

우주환경을 이용한 재료분야 연구동향



김창주

(KIMM 재료기술연구부)

- '67-'71 성균관대학교 금속과(학사)
- '73-'76 서울기계공고 교사
- '76-'78 연세대학교 산업대학원 재료과(석사)
- '78-'79 포항제철 기술연구소 주임연구원
- '82-'86 부산대학교 대학원 금속과(박사)
- '79-현재 한국기계연구원 책임연구원



김정근

(한국기술교육대)

- '68-'72 홍익대학교 금속과(학사)
- '75-'77 홍익대학교 금속과(석사)
- '80-'84 부산대학교 대학원 금속과(박사)
- '78-'92 창원기능대학교 금속과 교수
- '92-현재 한국기술교육대 산업기계과 부교수



1. 머릿말

금세기 인류는 무한한 우주공간에 도전하고 있어서, 이로 인한 과학기술의 진보는 실로 비약적이며, 앞으로도 무한한 우주공간 만큼이나 미지의 가능성이 있다.

현재, 인류가 추구하는 궁극적인 목표는 우주생성의 신비를 탐구하는 외에 우주의 환경을 이용하여, 지상에서와는 다른 차원에서 과학기술을 발전시켜 인류생활의 질을 높이고자 하는 데 있다고 본다. 이러한 노력에 의해, 위성체를 이용해 우주공간을 탐사하고, 다양한 과학기술 실험이 시도되

고 있으며, 특히 지상의 지역간 통신, 일기예보 및 지상관측 등의 분야에는 크게 공헌하고 있다.

그러나, 우주의 탐구와 그 이용을 위한 매체는 위성체이어서 이를 우주공간까지 보내는 데에는 대개 다음과 같은 난관이 있다.

- 1) 대기권 통과시, 높은 밀도의 산소와 같은 활성기체와의 고속마찰에 따른 고온 접촉
- 2) 우주공간에서의 고 에너지 입자선, 방사선, 고속 고체입자나 파편과의 충돌 위험성
- 3) 극고진공, 극고온 및 극저온의 반복, 무중력 등의 극단적인 환경

따라서, 위성체를 이루는 재료들은 지상에서의 경우와는 매우 다른, 이상의 조건들을 극복할 수 있어야 가능하다.

우주의 탐구와 이용은 인류 공동의 목표이며, 우리나라도 통신위성을 이미 보유한 상태로써, 선진국과의 우주개발 공동노력을 통한 인류공헌의 사명도 가지게 되었다.

이러한 배경에서, 현재까지 적용되어온 금속재료 분야와 관련한 지식과 아울러 특별한 조건인 우주환경에 적응과 그를 이용한 재료개발의 가능성 및 향후의 전망을 소개코자 한다.

2. 우주의 환경

우주의 환경은 지구에서와는 달리, 낮은 중력과 높은 진공, 방사선, 에너지 등과 같은 특별한 조건을 갖고 있다.

무중력에 가까운 낮은 중력이므로, 대류가 없고, 침강이 일어나지 않는 물리현상이 나타난다. 그리고 지구의 대기권을 벗어나 멀어질 수록 대기가 희박하여져서 지상에서부터 50 Km에 이르면 지상의 0.01% 정도의 기압으로서 약 10^2 Pa가 되며, 100 Km에서는 10^{-1} Pa이며, 500 Km에서는 10^{-7} Pa 정도로 낮아진다. 여기서 미국 NASA의 스페이스 셔틀의 고도는 250 Km 정도로 알려져 있으며, 그 스페이스 셔틀의 내부에서는 10^{-11} Pa 정도까지 고진공이 가능하다고 한다.

지상으로부터 500 Km에서는 1.4 KW/m^2 정도의 높은 태양 에너지가 항상 쾌정한 상태로 얻어

져 태양열이나 태양광 발전의 효율이 높다.

한편, 우주공간은 전자, 양자, 원자핵 및 하전입자 등과 같은 많은 우주 방사선이 존재하고 있다. 이들은 주로 태양으로 부터 오는 태양풍으로 불리며, 파장의 길이도 짧은 것에서 긴 것까지 아주 다양하다. 이러한 높은 에너지 입자는 우주선의 알루미늄 외벽을 쉽게 관통하여 우주 비행사들의 신체나 우주선 전자장치 시스템에 해를 준다.

우주공간에서 가장 흥미를 주는 환경인자는 무중력에 가까운 미소중력이다. 현재 지구상에서 고진공이나 태양 에너지인 방사선도 싸이크론 등을 이용하여 어느 정도까지는 얻을 수 있다.

한편, 미소중력장은, 지구상에서는 진공상태의 500 m 관의 내부를 자유낙하시켜도 겨우 10초 정도밖에 얻을 수 없다. 그러나 우주 공간에서 궤도를 도는 비행체의 중심에는 원심력과 지구의 중력이 상쇄되어 자유낙하 상태가 장시간 유지될 수 있다. 이러한 무중력 상태를 굳이 미소중력이라 함은 그 중심을 다소라도 벗어난다든지, 탑승자가 작업을 위해 움직인다든지 또는 태양풍에 의한 우주선의 항진에 저항이 발생하는 경우에 다소의 가속도가 발생하고 있기 때문이다.

3. 우주실험의 역사

미소중력 환경을 이용한 실험은, 1950년대 후반부터 미국에서 시작되었으며, 주로 로켓 액체연료의 거동을 미소중력 하에서 조사할 목적으로 낙하탑이나 항공기를 이용하여 실험하였다. 그리고 우주공간에 있어서 재료분야의 우주실험은 아폴로 계획의 일환으로서, 1971년 아폴로 14호 지령선에서의 대류실험, 복합재료 제조실험 및 생체기술실험 등이 시작되었다.

그 후, 본격적인 우주실험으로서, 아폴로 계획에서 사용된 세턴 로켓의 연료탱크의 일부를 실험실로 개조한 스카이랩 계획이 1973년 부터 실시되었다.

여기서는 연료실험, 반도체의 결정성장실험, 편정합금의 균일 혼합실험, 공정합금의 일방향 응고 실험 및 Ag-SiC 복합재료제조 등이 수행되었다.

1975년에는 아폴로 지령선과 소련의 소유즈호가 도킹한 미-소의 국제공동연구인 기체로부터의 결정성장실험 등의 재료연구, 생체물질의 분리 등의 생체기술이 행해졌다.

미국의 경우는 1975년 부터 스타계획이라 불리는 프로젝트에서, 그리고 서독은 1977년 부터 텍서스계획을 시작으로 소형 고체연료 로켓을 사용한 우주재료실험이 추진되었다. 이 때에는 5~6분 정도의 미소중력실험 시간이 얻어졌으며, 예비적인 실험에 불과하였다.

