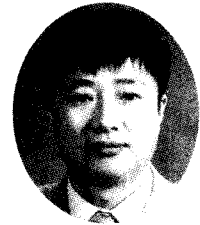


차세대 생산 · 제조시스템 : Micro-factory



박종권*
한국기계연구원
지능형정밀기계연구부



이득우*
부산대학교
나노과학기술학부

1. 서론

최근까지 대부분의 산업기술의 기본 구조가 대규모 플랜트, 대형 기계와 비대한 장치기계들로 주종을 이루어 왔고, 그에 따른 여러 가지 문제점들을 노출시켜 왔다. 가장 큰 문제로는 거대한 기계에서 발생하는 각종 오염물질에 의한 환경오염과, 제작되는 제품의 크기에 비해서 상대적으로 비대한 기계의 비효율적인 에너지 소비, 그리고 갈수록 고집적, 초소형화 되어 가는 각종 초정밀 부품에 대한 요구의 증대일 것이다. 현재의 생산 · 제조 시스템은 가공 · 조립의 정밀도를 향상시키기 위해 매뉴플레이터 및 이를 지지하는 구조물을 대형화함으로써 강성을 높이고, 자중 및 가공력에 의한 변형에 대응하여 왔다. 이는 소형의 생산시스템을 만들기 위해 필요한 마이크로 레벨의 요소기술 및 요소를 만들기 위한 주변기술이 미흡하였기 때문이다. 예를 들면, 수 밀리미터의 크기와 수 밀리그램의 시계, 카메라 부품 등은 수 미터 크기의 조립기계에 의해 제

작이 되고 있으며, 마이크로펌프와 미세튜브로 구성된 미세 분석시스템의 부재로 인해 값비싼 시약이나 시료의 DNA검사를 위해 필요 이상으로 많은 량을 사용하고 있다. 대규모 생산 시스템은 대규모 생산 공간을 필요로 하며 생산을 위해 매우 많은 에너지를 소비하게 된다. 생산시스템의 소규모 축소화에 대한 개발요구는, 특히 환경문제와 에너지 절감문제와 더불어 증가하고 있는 실정이다. 마이크로 머신기술의 응용분야는 마이크로 액추에이터, 마이크로 기계, 마이크로 가공 및 마이크로 핸들링 장치 등으로 광범위하게 확장되고 있으며, 이와 같은 기술의 발전은 마이크로 팩토리의 실현을 가능하게 하고 있다.

Micro-factory는 크게 두 가지 의미로 해석할 수 있다. 첫째, 제작 · 생산하는 부품의 크기가 미소하며 고도의 정밀도를 요구하는 것이 대부분이므로 부품의 초미세 · 고정밀 가공을 수행하는 Micro-fabrication system이라 할 수 있으며 둘째, 협의의 의미로써 고집적, 소형화된 제조 · 생산 시스템이라 할 수 있다. 이와 같은 마이크로 팩토리

시스템의 장점으로는 생산 시스템의 소형화로 인해 다양한 제품 요구에 민첩하게 대응할 수 있고, 고집적·초정밀 미세 제품의 제작기술로 21세기 첨단산업으로 인식되는 나노 기술(NT)을 위한 생산 시스템으로 발전할 수 있는 가능성을 포함하고 있다는 것이다. 본 논문에서는 최근 차세대 생산시스템으로 인식되는 마이크로팩토리의 기본적인 개념과 구성요소, 가공 공정에 따른 마이크로 팩토리의 다양한 형태에 대하여 기존에 알려진 연구내용들을 소개하고자 한다.

2. Micro-factory 개요

마이크로 팩토리 시스템(Micro-factory system)은 “필요한 제품을 필요한 양만큼 원하는 시간과 장소에서 미세하게 만든다”는 패러다임을 기치로 한 전혀 새로운 방식의 공장을 의미한다. 마이크로 머신은 μm 에서 밀리미터 단위의 미소부품으로 구성된 고기능의 기계시스템을 말하며, 전체 크기는 수 cm ~ 수 μm 까지에 이른다. 아울러 이러한 마이크로 머신이 유기적으로 결합된 형태의 총체적인 집합체를 마이크로 팩토리라 한다. Fig. 1은 소형화된 생산 시스템으로써 가공 공정에 적합하게 적용될 수 있는 다양한 마이크로 팩토리를 분류한 것이다. 마이크로 팩토리는 기본적으로 크게 두 가지 생산시스템으로 응용이 가능하며 장소에 구애받지 않고 사용할 수 있는 데스크 탑 형태의 마이크로 팩토리나 여러 개의 마이크로 로봇 그룹에 의해 작동되는 조합체로서의 마이크로 팩토리로 구분할 수 있다.

