

N-Octadecane의 상변화 열전달현상에 관한 연구

A Study on Heat Transfer with Phase Change of N-Octadecane

김 유*, 황 태 연**, 김 기 운**
Y. Kim, T.Y. Hwang, K.W. Kim

ABSTRACT

Experimental and numerical analysis were performed to investigate the heat transfer phenomena during phase change.

N-octadecane were used as a phase change material and TRUMP computer code was used as a numerical tool. Also, two quarter segment of cylinder shape was chosen as a vessel to simulate to this research.

The major contribution factor on the solidus surface movement was environmental temperature and the effect of roller gap and material initial temperature were insignificant. Experimental and numerical results were generally in good agreement and the effect of the mesh size (22x22 and 33x33) was negligible.

기 호 설 명

A	: Node 사이의 열전달면적(m^2)	t	: 시간(S)
C	: 비열(J/Kg K)	Un, b	: 외부 경계면에서의 열전도도(W/mK)
ΔH	: 상변화시의 잠열(J/Kg)	Un, k	: Node n 과 k 사이에서의 열전도도(W/mK)
K	: 열전도도(W/mK)	〈하 침 자〉	
Δr	: Node 사이의 거리	b	: 경 계
$S(t)$: 시간의 함수인 응고선의 위치	k	: Node 수
T	: 온도(K)	ℓ	: 액 체
Ta	: 상변화시의 주위온도(K)	ℓ_i	: 액체의 초기상태
Tp	: 상변화 물질의 초기온도(K)	mp	: 융 해 점
		n	: Node 수

* 충남대학교 기계공학과

** 충남대학교 대학원

s : 고 체
su : 표 면

〈그리스문자〉

α : 열확산계수(m²/s)
 ρ : 밀도(Kg/m³)
 σ : 표면좌표의 위치

1. 서 론

통상 Stefan problem으로 지칭되고 있는 상변화 문제는 서로 다른 상사이에서 상이 변화하며 잠열을 흡수 또는 방출하는 과정을 수반하는 열전달 현상이다. 동결기 지표면의 결빙, 식품의 동결건조공법¹⁾ 금속의 주조, 태양열을 이용한 축열장치, 열 제어장치²⁾ 신재료 제조 및 우주항공산업에의 응용 등 그 이용범위가 대단히 넓은 열전달 분야이다.

그러나 상변화 문제는 열전달 과정이 진행됨에 따라 경계면이 이동하는 이동경계문제로서 기본 열평형 방정식이 매우 복잡한 비선형 편미분 방정식으로 표현되므로 단순한 기하학적 형태나 조건에 대해 엄밀해를 구하였고,³⁾ 그 외에는 거의 다양한 수치해석기법으로 해를 구하고 있다.^{4),5),6),7)} 국외의 많은 학자들이 주로 용해과정에서 일어나는 상변화 열전달 현상을 연구하였으며,^{8),9),10)} 일부는 응고과정의 열전달 현상을 연구하였다.¹¹⁾ 국내에서는 상변화 물질로 물을 택하여 주로 용해현상에 대한 연구가 수행되었으며,^{12),13)} 그 외에 파라핀을 사용한 연구가 일부 이루어지고 있다.

한편 최근에 국내외에서 관심의 대상이 되고 있는 금속의 급속냉각주조방식^{14),15),16)}은 이와같은 상변화 열전달해석이 필수적으로 요구되는 분야이다.

본 연구에서는 쌍 로울러를 이용한 금속의 급속냉각주조장치의 초기조건과 유사한 용기를 제작한후 상변화 물질로 n-octadecane을 사용하여 열전달 현상을 실험하고, 그 결과와 유한차분법을 이용한 전산프로그램을 사용하

여 얻어진 수치해석 결과를 비교하였다.

실험조건으로는 주위온도, 상변화물질의 초기온도 및 로울러의 간격 등을 변화시켜 열전달 현상에 대한 영향을 검토하였으며, 또한 수치해석시 mesh 크기를 변화시켜 이에대한 영향도 검토하였다.