미국은 1981년 부터 스페이스셔틀을 가지고 우주실험이 재개하였으며, 1982년 부터는 소규모 우주재료실험이 수행되어 GAS라 불리는 소규모 실험용기도 사용되었다.

그 후, 유럽 우주기관인 ESA가 스페이스셔틀에 탑재하는 수퍼슬라브를 개발하였으며, 이는 1 기압의 공기를 채운 우주실험실과 우주공간에 노출한 실험대로 구성되어 있었다.

1883년에는 ESA와 NASA가 공동으로 우주실험을 행한 바 있고, 미국과 서독은 각각 1984년과 1985년에 독자적인 실험도 지속적으로 추진하였으며, 특히 서독의 D-1 실험에서는 재료분야, 생체공학분야 등을 포함해 75 개 과제가 수행되었다.

그러다가 1986년에는 스페이스셔틀 챌린저호의 불행한 사고로 일시 중단되었으나, 1989년 9월부터 재개되어 지금은 각국의 국제공동 우주실험계획이 활발하게 되었으며, 그 예로서 국제미소중력실험계획(IML), 미국미소중력실험계획(USML, USMP) 및 독일우주실험계획(D-2) 등이 그것이다.

4. 미소중력과 재료제조에 미치는 물리적 현상

미소중력을 이용하여 정도가 높은 측정이 가능하고, 재료의 제조라는 관점에서 미소중력을 이용하면 중력에 기인한 각종의 저해요인을 제거하여 선단재료의 제조가 가능하며, 최근에는 미소중력의 이용은 대단한 기대를 갖게하였다. 금속, 무기물 및 유기물 등의 재료는 그의 생성과정에서 액체 또는 기체의 상태를 거쳐 고체상태로 변환한

다. 따라서 그의 생성과정의 액체나 기체의 상변태에 있어서 대류나 밀도차에 의한 편석 등과 같은 중력의 영향을 받아 재료의 기계적, 구조적 균일성을 해치는 요인이 된다. 이에 본고에서는 재료제조의 관점에서 무중력하에서 기대되는 물리적 효과를 정리하여 본다.

4.1 미소중력과 재료제조

4.1.1 무대류 효과

유체나 기체에 있어서 중력방향의 아래 쪽에 온도가 높게 분포되어 있으면, 상하방향에 밀도의 차이가 생겨 대류가 일어난다. 미소중력 하에서는 유체의 점도에도 의존하나 밀도차이 효과에 의한 유동은 거의 생기기 어렵다.

4.1.2 무침강, 무부력 효과

지상에서는 유체 중에 밀도가 다른 물질이 있으면, 유체에 비해 밀도가 큰 물체는 침강하고 밀도가 작은 물체는 부상한다. 그리고 밀도차가 있는 유체의 경우는 2 상으로 분리되나 미소중력 하에서는 혼합된 상태로 유지된다.

4.1.3 무정압 효과

지상에서는 유체나 고체 중에 중력이 작용하면 재료제조 시에 압축응력이 작용하여 결정고체는 용융점 직하에서도 그 임계전단응력이 작으므로 압축으로 소성변형하는 전위가 도입된다. 그러나 미소중력 하에서는 이러한 체적력이 발생하지 않고 고품질의 결정이 얻어질 가능성이 있다.

4.1.4 무접촉부유 효과

미소중력 하에서는 물체에 작용하는 힘이 극히 작으므로 아주 작은 힘으로도 물체의 공간적 위치제어가 가능하다. 지상에 있어서 결정성장은 반드시 도가니를 사용하나 미소중력 하에서는 도가니 등의 용기기를 사용하지 않고도 재료의 용해와 응고가 가능하여 용기로부터 불순물의 혼입, 응고시에 용기와 제조재료의 열팽창계수가 다를 때에 발생하는 열응력에 의한 결정결함의 도입을 피할 수 있고 극히 순도가 높은 물질의 제조나 고품질 결정의 제조가 기대된다. 그리고 지상에서

는 도가니의 용융온도에 의한 용융물의 최고 온도가 한정되나 미소중력 하에서는 용기를 사용하지 않으므로 4,000℃ 이상의 초고온에서의 재료의 용해가 가능하다.

이상이 재료제조에 따른 미소중력 하에서의 기본적인 효과라 할 수 있다. 이러한 효과를 고려한 우주재료실험에 관한 물리적 현상을 정리해 보면 다음의 표 1과 같다.

표 1. 미소중력환경하의 제현상과 재료제조에의 응용

	주요 현상	기술적 요소
무 대 류	(1) 미소류 및 난류	* 난류에 의한 열 및 물질의 이동 * 중력의 변동에 의한 미소류 * 온도, 밀도구배에 의한 미소류
	(2) 무편식	* 결정변형의 감소 * 화학반응의 균일화 * 조성의 균일화
	(3) 계면현상	* 방향성 용고제어 용이 * 용고계면관측 용이 * 젖음성, 모세관 현상의 변화 * 계면장력에 의한 대류
	(4) 이동현상의 변화	* 외력에 의한 물질이동 용이 * 기체확산의 정량화 * 균일상 석출, 침적의 촉진 * 부식, 전기화학과정의 변화 * 액상의 확산, 표면대류 * 액상/기상 대형결정 성장
	(5) 열, 밀도의 변화 감소	* 상평형연구 용이 * 정렬조직제어 용이 * 핵생성 제어
	(6) 온도구배의 증대	* 열교환기술의 필요성
무침강 무부유	(7) 침강해소	* 영동분리 용이(전기적, 자기적) * 대형 모자이크 결정성장 용이 * 현탁화 용이
	(8) 상분리 해소	* 다성분계 균질 화학반응 * 비등차가 큰 비혼합계/복합재료 제조 * 액체/고체의 균일혼합 * 액체/액체의 균일혼합
	(9) 물질분포의 변화	* 기포 동역학연구 용이 * 기포의 균일분산
무 정 압	(10) 기포의 분포변화	* 탈포기술 필요(초음파, 원심력)
	(11) 계면압 변화	* 기체/액체계면의 증력변형 해소
	(12) 계면현상	* 연소현상 변화 * 점성침적의 합체현상관측 용이 * 액성, 부유대의 형상 안정화 * 임계점 부근의 용전이 관측 용이 * 이동계면 관측 용이 * 젖음성, 흡착성 규명
	(13) 자중변형 감소	* 결정립성장제어 용이 * 무전위화 등, 격자왜곡 제거 용이 * 균질 비정질화 * 벽효과 해소, 주조 용이
	(14) 유체변형 감소	
무접촉 부유	(15) 무용기, 부유 용이	* 음파부유기술이 필요 * 부유대 용융성의 응용확대
	(16) 계면현상 (17) 부유상태 안정도	* 표면장력 영향 확대, 진구 생성 * 부유액체의 액체역학연구 용이 * 초고순도물질 제조 용이 * 무접촉에 의한 오염생성물 방지
	(18) 열환경의 변화	* 냉각 및 급냉기술 필요 * 고온 및 초고온 화학반응(무접촉) * 방사냉각/가열이 현저

4.2 미소중력과 물리현상

재료제조라는 관점에서 미소중력의 영향을 평가할 때, 영향이 큰 재료는 기체나 액체의 상태와 같은 원자간 또는 분자간의 상호작용이 약한 상태일 것이다. 따라서 이러한 관점을 중심으로 미소중력과 물리적 현상을 소개한다.

