마이크로 동력기관

이 글에서는 마이크로 동력기관에 대한 소개와 세계적인 동향 및 향후 발전 방향을 살펴본다. 조 형 희 · 주 원 구 · 이 진 호 · 우 성 제

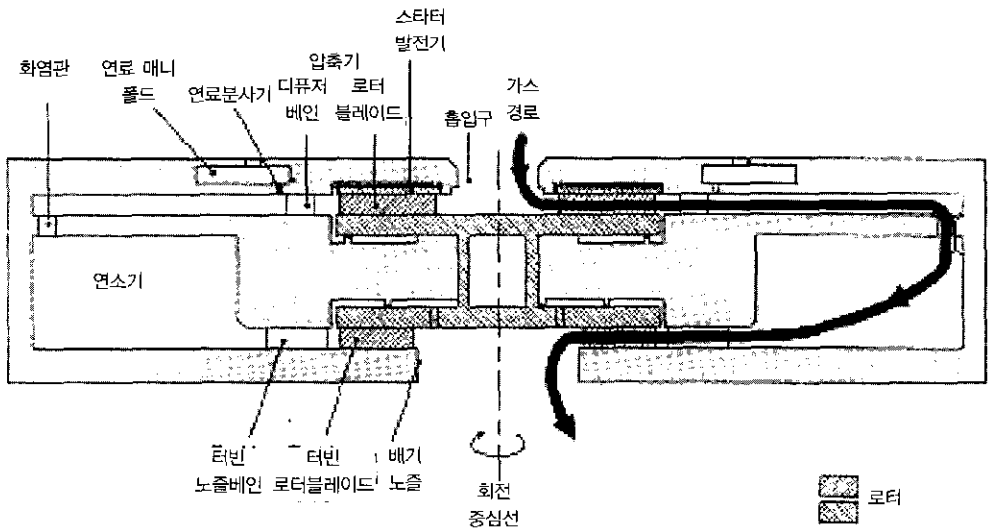
마이크로가공(micromachining) 기술의 발달에 따라 여러 가지 센서, 엑츄에이터, 밸브, 펌프, 채널 등 다양한 MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) 기기가 출현하게 되었다. 이와 더불어 마이크로 가스 터빈, 로켓 및 제트 등과 같은 마이크로 동력 발생/추진 기관의 제작이 가능해졌다. 마이크로 동력기관은 작은 동력이나 추력이 필요한 곳에 사용될 수 있고 또한 많은 수의 조합으로 기존의 거시적인 동력기관을 대체할 수도 있다. 마이크로 동력기관은 MEMS의 뛰어난 집적성에 의한 소형화의 장점과 더불어, 거시 시스템과 유사한 열적, 전기적, 기계적 동력 밀도를 가질 수 있어, 수 mm 크기의 시스템으로 10~100 W의 동력을 생산할 수 있으며, 큰 비추력을 갖는 추진엔진으로 활용할 수 있다. MEMS 기술의 발달은 μm 이하의 고정밀도의 형상을 제작하고, 기계적 요소와 전기적 요소를 한꺼번에 제작하는 것이 가능하므로 동일한 기기를 대량으로 동시 생산함으로써 단가절감과 생산성 향상을 도모할 수 있다. 또한 평면 차원에서는 형상의 복잡성에 의한 애로사항이 적어 열기관의 제작에 적합하므로 마이크로 동력기관의 실현은 마이크로가공과 기존의 기계공학/전기공학적 원리에 있어서 새로운 도전분야이다.

