

주요국의 마이크로팩토리 연구현황과 우리의 대응방향

Research Trends of Microfactory in Some Countries and Measurement for Korea

박 장 선*, 배 영 문**, 박 주 형***

<目 次>

- | | |
|------------------------|-----------------------|
| I. 서론 | IV. 국내 연구개발 잠재력과 대응방향 |
| II. 마이크로팩토리의 기술경제적 효과 | V. 결 론 |
| III. 주요국의 마이크로팩토리 연구현황 | |

<Abstract>

The status of microfactory or microfactory-related research in some advanced countries are investigated. Under the financial support of government, Japan has accomplished the Microfactory Project, the United States has pursued the Micro/Meso mMT project, and European countries have been studying micro assembly systems. In Korea, several universities and some large manufacturers have participated in the development of micro-components or micro-devices based on MEMS technology since the late 1990's.

Microfactory is a process which achieves an integrated micro-manufacturing system in a production system, which is followed by the steps of micro-technology of machine parts based on micro-system technology. In addition, this process is a new concept of manufacturing system that renovates the existing manufacturing system

It is sure that the research of micro- manufacturing technology must lead to nano-technology in the near future, with intensive financial supports of government for this technology.

Key words : microfactory, MEMS, micro system technology

* 한국과학기술정보연구원 전문연구위원, E-mail : jangseon@kisti.re.kr

** 한국과학기술정보연구원 책임연구위원, E-mail : ymbay@kisti.re.kr

*** 한국기계연구원 선임연구위원, E-mail : parkjooh@kimm.re.kr

I. 서론

마이크로팩토리(microfactory)란 공장의 크기를 마이크로화하여 책상 크기의 공장을 개발·가동하는 것으로, 공장 내에 가공, 조립, 반송 등 일반 공장과 같은 생산시스템의 각 구성 라인이 형성되어 있고 검사라인 역시 설치되므로 라인을 구성하는 기기들의 초소형화는 필수적이다.

일본이 사용하기 시작한 Microfactory의 용어에 대해 그간 미국과 EU에서는 “Mini(Miniature)-factory” 또는 “Microassembly System”이라고 표현하고 있으나 “Microfactory”라는 용어가 국제적으로 통용되고 있는 상황이다.

마이크로팩토리는 기술적 측면에서 볼 때 MEMS기술¹⁾에 의한 부품의 마이크로화에 이어 기기 또는 유닛의 마이크로화 단계를 지나 생산시스템의 마이크로화(micro manufacturing production system)를 달성하는 것을 의미하며, 이를 통해 기술경제적으로 기존 생산시스템을 혁신하고 새로운 생산방식을 추구하려는 신개념의 생산시스템이다.

마이크로팩토리가 실현될 때 기존 생산시스템에 비해 어떤 이익을 가져다 줄 것인가를 고려해 볼 때, 일본의 국가 연구개발사업인 부품가공용 마이크로팩토리의 경우, 그 사업배경에는 기존의 생산라인은 마이크로부품 가공·조립에는 비효율적인 구조를 갖는 시스템으로 평가하고 생산시스템 자체의 마이크로화를 통해 마이크로·나노기술시대에의 대응을 강조하

고 있으며, 또한 마이크로팩토리의 실현은 생산시스템의 혁신을 통해 새로운 그리고 막대한 경제적 이익을 가져다 줄 수 있을 것으로 판단하고 있다. 마이크로팩토리가 가져다 줄 효과 및 이익을 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 기존 생산라인의 비합리성, 비경제성 문제의 해결에 기여한다. 예를 들면, 기존의 소형부품 가공·조립라인은 정밀도 확보와 대량생산을 위해 동작기계, 로봇 등 생산기계의 대형화를 통한 자체중량과 가공반발력에 의한 피가공물의 변형억제를 도모하게 된다.

둘째, 커다란 자원·에너지절약의 효과가 있다. 공장부지 등 공간자원의 획기적 축소가 가능하며, 장비를 구성하는 재료의 감소, 부대설비의 경감, 공장건설 재료의 감소 등을 기대할 수 있다.

셋째, 생산시스템의 유연성 확보에 매우 유리하다. 필요한 것만을 필요한 때에 필요한 장소에서 생산가능하며 생산성 증대와 다품종 소량 생산체제에 적합하다.

넷째, 특수환경에서의 생산시스템으로 유리하다. 기차, 선박 등을 이용한 이동 중 생산시스템으로 활용이 가능하다.

다섯째, 장래 마이크로팩토리의 수요증가가 예상된다. 미래의 새로운 생산시스템으로서 관련 H/W 및 S/W 시장의 신규 수요가 예상된다.

여섯째, 마이크로기술의 발전에 의한 마이크로팩토리 기술개발 및 나노가공기술의 발전을 촉진시킨다. 각종 마이크로기기(devices), 부품(components, parts)

1) MEMS(Micro-Electro-Mechanical Systems)기술은 미국식 표현으로서, 유럽에서는 MST(Micro System Technology)로 표현하고 일본에서는 동의어로 Micromachine을 사용하기도 하는데, 주로 부품의 마이크로화에 이은 기기(단위기계)의 마이크로화 단계를 거치면서 커다란 기술경제적 이익을 가져다주고 있다.

기술의 발전으로 부품가공 및 조립시스템, 신물질, 생체의학 연구를 위한 마이크로유체시스템 등 마이크로팩토리 실현이 가능하다.

외국의 마이크로팩토리 사업이 제시하는 주요 목표는 시스템의 마이크로화를 통해 공간자원의 효율을 높이고 에너지를 절약하는 것이며, 실제로 연구결과들이 이를 실증하고 있다. 그러나 그 배경에는 해당 기술경쟁력의 우위를 점유하려는 세계전략과 장래 기술수요 대응전략이 내포되어 있다.

본 연구에서는 마이크로팩토리의 중요성을 인지하고 기술선진국의 기술동향 및 연구개발 방향을 파악함으로써 우리가 나아가야 할 연구방향과 대응 등을 분석하고자 하는데 초점이 있다.

본 연구의 구성은 마이크로팩토리 기술의 경제적 파급효과 분석을 통해 동 기술의 필요성과 중요성을 제시하고, 일본, 미국, EU 등 기술선진국의 기술개발 동향을 분석하면서, 마지막으로 국내 연구개발의 잠재력과 대응방향을 제시한다.

II. 마이크로팩토리의 기술경제적 효과

1. 산업에의 기술확산

일본의 마이크로팩토리 시스템은 구성하는 기기의 크기와 중량 그리고 가공, 조립, 운송라인을 초소형화함으로써 다음과 같은 기술적 성과들을 거두었다.

1) 단위 생산에 대한 시스템구성 기계들의 에너지와, 온도조절 및 조명용 에너지 소모량이 모두 기존 대형 생산라인에 비해 대폭 감축시킬 수 있다는 사실을 실증하였으며, 앞으로 에너지절약 효과를 보다 높이기 위해 시스템 기기들의 제작과정에 마이크로 가

공기술과 나노가공기술의 도입이 반드시 필요한 것으로 분석되었다.

