, K. J., "The Enthalpy Porosity Technique for Modeling Convection Diffusion Phase Change: Application to the melting of a pure-metal", *Numerical Heat Transfer*, Vol.13, No.1, pp.295~318, 1988.
- [13] Voller, V. R., "Fast implicit finite-difference method for the analysis of phase change problems", *Numerical Heat Transfer, Part B*, Vol. 17, pp.155~169, 1990.
- [14] Lacrox, M. and Voller, V.R., "Finite difference solution of solidification phase change problem: transformed versus fixed grids", *Numerical Heat Transfer, Part B*, Vol. 7, pp.25-41, 1990.
- [15] Voller, V. R., Swaminathan, C. R. and Thomas, B. G., "Fixed Grid Techniques for Phase Change Problem : A Review", *Int. J. for Numerical Methods in Eng.*, Vol. 30, pp.875-898, 1990.
- [16] Swaminathan, C. R. and voller, V. R., "A General Enthalpy Method for Modeling Solidification Processes", *Transactions of Metallurgical(B)*, Vol. 23, pp.651-664, 1992.
- [17] V. R. Voller, and S. Peng, " An Enthalpy Formulation Based on an Arbitrarily Deforming Mesh for Solution of the Stefan Problem", *Computational Mechanics*, Vol. 14, pp.492-502, 1994.

- [18] Poots, G., "An Approximate Treatment of a Heat Conduction Problem Involving a Two-Dimensional Solidification Front", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 5, pp.339-348, 1962.
- [19] C. Bonacina and G. Comini, A. Fasano, and M. Primicerio, "Numerical Solution of Phase-Change Problems", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 16. pp.1825-1832, 1973.
- [20] Hsiao, J. N., "An Efficient Algorithm for Finite Difference Analysis of Heat Transfer with Melting and Solidification", *Numerical Heat Transfer*, Vol. 8, pp.653-666, 1985
- [21] Sampath, R. and Zabarar, N., "An Object Oriented Implementation of a Front Tracking Finite Element Method for Directional Solidification Process", *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol .44, pp.1227~1265, 1999.
- [22] Gong, Z. W. and Mujumder, A. S., "A Finite Element Model for Convection-Dominated Melting and Solidification Problems", *Int. J. Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*, Vol. 8, No. 4, pp.393~408, 1998.
- [23] Sparrow, E. M., Schuidt, R. R. and Ramsey, J. M., "Experiment on the Role of Natural Convection in the Melting of Solids", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 100, pp.11~16, 1978.
- [24] Salcudean, M. and Adbullah, Z., "On the Numerical Modeling of Heat Transfer during Solidification Processes", *Int. J. for Numerical Methods in Eng.*, Vol. 25, pp.445-473, 1988.
- [25] Cao, Y., Faghri, A., and Chang, W. S., "A Numerical Analysis of Stefan Problem for Generalized Multi Dimentional Phase Change Structures Using the Enthalpy Transforming Model", *Int. J. of Heat and Mass*

- Transfer, Vol. 25, pp.545-556, 1989.
- [26] Hale, N. W. and Viskanta, R., "Solid-Liquid Phase Change Heat Transfer and Interface Motion in Material Cooled or Heated from Above or Below", Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 23, pp.283-292, 1980.
- [27] Gau, C. and Viskanta, R., "Melting and Solidification of a Pure Metal on a Vertical Wall", Journal of Heat Transfer, Vol. 108, pp.174-181, 1986.
- [28] Cerimele, M. M., Mansutti, D., and Pistella, F., "Numerical Modeling of Liquid Solid Phase Transitions Analysis of a Gallium Melting Test", Computer and Fluids, Vol. 31, pp.437-451, 2002.
- [29] 유효선, 노승탁, "좌표변환에 의한 상변화 과정의 수치해석", 대한기계학회논문집, 제10권, 제4호, pp.585~592, 1986.
- [30] 이채문, 임장순, "상변화 물질을 이용한 축열조에서 열전달 현상에 관한 연구", 한국태양에너지학회논문집, Vol. 12, No. 2, pp.53~64, 1993.
- [31] 유재석, "용기를 고려한 응고과정의 열전달 해석", 설비공학논문집, 제17권 제4호, pp.377~381, 1988.
- [32] 강관구, 외2인, "수정된 PISO 알고리즘을 이용한 응고 및 용해 현상의 수치해석", 한국전산유체공학회지, 제8권 제3호, pp.12~19, 2003.
- [33] 김학구, 외4인, "일정 열유속 조건의 관형 히터에 의한 해빙과정의 수치해석", 설비공학논문집, 제19권 제6호, pp.434~440, 2007.
- [34] B. C. Choi, C. K. Seo, and K. J. Myong, "Freezing and Melting Phenomena of Urea-water Solution for Diesel Vehicle SCR System", KSPSE, Vol. 13, No. 4, pp.5-10, 2009.
- [35] Kobus, C. J. and Wedekind, J. L., "An experimental investigation into natural convection heat transfer from horizontal isothermal circular

