

우리나라 초정밀가공기술의 기초연구동향 분석 연구

박원규*, 이대명⁺, 홍원화⁺

(논문접수일 2010. 11. 5, 심사완료일 2010. 12. 21)

A Study on Basic Research Trends of Ultra-Precision Machining Technology in Korea

Won-Kyoo Park*, Dae-Myung Lee⁺, Won-Hwa Hong⁺

Abstract

Ultra-precision machining technology is the essential core technology in today's micro-electronics and electro-optical industries. The needs for processing systems to manufacture products to nanometer(nm) accuracy and sub-nanometer resolutions are increased recently. By using ion beam, it is possible to fabricate ultra-precision and ultra-fine products with nm accuracy and sub-nm resolution. In this paper, the basic research trends of ultra precision machining technology in domestic are surveyed, and the ways to reach to the world-leading level of basic research capabilities in the field of ultra-precision machining technology in domestic is suggested.

Key Words : Ultra-precision machining(초정밀가공), Nano technology(나노기술), Single point diamond tool(단인 다이아몬드공구), Mechano-chemical polishing(메카노케미칼 폴리싱)

1. 서론

1.1 초정밀가공이란?

초정밀가공기술이란 안정되게 달성 가능한 가공정도의 상한을 추구하는 가공법을 정밀가공이라 하고, 특별한 경우에 만족되어질 때에만 실현되어지는 최고의 정도를 추구하는 가공법을 초정밀가공이라 한다. 여기에서 정도의 상대적인 스케일은 시대와 함께 급속한 변화를 하고 있다.

고정밀가공의 한계는 가공정도의 한계에 대응할수 있고, 초정밀가공에서의 가공정도는 고정밀 가공 한계보다 1자릿수 높아야한다. 현재 초정밀가공의 가공정도는 표면 거칠기가 0.01 μm R_y에 달한다. 이러한 가공정도는 일반 절삭가공 정도 보다 2자릿수 이상 높다. 이 레벨의 수치는 펄스의(100nm), DNA

의 크기(10nm)에 필적할 수도 있다.

초정밀 가공에 대한 정의는 그 시대의 기술수준에 따라 변화하지만, 현재의 시점에서는 가공물의 치수 및 형상 정밀도 0.1 μm , 표면조도 0.01 μm R_{max} 또는 그 이하를 말한다⁽¹⁾. 문헌에 따르면 초정밀 가공의 한계 정밀도는 궁극적으로 1nm(nano meter 0.001 μm)에 도달할 것이라고 판단하고 있다⁽²⁾. 초정밀 가공방법으로는 고대로부터 랩핑(lapping)으로 대표되는 입자가공과 폴리싱(polishing) 가공법 등이 있었으며, 최근에는 레이저(laser)로 대표되는 비임(beam)가공, 화학적 가공법 그리고 다이아몬드공구를 이용한 가공법 등으로 다양하게 발전하고 있다.

초정밀가공된 부품에는 천체망원경의 주 반사경과 같은 직경이 10m 근접한 것도 포함되어 있다. 천체의 상을 정확하게 관

* 한국연구재단 기초연구본부 공학기반단 (wkpark@nrf.go.kr)

주소: 305-350 대전광역시 유성구 가정로 165

+ 한국연구재단 기초연구본부 공학기반단

측하기 위해서는 표면의 다듬질 정도를 파장의 수백에서 수천분의 일로 하지 않으면 안 된다. 상이 번지지 않는 것, 간섭이 생기지 않는 것이 주변사정에 요구된다. 그러므로 고정도의 가공이 필요하다.

이와 같은 대형부품의 초정밀가공으로는 가공정도의 절대값보다 요구되는 가공 정도와 그 부품의 대표적인 수치와의 비(상대정도)의 정도가 실용적인 의미를 갖고 있도록 하고 있다. 그 비가 10^6 이상의 경우를 초정밀가공의 가이드라인으로 한다고 생각할 수 있다. 큰 부품으로는 진동, 강성, 열변형의 면에서 절대적인 가공정도를 확보하는 것이 곤란하다.

1.2 초정밀가공법의 종류

일반가공, 정밀가공과 같이 초정밀가공에도 칩의 분리 또는 에칭과 같은 피가공물의 재료를 제거하는 것에 의해서 원하는 형태를 얻는 제거가공, 소재의 표면에 막을 형성하는 것에 의해서 필요한 표면의 특성을 얻는 부착가공이 있다.

초정밀제거가공에는 다이아몬드 단인공구(single point diamond tool)에 의한 초정밀절삭가공, 메카노케미칼 폴리싱(mechano-chemical polishing)에 의한 초정밀연마가공이 있고, 초정밀부착가공에는 전자 빔 증착, 플라즈마 CVD(plasma chemical vapour deposition)등이 있다.

초정밀가공에 있어서의 공구에는 절삭공구, 연삭숫돌과 같은 고체상의 것과 레이저 빔, 전자 빔, 플라즈마와 같은 높은 에너지를 갖는 입자상의 것 그리고 소재와 화학적인 반응을 일으키는 기체, 액체상의 반응성물질 등이 있다.

한편, 고체상의 공구 또는 높은 에너지를 갖는 입자상의 공구를 사용한 초정밀가공에 있어서는 사정이 조금은 복잡해진다. 피가공물이 제거되어지는 단위는 작은 서브마이크로 이상의 영역에서의 초정밀가공에 있어서는 역학적, 열적, 전자기적, 또는 물리적인 에너지뿐만 아니라 가공의 진전에 화학반응의 중요한 역할을 하고 있다.

