

## 열전달 해석을 이용한 VAR 공정 변수가 티타늄 합금 잉고트 응고 조직에 미치는 영향 연구

김종환<sup>†</sup> · 이재현 · 허성강 · 현용택\* · 이용태\*

창원대학교 금속재료공학과  
\*한국기계연구원 재료공정연구부

### The Effects of VAR Processing Parameters on Solidification Microstructures in Ti Alloys by Computer Simulation

Jong-Hwan Kim<sup>†</sup>, Je-Hyun Lee, Sung-Gang Hur, Yong-Taek Hyun\* and Yong-Tae Lee\*

Dept. of Material Engineering, Changwon National University, Changwon Korea

\*Materials Processing Department, Korea Institute of Machinery and Materials, Changwon Korea

(2002년 3월 18일 받음, 2002년 5월 10일 최종수정본 받음)

**Abstract** VAR process is required to control its various operating parameters. Heat transfer simulation has been accomplished to understand development of solidification micro and macro-structures during VAR process in Ti alloys. Optimum VAR process parameters could be also estimated in this study. It was found that macro-structures were closely related to the shape and depth of liquid pool, and solidification parameters, such as temperature gradient, heat flux, solid fraction. The cooling rates were higher at bottom, top and center part respectively. As cooling rates increased, the  $\alpha$  phase decreased in length, width and fraction. In order to evaluate which parameter affects the result of heat transfer calculation most sensitively, the sensitivities of input parameters to the simulation result were examined. The pool depth and cooling rate showed more sensitive to the temperature of the molten metal, heat transfer coefficient, and liquidus respectively. Also, these thermal properties became more sensitive at higher temperatures.

**Key words**: Ti alloy, ingot, macro-structure, cooling rate, sensitivity, heat transfer coefficient, thermal physical properties

### 1. 서 론

티타늄 합금은 강도 및 내식성이 우수하며 가벼운 특성을 바탕으로 항공 우주 및 원자력 발전 소재 등 전략 소재로 그 중요성이 부각되어 왔으나 장치와 기술 등의 어려움으로 그 사용이 제한되어 왔다. 최근 용해 기술의 발달에 따라 티타늄 소재는 범용화 되기 시작하였으며 자동차, 건축, 석유화학 플랜트, 의료용 재료 및 스포츠 용품에 이르는 그 사용 범위가 확대되고 있다.<sup>1~3)</sup> 티타늄 소재는 일반적으로 스폰지 티타늄 및 합금 원소 등이 혼합된 원소재를 용해하여 잉고트를 제조하고 잉고트는 단조, 압연, 주조 등 가공 공정을 거쳐 판재, 봉재 등의 소재와 부품의 형태로 제조된다.<sup>4,5)</sup>

티타늄 합금의 용해 공정에서는 용융 티타늄의 강한 반응성으로 특별한 설비 및 고도의 기술이 요구된다. 티타늄은 용점이 철계 합금 보다 높을 뿐 아니라 용융 상태에서 만능 용매라고 불릴 만큼 반응성이 강하기 때문에 흑연을 제외한 통상적인 내화물과는 반응을 하므로 도가니로부터 오염을 방지하기 위하여 진공 또는 Ar 등의 불활성 가스 분위기에서 용융 하여야한다. 티타늄 잉고트를 제조하기 위한 용해

방법으로는 열원에 따라 진공 아크 재용해 (Vacuum Arc Remelting), 전자빔 용해 (Electron Beam Melting), 플라즈마 아크 용해 (Plasma Arc Melting) 등의 용해법이 사용되는데, 이 중에서 일반적으로 원소재를 소모전극으로 하고 진공 용기 속에서 직류 아크를 이용하는 진공 아크 재용해 (VAR) 방법이 가장 널리 이용된다.<sup>6~10)</sup>

VAR 용해 공정은 수냉 동 도가니 내에서 용해되는데 잉고트 내의 화학적 조성 균질화를 위하여 2~3회 재용해 하여 최종 제품을 얻게 된다. 응고시 수축결함과 편석 없는 잉고트를 얻기 위해서는 응고 거동을 제어하는 아크 발생 전압과 전류, 그리고 용탕의 용융속도, 냉각수에 의한 냉각 속도 등 많은 공정 변수의 적절한 설정이 요구된다. 본 연구에서는 티타늄 용해시 발생하는 실험적 어려움과 함께, 많은 용해 공정 변수를 가지는 VAR 공정을 컴퓨터를 이용하여 티타늄 VAR 용해 공정의 최적 공정 조건을 예측하고, 공정시 잉고트에 나타나는 열현상을 가시화 하여 공정이 진행될 때 용탕의 열유동 및 응고현상에 대해 이해하고자 하였다. 아울러, 잉고트의 특성을 결정하는 용융 pool의 깊이와 형상 변화를 순수 티타늄과 Ti-6Al-4V 합금에 적

<sup>†</sup> E-mail: ocean-JHK@yahoo.co.kr

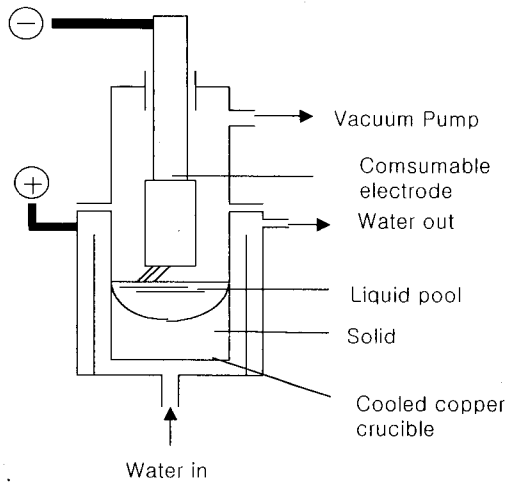


Fig. 1. Schematic illustration of the VAR furnace.