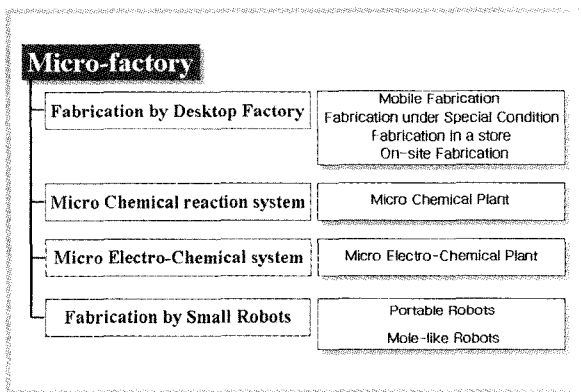


Fig. 1 Classification of micro-factory systems

또한 데스크 탑 형태의 마이크로 팩토리는 기계적인 절삭 가공을 수행하는 마이크로 팩토리, 화학적 가공공정을 위한 마이크로 팩토리, 전기화학적 가공공정을 위한 마이크로 팩토리등으로 나뉠 수 있으며, 이 모든 공정을 포함한 데스크 탑 형태의 마이크로 팩토리 또한 포함될 수 있다. Fig. 2는 대표적인 데스크 탑 형태의 마이크로 팩토리를 나타낸 것이다. 데스크 탑 형태의 마이크로 팩토리는 일반적으로 가공 및 전조립(pre-assembly) 유닛, 부품 공급 유닛 및 정밀조립(precision assembly) 유닛과 같은 세부분으로 구성되어 질 수 있다. 가공 및 전조립 유닛에서는 선삭, 밀링과 같은 기계적 가공, 에칭 등의 화학적 가공 및 전기화학적 가공을 통한 마이크로 부품 가공이 수행되며, 단순한 조립작업도 수행할 수 있으며 부품 공급 유닛을 통해 공급된 마이크로 부품을 조립할 수도 있다. 정밀 조립 유닛에서는 가공 및 단순 조립된 마이크로부품의 최종적인 조립을 수행하는 역할을 한다. 이상의 기본적인 유닛들은 마이크로 부품을 운반하는 이송장치에 의해 기능적으로 연결되어 있다.

3. Desktop Micro-factory

3.1 기계적 가공공정을 위한 마이크로팩토리

마이크로 팩토리 시스템은 가공, 조립, 반송, 검사의 모든 생산 공정을 축소하여 하나의 공장으로서의 기능을 하

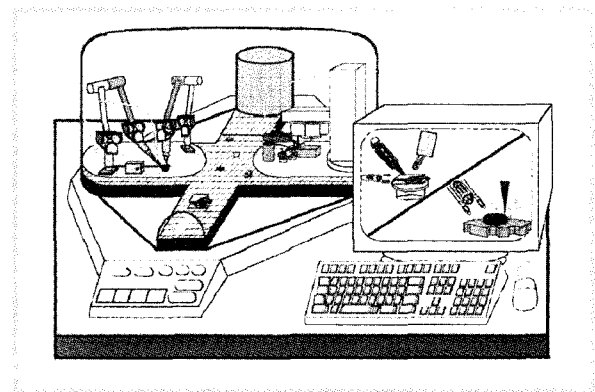


Fig. 2 Concept of desktop Micro-factory

고, 정밀한 가공조립을 가능케 한다. Fig. 4는 초소형 부품용 마이크로 팩토리와 이를 이용하여 제작한 부품을 나타낸 것이다. 시스템의 전체 크기는 50×70cm이고 밀링, 선반, 프레스등과 같은 마이크로 머신과 반송유닛, 조립유닛들의 조합에 의해 제작되었다. 각각의 마이크로 머신의 특징은 다음과 같다.

