

정전기 부유 무용기 용해 및 응고 장비

성연수[†] · 김명호

창원대학교 중점연구소 나노·신소재공학부

An Apparatus for Containerless Melting and Solidification of Materials Via Electrostatic Levitation

Y. S. Sung[†] and M. H. Kim

Priority Research Institute, School of Nano & Advanced Materials Engineering,
Changwon National University, Changwon, Gyeongnam 641-773, Korea

(2006년 5월 26일 받음, 2006년 7월 10일 최종수정본 받음)

Abstract An apparatus capable of melting and solidifying various materials containerlessly in high vacuum via electrostatic levitation (ESL) has been developed for finding materials with new or improved properties and further building a database for processing materials in microgravity. Containerless solidification of semiconductors, metals, and alloys such as Si, Zr, Nb, Mo, V₃Si, and boron carbides has been carried out to test how various materials at how high temperatures can be processed by ESL. The materials in levitation became spherical at melting by their own surface tensions which were ideal for measuring intrinsic thermophysical properties of materials in the liquid state. Multiple cycles of melting and cooling were reproducibly repeated and radiative cooling curves were recorded.

Key words electrostatic levitation, containerless solidification.

1. 서 론

무용기(containerless) 용해 및 응고는 용기(container)를 사용한 재료의 용해에 있어서 필연적으로 수반되는 용기와 용탕(melt)간의 반응으로 인하여 초래되는 문제들을 원천적으로 배제한다. 이는 궁극적으로 재료 외적인(extrinsic) 요인이 배제된 상태에서 재료 자체(intrinsic)만의 용해 및 응고(solidification)에 관한 연구를 비롯하여 재료의 액체 상태에서의 열물리적(thermophysical) 특성에 대한 연구를 가능하게 하는 중요한 수단으로 활용될 수 있다. 또한 용기의 존재로 인하여 발생하는 불균일 핵생성(heterogeneous nucleation)이 없어짐에 따른 과냉(undercooling)의 증가를 통하여 재료의 특성개선은 물론 일반적인 용해 및 응고 조건에서는 실현되지 않는 신소재의 탐색 및 개발에도 이용될 수 있다.

금속과 같은 전도성 재료뿐만이 아니라 반도체 및 부도체의 비전도성 재료들의 무용기 용해 및 응고가 가능한 정전기부유(Electrostatic Levitation, ESL)장비는 앞서 언급한 재료에 관한 기초 연구뿐만이 아니라 장차 무중력 고진공의 우주 환경에서의 소재개발을 염두에 둔 지상연구 및 데이터베이스 구축에 그 목적을 두고 개발되

었다. 지금까지 각종 금속, 반도체 및 비정질 합금 등 다양한 재료들의 액체 상태에서의 열물리적 특성들을 측정하는데 사용되었는데 고진공에서 정전기를 이용하여 재료를 부유하고 용해하는데 수반되는 설비 및 실험적인 어려움으로 인하여 장비의 잠재적 효용성에 비하여 많이 보급되지 않고 현재 미국 Jet Propulsion Laboratory(JPL)와 일본 Japan Aerospace Exploration Agency(JAXA)에 1대씩 운용되고 있다.

본 논문에서는 일본의 National Institute for Materials Science(NIMS)에서 개발하였던 정전기부유장비를 토대로 장비를 소개하고 그를 이용하여 얻은 실험 및 결과에 관하여 보고한다.

2. 배 경

무용기 용해 및 응고를 실현시키는 장비로 자유낙하를 이용하는 drop tube(또는 tower) 장비들¹⁻³⁾과 부유(levitation)를 이용하는 장비들⁴⁻³³⁾이 개발되었는데 각각의 장비들은 상대적으로 장단점이 있다. 예를 들어 자유낙하를 이용한 경우 tube의 길이가 실험하고자 하는 재료의 등속자유낙하 조건이 만족될 정도로 충분히 길다면 용해된 재료를 낙하시키면서 무용기 응고를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 등속자유낙하 도중 무중력 상태를 얻을 수

[†]E-Mail : yssung@changwon.ac.kr

있다. 즉 조건만 만족되면 무중력 상태에서 무용기 응고된 재료를 얻을 수 있게 된다. 이러한 실험결과들은 장차 우주 환경에서의 재료공정 및 소재개발에 대비한 지상연구로서의 데이터베이스 구축에 바로 활용될 수 있다는 점에서 다른 장비들에 비하여 장점이 된다. 하지만 정지 상태가 아닌 자유낙하 도중의 재료의 관측은 다른 정적인 장비들에 비하여 실험적으로나 시간적으로 제한되기 때문에 예를 들어 응고 전후의 재료의 물성측정이 용이하지 않다는 단점이 있다. 또한 자유낙하를 통하여 얻을 수 있는 재료의 크기는 tube의 길이에 의존하여 한정되는데 tube가 길어지면 길어질수록 장비의 설치 비용이 증가할 뿐만 아니라 설치 후 tube 내외부의 상태 및 설비의 유지가 쉽지가 않다는 단점이 있다.

