

미세중력(Microgravity) 응용 연구

지구상에서 살고 있는 우리는 일상 생활의 모든 영역에서 나타나는 여러 자연 현상을 당연하게 받아들이고 있어 미세중력(Microgravity) 하에서 일어나는 특이한 현상에 대해서는 신기하고 낯설게 느끼게 된다. 지구상에서 중력은 절대적 힘으로 작용하고 있지만, 때에 따라 과학적 이용에는 장애의 요소가 되기도 한다. 최근 들어 우주왕복선(space shuttle), 우주정거장(space station)의 출현으로 인해 중력에 의한 악영향을 최소화할 수 있게 되어 미세중력 하에서의 연구도 중요한 과제로 부상하게 되었다. 미세중력이라 함은 중력의 $10^{-6}g$ 정도를 말하며 무중력(weightlessness)이라고 표현하기도 한다. 미세중력이 되는 환경으로는 크게 두 가지 경우를 들 수 있다.

하나는 지구의 중력장에서 멀리 떨어지는 것이고 다른 하나는 지구의 중력장에 있다 하더라도 지구의 중심을 향하여 자유 낙하하는 경우를 들 수 있다. 전자의 경우 지표면에서 약 640만km 떨어진 거리(지구-달 사이 거리의 17배)에서 지구상에서의 중력의 $10^{-6}g$ 에 해당하는 값을 얻을 수 있다. 그러나 우주선들의 경우 지표면에서 200-450km 거리에 있어 후자의 경우에 해당되며 궤도 운동이 자유 낙하 운동과 동일한 영향을 미침을 이해하여야 한다.

본 원고에서는 미국 NASA에서 수행하고 있는 연구분야를 조사하여 간단히 소개하고자 한다. 미세중력 환경은 물질의 세 가지 상태인 고체, 액체, 기체에 대해 지구의 중력으로 인해 밝혀지지 않은 특정한 현상 및 과정에 대한 관찰과 탐구의 기회를 제공한다.

이러한 연구는 1960-1970년대에 우주계획의 일환으로 최초로 시작되었으며 Apollo, Skylab, Apollo-Soyuz 계획 하에서 실험이 시도되고 발전되었다. 1981년에 최초의 우주왕복선 발사가 있는 후로 미세중력에 관한 연구는 이전의 결과를 토대로 한층 더 발전하게 되었으며 현재 미세중력에 관한 연구는 일반적으로 생물공학(biotechnology), 연소과학(combustion science), 유체역학(fluid physics), 기초물리학(fundamental physics), 재료과학(material



이 규 정

고려대학교 기계공학과 교수

science)의 5가지 영역으로 분할하여 수행되고 있다. 이러한 연구 결과들은 현재의 과학이론을 수정하거나 증명하고 미세중력 하에서만 가능한 새로운 물리적 이론들을 해석하는 데에 유용하게 사용된다.

생물공학(Biotechnology)

생물공학은 생물의 분자, 조직 및 기관 등을 연구, 개발 및 제조하는 응용 생물학이다. 의학, 농업, 환경 보호적 측면에서 생물공학은 21세기의 우리의 삶과 경제에 중요한 역할을 하게 될 것이다. NASA의 미세중력-생물공학 프로그램은 단백질 결정 성장(protein crystal growth), 포유류 세포 및 조직 배양(mammalian cell & tissue culture), 기초생물공학연구(fundamental biotechnology)의 세가지 항목에 초점을 맞추고 있다.