2. 이 론

2.1 기본방정식

초기온도 T_{ii} 인 용융상태의 물질을 응고점 이하의 용기에 담은 경우, 시간 $t=0$ 에서 용기 벽면의 온도는 물질의 응고점이하의 온도인 T_{su} 이고, $t>0$ 일 때 응고면이 용기 벽면으로부터 형성되며 시간의 경과에 따라 변화한다. 고상 및 액상을 통과하는 열유량은 2차원 비정상 상태인 경우

$$\frac{\partial^2 T_s}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial Y^2} = \frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial T_s}{\partial t} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial^2 T_l}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T_l}{\partial Y^2} = \frac{1}{\alpha_l} \frac{\partial T_l}{\partial t} \dots\dots\dots (2)$$

로 표현되며, 이 경우의 경계조건은

$$x=0, y=0, t \geq 0 \text{ 일 때 } T_s = T_{su} \dots (3)$$

$$x \rightarrow \infty, y \rightarrow \infty, t \geq 0 \text{ 일 때 } T_l = T_{ii} \dots (4)$$

$$x=0 \sim \infty, y=0 \sim \infty, t=0 \text{ 일 때 } T_l = T_{ii} \dots\dots\dots (5)$$

$$x=S(t) \text{ 및 } y=S(t) \text{ 에서는 } T_s = T_l = T_{mp} \dots\dots\dots (6)$$

가 되고, 자연대류가 전도에 의한 열전달량에 비해 무시할만 하면

$$K_l \frac{\partial T_l}{\partial \sigma} - K_s \frac{\partial T_s}{\partial \sigma} = \rho_s \Delta H \frac{dS(t)}{dt} \dots\dots\dots (7)$$

가 된다.

여기서 ΔH 는 액상물질의 단위질량에 대한 응고잠열, $S(t)$ 는 응고선의 위치를 나타낸다.

2.2 수치해석

본 연구의 수치해석에 사용된 프로그램은 온도장에서의 열흐름, 압력장에서의 질량흐름 및 전자기장에서의 전류 등 비선형 포물선형 미

분방정식의 해를 구하는 TRUMP 프로그램¹⁷⁾으로서 유한차분법이 사용되었다.

기본방정식을 다차원 오일러 공간(multi-dimensional Eulerian space)으로 각 node에 대해서 표현하면

$$\frac{\partial T_n}{\partial t} = \frac{1}{\rho_n C_n V_n} \left(\sum_k U_{n,k} (T_k - T_n) + \sum_b U_{n,b} (T_b - T_n) \right) \dots\dots\dots (8)$$

이 되며, 여기서

$$U_{n,k} = \frac{A_{n,k}}{\frac{\Delta r_{n,k}}{K_n} + \frac{1}{h_{n,k}} + \frac{\Delta r_k}{K_k}} \dots\dots\dots (9)$$

이다.