4.2.1 계면장력

기체나 액체 표면의 원자 또는 분자에 가한 힘은 이방적이 된다. 즉, 표면의 원자나 분자는 내부의 원자나 분자로부터 인력에 의해 인장된다. 따라서 액체의 경우는 액체에 걸린 힘이 등방적이 되므로 진구체가 되고, 이 표면에 수직인 힘을 계면장력이라 한다. 이러한 상태는 서로 다른 2 상의 경우에 성립한다. 예를 들어, 서로 다른 2 종류의 기체나 액체는 언제나 정량적으로 혼합이 가능하며 표면이 존재하기 위해서는 적어도 1개의 상은 액체나 고체일 필요성이 있다. 특히, 기상과 액상, 고상과의 계면에 작용한 힘은 표면장력이라 부른다. 더우기, 액체의 경우에 표면장력은 표면 단위체적당 자유 에너지, 즉, 새로운 표면을 만들려고 한다.

고체의 경우도 표면장력은 정의되나 고체와 같은 결정체는 액체와 비교하여 매우 다른 상관점이 있다. 액체에는 장범위 규칙성이 존재하지 않으나, 결정체는 장범위 규칙성이 존재하므로 표면 자유 에너지가 결정면에 따라 다른 점이 있다. 이것은 원자간의 상호작용력이 같아도 결정구조에 따라 원자간격이 다른 것에 기인하는 것으로 정성적으로 이해될 수 있다. 표면장력은 온도 의존성이 강하여, 온도의 상승에 따라 직선적으로 감소하며 표면의 오염에 대해서 표면장력은 현저히 변화한다. 표면활성제는 극미량으로도 액체표면에 확산하여 표면장력을 크게 변화시킨다.

따라서, 표면장력의 크기가 장소에 따라 다른 경우가 있음은 표면상에서 온도나 농도구배가 존재하는 경우이다.

4.2.2 마랑코니 대류

마랑코니 대류는 액체자유표면에서의 계면장력의 불균질에 기인하는 유체운동이다. 19세기에 이태리 물리학자 마랑코니에 의해 이론적으로 예상된 것이나, 이 현상이 실험적으로 확인된 것은 우주실험에서이다. 이것은 지상에 있어서 온도가 다른 경우에 밀도차가 생겨, 중력에 의한 자연대류 현상이 나타나 자연대류의 흐름에 비해 표면장력이라는 약한 구동력에 기인하는 표면흐름현상이다. 그러나 이 순수한 표면흐름만의 관찰은 극히 곤란하다. 그림 1은 스페이스 셔틀에 의한 마랑코니 대류의 우주실험결과이다. 실험은 용액이 투명

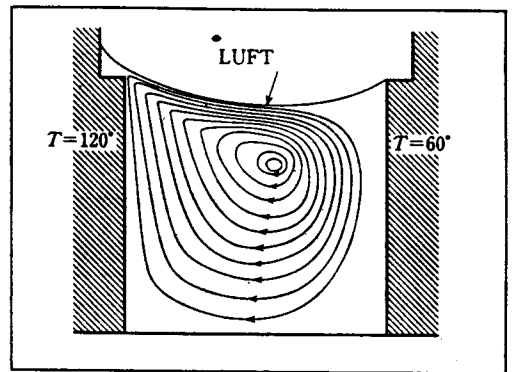


그림 1 마랑코니 대류의 실험

가열체의 온도차가 60K인 미소중력하에서 생긴 긴 열모세관효과에 의한 대류의 흐름이며, 화살표는 최대유속 2cm/s로 측정된 위치

한 테트라코사인이라는 유기물을 사용하여 흐름을 관찰한 것으로 입자들이 용액에 혼합되고 있음을 보인다. 용기는 20×20×20mm³의 크기를 가지며, 여기에 용액을 가득 채우고 자유표면을 형성시켜 한 쪽 벽을 120℃로 하고 다른 벽을 60℃인 온도구배를 갖게하면 용액은 고온 측에서 저온 측으로 표면류가 생긴다. 따라서, 용액내부까지 대류가 나타나고, 이 때의 유속은 20mm/s를 갖고 용기내의 전역으로 확대된다. 마랑코니 대류의 강도는 마랑코니수 Ma로서 다음식과 같다.

$$Ma = -(\delta\sigma / \delta T) \times (\Delta T \times L / \nu\lambda)^2$$

여기서 $\delta\sigma / \delta T$ 는 표면장력의 온도의존성, ν 는 동점성계수를, χ 는 열확산율을 의미한다. 그리고 ΔT 는 온도차, L 은 유체의 길이이다. 이 식으로부터 마랑코니 대류의 강도는 표면장력의 온도의존성이 크며, 동점성계수나 열확산계수가 작을 수록 강한 대류가 나타난다. 여기에 표면장력은 물질의 농도에도 의존하므로 온도구배가 없어도 장소에 따라 농도구배가 존재하면 마랑코니 대류가 일어난다. 이 경우에는 위의 식 중에서 온도 T 의 의존성을 농도 C 로 바꾸어 예상할 수 있다.

마랑코니 대류에 관한 흥미있는 실험으로서, 그림 2와 같은, 온도구배 하에서 기포의 운동이 있다. 기포 내부에 액체와 기체의 계면이 존재할 때, 만일 액체 내부에 온도구배가 있으면 기포에 표면장력의 구배가 생긴다. 따라서 그림에서와 같은 액체의 흐름이 생기고 기포는 이 흐름과 반대 방향으로, 즉 고온 측으로 이동한다. 이와 같은 실험으로써 1985년 서독에서 실시된 D-1계획의 실험에서, 실리콘 오일 중에 기포의 운동이 관찰되었다.