단백질은 인체를 구성하고 있는 중요 요소일 뿐 아니라 혈액에 산소 및 영양소 공급, 병원균 퇴치 등 중요 기능과 밀접한 관계를 가지고 있다. 단백질 성장을 연구하는 주요 목적은 단백질 구조의 파악 및 기능과의 관계 해석, 의약품의 개발에 있다. 이를 연구하기 위해서는 결함이 적은 양질의 큰 단백질 생성이 요구되나, 지구상에서는 중력에 의해 야기되는 부력에 의한 대류 및 침전현상(sedimentation) 등으로 단백질 결정체 성장이 억제될 뿐 아니라 결함도 많이 나타나 연구를 어렵게 한다. 미세중력 하에서는 대류에 의한 유동이 크게 억제되므로 결정체 성장이 훨씬 안정된 환경에서 이루어지며 구조적 배열이 개선되고 침전현상이 없어 단백질 결정 공정시 사용되는 용기의 밑바닥에 쌓이지 않아 양질의 단백질을 생성할 수 있어

이에 관한 연구가 활발히 진행 중이다.

동물의 세포 및 조직 배양은 생물공학 연구에서 단백질 성장과 마찬가지로 중요 분야이다. 이는 인체 외부의 치료 기술과 조직 이식을 활성화시켜 의학기술의 진보를 가져다 주리라 예상되나 현재의 의학기술은 인체 내에서와 같은 완전한 상태로 세포 및 조직을 배양시킬 수 없는 한계에 직면해 있다.

지구상에서 대부분의 조직 배양은 평판 형태의 배양기에서 1차원적으로 이루어지게 되어 생명체 내에서 3차원적으로 배양되는 것에 비해 외형과 기능적 면에서 차이가 나타난다. 중력에 의한 유체의 유동과 침전효과는 전단력을 일으켜 합체되려는 세포들의 수를 억제, 각각을 분리하려는 특성을 가지고 있다. 전단력을 줄이고, 3차원적 구조형태로 세포 및 조직들을 배양하기 위하여 현재 수평실린더의 회전에 의해 중력효과를 감소시키는 반응기(rotating wall bioreactor)를 사용하고 있다. 세포와 조직에 작용하는 응력을 제어함으로써 효과적인 배양이 이루어지며 인체조직에 대해 표본화 할 수 있는 전형적인 세포의 배양이 가능해졌으며 미세중력장에서는 전단력이 최소화 되어 더욱 큰 양질의 세포 조직의 배양이 이루어진다.

이러한 방법을 사용하여 연골조직, 골수, 심장 근육 및 간세포 등의 배양이 연구되고 있으며 심장 및 신장 질환, 바이러스성 전염병, 종양, 암 등에 관한 모델이 개발 중이다. 기초생물공학에 관한 연구는 미세중력 하에서 생물공학의 공정 및 생체의 물리적 현상을 이해, 해석하는데 주안점을 두고 시행되고 있다. 분자 및 세포의 분리·합체 기술, 전기력에 의한 유동, 물질전달, 모세 및 표면 현상 등이 생물공학에 적용할 수 있는 기초연구로 구성되어 있다. 특히

전기이동(electrophoresis), 상 분리(phase partitioning)에 관한 실험은 우주비행시 비교적 일찍 연구가 시작되었으며 유체역학과 연계되어 추가적 해석이 진행되고 있다.

연소(Combustion)

인류 역사의 획기적 발전은 불의 사용으로부터 이루어졌다고 한다. 전력 생산, 가정 난방, 교통 수단, 재료 공정 등 많은 분야에서 연소를 이용하여 보다 나은 윤택한 생활을 이루고 있으나 잘못된 사용으로 인한 위험성을 항상 내포하고 있다. 지금까지의 많은 연구에도 불구하고 연소현상에 대한 정확한 이해는 아직 부족한 실정이다. 미세중력에서의 연소에 관한 연구는 미세중력 하에서 화염의 점화 및 전파, 소화 현상을 해석하고 이를 중력 하에서의 연소현상과 비교하여 연소현상에 대한 기본적 이해를 높이는데 있다.