한편 부유를 이용한 장비들은 음파(aeroacoustic),^{4,5)} 전자기(electromagnetic)⁶⁻¹⁰⁾ 또는 정전기(electrostatic)¹¹⁻³³⁾를 이용하여 재료를 부유(levitation)시켜 무용기 상태를 얻는 것이다. 자유낙하를 이용한 장비들에 비하여 부유를 이용한 장비들은 같은 크기의 재료들을 얻기 위한 장비의 크기가 상대적으로 작다는 장점이 있다. 장비의 종류와 크기에 따라 다르지만 상대적으로 개발된 지 얼마 안 되거나 최소한 음파 또는 정전기 장비의 경우 수십-수백 mg 정도의 재료의 부유가 가능한데 비하여 상대적으로 가장 오래 되고 보편적인 전자기 장비의 경우 수 kg의 재료를 부유시킬 수 있다는 점이 전자기 장비의 실용적인 장점이다. 음파를 이용한 장비는 폐쇄적이 아닌 개방된 상태에서 재료에 고속 고압의 음파를 가하여 재료를 부유시키는 장비로서 재료의 종류에 구애를 받지 않고 관측이 용이하며 용해 중인 재료에 응고를 유발시키는 seed의 접촉 등을 이용한 핵생성 및 응고에 대한 실험이 가능하다는 장점이 있으나 필연적으로 음파에 의한 turbulence가 재료에 초래되는 단점이 있다. 정전기를 이용한 부유장비는 정전기로 재료를 대전(charging)시켜 부유시키기 때문에 전자기를 이용한 부유장비가 전도성을 가지는 재료 즉 금속류의 부유에 한정됨에 반하여 음파를 이용한 장비와 마찬가지로 금속뿐만 아니라 반도체 및 세라믹 등 다양한 재료의 부유가 가능하다는 점이 장점이다. 또한 고진공의 깨끗한 분위기에서 부유 중의 재료에 turbulence가 발생하지 않는 안정된 상태에서 재료의 용해 및 응고를 수행할 수 있기 때문에 재료의 응고 전후의 물성 측정이 용이하다는 장점이 있다. 반면에 정전기로 재료를 부유시키기 위한 고전압 및 고진공 장비와 용해에 관련하여 다른 장비들에 비하여 상대적으로 설비 비용이 많이 드는 단점이 있다.

3. 실험 방법

ESL 장비는 크게 재료를 대전시키고 부유시키는 장치,

부유 중 재료의 움직임을 관찰하고 제어하는 장치, 재료를 가열하는 장치, 가열 및 냉각을 측정하는 장치, 장비의 진공을 유지하는 장치로 구성된다.

3.1 대전 및 부유

ESL 공정에서 재료의 대전은 capacitive charging, photoelectric charging 그리고 thermionic charging의 3가지 원리에 의하여 이루어진다. 본 연구에서 사용된 정전기 부유장비에는 Fig. 1에 보인 바와 같이 상부에 1개, 하부에 2개의 전극을 동심원적으로 위치시켜 인가하는 전압에 차이를 주어 'potential well'을 형성시켜 부유 중의 재료가 항상 potential well의 중심 즉 상하 전극 사이의 중심에 위치되도록 하였다. 재료의 부유는 하부 중앙에 위치한 전극 위에 재료를 놓고 0~15 kV의 플러스의 전압을 가하고 상부 전극에는 0~10 kV의 마이너스의 전압을 가감하여 시작되어 Eq. 1의 force-balance로 유지된다.

$$mg = qE \quad (1)$$

여기서 m =mass, g =gravitational acceleration, q =charge, E =electric field이다.