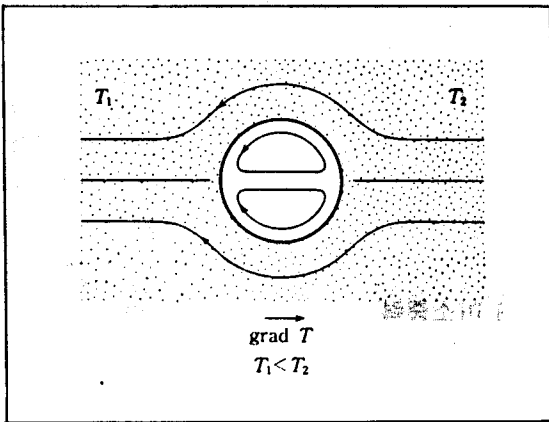


그림 2. 미소중력하에서 액체 중의 기포의 운동

지상에서는 이와같은 마랑코니 대류는 관찰이 어려우므로 결정성장에 미치는 영향을 열대류와 구별하여 정량적으로 평가할 수 없으나, 예를 들어, zone melting법과 같은 용액과 자유표면이 존재하는 결정성장법에도 마랑코니 대류가 영향을 미칠 가능성이 있다.

미소중력 하에서 마랑코니 대류현상은 우주실

험으로서 서로 다른 두 가지의 의미를 갖는다. 하나는 확산계수 등의 물리정수의 정확한 측정을 목적으로한 대류제거라는 미소중력 이용의 문제 제기이다. 이는 이런 종류의 실험에 있어서 마랑코니 대류 제거를 위해 자유계면을 없애거나 물리적으로 마랑코니를 없앨 수 있는 정확한 실험설계가 필요함을 의미한다. 다른 하나는 재료제조 관점에서 마랑코니 대류의 적극적 이용이다. 미소중력 하에서는 열대류가 존재하지 않으므로 지상에서는 간단하게 혼합되는 물질도 균일혼합이 사실상 어렵다. 그러나 미소중력 하에서는 밀도차가 존재하지 않으므로 용액 내부에 존재하는 기포를 제거하는 일도 간단치 않다. 그러므로 용액으로부터 응고시키기 전에 물리적으로 압력을 걸어 기포를 밀어낼 필요가 있으며, 실제로 우주 실험에서는 이러한 처리가 실시되고 있다.

그러나 이러한 처리를 이용할 수 있는 경우는 기포가 용액의 증기압에서 구성된 경우에만 유효하며, 그 이외의 경우에는 기포를 제거하기는 어렵다. 예를 들어, 특별히 균일입자분산 복합재료 등의 제조에 있어서 시료를 분말합금으로 준비한 경우에 문제가 된다. 마랑코니 대류에 의한 기포의 운동을 이용하면 미소중력 하에 있어서 기포 제거가 가능하다.

4.2.3 젖음현상

젖음이란 고체와 액체의 계면현상으로 재료제조 상에서는 고품질의 내열합금의 제조나 복합재료의 입자, 섬유, 강화상과 모상과의 계면강도를 결정하는 점에서 중요한 요소이다. 젖음현상을 모식적으로 설명하면 그림 3과 같다. 예를 들어, 깨끗한 유리 위에 알콜을 떨어뜨리면 넓게 적셔져서 그림 3에서 접촉각 θ 는 0이 되나, 수은의 경우는 젖음성이 적어 접촉각 θ 는 0이 되지 않는다. 그리고 그림 3에서 γ_s, γ_e 를 고체 및 액체의 표면장력, γ_i 를 고체와 액체의 계면장력이라 하면 $\gamma_s, \gamma_e, \gamma_i$ 간에는 다음의 식이 성립하며, young's law라 알려져 있다.

$$\gamma_s = \gamma_i + \gamma_e \cos \theta$$

여기서 θ 는 접촉각으로 일반적으로는 90° 보다 작은 경우를 젖음성이 있다고 보나, 주의할 점은 동일 표면장력을 갖는 액체에 대한 젖음성의 비교로서 가능성이 있는 것이다.

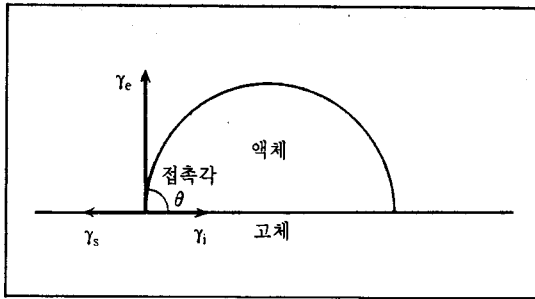


그림 3. 고체표면 상의 액체방울

그런데, 미소중력 하에서는 지상에서는 거의 문제가 되지 않는 젖음현상이 다음과 같은 이유에서 매우 중요한 요소가 되고 있다. 도가니와 용융시료의 젖음에 의해 그림 4에서와 같은 차이가 있다. 여기서 도가니 단면에 나타내는 용융시료의 높이 h 는 도가니가 모세관현상이 되고, γ 을 도가니의 직경, d 를 용융시료의 밀도라 하면 다음의 식이된다.

$$\gamma_i = \gamma d h g / 2$$

여기서 g 는 중력가속도이며, 이 식의 의미는 지상에서는 중력이 있으므로 용융시료가 도가니 벽을 오르는 양은 한정되어 있다. 만일, g 가 극히 작으면 γ_e 가 유한의 값을 가지며 h 는 극히 커지게 된다.

즉, 미소중력 하에서는 도가니와 용융시료의 젖음성이 좋은 경우, 도가니 벽을 용융시료가 이동하여 덮게 된다. 1980년 일본이 우주개발연구에서 실시한 TT-500A의 소형 로켓을 이용한 Si-As-Te계의 비정질 반도체의 제조실험에서 도가니로서 사용한 석영 튜브와 이 비정질 반도체가 그림 5에서와 같이 석영 튜브 벽 전면을 덮고 있으며, 다른 우주실험에서도 같은 결과를 얻고 있다.

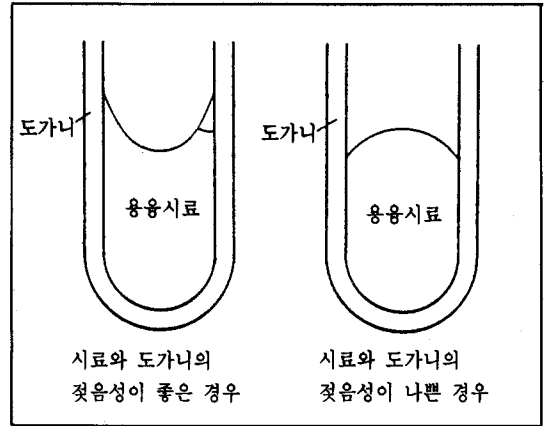


그림 4. 용융시료와 도가니 벽과의 젖음성

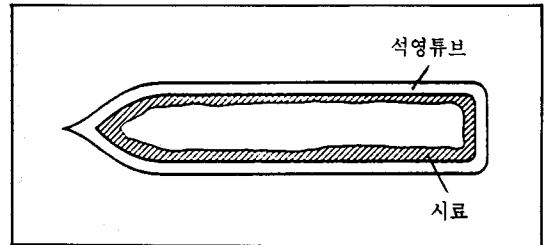


그림 5. 미소중력 하에서 도가니 내의 용융시료의 젖음성

이와같이 지상실험에서는 전혀 주의가 필요없는 도가니와 용융시료의 젖음현상이 미소중력 하에서는 표면장력이 극히 적어 재료의 제조상에 중대한 문제가 되는 경우가 있다.