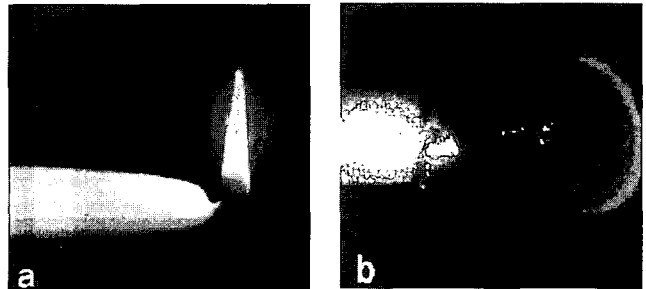
중력 하에서 연소는 밀도의 불균일로 야기되는 부력과 침전의 영향으로 화염 주위에 비대칭 형태의 유동을 야기하여 연소의 기본 메커니즘에 대한 해석을 어렵게 한다. 그러나 미세중력 하에서는 부력 및 침전의 영향이 없어 부가적인 효과가 복합되지 않은 대칭 형태의 안정적 화염을 형성하여 해석을 용이하고 연소 자체의 특성을 보다 잘 파악할 수 있다. 또한, 연료를 잘 섞기 위한 보조 장치 필요 없이 균일한 유체들을 유지할 수 있어 연소 실험시 장기간, 보다 큰 규모로 수행할 수 있는 장점이 있다. 주요 연구 과제로는 예혼합화염(premixed flame), 확산화염(diffusion flame), 연료 액적 및 분무, 고체연료, 화염전파등이 있다.

지금까지 미세중력과 정상상태의 중력(1g) 하에서 다양한 형태의 화염의 구조에 대한 비교 연구가 진행되어 왔다. 그 결과로 미세중력 및 중력 하에서 생성되는 검댕(soot)의 크기가 다름이 밝혀져 우주에서는 공기 중 검댕을 감지하는 대다수의 화재경보기에 대해 재설계가 필요함이 밝혀졌다. 미세중력 하에서의 연소 특성은 지구상의 연소반응에도 응용되어 저공해, 고 연소효율, 화염의 안전(fire safety)성에 관한 방안이 제시되고 이에 관한 측정기술 또한 개발되고 있다. 또한 희박연소(lean burning)에 대한 연구가 활발히 진행 중이며 엔진 및 연소기에서 광학적 방법과 레이저를 사용하여 검댕을 제어할 수 있는 기술이 개발중이다.

나아가 새로운 연구항목으로 재료과학과 관련하여 특정 조건에서 연소반응을 일으켜 새로운 물질을 개발하려는 시도가 이루어지고 있다.

유체역학(Fluid Physics)

유체는 작은 외력에 대해서도 저항 없이 유동하는 물질을 일컬으며 흔히 알고 있는 액체와 기체가 이에 해당한다. 유체역학 연구는 미



a. 중력 작용시 부력에 의한 대류는 촛불의 화염을 눈물형상(teardrop-shaped)으로 노란 빛을 띠게 하며 화염의 끝 부분으로 검댕을 이동시킨다.
 b. 미세중력 하에서 대류에 의한 유동이 없어지므로 화염은 구형태를 유지하며 검댕이 사라지며 파란 빛을 띤다.

세규모(microscale)로부터 지구의 대기를 연구하는 범위까지 광범위하게 수행되고 있으며, 열 및 전기에 의한 유체 유동, 두개의 다른 유체 또는 유체와 고체의 경계면에서의 상호작용, 고체분자, 액적 및 기포의 유동, 상변화에 따른 유동 해석 등 유체유동의 물리적 원리를 탐구한다. 중력은 유동, 경계면 형성, 유체를 압축하는 구동력을 유발하여 유체역학과 관련된 많은 현상에 영향을 미친다. 이러한 중력이 제외된 미세중력 환경에서는 유동의 형태가 달라지며, 이를 연구·비교함으로써 물리적 특성의 해석을 구체화하여 기초 과학기술의 향상과 지구상에서도 유용하게 적용함을 목적으로 한다.