2) 시스템 전체의 초경량화에 의한 관성력의 감소에 따라 민첩하고 고속이다.

3) 기존 생산시스템에 비해 시스템설계(H/W 및 S/W)를 용이하게 변경시킬 수 있기 때문에 제작시스템의 유연성이 증대된다.

이상과 같은 초소형 공장의 기술적 성과 내지 가능성들은 장래에 산업적으로 어떻게 전개되어 나갈 것인가에 대해 일본은 마이크로머신센터(MMC) 등의 관련기관에서 마이크로팩토리 기술의 응용 잠재력이 있는 부문 즉, 마이크로팩토리를 이용한 생산형태에 대해 분석하고 장래 마이크로팩토리가 하나의 산업으로서 전개될 경우 이에 따른 경제적 파급효과를 연구해 왔다.

우선 마이크로팩토리 산업은 결과적으로 고도로 발전된 생산시스템이 실현될 수 있을 것으로 전제하고 마이크로팩토리를 이용하여 <표 1>과 같은 수요 개발이 유망한 분야를 예측하고 있다.

2. 경제적 파급효과 예측

1) 마이크로기술의 경제적 효과

MEMS 또는 마이크로머신 등 마이크로기기 관련기술은 경제적으로 어느 정도의 파급효과를 가져다 줄 것인가에 대한 경제적 효과분석이 선행되어야 한다. 1990년 중반에 실시한 일본의 마이크로머신센터 예측 자료를 보면, 2010년 일본에서의 경제적 효과는 이 기술에 기존 시장을 대체하는 효과와 새로운 시장창

<표 1> 마이크로팩토리의 수요개발이 유망한 분야

| 생산 형태 | 유 망 분 야 |
|-------------------|--|
| 가정, 상점, 사무실 내의 생산 | <ul style="list-style-type: none"> · 개인사업용 마이크로 부품, 정밀화학제품, 재료가공 등 · 3차원 모델링 시스템 · 고객의 수요, 기호에 적합한 주문생산이 용이한 분야 * 이 분야는 IT와의 결합에 의해 발전가능성 많음 |
| 현장생산 | <ul style="list-style-type: none"> · 공간, 에너지, 자원 절약을 위한 각종 마이크로부품, 고가 재료, 시약 생산 등 · 마이크로부품 제조기, 교환부품 생산시스템 등에 대한 보수가 필요할 때 필요한 제품만을 현장 생산 |
| 일반생산 | <ul style="list-style-type: none"> · 화학반응, 합성용 마이크로 팩토리, 의료, DNA검사 등 |
| 특수환경에서의 생산 | <ul style="list-style-type: none"> · 우주선내의 무중력생산 · 고진공, 고온, 저온, 고압 등 극한환경에서의 생산 |
| 이동생산 | <ul style="list-style-type: none"> · 차량, 선박 등에 의한 이동생산 · 부품제작, 보수시스템, 조리시스템 등 |

출 효과를 합해 약 150억 달러 ~ 260억 달러에 이를 것으로 예측한 바 있고, 2001년 NEXUS의 연구에 의하면 2005년 마이크로시스템, 마이크로기기 및 부품에 대한 세계적인 수요는 600억 달러를 상회하게 할 것으로 발표하고 있다.

이 예측자료는 시간이 경과할수록 신시장 창출효과의 신장률이 기존시장대체효과 신장률을 훨씬 상회하고 있음을 보여주고 있는데, 이는 마이크로기술의 지속적인 발전과 나노기술과의 접목에 의한 신제품개발 가능성을 나타내고 있으며, 마이크로팩토리가 하나의 새로운 산업으로 성장할 가능성 등을 예상하는 데에 따른 것이다.

다음의 <표 2>는 마이크로머신의 경제적 효과를 나타낸 것이다.

2) 마이크로팩토리의 경제적 효과

장래 마이크로팩토리 기술이 산업, 경제적으로 미치게 될 파급효과에 대하여, 일본의 MMC는 일본 내 기존시장 대체 및 신규시장 창출 등 두 가지 시장으로 구분하여 그 결과를 제시하고 있다. 시장대체는 마이크로 머신기술 응용을 통해 기존의 생산시스템을 구성하는 생산시설과 기계·부품의 대체가 점진적으로 이루어짐으로써 발생하는 효과이며, 다음의 <표 3>에 나타난 바와 같다.

전체적으로 볼 때, 그 효과는 1997년 17백만 달러 수준에 불과했던 것이 2010년에는 9억 달러, 2015년에는 16억 달러를 각각 상회하고 있음을 알 수 있다. 시장별로는 가공기계 분야가 시장대체 효과의 중심 위치에 있음을 나타내고 있고, 그 비중은 2010년 61%

〈표 2〉 마이크로머신의 경제효과

(단위 : 억엔)

| | | 1994년 | 2005년 | 2010년 |
|----------|-------|-------|--------|--------|
| 기존제품대체시장 | | 1,390 | 5,702 | 10,114 |
| 신규시장창출 | case1 | 40 | 1,974 | 8,546 |
| | case2 | 40 | 4,301 | 13,199 |
| | case3 | 40 | 19,335 | 21,450 |
| 합 계 | case1 | 1,430 | 7,676 | 18,690 |
| | case2 | 1,430 | 10,003 | 23,343 |
| | case3 | 1,430 | 25,037 | 31,594 |

주) case1 : 시장형성 초기 성장이 완만한 경우
 case2 : case1~case3 중간
 case3 : 시장형성 초기 성장이 급속히 이루어지는 경우

〈표 3〉 마이크로팩토리의 시장대체 효과

(단위: 백만달러)

| 연도 \ 시장 | 1997 | 2010 | 2015 |
|---------|------|------|-------|
| 산업용 로봇 | 0.8 | 28 | 57 |
| 가공기계 | 2.5 | 578 | 1,174 |
| LCD마운터 | 0.0 | 1 | 1 |
| 칩마운터 | 7.5 | 320 | 353 |
| 반도체장비 | 5.8 | 27 | 29 |
| 계 | 16.6 | 953 | 1,614 |

에서 2015년에는 73%로 증가하고 있다. 또한 공작기계를 비롯한 각종 가공기계와 이와 관련된 부품류의 마이크로화가 빠른 속도로 진전될 것임을 암시하고 있으며, 생산시스템의 마이크로화에 따라 생산요소 부품인 칩마운터 역시 초소형 제품으로의 대체수요가 비교적 클 것으로 예측된다.

마이크로팩토리가 새로운 산업으로서 형성될 수 있는 시장규모는 2015년에 19억 달러 수준에 이를 것으

로 예측하고 있다(<표 4> 참조). 시장별로는 특히, 마이크로 팩토리에 의한 생산형태 도입이 유망한 일부 정밀화학제품, 의약·치료용 등을 위한 초소형 화학 공장 수요가 전체의 58%인 10억 달러를 상회하고 있으며, 보수·재활용을 위한 장비로서의 마이크로 팩토리 수요 역시 신규수요의 33% 비중으로서 주목되고 있다.