가공단위의 크기가 1 μ m이상 재료의 제거는 그 모재의 역학적인 특성에 따른다. 초정밀절삭, 초정밀연마가공에 있어서는 가공단위가 서브미크론 이하이고 가공되어진 영역의 체적에 대하여 표면적이 크게 된다. 따라서 공구와 피삭재의 접촉계면에서의 상호작용(화학적 작용)이 중요해진다.

1.3 초정밀가공 시스템의 가공환경

초정밀가공을 실현하기 위해서는 가공환경의 충분한 제어가 필요하다. 가공환경이 적절하게 제어되고 있는 크린 룸에서는 공기중의 먼지, 미립자, 실내의 압력, 온도, 습도, 기류의 분포 등을 일정하게 제어해야만 한다. 만약 미세한 먼지가 1개라도 안내면에 개입된다면 초정밀가공기의 운동정도는 크게 영향을 받고, 가공정도는 저해된다. 여기서 공기중의 미세한 먼지는

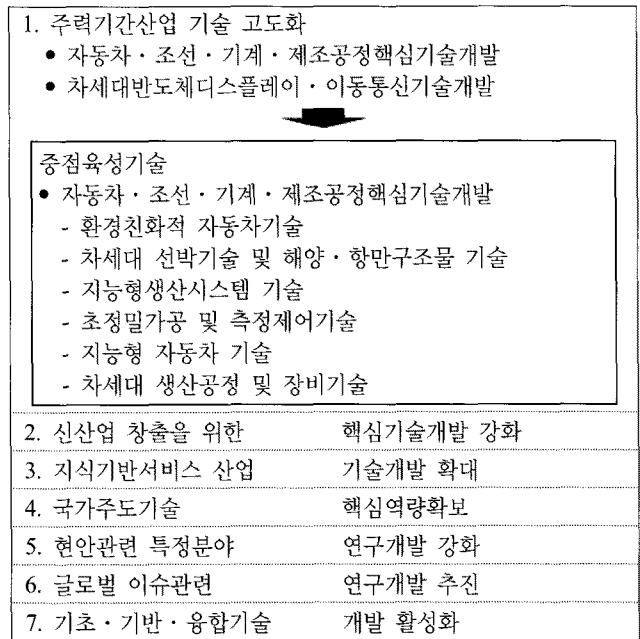


Fig. 1 7대 중점과제

0.5 μ m이하의 먼지를 말한다.

또 극소진동에 대한 문제가 대두되고 있다. 소위 압진동이라고 하는 진동가속도, 진동진폭이 극히 작은 건물의 진폭이 이에 속한다. 지진, 바람 등의 자연현상에 의한 진동, 자동차, 전차 등의 교통기관에 의한 진동, 인간의 보행에 의한 진동 등이 초정밀가공기에까지 전달되지 않도록 차단해야 한다.

1.4 우리나라의 과학기술기본계획

가장 최근의 과학기술기본 계획으로는 「선진일류국가를 향한 이명박정부의 과학기술기본계획」(2008~2012)가 수립되었으며 7대 중점분야 50개 중점육성기술, 40개 중점육성후보 기술분야를 도출하여 전략적 투자를 추진하고 있다. 7대 중점과제 중 첫 번째가 현세대의 먹거리 분야인 주력기간 산업 고도화 기술의 개발이다. 이 분야는 세계시장 규모의 지속적 확대가 예상되는 자동차조선, 기계-제조공정 등 주력기간산업의 고부가가치화를 위한 핵심기술이 포함되어 있다. 초정밀가공 및 측정제어기술은 주력기간산업 고도화기술로 도출된 주요 핵심기술이다⁽³⁾.

2. 초정밀가공기술 관련 기초연구분야

2.1 초정밀다이아몬드절삭가공

다이아몬드 공구를 이용한 초정밀 가공 기술개발은 미국에서는 1960년대부터 시작되었는데 POMA(Point One Micrometer Accuracy) 계획과 LLNL(Lawrence Livermore National Laboratory)의 LODTM(Large Optics Diamond Turning Machine)

이 획기적인 성과를 이루었다. 1990년에 발표한 NANOFORM 600은 위치결정정도 0.25 $\mu\text{m}/300\text{mm}$, 분해능 1.25nm로, 직경 75mm의 비구면 가공 실험결과 형상정도 0.1 μm 이내, 표면조도 0.01 μm Rmax 이내를 실현하였다.

한편, 유럽에서는 Philips사에서 1959년 고정밀도 정압베어링과 다이아몬드 공구를 이용한 선반을 개발하여 1969년에 발표하였으며 1978년경 CUPE(Cranfield Unit for Engineering)에서는 비구면 반사경을 가공하기 위한 선반이 개발되었다. 최근에는 상업용 초정밀 가공기 NANOCENTER를 발표하였으며 이 가공기는 직경 600mm의 비구면을 형상정도 $\pm 50\text{nm}$, 면조도 5nm Ra로 가공할 수 있다고 한다.

가까이 있는 일본에서는 1970년대부터 사무용품 및 컴퓨터 기기를 중심으로 고정도의 초정밀가공기술이 발달하여 왔다. 일본의 초정밀가공기는 주로 민생기기용의 렌즈나 반사경 가공을 위하여 개발되어 직경이 100mm이하인 소형이 대부분이며 개발도 1980년대 이후부터 이루어졌다. Toyota, Toshiba, Hitachi 등의 여러 유명업체가 이 분야에 관심을 가지고 연구중이며 현재에도 다수의 논문이 발표되고 있다.