마이크로 가스터빈

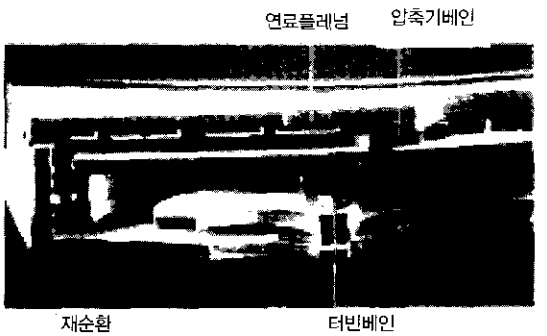
현재 항공용, 발전용 및 산업용으로 사용되고 있는 가스터빈 엔진의 구동 사이클인 브레이튼 동력사이클은 동력밀도, 제작의 간편성, 높은 효율 등의 장점을 가지고 있어 초기의 마이크로 동력기관의 사이클로서 연구대상이 되었다. MIT에서 개발한 마이크로 가스 터빈의 개념도와 마이크로가공으로 제작된 블레이드 형상이 그림 1에 나타나 있다. 전체 크기는 외경 12 mm에 3 mm 두께를 가지는 원반형으로 동전 보다 작으며, 무게는 1 g에 지나지 않는다. 작동원리는 위쪽 흡기구를 통해 들어온 공기를 압축비 4:1의 평면원심 압축기에서 압축하여 분사된 연료와 혼합한 후, 아래 쪽 연소실에서 연소하여 1,600 K의 온도에 이르게 하며, 이 연소가스가 아래 중앙의 평면원심형 터빈을 돌려 동력을 얻는다. 배출되는 배기가스는 0.125 N의 추력을 발생시키거나, 터빈을 통하여 압축기에 인접해 있는 스타터/발전기를 구동시켜 16 W의 전력을 생산한다. 연료로는 수소가스를 사용하여 매 초 0.15 g의 공기와 시간당 7 g의 연료를 소비하며, 로터는 2.4×106 rpm에서 작동하는 초고속 회전체이다.

전체 시스템은 브레이튼 사이클에 기초하여 열역학적 고려에 의해 결정되지만 각 요소는 마이크로 유체역학, 열전달, 구조역학, 재료 및 전기의 특성이 고려되어야 이의 제작이 가능하다. 즉, 각 요소의 기계적/전기적 특성은 미시계와 거시계에서 다르므로 기존의 가스 터빈 최적 설계개념을 마이크로 요소 설계에 그대로 적용할 수 없다. 미시계

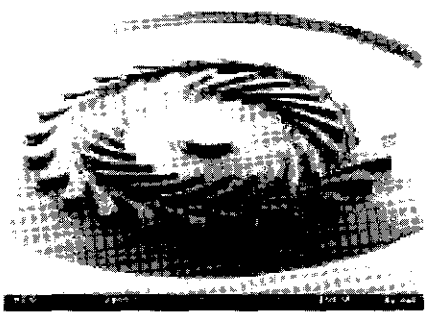
· 조형희, 연세대학교 기계공학과 교수, e-mail: hhcho@yonsei.ac.kr
· 주원구, 이진호, 연세대학교 기계공학과 교수
· 우성제, 연세대학교 대학원 기계공학과