마이크로 밀링머신의 전체크기는 119×119×102mm이고 36w의 시핀들 모터 출력과 3mm의 직경을 가진 샵크에 의해 곡면가공, 드릴링작업이 가능하다. 마이크로 선반은 32×25×30.5mm의 크기를 가지고 1.5w의 출력을 낼 수 있다. 이 선반의 가공공차는 1.5 μ m, 가공면 거칠기는

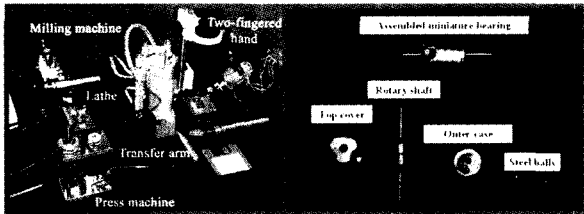


Fig. 3 Desktop Micro-factory and fabricated products

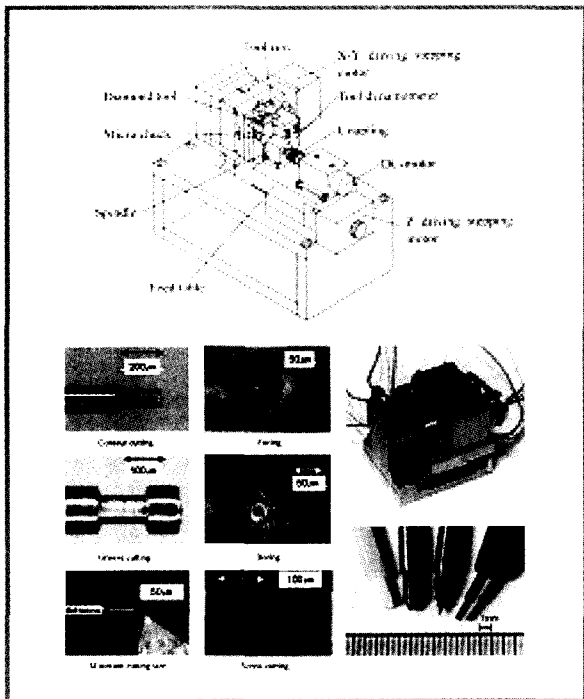


Fig. 4 Micro lathe and shape cutting

2.5 μ m 정도이다. 마이크로 프레스의 전체크기는 110×66×170mm이며 프레스 하중이 3kN, 다이를 세팅할 수 있는 스트로크가 30×40×52mm로 초소형 부품에 대해 펀칭과 벤딩작업을 수행할 수 있다. 그리고, 마이크로 트랜스퍼 암(micro transfer arm)은 전체 높이 200mm에 최대 암길이는 100mm, 3자유도 운동과 1개의 수직회전축을 가진다.

Fig. 4는 일본에서 마이크로 머신과 마이크로 팩토리에 장착하기 위해 개발한 초기의 마이크로선반의 개념도이다. 사용되는 재료의 크기가 대략 10~1000 μ m정도이며 x, y, z 축 이송계와 스피들, 마이크로 척 등으로 구성되어 있다. 또한 마이크로 척에 다양한 형상의 공구를 장착하여 윤곽가공, 보링가공, 스크류가공 등을 수행할 수 있도록 설계되었다. 무게 약 100g로써 Rmax 1.5 μ m, Roundness 2.5 μ m 정도의 정밀도를 가지고 있다.

마이크로 선반을 이용하여 가공할 수 있는 가공물의 형상에는 한계가 있으며 부품의 특성상 3차원 기계가공을 수행할 필요가 있으며 이런 경우에 활용할 수 있는 가공시스템으로 마이크로 밀링머신을 들 수 있다. Fig. 5에 나타난

