

미소중력하에서의 재료의 응고현상-연구동향과 분석

김 신 우

호서대학교 재료공학과

The Solidification Phenomena of Materials under Microgravity-Review

Shin Woo Kim

Dept. of Materials Science & Engineering, Hoseo University

초 록 지상에서 금속제품의 제조시 필수적으로 일어나는 응고과정은 중력에 기인한 액상분리, 부력, 침전 및 대류등으로 균일하지 못한 응고조직을 보여준다. 그래서 최근의 우주비행선의 비행으로 가능하게 된 긴 시간의 미소중력 환경을 이용하여 균일하고 향상된 재료를 만들기 위하여 수행된 많은 실험들 중에서 공정, 수지상, 편정합금들의 응고와 관련된 미소중력하의 결과들을 분석하였다. 또한 지상에서 중력에 기인한 대류를 극소화시켜 균일한 응고조직을 보여준 새로운 응고방법을 조사하고 향후 미소중력하의 실험의 방향을 제시하였다.

Abstract The solidification process which inevitably occurs during the fabrication of all metal products shows the macrosegregation structure due to liquid separation, buoyancy, sedimentation and convection induced by gravity. Therefore the experimental results involving eutectic, dendritic and monotectic solidification that were carried out in order to get the improved and uniform materials in the long-time microgravity environment by the flight of space shuttle, were analyzed. In addition, the novel solidification processes on earth to minimize the gravity-driven convection and show the uniform microstructure were investigated and the future direction of solidification process under microgravity was discussed.

1. 서 론

미소중력 현상에 대한 관심은 1950년대 인간의 우주탐험 개발과 더불어 발전되기 시작하였다. 즉, 초기에 우주선의 추진(propellant) 시스템 및 관련 유체 시스템의 설계시 미소중력하에서 유체의 거동에 대한 정보가 필요하게 되었고 재료의 상변화를 이용한 열 저장체 개발과 우주공간에서 납땜과 용접에 의한 구조물의 보수시 일어날 미소중력하의 응고현상에 대한 연구가 요구되었다¹⁾. 그동안 우리가 익숙해져 온 지구중력하에서 일어나는 현상과 분명히 다를 것으로 예상되는 미소중력하의 여러가지 물리화학적 현상들을 이해하기 위하여 우리는 우선 미소중력 상태를 만드는 것이 필요하다. 지상에서 미소중력을 가장 쉽게 얻을 수 있는 방법은 3~100m의 높이를 가진 Drop

Tube와 Drop Tower라는 장치의 상부에서 물체를 자유낙하함으로써 얻을 수 있으나 매우 짧은 시간동안(1~10초) 미소중력이 유지되므로 여러가지 실험을 수행하는데 매우 한계가 있다. 그러나 실험비용이 매우 싸고 하루에 여러번 실험을 할 수 있는 장점을 가져서 액상금속의 과냉현상과 핵생성 등 기초적인 예비실험 등이 이 방법을 이용하여 행하여지고 있다. 두번째 방법은 연구용 비행기를 이용하는 것으로 포물선 비행시 대략 15~60초 동안 미소중력이 얻어지며 연구자가 실험중 접근 가능하며 한번 비행시 수십번의 포물선 비행이 가능한 장점을 가지고 있다. 세번째 방법으로는 무인의 탐사용 로켓을 200~300km 높이로 발사하여 포물선 운동시에 약 4~10분 정도의 미소중력을 얻는 것으로 우주선에 비하여 비용이 저렴하고 안전의 위험성이 없는 장점을

Table 1. The levels of gravity in the various microgravity experimental methods.

Drop tube	$10^{-5} \sim 10^{-6}$ g
Aircrafts	$10^{-2} \sim 10^{-3}$ g
Sounding Rocket	$10^{-4} \sim 10^{-5}$ g
Space Shuttle	$10^{-5} \sim 10^{-6}$ g

Table 2. The microgravity-relevant research fields and topics in materials processing.