용하여 비교 분석하였으며, 실제 잉고트를 제조하고 그 단면 조직을 관찰하여 해석 결과를 검증하였다. 또한 잉고트 각 부위별 미세 조직과 응고 공정 변수를 정량화 하여 전산 모사에 의한 조직 예측과 열전달 해석에 있어 주요 입력 물성치인 재료의 고온 열 물성치와 계면 열전달 계수, 공정 변수를 변화시킴으로써 냉각속도와 용융 pool의 깊이 변화량에 대한 민감도를 연구하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에 사용된 VAR 장비의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 용해 장비는 수냉 동 도가니, 소모전극의 승강 기구, 진공 시스템, 직류 전원, 냉각수 순환 기구, 제어 계통 등으로 구성되어 있다. 소모 전극은 수냉 동 도가니 용해로의 중앙에 설치하여 진공 분위기에서 소모전극과 용해 스타트 재료 사이에 큰 전류를 흘려 아크를 발생시킴으로써 아크열에 의해 소모전극의 용해가 시작된다. 소모전극 선단에서 용융된 금속은 표면 장력에 의해 액상의 방울이 형성되면서 낙하하여 수냉 동 도가니 내에 쌓여 용융 pool을 형성하게 된다. Ti의 강한 반응성을 막고 여러 가지 불순물에 의한 오염을 방지하기 위하여 용해로 내부는 진공 상태를 유지하였다. 먼저 같은 VAR 공정 변수에서 순수 티타늄과 티타늄 합금(Ti-6Al-4V)을 소모전극으로 하여 잉고트를 제조한 후 결정성장 거동을 알아보기 위해 잉고트 중심부를

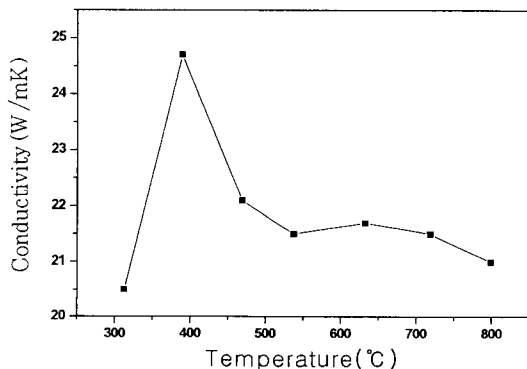


Table 1. Thermal properties of pure Ti and Ti-6Al-4V alloy.

Physical Property	Pure Ti	Ti-6Al-4V
Solidus	1660°C	1604°C
Liquidus	1670°C	1660°C
Latent heat	3.92 × 10 <sup>2</sup> kJ/kg	
Viscosity	5.2 × 10 <sup>-3</sup> N.s/m <sup>2</sup>	
Conductivity	Fig. 2(a).	
Specific heat	Fig. 2(b).	

절단하여 거시 조직 (macro-structure) 을 관찰하였다.

전산모사에 사용된 소량의 불순물을 포함하는 Ti와 Ti-6Al-4V 합금의 물성치를 Table 1에 나타내었고, 주요 열 물성치인 열전도도 및 비열은 온도의 함수로 Fig. 2에 보여 주고 있다. 해석에 필요한 계면에서의 열전달 계수값은 용탕과 주형의 접촉 면적, 접촉하는 두 재료의 종류, 표면 압력 등 여러 요인들에 의해 변화하며 정확한 데이터가 없는 실정이다. Table 2에서와 같이 본 실험에 적용된 경계값들은 기존 문헌을 참조하였다.<sup>11-17)</sup> 진공 챔버와 접하는 잉고트 윗면에서는 복사에 의한 열전달이 발생하며 이때 진공 중의 챔버 온도는 30°C로 두었다.<sup>11-13)</sup> 잉고트 측면에서의 계면 열전달 계수값은 온도의 함수 값으로 두었으며, 잉고트 밑면에서는 800W/m<sup>2</sup>/K로 일정하게 두었다. 본 실험에 적용된 해석적 방법은 FEM (Finite Element Method) 에 기초하고 있으며 수치해석을 위한 잉고트 단면의 요소 (mesh)는 순수 티타늄과 Ti-6Al-4V 합금에 대해 각각 같은 같은 조건으로 몰드는 10mm, 주물은 5mm 크기로 자동생성 (auto mesh) 하였다. 초기 VAR 용해 공정이 시작되어 아크 발생이 안정화되기까지 소모전극의 이송 속도는 안정화 상태에서의 이송속도보다 느리지만, 전체 공정시간에 비해 짧은 시간이 소요되므로 이송속도는 공정이 끝날 때까지 일정하다고 가정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 순수 티타늄과 Ti-6Al-4V 합금에서 Pool의 변화

VAR 공정에 있어 용융 pool의 형상과 깊이는 제조된 잉고트의 특성을 결정하는 중요한 의미를 가진다. 용융 pool의

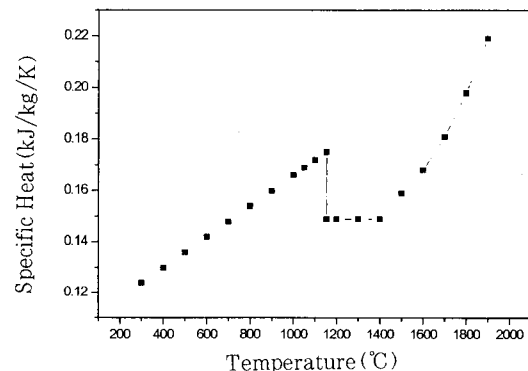


Fig. 2. Thermal properties used in calculation.

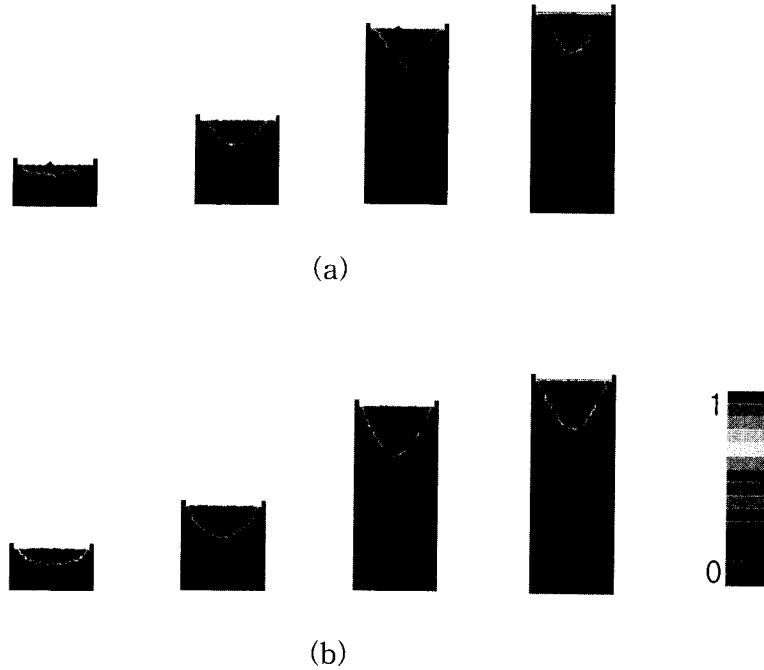


Fig. 3. Evolution of the liquid pool profiles with VAR process. (a) Pure Ti (b) Ti-6Al-4V alloy

Table 2. Boundary and processing conditions.