최근의 초정밀절삭가공연구는 초정밀가공기의 발전과 함께 다음과 같은 방향으로 진행되고 있다.

- 마이크로머신에 사용하는 작은 부품가공
- 정보기기의 광학계 등에 사용하는 축 비대칭 곡면가공
- 천체망원경 등에 사용하는 광학부품의 비구면 형상가공
- 가공이 어려운 재료의 가공 등

2.2 초정밀연삭가공

“연삭은 다수의 입자를 결합하여 연삭숫돌에 강제로 절삭깊이 이송을 주고 공작물을 절삭한다.”라고 정의된다. 연삭가공은 고속으로 회전하는 숫돌을 사용하여, 숫돌을 구성하고 있는 단단한 입자에 의해 공작물을 조금씩 절삭하는 가공법이다. 단단한 입자로 절삭가공하는 것은 일반금속뿐만 아니라 담금질강, 초경합금 등의 가공도 가능하다. 작은 입자로 절삭하기 때문에 칩은 극히 작다.

연삭은 기계가공공정의 마지막 단계로 제품의 품질을 좌우하는 중요한 가공공정이다. 따라서 연삭가공은 연삭기 및 연삭숫돌의 특성 뿐만 아니라 모재의 종류, 연삭속도, 연삭유의 성능, 가공조건 등 다양한 요인에 의해 연삭품질의 차이가 발생한다.

최근의 연구동향을 보면 최적 연삭공정설계, 각종 다양한 재료에 대한 연삭가공에 관한 연구, 연삭저항 및 연삭면 특성연구, 연삭버닝 등에 관한 연구가 수행되고 있다.

연삭가공에 의해 초정밀 가공을 실현하기 위해서 새로운 발상의 ELID연삭이라는 연삭가공기술이 개발되었다. ELID연삭은 연성모드 연삭이라고 할 수 있는데 입자의 높이 분포를 제어하는 것으로 입자의 선단을 맞추고 미소한 절삭깊이의 조건으

로 연삭가공을 행하여, 취성재료로도 금속과 같은 연성적인 칩이 생성되고 경면을 얻는 것이 가능하다. 이것이 연성모드연삭이라 불리는 가공법이다. 이때 임계입자절삭깊이는 0.1 μm 이하로 생각된다.

2.3 초정밀연마가공(연마, 랩핑, 폴리싱)

연마가공은 마제석기를 갈기 위해 신석기시대에 이미 실용화된 기술로 유리입자와 공작액을 이용하는 래핑과 폴리싱, 스톨에 의한 연마가공인 호닝 등이 있다.

2.3.1 랩핑

주철, 동합금 등의 연금속이나, 경목, 목탄 등의 비금속 재료로 만들어진 랩에 공작물의 표면을 눌러 부착하고, 랩과 공작물 사이에 직경 수 μm 의 미세한 입자 랩핑 파우더를 가하여 상대운동시키면, 랩제에 의해 공작물 표면부터 미량의 칩이 제거되어 평활한 표면이 얻어지는 가공법을 래핑이라 한다. 랩핑의 대표적인 예는 블록게이지의 다듬질 가공이며 블록게이지의 랩핑가공은 거친, 중간다듬질은 습식랩핑을, 다듬질에는 건식래핑이 이용된다. 랩핑게이지에 요구되는 치수공차, 표면조도는 등급, 호칭치수에 따라 다르다. 호칭치수가 150mm이하의 블록게이지에서는 평면도의 허용치 0.05 μm , 표면조도 0.06 μm R_y로 되어 있다.

2.3.2 폴리싱

랩핑에 있어서의 입자를 고르고 미세하게 하고, 공구인 랩도 연질의 것으로 바꾸면, 연마면을 아주 평활하게 하면 경면다듬질이 용이해 진다. 이것이 폴리싱이라 하는데 랩핑의 최소가공단위는 0.1 μm 정도이지만, 폴리싱의 최소가공단위는 나노미터 오더까지 접근하고 있다. 폴리싱에 의해 경면이 생성되어지는 메카니즘은 완전히 밝혀져 있지 않다. 기계적인 작용과 화학적인 작용이 조합되어 경면화가 진행된다고 이해되고 있다.

폴리싱에 의해 가공된 경면을 현미경으로 관찰하면 전면이 미소한 굽힘으로 덮여져 있는 면으로부터 요철이 전혀 인식되지 않는 면까지 여러 가지가 있다. 굽힘이 있는 폴리싱면에는 연마에 의해 가공변질층이 발생하고 있다. 기계적인 작용에 의한 가공변질층의 발생을 감소하고 폴리싱에 의해 생성된 경면의 품질을 높이기 위해서 프로토폴리싱이라는 새로운 폴리싱가공법이 개발되었다.

프로토폴리싱은 높은 형상정도를 실현하고 가공변질층이 생기지 않는 가공법으로 플롯 폴리싱법이 개발되었다. 수중의 SiO₂의 초립자를 현탁시켜 가공액으로 사용한다. 가공액에 동압효과에 의해 가공액에 압력이 생겨 이 때문에 공작물이 폴리싱플레이트로부터 아주 잘 떠오른다. 따라서 폴리싱플레이트와 공작물이 비접촉의 상태로 가공이 행해진다.