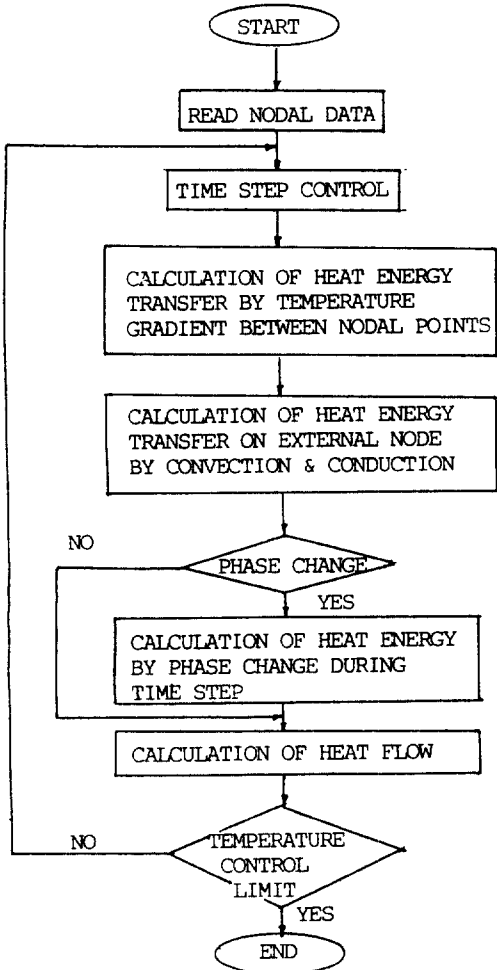


Fig. 1 Flow chart of computer simulation

사용된 프로그램의 흐름도는 Fig.1에 표시하였다.

2.3 모델링

Mesh 크기에 따른 열전달 현상에 대한 영향을 고찰하기 위해 로울러의 1/4 단면에 대해 22×22 및 33×33의 크기로 mesh를 설정하였으며, 응고에 소요되는 최대 계산시간은 9000초, 출력은 120초 간격으로 하였다. 또한 본 해석을 위해 사용된 전산기로 CDC 180/860을 선정하였다.

3. 실험

3.1 실험용기

실험에 사용된 실험용기는 급속의 급속냉각 주조시에 주로 사용되는 쌍 로울러의 일부를 용기의 형상으로 취하여 제작하였다. 즉, 로울러의 재료는 직경 130 mm, 두께 3mm의 동관을 4등분하여 사용하였으며, 용기의 재료로는 상변화 경계면의 이동을 육안으로 관찰할 수 있도록 10mm의 투명 아크릴판을 사용하였다. 또한 로울러 간격에 의한 응고면의 이동형태를 알아보기 위해 용기의 바닥치수를 132×260mm, 135×260mm, 138×260mm의 3종을 제작하였으며, 용기의 외부에는 두께 30mm의 styrofoam 단열재를 사용하여 단열시켰다. 이와같이 제작한 실험용기의 형상은 Fig.2와 같다.

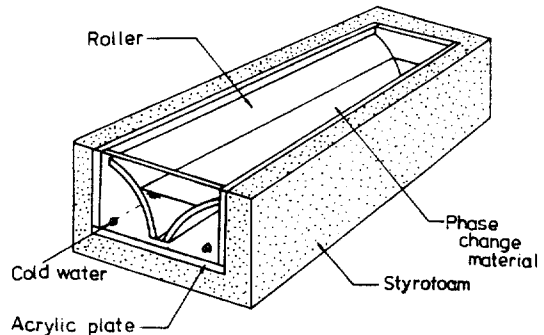
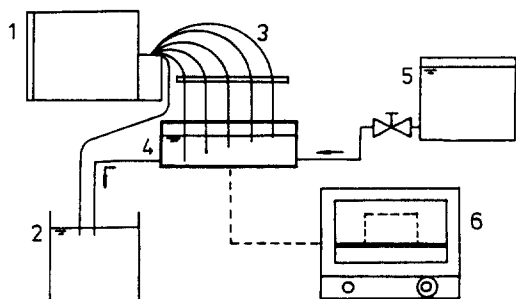


Fig. 2 Experimental vessel

3.2 실험장치

실험에 사용된 실험장치는 실험용기, 냉각수 공급장치, 냉각수량 측정기, 열전대, 자동 온도기록계 및 항온조 등으로 구성되며, 이 구성도는 Fig. 3에 나타내었다. 열전대를 사용한 온도 측정점의 위치는 실험용기의 길이방향의 중앙부에서 Fig. 4와 같이 15개소를 선정하였으며, 열전대의 위치를 고정하기 위해서 별도의 보조치구를 제작하여 원하는 측정 위치에 고정시켰다.