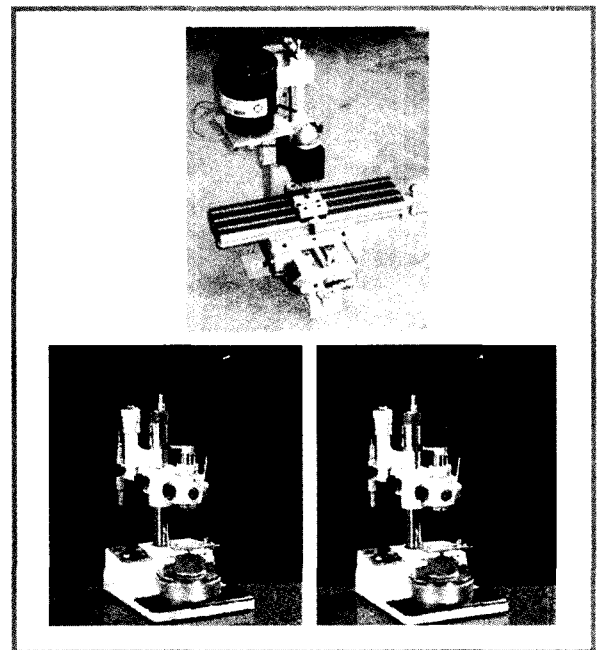


Fig. 5 Micro milling machine for micro-factory and dental field

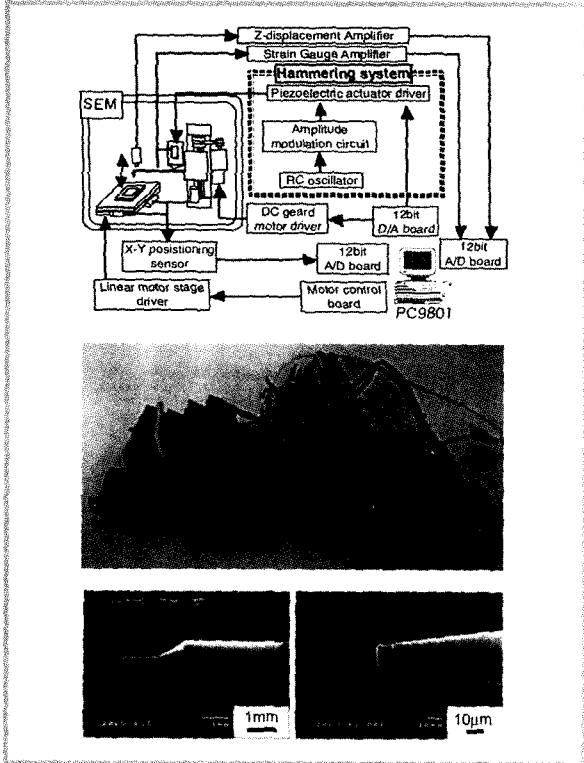


Fig. 6 Micro-incremental forming system and punch tip

마이크로 밀링기들은 일반적으로 DC모터로 구동되며 몇 가지 콜렛을 장착하여 다양한 가공을 수행 할 수 있으며, 마이크로 팩토리에 장착될 수도 있고 치과용 제품을 제작 하기 위한 독립된 생산시스템으로 활용 될 수도 있다.

절삭가공과 같은 재료 제거공정이 아닌 3차원 소성변형을 통한 부품가공에는 일반적으로 프레스가 사용되고 있으며 마이크로 단위의 초미세 부품의 소성변형을 위해서는 부품 정밀도와 에너지 절감 측면에서 마이크로 포밍 머신과 같은 제조시스템이 필수적이다. 마이크로 소성변형 시스템은 데스크 탑 형태의 마이크로 팩토리에 사용 가능하며 독립된 마이크로 머신으로 사용되어 질 수도 있다. Fig. 6에 나타난 마이크로 포밍 시스템은 리니어모터로 x, y스테이지가 구동되며 외팔보 형상의 스윙 암으로 펀치작업을 수행한다. 스윙 암에 장착된 미세한 펀치를 이용하여 반복적으로 공작물을 두드려 원하는 형상으로 부품에 변형을 가하는 방식이 사용되고 있으며 펀치는 공구장으로 제작되

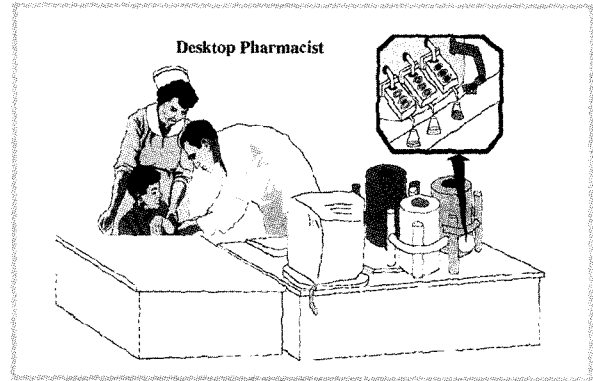


Fig. 7 Chemical reaction micro-factory for pharmacist

었고, 팁의 직경은 약 $10\mu\text{m}$, 펀칭은 피에조 액추에이터로 구동된다.

