

연료전지 자동차의 물탱크 해빙과정에 대한 수치해석적 연구

김 학 구, 정 시 영[†], 허 남 건^{*}, 임 태 원^{**}, 박 용 선^{**}

서강대학교 대학원, ^{*}서강대학교 기계공학과, ^{**}현대자동차 연료전지자동차 개발팀

Numerical analysis of melting process in a water tank for fuel-cell vehicles

Hark-koo Kim, Siyoung Jeong[†], Nahmkeon Hur^{*}, Taewon Lim^{**}, Yong-Sun Park^{**}

Graduate school, Sogang University, Seoul 121-742, Korea

^{*}Department of Mechanical Engineering, Sogang University, Seoul 121-742, Korea

^{**}Corporate Research & Development Division, Hyundai-Kia Motors, Yongin 446-912, Korea

ABSTRACT: Good cold start characteristics are essential for satisfactory operation of fuel cell vehicles. In this study, the melting process has been numerically investigated for a water tank frozen in cold weather. The 2-D model of the tank containing ice and plate heaters was assumed and the unsteady melting process of the ice was calculated. The enthalpy method was used for the description of the melting process, and a FVM code was used to solve the problem. The feasibility study compared with other experiment showed that the developed program was able to describe the melting process well. From the numerical analysis carried out for different wall temperatures of the pate heaters, some important design factors could be found such as local overheating and pressurization in the tank.

Key words: Melting(용해), Enthalpy method(엔탈피 방법), Phase change(상변화), Liquid fraction(액상분율), Fuel-cell(연료전지)

———— 기 호 설 명 ————	
h : 엔탈피 [kJ/kg]	
C : 비열 [kJ/kgK]	
f_s : 고상 분율	
f_l : 액상 분율	
L : 용해 잠열 [kJ/kg]	
T_m : 녹는점 [°C]	
V : 부피 [m^3]	

P : 압력 [kPa]
S : 표면적 [m^2]

그리스 문자

α : 열확산 계수
ρ : 밀도
μ : 점성계수

하첨자

l : 액체
s : 고체

†Corresponding author
Tel.: +82-2-705-8633; fax: +82-2-712-0799
E-mail address: syjeong@sogang.ac.kr

1. 서론

연료전지 자동차의 상용화와 보급 활성화를 위해서는 냉시동성을 개선하는 것이 필수적이다. 냉시동에 있어서 중요한 점은 신속성과 에너지 효율성인데 연료전지 자동차의 냉시동성에 관련된 중요한 것 중 하나가 동절기의 물탱크 해빙 기술이다.

현재 연료전지 자동차에서는 증류수를 수소 및 공기의 가습에 사용하고 또한 연료전지 스택의 냉각수로 사용한다. 이러한 경우, 동절기에 주변 온도가 영하로 내려가면 시스템이 정지되어있는 상태에서는 가습수와 냉각수를 저장하는 물탱크 안의 물이 얼게 되어 시동이 불가능해진다. 많은 연구자들이 연료전지 자동차의 냉시동(cold start) 성능을 개선하기 위하여 노력하고 있지만 아직 효율적이고 신뢰성 있는 방안이 확보되지 못한 상태이며 이에 대한 연구가 절실히 요구되고 있다.

현재 사용되고 있는 일반적인 물탱크 해빙시스템은 시동 시에 물탱크 내에 내장되어 있는 전기 히터를 가열하여 얼음을 녹이는 방식이다. 전기 히터가 가열되면 주변의 얼음이 용해되기 시작한다. 얼음은 열전도도가 높지 않으므로 물탱크와 히터의 설계가 부적절하게 되어 있는 경우, 용해 과정에서 물의 온도가 증가하여 탱크에 압력이 과도하게 가해질 염려가 있다. 특히 연료전지 자동차의 물탱크 해빙은 3~5분 이내에 상당히 급격한 상태변화가 이루어지므로 부분적인 과열의 염려가 크다.

이러한 배경에서 본 논문에서는 일정한 벽면 온도를 갖는 판형 전기히터가 장착된 물탱크에 대하여 해빙과정의 특성 및 시스템에 필요한 설계 변수를 수치해석을 통해 제시하고자 한다.

2. 해빙 과정의 수치해석 방법

2.1 물탱크 해석 모델

본 연구에서는 Fig.1과 같이 단열재가 부착된 직육면체의 금속용기 내부에 다수의 판형 히터가 설치된 물탱크를 가정하여 해석을 수행하였다.