2.3.3 메카노케미칼 폴리싱

메카노케미스트리는 인장, 압축, 전단, 굴곡, 소성변형 등의 가공을 통하여 가공하는 기계적인 에너지 보다는 고체표면의 물리적 또는 화학적 특성을 변화시키기도 하고, 고체의 주변에 존재하는 기체와 액체물질에 화학적인 변화를 주거나, 또는 주위의 물질과의 직접화학반응을 촉진시키는 등의 일련의 물리 화학적 현상을 나타내는 단어이다.

특히 초미세입자가 관여하는 경우에는 초미세입자의 표면적이 크기 때문에 재료의 물리적인 특성에서도 접촉의 경계면이 화학적인 상호작용 쪽이 물질변화에 대하여 영향이 크게된다. 이와 같은 초미립자의 화학적인 작용을 이용하여 가공변질층이 없는 초평활면을 만드는 가공법이 메카노케미칼 폴리싱이다.

2.4 에너지빔가공(레이저빔, 전자빔, 이온빔)

에너지빔 가공은 가공에너지를 빔상으로 하여 가공물에 주사하여 목적하는 형상으로 가공하는 방법이다. 에너지원으로 레이저, 전자, 이온, 플라즈마 등을 사용하는 데 사용하는 에너지원에 따라 레이저빔가공, 전자빔가공, 이온빔가공, 플라즈마빔가공 등으로 구분된다.

2.4.1 레이저빔

1960년, 나이만이 루비 레이저(레이저의 명칭에는 발진 매질의 재료를 붙이는 것이 일반적이고 이경우는 루비를 사용하고 있다.)의 발진에 성공한 이래 레이저 가공기술이 발전하기 시작하였다.

레이저 가공은 강력한 출력의 레이저를 사용하여 금속, 플라스틱, 나무 그리고 천 등의 절단, 구멍 뚫기와 용접, 담금질 등을 하는 기술이다. 작동 속도가 빠르고 초점을 정확히 맞출 수가 있기 때문에 여러 분야에 이용되고 있다. IC와 LSI, 정밀 기기의 가공에 매우 뛰어나다. 매우 작은 점에 집광(集光)할 수 있고 에너지 밀도가 큰 것이 레이저의 특성 때문이다. 가장 단단한 다이아몬드를 비롯하여 보석·내열합금(耐熱合金)·세라믹스 등도 가공할 수가 있다. 예를 들어 시계 베어링으로 쓰이는 직경 1mm의 루비에 직경 0.05mm의 구멍을 1초 동안에 10개 이상이나 뚫는다. 같은 레이저 가공기라도 출력을 달리 하면 갖가지 작업을 할 수 있다. 출력을 높여 연속적으로 빛을 대면 금속을 절단할 수가 있으며, 재료가 녹으면서도 증발하지 않을 정도로 출력을 줄이면 용접기로 변한다. 더욱 줄이면 금속 표면에만 열처리를 한다든지 금속 표면의 흠을 체크할 수도 있다. 이와 같이 산업용 레이저는 실용화가 뛰어나다. 아직은 비용이 많이 들지만 이것만 해결되면 종래의 공작 기계의 이미지를 바꾸어 버리게 될 것이며 소형화, 고효율화(高效率化), 자동화, 그리고 작업장의 면적을 줄이는 데도 크게 기여할 것이다. 바야흐로 커터라든가 드릴 등이 모습을 감추고 레이저

광선으로 바뀔 날도 멀지 않은 것으로 보인다.

2.4.2 전자빔

전자빔의 역사는 1869년 물리학자인 Hittorf and Crookes가 음극선발생을 성공한 것을 계기로 많은 과학자들이 그것의 응용을 도모하였다. 1948년부터 물리학자 Steigerwald는 강력한 빔 발생기를 전자현미경에 적용하고 시계부품이나 초경금형의 전공, 용해, 용접 등을 시도하였다. 그후 산업현장에 활용할 수 있는 전자빔용접기는 1958년 독일 Stuttgart의 Cari Zeiss Company에서 개발되었다. 전자빔에 의한 구멍내기, 용접기술이 개발된 것은 1950년대 이다. 특히 원자력 관계의 특수한 금속의 용접 요구에 있어서 용접, 용해, 천공, 증착 등의 실용화 연구가 시작되고, 용접을 중심으로 1960년대에는 방대한 데이터가 축적되었다.

또한 60년대 후반으로부터 전자빔 리소그래피 기술의 개발이 빠르게 진행되었다. 전자빔의 적용분야는 거의 레이저 가공과 같다. 그러나 전자빔 열가공이 실용적으로 이용되고 있는 것은 증착, 용접, 천공 등이 주체이다. 화학반응에는 리소그래피, 큐어링이 있다.

2.4.3 이온빔

이온빔 가공은 이온을 고체시료에 조사시켰을 때 시료의 구성원자가 시료표면으로부터 진공중으로 방출되는 소위 스퍼터링현상을 이용해서 피가공물의 표면을 원자, 분자의 수준으로 조금씩 제거가공하는 가공법으로 다이아몬드와 초경합금 등 경취재료의 초정밀 미세가공에 적합하다.

3. 우리나라 초정밀가공의 기초연구동향

3.1 기초연구동향

한국연구재단의 2009년도 기초연구사업에서 초정밀가공분야에 12과제, 총658백만원이 지원되었으며 이 과제들을 중심으로 한 기초연구동향은 다음과 같다.