3.2 화학적 가공공정을 위한 마이크로팩토리

데스크 탑 형태의 마이크로 팩토리는 화학적인 가공공정을 필요로 하는 생산 시스템으로도 활용이 될 수 있으며, 이 경우 기본적으로 반응기와 기체나 액체를 이송할 수 있는 미세직경의 파이프와 마이크로 펌프 등으로 구성된다. 매우 위험한 약품, 값비싼 시약 등을 이용하는 경우에는 화학반응-마이크로팩토리 시스템을 사용하여 안전하게, 소량의 시약을 사용하여 비용을 절감하면서 원하는 작업을 수행 할 수 있다. 의학용으로 응용되는 마이크로 팩토리 시스템은 기본적으로 DNA검사와 같은 검사 장치를 포함하고 있으며 물, 공기, 혈액, 시약샘플 등의 분석을 장소에 구애 받지 않고 이동하면서 모니터링 할 수 있는 포터블 타입으로도 제작될 수 있다. Fig. 7은 치료약을 제조하는데 이용될 수 있는 데스크 탑 형태의 화학반응-마이크로팩토리의 개념도를 나타낸 것이다.

3.3 전기화학적 가공공정을 위한 마이크로팩토리

마이크로 시스템을 이용한 마이크로 부품 제작에서 공구와 소재가 직접 접촉하는 기계적 가공은 공구의 강성과 그로 인한 가공정밀도, 공구 마멸과 같은 몇 가지 해결되어

야 할 문제들이 있으며 전기화학적 가공공정은 이런 문제 점을 해소할 수 있는 가공방법이라 할 수 있으며 마이크로 팩토리의 응용분야로서 많은 부분을 차지하고 있다. 또한 전기적 가공방법을 이용함으로써 부가적인 환경장 치가 필요하지 않고, 화학반응을 이용함으로써 에너지 소 비가 적기 때문에 마이크로 팩토리에 가장 적합한 시스템 이라 할 수 있다.

Fig. 8은 크게 가공, 조립, 이송의 세 유니트로 구성된 전기화학적 가공공정을 위한 마이크로 팩토리 시스템과 전 기화학적가공(ECM)을 이용하여 제작한 마이크로 기어의