Field	Research Topics
Undercooling	Nucleation, Amorphous Phase Containerless Process
Microstructure	Stability of S/L Interface Eutectics, Dendrites
Phase Separation	Pattern Formation Immiscible Alloys Ostwald Ripening Marangoni Convection Dispersion Hardening
Crystal Growth	Semiconductor Single Crystal Protein & Polymer Crystal Transport Coefficients
Thermophysical Properties	Surface Tension, Electro-Optical Properties Calorimetric Properties

가지며 이미 미국의 SPAR과 독일의 TEXUS와 같은 프로그램으로 많은 유용한 실험들이 수행되었다. 네번째 방법은 지구둘레의 저궤도를 도는 우주선을 이용하는 것으로 수일에서 수주동안의 긴 시간동안 미소중력 상태를 얻을 수 있기 때문에 실질적인 여러가지 실험이 가능하나 비용과 노력이 많이 요구되며 많은 실험이 불가능한 단점이 있다. 그러나 최근에 미국과 유럽 선진제국에서 우주왕복선(space shuttle)의 성공적인 비행과 우주기지(space station)의 건설계획으로 순수과학, 생명공학, 재료공학 등 여러 분야에서 본격적으로 미소중력의 새로운 환경 이용에 관심을 가지게 되었다. 위의 방법들에 의해 얻을 수 있는 미소중력의 크기는 Table 1과 같다²⁾.

지상에서 재료의 제조과정시 거의 필수적으로 일어나는 액상으로부터 고상으로의 천이 즉 응고현상은 중력의 영향으로 밀도차에 의한 액상의 분리, 부력, 침전 및 대류현상으로

균일하지 못한 응고조직을 보여준다. 그래서 이러한 중력효과가 거의 제거된 미소중력상태를 이용하여 보다 균일하고 향상된 재료를 만들기 위한 여러가지 많은 실험들이 수행되었으며 관심 연구분야들을 정리하면 Table 2와 같다^{3,4)}. 본 논문에서는 범위를 금속재료의 응고현상에 관계된 실험결과, 그중에서도 공정조직, 수지상조직, 편정조직에 국한시켜 미소중력하의 결과와 지상에서의 결과를 비교, 분석하여 미래의 연구방향을 제시하고자 한다.

2. 미소중력하의 실험

거의 모든 상업용 금속제품은 기본적으로 액상 합금의 응고와 다른 가공 공정을 통하여 제작되는 것으로 응고조직은 보통 공정상, 수지상, 편정상등으로 구성되며 이것은 재료의 성질과 밀접한 관계를 가진다. 이러한 응고조직은 합금의 조성, 응고속도, 그리고 온도기울기와 같은 응고변수들에 의하여 결정되며 이들과의 상호 관계를 구하기 위하여 그동안 많은 노력이 행하여졌다. 또한 합금 응고시 발생하는 온도와 조성의 기울기에 의하여 유도되는 밀도차와 대류로 응고조직에 편석현상이 일어나는데 이것의 원인이 되는 지구중력도 중요한 응고변수로 간주된다. 이러한 중력에 기인한 응고현상을 좀더 잘 이해하고 고품질의 재료를 제조할 목적으로 지난 20년간 미소중력하에서 합금응고에 관한 많은 실험들이 행하여졌는데 응고조직별로 결과를 정리하면 다음과 같다.

공정조직

공정조직은 액상으로부터 서로 다른 두 개의 고상이 동시에 석출되는 것으로 고상의 상대적 부피분율에 따라 크게 두 가지로 구별되는데 판상형태(lamellar)와 막대형태(rod-like)로 나누어진다. 미소중력하에서 공정계 실험의 주요한 관심은 중력에 의하여 발생되는 대류가 크게 감소됨에 따라 기계적, 전기적 응용에 보다 적합한 결함이 없는 규칙적 공정 응고조직의 생산 가능성이다. 또 다른 목적은 기계적 성질과 밀접한 공정조직의 총간격 또는 막대간격의 미소중력에서의 변화와 이론적 공정 응고이론에 대한 분석이다. 그동안 이루어진 실험결과를 요약한 Table 3에서 보듯이 판상형태의 공정조직은 총간격과 결함수에 있어

Table 3. A comparison of eutectic spacings in microgravity with those in unit-gravity.