히터는 물에 잠겨 있는 형태를 지니고 있으며, 해석모델은 물탱크와 단열재 등을 제외한 전기

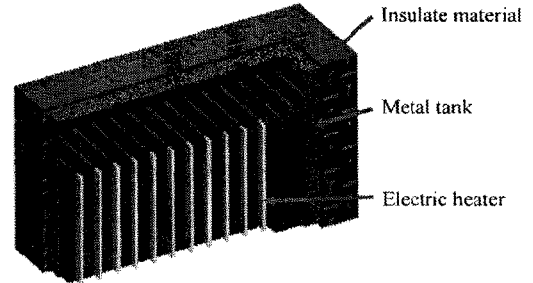


Fig.1 Shape of a water tank

히터와 얼음만 존재하고, 단열이 잘 이루어진 일정한 공간 내에서 용해가 일어난다는 가정 하에 이루어졌다.

2.2 수치해석 방법

상변화 문제를 해석하는 방법은 이동 격자계와 고정 격자계로 나눌 수 있는데 본 연구에서는 고정 격자계를 이용한 엔탈피 방법을 이용하였다 [1-5]. 이 방법은 잠열의 효과를 통해 상경계에서의 열 흐름을 고려할 수 있고, 그 위치는 액상 분율 등의 형태로 결정할 수 있다. 고정 격자계의 장점은 상경계의 형상이 복잡한 경우에도 용이하고, 그 위치를 추적할 필요가 없어서 격자의 재생성도 필요하지 않다는 것이다. 또한 액체와 고체 모두 같은 지배 방정식을 사용하기 때문에 프로그램에 적용하기도 비교적 쉬운 편이다.

Solver는 현재 서강대에서 개발 중인 Turbo-3D[6]를 사용하였고, 선처리와 후처리는 Star-CD[7]를 이용하여 수행하였다. Turbo-3D는 일반비직교 좌표계를 사용하는 3차원 전산유체역학 프로그램으로 3D Body Fitted Coordinate를 사용하는 Navier-Stokes 방정식 해석 프로그램이다. 엔탈피 방법을 Turbo-3D에 적용한 알고리즘이 Fig.2에 나타나 있다.

사용된 연속방정식과 운동방정식, 그리고 에너지 방정식은 식(1), (2), 식(3)과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho V)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V V) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla V) + S_V + \rho B \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V h) = \nabla \cdot \left(\frac{k}{C_l} \nabla h \right) + \frac{C_l - C_s}{C_l} \frac{\partial}{\partial t} (f_s \rho h) + L \frac{\partial}{\partial t} (f_s \rho) \quad (3)$$

윗 식에서 사용된 종속 변수로 ρ 는 밀도, V 는 속도 벡터, p 는 압력, h 는 엔탈피, S_V 는 속도의 생성 항이고, B 는 체적력으로 본 연구의 경우 부항력을 나타낸다. 여기서 사용된 μ 는 점성계수, C_l 은 유체의 비열, C_s 는 고체의 비열, L 은 잠열이고, f_s 와 f_l 은 각각 미소체적에서의 고체와 액체의 체적분을 나타낸다. 위에 열거한 물성치는 온도 변화에 관계없이 일정한 것으로 가정하였으나, 부력에 의한 자연대류 영향의 계산을 위하여 밀도를 온도만의 함수로 가정하는 Boussinesque approximation을 이용하였다.