마이크로 가스터빈의 개념도



마이크로 가스터빈 단면 사진

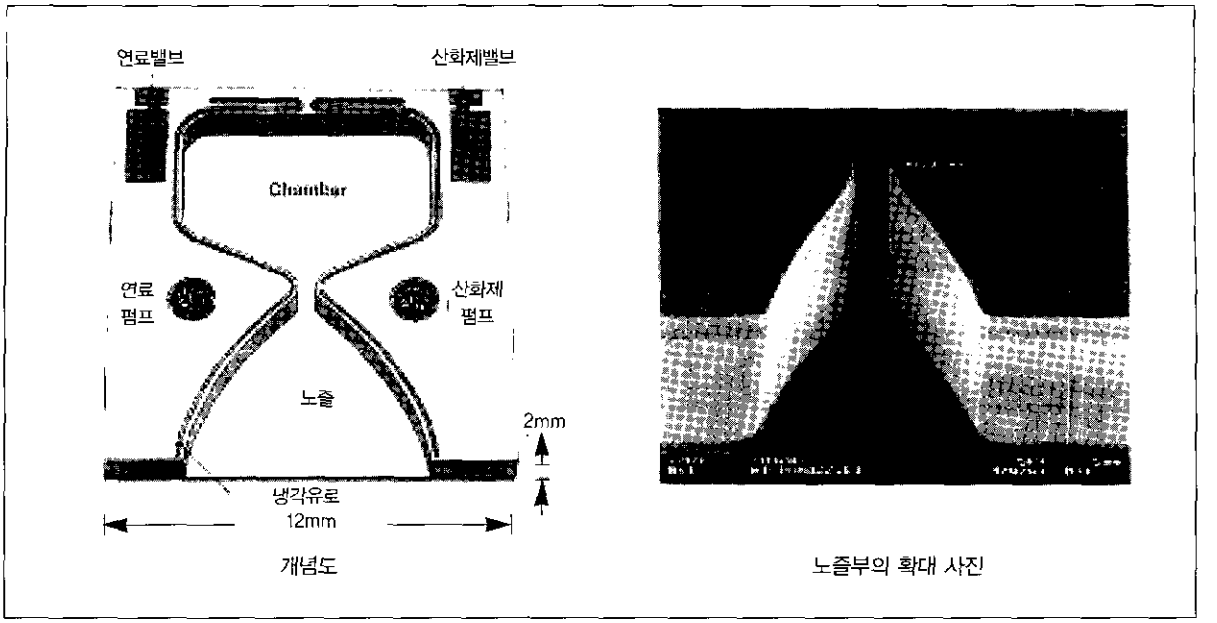


마이크로 가스터빈 블레이드

〈그림 1〉 마이크로 가스터빈

에서는 유체 점성력, 재료의 가용 강도, 면적 대 체적비가 거시계에 비하여 크고, 제작은 대체로 평면적인 2차원 구조로 제한 받는다. 마이크로 동력기기의 열유동 특성상 크기가 작을수록 상대적 점성력 증가로 구동에 어려운 점이 많아 그림 1의 마이크로 가스터빈은 현 MEMS 제작기술로 만들 수 있는 가장 큰 크기로 SiC 또는 Si/SiC 복합재료를 사용하여 제작되었다. 제작과정은 CMOS 마이크로프로세서 공정을 따라 7번의 웨이퍼 본딩, 20번의 사진석판과정, 9번의 박막 생성과 Deep RIE(reactive ion etching)를 거치게 된다. 그림 1의 마이크로 가스 터빈은 가장 간단한 형태로 여기에 재생기(recuperator)를 설치하면 효율을 크게 증가시킬 수 있다. 기존 거시계에서 적용되는 연속체 가정에서 벗어나는 것은 아니지만 수천~수 만의 낮은 레이놀즈수와 마하수로 기존의 설계 경험이나 해석 기구로는 설계할 수 없는 난점이 있다. 또한 현재의 마이크로가공 기술로는 평면형상 이상의 3차원 형상 제작은 매우 어려우므로 경계층의 박리를 줄이거나 확산을 조절하기 위한 비틀어진 모양의 블레이드나 블레이드 근저부의 형상 변화를 꾀할 수 없다. 이와 더불어 증가된 면적 대 체적비로 연소실 벽을 통한 큰 열손실로 성능이 저하된다.

마이크로 가스 터빈의 가장 큰 특징은 높은 비추력에 있다. 추력은 공기 흡기구의 면적(길이의 제곱)에 비례하고 무게는 체적(길이의 세제곱)에 비례하기 때문에 가스 터빈 크기의 감소는 이론적으로 추력 대

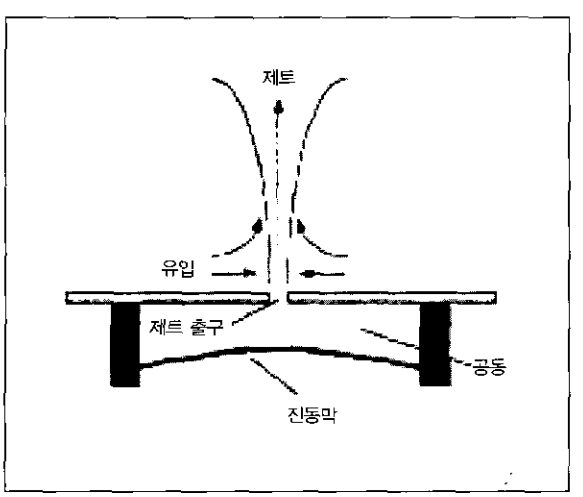


〈그림 2〉 마이크로 로켓엔진

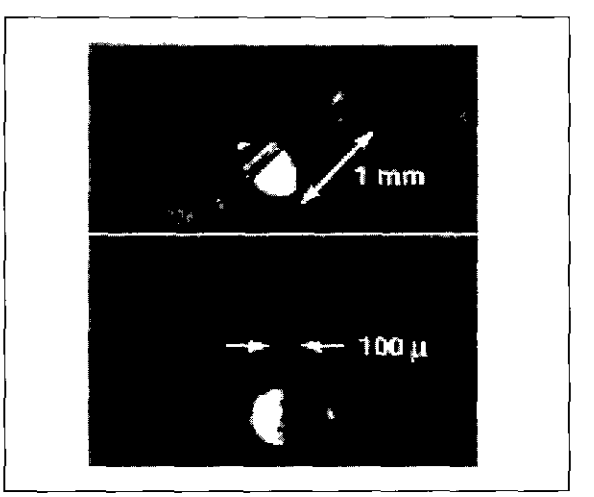
중량비를 선형적으로 증가시킨다. 또한 특성시간도 짧아져 터빈의 시동과 정지에 소요되는 시간은 수 백 μsec에 불과하여, 엔진을 쉽게 작동/정지시킬 수 있으므로 설계조건을 벗어나는 운전이나 비효율적 운전 구간에 대한 대비책을 고려할 필요가 없는 장점이 있다.