3.1.1 절삭가공분야

현재 미세방전가공, LIGA 같은 마이크로전자에칭가공에 의해 가공되고 있는 디스플레이, 광학기기, 태양광발전, 연료전지 분야에서 사용되는 다양한 형태의 미세패턴들을 미세공구를 이용하여 초정밀 미세형상 금형을 가공하고 이 금형으로 미소부품들을 생산 가능케 하려는 연구가 이루어지고 있다. 이때 가공을 위해서는 다이아몬드공구가 이용되며 마이크로 이하의 정밀도를 유지하는 효율적 가공을 위해 가공공정에 대한 이론적 해석연구가 시도되고 있다.

또한 절삭가공 중에 공구와 텃 사이에 발생하는 열을 냉각시

키고 공구의 수명을 연장하고, 가공정밀도를 향상 시키는 데 중요한 역할을 하는 절삭유에 대한 연구가 진행되고 있다. 나노유체를 활용하여 친환경 미세형상가공기술 확보를 목표로 하고 있으며 나노유체 MQL 기계가공/ 나노유체 MQL기계가공 프로세스 특성규명이 연구되고 있다.

3.1.2 연마가공분야

초정밀연삭된 렌즈급형의 공구마크 제거를 위해 초정밀연마는 필수적인 공정이다. 그러나 연마가공은 초정밀연삭가공된 0.1 μm 급의 형상정밀도를 크게 훼손할 가능성이 있다.

따라서 형상정밀도를 유지하면서 공구마크만을 효율적으로 제거하는 연마공정이 필요하다. 최근 초소형비구면렌즈 연구 성과는 일본에서 소형의 초음파 연마공구를 이용하여 2mm렌즈크기에서 표면거칠기 2nm Ra를 달성한 것으로 보고되고 있고⁽⁴⁾ 국내에서는 에어백공구와 편심운동기구에 의한 방법으로 유리소재에 대해 1nm Ra를 달성한 것으로 보고되고 있다. 현재 직경 1mm 이하의 마이크로 비구면렌즈 초경금형에 대해 표면거칠기 2nm Ra연마공정구축이 시도되고 있다.

자기유변유체와 abrasive jet 머시닝 기법을 이용하여 초정밀의 경면연마를 얻기 위한 MR abrasive jet machining을 개발하고, 이에 대한 연마용 MR 슬러리를 합성하여 초정밀 연마기술을 확립하고자 하는 연구가 추진되고 있다. 이 연구는 이를 이용하여 다양한 재질과 조건에 대하여 실험기법과 분석평가를 통해 초정밀 가공(Ra 1nm이하)과 미세패터닝 조건을 확립하여 최적의 MR 슬러리 조건과 시스템을 개발하고 다양한 미세형상 가공기술을 개발하는 것을 목표로 하고 있다.

3.1.3 레이저가공분야

유연한 섬유재료에 전도성 나노입자를 레이저를 통해 직접 소결시켜 전기적 회로 등을 섬유재료에 직접 전사하는 방법에 대한 연구가 진행되고 있다. 레이저 직접 전사공정은 마스크가 별도로 필요없고 수십 마이크로론의 전도선을 직접 가공할 수 있는 장점이 있다. 이 연구의 목표는 첫째는 레이저 집속에너지를 통해 얇고 유연한 재료의 손상없이 전도성 나노입자를 고형화시킬 수 있는 레이저 선택적 마이크로 고형화 특성규명이고 둘째는 공정 최적화에 의한 수십-수백 마이크로론 전도선을 유연한 섬유재료에 전사하는 것이다.

또한 레이저빔 마킹 기술과 전해에칭 기술을 결합한 새로운 형식의 복합가공기술을 개발하여 기존의 반도체 공정으로는 힘든 금속합금에 미세패터닝과 형상구조물 제작이 가능하도록 하고 또한 전해 에칭으로는 구현이 어려운 deep etching구현을 목표로 하는 연구가 이루어지고 있다. 레이저빔 가공과 미세방전가공 및 미세 전해가공을 결합한 복합가공기술에 대한 연구를 통해 기존의 미세가공법의 느린 가공속도로 인한 비생산성

및 비효율성을 개선하여 실제 산업에 적용할 수 있도록 최적의 가공법을 제시하는 것을 목표로 하고 있다.

3.1.4 이온빔가공분야

집속이온빔 기술을 이용한 임플란테이션 기술은 회로의 수정 및 보수, 마이크로 구조분석을 위한 TEM시편의 제작 및 나노 스케일의 가공을 위한 다양한 재료과학의 응용분야에서 복합가공(밀링 및 증착)이 가능한 아주 중요한 기술이다. 벡터스캔을 이용하여 이온빔의 이동경로에 따른 이온빔 가공형상을 관찰하고 분석하여 최적의 3차원 형상을 제작하기 위한 연구가 이루어지고 있다. 가공형상 맞춤형 이온빔 가공의 최적화를 위하여 벡터스캔을 이용하여 이온빔의 이동경로를 생성하는데 이는 이온빔 가공시 발생할 수 있는 다양한 현상들의 과학적 해석이 가능하게 하며 이를 이용하여 가공형상을 최적화 할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

3.1.5 리소그래피기술분야

초정밀 기기 및 부품 생산을 위해서는 회절한계 이하의 선폭 및 높은 광학적 투과 효율을 갖는 리소그래피 기술이 필요하다. 그러나 마스크 없이 회절한계 이하의 미세선폭의 효율적인 가공을 위해서는 빔의 강도가 강해야 하는데 이를 위해 나노고속도파로 개발에 관한 연구가 진행되고 있다. 현재 30nm 빔스팟에 600배 이상의 빔 강도 증폭을 갖는 SIL기반 복합광학헤드 설계/제작/평가 기술 획득을 목표로 연구가 이루어지고 있다.