고정격자계 방법에 의한 상변화 계산시 가장

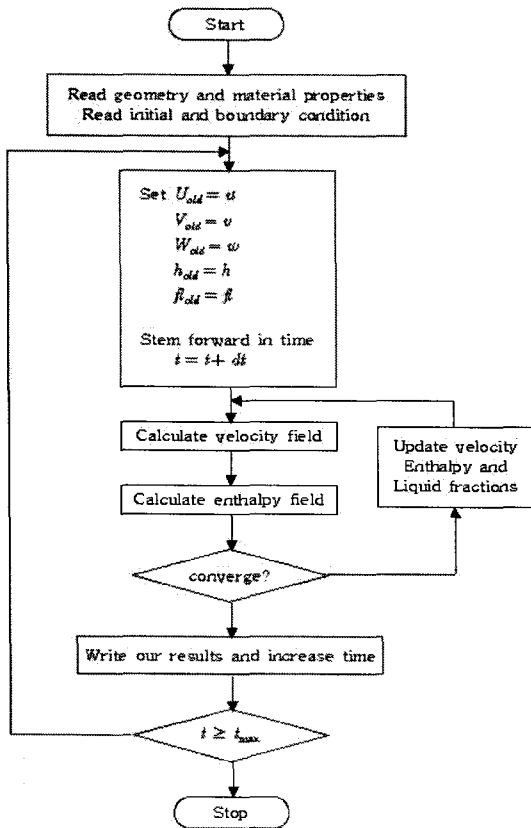


Fig.2 Flow chart of the enthalpy method applied

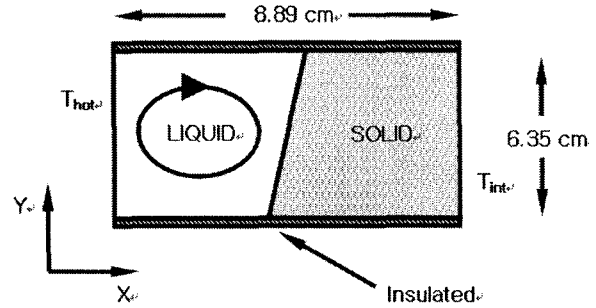


Fig.3 Problem domain after onset of melting

핵심적인 내용은 미소체적내의 액상과 고상의 체적분을 f_l 의 변화량 계산으로서, 이는 현열 (sensible enthalpy)의 전달에 의하여 시간 t 에서의 $(f_l)_k$ 가 $t + \Delta t$ 에서의 $(f_l)_{k+1}$ 로 변화하는 양을 계산하는 것이다. Voller에 의해 제시된 New source scheme을 수정하여 본 연구에서는 식(4)으로 표시된다.

$$(f_l)_{k+1} = (f_l)_k + \frac{\sum_m a_m h_m + (a_p h_p)_k}{\rho L \delta V} \Delta t \quad (4)$$

$$\begin{cases} \text{if } (f_l)_{k+1} < 0, f_l = 0 \\ \text{if } (f_l)_{k+1} > 1, f_l = 1 \end{cases}$$

여기서 $(h_p)_k$ 는 시간 t 에서의 미소체적 P 의 엔탈피, a_m 과 h_m 은 미소체적 P 의 선형화 대수방정식 계수와 미소체적 P 에 인접한 미소체적의 엔탈피를 나타내고 δV 는 미소체적 P 의 체적을 나타낸다.

2.3 수치해석의 타당성 검증

제안된 수치해석 방법의 검증을 위해서 사각 공동(rectangular cavity)에서 한쪽 벽면의 높은 온도로 인한 순수 갈륨의 용해 문제를 2차원적으로 수치해석을 수행하였다. 순수 갈륨은 상변화가 상온과 유사한 29.78°C에서 등온과정으로 진행되어서, 상경계면을 실험적으로 추적하기 용이하고 실험치도 풍부하다. 본 연구에서는 Gau 등의 실험 결과[8]와 비교를 통해서 수치해석 결과를 비교하였다.

Fig.3은 계산영역과 경계조건을 보여준다. T_{hot} 은 38°C, T_{int} 는 28.3°C로 Gau 등의 실험 조건과

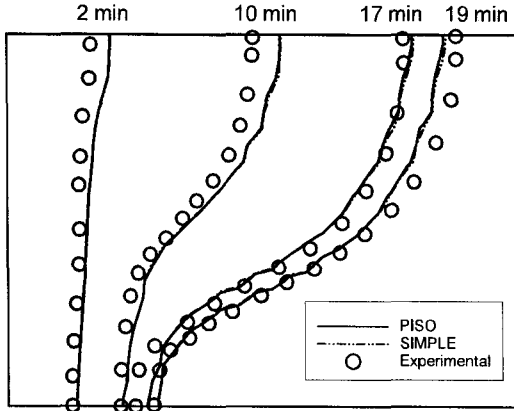


Fig.4 Comparison of melt fronts calculated by Turbo-3D and experimental result for the 2-D melting of gallium

동일하다. 갈륨의 물성치는 전체 온도장의 범위가 10℃정도(28.3~38℃) 이기 때문에 그 범위가 작아서 32℃일 때의 물성치로 일정하다고 가정되었고, Table 1에 정리되어있다.