- disks", Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 44, pp.3381~3384, 2001.
- [36] Wenxian and Armfield, S. W., "Direct simulation of natural convection cooling in a vertical circular cylinder", Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 22, pp.4117~4130, 1999.
- [37] Gehart, B. "Natural Convection Flow, Instability, and Transition" ASME, pp.69~89, 1969.
- [38] Eckert, E. R. G. and E. Soehngen, "Interferometric Studies on the Stability and Transition to Turbulence of a Free Convection Boundary Layer", Proc. Gen. Discuss. Heat Transfer ASME-IME, 1951
- [39] Lewandowski, W. M., Szymanski, S., Kubski, P., Radziemski, E., Bieszk, H. and Wilczewski, T., "Natural convection heat transfer from isothermal conic", Int. J. of Heat Transfer and Mass Transfer, Vol. 42, pp.1895~1907, 1999.
- [40] Ramaswamy, B. and Moreno, R., "Numerical study of three-dimensional incompressible thermal flows in complex geometries", Int. J. for Numerical methods for Heat & Fluid flow, Vol. 7, No. 4, pp.297~343, 1997.
- [41] Mayne, D. A., Usmani, A. S. and Crapper M., "H-adaptive finite element solution of high Rayleigh number thermally driven cavity problem", Int. J. for Numerical Methods for Heat & Fluid flow, Vol. 10, No. 6, pp.598~615, 2000.
- [42] 고상근, "정사각형 밀폐공간내의 비정상 자연대류에 관한 연구", 서울대학교 기계공학과, 박사학위논문, 1987.
- [43] 유호선, "밀도차 및 자연대류를 고려한 상변화과정 해석", 서울대학교 대학원 기계공학과, 박사학위논문, 1985.

- [44] Faghri, A., and Zhang, Y., Transport Phenomena in Multiphase Systems. ACADEMIC PRESS, 2006.
- [45] Patankar, S. V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Mcgraw-Hill, New York, 1980
- [46] John, B., "Internal Combustion Engine Fundamentals", Mcgraw-Hill Book company, 2005.
- [47] Stefan aus der wies, "Numerical heat transfer and thermal engineering of AdBlue(SCR) tanks for combustion engine emission reduction", Applied Thermal Engineering, Vol. 27. pp.1790~1798, 2007.
- [48] Manfred Koebel, Ernst Olav Strutz, "Thermal and Hydrolytic Decomposition of Urea for Automotive Selective Catalytic Reduction System: Thermochemical and Practical Aspects", Ind. Eng. Chem. Res., 42, pp.2093~2100, 2003.



요 약 문

물질의 상변화 문제(Phase change problem)는 비정상 열전달 문제 및 2상 유동의 한 분야로서, 학문적인 연구뿐만 아니라 여러 산업 분야에서 관심의 대상이 되어 왔다. 하지만, 문제의 복잡성으로 인하여 근사 또는 단순화된 형태로 해석하여 이용하고 있으며, 아직 해결해야 할 중요한 문제로 남아있다.