- 1. 6-channel temperature recorder
- 2. Water drain bath
- 3. Thermocouples
- 4. Vessel (Twin-Roll)
- 5. Cold water source
- 6. Isothermperature vacuum oven

Fig. 3 Schematic diagram of the experimental apparatus

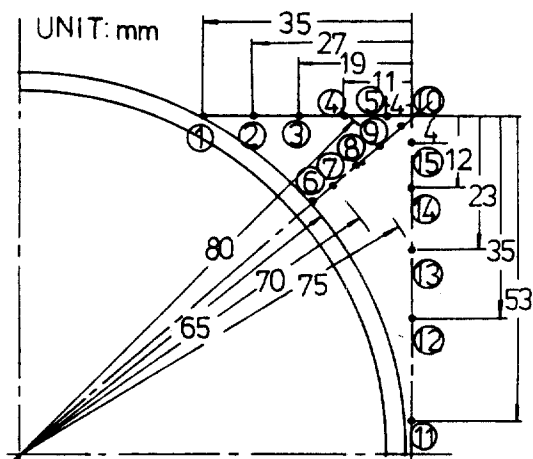


Fig. 4 Positions of thermocouples

3.3 실험방법

상변화 현상에 대한 실험은 상변화 물질의 용고시에 아크릴 판을 통하여 육안으로 관찰하고, 동시에 열전대를 통해서 온도를 측정하였다.

실험용기에 상변화 물질을 채우기 전에 실험용기와 상변화 물질을 이 물질의 융점보다 약간 높은 온도로 유지시키기 위해 항온조에 넣고 약 6시간동안 예열하여 온도평형을 얻은 후 실험용기를 꺼내어 냉각수관과 열전대를 설치하고 용해된 상변화 물질을 용기에 서서히 부었다. 이어서 14 °C의 냉각수를 흘려 보내기 시작하였으며, 동시에 자동온도기록계를 가동시켰다. 이때 육안관찰을 통하여 상변화 물질의 용고과정을 관찰하기 위해 용기의 전면면에 부착된 아스테지에 15분 간격으로 응고면을 그렸다.

상변화 물질로는 상온에서 실험하기에 용이한 파라핀 계열 화합물질인 n-octadecane($C_{18}H_{38}$)을 선택하였으며, 그 열적물성치는 table 1과 같다.

Table.1 Thermophysical properties of n-octadecane

Property	Value
Melting temperature (T_m)	301°K
Heat of fusion (L_f)	243×10^3 J/Kg
Density of liquid (ρ)	774 Kg/m ³
Thermal conductivity (K)	0.15 W/mK
Heat capacity (C)	2160 J/Kg K

4. 결과 및 고찰

4.1 응고면의 이동

가. 육안관찰 결과

(1) 로울러의 간격에 의한 영향

상변화 물질의 초기온도를 32 °C, 주위온도를 23 °C로 고정하고 로울러 사이의 간격을 변화시켜 가면서 관찰한 결과는 Fig. 5와 같다. 시간별 응고형태는 로울러 간격의 변화에

의해서는 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.

응고 완료후 물질의 상면 증상부가 약간 들어가는 현상은 양 로울러 방향으로 응고가 진행될 때 액상이 고상으로 변하면서 물성변화에 따른 체적변화에 기인하는 것으로 판단된다.