〈표 4〉 마이크로 팩토리의 새로운 시장수요 전망

(단위: 백만달러)

| 시장 \ 연도 | 1997 | 2015 |
|------------|------|-------|
| 현지 생산용 | 0 | 83 |
| 초소형화학공장용 | 0 | 1,083 |
| 가정 생산용 | 0 | 83 |
| 보수·재활용 장비용 | 0 | 625 |
| 계 | 0 | 1,875 |

Ⅲ. 주요국의 마이크로팩토리 연구현황

1. 일본의 마이크로팩토리 프로젝트 분석

1) 프로젝트의 설정

1980년대 후반 세계의 주요 기술조류의 하나로 등장하기 시작한 MEMS기술은 미국, EU를 중심으로 확산되는 양상을 보이고 있다. 제품생산 기술의 경박단소(輕薄短小)화를 통해 세계적 산업경쟁력을 보유하고 있던 일본은 경쟁국들의 이러한 MEMS 기술 조류에 대응하여 국가 프로젝트로 『마이크로머신 연구개발사업』(Micromachine R&D Project)을 계획하고, 사업의 총괄기관을 통상산업성 산하의 공업기술원으로 하여 국립 연구기관, 국공립 사립대, NEDO(New Energy Development Organization) 등 산·학·연 종합연구체제를 구성하여 추진하였다(<그림 1> 참조).

마이크로팩토리 프로젝트는 마이크로머신 3대 연구개발 사업의 한 프로젝트로 설정되어 1994년부터 해오고 있다. 공간자원 및 에너지자원 절약과 산업 생산구조의 고도화를 유도하는 것을 기본목표로 정부

연구기관(기계기술연구소: 현재 산업기술종합연구소로 통합)의 부품절삭가공·조립용 마이크로팩토리, 기업(가공세이코)의 부품전해 가공용 마이크로팩토리 등 연구기관과 기업의 컨소시엄에 의한 개발체제를 형성하여 연구개발을 추진해 오고 있다.

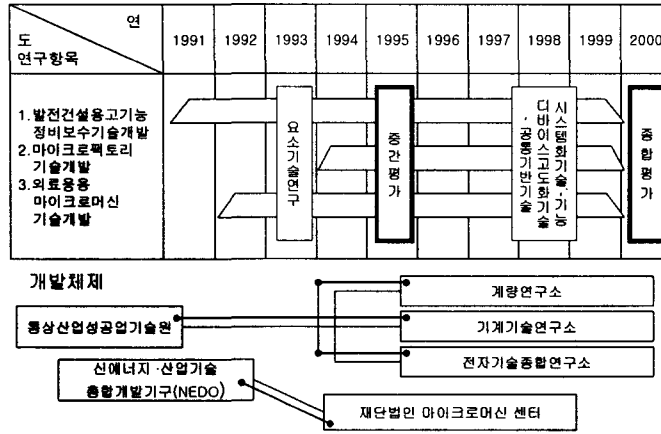
2) 마이크로팩토리 프로젝트의 특징

마이크로팩토리 프로젝트는 일본정부의 "마이크로머신 연구개발 사업"의 3개 단위사업 중 한 사업으로 설정되어 추진한 것으로, 마이크로부품가공을 지향한 마이크로생산 시스템을 추구하고 있다.

1990년을 전후하여 프로젝트를 설정할 당시에는 MEMS/Micromachine 기술에 목표를 두었으나, 이 기술을 이용하여 부품가공을 위한 생산시스템의 마이크로화에 기술적 목표를 둔 것은 세계 최초로 미래의 새로운 생산시스템 기술개발에 대한 도전이라 할 수 있다.

미국과 EU는 MEMS 기술을 응용한 시스템개발 연구에서 신물질·생체의학을 위한 μTAS 연구에 비중을 둔 반면, 일본은 마이크로부품생산을 대상으로 하는 마이크로팩토리 시스템 개발을 추구하고 있다.

<그림 1> 마이크로머신 프로젝트 추진일정



일본의 마이크로팩토리 프로젝트는 국가프로젝트로서 Top-down형의 개발체제로 추진하고 있다. 연구기관과 산업계 및 대학이 연구개발 계획을 분담하여 추진하고 있다. 연구기관(기계기술연구소)은 독립적으로 마이크로부품 가공용 마이크로 팩토리 시스템을 개발하고, 산업계(울림프스 광학, 세이코 등)는 각각 독립적인 마이크로팩토리 시스템을 개발하여 실증 시험까지 일련의 연구사업을 수행하고 있으며, 동경대학 등 10여개 대학은 요소기술 연구 및 독창적 마이크로팩토리 연구 수행과 프로젝트 평가에 참여하고 있다. 정부는 NEDO/ Micromachine Center를 통해 산업계 프로젝트를 관리하고 있다.

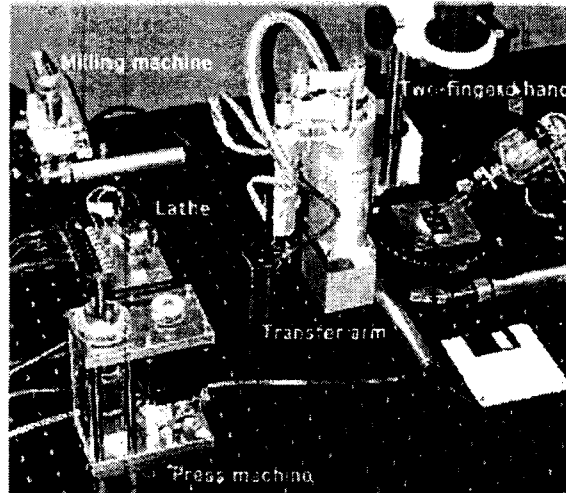
3) 프로젝트 성과

(1) 마이크로부품 절삭가공용 마이크로팩토리

선박을 통해 마이크로부품을 가공·조립하기 위한 Desktop-type 마이크로팩토리 연구는 기계기술연구소가 주관하여 추진하고 있다. 주요 연구개발내용으로는 시스템을 구성하는 가공유닛과 이 유닛을 구성하는 마이크로선반, 마이크로밀링머신, 마이크로프레스머신 등 마이크로가공기기 및 이를 구성하는 각종 마이크로부품 및 마이크로 조립·운송유닛을 구성하는 마이크로 매니플레이션 시스템과 마이크로부품, 그리고 이를 가공·조립/운송시스템으로 구성하여 운전하는데 필요한 현미경 모니터링기술, 제어기술, 조작기술 등이 포함되어 있다.