Surface Boundary conditions		Value
Side surface HTC	Liquid to mold	800W/m <sup>2</sup> /K
	Solid to mold	450W/m <sup>2</sup> /K
Bottom surface HTC		800W/m <sup>2</sup> /K
Emissivity	Liquid	0.2
	Solid	0.4
Ambient temperature		30°C
Initial temperature		2000°C
Operating conditions		Value
Steady state voltage		25-35V
Steady state ampere		3.0-3.5kA
Cooling water temperature		24°C
Melting metal quantity		20.99g/sec
Geometry		Value
Ingot diameter		204mm
Ingot height	Pure Ti	417mm
	Ti-6Al-4V	450mm
Consumable electrode diameter		150mm
Crucible diameter		224mm

깊이와 형상에 직접적으로 영향을 미치는 소모전극의 용해 속도는 대개 용해 전류에 비례하는 경향을 나타내므로 용해 전류는 각 공정마다 적절한 선택이 요구된다. 즉 생산성의 관점에서는 로의 용해 유지 시간을 가급적 최소화하기 위하

여 전류를 높여야하는 반면, 금속학적 측면에서는 얇은 용탕 pool을 유지하여 편석의 영향을 최소화하여야 하므로 낮은 전류값이 요구된다. 잉고트의 표면 품질은 용해 전류가 크고 수냉 동 도가니 부근까지 안정하게 용융 pool이 형성될 때 양호하게 되므로 실제 조업에 있어서는 성분의 균일화, freckle 편석의 방지, 수율 향상을 위한 표면 품질 등을 고려해서 로마다 최적의 전류값을 설정하여 pool의 깊이를 결정해야 한다.<sup>14~17</sup> 순수 티타늄과 Ti-6Al-4V 합금 잉고트가 성장할 때 pool의 깊이 변화를 Fig. 3에 보여주고 있고, 시간에 따른 pool의 깊이 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 공정 초기 pool의 깊이가 거의 일치하는 부위는 몰드 밑면의 열유량이 크게 작용하는 부위로 두 합금에서 pool 깊이가 증가하는 기울기는 거의 일치함을 볼 수 있다. 아크열에 의해 공급되는 열에너지가 점차 몰드 측면의 열전달에 의존하는 부위에서부터는 pool 깊이 차이가 계속 증가하는데, 이것은 온도 함수적으로 변화하는 몰드 측면부의 열유량과 순수 티타늄과 Ti-6Al-4V 합금이 가지는 서로 다른 열물성적 특성 때문인 것으로 판단된다. 이 범위 이상에서부터는 아크 열로부터 공급받는 열에너지와 잉고트에서의 대류, 전도 및 복사에 의해 방출되는 열에너지는 평행상태에 근접하여 각각의 잉고트에서 pool의 깊이는 미소한 변화를 보이고 pool 깊이 차이는 거의 일정하게 유지됨을 볼 수 있다.

VAR 공정을 통하여 제조된 순수 티타늄과 Ti-6Al-4V 합금의 잉고트를 각각 수직으로 절단한 거시 조직을 Fig. 5에 나타내었다. 몰드 밑면부의 열유량에 영향을 크게 받는 잉고트 밑면부에서는 열전달 방향과 수직 방향으로 성장한 결정들이 선명하게 관찰되었다. 그리고 pool의 깊이가 점차 커지는 Ti-6Al-4V 합금에서는 거시 조직상 순수 티타늄 잉고트에서 볼 수 없는 등축정이 존재함을 볼 수 있다. 이것은 순수 티타늄의 응고와는 달리 Ti-6Al-4V 합금에서

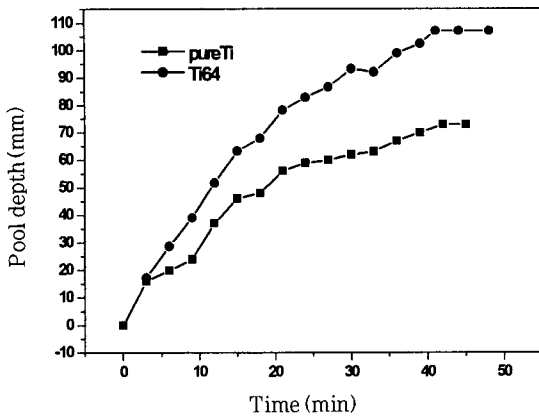
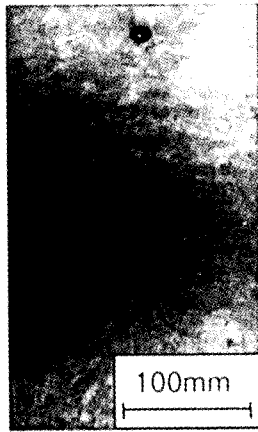


Fig. 4. Pool depths with VAR process in the pure Ti and Ti-6Al-4V alloy.

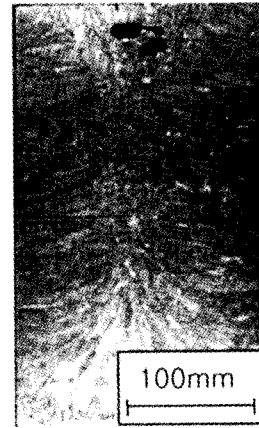
는 용질 원자에 의한 조성적 과냉이 존재하고 pool의 깊이와 폭이 크기 때문에 동 주형의 측면에서 차라온 주상정은 대류의 영향을 크게 받으므로 수지상 가지는 쉽게 떨어져

나가 과냉된 액상이 고상으로 성장 할 수 있는 많은 핵 생성 자리(site)를 제공해 주기 때문인 것으로 판단된다. 잉고트 높이 296mm에서 중심으로부터 10mm 간격으로 냉각속도를 Fig. 6에 나타내었다. 냉각속도는 전체적으로 순수 티타늄에서 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 거시 조직에서 잉고트 중심선을 기준으로 주상정이 성장해 가는 각도가 순수 티타늄에서 더 큰 것을 고려해 볼 때 신뢰성 있는 결과임을 알 수 있다. Ti-6Al-4V 합금의 경우 중심부에서 40mm 부근까지는 거의 일정한 냉각속도(0.53 ~ 0.63 °C/sec)를 나타내는데 이 부위는 거시 조직상에서 등축정이 나타나기 시작하는 부위와 유사하였다.