중점적인 연구 분야로는 complex fluid (colloids, gels, foam 등)의 상태치 연구, 다상 유동과 열전달, 상간의 경계면 현상, 모세력과 전자기력의 영향 및 안정성 등이 있다.

미세중력에서는 콜로이드의 상변화가 잘 관찰될 수 있으며, 중력에 민감한 foam인 경우, 보다 안정적인 특성이 있어 활발히 연구가 진행 중이다. 또한 비등 (boiling), 응축 (condensation) 및 확산(diffusion) 등의 과정과 관련하여 여러 조건에 대하여 다상유동 (multiphase flow) 및 열전달에 관한 연구가 이루어져 열전달시스템, 가스정화시스템에 적용되고 있다. 특히 비등 현상은 많은 양의 에너지를 효과적으로 전달할 수 있어 이를 이용한 에너지 변환시스템에 다양하게 적용되고 있다.

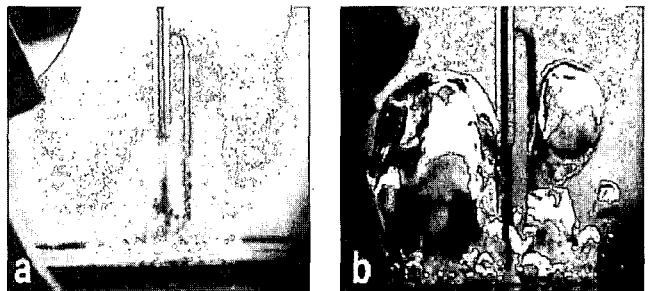
미세중력 하에서 유체의 동적 특성 및 안정성과 관련하여 액적의 거동, 모세 (capillary) 현상, 유동의 전자기적 특성 등의 연구도 활발히 진행되고 있다. 외력과 특정한 화학적 조건에서 액체의 액적 및

기체 방울의 유동 현상에 관한 연구분야에서는 비에서부터 화학 반응에 이르기까지 액적 및 기포의 역할을 조사하고 있다.

표면장력은 기체와 액체, 두 액체, 하나 또는 그 이상의 액체, 기체와 고체 사이의 경계면에 작용하는 힘이다. 표면장력은 중력이 작용하는 지구상에서는 미세규모 (모세관, 기포, 액적 등)를 제외하고는 그 효과가 그다지 크게 나타나지 않으나 미세중력 하에서는 상대적으로 큰 구동력으로 작용하게 된다.

따라서 표면장력에 의해 유체 간에 경계면이 형성되고 표면장력 변화에 따른 유동이 야기된다. 또한 유체의 유동에 전기·자기장이 작용될 때의 유체 거동에 대하여도 연구가 되고 있으며 생물체 내에서 전자기적 성질을 갖는 신경계통과 관련된 유동을 모델링 하여 해석하는데도 도움을 주고 있다.

기타 분야와 연계되어 유체역학적 연구 결과들은 유체와 같은 특성을 갖는 토양에서 구조물 설계, 액체 금속 재료에 대한 해석, 기체-액체 이상유동에 대한 정보를 필요로 하는 플랜트 설계 등 각종 영역에 확대 적용될 수 있다. 특히 응용된 상태에서 합금, 결정체 재료의 불



a. 중력 하에서 밀면가열로 인해 비등된 기체는 부력으로 인해 작은 기포상태로 떨어져 액체의 표면으로 상승한다.
 b. 미세중력 하에서는 대류와 부력의 영향이 없어 가열된 기포는 용기의 밀면에서 오랜 시간동안 성장하여 크기가 커진다.

순물을 제거시 상당히 유용한 방법을 제공할 수 있다.