연구를 통해 마이크로선반 등 구성기기와 Desktop-type 마이크로팩토리를 실증, 시험하고 이 시스템을 기초로 한 휴대형(Portable) 마이크로팩토리를 개발하여 실증, 시험을 한 바 있으며(<그림 2> 참조), 특허를 출원해 놓고 있다.²⁾

<그림 2> Desktop-type 마이크로 팩토리



(2) 마이크로 가공시스템

일본 기계기술연구소(MEL)는 1996년 세계에서 가장 작고 절삭정밀도가 우수한 마이크로 선반을 개발하여 에너지와 공간절약 효과를 실증한 바 있다. 그 후 마이크로 팩토리 개념을 명확히 하고 서브밀리에서부터 밀리미터 크기의 소형부품을 기계가공·조립할 수 있는 Desktop-type 팩토리로 발전시키고 있다.

마이크로 가공유닛을 구성하는 주요 기계들은 마이크로 선반, 마이크로 밀링머신, 마이크로 프레스머신 등이 있고, 전해가공방법을 이용하는 패턴가공방식이 있다(후자의 가공방식은 산업계가 개발). 이들을 하나의 가공유닛으로 구성하여 마이크로화를 실행하려면 각 구성기기가 가공정밀도를 유지하면서 동시에 초소형화의 목표를 달성하는 것이 기술개발의 초점이다.

아래의 <표 5>는 MEL이 개발하여 시험한 가공유닛 구성기기의 주요 사양을 나타내고 있으며, 마이크로선반은 특허를 출원하여 공개된 상태이다.^{3) 4)}

(3) 마이크로 조립·운송유닛

조립·운송유닛은 마이크로 로봇과 마이크로 매니플레이터 기술을 응용하여 크기를 초소형화한 시스템이다. 따라서 이 유닛을 구성하는 마이크로 암(MEL의 Desktop microfactory에서는 운송유닛으로 사용)과 마이크로 핸드는 소형이면서 동시에 마이크로 가공부품을 취급할 수 있는 작업능력과 유연성을 동시에 갖춰야 하며, 이를 위한 구동원으로서 마이크로 서보모터, 마이크로 초음파모터 등의 부품개발은 필연적 과제이다. 아래의 <표 6>은 구성기기의 주요 사양을 나타내며, 일부는 특허 등록을 받은 것도 있다⁵⁾.

2) 마이크로팩토리 제조시스템及び製造方法 (日特公開 2002-6924, 2002.1.11)

3) 異形部品を複数個同時に加工する装置 (日特公開 平11-262801, 1999.9.28)

4) 同一形状部品を複数個同時に加工する装置 (日特公開 平11-262802, 1999.9.28)

5) 二本指マイクロハンド機構 (일특등록 2560262, 1996.9.19)

〈표 5〉 마이크로팩토리 가공유닛 구성기기들의 주요 사양

| 종 류 | 크 기 | 주 요 성 능 |
|-------------------|--|---|
| microlathe | 길이 : 32mm 폭 : 25mm 높이 : 30.5mm 무게 : 약100g | · 주 스피들모터 - 동력 : 1.5W - 회전속도 : 약 10,000rpm · 가공정밀도 - 표면가공 : 1.5 μ m - 원형가공 : 2.5 μ m |
| micro-milling m/c | 길이 : 170mm 폭 : 170mm 높이 : 102mm | · 주축 DC서보모터 : 36W · 회전속도 : 15.600rpm |
| micro-press m/c | 길이 : 111mm 폭 : 66mm 높이 : 170mm | · 동력 : 100W AC서보모터 · 프레스하중 : 약3kN |

〈표 6〉 조립유닛 구성기기의 주요 사양

| 종 류 | 크 기 | 주 요 성 능 |
|------------------------|--|--|
| micro-transfer arm | 높이 : 200mm | · 3방향 자유이동운동 · 팔의 중심부위에 감속기가 달린 3개 서보모터 부착 · 작업범위 : 직경200mm |
| two-fingered microhand | · 원형실린더 외경 : 48mm 높이 : 65mm · 집게길이 : 50mm | · 각 집게모듈에 3개의 내부압전 액츄에이터 부착 · 작업범위 : 100 \times 100 \times 30 μ m |

(4) 마이크로팩토리 시스템 실증 시험

MEL이 개발한 Desktop-type 마이크로팩토리의 실증 시험은 외경 900 μ m, 샤프트 길이 3mm의 초소형 볼 베어링 조립제품(수개의 볼베어링, 1개의 로터리 샤프트, 1개의 베어링 하우스, 1개의 톱 커버)을 가공·조립하는 제작시험이 실시되었다.

마이크로밀링 머신으로 900 μ 황동재료 베어링을 가공하고 황동 선재의 상하면을 밀링가공하고, 길이 1.3mm의 하우스 외형을 절단한 후 회전축용 직경

200 μ m 및 하우스 내경 700 μ m의 구멍을 가공하였다.

마이크로선반으로 외경 2mm의 황동 선재를 500 μ m 선삭 가공하고 45의 선삭 가공에 의해 최소직경 100 μ m, 길이 1.5mm의 축을 제작한 후 두 개의 축을 접합하여 회전축을 완성하였다.

마이크로프레스 머신으로 120 μ m 인칭동 박막을 휨 가공, 타발가공으로 하우스커버를 제작하였고, 가공부품들은 180mm거리의 마이크로 운송암으로 이송하여 현미경 원격조작에 의하여 조립하고, 집게형 마이크

로랜드에 의해 스테이지에 고정된 하우스징으로 외경 200 μ 의 볼과 회전축을 삽입하고 커버를 장착하여 조립을 마무리한 바 있다.<그림 3> 참조).

2. 미국과 EU의 마이크로팩토리 연구 프로젝트 분석

1) 마이크로팩토리에 대한 미국과 EU의 대응

1980년대 중, 후반부터 MEMS 기술발전을 주도해 오던 미국과 EU는 1990년대에는 MEMS기술을 응용하여 마이크로 액츄이이터, 마이크로센서 등 마이크로부품, 마이크로펌프, 밸브 등 유체기기 소자, 마이크로 IT기기, 마이크로 로봇 등의 마이크로기기·부품 기술발전을 국제적으로 광범위하게 확산시켜 왔다. 특히 미국과 EU는 신물질개발, 화학·의약분야의 시료·시약분석과 생체의학연구를 위해 마이크로유체기술을 응용한 μ TAS연구에 각국 정부가 지원을 확대해 왔으며, 이 기술은 해당 분야에서 마이크로팩토리 개념으로 정의하고 있다.

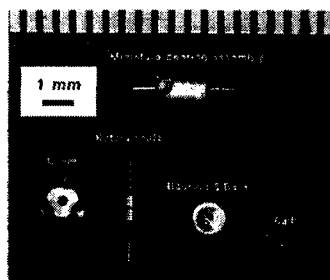
1990년대 중반부터 미국과 EU는 기계가공·조립시스템의 마이크로화(또는 생산시스템의 마이크로화) 연구에 착수하기 시작하였고, 일본의 마이크로팩토리 연구개발 사업이 목표를 달성하는 1990년대 후반부터 각국 정부는 마이크로팩토리 관련 연구개발 프로젝트를 적극적으로 지원하고 있다.