4.3 미소중력 이용의 예

대류현상은 온도의 상승에 따라 액체나 기체가 불균일하게 팽창하여 밀도차가 생겨 중력 하에서 부력이 생겨 일어나는 자연대류의 크기는 Grashof 수 Gr 로서 다음과 같이 표시한다.

$$Gr = g \beta \Delta T L_c^3 / \nu^2$$

여기서 g 는 중력가속도, β 는 체적팽창계수, ΔT 는 온도차, L_c 는 계의 길이, ν 는 동점성계수이다. 이 식의 의미는 온도차가 큰 경우, 계의 길이가

긴 경우, 또는 동점성계수가 작은 경우에는 미소중력 하에서도 자연대류가 생길 가능성이 있음을 의미한다. 현재까지 물리현상의 미소중력 이용의 관점에서, 특히 결정성장 등의 재료제조상 중요한 확산현상에 대해서 설명하였다.

지상에서 액체의 확산실험은 중력에 기인한 대류가 실험결과에 크게 영향을 미치나, 이 대류의 영향을 평가하기 위한 실험에서는 수 %에서 100%까지 다른 결과를 보이고 있어서 액체의 확산이론은 정확히 입증되지 못하고 있다. 다만, 어느 온도에서의 확산계수는 다음의 아레니우스 식을 편의적으로 사용할 뿐이다.

$$D = D_0 \exp(-Q/kT)$$

여기서 D_0 는 확산계수, Q 는 활성화 에너지, k 는 볼츠만 정수이다. 이 식의 의미는 원자의 확산에 대하여 포텐셜 장벽을 넘으므로 열활성이 필요하다. 고체의 확산에서는 아레니우스 식이 실험결과와 일치하며, 액체 중에서 원자의 확산은 열활성과정임을 나타낸다.

우주에서 최초의 확산실험은 Ukawa에 의해 1973년 스카이랩에서 행해진 아연의 자기확산계수 측정실험이며, 이때 얻어진 결과는 마랑코니 대류에 의한 교란이 생기는 것으로 생각되었고 지상에서 측정된 가장 높은 정도의 값보다도 약 10% 작았다. 이는 미소중력 하에서의 확산계수의 측정이 정도가 높음 암시하는 것으로 본다. 그 후, 아폴로 소유즈 계획에서 납 중에 금의 확산거동을 측정하였으나 심한 농도차 마랑코니 대류로 인하여 좋은 결과를 얻지 못하였다. 그리고 1983년 스페이스랩을 이용한 납의 자기확산계수 실험에서는 보다 명확한 결과를, 얻은 바 있으며, 그 정도는 0.4~1.0% 였다. 이는 지상에서 최고의 정도로 얻은 결과에 비해 20~40% 낮은 값으로 나타났다.

5. 재료제조와 미소중력

5.1 중력과 재료특성

5.1.1 조성 및 불순물의 균일성

지상에서 반도체 등의 전자재료를 제조하는 경우에 다원계의 결정이나 불순물을 첨가한 결정을 육성하려면 조성이나 불순물의 분포가 불균일하게 되어 결정의 전기적 특성이 좋지 않다. 이러한 현상은 열대류에 의하며, 고액계면 부근의 저온용체와 계면으로부터 떨어진 고온용체를 교반하기 위한 고체계면에 온도요동을 시키므로 결정의 성장속도가 일정하지 않고 국소적으로 조성변동이 나타난다.

5.1.2 결정결함

전자재료에 있어서는 결정 중에 공격자나 격자간 원자 등의 점결함, 인상전위 및 나선전위 등의 선결함, 쌍정이나 적층결함 등의 면결함 등은 전자재료의 질을 저하시키므로 저결함재료의 개발에 많은 노력이 요구된다. 예를 들어, GaAs(갈륨비소) 단결정의 경우에는 In을 첨가해 임계전단응력을 크게하는 방법이 사용되고 있다. 그리고 요화수은은 유동성이 있는 결정이므로 결정성장 중에 자중에 의해 전위가 발생하므로 미소중력의 무중압을 이용한다면 무전위 결정을 얻을 수 있다.

5.1.3 고순도화

전자 디바이스나 광전자 재료는 미량의 불순물이 재료의 특성이나 광학특성에 대단한 영향을 미치므로 고순도화는 가장 큰 과제이다. 지상에서는 이러한 재료의 제조시에 도가니를 사용하나 미소중력 하에서 무점촉부유를 사용하면 도가니를 사용하지 않으므로 고순도 물질을 얻을 수 있다.

5.2 응고 결정성장과 미소중력

5.2.1 대류와 용체 중의 온도분포

응고과정은 고액계면에 있어서 용체로부터의 열방출에 의해 생기는 것으로 용체 중에는 필연적으로 온도구배가 생겨 밀도의 차이가 나타나며, 이는 대류발생의 원인이 된다. 대류와 용액 중의 온도분포의 관계는 용액의 물리정수의 관계인 브

랜들 수로서 표시된다.

$$P_y = \mu C_p/k$$

여기서 μ 는 점성, C_p 는 비열, k 는 열전도율이다. 이렇게 브랜들 수는 물리정수로서 표 2에서와 같이 산화물의 용체에서는 1 보다 크며, 금속이나 반도체에서는 1 보다는 현저히 작은 10^{-2} 정도의 값을 갖는다. 브랜들 수가 작은 용체에서는 온도분포가 완만하여 그다지 영향이 없으나, 오히려 열전도에 의해 좌우된다. 한편, 브랜들 수가 큰 용체는 온도분포가 완만하여 물질이동에 의존하는 수가 있다.

그림 6은 높은 브랜들 수(a)와 낮은 브랜들 수(b)의 혼합재의 유속과 온도분포의 씨물레이션 결과이다. 높은 브랜들 수를 갖는 용체(a)는 온도분포가 완만함에 따라 영향을 받는 것에 비해, 낮은 브랜들 수를 갖는 용체는 용체흐름과 온도분포에 거의 상관관계가 없음을 알 수 있다. 반도체와 같이 브랜들 수가 작은 용체는 대류가 정상적인 흐

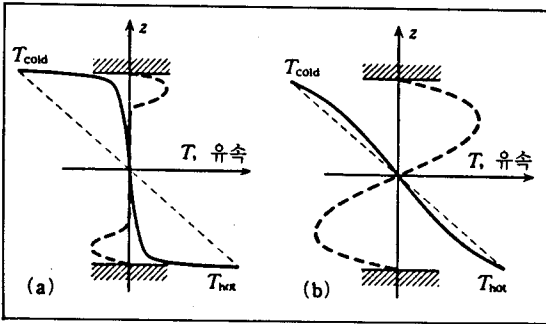


그림 6. 높은 브랜달 수(a)와 낮은 브랜달 수(b)인 경우의 온도분포와 액체의 흐름(파선; 열전도의 경우 온도분포, 점선; 흐름의 속도, 실선; 흐름을 고려한 온도분포)

름으로 부터 비정상적인 흐름, 주기적인 흐름 및 불규칙한 흐름으로 이행한다. 비정상적인 흐름은 용체의 온도변동을 갖으며 결정의 질을 저하시키기도 한다.