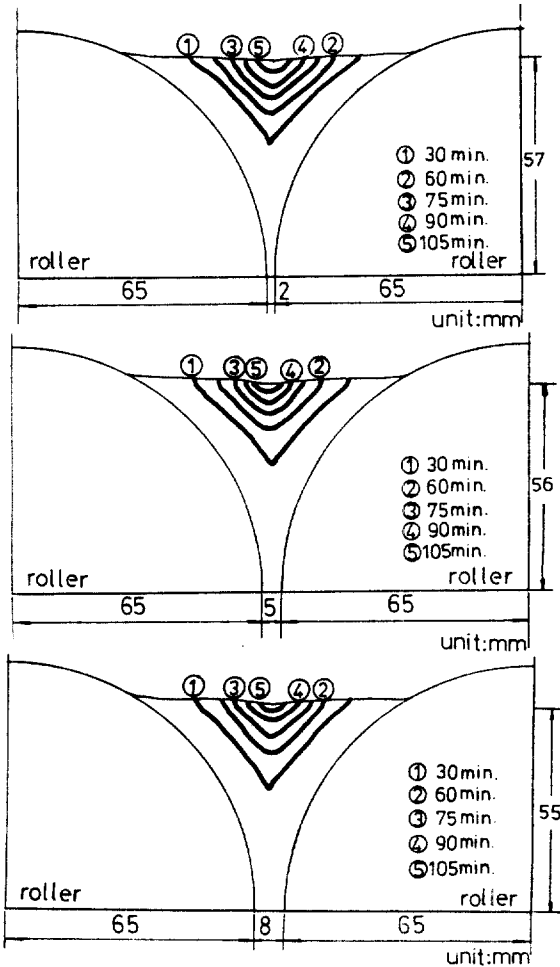


Fig. 5 Solidification profiles at various roller gap

(2) 상변화 물질의 초기온도에 의한 영향
로울러 간격을 5mm, 주위온도를 23°C로 고정하고 상변화 물질의 초기온도를 32°C와 75°C로 변화시켰을 경우 응고면의 이동형태는 Fig. 6 과 같다. 상변화 물질의 초기온도에

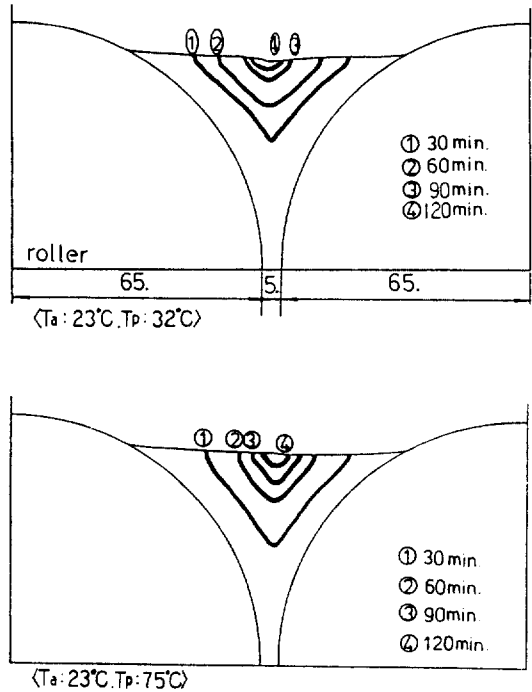


Fig. 6 Solidification profiles at two initial temperature of phase change material

의해서는 응고면의 이동형태가 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있었다.

(3) 주위온도에 의한 영향

로울러 간격을 5mm, 상변화 물질의 초기온도를 32°C로 고정하고 주위온도를 17°C와 23°C로 변화시켰을 경우 응고면의 이동형태는 Fig. 7 과 같다. 주위온도가 17°C인 때는 상변화 물질의 응고과정이 전도 열전달보다는 주로 외기와 접하는 상변화 물질의 상부에서의 대류 열전달에 의해 상변화 물질의 상면에서부터 응고가 이루어지므로서 내부응고가 뒤늦게 일어나는 현상을 보이고 있다.

나. 열전대를 이용한 측정결과

주위온도를 23°C, 상변화 물질의 초기온도를 32°C로 고정하고, 로울러 간격 5mm의 용기를 사용하여 열전대 5개를 1조로 용기의 상면(1~5 위치), 로울러의 중심방향(6~10 위치), 용기의 중심선 방향(11~15 위치)에 대한 온도변화를 온도기록계로 기록하여 정리