일단 부유된 재료의 대전 상태는 자외선(ultraviolet, UV) 램프에 의한 재료 표면에서의 photoelectric emission 현상으로 유지된다. Fig. 2에 보인 바와 같이 250 W의 UV-rich mercury 램프에 의해 발생된 자외선이 렌즈를 통하여 재료 표면에 초점이 모이므로 램프의 반대 편에는 Al_2O_3 를 코팅한 mirror를 설치하여 재료를 지나친 자외선 또한 반사되어 재료를 비추게 하여 재료의 모든 부분에서 자외선에 대하여 그늘진 부분이 없도록 하여 자외선에 의한 대전이 균일하게 유지되도록 하였다. 레이저를 조사하여 재료가 가열되기 시작하면 추가적으로

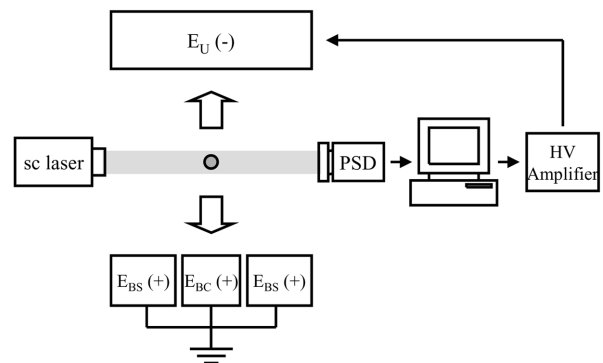


Fig. 1. A side view of the electrode assembly inside the ESL chamber. Also shown is the principle of keeping a sample being levitated during ESL process: E_U =upper electrode, E_{BC} =bottom center electrode, E_{BS} =bottom surrounding electrode, sc laser=positioning semiconductor laser, and PSD=two dimensional position sensitive detector.

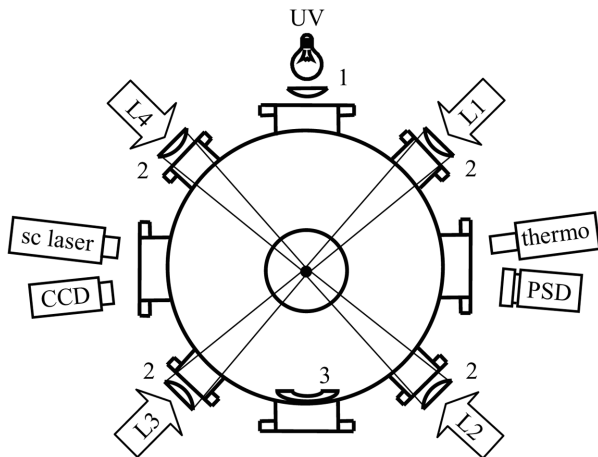


Fig. 2. A schematic showing the array of components of the ESL system used in this study: UV=UV lamp, 1=UV lens, 2=laser lens, 3=UV mirror, thermo=infrared radiation thermometer, CCD=CCD camera, and L1-L4=four branched laser beams.

thermionic emission 현상에 의한 대전이 더해져서 전하의 run-away를 상쇄하여 재료의 부유 상태가 유지된다.

3.2 위치제어

부유 중의 재료의 움직임은 가시광선 반도체 레이저 ($\lambda=0.67 \mu\text{m}$)와 2차원 position sensitive detector(PSD)를 이용하여 관측하고 제어하였다. 부유 중인 재료에 의하여 생기는 그림자가 PSD에 관측되고 상부와 하부의 전극 사이 부유의 중심위치로부터의 변위가 발생하면 proportional-integral-derivative(PID) 제어 컴퓨터를 통하여 변위에 대응하여 상부 전극으로 인가되는 전압이 실시간으로 변화되도록 하여 재료의 위치를 제어하였다.

3.3 가열

재료의 가열을 위하여 250 W와 150 W의 Nd-YAG (Yttria-Alumina-Garnet) ($\lambda=1.064 \mu\text{m}$) 레이저 발진장치 2대를 사용하였다. 균일한 가열을 위하여 각각의 레이저 beam을 50% 반사/투과(reflection/transmission) 거울과 광섬유(optical fiber)를 이용하여 2개씩으로 분할(branching)하여 Fig. 2와 같이 도합 4개의 레이저 beam이 4방향에서 재료에 조사되도록 하였다. 또한 레이저의 출력 조절과 더불어 렌즈를 이용하여 각 beam들의 초점거리를 변동시켜 재료 표면 상의 가열 면적을 조정하는 방식으로 재료의 가열을 조절하였다. 재료의 용해는 재료 자체의 융점 이상으로 충분히 과열되도록 하여 완전한 용해를 얻었다.