5.2.2 대류와 용체의 재분포

응고 중에 고체의 용질원자 농도는 고액계면 전방의 용액 중의 용질농도와는 다르다. 이는 순물질 등의 예외적인 것을 말하는 것으로, 상태도상에서 고상선과 액상선이 일치하지 않으므로 고체는 항상 이와 평행하는 액체와 조성이 다른 것이 된다. 따라서 고액계면에 있어서 고상의 용질농도가 액상의 농도보다 낮은 경우에 용질원자는 계면에서 배출된 액체 중에 확산한다. 이러한 고액계면 전방의 액상 중의 용질확산 경계층의 존재에 따른 대류의 유무에 따라 결정성장의 고액계면에 이것이 존재하면 대류에 의해 용질확산층이 감소하므로 고상의 용질농도가 결정의 처음부터 마지막에 걸쳐 달라지고 있다.

한편, 미소중력 하에서는 대류가 존재하지 않으므로 확산경계층을 통과하는 용질물질의 이송이 나타나면, 결정의 처음과 마지막에 걸쳐 정상상태의 성장인 중간부에서는 실효분배계수가 1이 된다. 액상과 같은 조성의 균일한 고액체 결정이 얻어지므로 미소중력 이용에 의한 고품질 결정의 제조가 가능하다.

5.3 미소중력과 응고재료

과거 우주실험에서 몇 차례에 걸쳐 재료제조에 관한 실험이 있었다. 지상에서 제조한 동일 재료와 비교해서 차이점이 있었으며, 특히 응고와 관련한 공정합금과 비혼합합금인 편정합금에 대한

표 2. 각종 용액의 브랜들 수

용액	Zn	Ga	Ge	Si	MgAl ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
응고온도 T _m (K)	693	303	1,210	1,683	2,412	2,318
동점성계수 ν (cm ² /s)	4.4×10^{-3}	3.2×10^{-3}	1.3×10^{-3}	2.7×10^{-3}	3.3×10^{-2}	0.35
열확산계수 α (cm ² /s)	0.2	0.15	4×10^{-2}	5×10^{-2}	$\sim 5 \times 10^{-3}$	$\sim 10^{-2}$
브랜달수 Pr= ν/α	2.2×10^{-2}	2.2×10^{-2}	3.2×10^{-2}	5.4×10^{-2}	~ 8	~ 40

결과가 괄목하였다.

5.3.1 마소중력 하에 있어서 공정합금의 제조

공정합금을 일방향 응고시키기 위하여, 열류를 제어하여 응고속도와 고액계면의 온도구배를 일정하게 유지하면서 응고가 제어되면 응고방향으로 정렬된 조직이 얻어진다. 예를 들어, $CuAl_2$ 의 공정합금의 일방향 응고에서는 층상조직이 되며, $Al-Al_3Ni$ 의 공정합금의 경우는 제 2 상의 Al_3Ni 가 섬유상의 조직이 된다. 이러한 제 2 상이 정렬된 조직제어 재료를 in situ composite라 부른다. 이렇게 조직제어된 재료는 인장강도와 크립강도 등의 기계적 성질이 조직제어가 되지 않은 공정합금에 비해 우수한 특성을 갖으므로 터빈 블레이드 재료 등의 내열재료로서 용도가 기대된다.

소형 로켓 실험에 의해 MnBi-Bi계 합금의 결과에서는 미소중력 하에서 제작된 시료의 섬유간 거리가 지상에서 제작된 것에 비해 50% 이상 감소하였고 고액계면에서 과냉도가 증가한 것으로 보고되었다. 공정합금의 일방향 응고에서는 섬유간 거리 또는 층간 간격 λ 과 응고속도 R 간에는 $\lambda R^2 = \text{일정}$ 의 관계가 있음이 많은 실험에서 입증되었다. 이러한 관계는 응고속도 R이 증가하면, 섬유간격이 감소한다는 의미를 나타내며 미소중력 하에서의 일방향 응고는 지상에서의 응고속도의 증가와 대응하는 것이다.

표 3은 각종 공정합금이 미소중력 하에서 일방향응고 상간격의 변화를 나타낸다. 이 표에서 특별히 일정한 범칙적 변화는 관찰되지 않는다. 그림 7은 중력 하에서와 미소중력 하에서 MnBi-Bi계 공정합금의 섬유간격을 나타낸다. 그림 중의 $\lambda R^2 = \text{일정}$ 의 직선관계로부터 대류의 효과가 있음을 알 수 있다.

미소중력 하에서 공정합금의 일방향 응고상 간격의 변화에 대하여 확산계층과 대류, 용질의 재분포와 대류, 과냉효과 등을 고려하여, 이 현상의 이론적 해명이 시도되고 있다. 이 간격에 관해서는 실험장치의 제어정도, 온도측정 정도 등의 개선은 실험결과의 신뢰성을 높일 수 있다.

표 3. 미소중력 하에서 공정합금의 일방향응고 조직의 상간격

층상조직	미소중력의 효과 (%)
Al_2Cu/Al	불 변
Fe_3C/Fe	- 25
섬유상조직	
MnBi/Bi	- 50
InSb/NiSb	- 20
Al_3Ni/Al	17

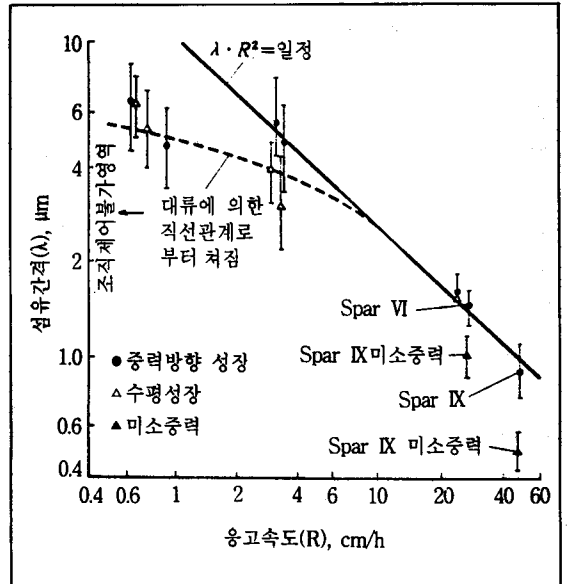


그림 7. 중력과 미소중력 하에서 MnBi-Bi의 섬유간격과 응고속도의 관계

5.3.2 미소중력과 편정합금

비혼합합금은 액상상태에서 두 층으로 분리되며, 고상에도 전혀 고용하지 않는 경우가 많다. 따라서 지상에서 편정합금을 용해응고하면 액상에서 두 상이 물과 기름을 혼합시키는 것과 마찬가지로 밀도차나 대류에 의해 분리되므로 고체상태의 마크로적 편석을 일으킨다. 그러므로 지상에서는 비혼합합금의 균일조성 재료를 제조하는 것은 곤란하다. 특히, 재료특성의 관점에서는 두 상이 접하는 계면에서만 서로 혼합되고 나머지는 순도