Lamellar	Spacing Comparison	Ref.
Al-Cu	$\lambda(\mu g) = \lambda(1g)$	5, 6
Zn-Sn	$\lambda(\mu g) = \lambda(1g)$	6
Al-Si	$\lambda(\mu g) = \lambda(1g)$	6
Ag-Ge	$\lambda(\mu g) = \lambda(1g)$	7
Fe-C	$\lambda(\mu g) = \lambda(1g)$	8
Rod-like		
NaF-NaCl	$\lambda(\mu g) > \lambda(1g)$	9
LiF-NaCl	$\lambda(\mu g) > \lambda(1g)$	10
Al-Al ₃ Ni	$\lambda(\mu g) > \lambda(1g)$	7
Ni-Ni ₃ Al, Mo	$\lambda(\mu g) > \lambda(1g)$	11
InSb-NiSb	$\lambda(\mu g) < \lambda(1g)$	12
MnBi-Bi	$\lambda(\mu g) < \lambda(1g)$	13

지상의 실험결과와 거의 같은 것을 알 수 있으나 막대형태의 공정조직은 InSb-NiSb, MnBi-Bi와 같은 재료에서는 미소중력에서 막대간격이 감소되었으나 Al₃Ni-Al, NaF-NaCl, Ag-Cu 등과 같은 재료에서는 반대로 미소중력에서 막대간격이 증가하는 결과를 보여 주었다^{5~10}. 이와 같이 일관되지 못한 실험결과는 Marangoni 대류와 액상-고상의 부피차에 의한 대류같은 중력과 무관한 잔류대류가 각 공정 합금계의 특

성에 따라 미치는 영향의 차이에 기인한 것으로 추정되며 향후 지상과 우주실험에서 증명되어야 할 과제이다. 또한 미소중력하의 실험수행이 이상적으로 지상에서 행한 실험조건과 완전히 동일하게 이루어지지 않은 원인도 있을 것으로 생각된다. 기타 Al-Si, Fe-C, Ag-Ge 공정계의 불규칙한 형태조사도 이루어졌는데 지상에서의 결과와 거의 비슷한 것으로 판명되었다^{6~9}. 결과적으로 막대형태의 공정계만 중력의 변화에 민감한 것으로 나타났으며 미래의 실험대상으로 남게 되었다.

수지상 조직

수지상 조직은 고상-액상 계면의 불안정성에 의하여 형성되는 것으로 계면에서의 온도기울기, 응고속도, 용질원자의 분포와 같은 인자들에 의하여 결정된다. 특히 지상에서는 용질과 온도기울기의 밀도차에 의한 대류가 발생하여 심한 용질 편석현상이 나타나고 또한 수지상이 불균일하게 분포하는 응집현상(clustering)이 일어난다. 미소중력은 이러한 중력에 기인한 대류를 최소화할 것이고 균일한 용질분포와 수지상 응고조직을 보여줄 것으로 예상된다. 실제로 Al-Cu, Sn-Pb 등의 합금계를 이용하여 실험이 이루어졌으며 앞의 공정