또한 기존의 포토리소그래피 방식으로는 반복적으로 고가의 마스크를 노광시켜 패터닝을 하고 에칭을 수행해야 제작되는 마이크로구조의 채널을 접촉인쇄공정을 이용하여 단순하며 편리하게 다층형 마이크로채널 제작방법을 개발하기 위해 다층형 마이크로채널의 제작을 위한 설계 및 공정변수에 대한 연구가 진행되고 있다.

3.1.6 전해방전융합가공분야

나노소자, 센서 등 부품들을 제작하기 위해서는 나노 점, 선 및 복합형상의 가공기술 확립되어야 한다. 현재는 AFM을 이용한 나노패터닝은 표면산화에 의한 AFM nanolithography, 나노프로브를 이용한 기계적 압입, 그루빙 기술로 이루어지고 있다. 그러나 이러한 가공방식은 대상재료가 폴리머나 반도체 재료 등으로 극히 제한적인 재료 그리고 형상의 단순해야 하는 등 여러 측면에서 한계를 갖는다. 이를 해결하기 위해 원자현미경과 나노초 펄스발생기를 활용한 나노전해방전 융합가공기술 개발에 관한 연구가 이루어지고 있다. 본연구에서는 AFM을 이용한 탐다운 방식의 금속나노구조물 가공기술을 개발하고자 하고 있다. 고정도 도전성금속구조물제작에 널리 활용되는 EDM, ECM 기술을 나노영역으로 확장하여 10nm~100nm에

이르는 금속나노구조물의 제작을 용이하게 하려고 시도하고 있다.

3.2 기초연구지원현황

(구)한국과학재단에서 수행하던 목적지향적 연구활동지원사업과 (구)한국학술진흥재단에서 수행하던 학문발전 및 연구인프라육성지원사업의 공학기반 분야의 지난 4년간 지원과제 현황(2006~2009)을 통해 공학기반 학문분야의 연구동향을 점검해 보았다. 한국연구재단 공학기반분야에서 4년간의 총 지원과제 수는 2,174개이며, 총 지원규모는 1,920억원이다. 연도별 지원과제 수는 380개~750개로 증가하고 있으며, 평균적으로 25%의 지원과제수 증가율을 나타내고 있다. 또한 지원 금액은 연간 30% 정도의 상승률을 나타내고 있으며, 이는 국가 R&D 예산 상승률과 비슷한 수준이다. 특징적인 점은 2009년 들어 개인연구 지원과제 수가 전년대비 168개 과제가 늘어나며 30% 증가율을 나타내고 있으며, 지원금액면에서도 130%가 증가한 196억원의 연구비를 지원하고 있다. 이를 통해 학문의 경향 혹은 정책적인 목표가 응용 및 개발연구로 발전 가능한

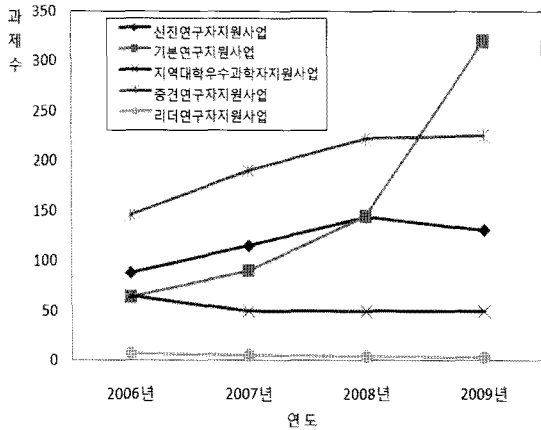


Fig. 2 사업별 지원과제수 변화 추이

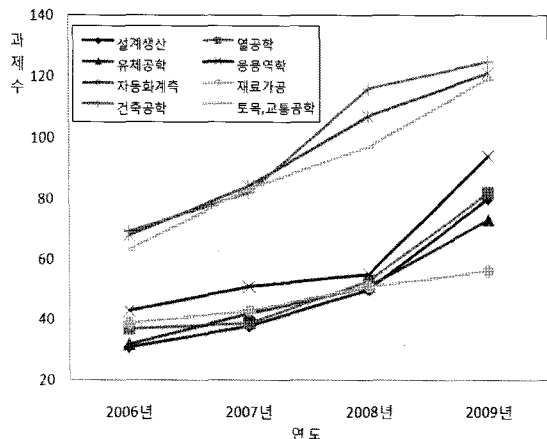


Fig. 3 분야별 지원과제수 변화 추이

목적지향적연구활동 보다는 공학기반 학문분야의 기반조성을 위한 순수기초연구에 대한 지원이 늘어났음을 알 수 있다. 공학기반 분야에서 지원한 과제의 평균 지원액은 88백만원이며, 사업별 과제 평균 지원액은 집단연구의 선도연구센터(S/ERC)가 9.7억원으로 가장 규모가 큼을 알 수 있다. 공학기반 분야의 4년간의 지원과제 수를 살펴보면 공학기반 8개 분야 중 재료가공분야에 189과제가 지원되어 전체과제 수(2,174과제)의 8.6%를 점하고 있는 것으로 나타났다. 2009년도를 살펴보면 공학기반분야 지원과제수 총 750과제 중 재료가공분야에 56과제가 지원되어 7.5%를 점하고 있으며 이중 초정밀가공분야에 12과제가 지원되어 1.6%를 점하고 있는 것으로 나타났다.