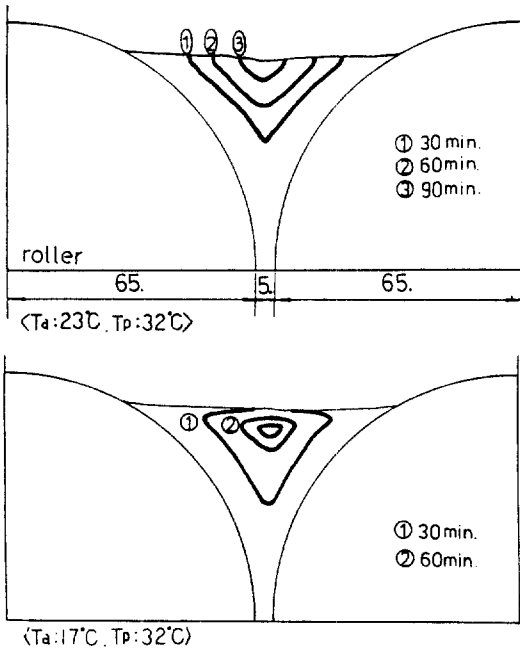


Fig. 7 Solidification profiles at two ambient temperature

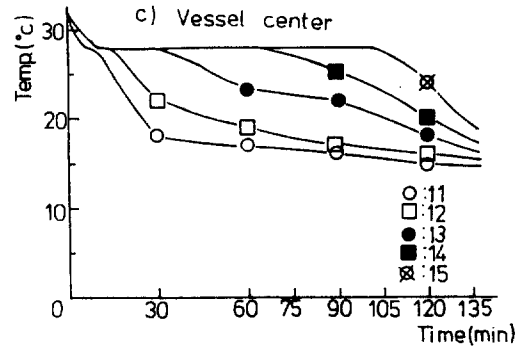


Fig. 8 Temperature profiles at the Various positions

한 결과는 Fig. 8 과 같다. 그림에서 보는바와 같이 일정시간에서 상변화 물질내의 임의의 점에서의 응고면을 발견할 수 있었으며, 본 상변화 물질의 응고점이 28 °C라는 것도 동시에 확인할 수 있었다. 로울러 부근에 위치한 부위의 온도는 응고개시후 30 분만에 20 °C이하로 강하하였고, 그후 60 분정도 경과한 후에는 9 개의 열전대 위치까지 응고가 진행됨을 볼 수 있었는데, 이는 전체 응고과정의 약 절반에 해당하는 부분으로서 육안관찰에 의한 결과와 일치하는 것을 알 수 있었다.

다. 수치해석 결과

로울러 간격 5mm, 상변화 물질의 초기 온도 32 °C, 주위온도 23 °C의 경우에 대하여 시간별로 계산된 온도결과, 즉 상변화 물질의 용해점인 mesh를 등온선으로 하여 mesh 크기에 따라 나타내면 Fig. 9와 같다. Mesh 크

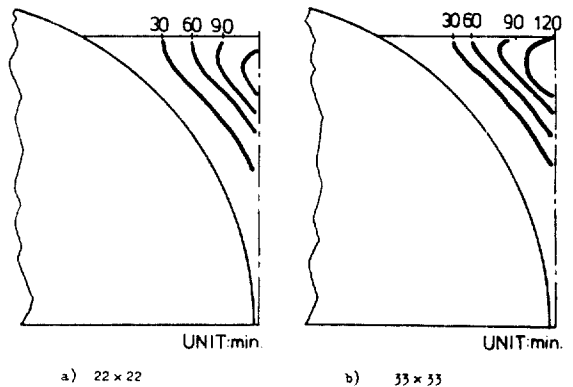
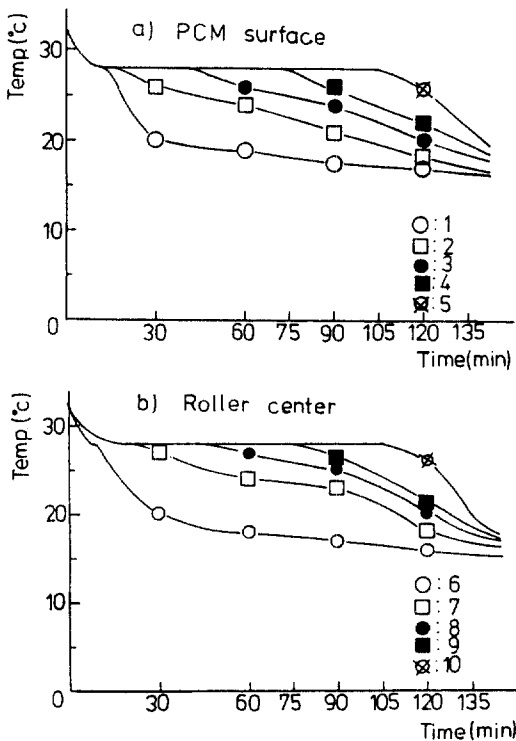