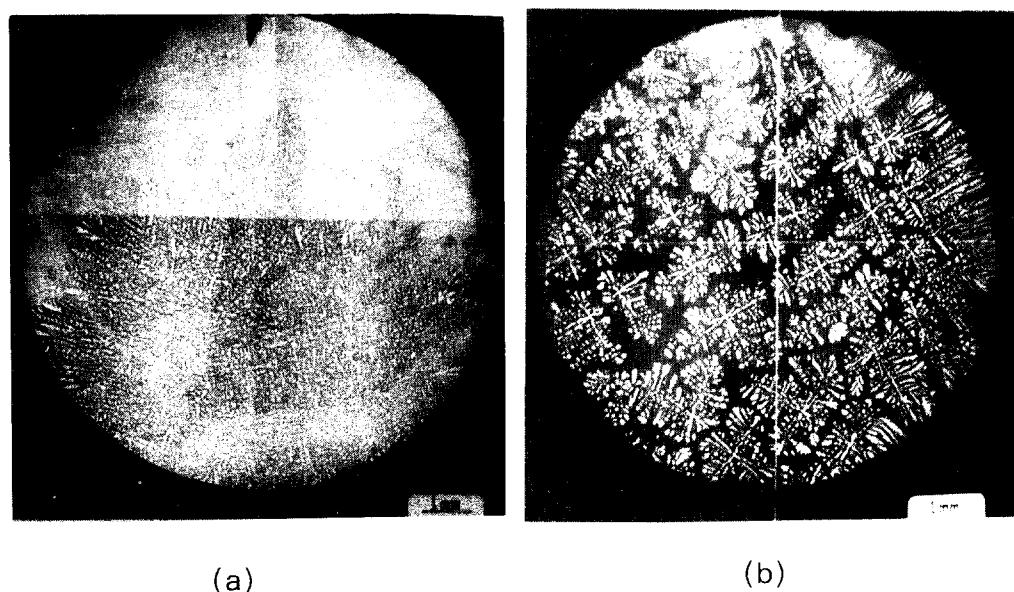


Fig. 1. Cross-sectional micrographs of an Al-26wt% Cu alloy: (a) solidified in 1g (b) in microgravity.(From ref. 15)

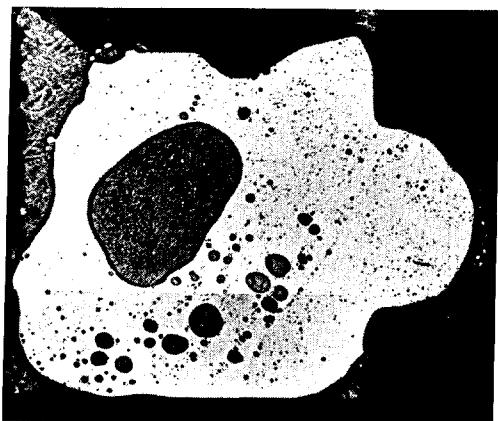
조직과는 달리 미소중력과 지상에서 응고된 시편 사이에 큰 차이가 Fig. 1의 단면 조직사진에서 잘 나타나고 있다^[4, 15]. Fig. 1의 결과로부터 대류에 의한 영향이 특히 심각한 큰 고액 응고범위와 적은 수지상 부피분율을 가지고 느린 응고속도에서 응고되는 Pb-Cu와 같은 합금계에 대하여 미소중력상태는 균일한 수지상 응고조직을 만드는데 더욱 효과적일 것으로 생각된다^[36]. 위의 실험에서 기계적 성질과 밀접한 관계가 있는 1차 수지상 가지간격은 미소중력하에서 더 큰 것으로 밝혀졌다. 또한 주조품에서 주상정과 등축정 수지상 영역의 형성기구가 주요한 관점으로 $\text{NH}_4\text{Cl}-\text{H}_2\text{O}$, $\text{Sn}-\text{Pb}$, $\text{Sn}-\text{Bi}$ 등을 이용한 미소중력하의 실험에서 조대한 입자와 증가된 주상정 응고조직이 얻어졌다^[16, 17]. 이것 역시 중력에 기인한 대류의 감소로 수지상 가지의 재용해와 같은 현상이 감소하여 핵생성수가 억제된 이유로 생각된다.