일본의 마이크로팩토리 연구개발 프로젝트가 정부 주도하에 계획되고 추진된 형태인데 비해, 미국과 EU의 관련 프로젝트는 각국 정부의 특정 연구지원 프로그램에 따라 연구그룹(주로 대학교수와 대학원생 중심)이 연구사업계획서를 제출하여 승인받는 형태를 취하고 있다.

마이크로 가공기술이 앞으로 당분간 산업기술경쟁력의 주요 지표로 작용하게 될 것임이 분명한 뿐만 아니라, 나노가공기술에 접근하는 중요한 경로이기 때문에 최근에 시행되고 있는 마이크로팩토리관련 프로젝트는 정부의 나노기술 연구개발 프로그램과 연계시켜 지원하고 있는 경우도 있다.

미국과 EU에서 진행되고 있는 마이크로가공·조립 기술과 관련된 프로젝트에 대한 연구결과에서는 앞으

<그림 3> 마이크로팩토리에 의해 가공·조립된 볼베어링과 부품



6) "Nanofactory: Ultra High Precision Electro Discharge Machine(EDM) of Small Size"(스위스 TopNano21 과제)

7) "Nanofactories Based on a Fleet of Scientific Instruments Configured as Miniature Autonomous Robots"(Proc. 3rd International Workshop on Microfactories, Mineapolis, Sep.,2002)

로 마이크로팩토리 연구방향의 하나의 지향점이 나노팩토리(Nanofactory)가 될 것임을 암시하고 있다⁶⁾⁷⁾.

2) 미국의 주요 마이크로팩토리 연구프로젝트

미국에서 추진하는 마이크로가공·조립을 위한 마이크로팩토리 개념의 연구는 대표적으로 다음의 2가지 프로젝트가 있다.

① Development of Micro/Meso-Scale Machine Tool System

② Agile Assembly Architecture/Minifactory

(1) Micro/Meso-Scale Machine Tool Systems(mMT)

mMT는 현재 미국에서 추진중인 기계가공을 위한 마이크로시스템 연구의 대표적인 프로젝트이며, NSF의 연구비 지원으로 Northwestern Univ.와 Univ. of Illinois(at U-C) 및 Univ. of Michigan이 공동으로 3년간(2001-2003) 수행하는 과제이다.

이 프로젝트는 4개의 중과제(中課題; Task)로 구성되어 있고, 각 중과제는 세부과제(sub-task)로 나누어져 있다.

① Task1 : Micro/Meso-Level Process Mechanics and Modeling

② Task2 : Miniaturization

③ Task3 : System Integration

④ Task4 : Prototype System Development and Performance Evaluation

이 4개 Task는 마이크로화를 위한 process modeling 과정에서부터 마이크로화, 시스템 종합을 거쳐 최종 단계인 프로토타입 시스템 개발과 시스템의 성능 실증 시험까지의 연구단계를 보여 주고 있다.

Miniaturization(Task2)의 Meso-scale Machine Tool (mMT) 개발은 전혀 새로운 설계개념이며, 이 프로젝트의 성공여부를 결정할 수 있는 핵심적 연구과제이다. mMT의 크기는 25×25×25mm로 목표하고 있는데 이 크기는 일본의 마이크로팩토리 프로젝트에서 실현한 마이크로선반의 크기 32×25×30.5mm와 비교할 수 있는 규모이기도 하다.

시스템 종합(Task3)의 주요 연구과제인 “병렬형 mMT 시스템 구축” 연구는 9개의 mMT를 3×3형태로 구성하여 한 컴퓨터에 의해 운전할 수 있도록 설계하고, 이를 위해 서로 다른 기능을 갖는 상중하 기관으로 구성되는 backplane과 그 위에 9개의 mMT로 시스템을 구성되어 있다. Backplane을 구성하는 3개 기관의 기능은 Top layer가 재료이송을, Middle layer가 전기신호를, Bottom layer가 기계장치(공압공급용 장치 등)를 각각 담당하고 있다(<그림 4> 참조).

병렬형 mMT시스템을 구성하는 배경은 점유공간, 노동력, 에너지 코스트, 유지비 등의 감소를 위한 경제적 시스템을 지향하는 데 따른 것이다.

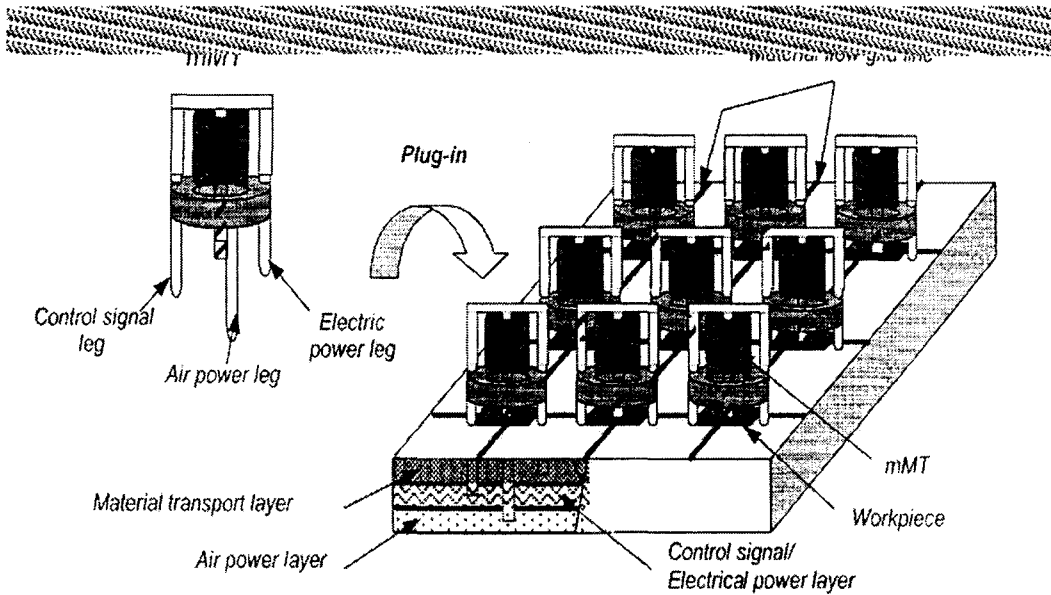
연구개발 목표는 기계가공용(밀링 및 드릴링) mMT 개발 및 시스템통합 및 실증시험, 평가이며, 상중하 평행기관(Backplane)에 의해 운전되는 3×3 mMT 병렬형 가공시스템의 개발이다.

(2) Agile Assembly Architecture/Mini-Factories for Precision Assembly

이것은 소형 정밀부품을 고속으로 조립하기 위한 Miniature Factory시스템의 개발이며, 역시 NSF의 연구비 지원으로 Carnegie Mellon Univ.(CMU)의 로보틱스 연구소에서 4년간(1995-1998) 수행한 과제이다.