기초물리학(Fundamental Physics)

기초물리학은 원자에서부터 우주에 이르기까지 물리적 현상을 지배하는 모든 기초 법칙을 연구 대상으로 한다. 기존 법칙을 더욱 발전시키는 것은 물론 아직 밝혀지지 않은 새로운 지식에 대한 탐구가 주목적이다. 미세중력 하에서 기초물리학의 연구는 주로 중력의 영향이 없을 때 물리적 현상을 파악하기 위해 수행되고 있다. 지상에서의 자유낙하의 무중력 실험은 짧은 시간 (sounding rocket인 경우 수 분)에 수행하여야 하므로 시간제약도 문제가 된다. 지상에서의 환경은 정밀한 제어가 어려워 항상 주위의 진동 또는 잡음, 즉 외란 등에 의한 영향을 배제할 수 없어 세밀한 실험을 요하는 경우 미세중력에서의 실험이 보다 정확한 결과를 준다. 또한 미세중력에서의 실험은 정교한 측정실험 기기의 개발에 응용될 수 있다.

주로 연구되는 분야로는 응축물질(condensed matter), 레이저냉각과 원자물리, 중력과 상대성이론 등이 있다.

중력과 상대성이론을 연구하기 위해서는 지상에서 뿐만 아니라 아주 미세한 차이를 가지고 있는 중력의 영향을 받지 않는 영역에서의 실험도 수행하여야 한다. 이를 비교함으로써 새로운 현상을 관찰할 수 있으며 미세중력 하의 실험조건은 지구상에서보다 여러 가지 단순화가 가능하게 된다.

미세중력 하에서 기초물리는 최근까지 주로 극 저온에서 응축하는 물질, 특히 액체 상태의 헬륨에 대하여 연구가 이루어져 왔다. 물질을

형성하는 원자들의 집합체는 압력, 온도 및 기타 외부 상태의 변화에 반응하게 된다.

연구자들은 이러한 반응을 지배하는 법칙을 이해하여 특정한 조건에서 원자들의 반응을 예측하고자 한다. 특히 기체와 액체의 상태가 명확히 구분되지 않는 임계점 근방에서의 물질의 상태, 임계현상(critical phenomena)에 관한 연구에 많은 관심이 집중되고 있다. 헬륨은 2.17K에서 온도 차이가 없이도 열전도가 급속하게 일어나며 점성 효과가 사라지는 초유체(superfluid)가 되며, 다른 물질에 대해 우수한 해석모델을 제공한다. 미세중력 하에서 연구를 수행할 경우 원자의 운동을 나타내는 방정식에서 중력에 관련된 외부효과를 제거함으로써 좀더 정확한 해석을 할 수 있다. 임계점 부근에서 발견되는 또 다른 중요한 현상으로 초전도(superconductivity) 현상이 있는데 금속이 초전도체가 될 경우 물질의 전기 저항이 없어지며 주위의 자기장의 영향을 받지 않아 에너지 손실 없이 전류가 흐르게 된다. 이는 자기장 억제 및 온도 측정 등에 사용되며 그 응용범위가 점점 넓어지고 있다.

그 외에 현재 새로운 영역으로 레이저 냉각을 이용한 원자물리학에 관련된 연구가 진행 중이다. 레이저 냉각은 개개의 원자들과 운동량을 교환하는 특정 주파수의 빛을 입사시켜 원자의 운동속도를 감소시키는 역할을 한다. 미세중력 하에서 실험을 하게 되면 중력에 의한 원자의 가속을 줄임으로써 개개의 원자들의 운동을 구속(trapping)할 수 있고 레이저로 냉각된 저속의 원자를 관찰함으로써 그 특성을 해석 가능케 한다. 레이저 냉각에 의해 구속된 원자는 다른 주파수의 빛에 의해 상태가 주기적으로 변하는데 이 때 원자 내의 전자가 일정한

주기적 운동을 하게 된다. 이 원리를 이용한 원자시계는 정확한 시간측정을 필요로 하는 시스템에 적용될 수 있다. 미세중력 조건에서는 원자의 구속이 용이하고 오랜 시간 동안 일정한 상태가 유지되므로 우주선이 궤도에 따른 정해진 경로를 이탈하지 않고 유지하기 위해 필요한 정확한 시간을 측정하는데 도움을 준다.