3.4 측정

ESL공정 중 일단 재료가 용해되면 과열과 냉각을 경

우에 따라 여러 번 반복시켰으며 그 과정에서 재료는 고진공의 환경에서 복사적으로 냉각되게 된다. 재료의 온도 변화에 순간적으로 대응하기 위하여 response time이 1 ms, 측정 파장이 $1.3\text{-}1.6 \mu\text{m}$, focal area의 직경이 1.3 mm인 InGaAs detector가 장착된 측정 온도 범위가 $600\text{-}3500^\circ\text{C}$ 인 적외선온도계(infrared thermometer)를 사용하여 가열 및 복사냉각(radiative cooling)에 따른 재료의 온도변화를 기록하였다. 측정된 가열 및 냉각곡선은 가열과 냉각 과정에서의 고체-액체 공존에 의한 plateau temperature를 재료 자체의 융점으로 하고 적외선온도계 자체의 zero signal voltage의 온도를 이용하여 two-points 보정하였다. 또한 ESL공정에서의 부유-용해-응고의 과정은 charge coupled device(CCD) 카메라를 설치하여 관측하고 녹화하였다.

4. 결 과

ESL 공정을 위한 재료는 아크 용해로(arc melter)를 이용하여 준비하였다. Si (99.999%) chip, Zr (99.9%) foil, Nb (99.99%) wire, Mo (99.95%) wire를 사용하여 대체적으로 구형에 가까운 모양으로 제작하였다. V_3Si 는 고순도 재료를 이용하여 제작하였는데 조성을 균일하게 하기 위하여 각 성분의 융점을 감안하면서 용해-분쇄-재용해의 과정을 3번 반복하였다. 최종적으로 준비된 재료들은 크기 2-3 mm의 둥근 모양에 무게는 20-120 mg이었다. 준비된 재료는 ESL 공정 직전에 최종적으로 산(acid)으로 세척하여 표면의 불순물과 산화막 등을 제거하고 아세톤(acetone)으로 헹군 후 즉시 ESL 장비 안에 넣었고 이후 터보(turbomolecular) 펌프로 $10^{-8}\text{-}10^{-9}$ Torr의 background pressure를 얻었다.

Fig. 3은 ESL 공정을 통하여 얻어진 복사냉각곡선들로서 Zr, Nb, Mo의 금속의 응고는 과냉 후 순간적인 recalescence를 보이는데 반하여 반도체인 Si의 응고는 금속에 비하여 상대적으로 점진적인 recalescence를 보였다. 한편 alloy의 경우 V_3Si 는 응고 전 과냉 현상이 있었지만 다성분계인 $\text{HoNi}_2\text{B}_2\text{C}$ 는 여러 번 용해와 응고를 반복하여도 Fig. 3에서 보는 바와 같이 과냉이 얻어지지 않았다. Table 1에 각각 얻어진 과냉도(ΔT)를 나타내었는데 각 재료들의 과냉도는 반복된 용해 및 응고 후 각각 일정한 수치로 안정화되는 경향을 보였다.

Fig. 4는 ESL 공정 처리된 재료들 중에서 Mo의 과열-과냉-잠열방출-냉각의 sequence를 보여주는 비디오 snap 사진들로서 Fig. 3에서 보인 냉각곡선에서 무용기 상태에서 용해되었다가 응고 전 과냉(undercooling)이 발생하다가 궁극적으로 고체 핵생성에 수반된 잠열방출(latent heat release)이 일어나고 액체-고체 상전이가 진행되는 동안 일정 온도의 plateau가 유지되다가 액체-고체 상전이

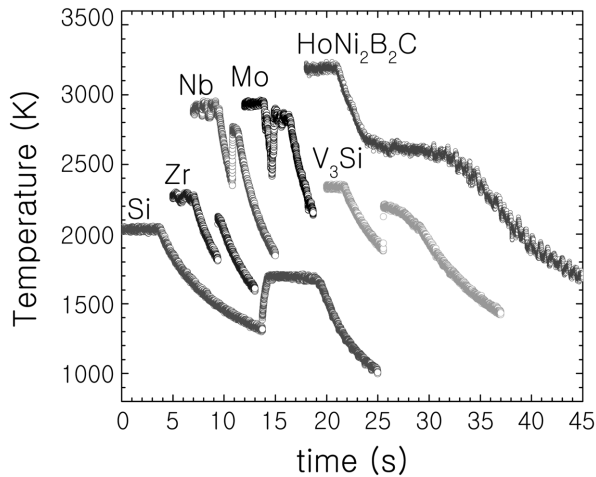


Fig. 3. Radiative cooling curves of Si, Zr, Nb, Mo, Si, V₃Si, and HoNi₂B₂C measured during ESL process. Temperature was calibrated with two points, one is the plateau melting temperature of each sample in both heating and cooling and the other is zero signal voltage of the thermometer at 873 K.