를 유지하는 재료는 전기적 특성을 비약적으로 향상시킬 수 있으며, 밀도차가 없고 대류의 영향이 없는 미소중력의 이용이 시도되고 있다.

Ga-Bi 비혼합합금의 미소중력시험에서는 어느 정도의 혼합상태가 얻어졌으며, Zn-Pb나 Al-In의 실험결과에 의하면 거시적 편석을 일으키며, 미소중력에 의한 비혼합합금의 균일분산이 당초의 목적과는 다소 일치하지 않음을 보였다. 이러한 원인은 도가니와 비혼합합금의 젖음성의 문제, 오스트발트 성장, 표면장력 차에 의한 이동, 대류에 의한 충돌, 합체기구 등에 의한 것으로 보나 결정적인 결론을 말하기는 어렵다.

한편, 매우 흥미를 끄는 것은 Ga-Bi 비혼합합금의 실험에 있어서, 초전도 상태에의 천이온도 변화가 보고되었으며, 이는 중력 하에서 제작된 재료에 비해 미소중력 하에서의 시료의 초전도 천이온도가 높아진 사실이다. 마찬가지로의 결과로서 스카이랩에서 실시된 Pb-Zn-Sb의 실험에서 관찰된, 보다 높은 초전도 전이온도를 갖는 재료가 미소중력 하에서 제작되고 있다.

6. 진공 및 복합환경

6.1 진공의 정도와 질

대기의 밀도와 조성은 고도에 따라 다르며 기체의 입자밀도를 압력으로 환산하면 고도 250~500 km에서의 압력은 $10^{-4} \sim 10^{-7}$ Pa 정도이다. 이러한 진공도는 지상에서의 진공장치로도 가능하다. 그러나, 지상의 대기는 질소와 산소가 4:1의 비율로 존재하나 이러한 고도의 대기는 대부분이 자외선에 의해 해리된 원자상의 산소로서 나머지는 질소와 헬륨이다. 기체의 밀도에 1~2행의 폭이 있는 것은 11년 간격으로 활발해지는 태양의 활동주기에 기인한다고 본다. 궤도를 높이면 압력은 보다 낮아지며 고도 36,000 km의 정상궤도에서는 10^{10} Pa 이하의 극고진공을 얻을 수 있으나 수송수단이 어려워 진다.

그런데, 우주선은 기체분자의 열분자운동에 비

해 매우 빨라 7.8 km/s의 초고속으로 비행하므로, 보다 낮은 궤도에서도 지상에서는 얻기 어려운 극고진공이 가능하다. 그림 8은 우주선에 차폐된 원반을 붙인 것으로, 이 원반을 우주선의 진행방향으로 향하면, 원반은 기체를 헤치며 기체는 헤쳐진 공간을 만들게 된다. 그러나, 우주선의 비행 속도는 수소나 헬륨 속도의 수배, 산소나 질소의 십수배의 속도를 가지므로 기체가 채워지는 데에는 시간이 걸린다. 따라서, 원반의 웨크 내에는 극고진공이 생긴다. 고도와 기체의 종류에 따라 분압이 다른 것은 기체 각각의 분압과 속도가 다르기 때문이다. 여기서 가장 활성이 높은 산소의 분압은 10^{-12} Pa 이하가 된다.

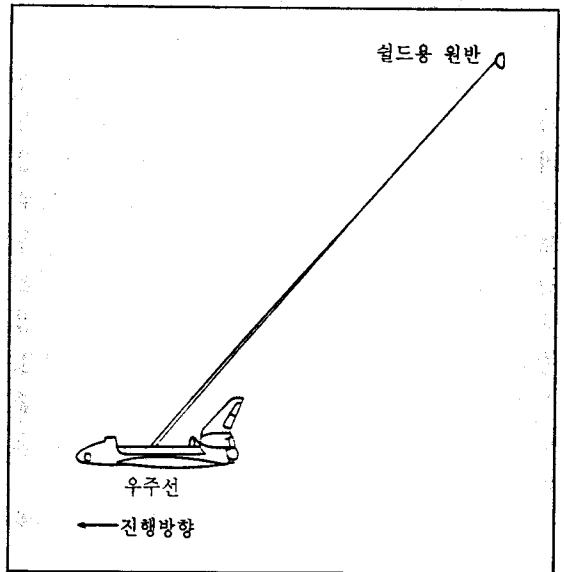


그림 8. 스페이스셔틀에 달린 원반의 모양

웨크 내의 압력분포는 기체의 조성밀도와 열분자운동의 속도분포에 의존하고 원추상이 된다. 그림 9는 직경 10m의 원반이 형성하는 웨크의 압력분포를 나타내며, 극고진공이라 할 수 있는 10^{-10} Pa 이하의 공간의 크기는 300 m^3 에 달한다.

기체의 평균자유행정은 매우 길어서 실험장치로부터 방출된 기체는 원반으로 되돌아오지 않는다. 이는 우주공간이 무한의 배기속도와 배기용량을 갖춘 진공펌프라 볼 수 있다.

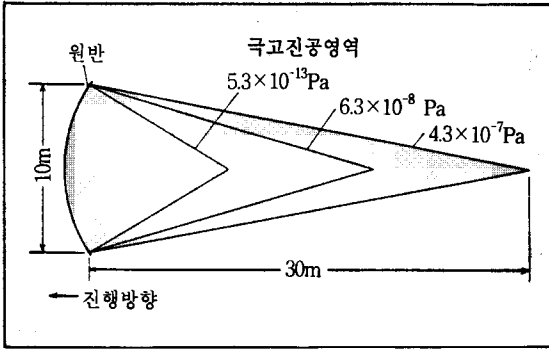


그림 9. 직경 10 m인 원반 웨크로 가능한 극고 진공의 압력분포

6.2 극고진공의 이용

극고진공을 가장 필요로하는 것은 전자재료의 제조와 가공분야이다. 재료의 성능을 극한까지 이용하여 초고속 소자나 광반도체소자를 만들려면 그림 10에서와 같이 띠간격이 다른 재료를 서로 적층하는 등, 원자 레벨에서와 같이 높은 정도의 박막제조와 가공이 필요하게 된다. 전자재료의 전자물성은 소재의 결정학적 조성, 불순물 및 결합에 민감하나, 화학분석으로는 검출하기 어려운 미량의 석출 불순물 농도가 전자물성을 변화시킬 수 있을 것으로 본다. 그런데, 진공 중에서의 재료 표면은 보통 잔류기체에 영향을 받으며, 잔류기체의 양은 압력에 비례한다.