이와 같이 기초물리학의 영역은 기술의 진보와 함께 물리적 현상의 대상이 확대되어가고 있기 때문에 이에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

재료과학(Material Science)

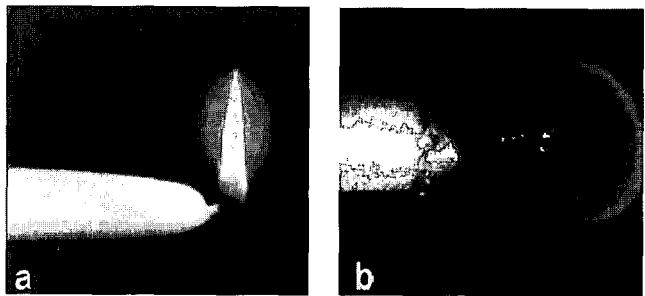
일상생활에 흔히 사용되는 재료로는 전자 및 광학재료, 금속 및 합금, 복합재료, 유리, 세라믹, 폴리머 등을 들 수 있다. 이들 재료는 대개의 경우 고온의 유체상태에서 결정화 과정을 통하여 고체의 재료를 얻어내므로 유체 상태에서의 특성이 고체 재료의 특성으로 반영된다. 이러한 상호작용을 밝혀 재료의 형성과정 동안 재료의 구조 및 특성을 결정하는 것이 재료과학의 목적 중 하나이다.

일반적으로 지구상에서의 부력에 의한 대류, 침전작용, 정수압(hydrostatic pressure) 등은 재료 형성에 지대한 영향을 미치는 것으로 나타나 있으며, 해석에 있어서도 복합된 작용으로 인해 어려움을 준다. 각종 재료의 형성에 있어서 중력으로 인한 이러한 효과는 재료 내부 구조에 불규칙성 및 결함을 유발하여 재료의 성질을 변화시킨다. 따라서 중력에 의해 야기된 복합 작용을 줄일 수 있는 미세중력에서의 재료 결정화 과정 및 결정체 성장

이 중요한 과제로 부상하였다. 재료를 결정화하는 방법으로 응고(solidification), 용액으로부터의 결정화 및 기체로부터의 결정체 성장 등의 방법이 있는데 이러한 공정들은 대부분 중력의 영향을 받는 유체들로부터 생성된다.

미세중력 하에서는 중력에 의한 효과가 줄어들게 되어 앞서 언급한 효과 뿐만 아니라 중력에 의해 제한된 재료의 크기나 재료 내에 발생하는 응력도 제거할 수 있는 장점이 있어 고품질의 재료를 생산하는 공정을 가능하게 하고 중력 하에서는 얻어질 수 없는 독특한 구조의 재료를 생산하는데 응용될 수 있다.

미세중력 환경 이용의 또 다른 장점으로 재료의 생성시 오염을 유발할 수 있는 용기(container)를 사용하지 않는 방법을 들 수 있다. 용기를 사용하지 않는 공정은 지구상에서도 사용될 수 있지만 미세중력 하에서는 재료를 부양(levitation)시키는데 상대적으로 훨씬 적은 힘이 소요되고 재료의 위치 제어가 쉽기 때문에 고집적 및 고효율화를 추구하는 현재의 상황을 볼 때 양질의 큰 규모의 재료를 얻을 수 있다.



- a. 지구상에서 중력 작용시 부력에 의한 대류는 촛불의 화염을 눈물형상(teardrop-shaped)으로 노란 빛을 띠게 하며 화염의 끝 부분으로 검댕을 이동시킨다.
- b. 미세중력 하에서 대류에 의한 유동이 없어지므로 화염은 구형태를 유지하며 검댕이 사라지며 파란 빛을 띤다.