가 완료됨에 따라 다시 냉각이 진행되는 각각의 순간들을 보이고 있다.

ESL 공정 처리된 재료들은 액상과 고상간의 밀도 차이에 의하여 응고 시 부피가 증가하는 경우(예를 들어 Si)를 제외하면 응고 후에도 액상에서 자체 표면장력의

Table 1. The degree of undercooling obtained before nucleation in each sample.

	Mo	Nb	Zr	Si	V ₃ Si
T _m (K) ³⁴⁾	2896	2750	2128	1687	2208
T _{min} (K)	2416	2348	1808	1300	1878
ΔT (T _m -T _{min})	480	402	320	387	330
ΔT/T _m	0.17	0.15	0.15	0.23	0.15

로 가졌던 구형을 그대로 유지하였다. Fig. 5는 Nb의 scanning electron microscope(SEM) image들인데 아크 용해를 통하여 준비된 Cu chill-plate에 접촉하였던 면은 납작하고 위쪽은 꼭지가 있는 모양과 ESL 공정을 통하여 얻어진 구형이 비교된다.

5. 고찰

ESL 공정의 측면에서 가장 중요한 점은 재료의 무용기 상태에서의 용해이다. 즉 무용기 용해 및 응고의 성공 여부는 재료를 부유시키고 레이저를 조사하여 가열하는 과정에서 급격하게 변하는 재료의 대전 상태에 좌우되었다. 안정적인 부유 상태에 있는 재료에서 레이저에 의한 급격한 온도변화는 대전 상태에서의 급격한 변화를 야기하여 재료의 낙하를 초래하였다. 하지만 일단 성공

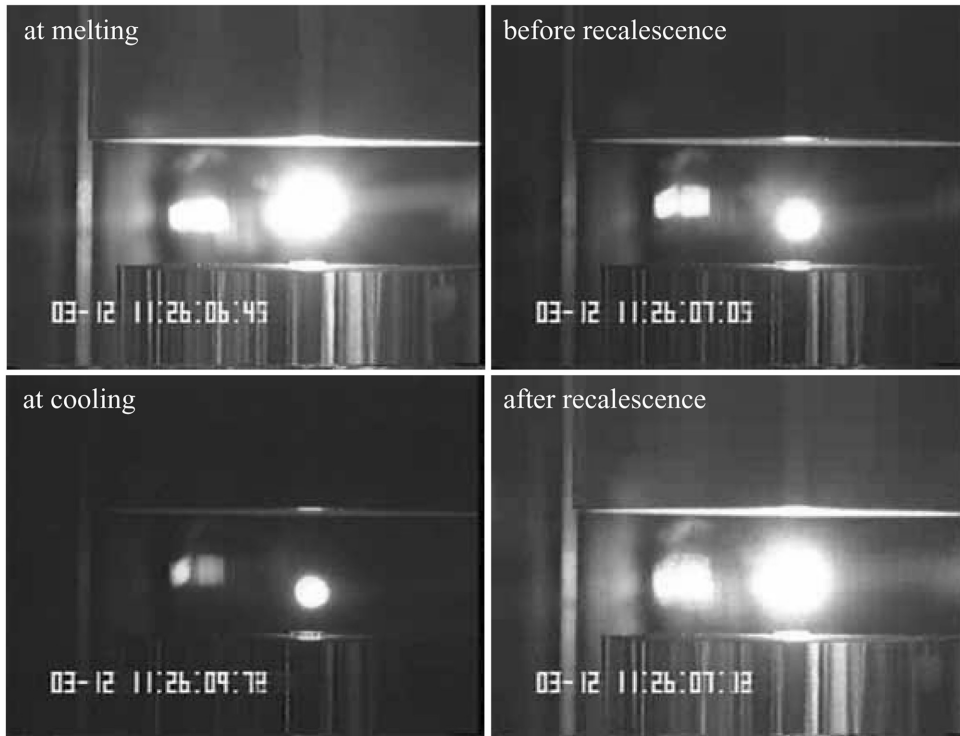


Fig. 4. A series of video images showing a Mo sample at superheated liquid, undercooled liquid, co-existing liquid and solid in transition, and cooled solid condition, respectively in a clockwise direction from the upper left one. Note the instantaneous latent heat release.