원자 레벨에서의 박막제조는 분자 빔상태의 금속을 기판상에 Epitaxial 성장시키며 적층하는 MBE, Epitaxial 성장시키며 화학증착하는 CBE (Chemical Beam Epitaxy) 및 MOCVD(Metal Organic Chemical Vapor Deposition) 등의 피막 기술이 가장 유망하다. MBE 장치는 실용 진공장치 중에서 가장 낮은 압력을 달성시키고 있으나, 그 도달압력은 10^{-9} Pa 정도이며, 피막성장속도는 $\sim 1 \mu\text{m/hr}$ 로서 ~ 1 원자량에 상당한다.

MBE 장치는 신소재 개발에 많이 사용되고 있으나, 연구에서 생산까지는 문제가 많다. 그 이유는 제조원가가 높고, 잔류기체의 변화로 피막특성이 열화되기 때문이다. 한 원자층의 두께로 제어

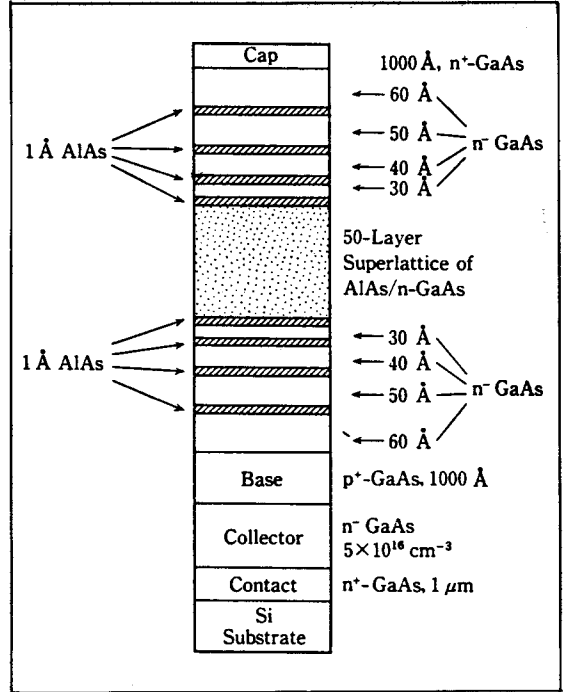


그림 10. GaAs/AlAs 초격자를 이용한 적층 트랜지스터 에

하여 피막을 성장시키기 위해서는 성장속도를 지연시킬 필요가 있으며, 잔류기체의 영향은 크므로 압력은 최대한 낮추는 것이 기술이다.

고온초전도체나 자성광학기억소자의 개발을 위해서는 희토류금속자성초격자의 제조도 MBE 등을 사용한 원자 레벨에서의 박막제조가 주목되고 있다. 이는 반도체에 비해서 활성금속이 현저하게 잔류기체의 영향을 받으므로 극 고진공이 요구된다. 재료의 표면에서 원자 레벨의 분석 및 박막적층과정이나 화학반응 등의 명확한 해명도 잔류기체의 영향이 없는 극고진공이 필요하다.

6.3 복합환경

우주의 진공특성은 10^{-6}g 정도의 미소중력과 태양광, 방사선 및 원자상태인 산소 등의 복합상태이다. 산소와 결합이 쉬운 고융점의 재료도 무점속 부유상태에서 용융하면 초고순도로 정련이 가능하다.

태양광은 대기를 통과하며 감쇄되고 굴절되어 지상에 도달하는 과정에서 약 40%가 소실되나 우주에서는 약 1.4 kW/m^2 의 조사강도가 있을 뿐 아니라 파장이 긴 마이크로 파에서 부터 적외선, 가시광선, 자외선 X-선 및 γ -선까지 전파장영역에 전자파가 존재한다. 그리고, 빛은 대기가 없으므로 지향성을 갖는다. 따라서 에너지원으로서 뿐만 아니라 광화학반응이나 반도체소자 제조의 광원으로 사용도 이용이 기대된다.

250~500 km인 고도에 다량으로 존재하는 원자상태의 산소는 매우 활성이 커서 우주선의 진행 방향 면에는 7.8 km/s 의 상대속도, $\sim 10^{15} \text{ atom/cm}^3$ 밀도로서 충돌한다. 스페이스 셔틀에 탑재한 각종 시료의 폭로실험에 의해 금속은 모두 안정하나 탄화수소계의 고분자재료는 반응이 빨라서 손상속도는 $2\sim 3 \times 10^{-24} \text{ cm}^3/\text{atom}$ 에 달한다. 충돌속도가 화학결합의 해리 에너지와 거의 같은 수준인 $\sim 5 \text{ eV}$ 에 상당하므로, 해리반응을 일으키기 쉽다. 원자상태의 산소는 반사 등의 광학특성이나 구조재료의 강도에 악영향을 주지만 재료개발에는 이 특성을 역이용하여, 부식이나 산화 등의, 우주에서의 반도체소자에 유용할 수 있다.

7. 향후 전망

무한방대한 우주는 인간의 사고력으로 상상을

초월한 신비 그 자체여서, 아무리 대범하게 마음 먹고 상상을 펼쳐도 가늠할 수 없어 두려움도 느끼게 한다.

이러한 우주에 인류는 금세기에 들어서, 지상을 벗어나 얼마 떨어지지 않은 공간까지는 손을 뻗쳐 신비를 해명코자하고 있으며, 나름대로 소기의 성과도 얻고 있다.

거시적으로 보아, 무한한 우주를 향해 인류는 앞으로도 작은 손짓을 끊임없이 할 것으로 예상되나, 미시적으로는 현재까지 얻어진 우주의 정보를 지상과는 다른 차원에서 인류를 위해 이바지될 점은 무엇인지 지속적으로 찾으려 할 것이다.

이에, 우리 재료학도는 이제 막이 오르는 우주와 재료라는 분야에서 나름대로 그 관점을 활용할 수 있는 새로운 재료기술을 공부하려는 노력이 바로 소임이 아니겠는가?

참 고 문 헌

1. 우주와 재료 ; 일본재료과학회, 상화방 (1991) 205-238
2. E.A.Starke ; NASA-UVa Light Aerospace Alloy & Structure Technology Program Supplement (1993)