Fig.4에서 PISO 알고리즘[9-10]을 사용하였을 때와 SIMPLE 알고리즘[11]을 사용하였을 때의 시간의 따른 상경계면을 실험치와 함께 나타내었다. PISO 알고리즘을 사용하였을 때와 SIMPLE 알고리즘을 사용하였을 때의 상경계면의 위치는 거의 차이가 없다. 이 결과로부터 본 연구에서 제안한 수치해석의 기법이 높은 신뢰성을 갖는 것을 알 수 있다. Fig. 4의 결과를 보면 수치해석 결과는 곡선이 약간의 굴곡을 나타내는데 이러한 현상은 엔탈피 방법의 특성으로 타 수치해석 결과에서도 이러한 현상이 나타난다.

Table 1 Physical properties of pure Gallium

Density (liquid), ρ [kg/m^3]	6093
Reference density, ρ_{ref} [kg/m^3]	6095
Reference temperature, T_{ref} [$^{\circ}\text{C}$]	29.78
Volumetric thermal expansion coefficient of liquid, β [$1/\text{K}$]	$1.2 \cdot 10^{-4}$
Thermal conductivity, k [W/m]	32.0
Melting point, T_m [$^{\circ}\text{C}$]	29.78
Latent heat of fusion, L [J/kg]	80160
Specific heat capacity, C [$\text{J/kg} \cdot \text{K}$]	381.5
Dynamic viscosity, μ [$\text{kg/m} \cdot \text{s}$]	$1.81 \cdot 10^{-3}$
Prandtl number, Pr	$2.16 \cdot 10^{-2}$

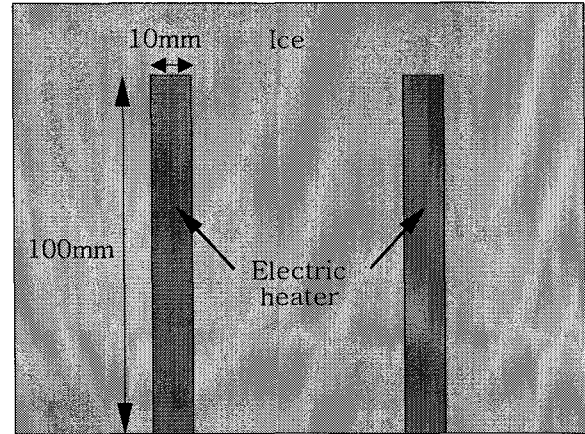


Fig.5 2-D meshes for calculation

2.4 해석모델의 Geometry 및 경계조건

Fig.5는 Fig.1의 판형 전기 히터 두 개 및 코너 부분을 포함한 2-D 모델이다. 가로 141.5mm 높이 120mm의 Green mesh가 얼음이고, 가로 10mm, 높이 100mm의 blue mesh가 전기히터이다. 총 24,960개의 cell이 계산에 사용되었고, heat source와 얼음사이의 3개의 층에는 초기에 녹아있는 물이 존재한다. 초기 녹아있는 물의 양은 전체 얼음 부피의 0.46%, time step은 0.01sec이고, 총 30,000 iteration(5min)을 수행하였다.

경계조건은 2-D 해석모델이므로 top과 bottom은 east 벽면과 같이 symmetric plane이고, 나머지는 단열조건이다. 히터를 기준으로 east, west, north 방향으로 100~250℃까지 50℃씩 case study를 진행하였다.

3. 수치해석 결과

3.1 속도 profile

Fig.6은 100~250℃까지 50℃씩 4개의 case study 중 100℃와 250℃의 5분경과 후 속도해석 결과를 0~0.0125m/s의 동일한 scale로 정리한 것이다. 얼음의 해빙과정은 초기에 히터로부터 받은 열량의 전도가 주를 이루지만, 용해가 시작함과 동시에 온도차에 따른 밀도의 변화와 이로 인한 대류가 해빙과정의 중요한 요소가 된다. Fig.6를 보면 히터가 고온으로 일정하게 고정됨에 따라 히터의 벽면 주변에 용해된 물의 온도가 급상승하게 되