Agile Assembly Architecture(AAA)는 카네기멜론 대학의 로보틱스 연구소가 로봇기술을 응용한 매니플레

〈그림 4〉 9개 mMT가 병렬 설치된 Backplane 구성도



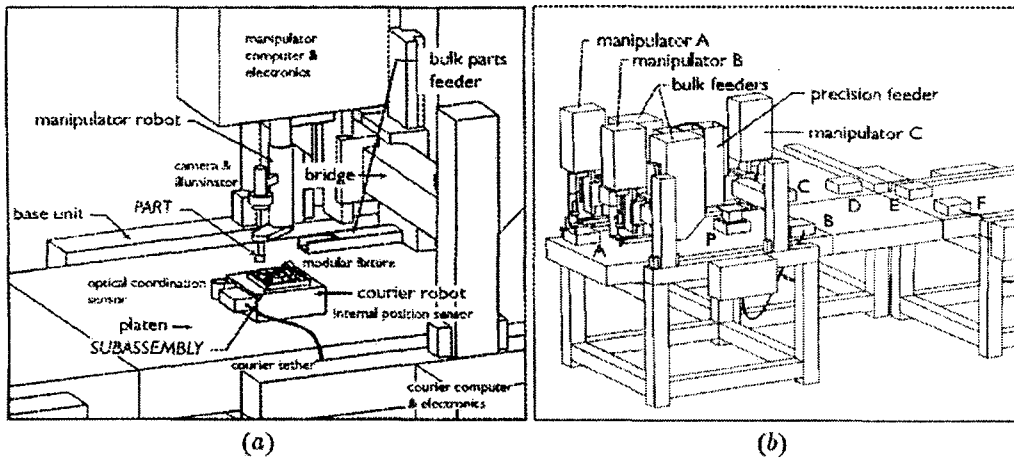
이전 및 제어기술에 의해 초소형 부품을 조립하는 기술이며, AAA기술을 이용하여 핸드폰 부품의 고속자동 조립시스템인 Mini-factory를 개발, 실증시험 연구를 거친 바 있다(〈그림 5〉 참조).

이 팩토리를 구성하는 기본부품은 2자유도 매니플레이터, 고정밀 플레튼 표면 위를 움직이는 2자유도 평면 매니플레이터(courier), 부품이송 기구 등이다. 미니팩토리를 구성하는 각각의 제작장비들은 각각 기

〈그림 5〉 CMU의 Minifactory

(a) 주요부품 구성도

(b) 공장입체도면



계, 전기, 연산적으로 모듈화되어 있고 동력, 공기, 진공 그리고 네트워크 연결기구를 제공하는 모선(bus)에 의해 서로 연결되어 있다.

앞으로 동 연구팀은 100 혹은 200nm 이하 초소형 부품의 조립시스템 연구개발을 계획하고 있다.

3) EU의 주요 마이크로팩토리 연구프로젝트

EU의 대부분 국가들은 MEMS 기술과 이를 응용한 마이크로 기계가공과 조립기술 등 마이크로 생산시스템 분야에서 매우 활발한 연구활동이 이루어지고 있으며, 이 중에서 특히 독일과 스위스는 마이크로팩토리 기술분야에 가장 활발한 연구를 수행하고 있다.

대부분의 주요 마이크로가공·조립시스템 연구개발 프로젝트들이 정부의 연구지원 예산에 의해 수행되고 있으며, 독일의 Fraunhofer Institute for Manufacturing, 스위스의 Federal Institute of Technology 등 국가연구

기관들이 연구사업에서 중요한 역할을 담당하고 있다 (<표 7> 참조).

EU국가 중 μTAS 연구개발에 투자를 지속하고 있는 독일과 스위스는 마이크로 기계가공·조립 시스템 연구뿐만 아니라 마이크로팩토리 개념의 생체의학과 화학분석용 마이크로 유체시스템(Microfluidic System) 연구를 활발히 진행하고 있다⁸⁾⁹⁾. (<표 8> 참조).

IV. 국내 연구개발 잠재력과 대응방향

1. 국내 연구개발 잠재력

우리나라는 마이크로팩토리에 대한 연구가 국가적인 차원에서 계획되거나 기업에서 추진된 실적이 없으나, 이와 관련된 기술분야로서 최근 대학의 ERC와 출연연구기관을 중심으로 마이크로시스템, 마이크로

<표 7> EU의 마이크로기술에 대한 정부지원 프로그램

| 정부기관 · 프로그램 | 주요 연구추진기관 | 주요 프로젝트 |
|--------------------------------|---|---|
| 독일 BMBF | Fraunhofer IPA ForschungszentrumKarlsruhe GmbH | Miniprod - Advanced Modular Microproduction System |
| 핀란드 National Technology Agency | Tampere U. Helsinki U. | Microassembly System |
| 스위스 Research Program TopNano21 | Federal Inst. of Tech., Lausanne | Nanofactory:ultra high precision electro discharge machine(EDM) of small size |
| 프랑스 CNRS | UMR CNRS | Microrobots on Chip(MOC) |

8) "A Modular and Flexible Assembly System for Microfluidic Analysis Systems", Forschungszentrum Karlsruhe GmbH

9) "From Laboratory Processes to Production-Table Top Factory for Biotechnological Applications", Fraunhofer Inst. for Manufacturing Engineering & Automation

442 주요국의 마이크로팩토리 연구현황과 우리의 대응방향

머신, 마이크로가공, MEMS 등 관련연구가 부분적으로 진행되고 있다.

서울대에서는 마이크로시스템/나노기술연구소가 MEMS를 위한 표면 마이크로 가공기술 등에 대해 연구하고 있으며, 마이크로/액츄에이터연구소에서는 마이크로 렌즈, 마이크로 자이로스코프 기술 등이 주요 연구분야이다.

한국과학기술원(KAIST)의 NanoSensuating System Lab.은 마이크로 센서, 마이크로 액츄에이터, 마이크로머신과 시스템, 부품 등에 대한 연구활동이 이루어지고 있으며, 한국과학기술연구원(KIST)의 마이크로시스템연구센터는 Bio-chip/ MEMS Optical Device 등 MEMS 소자연구 그리고 마이크로 액츄에이터, 바이오 로보틱스 등 마이크로로봇에 관한 연구가 추진되

고 있다.

한국기계연구원(KIMM)의 공작기계 연구그룹은 그간 축적해온 초정밀 가공기계 기술을 응용하여 마이크로팩토리 개념의 마이크로 가공기기 및 시스템 연구사업 계획을 추진하고 있다.

기업의 경우에는, 삼성종합기술원이 마이크로 자이로스코프, 마이크로 액츄에이터, MEMS mirror 액츄에이터, 마이크로 유체기기 분야에서 연구활동이 진행중이며, LG전자기술원은 Bio-MEMS, 마이크로 광학기기 등에 대한 연구활동을 시작하고 있다(<표 9> 참조).