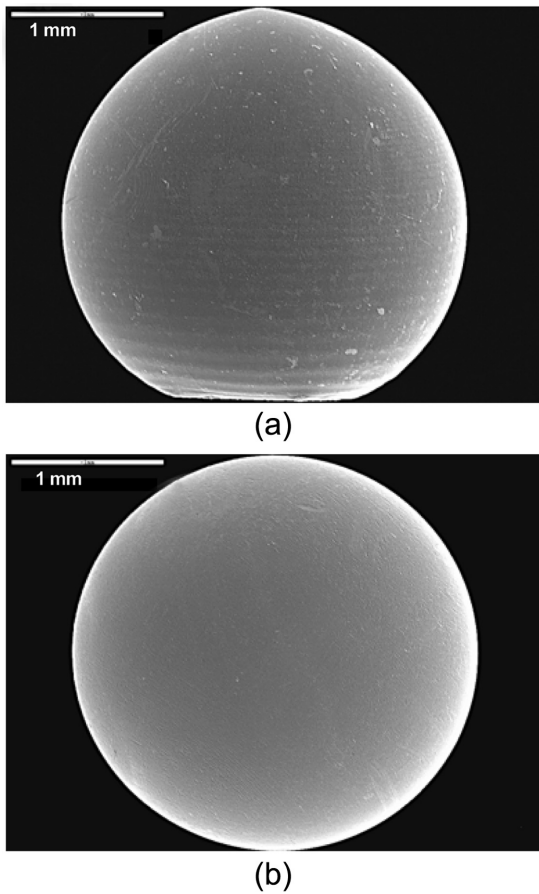


Fig. 5. SEM images of Nb showing the change in shape via ESL process from non-spherical arc-melted to spherical ESL-processed; (a) an arc-melted Nb sample before ESL, (b) after ESL process.

적으로 용해 및 응고의 과정을 거친 재료는 몇 번의 용해 및 응고의 과정을 반복하더라도 안정적이며 일관적인 냉각특성을 보였다. 이는 재료 표면의 흡착물과 고진공 환경의 용해 과정에서 비로서 방출되는 재료 내부에 존재하던 gas 등이 재료의 대전 상태에 영향을 미치기 때문이라고 생각된다. 이러한 경험으로부터 ESL 공정을 기존의 부유 후 가열 방식에서 가열 후 부유 방식으로 전환²⁵⁾하여 ESL 공정의 성공률을 비약적으로 높이고 ESL 장비를 이용하여 세계 최초로 고융점 Mo의 무용기 용해 및 응고^{25,33)}에 성공하게 되어 ESL 장비를 이용한 각종 재료의 무용기 용해 및 응고의 온도범위가 ~3000 K까지 가능하게 되었다. 이는 저융점의 재료들에서만 제한적으로 가능하였던 무용기 용해 및 응고에 관한 연구^{35,41)}가 고융점의 재료들을 적용하여 수행할 수도 있게 되었다는 점에서 의미가 있다. 더욱이 재료의 제작 과정에서 혼재되어 재료 내에서 불순물로 작용하는 gas 들이 ESL 공정의 고진공의 환경에서 자연적으로 제거되어 재료 자체의 기본 물성들이 불순물이 제거된 깨끗한 상태에서 다

루어질 수 있게 되었다는 점에서도 의미가 있다.