Fig. 9 Numerical results of the solidification profiles

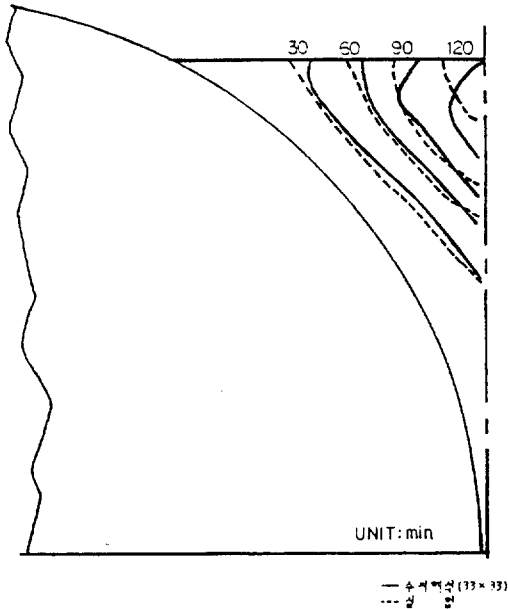


Fig. 10 Experimental and numerical results of solidification profiles

기에 따르는 응고면의 이동형태는 시간에 따라 큰 차이가 없었으나, mesh 크기를 작게 하므로써 실험치에 근접시킬 수 있었다.

이와같이 얻은 실험 및 수치해석 결과를 비교하여 그림으로 나타내면 Fig. 10과 같다. 응고면의 이동형태는 서로 유사한 경향을 나타내며 거의 일치하고 있다.

4.2 총 응고시간

주위온도와 상변화 물질의 초기온도를 변화시킨후 상변화 물질 상면의 응고가 완료될때 까지의 총 응고시간에 대한 실험결과와 수치해석 결과를 비교하여 나타내면 Table 2와 같

다. 전반적인 실험결과와 수치해석 결과는 오차가 약 8%미만으로 비교적 잘 일치하였으며, 또한 수치해석시 mesh 크기에 의한 영향도 약 3%이내로 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. 한편 총 응고시간은 주위온도의 변화에 의해 매우 크게 변동되었으나, 상변화 물질의 초기온도의 변화에 의해서는 큰 변동이 없었다. 즉 주위온도가 높을수록 총 응고시간은 크게 지연되었고, 상변화 물질의 초기온도가 높을수록 약간 지연되었음을 알 수 있었다. 또한 mesh 크기에 의해서는 총 응고시간의 변화에 큰 영향을 주지 않았다.

5. 결 론

상변화 물질로 n-octadecane (C₁₈H₃₈)을 선택하고 쌍 로울러 형상의 일부를 해석 모델로 취하여 이에 대한 응고면의 이동형태와 총 응고시간에 대한 실험 및 수치해석을 실시하여 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 응고면의 이동형태는 로울러 간격과 상변화 물질의 초기온도의 변화에는 큰 영향이 없었으나, 주위온도의 온도변화에 의해 큰 영향을 받았다.
- (2) 총 응고시간은 주위온도가 6℃정도 낮아짐에 따라 약 2배이상 짧아져서, 주위온도의 변화에 큰 영향이 있음을 알았다.
- (3) 응고과정의 전반에는 주로 전도에 의해 응고가 빠르게 진행되었으나, 후반에는 응고면이 증가하여 냉각에 의한 전도효과가 작아 지므로써 응고시간이 지연되었다.
- (4) Mesh 크기에 의한 응고면의 이동형태

Table.2 Experimental and numerical results of the total solidification time

roller gap (mm)	ambient temperature (°C)	PCM initial temperature (°C)	total solidification time		
			experimental	numerical	
				22 × 22	33 × 33
5	23	32	7.500	7.080	7.200
5	23	25	8.400	8.220	8.350
5	17	32	3.000	2.820	2.900
5	17	75	4.200	3.900	4.020

의 차이는 거의 없었으며, 총 응고시간은 약 3% 이내의 차이를 보였다.