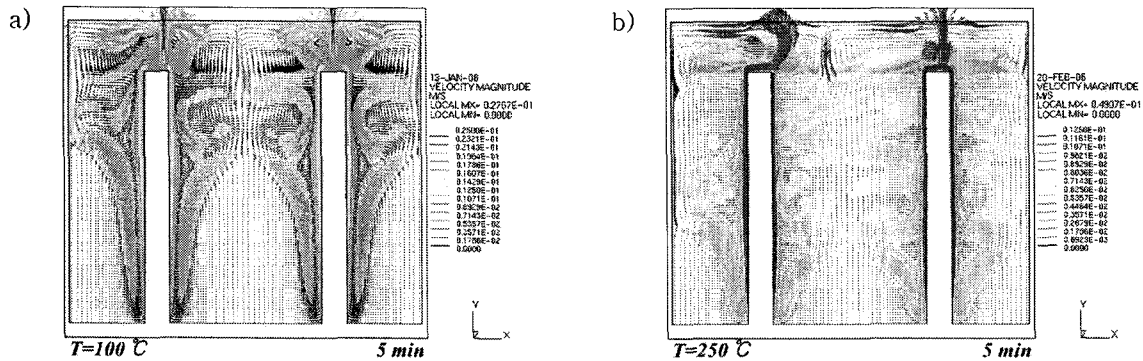


Fig.6 Velocity profile for 2D calculation(5min)

고, 밀도차가 급격히 증가하면서 driving force가 크게 작용하며 속도가 급격히 빨라지고 있는 것을 확인할 수 있다. 반면에 가장 중요한 얼음과의 비정상 경계면에서는 오히려 속도가 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 이와 같은 대류열전달로 인하여 일정한 방향으로 용해가 이루어지는 것이 아니라, 속도장이 급격한 곳에서 주로 열전달이 잘 일어나게 되어 얼음의 상부에서는 해빙이 잘 이뤄지지만, 바닥면에서는 얼음이 녹는데 상당한 시간이 소요됨을 확인할 수 있다. 특히 히터의 벽면과 윗면이 교차하는 지점에서 강한 속도장을 형성하며 해빙 초기에 녹아가는 현상을 발견할 수 있다.

3.2 온도 profile

Fig.7은 각 case study에 대한 5분경과 후 온도해석결과를 0~80°C로 scale을 고정된 후 정리한 것이다. 속도 profile과 비교해보면, 온도가 높은 곳에서 활발한 속도장이 형성되고, 해빙과정이 원활히 이루어지고 있음을 확인할 수 있다. 국부적으로 나타나는 최고 온도는 주어진 일정 온도에 대하여 1분 이후에는 거의 변하지 않는 것을 알 수 있다.

그리고 시간에 따른 결과를 비교해보면, 용해 과정이 시간이 지남에 따라 상대적으로 저하되고, 고온부가 차지하는 영역이 상대적으로 늘어남으로서 현열이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 용해면적이 늘어나면서 전체적인 용해과정이 국부적인 driving force에 의지하기 때문에 나타나는 것으로, 초기 용해과정에서 발생한 대류가 시간이 지남에 따라 히터 주변에서만 원활하게 이뤄짐으로서 물과 얼음의 비정상 경계면에서 상대적으로 대류열전달이 작아지기 때문이다. Fig.7(a)와 Fig.7(b)를 비교해보면, 용해된 물의 상면온도가 전자의 경우 30°C인데 반해, 후자의 경우 90°C 이상이 지배적이다. 고정된 온도와 비례적으로 용해 면적이 늘어나지 않으며, 이렇게 가열된 물의 분포에 따라 물탱크 내부에 증기압을 가하게 된다.

3.3 계산 격자수의 영향

Cell 개수를 2배와 4배로 늘렸을 때 수치해석 결과의 error의 변화는 0.003%로 거의 차이가 없었고, 상대적으로 2/3 모델의 경우 -0.015%로 계산 결과와 차이가 없었다. 그러나 1/2 모델과 1/4