편정 조직

편정반응은 공정반응과 유사한 형태로 액상 I로부터 액상 II와 고상이 동시에 석출되는 것으로 보통 액상 I과 액상 II는 조성과 밀도가 상당히 다르기 때문에 응고과정시 중력에 기인하여 서로 분리(separation), 합체(coalescence)되어 심한 거시적 편석의 원인이 되어 열악한 응고조직을 보여주었다^[18~25]. 그래서 일찍부터 열역학적으로 두 가지 액상이 공존하는 액상분리 영역(miscibility gap)을 가지는 Zn-Bi, Al-In과 같은 합금계가 미소중력실험의 대상이 되어 두상이 서로 균일하게 분산된 조직을 얻을 것으로 예상되었다. 그러나 Fig. 2과 같이 기대와는 달리 여전히 심하게 편석된 응고조직을 보여주었다^[26~30]. 이것은 미소중력이 밀도차에 의한 분리현상을 최소화 할 수 있으나 도가니 용기의 벽과 두 액상간의 상대적 접촉(wetting)성질과 표면 에너지의 기울기에 기인한 Marangoni 대류와 같은 중력에 무관한 인자들에 기인한 것으로 생각된다. 그래서 향후 실험은 이러한 예상밖의 인자들이 미치는 영향들을 정확히 분석하는데 초점이 맞추어 질 것이다.

3. 지상에서의 실험

실험하기에 충분히 긴 시간동안 미소중력



Zinc-0.09 mol fraction Bismuth

Fig. 2. Microstructure of a hypermonotectic Zn-Bi alloy processed in a microgravity(From ref.28).

을 유지하는 것이 최근의 우주왕복선의 성공적 비행으로 쉽게 가능하여 졌으나 아직까지 비용과 시간이 많이 소비되고 실험횟수가 극히 제한적이므로 광범위하고 지속적인 지상에서의 많은 연구와 실험이 필수적이다. 즉 지상에서의 연구결과는 우주비행 실험조건, 방법, 종류등을 최적화하여 미소중력하의 성공적이고 유용한 실험결과가 얻어지는데 기여할 것이며 또한 미소중력하의 실험결과를 비교, 평가하는데 기초자료가 될 것이다.

대부분의 주조제품의 응고조직을 이루는 수지상 결정성장은 재료의 기계적, 전기적, 자기적 성질에 매우 중요하기 때문에 그동안 많은 연구가 이루어졌다. 그중에서 특히 1차 수지상 가지간격(primary dendrite arm spacing)과 응고변수들(온도기울기, 합금조성, 응고속도)의 관계를 구하는 상당한 노력이 있어 일반적으로 받아 들여지는 3개의 모델식이 존재하는데 다음과 같은 관계식으로 요약될 수 있다^[31~33].

$$\lambda_1 = KG^{1/2}V^{-1/4}C_0^{1/4}$$

여기서 λ_1 은 1차 수지상 가지간격, G는 고액계면에서의 액상 온도기울기, V는 응고속도, C_0 는 합금의 조성 그리고 K는 재료에 의한 상수를 각각 나타낸다. 그러나 이 관계식은 고액계면에서의 대류현상을 전혀 고려하지 않은 것으로 미소중력하에서 더욱 잘 적용될 것으로 생각된다. J.D.Verhoeven 등은 용매원자보다 용질원자가 무거운 합금계(Pb-Au, Pb-Pd,