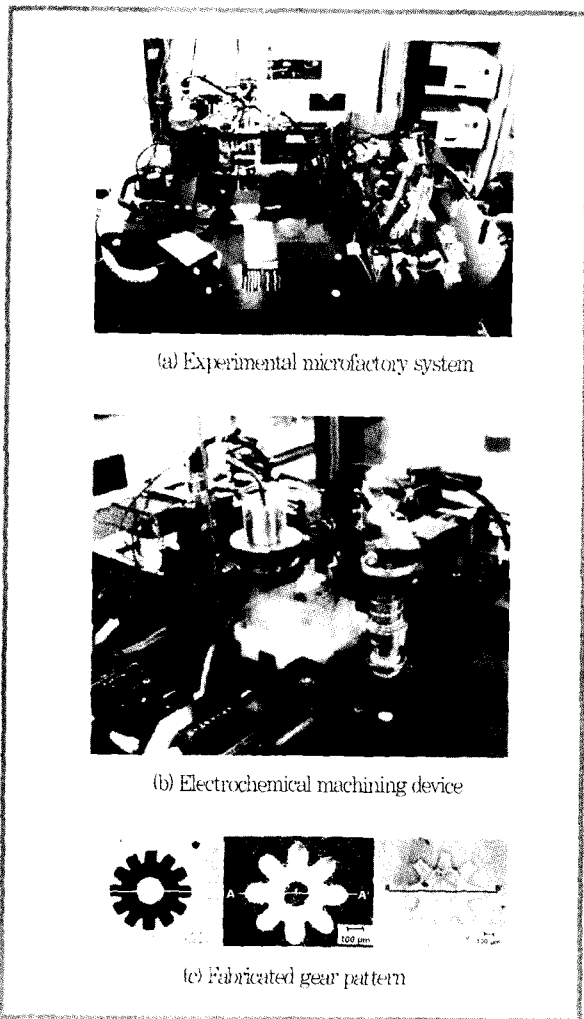


Fig. 8 Electrochemical micro-factory system

모습을 나타낸 것이다. Fig. 8(c)는 에칭을 이용하여 직경 이 800 μm , 두께가 10 μm 인 기어를 크롬판위에 제작한 것과, 용착기법을 이용하여 직경 800 μm , 두께 2 μm 를 유리위에 스퍼터링된 금위에 제작된 기어의 모습이다. 전체 마이크로 팩토리의 데스크 탑 크기는 60×65×75 cm^3 이며, 작업영 역은 1 cm^3 , 가공할 수 있는 부품의 크기와 무게는 약 10mm, 2g 이하이다.

4. 마이크로 로봇으로 구성된 마이크로팩토리

마이크로팩토리의 한 형태로써 테스트 탑 마이크로팩토 리외에 마이크로머신이나 마이크로 로봇들의 유기적인 조 합을 기초로 한 제조·생산 시스템으로써의 마이크로 팩토 리를 들 수 있으며 기본적으로 다음과 같은 형태를 가지고 있다.

(a) 이송, 집착, 조립등과 같은 단일기능을 수행하는 마 이크로머신이나 마이크로 로봇들의 유기적인 조합에 의한 생산 시스템.