잉고트 상부는 용융된 소모전극이 최종 응고하는 부위로 Ti-6Al-4V 합금의 경우 용융 pool의 깊이와 폭이 크기 때문에 윗면부에서 성장한 결정들이 많이 관찰되며 수축결함은 크게 나타났다. Ti-6Al-4V 합금에서 나타나는 결함은 최종 응고부에 의한 수축 결함이라기 보다는 몰드 측면에서 먼저 성장한 고상에 의해 용탕 공급이 이루어지지 않아 생



(a) pure Ti



(b) Ti-6Al-4V alloy

Fig. 5. Macro-structures of VAR casted ingots. (a) Pure Ti (b) Ti-6Al-4V alloy

Table 3. Percentage changes in pool depth with percentage changes in heat transfer coefficient, melting temperature and material properties.

processing parameters		Value Change (%)	Cooling rate at the mushy zone temp. (°C/s)	Rate Change(%)
Material Properties	Latent Heat	-25	1.52	0
	Specific heat	-25	1.52	0
	Conductivity	-25	1.54	1.3
	Liq- temperature	-25	1.66	9.2
Heat Transfer Coefficient (W/m²/K)	+ 10	2.2	1.57	3.3
	+ 40	8.9	1.67	9.9
	+ 80	17.8	1.91	25.7
Melting Temperature(°C)	2050	2.5	1.44	5.3
	2100	5	1.39	8.6
	2200	10	1.35	11.2

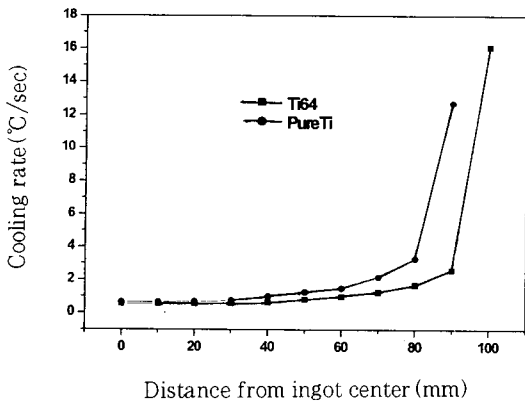


Fig. 6. Columnar/equiaxed transitions with cooling rates in VAR ingots.

성된 것으로 판단된다.

3.2 잉고트 각 부위별 냉각속도와 미세조직

Ti-6Al-4V 합금에서 잉고트 각 부위별 냉각속도에 따른 미세조직 변화를 알아보기 위해 먼저 잉고트 밀면부, 중심부, 윗면부에 대하여 냉각속도를 조사하였다(Fig. 7). 잉고트 밀면부는 잉고트 중심을 기준으로 폭 방향으로 같은 거리에 있을 때 가장 큰 냉각속도를 나타냈으며 잉고트 중심부에서 가장 작은 냉각속도 값을 나타내었다. 이것은 몰드 밀면부에서의 큰 열유량과 잉고트 윗면부에서는 복사에 의한 열전달에 기인하기 때문이다. 각각의 부위에서 냉각속도의 증가율은 위와 같은 이유에서 잉고트 밀면부, 상부, 중심부 순으로 큰 값을 가짐을 알 수 있다.

냉각속도 차이가 구별되는 잉고트 각각의 부위에서 미세조직을 Fig. 8에 나타내었다. 냉각속도가 작을수록 기지 조직인 β상에서 변태하는 α상은 폭과 길이 방향으로 조대해지는 경향을 나타내었다. 냉각속도가 가장 큰(약 3.90°C/sec) 밀면부 (f) 위치와, 가장 작은(약 0.57°C/sec) 중심부 (a) 위치에서의 냉각 속도차는 약 3.33°C/sec 정도이며, α 상의 최대 너비 차이는 약 4.9μm이었다. α/β Ti 합금의 대

표적인 합금인 Ti-6Al-4V 합금은 α상이 약 10% 이상 차지하며 상태도에서 Al과 V은 각각 α상, β상 안정화 원소로써 역할을 한다. Fig. 9는 냉각속도에 따른 α상의 분율을 나타낸 것으로 냉각속도가 느릴 때 α상 분율은 냉각속도가 약간 증가해도 크게 감소하지만 냉각속도가 어느 정도 커지면 냉각속도에 관계없이 거의 일정한 값을 가짐을 볼 수 있다. 본 실험에서 α상의 최대 분율은 잉고트 (a) 위치에서 약 0.68, 최소 분율은 (f) 위치에서 약 0.23 값을 나타냈다.

3.3 VAR공정 진행에 따른 잉고트 결정성장과 열현상

순수 티타늄 VAR 잉고트의 거시 조직을 전산모사를 이용하여 VAR 공정에 따른 잉고트의 등온도 분포, 열유량, 고상분율 변화 현상을 가시화하며 고찰하였다.

3.3.1 등온도 분포

순수 티타늄 잉고트 중심부를 절단한 거시 조직 사진과 VAR 공정이 진행됨에 따른 등온도 분포 변화를 Fig. 10에 나타내었다. 온도가 높은 3번째 색상은 약 1605~1737°C의 온도범위로서 액상에서 고상으로 변태가 일어나는 고상/액상 공존 온도 영역을 나타낸다. 공정 초기 단계에서 이 영역은 수평을 유지하며 시간이 경과함에 따라 기울기를 가지는 포물선으로 변화됨을 볼 수 있다. 결정은 온도구배가 큰 쪽에서 먼저 성장되며 성장 방향은 등온도선에 대해 법선 방향으로 일어난다. 온도 분포도에서 예측되는 결정성장 거동과 결정이 성장한 거시 조직은 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 잉고트의 최종 응고부는 고상/액상 공존 영역의 위치 변화를 통해 예측 가능하다. Fig. 10(d)에서와 같이 공정이 진행됨에 따라 고상/액상 공존 영역은 수축 결합부로 이동하고 있으며, 최후에는 이것을 둘러싼 고상에 의해 최종응고 함으로써 수축결함이 생성됨을 알 수 있다.