본 논문에서는 고상(Solid phase)과 액상(Liquid phase) 사이의 상변화 문제를 해석하는 데 있어 수치 해석적 방법을 사용하였다. 수치해석 프로그램을 이용하여 2차원 상변화 문제를 검증함과 동시에 계산 대상의 상변화 과정과 자연 대류 현상을 자세하게 고찰하고, 또한 3차원 상변화 문제로서 디젤 자동차의 NO_x를 저감시킬 수 있는 유망한 방법 중 하나인 Urea-SCR 시스템에서 자연 대류 영향을 고려한 요소수 수용액의 동결 및 해동 현상에 대하여 수치해석 하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

2차원 비정상 상태인 사각형 캐비티 내 순수 갈륨의 용융 현상에 대한 수치해석에서 기존 실험 결과와 비교적 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었으며, 따라서 본 연구에서 사용된 수치해석 방법은 순수물질의 응고와 용융 문제를 해결하는데 유용하게 사용될 수 있다.

NO_x 저감을 위해 H/D(Heavy duty) 디젤 차량에 장착된 Urea-SCR 시스템은 동절기 -20℃ 이하로 내려가는 혹한지역에서 요소수가 동결되는 문제를 해결하기 위해서는 별도의 해동장치가 필요하다. 본 연구에서는 동결된 요소수로부터 냉시동 초기에 필요한 액상 요소수를 안정적으로 공급하기 위한 해동방법으로 냉각수 순환 가열 방식을 사용하여 요소수 저장 탱크 내 요소수의 해동 현상에 관하여 수치해석 하였다.

짧은 시간에 많은 액상 요소수를 확보하기 위해서는 가열원인 냉각수 순환 과

이프의 최적 설계가 필요하며 전열면적은 클수록, 형상은 지그재그 형 보다 코일 형이 해동 성능 향상에 유리하였다. 또한, 냉각수 순환 파이프를 수평방향으로 저장 탱크 바닥에 가까운 위치에 설치하는 것이 유리하였다.

하지만 냉각수 순환 유량이 해동 성능에 미친 영향은 미비하였다. 이는 예상했던 결과와 다른 것으로써 사용된 냉각수 순환 파이프의 형상이 단순했기 때문에 생긴 결과이며, 냉각수 순환 유량 증가에 따라 향상된 해동 성능을 얻기 위해서는 유동 경로가 길고 복잡한 형상이어야 된다고 판단된다.



감사의 글

이 논문이 있기까지 많은 분들의 도움이 있었으며, 그 고마움과 은혜는 항상 마음속에 깊이 간직하겠습니다.

우선, 늘 가까이에서 아낌없는 관심과 배려로 지도해 주신 허종철 교수님께 깊은 존경과 감사의 말씀을 드립니다. 바쁘신 가운데도 심사위원을 맡아주신 현명택 교수님, 강창남 교수님 그리고 인하대학교 김주형 교수님께 감사드립니다. 또한 대학원 과정 내내 도움을 주신 제주대학교 기계공학과 교수님들과 어려운 상황에서 항상 동고동락해주시는 제주국제대학교 교수님들께도 진심으로 감사드립니다. 특히 논문을 준비하는 과정 중에는 물론 평소에도 세심한 조언과 격려를 아끼지 않으셨던 박윤철 교수님, 김남진 교수님, 김근형 교수님께 나의 존경과 신의를 드립니다. 어릴 적부터 有朋自遠方來 不亦樂乎하며 함께 살아온 형제이며 벗인 전북대학교 김만영 교수님께 진심으로 고마움을 전합니다.

아울러 유체 연구실에서 보내는 동안 도움을 주신 고경남 교수님, 김경보 박사님, 연구실의 모든 후배들과 전북대학교 추진·연소 연구실의 이승엽, 안태현 선생에게도 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 지금까지 저를 지켜봐주시고 도와주신 모든 분들께 감사드립니다.

오늘의 제가 있기까지 한결같은 애정으로 보살펴주시는 부모님과 장모님께 머리 숙여 감사드리며 이 작은 결실의 기쁨이 평생 함께 하시길 바랍니다. 즐거울 때나 어려울 때 함께 하는 형과 형수님, 누나와 매형들, 동생과 매제 그리고 처남과 처형 가족에게도 그동안의 미안함과 함께 진심으로 감사드립니다. 그리고 사랑하는 조카들에게도 사랑을 전합니다.

끝으로 논문을 준비하는 동안 자신감을 잃지 않도록 믿음과 사랑으로 위로해 주고 어려움을 곳곳이 견뎌내 준 사랑하는 아내 은정, 딸 지현, 서형, 민혜에게 변함없는 사랑으로 이 논문을 드립니다.

2015 년 1월

박윤범 올림