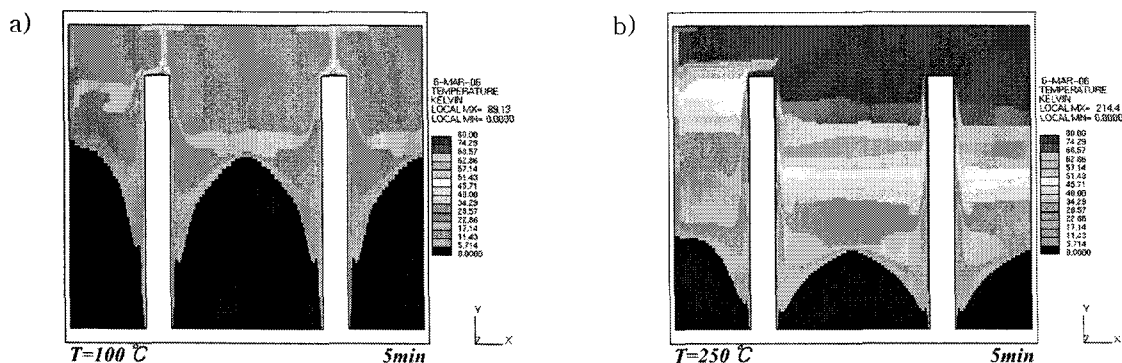


Fig.7 Temperature profile for 2D calculation(5min)

모델의 경우 계산 자체가 발산하였다. 이 경우에는 국부적인 급격한 온도변화에 의해 energy equation과 momentum equation 사이에서의 coupling이 원활하게 이뤄지지 않아 계산 자체가 불가능 하였다.이 결과로부터 본 연구에서 사용한 cell 개수는 적절한 것임을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

관형 히터 벽면의 온도를 일정하게 유지한 조건에서 물탱크의 용해과정에 대한 수치해석을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 물탱크의 용해과정은 초기에는 열전도가 주를 이루지만 대류 열전달이 해빙과정의 중요한 요소가 된다. 특히 히터 벽면에서의 급격한 온도 차에 의한 driving force와 얼음과 물의 비정상경계면에서의 속도 감소가 용해형상을 결정짓는 중요한 요소이다.

(2) 용해과정이 국부적인 고온현상과 이로 인한 국부적인 driving force에 의한 대류 열전달이 주를 이루면서 시간이 경과함에 따라 용해열보다는 현열을 증가시키는 현상을 확인할 수 있다.

(3) 본 연구에서 가정한 관형히터에서는 벽면의 온도가 250℃인 경우에 용해 과정이 5분 경과한 후 물탱크의 상부 수온이 90℃이상에 도달하였다. 히터의 벽면온도가 증가함에 따라 용해과정에서 물의 부분적 과열과 탱크에 압력이 과도하게 가해질 염려가 있으므로 적절한 온도 이내로 히터 표면 온도를 제한하고 히터의 표면적을 증가시키는 방향으로 설계가 이루어져야 한다.

후 기

본 연구는 현대기아 자동차 연구개발 총괄 본부 연료전지개발팀의 연구비 및 2004년도 서강대학교 교내연구비지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Lacrox, M. and Voller, V.R., "Finite difference solutions of solidification phase change problem: transformed versus fixed

grids," *Numerical Heat transfer, Part B, Vol.17, (1990), p.25-41*

2. Morgan, K., "A numerical analysis of freezing and melting with convection," *Comp. Methods Appl. Eng, Vol.28, (1981), p.275-284.*

3. Voller, V.R. and Prakash, C., "A fixed grid numerical modeling methodology for convection/diffusion mushy region phase change problems," *Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.30, (1987), p.1709-1719.*

4. Brent, A.D., Voller, V.R. and Reid, K.J., "Enthalpy-Porosity technique for modeling convection-diffusion phase change: Application to the melting of a pure metal," *Numerical Heat Transfer, Vol.13-1, (1988), p.295-318.*

5. Voller, V.R., "Fast implicit finite-difference method for the analysis of phase change problems," *Numerical Heat Transfer, Part B, Vol.17, (1990), p.155-169.*

6. Nahmkeon, Hur, *Developmnet of General Purpose Thermo/Fluid Flow Analysis Program, MOST, (2002)*

7. STAR-CD, version 3.24.000, CD Adapco Group

8. Gau, C. and Viskanta, R., "Melting and solidification of a pure metal on a vertical wall," *J. Heat Transfer, Vol.108, (1986), p.174-181.*

9. Issa, R.I., "Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting," *J. Computational Physics, Vol.62, (1985), p.40-65.*

10. Oliveira, P.J. and Issa, R.I., "An improved PISO algorithm for the computation of buoyancy-driven flows," *Numerical Heat Transfer, Part B, Vol.40-6, (2001), p.473-493.*

11. Patankar, S.V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill, New York (1980)*