3.3.2 열유량

공정 초기 단계에서 용융된 용탕이 충전하는 동안 열유량(heat flux)의 변화 양상을 Fig. 11에 나타내었다. 용탕 충전시 열유량은 잉고트 전체에서 균일하게 큰 값을 가지는데, 이것은 용탕이 가지는 열에너지는 쉽게 잉고트 밖으로 방출됨을 의미한다. 그리고 액상부는 지속적으로 작은 값을

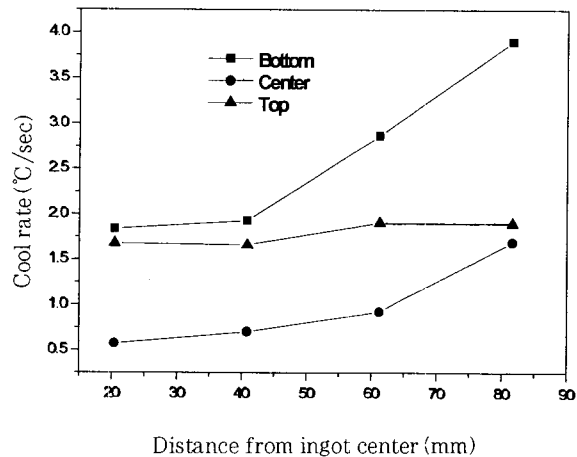
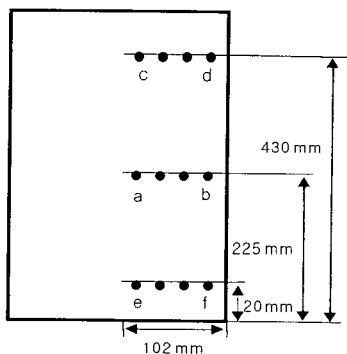


Fig. 7. Cooling rates with positions of the Ti-6Al-4V ingot. (a) Estimated positions of cooling rates (b) cooling rates at various positions of the ingot

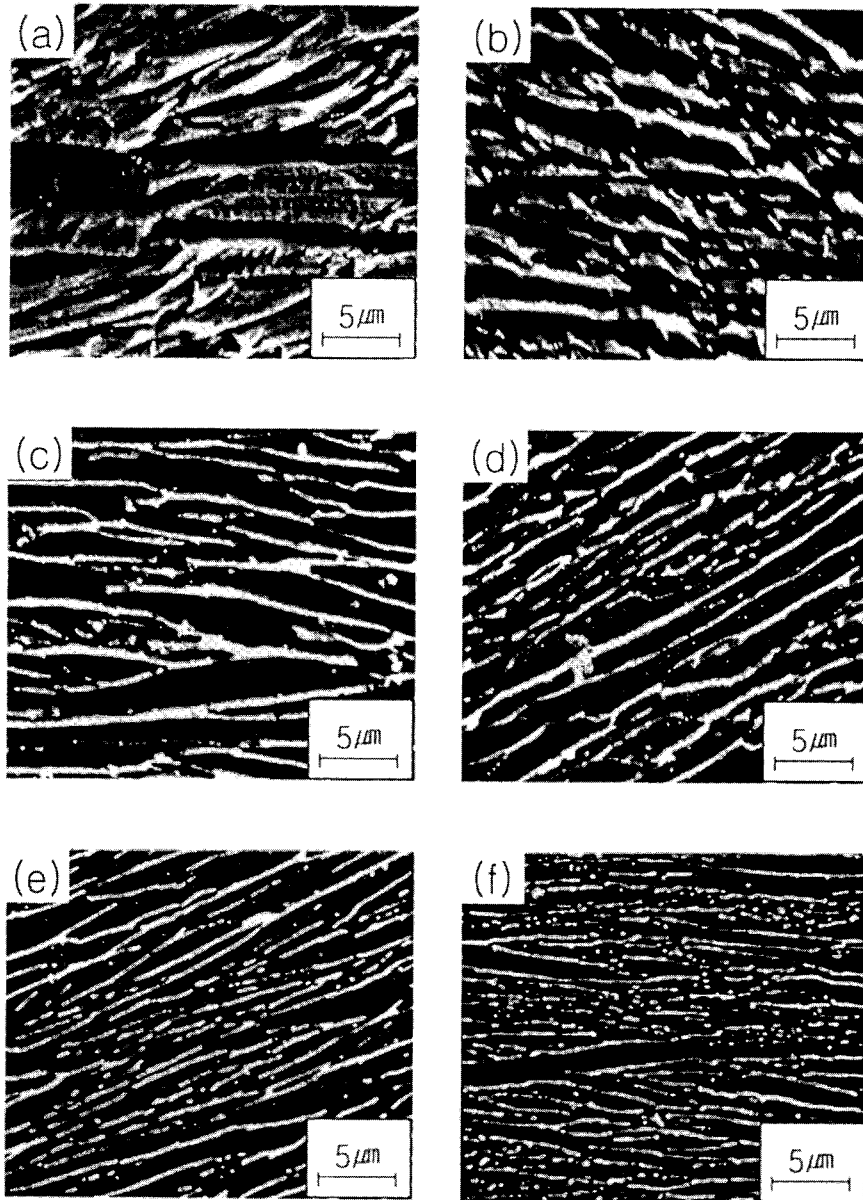


Fig. 8. Micro-structure variations with positions of the Ti-6Al-4V ingot. (a)-(f) are at the positions of the ingot in Fig. 7.

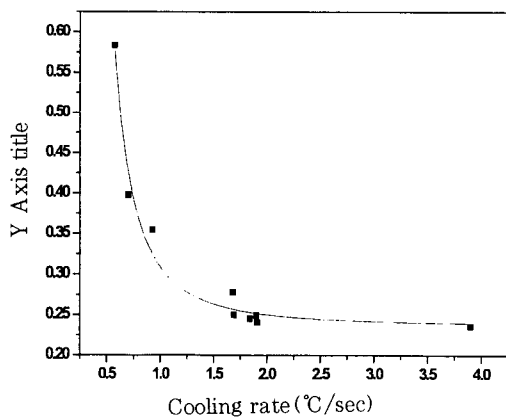


Fig. 9. The fractions of the  $\alpha$  phase with cooling rates.

갖는 것을 알 수 있다. 공정이 시작되어 7분 15초를 경과할 때 모서리 부근에서는 거리에 따른 온도 변화량이 작기 때

문에 점차 감소함을 알 수 있으며, 이러한 현상은 Fig. 11 (c)에서 더 쉽게 확인할 수 있다. 몰드 밑면에서 열유량이 점차 감소함에 따른 거시 조직에서 결정들은 몰드 측면에서 점차 크게 성장하고 있음을 볼 수 있다. 시간이 경과함에 따라 열전달은 몰드 측면에 점차 의존하게 되고 공정이 끝나고 아크에 의한 열에너지 공급이 더 이상 없을 때 결정 성장은 진공 챔버와 접한 잉고트 윗면의 복사 열전달에 영향을 받게 된다. Fig. 11 (d)에서는 복사 열전달에 의한 잉고트 윗면에서의 열유량을 볼 수 있다.