또한 정전기 부유의 경우 음파와 전자기 부유와는 달리 재료에 유발되는 turbulence가 없는 무용기 상태에서 용해됨에 따라 액체 상태에서 재료 자체의 표면장력에 의하여 구형이 추구되고 그 형태는 고체 상태로의 상전이 과정에서도 그대로 유지되었다. 물론 과열의 클수록 액상의 viscosity가 작아지고 그에 상응하여 자체 중량에 의한 구형에서 타원형으로의 경향이 발생하지만, 액상에서 재료의 viscosity를 측정하기 위하여 의도적으로 재료를 회전시키는 경우와 실험 중 발생할 수 있는 제어를 벗어난 불규칙하고 급격한 움직임이 생기는 경우를 제외한 일반적인 ESL 공정 조건의 무용기 용해 및 응고에서는 대체적으로 진(purely spherical)구에 접근하는 재료들이 만들어졌다. 재료의 표면(surface)이 재료의 물성에 미치는 영향들을 고려할 때 이러한 진구의 형태에서 재료의 물성 측정이 가능하다는 점도 ESL 공정의 큰 장점이 되겠다. 이러한 ESL 공정 처리된 이상적인 구형의 재료는 구형이 아닌 모든 형태를 갖는 재료들과의 특성 비교에서 표준 재료^{29,30,32,33)}로 이용될 수 있다. 또한 과냉의 증대를 통하여 새로운 안정상 및 준안정(metastable)상들의 탐색에도 ESL 장비가 활용될 수 있겠다.

한편 무용기 용해 및 응고 과정 중에 측정된 가열 및 복사냉각곡선으로부터 액상 재료들의 복사율(hemispherical total emissivity)과 비열(constant pressure heat capacity)의 온도에 따른 함수를 유도^{26,28,31,33)}할 수 있는데 그에 대해서는 추후의 논문에서 다루고자 한다. 재료들의 액상에서의 온도에 따른 특성들은 참고문헌이 거의 없고 그나마 제한된 자료들⁴²⁻⁴⁵⁾ 간에도 상당한 차이가 있는 상황을 감안할 때 다양한 재료들의 용융 액상에서의 열물리 특성들의 측정이 ESL 장비를 이용하여 가능하다는 점도 ESL 장비의 개발 및 활용 필요성을 부각시킨다.

6. 결 론

재료의 액상에서의 기본 물성에 관한 연구와 무용기 용해 및 응고 과정에 관련한 열역학적, 열물리적인 연구들과 더불어 장차 고진공 무중력의 우주 환경에서의 신소재 개발을 대비한 지상 연구를 위하여 ESL 장비를 개발하여 금속, 반도체, 세라믹의 다양한 재료들의 무용기 용해 및 응고 실험들이 성공적으로 수행되었다. ESL 공정을 통하여 고진공의 환경에서 제작된 재료들은 내부 결함이 적은 이상적인 구형의 표준 재료로서의 활용이 기대된다.

감사의 글

본 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하

여 연구되었음 (KRF-2004-005-D00099).