마이크로 로켓엔진

그림 2는 마이크로 액체 로켓엔진의 개략도와 노즐의 사진 보여주고 있다. 재생 냉각형 연소실, 노즐, 압축기, 밸브, 배관 및 조절기로 이루어진 비교적 간단한 구조를 가지고 있으며, 여기서 압축기는 앞서 설명한 마이크로 가스 터빈의 압축기를 그대로 채용할 수 있다. "Rocket motor on a chip"의 개념으로 제작된 이 로켓엔진은 5 g/s 액체산소와 메탄올을 소비하면서 15 N의 높은 추력을 발생시키며, 이는 거시 로켓 시스템의 비추력의 10~100배에 해당된다. 연소실의 압력은 추력과 냉각 등의 이유로 100~200 atm의 높은 압력을 필요로 하는데, 노즐은 원추형이 아닌 이차원형상으로 고압에 유리하진 않지만 크기가 작아지면 재료의 실제 강도가 상대적으로 우수해지는 효과에 의해 이러한



〈그림 3〉 마이크로 합성 제트의 개념도



〈그림 4〉 투명한 포토세라믹을 레이저 가공한 드 라발 마이크로 노즐

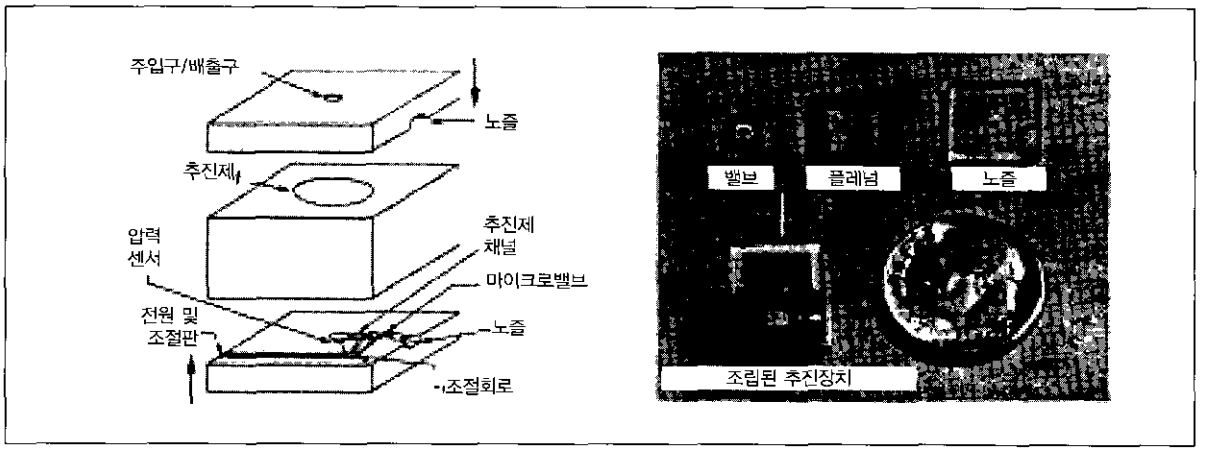
고압을 견딜 수 있게 된다.