### 3.3.3 고상분율

Fig. 12는 공정이 진행될 때 고상 분율의 변화를 나타내었다. pool 형상으로 채워진 보라색은 액상 용탕, 빨간색은 100% 응고된 고상을 나타내며, 얇은 경계층 부분은 액상과 고상이 공존하는 영역을 나타낸다. 최초 공정이 진행될 때 고상/액상 공존영역은 수평을 유지하며 점차적으로 물

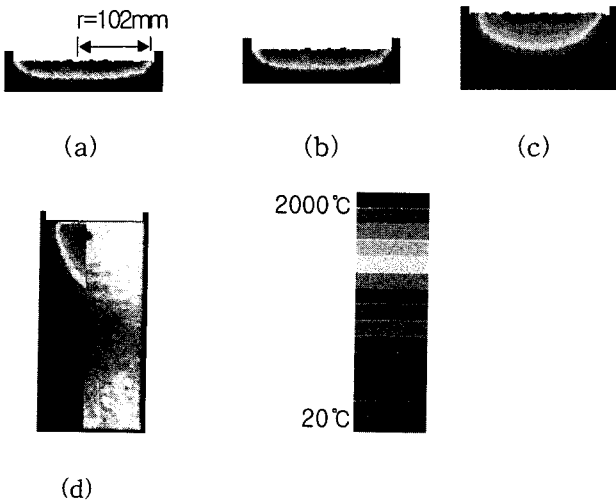


Fig. 10. Temperature profiles in (a) 1min 53sec, (b) 2min 42sec, (c) 8min 19sec, (d) 44min 34sec(end of melting) during VAR process.

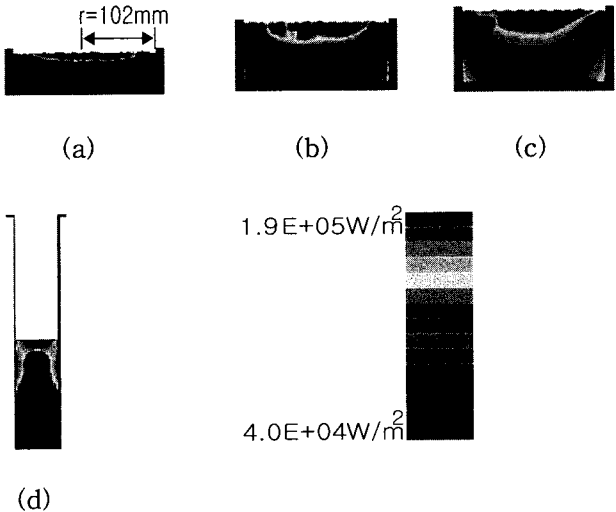


Fig. 11. Heat flux profiles in (a) 3min 4sec, (b) 7min 15sec, (c) 8min 51sec, (d) 50min 34sec(end of melting) during VAR process.

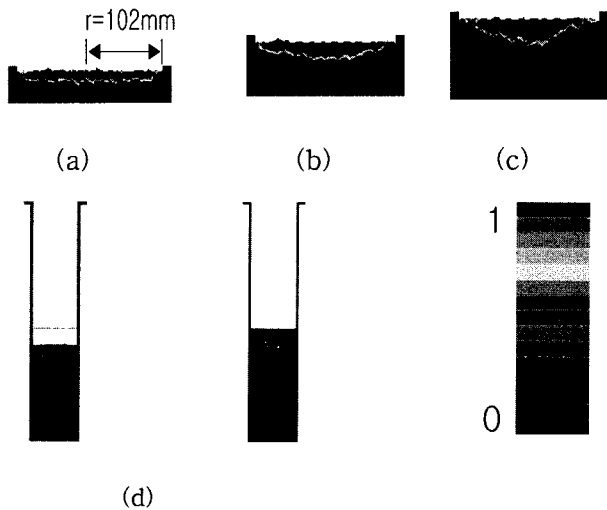


Fig. 12. Solid fraction profiles in (a) 2min 20sec, (b) 6min 38sec, (c) 8min 19sec, (d) 44min 28sec, 46min 43sec(end of melting) during VAR process.

드 벽면으로 기울어지는 것을 볼 수 있다. 이러한 변화는 온도 구배의 변화와 유사한 것으로 몰드 벽면에서 성장하는 결정들이 점차 많아지기 시작하는 잉고트 부위와 잘 일치함을 확인 할 수 있다. VAR 공정이 진행됨에 따라 소모전극의 일정한 용융 속도에 반해 액상에서 고상으로의 변화율은 점차 감소하여 반구 모양의 pool을 형성하게 된다. 고상 분율에서 최종 응고부에 의한 수축결함을 Fig. 12(d)에 나타내었다. 공정 마지막 단계에서는 복사에 의한 열전달이 일어나므로, 최종 응고부는 잉고트 내부로 이동하게 되고, 결과적으로 pool의 깊이가 클 경우 아크 발생에 의한 소모전극을 용해하는데 필요한 에너지를 많이 소비할 뿐만 아니라, 공정이 끝났을 때 수축결함에 의한 절단부가 커지므로 공정이 끝나는 마지막 단계에서는 적당한 pool의 깊이를 위한 적절한 냉각속도와 공정 변수의 조절이 필요함을 알 수 있다.

3.4 민감도

본 연구에서는 재질의 열물성치와 계면 열전달계수, 그리고 공정변수에 의한 냉각속도와 잉고트 특성을 좌우하는 pool 깊이가 해석 결과에 미치는 영향의 척도인 민감도를 조사하였다. 재질의 고온 열 물성치는 측정 장비와 측정 방법에 따라 큰 변화 값을 가지며, 특히 Ti의 경우 산소와의 강한 반응성으로 액상에서의 열 물성치 데이터는 기존 문헌상에 거의 없는 실정이다. 또한 전산모사에 있어 서로 다른 물질이 접할 경우 계면 열전달 계수는 반드시 필요한 입력 값이며, 이것은 주물 금속과 몰드의 종류 및 특성에 크게 의존할 뿐 만 아니라, 진공, 수소가스 함유 정도와 같은 주물내의 분위기에 따라서도 민감하게 변화한다. 이러한 계면 열전달 계수를 정확하게 설정하기 위해서는 열전대를 사용하여 주형 및 주물의 실제 온도를 측정하고, 그와 동시에 열전달 해석을 병행하여 계면에서의 열전달 계수를 결정하는 역 문제 (inverse problem) 해법을 사용해야 하지만, 시간과 비용이 소요되는 이러한 역 문제 해법을 모든 공정 및 합금에 적용할 수는 없기 때문에 정확한 수치를 입력하기보다 대표적인 합금에 대한 실험적 연구와 이를 통한 해석적인 방법을 사용하여 비교적 실제 구조에 근접한 계면 열전달 계수를 설정하여 사용하게 된다. 따라서 본 연구에서는