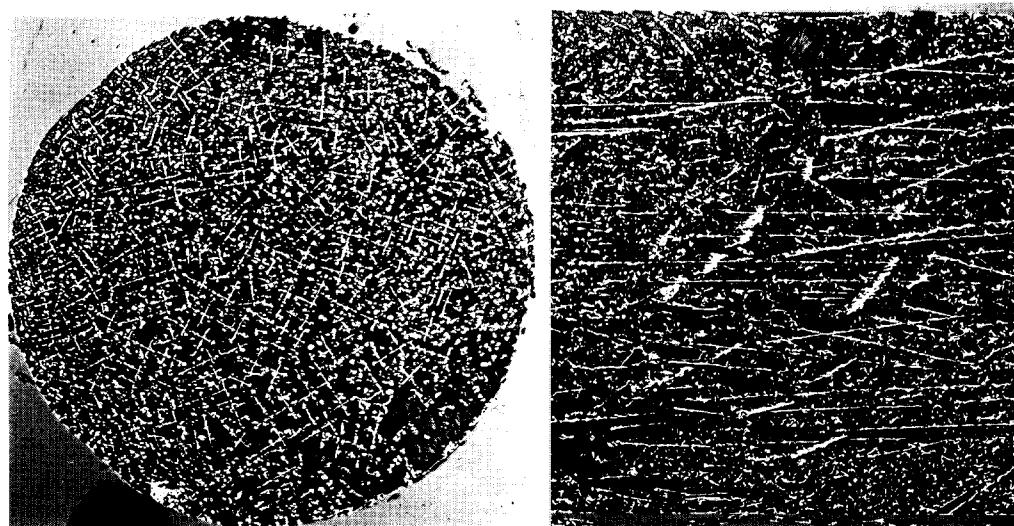


Fig. 3. Micrographs of longitudinal and transverse sections from Pb-20wt% Cu sample(diameter : 5mm) directionally solidified horizontally at a growth velocity, 20 μ m/s and rotation rate, 0.18rpm.(From ref.36)

Sn-Pb)와 가벼운 합금계(Pb-Sn) 그리고 중력과 평행하고 반대인 두경우의 응고방향을 조합하여 실험한 결과, 용질의 농도기울기와 온도기울기의 상호작용으로 발생하는 수평방향의 대류의 정도에 따라 수지상 결정의 응집현상(clustering)과 첨탑현상(steepling)이 일어나는 것을 밝혔다³⁴⁾. Table 4에서 보듯이 용질이 무거운 합금계에서는 중력과 평행한 응고방향일 때 그리고 용질이 가벼운 합금계에서는 중력과 반대의 응고방향일 때 위의 두 현상이 제거되었으나 응고 길이방향으로 용질의 편석이 일어나는 것으로 알려졌다. 또한 M.D. Dupouy 등은 Al-Cu 합금의 일방향 응고시 발생하는 대류현상에 대하여 중력에 대한 응고방향을 평행, 반평행, 수직의 세 가지로 바꾸어 위와 유사한 실험결과를 얻었다³⁵⁾. 최근에 이러한 결과를 토대로 Pb-Cu

합금을 이용하여 중력과 수직방향으로 응고함과 동시에 축방향 회전을 가하는 새로운 응고방법으로 Fig. 3과 같이 Cu 수지상이 균일하게 분포한 응고조직을 얻었다^{36, 37)}. 이 결과는 Fig. 1의 미소중력하의 균일한 수지상 응고조직과 비교할때 매우 유사한 결과이며 지상에서도 응고방법의 최적화로 대류현상을 최소화할 수 있는 가능성을 보여 주었다.

그동안 액상분리 영역을 보여주는 재료를 이용하여 행한 많은 실험결과들은 공존하는 두액상의 조성과 밀도차에 기인한 분리현상으로 심한 거시적 편석현상을 피할 수 없는 것으로 알려졌다. 그러나 새로운 시도로써 편정계의 유기재료와 Al-In과 같은 액상내에 균일하게 잘 배열된 섬유를 포함시켜 응고시 액상 II가 표면장력에 의하여 섬유에 선택적으로 부착되어 상분리를 방지, 기지내에 균일하게 분포하는 좋은 결과를 얻었으며^{38, 39)} 그러한 응고과정은 Fig. 4에서 잘 나타난다. 그러나 이러한 방법을 표면장력이 우세하게 작용하는 미소중력하에 적용하면 더욱 효과적인 상분포의 결과를 얻을 것으로 생각된다.