마이크로 합성 제트와 마이크로 초음속 노즐

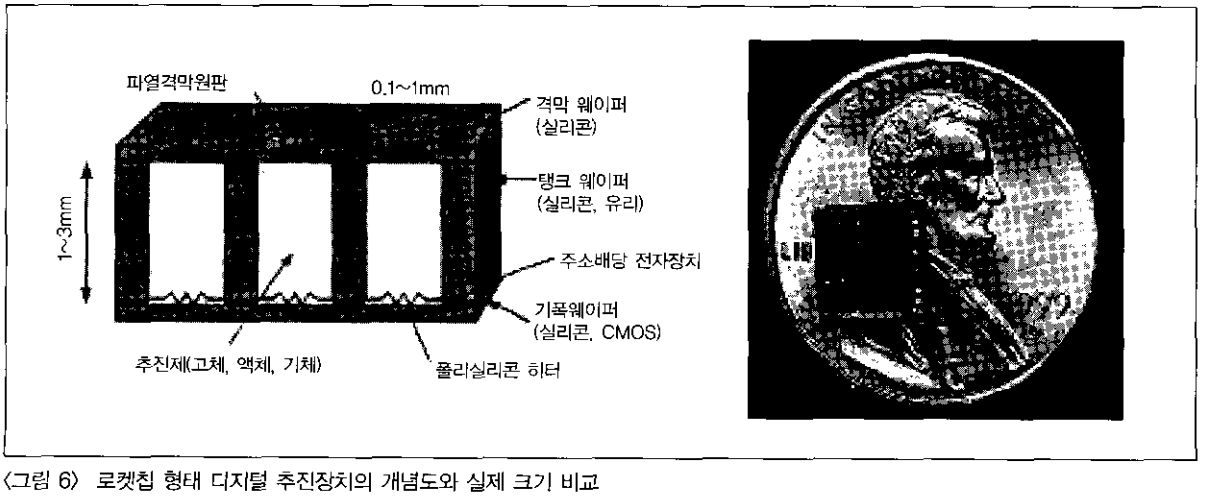
고주파에 의해 작은 운동량의 유체를 주변에서 빨아들이고, 큰 운동량으로 단일방향 분사하는 마이크로 합성 제트의 개념도가 그림 3에 나타나 있다. 진동막이 공명주파수로 진동하며 진폭 1~5 μm 정도로 저효율의 추진장치이지만 최대 제트속도는 30 m/s에 이르는 것으로 보고되고 있다. 실제 추진기관으로 사용하고자 할 때는 배열제트로 사용하여 추력을 높일 수 있다. 그림 4의 마이크로 초음속 노즐은 목(throat) 직경 12~30 μm의 드 라발 노즐(축소-확대 노즐)로 단면적 확장비는 5~20으로 매우 크다. 단결정의 이방식각(anisotropic etching)에 의한 피라미드 형태의 공간을 만들거나 레이저 공정에 의해 형상에 제한 없이 제작이 가능하며, 이 노즐은 우주공간에서의 추진기기에 응용된다.

비연소 가스 추진장치

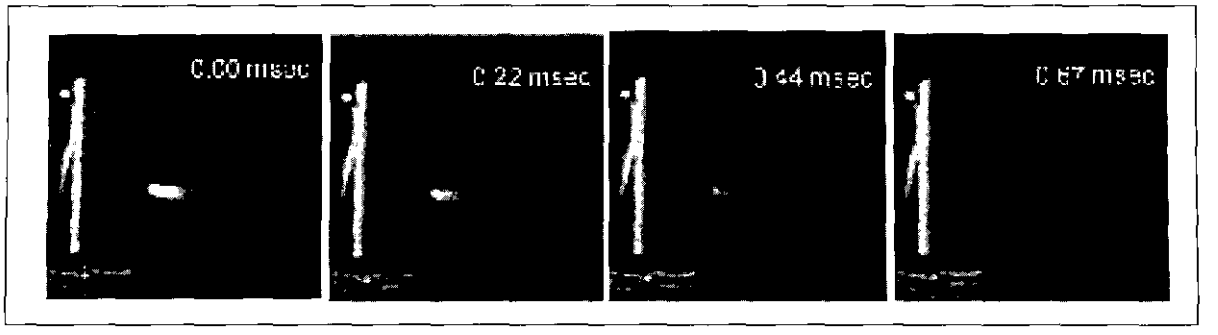
추진제가 연소에 의하지 않고 외부에서 공급되거나 각각의 분리된 탱크가 파열하며 추진력을 얻는 마이크로 추진장치는 주로 우주공간에서의 자세 조정이나 유지에 사용된다. 그림 5는 이러한 추진장치의 기본적인 개념도와 사진을 보여주고 있는데 노즐이 위, 아래에 있는 이방향성을 가지는 추진장치이다. 그림 6은 이와 달리 여러 개의 추진탱크를 가지고 원하는 위치의 탱크의 격막을 파열시켜 추진방향을 조절하는 디지털 추진장치를 보여주고 있다. 폴리실리콘 박막히터에 순