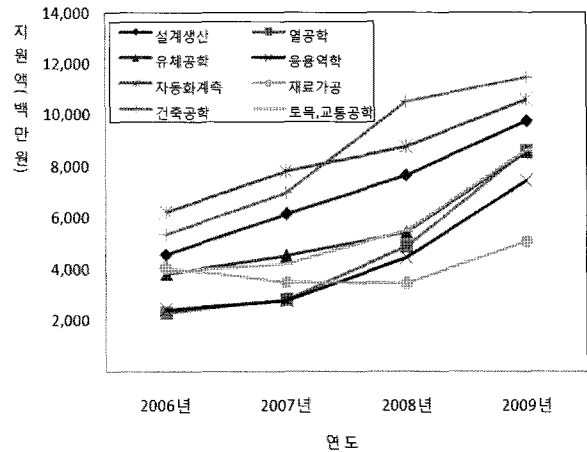


Fig. 4 분야별 지원금액 변화 추이

Table 1 분야별 지원현황 (2006~2009)

(단위 : 백만원)

	2006년		2007년		2008년		2009년		합계
	과제 수	금액	과제 수	금액	과제 수	금액	과제 수	금액	
설계·생산	31	4,540	38	6,147	50	7,661	80	9,759	199
열공학	37	2,307	39	2,820	53	4,876	82	8,599	211
유체공학	32	3,810	42	4,526	51	5,429	73	8,562	198
응용역학	43	2,433	51	2,773	55	4,454	94	7,455	243
자동화·계측	68	6,223	84	7,812	107	8,759	121	10,576	380
재료가공	39	4,040	43	3,472	51	3,460	56	5,084	189
건축공학	69	5,334	82	6,962	116	10,492	125	11,446	392
토목·교통	63	3,874	83	4,200	97	5,492	119	8,617	362
합계	382	32,561	462	38,713	580	50,622	750	70,098	2,174

3.3 기초연구수준 분석

한국연구재단의 기초연구 분야분류상 재료가공분야는 재료 구조, 특성 및 시험, 용해, 주조, 응고 및 열처리, 성형, 가공 및 접합, 표면처리 및 박막증착, 생산 및 초정밀공학, MEMS, 나노가공, 원자로재료 및 핵연료 8개 분야를 포함하는데 초정밀가공분야는 재료가공분야의 핵심분야로 그 중요성을 점점 더해가고 있다.

이번 분석에서는 초정밀가공분야만을 대상으로 분석하기에는 분야 사이즈가 너무 작고 SCI데이터 양도 많지 않아 보다 넓은 범위의 재료가공분야의 데이터를 대상으로 하였고 이를 통해 초정밀가공분야의 수준을 가늠해보았다.

연구수준 분석방법은 재료가공분야의 상위 20개 SCI저널을

선정하고 동 저널에 수록된 최근 5년간의 논문 수, 영향력지수, 피인용 횟수 등 논문데이터를 활용하였다. 최근 우수저널의 지표로 활용되고 있는 WCU사업의 상위 10% 저널 목록에 기초하여 선정하고, 각 분야별로 영향력 지수 최상위의 저널을 대표 저널로 선정하는 것을 원칙으로 하였다. 재료 및 가공분야 전 분야에 걸쳐 우수 저널로 인정되는 저널을 우선 선정하였다. 채택된 20개 저널은 SCI 등재 저널은 다음과 같다.

2004년부터 2008년까지 전 세계적으로 재료가공분야의 SCI 논문발표 수는 매년 평균 9% 증가율을 보이고 있다.

동 기간 국내연구자에 의해 발표되는 논문은 매년 평균 17% 증가하여 전 세계 증가율을 크게 앞서고 있고, 전 세계 논문발표 수 대비 국내연구자에 의해 발표되는 논문의 비율은 5.5% 이고 해마다 증가추세에 있어 2008년도에는 6.1%에 이르고 있다.

재료가공분야는 논문발표 수 상위 15개국의 실적이 전 세계 실적의 82.9%를 점유하였고, 실적이 매년 평균 9.2% 증가하여 전 세계 실적 평균 증가율 9%를 약간 상회하였다. 국내연구자에 의해 발표되는 논문은 매년 평균 17% 증가하여 전 세계 증가율을 크게 앞서고 있다.

2004년~2008년 전체 논문발표 수에서 미국이 1위이나 2007년 이후 연도별 논문발표 수는 중국이 1위이다. 한국은 전체 논문발표 수에서는 5위이지만 2008년도 실적은 독일을 앞질러 4위이다. 연도별 논문발표 수 증가율은 중국이 29%로 1위이고, 인도가 27%로 2위, 한국과 대만이 17%로 3위권으로 아시아권 국가의 논문발표 실적이 급속도로 증가하고 있다. 전 통적 재료가공분야 연구의 선진국인 일본, 독일, 영국, 프랑스의 논문발표 수는 2004년~2008년 기간 내 증가율이 평균 1%로서 정체되어 있다.