4. 미소중력하의 응고실험의 전망

앞의 분석으로부터 공정계에서는 막대형 응고조직이 중력의 변화에 민감한 반응을 보여

Table 4. Cluster and steepling formation results for the four alloys.(from ref.34)

Alloy System	Solute Density	Clustering and Steepling	
		V↑↓g	V↓↓g
Pb-Au	Heavy	Yes	No
Pb-3Pd	Heavy	Yes	No
Sn-31Pb	Heavy	Yes	No
Pb-40Sn	Light	No	Yes

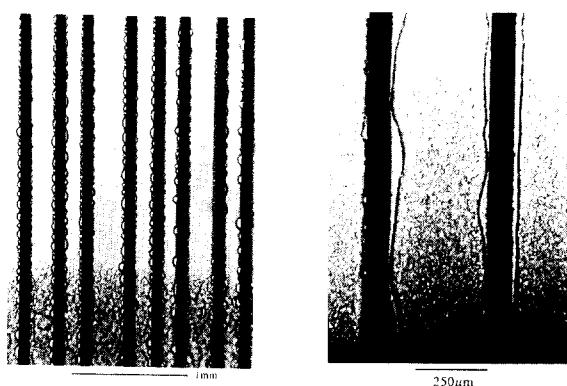


Fig. 4. Liquid II distribution on Enamel-coated Cu fibers in Succinonitrile-10wt% Glycerine.(From ref.38)

주었으며 특히 막대 간격의 크기가 실험재료에 따라 증감의 경향이 각기 다르게 나타났기 때문에 잔류대류의 합금계에 미치는 영향을 재분석하여 여러 종류의 공정계를 조직적으로 선별, 같은 조건하에서 동시에 미소중력실험을 실시함으로 초기 실험결과의 원인을 정확히 규명할 수 있을 것이다. 수지상 응고에서는 지상에서 많은 실험결과로 최적의 실험조건 등이 얻어진 Pb-Cu, Al-Cu, Sn-Pb 합금계 등을 일방향응고하여 응고변수에 따른 수지상 가지 간격을 조사, 기존의 수지상 가지간격 이론식의 타당성을 검토할 수 있을 것으로 생각된다. 편정계에서는 Marangoni 대류를 발생시키는 자유표면장력의 효과를 최소화하는 실험방법의 개발이 필요하며 또한 상분리를 감소시키기 위한 새로운 시도로써 액상내에 섬유를 배열시켜 복합재료를 응고시키는 실험은 표면장력의 역할을 보여주는 좋은 결과가 예상된다.

5. 결 론

미소중력하의 재료 응고실험들은 중력에 기인한 대류의 감소로 용질편석과 상분리와 같은 지상에서의 여러가지 응고결합들이 제거된 좋은 결과를 예상하였으나 과소 평가하였던 표면장력에 기인한 대류현상과 불안정한 실험으로 빈약한 결과가 얻어졌다. 그러나 이러한 초기의 실험결과와 방법의 시행착오를 분석, 제거하여 최근의 우주 비행선의 성공적 비행과 향후 우주기지의 설치예정으로 본격적으로 시작되는 미소중력 시대에는 많은 새로운 재료와 공정이 개발될 것으로 기대된다. 또한 지

상에서의 광범위하고 지속적인 연구와 실험은 미소중력실험의 성공과 최적화에 필수적이다.

감사의 글

본 연구는 1995년도 호서대학교 교내연구비에 의해 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. R.J.Naumann, Material Sciences in Space, Springer-Verlag, 11 (1986).
2. H.Hamacher, Material Sciences in Space, Springer-Verlag, 31 (1988)
3. R.Jansen and P.R.Sahm, Mater. Sci. and Engr., 65, 199 (1984)
4. M.J.Wargo, NASA Research Announcement, NRA-94-OLMSA-06
5. E.A.Hasenmeyer, C.V.Lovoy and L.L. Lacy, Proc. 3rd Space Processing Symp. Skylab Results, NASA Report M74-5, 1, 457 (1974)
6. T.Carlberg, Materials Sciences in Space, Proc. 3rd European Symposium, ESA SP-142, 221 (1979)
7. J.J.Favier and J.de Goer, Materials Science under Microgravity, Proc. 5th European Symposium, ESA SP-222, 127 (1984)
8. H.Nieswaag and Malinowska, Scientific Results of the German Spacelab Mission D1, Norderney Symp., 349 (1986)
9. A.S.Yue, Proc. 3rd Space Processing Symp. Skylab Results, NASA Report M74-5, 1, 469 (1974)
10. A.S.Yue, Apollo-Soyuz Test Project Experiment MA131, (1977)
11. H.J.Sprenger, Scientific Results of the German Spacelab Mission D1, Norderney Symp., 342 (1986)
12. G.Muller and P.Kyr, Materials Science under Microgravity, Proc. 5th European Symposium, ESA SP-222, 141 (1984)
13. R.G.Pirich and D.J.Larson, Materials Processing in the Reduced Gravity Environment of Space, Elsevier Pub., 9, 523 (1982)