〈그림 5〉 이방향 비연소 가스 추진장치의 개념도와 사진



〈그림 6〉 로켓칩 형태 디지털 추진장치의 개념도와 실제 크기 비교



〈그림 7〉 디지털 추진장치의 점화 사진

간적으로 높은 전압을 가하여 증발시키고, 이로 인해 발생되는 압력파로 추진제를 점화시키고 격막을 터뜨린 후 추진제를 배출하게 되어 한 번의 사용만이 가능하다. 이는 길이 10 cm의 정방형 표면에 약 만 개 정도의 추진 탱크를 설치하는 것으로 더 크게 확장할 수도 있다. 이러한 추진장치는 별도의 밸브나 추진제의 저장공간, 배관 등이 필요하지 않으면서도 0.1 mN의 추력과 100 W의 출력을 낼 수 있다. 그림 7은 디지털 추진장치의 점화 장면을 보여주고 있다

마이크로 동력기관의 응용

마이크로 동력기관이 가장 널리 쓰일 수 있는 곳은 휴대용 동력장치일 것이다. 액체 탄화수소의 에너지 밀도는 현재 가장 좋은 축전지의 20~30배로 매우 높으므로 동력원의 소형화 역할을 할 수 있을 것이다. 1 g 정도의 엔진이 시간당 10 g 정도의 연료를 소비하는 마이크로 가스 터빈을 여러 개를 집적하여 200 mm 웨이퍼 크기에 3 mm 두께로 제작하는 경우, 10 kW의 동력을 얻을 수 있다. 또한 비출력이 매우 높아 비행기나 자동차의 예비 동력장치로 사용하는 것도 가능할 것이다. 최근 군사목적으로 요구되는 소형 비행체에도 이러한 마이크로 가스 터빈은 적합하다. 일례로 마이크로 UAV(Unmanned Aerial Vehicle)와 같은 마이크로 항공기는 총 이륙 중량이 50~100 g인데 반해 200 mm 웨이퍼는 20 lb의 추력을 낼 수 있다. 더 나아가 수천 개의 엔진 장착으로 100~1,000 kg 정도의 전략군용품과 UAV에도 응용 가능하지만, 많은 수의 엔진이 웨이퍼를 벗어나 독립적으로 있을 경우 연료 공급이나 조정, 집적이 어렵고, 연비가 큰 엔진보다 상당히 낮은 단점이 있어 대형 항공기에는 부적합할 것이다. 따라서, 큰 이송기기에 있어서는 큰 비추력과 낮은 소음의 장점을 살려 단시간만 사용하는 수직 이륙을 위한 보조 추력장치 등 보조 역할로 유용하다. 마이크로 동력기관의 또 다른 장점은 한 개의 엔진 설계로 넓은 범위의 운송기기에 조합하여 사용할 수 있으므로 대량 생산이 가능하다는 것이다. 운송기기의 추력 증가는 장착되는 엔진의 개수를 늘림으로 얻을 수 있으므로, 엔진의 변형이나 새로운 설계가 불필요하게 된다. 또한 표면에 부착하는 마이크로 동력기관은 빠른 조정이 가능하고 유체의 강력한 소스 및 싱크 역할을 할 수 있기 때문에 경계층 및 순환을 조절하는데 사용될 수도 있다. 더불어 압축기, 터빈, 모터, 발전기, 연소기 등 마이크로 동력기관의 요소 기술은 가스 터빈 이외에도 다른 열역학적 사이클에 적용 가능한 기술이다. 즉, 냉각을 위한 공기 냉동사이클, 각종 마이크로 냉각사이클에 적용하기 위한 모터로 작동하는 압축기나 열교환기 등에 응용할 수 있어, 인체 혹은 전자기기 냉각에도 응용될 수 있다.

마이크로 동력기관은 MEMS 제작기술을 사용하여 낮은 생산단가로 신뢰성이 높은 제품을 대량 생산할 수 있고, 큰 비추력으로 작은 크기에도 필요한 추력을 낼 수 있으므로 항공우주산업에서 많은 응용이 가능할 것이다. 우주선의 자세조정이나 우주 정거장의 유지, 그리고 배열 형태로 쓰일 경우 작은 비행체의 발사 및 추진력 조절에 의한 추력 벡터 컨트롤에 사용할 수 있을 것이다. 초소형 정찰비행체 혹은 마이크로 UAV과 초소형 인공위성 등에 이용될 수 있으며, 이외에도 많은 분야로의 응용이 가능할 것이다. 이와 같이 마이크로 동력기관은 동력과 추진에 있어서 새로운 영역과 도전과제를 제공하고 있다.