최근에는 국내 연구원들의 연구논문이 국제 마이크로팩토리 관련 국제회의에서 발표되고 있는 등 마이크로 기술에 대한 국내 연구활동이 증대되고 있는 양상을 보이고 있다¹⁰⁾⁻¹¹⁾. (<표 10> 참조).

<표 8> IWWMF'02에서 발표된 EU의 마이크로팩토리 기술관련 주요 논문

| 국 가 | 연 구 기 관 | 발 표 논 문 |
|-----|---|--|
| 독 일 | Fraunhofer Inst. for Manufacturing U. of Oldenburg IAI, Karlsruhe GmbH | <ul style="list-style-type: none"> • Building a Mini-Factory from a Technology Construction Kit • Development of a Versatile Nanohandling Station in a Scanning Electron Microscope • Modules of the Microgripper Construction Kit- Fine Positioning, Compliance |
| 스위스 | CSEM IPR, Federal Inst. of Tech. | <ul style="list-style-type: none"> • A Centralized Control System for Microfactories • Miniature Electro Discharge Machine for High Precision Micro-structurisation • Fabrication of Aluminium Electrodes for Glass- and Polymer-based Microfactories by a Sample, Low-Power Laser-Assisted Corrosion Process |
| 핀란드 | Tampere U. of Tech Helsinki U. of Tech | <ul style="list-style-type: none"> • Environment Controlled Microassembly System |

10) Jongwon Kim(서울대), "Research Activities in Korea on Micro Mechanical Design and Manufacturing", Report for NSF Workshop on Micro/Meso Mechanical Manufacturing-M4, (Northwestern Univ. USA)2000.5

11) Y. H. Bae et al.(영남대), "Micro Machining with Micro Turning Lathe" Proc. of The 3rd International Workshop on Microfactories, Minneapolis, Minnesota USA. Sep. 2002

〈표 9〉 국내 주요 MEMS/Micro machine 연구 조직

| 기 관 | 연구조직 | 주요 연구분야 |
|-------|--|--|
| KAIST | ○ NanoSensuating Systems Lab. | <ul style="list-style-type: none"> · MOEMS기반기술 · Micro Sensor/Actuator · Sensuating Micro Device & System · Functional Micro Structure & Micro Component |
| KIST | ○ Microsystem Research Center | <ul style="list-style-type: none"> · MEMS소자(Bio-chip, MEMS Optical Device 등) · 마이크로로봇(Micro Actuator, Bio-Robotics 등) |
| 서울대 | <ul style="list-style-type: none"> ○ Microsystems & Nano Technology Lab. ○ Micro Sensor & Actuator Lab. ○ Bio-MEMS Lab. | <ul style="list-style-type: none"> · MEMS를 위한 표면 마이크로가공기술 · Micro-mirror, Micro-lens · Micro-gyroscope · Endoscopes, 인공심장 등 |
| 서강대 | ○ MEMS Lab. | <ul style="list-style-type: none"> · RF MEMS Switch · Micro Turbine · Micro Mirror Array |
| 아주대 | ○ MEMS Lab. | <ul style="list-style-type: none"> · Micro-injector · Micro-thermo-pneumatic pump |
| 삼성 | ○ 삼성종합기술원 | <ul style="list-style-type: none"> · Micro Gyroscope · Micro Actuator · Mems Mirror Actuator · Micro Fluidic Device |
| LG | ○ LG전자기술원 | <ul style="list-style-type: none"> · Bio-MEMS · Micro Optical Device |

〈표 10〉 IWMMF'02에서 발표된 국내 연구원의 논문

| 발표논문 | 발표자 / 소속 |
|---|--|
| · Hybrid Microassembly System for Three-Demensional MEMS Components | K. Kim/Wooshin Mechatronics Co. D. H. Kim/KIST S. J. Lee/Korea Univ. |
| · Motion Planning of an AFM-Based Nanomanipulator in a Sensor-Based Nanorobotic Manipulation System | D. H. Kim, B. Kim/KIST K. Kim/Wooshin Mechatronics Co. |
| · Vision Based Micromanipulation | S. J. Lee, G. T. Park/Korea Univ. K. Kim, D. H. Kim/KIST |
| · Micro Machining with Micro Turning Lathe | Y. H. Bae, T. J. Ko, B. M. Chung, H. S. Kim/Yeongnam Univ. |

또한, 한국정밀공학회는 공학회지 2002년 10월호에 “마이크로팩토리 시스템 기술”을 특집으로 발간하여 관련기술의 개발동향과 연구 필요성을 강조하는 등 마이크로팩토리 기술에 대해 최근 확산되고 있는 국내 연구원들의 관심을 반영하고 있기도 하다.

국내 연구현황은 주로 일부 마이크로부품과 디바이스 기술을 대상으로 한 MEMS 기술에 중점을 두고 있으며, 마이크로가공·조립 시스템 연구는 초보단계에 있으나 지속적인 연구지원이 이뤄질 경우 빠르게 성장할 수 있는 연구잠재력을 가지고 있다.

정부는 이러한 국내의 연구잠재력을 동원하여 마이크로팩토리 시스템 연구를 추진해야 할 중요한 시점에 와 있다고 할 수 있으며, 정부의 연구프로그램에 의해 장기적이고 목표 지향적인 프로젝트를 설정하여 추진할 필요가 있다.

2. 연구개발 방향의 설정

『마이크로팩토리』가 국가프로젝트로 발전하기 위해서는 정부가 마이크로팩토리 기술의 기술경제적 파급영향에 대해 확신을 갖는 것이 우선 중요하다. 이를 위해 마이크로팩토리 연구에 관여하고자 하는 연구원(대학, 연구기관, 기업)들은 공동으로 우선 이 기술에 대해 정부가 확신할 수 있도록 설득하고 국가 연구사업에 반영하기 위한 연구기획 보고서를 작성할 필요가 있다. 마이크로팩토리 연구프로젝트는 산·학·연이 동원된 장기 대형프로젝트로 추진해야 하고 외국과의 개발경쟁이 가능한 수준까지 달성하는 것을 개발목표로 설정함이 바람직하다.

1) 마이크로팩토리 연구의 지향점

마이크로팩토리 연구개발을 국가프로젝트로 추진하는 경우에 고려할 수 있는 연구방향(Target)은 크게 다음의 2가지로 나눌 수 있다. NT, IT, BT, ST 등 산업의 생산능력을 고도화시키기 위한 연구개발과 마이크로팩토리를 새로운 미래산업으로 성장시키기 위한 연구개발이 그것이다.

앞으로 전개될 NT, IT, BT, ST 기술제품(특히 부품)들은 현재보다 더욱 MEMS/NEMS 경향을 띠게 될 것이고, 이를 충족하기 위해서 초정밀, 초소형, 지능형, 자동화 생산시스템(생산유닛에서 팩토리까지) 수요가 증가 될 것이 예상된다.