14. J.J.Favier et al., *Acta Astronautica*, **9**, 235 (1982)
15. D.Camel, J.J.Favier, M.D.Dupouy and R. Lemaguet, *Scientific Results of the German Spacelab Mission D1, Norderney Symp.*, **236** (1986)
16. M.H.Johnston and R.A.Parr, *Proc. MRS Symp.*, **9**, (1982)
17. S.V.Bourgeois, P.G.Grodzka, J.E.Pond, L. W.Spradley, *LKHD Report LMSC-HREC TR D 4977400, NASS-32401*
18. J.D.Livingston and H.E.Cline, *Trans. TMS-AIME*, **245**, 351 (1969)
19. G.A.Chadwick, *Brit. J. Appl. Phys.*, **16**, 1095 (1965)
20. J.D.Livingston, *Mater. Sci. Eng.*, **7**, 61 (1971)
21. J.W.Cahn, *Metall. Trans.A*, **10A**, 119 (1979)
22. R.N.Grugel and A.Hellawell, *Metall. Trans.A*, **12A**, 669 (1981)
23. B.Derby and J.J.Favier, *Acta Metall.*, **31**, 1123 (1987)
24. A.Bergman, T.Carlberg, H.Fredriksson and J.Stjerndahl, *Materials Processing in the Reduced Gravity Environment of Space*, Elsevier Pub., **9**, 579 (1982)
25. R.N.Grugel, T.A.Lograsso and A. Hellawell, *Materials Processing in the Reduced Gravity Environment of Space*, Elsevier Pub., **9**, 553 (1982)
26. T.Carlberg and H.Fredriksson, *Metall. Trans.A*, **11A**, 1665 (1980)
27. S.H.Gelles, J.Markworth and C.E.Mobley, *Materials Science under Microgravity*, Proc. 4th European Symposium, **307** (1983)
28. H.Ahlborn and K.Löhberg, *Materials Science under Microgravity*, Proc. 5th European Symposium, *ESA SP-222*, **55** (1984)
29. B.K.Dhindaw, D.M.Stefanescu, A.K.Sing and P.A.Curreri, *Metall. Trans.A*, **19A**, 2839 (1988)
30. A.C.Sandlin, J.B.Andrews and P.A. Curreri, *Metall.Trans.A*, **19A**, 2665 (1988)
31. J.D.Hunt, *Solidification and Casting of Metals*, The Metals Society, London, **3**, (1979)
32. W.Kurz and D.J.Fisher, *Acta Metall.*, **29**, 11 (1981)
33. R.Trivedi, *Metall. Trans.A*, **15A**, 977 (1984)
34. J.D.Verhoeven, J.T.Mason and R.Trivedi, *Metall. Trans.A*, **17A**, 991 (1986)
35. M.D.Dupouy, D.Camel and J.J.Favier, *Acta Metall.*, **37**, 1989 (1143)
36. Shinwoo Kim, Ph.D.Thesis, Dept. of MSE, Vanderbilt Uni., Nashville, TN, U.S.A., (1992)
37. R.N.Grugel, Shinwoo Kim, Tracey Woodward and T.G.Wang, *J. of Crystal Growth*, **121**, 599 (1992).
38. R.N.Grugel, *Metall.Trans.B*, **22B**, 339 (1991)
39. R.N.Grugel and S.Nourbakhsh, *4th Inter. Conf. on Experimental Methods for Microgravity Materials Science Research*, *TMS*, **81** (1992)