(b) 필요시 제품의 유지, 보수를 위해 제품 내부에 몇 개

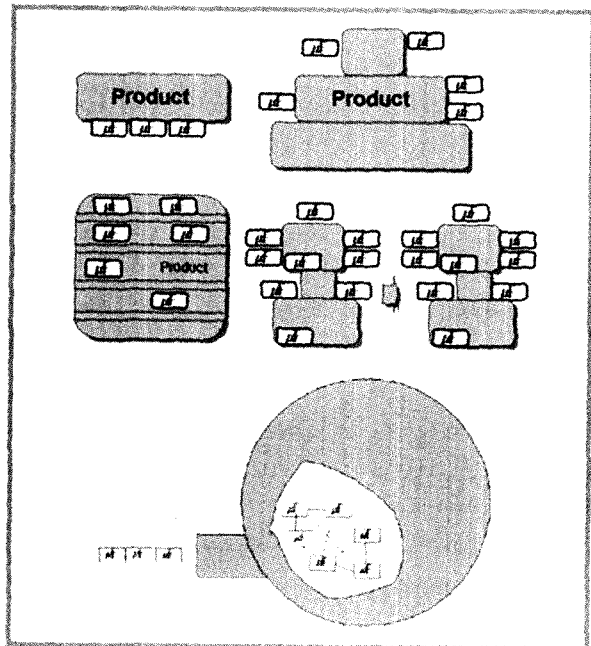


Fig. 9 Examples of production system with small robots

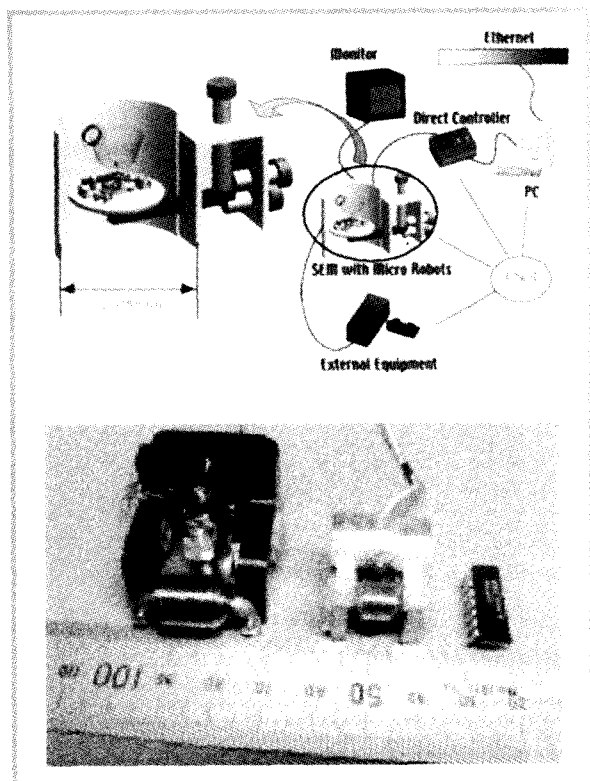


Fig. 10 Micro robots for micro processing in SEM vacuum chamber

의 마이크로 로봇 또는 마이크로팩토리가 삽입되는 생산 시스템.

(c) 다수의 마이크로 로봇을 이용하여 제품의 내외부에서 제품을 생산하고 작업 완료후에는 제품의 일부가 되는 생산 시스템.

(d) 분리된 다수의 마이크로 로봇이 좁은 공간을 이동하면서 필요시 수리 및 제작 등의 기능을 수행하는 생산 시스템.

Fig. 10는 다량의 소형로봇을 이용하여 SEM 진공챔버 안에서 다양한 마이크로 공정등을 수행하도록 설계된 시스템을 나타낸 것이다. 이 시스템은 마이크로 로봇에 의해 작동되며 조이스틱과 PC에 의해 SEM 이미지를 실시간으로 모니터링하면서 직접 또는 원격으로 제어하도록 설계되었다. 모든 마이크로 로봇은 직경 140mm 정도의 금속원판에 설치되며 동시에 몇 개의 마이크로 로봇이 서로 다른 기

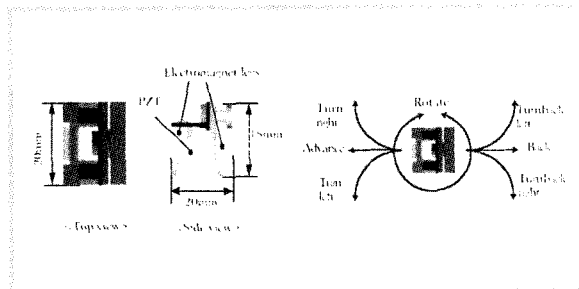


Fig. 11 Principle of microscopic locomotion of micro robot

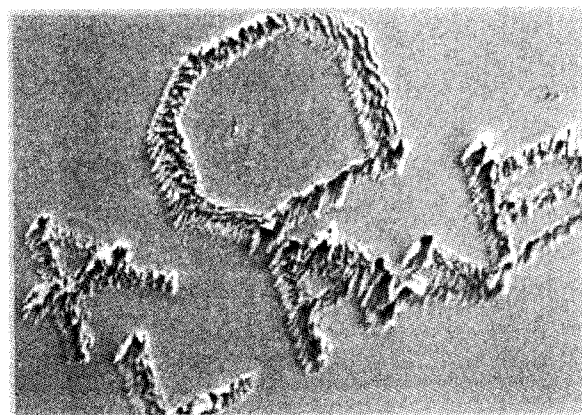


Fig. 12 Machined word "AOLAB" drawn on silicon

능을 수행할 수 있다. 일반적인 SEM 진공챔버의 크기는 직경이 200mm, 높이가 50mm 정도 밖에는 되지 않으므로 삽입되는 마이크로 로봇의 크기는 제한이 되며, 이 시스템에 사용된 마이크로 로봇은 20×20×18mm 크기로 피에조 요소와 전자석으로 구성되어 있다. SEM 진공챔버 속에 삽입된 마이크로 로봇의 구동원리는 Fig. 11에 나타난 것처럼, 두개의 전자석과 피에조에 전류를 적절히 차단 또는 공급함으로써 회전, 전·후진 및 모든 방향으로 마이크로 로봇이 이동하도록 하는 것이다. 이와 같은 마이크로 로봇들을 SEM 진공챔버 내에 설치하고 마이크로 로봇위에 미세한 Si 기판을 설치한 후 레이저를 이용하여 SEM 이미지를 실시간으로 모니터링 하면서 Si 기판 위에 "AOLAB" 이란 문자를 가공하였다. 레이저 및 SEM의 포커스는 앞서 설명한 마이크로 로봇의 동작원리를 이용하여 서브마이크로 이하의 정밀도로 미세하게 제어가 되며 또한 SEM 이미

지를 확인하면서 가공을 수행 할 수 있는 마이크로 팩토리를 구성할 수 있다.