정부가 발표한 국가기술지도(NTRM) 『1단계』 핵심기술도출 보고서에 반영된 「차세대 생산시스템」 및 「최첨단 정밀가공시스템」에 해당하며, 앞에서 논의한 상점·사무실 생산, 극한 환경에서의 생산, 차량 이동생산 등 새로운 생산시스템으로서의 마이크로팩토리에 대한 연구를 검토할 필요가 있다.

2) 개발기술(팩토리모델)의 선정

어떤 마이크로팩토리 기술을 개발모델로 할 것인가에 대한 결정은 앞으로 국내 마이크로팩토리 연구방향을 결정하는 출발점이 되어야 하므로 충분한 연구가 필요하다.

고려할 수 있는 개발모델 선정은, 외국에서 개발경험이 있거나 개발중인 기술의 모방형태로 일본의 마이크로부품가공·조립생산시스템, 미국·EU의 마이크로가공시스템 또는 조립시스템, EU의 마이크로분석 유체시스템(예:µTAS) 등을 생각할 수 있으며, 새로운 마이크로팩토리 시스템 개발형태로 한국형 마이크로팩토리 시스템을 선정할 수도 있겠다.

어떠한 개발모델이든지 연구개발은 ①시스템요소기

술, ②시스템 구성기기(또는 유닛) 및 부품, ③시스템 통합, ④시스템운전·제어기술 및 ⑤실증시험까지 이르는 생산시스템(Manufacturing System)으로 하는 것이 바람직하다.

3) 나노기술연구와의 연계성

나노기술에의 접근은 나노재료, 바이오, 고분자 등에서 Bottom-up 방식이, 기계, 나노가공(공정), 소자 등에서 Top-down방식의 개발 방향이 일반적 견해지만, 결국 마이크로 가공기술은 나노가공기술에 도달하기 위해 반드시 거쳐야 할 단계이다.

Top-down 방식의 나노기술개발 접근에서는 광의로 볼 때 나노기술개발 내에 마이크로 기술영역이 포함되며, 나노와 마이크로의 각 영역에서 모두 매우 큰 부가가치를 창출할 수 있다. 나노기술 영역으로 이동할수록 제품의 크기에 소형화가 예상되므로 생산설비는 자연히 초소형, 초정밀하게 될 것이며, 이를 위한 시스템 기술이 마이크로/나노팩토리라 할 수 있다. 따라서 마이크로팩토리 기술연구는 나노기술과 연계하여 추진되는 것이 바람직하다.

V. 결론

세계 최초로 마이크로부품에 대한 가공·조립시스템인 마이크로팩토리 프로젝트를 성공적으로 마무리한 일본은 후속 조치로 프로젝트 참여기업을 중심으로 한 실용화 연구를 진행시키고 있으며, 산업기술총합연구소를 중심으로 하는 신개념의 연구 「Micro/Nano 기술연구프로젝트」(연구기간: 200-2007년, 연구비: 10억엔)를 추진하는 한편, “작은 제품은 작은 생산설비에서”라는 사상을 보급하는 등 정

부차원에서 기술 수요를 적극 유도하고 있다.

미국은 NSF의 연구지원 프로그램을 통해 대학을 중심으로 이미 일본이 달성한 초소형, 초고속 회전 성능을 증가하는 새로운 형태의 마이크로팩토리 개념인 Micro/Meso mMT 시스템개발 프로젝트를 진행 중에 있으며, 독일, 스위스를 중심으로 하는 EU 국가들 역시 정부의 특정 프로그램에 의해 국가연구기관을 중심으로 마이크로 부품의 가공·조립시스템과 관련된 연구, 신물질, 생체의학용 분석시스템인 마이크로 유체분석시스템 연구 등 마이크로팩토리 관련 연구를 활발히 추진하고 있음이 최근 개최된 IWMF'02에서도 확인되고 있다.

외국에서 마이크로팩토리 연구에 정부가 적극 투자하는 배경에는 생산시스템의 초소형화를 통한 여러 형태의 경제적 미래가치 창출 가능성이 있지만, 또한 한편으로는 마이크로 생산기술이 최근 세계적 연구테마인 「나노기술」의 실용화를 위해 반드시 접근해야 할 Top down형 핵심기술이라는 데 있다.

다시 말해서, 「마이크로팩토리」는 앞으로 전개될 「나노산업」에 있어서 「Mother Machine」으로서의 중요성을 지니고 있으며, 이러한 연구·정책 동향은 우리의 국가기술경쟁력 강화를 위한 연구방향 설정에 있어서 마이크로팩토리 기술의 중요성을 시사하고 있다.

마이크로 가공과 조립 기술 등 마이크로팩토리 와 관련된 국내 연구개발 활동은 1990년대부터 여러 대학과 연구소를 중심으로 비교적 활발히 이루어져 왔다. 이 결과, 마이크로 생산기술로서의 시스템통합 잠재력은 선진국에 접근할 수 있는 수준에 이르고 있다고 분석된다. 따라서 정부는 이러한 국내 연구개발 잠재력을 동원하여 선진국의 예에서와 같이 마이크로팩토리 기술개발 프로젝트를 반영하여 추진하는

것이 매우 바람직한 시점이라고 판단된다. 이 분야의 연구경력에서 볼 때 선진국과의 격차는 10여년 수준이지만, 집중적인 연구개발 투자가 이루어질 경우, 선진국 기술 수준으로의 접근은 가능하다고 할 수 있다. 또한 이 기술은 미래 생산기술 경쟁력 확보를 위해 불가피한 선택분야이기도 하다.

〈참고문헌〉

1. 정부보고서, 「국가기술지도 1단계 핵심기술도출」, 2002. 7
2. 박종권, “차세대 지능형 Microfactory 시스템기술 : 마이크로팩토리 개발동향”, 「한국정밀공학회지」, 19(10), p. 7-14, 2002. 10
3. IWMF’2002 Committee, “Microfactory”, *Proc. of The 3rd International Workshop on Microfactories*, Minneapolis, Minesota USA, Sep. 16-18, 2002
4. Report for NSF Workshop on Micro/Meso Mechanical Manufacturing-M4, (Northwestern Univ.) 2000.5
- Jongwon Kim, “Research Activities in Korea on Micro Mechanical Design and Manufacturing”
- M. Tanaka et al, “Microfactory Project”
5. M. Tanaka, “Development of Desktop Machining Microfactory” *RIKEN Review* No.34, 2001
6. F. Kodama, “Micromachines and Business Models” *Micromachine* No.38, 2002.2
7. Pedro J. Estevan, *Microassembly 1 (Microfactory Approach in Japan)* Mar. 2001
8. K. F. Ehmann et. al., *Development of Micro/Meso-scale Machine Tool Systems*, Submitted to The National Science Foundation, Jun. 2000
9. T. Ataka, *The Experimental Microfactory System in Japanese National R&D Project*, <http://www.aist.go.jp>, 2002
10. 日刊工業新聞社, 「マイクロマシン革命 -日本發超微小機械の衝撃」, 2002.2
11. 田中 誠, “マイクロファクトリ研究の現状”, 「機械の研究」, 53(3), 2001