참 고 문 헌

1. F. Gillessen, D. M. Herlach and B. Feuerbacher, *J. Less-Common Met.*, **145**, 145 (1988).
2. R. F. Cochrane, P. V. Evans and A. L. Greer, *Mater. Sci. Eng.*, **98**, 99 (1988).
3. A. L. Greer, *Mater. Sci. Eng., A* **178**, 113 (1994).
4. Y. Tian, R. G. Holt and R. E. Apfel, *Rev. Sci. Instrum.*, **66**, 3349 (1995).
5. J. K. R. Weber, D. S. Hampton, D. R. Merkley, C. A. Rey, M. M. Zatarski and P. C. Nordine, *Rev. Sci. Instrum.*, **65**, 456 (1994).
6. E. C. Okress, D. M. Wroughton, G. Comentz, P. H. Brace and J. C. R. Kelly, *J. Appl. Phys.*, **23**, 545 (1952).
7. H. J. Fecht and W. L. Johnson, *Rev. Sci. Instrum.*, **62**, 1299 (1991).
8. G. A. Bertero, W. H. Hofmeister, M. B. Robinson and R. J. Bayuzick, *Metall. Trans., A* **22A**, 2713 (1991).
9. G. A. Bertero, W. H. Hofmeister, M. B. Robinson and R. J. Bayuzick, *Metall. Trans., A* **22A**, 2723 (1991).
10. K. Eckler, F. Gartner, H. Assadi, A. F. Norman, A. L. Greer and D. M. Herlach, *Mater. Sci., Eng. A* **226-228**, 410 (1997).
11. W. K. Rhim, S. K. Chung, D. Barber, K. F. Man, G. Gutt, A. Rulison and R. E. Spjut, *Rev. Sci. Instrum.*, **64**, 2961 (1993).
12. A. J. Rulison and W. K. Rhim, *Rev. Sci. Instrum.*, **65**, 695 (1994).
13. A. J. Rulison and W. K. Rhim, *Metall. Mater. Trans., B* **26B**, 503 (1995).
14. R. Busch, Y. J. Kim and W. L. Johnson, *J. Appl. Phys.*, **77**, 4039 (1995).
15. R. Busch, Y. J. Kim, W. L. Johnson, A. J. Rulison, W. K. Rhim and D. Isheim, *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 3111 (1995).
16. Y. J. Kim, R. Busch and W. L. Johnson, *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 1057 (1996).
17. R. Busch, Y. J. Kim, W. L. Johnson, A. J. Rulison, W. K. Rhim and D. Isheim, *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 3111 (1995).
18. S. K. Chung, D. B. Thiessen and W. K. Rhim, *Rev. Sci. Instrum.*, **67**, 3175 (1996); **68**, 2597 (1997).
19. A. J. Rulison, J. L. Watkins and B. Zambrano, *Rev. Sci. Instrum.*, **68**, 2856 (1997).
20. W. K. Rhim, S. K. Chung, A. J. Rulison and R. E. Spjut, *Int. J. Thermophys.*, **18**, 459 (1997).
21. K. Ohsaka, S. K. Chung, W. K. Rhim and J. C. Holzer, *Appl. Phys. Lett.*, **70**, 423 (1997).
22. K. Ohsaka, S. K. Chung, W. K. Rhim, A. Peker, D. Scruggs and W. L. Johnson, *Appl. Phys. Lett.*, **70**, 726 (1997).
23. P. F. Paradis and W. K. Rhim, *J. Mater. Res.*, **14**, 3713 (1999).
24. W. K. Rhim and K. Ohsaka, *J. Cryst. Growth*, **208**, 313 (2000).
25. Y. S. Sung, H. Takeya and K. Togano, *Rev. Sci. Instrum.*, **72**, 4419 (2001).
26. Y. S. Sung, H. Takeya and K. Togano, *Jpn. J. Appl. Phys., Part 2* **41**, L895 (2002).
27. P. F. Paradis, T. Ishikawa and S. Yoda, *Int. J. Thermophys.*, **24**, 239 (2003).
28. Y. S. Sung, H. Takeya and K. Togano, *J. Appl. Phys.*, **92**, 6531 (2002); **93**, 3681 (2003).
29. H. Takeya, Y. S. Sung, E. H. Sadki, K. Hirata and K. Togano, *Jpn. J. Appl. Phys., Part 1* **42**, 2675 (2003).
30. Y. S. Sung, H. Takeya, K. Hirata and K. Togano, *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 3638 (2003).
31. Y. S. Sung, H. Takeya, K. Hirata and K. Togano, *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 1122 (2003).
32. H. Takeya, Y. S. Sung, K. Hirata and K. Togano, *Physica C*, **392-396**, 479 (2003).
33. Y. S. Sung, D. S. Bae, T. K. Song, M. H. Kim, H. Takeya, K. Hirata and K. Togano, *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 121922 (2006).
34. D. R. Lide, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 83rd ed. (CRC Press, Boca Raton, FL, 2002).
35. D. Turnbull and R. E. Cech, *J. Appl. Phys.*, **21**, 804 (1950).
36. D. Turnbull, *J. Appl. Phys.*, **21**, 1022 (1950).
37. D. Turnbull, *J. Met.*, **188**, 1144 (1950).
38. D. H. Rasmussen and C. R. Loper, Jr., *Acta Metall.*, **23**, 1215 (1975).
39. H. W. Kui, A. L. Greer and D. Turnbull, *Appl. Phys. Lett.*, **45**, 615 (1984).
40. G. Devaud and D. Turnbull, *Acta Metall.*, **35**, 765 (1987).
41. Y. Shao and F. Spaepen, *J. Appl. Phys.*, **79**, 2981 (1996).
42. T. Iida and R. I. L. Guthrie, *The Physical Properties of Liquid Metals* (Clarendon, Oxford, 1988).
43. O. Kubaschewski, C. B. Alcock and P. J. Spencer, *Materials Thermochemistry*, 6th ed. (Pergamon, New York, 1993).
44. D. R. Lide, Jr., *JANAF Thermochemical Tables*, *J. Phys. Chem. Ref. Data* Vol. 14, Suppl. 1, 3rd ed. (American Chemical Society and American Institute of Physics, Washington D.C./Melville, NY, 1985).
45. Y. S. Touloukian, *Thermal Radiative Properties-Metallic Elements and Alloys*, Vol. 7 of *Thermophysical Properties of Matter* (IFI/Plenum, New York, 1970).