(5) 실험 및 수치해석 결과 매우 일치하는 경향이 있었으며, 이에 따라 이와 유사하거나 복잡한 문제의 열전달 해석에 본 프로그램이 유용할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. N.W. Desrosier and D.K. Tressler, Fundamentals of Food Freezing, AVI Publishing Company Inc., 1977.
2. W.R. Humphries and E.I. Griggs, NASA Technical Paper 1074, NASA, 1977.
3. H.W. Carslaw and J.C. Jaeger, Conduction of Heat in Solids, 2nd ed., pp.51-90, Clarendon Press, Oxford, 1959.
4. W.D. Murray and Fred Landis, "Numerical and Machine Solutions of Transient Heat Conduction Problems Involving Melting or Freezing", J. of Heat Transfer, Vol.81, pp.106-112, 1959.
5. Anastas Lazaridis, "A Numerical Solution of the Multidimensional Solidification (or Melting) Problem," Int. J. of Heat Mass Transfer, Vol.13, pp.1459-1477, 1970.
6. J. Crank and R.S. Gupta, "Isotherm Migration Method in Two Dimensions", Int. J. of Heat Mass Transfer, Vol.18, pp.1101-1107, 1975.
7. H.M. Ettoney and R.A. Brown, "Finite Element Method for Steady Solidification Problems", J. Computational Physics, Vol.49, pp.118-150, 1983.
8. D.V. Boger and J.W. Westwater, "Effect of Buoyancy on the Melting and Freezing Process", J. of Heat Transfer, pp.81-89, 1967.
9. E.M. Sparrow, R.R. Schmidt and J.W. Ramsey, "Experiments on the Role of Natural Convection in the Melting of Solids", J. of Heat Transfer, Vol.100, pp.11-16, 1978.
10. A.G. Bathelt and R. Viskanta, "Heat Transfer and Interface Motion During Melting and Solidification around a Finned Heat Source/Sink", J. of Heat Transfer, Vol.103, pp.720-726, 1981.
11. E.M. Sparrow, J.W. Ramsey and R.G. Kemink, "Freezing Controlled by Natural Convection", J. of Heat Transfer, Vol.101, pp.578-584, 1979.
12. 유상신, 이동욱, "물속에 수평으로 잠겨 있는 원통형 얼음봉의 용해현상에 관한 실험적 연구", 대한기계학회 논문집, 제9권, 제4호, pp. 414~420, 1985.
13. 노승탁, 김민수, "적사각형 단면을 갖는 용기내 상변화 열전달과정에 관한 실험적 연구", 대한기계학회 논문집, 제11권, 제4호, pp. 697~707, 1987.
14. K. Miyazawa and J. Szekely, "A Mathematical Model of the Splat Cooling Process Using the Twin Roll Technique", Metallurgical Transactions A. Vol.12A, pp.1047-1057, 1981.
15. T.W. Clyne, "Numerical Treatment of Rapid Solidification", Metall. Trans., Vol. 15B, pp.369-381, 1984.
16. C.G. Kang and T. Saitch, "A Mathematical Model of Two-Dimensional Solidification Problems for Twin Roll Type Strip Casting", J. of Korean Soc. Proc. Engng., Vol.4, No.2, pp.56-67, 1987.
17. Arthur L. Edwards, "TRUMP: a Computer Program for Transient and Steady-state Temperature Distributions in Multidimensional Systems", Lawrence Radiation Lab., Univ. of Calif., pp.1-171, 1969.