제작된 마이크로 로봇은 스텝이송거리가 7 μ m, 이송속도는 1.16mm/s 정도이며 무게는 약 17.5g이다.

4. 결론

현시대는 대량생산·소비에서부터 다품종소량 생산으로 급속히 제조형태가 변모하고 있고, 개성시대의 새로운 생산 시스템에 대한 기대가 커지고 있다. 현재의 공장과 같은 거대한 생산시스템이 아니라, 사용자의 수요를 그 자리에서 반영하여 생산하는 작은 공장으로서의 마이크로 팩토리라고 하는 개념이 필요하게 되었다.

이러한 추세에 부응하기 위해 정부에서는 자동차, 반도체, 기계, 전자 등 주력기간산업의 경쟁력을 끌어올리기 위해 지대한 관심을 가지고 막대한 물적, 인적자원을 투자할 계획이다. 초정밀 요소부품의 증대가 뚜렷한 현 상황에서 공간과 에너지, 원자재의 절감측면에서 전혀 새로운 형태의 제조시스템인 마이크로 팩토리는 제조업에 혁명을 불러일으킬 것으로 보인다. 제조시스템의 사이즈는 작아지면 작아질수록 수요자의 요구에 부응할 수 있을 정도로 짧은 시간안에 제품을 제작할 수 있다. 이를 위해서는 마이크로 팩토리 제조디바이스가 소형화, 에너지 소비율의 감소, 제조공정의 자동화를 필연적으로 만족시킬 수 있어야만 한다.

아울러, 어떠한 장소에서 무엇을 생산할 것인지에 대한 명확한 목적을 설정하는 것이 중요하다. 단지 현재의 기계를 소형화하는 것이 아니라 생산하고자 하는 제품에 부합되는 시스템의 구축이 필요하다.

공작기계산업은 모든 산업기계의 모체가 되고 그 정점에 위치함으로써 국가산업경쟁력의 근간이 된다. 공작기계산업에서 경쟁력을 갖지 못한 나라는 선진국이 된 예가 동서고금을 통하여 찾아볼 수 없을 정도로 매우 중요한 산업이라고 할 수 있다. 미래산업을 주도하고, 산업 전반에 파급

효과가 큰 지식집약적 기술의 일환인 “Micro-factory 시스템”에 대한 기술 개발은 국가 경쟁력 제고를 위한 핵심 기술임이 분명하다.

참고문헌

1. Honegger, M. and Codourey, A., 2001, “High Performance Control Software for Microfactories and Robotics”, Swiss Center for Electronics and Microtechnology, Scientific Report.
2. Kawahara, M., Suto, T., Hirano, T., Ishikawa, Y., Kitahara, T., Ooyama, N. and Ataka, T., 1997, “Microfactories : New Applications of Micromachine Technology to the Manufacture of Small Products”, Microsystem Technologies, Technical papers, Vol. 37, No. 41, pp. 37~41.
3. Aoyama, H. and Fuchiwaki, O., “Flexible Micro-Processing by Multiple Micro Robots in SEM”, 2001, International Conference on Robotics & Automation, pp. 3429~3434.
4. Saotome, Y. and Okamoto, T., 2001, “An in-site Incremental Microforming System for Three-dimensional Shell Structures of Foil Materials”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 113, pp. 636~640.
5. Lu, Z. and Yoneyama, T., 1999, “Micro cutting in the Micro Lathe Turning System”, 1999, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 39, pp. 1171~1183.
6. Suda, M., Furata, K., Sakuhara, T. and Akata, T., 2000, “The Microfactory System Using Electrochemical Machining”, Mikrosystemtechnik, Vol. 90, pp. 2607~2609.
7. Bleuler, H., Clavel, R., Breguet, J.M., Langen, H. and Bellouard, Y., 2001, “Applications of Micro-robotics and Microhandling”, RIKEN Review, No. 36, pp. 26~28.