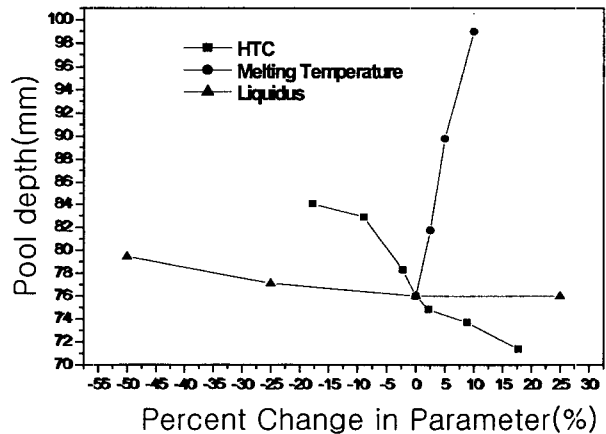


Fig. 13. Pool depth variations with VAR processing parameters at the 200mm height of the center of the ingot.

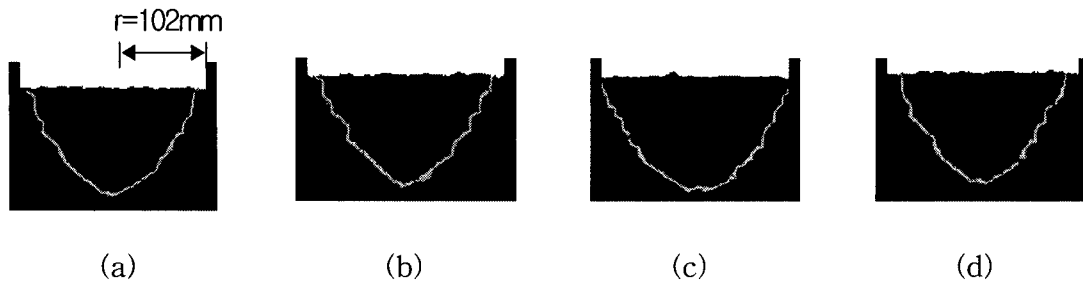


Fig. 14. The liquid pool shapes at (a) standard state, (b) 80W/m<sup>2</sup>/K higher heat transfer coefficient, (c) 200°C higher melting temperature, (d) 1632°C liquidus temperature.

Table 4. Percentage changes in the pool depth with thermal properties at various ingot heights.

Processing parameters		Pool depth change(%) at various ingot heights		
		h=72	h=150	h=327
Material Property	liquidus(-50%)	-3.2	-3.6	-7.5
Heat Transfer Coefficient	+80W/m <sup>2</sup> /K	0	-16.1	-17.2
Melting Temperature	+200°C	10.5	10.7	32.2

이들 변수값과 아울러 공정 초기값을 변화시켜 실제 주조시 중요시 취급되는 냉각속도와 pool의 깊이 변화에 대한 민감도를 측정하여 변수값의 중요도를 알아보려고 하였다.<sup>18~24)</sup>

먼저 재료의 열물성치 변화에 대한 냉각속도의 민감도는 Table 4에서와 같이 잠열과 비열의 변화량에 대해서는 전혀 변화를 보이지 않았으며 열전도도에 대해서는 미소한 변화를 보였다. 액상선 온도를 고상/액상 공존구역의 온도 범위에서 25% 감소시킬 경우 냉각속도는 증가하여 약 9.2%의 변화량을 보였다. 따라서 다른 열 물성치 보다 액상선 온도의 보다 정확한 입력이 요구됨을 알 수 있다. 계면 열전달 계수와 소모전극이 용융되는 초기 온도의 변화에 대해서는 열 물성치에 대한 값보다 상당한 민감도를 보였다. 냉각속도에 대해 민감도를 보이는 액상선 온도, 계면 열전달 계수, 용융 온도 각각의 변수에 대해 잉고트 특성을 좌우하는 pool의 깊이를 변화하는 조사하였다. 같은 변화량(%)에 대한 pool의 깊이는 용탕의 초기 온도, 계면 열전달 계수, 액상선 온도 순으로 민감하게 변화하였다(Table 4, Fig. 13). Table 4에서와 같이 계면 열전달 계수에 의한 잉고트 부위별 pool의 깊이 변화는 초기 잉고트가 작게 성장했을 때 그 변화 값이 다른 두 변수 값에 비해 크지만 잉고트가 크게 성장할수록 pool의 변화량은 거의 일정한 값을 가짐을 알 수 있으며, 이에 비해 다른 두 변수 값에 대해서는 잉고트 성장과 함께 pool의 깊이 변화량은 비례하는 경향을 볼 수 있다. 이것은 이들 변수 값은 저온에서 보다 고온에서 더 큰 민감도를 가짐을 말해준다. 공정이 진행되어 30분이 경과할 때 pool의 형상을 Fig. 14에 나타내었다. 용융 pool의 형상은 잉고트의 편석 결함과 직접적으로 관련되며 결정의 성장 방향에 대한 정보를 제공해준다. 특히 pool의 깊이는 등축정의 양을 결정하고 주상정의 크기를 결정하는 등 VAR 공정에서 pool은 중요한 의미를 내포하고 있다. Fig.

14 (b)에서와 같이 계면 열전달 계수가 증가할 경우 수냉동에 의한 열유량이 많아지기 때문에 pool의 폭은 작아져 전체 pool의 형상은 역삼각형 모양을 하게된다. 초기 소모전극이 용융되는 온도를 200°C 증가시킬 경우 pool의 형상은 고상으로 응고하지 않고 남은 액상에 의해 반원 형상을 하게된다(Fig. 14 (c)). 이때 제조된 잉고트는 소모전극이 1차 용해 용일 경우 pool은 깊이에 의한 합금 성분의 균일화가 이루어지지만 2차 3차 용해일 경우 제조된 잉고트는 용질 편석에 의한 주조 결함이 생길 수 있고 잉고트 중심부에 이상 조직이 형성되어 잉고트 특성을 저하시킬 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 초기 용탕 온도 변화에 따른 pool은 민감한 형상 변화를 보이므로 적절한 전류, 전압의 조합에 의한 공정 설정이 중요하다. 액상선 온도 변화에 의한 pool의 형상 변화는 pool의 폭 방향으로 감소하여 계면 열전달 계수를 증가 시켰을 때와 유사한 효과를 보였다(Fig. 14 (d)).

#### 4. 결 론

본 연구에서는 VAR 용해 공정에서 거시 및 미세 응고 조직 형성거동을 전산모사를 이용하여 고찰하였다.

1) 순수 티타늄, Ti-6Al-4V 합금 잉고트 제조시 용융 pool의 깊이 변화는 공정 초기 각각 같은 속도로 증가하였으나, 몰드 밀면부의 열유량의 영향이 감소하면서 용융 pool의 깊이 차이는 점차 크게 나타났다. 용해 공정 말기에서는 공급되는 열에너지와 방출되는 열에너지는 평형에 근접하여 용융 pool의 깊이 차이는 미소한 변화량을 보였다. 거시 조직에서 주상정만 존재하는 순수 티타늄에 비해 용융 pool의 깊이가 크게 나타나는 Ti-6Al-4V 합금에서는 중심부에 등축정이 존재하였다.

2) 잉고트 밀면부, 중심부, 상부에서 냉각속도는 열유량



이 큰 밀면부, 복사 열전달이 존재하는 상부, 중심부 순으로 큰 값을 가지며 각각의 부위에서 잉고트 중심으로의 냉각속도 변화량 또한 같은 순서로 큰 값을 나타내었다. 냉각속도 증가에 따른  $\alpha$ 상의 조직은 폭과 길이 방향으로 미세해지고 분율은 감소하는 경향을 보였다.

3) 잉고트 각 부위별 결정의 형태와 방향은 응고 공정 변수인 온도구배, 열유량, 고상분율 변화와 밀접한 관계를 보였으며, 실제 공정에서 얻은 잉고트에서 나타나는 최종 응고부에 의한 수축결함 위치는 온도구배 변화와 고상 분율 변화에서 예측되는 수축결함 위치와 거의 일치함을 보였다.

4) 민감도에 대해서는 먼저 냉각속도는 열 물성값인 잠열, 비열, 열전도도에 대해 거의 변화가 없었으며 액상선 온도에 대해서는 미소한 변화를 나타냈다. 계면 열전달 계수와 초기 용융 액상 온도에 대해서는 열 물성값 보다 민감한 변화를 보였으며, 이들 세 변수 값의 변화량에 대한 용융 pool의 길이 변화는 용융온도, 계면 열전달계수, 액상선 온도 순으로 민감도를 보였다.

### 감사의 글

본 연구는 국가지정연구소(NRL) 사업의 위탁연구과제로 한국기계연구원의 연구비 지원에 감사 드립니다.

### 참 고 문 헌

1. P.A. Blenkinsop : Proc. of the 5th Int. Conf. on Titanium, Munnich, West Germany (1984).
2. M. Yamada : Mater. Sci. and Eng., **A123**, 8 (1996).
3. A.M. Sherman and J.E. Allison : SAE Int. Cong. and Expo., Warrendale, PA : SAE (1986).
4. D.S. Reed and M.L. Jones : Trans. AFS, **99**, 697 (1991).
5. H.B. Bomberger and F.H. Froes : J. of Metals, **12**, 39 (1984).
6. A. Jardy, S. Hans and D. Ablitzer, "On the numerical prediction of coupled transfer and solidification process during vacuum consumable arc remelting of titanium alloy". The Minerals, Meta & Materials Society, p. 205 (1995).
7. S. Hans, "Modeling of the Coupled Heat, Solute and Momentum Transfers During Vacuum Arc Remelting (VAR)-Application to Titanium Alloy", Ph. D. thesis, Nancy, France (1995).
8. C. Prakash and V. Voller, Numerical Heat Transfer B, p. 171, 15 (1989).
9. A. Mitchell, D. Mitchell and D. Tripp, Proc. of 8th Conference on Vacuum Metallurgy, Linz, p. 1269 (1985).
10. A. Jardy, L. Falk and D. Ablitzer, Iron and Steelmaking, **19**(3), p. 226 (1992).
11. D. Grandemange, Y. Combres, B. Champin, A. Jardy, S. Hans, and D. Ablitzer : An Application to the "Wafer" Practice, Vacuum Metallurgy Division, American Vacuum Society, p.204 (1997).
12. A. Cezairliyan, J.L. McClure, and A.P. Müller, Int. J. Thermophysics, **15**, No. 5, 993-1009 (1994).
13. A. Cezairliyan, J.L. McClure, and R. Taylor, **27B**, No. 2 and 3, 251-256 (1977).
14. D. Grandemange, Y. Combres, B. Champin, A. Jardy, S. Hans, and D. Ablitzer : An Application to the "Wafer" Practice, Vacuum Metallurgy Division", American Vacuum Society, p.204 (1997).
15. A. Jardy, S. Hans and D. Ablitzer, : An Application to the "Wafer" Practice" International Symposium on Liquid Metal Processing and Casting, Santa Fe, New Mexico, **204**, (1997).
16. R.L. Williamson, F.J. Zanner and S.M. Grose, "Low Current VAR Factor Space Experiment At Cytemp Specialty Steel, Titusville, Pennsylvania," Report to the Specialty Metals Processing Consortium, Sandia National Laboratories internal publication, Albuquerque, New Mexico, (1991).
17. R.L. Williamson, "Low Current VAR Experiments At INCO Alloys, Huntington, West Virginia," Report to the Specialty Metals Processing Consortium, Sandia National Laboratories internal publication, Albuquerque, New Mexico (1992).
18. A. Cezairliyan, J.L. McClure, and A.P. Miller, Int. J. Thermophysics, **15**, No 5, 993-1009 (1994).
19. A. Cezairliyan, J.L. McClure, and R. Taylor, J. of Research of the National Bureau of Standards-A. Physics and Chemistry, **81A**, No. 2 and 3, 251-256 (1977).
20. G. Li and B.G. Thomas, Metallurgical and Materials Transactions B, **27B**, pp. 509-525 (1996).
21. Materials Properties Handbook : Titanium Alloys, ASM International (1994).
22. J.L. McClure and A. Cezairliyan, Int. J. Thermophysics, **13**, No. 1, 75-81 (1992).
23. B.A. Mueller, private communication, Howmet International, Inc., Whitehall, MI, (1996).
24. F. Zhang, Y.A. Chang, and J.S. Chou, Proceedings of the 1997 Int. Symp. on Liquid Metal Processing and Casting, A. Mitchell and P. Auburtin, eds., Vacuum Metallurgy Division, American Vacuum Society, Santa Fe, NM, **35-59** (1997).