2004년~2008년 한국의 전체 발표논문 수는 5위이지만 2008년 기준으로 4위를 기록하였다. 이는 국내연구자에 의해 발표되는 논문 수가 매년 평균 17% 증가하여 전 세계 증가율을 크게 앞서고 있기 때문이다. 2004년~2008년 전 세계 논문발표 수 대비 국내연구자에 의해 발표되는 논문의 비율은 5.5% 이고, 국내연구자의 우수저널 논문 발표실적은 2004년부터 2008년까지 지속적으로 증가하고 있다고 판단되지만, 세계 1~3 위권과의 격차가 매우 커서 세계 최상위권에 진입하기 위해서는 지속적인 지원이 필요하다.

국가별 총 인용횟수는 미국, 중국, 일본, 독일, 한국 순으로 총 논문발표 수 순위와 동일하다. 미국은 발표논문 수 기준 세계점유율이 18.8%임에 반해 인용횟수 점유율은 26.8%에 이르러 발표논문의 인용빈도가 매우 높다. 영국도 발표논문 수 기준 세계점유율이 2.7%임에 반해 인용횟수 점유율은 5.5%에 이르러 발표논문의 인용빈도가 매우 높다. 일본은 발표논문 수 기준 세계점유율이 17.0%임에 반해 인용횟수 점유율은 12.6%에 그쳐 발표논문의 인용빈도가 낮다.

Table 2 대표저널 목록 및 영향력지수

No.	대표저널	영향력 지수
1	ACTA MATERIALIA	3.729
2	ADVANCED FUNCTIONAL MATERIALS	6.808
3	ADVANCED MATERIALS	8.191
4	COMPOSITES SCIENCE AND TECHNOLOGY	2.533
5	INTERMETALLICS	2.034
6	INTERNATIONAL JOURNAL OF PLASTICITY	3.875
7	JOURNAL OF ALLOYS AND COMPOUNDS	1.51
8	JOURNAL OF MICROLITHOGRAPHY MICROFABRICATION AND MICROSYSTEMS	1.217
9	JOURNAL OF NUCLEAR MATERIALS	1.501
10	JOURNAL OF THE AMERICAN CERAMIC SOCIETY	2.101
11	JOURNAL OF THE MECHANICS AND PHYSICS OF SOLIDS	3.467
12	MATERIALS & DESIGN	1.107
13	MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING A-STRUCTURAL MATERIALS PROPERTIES MICROSTRUCTURE AND PROCESSING	1.806
14	MATERIALS TRANSACTIONS	0.753
15	METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A-PHYSICAL METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE	1.389
16	SCRIPTA MATERIALIA	2.887
17	SENSORS AND ACTUATORS B-CHEMICAL	3.122
18	SMART STRUCTURES AND SYSTEMS	1.137
19	SURFACE & COATINGS TECHNOLOGY	1.86
20	THIN SOLID FILMS	1.884
	평균	2.65

국가별 논문 당 인용 횟수는 네덜란드, 미국, 영국, 싱가포르, 독일, 호주의 순으로 발표논문 수 및 총 인용횟수와 상관관계가 거의 없다. 총 논문발표 수 및 총 인용횟수가 상대적으로 높았던 중국, 일본, 한국의 경우 논문 당 평균 인용횟수가 5.71(12위), 4.89(14위), 5.95(9위)로서 상위 15개국 평균치 6.90에 미치지 못하였으며 순위 면에 있어서도 양적인 순위보다 뒤쳐져 있다. 아시아권 국가 중 싱가포르를 제외한 중국, 일본, 타이완, 인도 모두 평균치 이하의 논문 당 평균 인용횟수를 나타낸다.

연도별 총 인용횟수는 2004년 88,708회에서 2008년 18,176회로 매년 감소하고 있다. 2004년 결과를 국가별로 비교하면

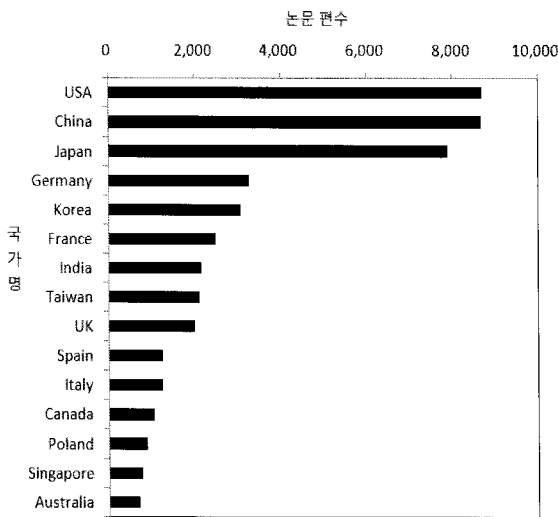


Fig. 5 국가별 논문 발표수 (상위 15개국)

Table 3 주요국 연도별 논문수 현황(상위 15개국)

	(단위 : 편수)				
	2004	2005	2006	2007	2008
USA	1,457	1,658	1,802	1,875	1,902
China	940	1,250	1,777	2,121	2,582
Japan	1,607	1,427	1,834	1,498	1,518
Germany	658	656	607	714	635
Korea	447	586	535	702	803
France	479	452	506	517	546
India	256	309	406	512	671
Taiwan	300	322	508	484	503
UK	409	398	426	360	413
Spain	224	191	292	266	265
Italy	239	199	257	255	286
Canada	164	202	213	202	263
Poland	274	145	138	186	147
Singapore	159	165	182	114	156
Australia	89	113	152	157	201
총합계	7,702	8,073	9,635	9,963	10,891

한국은 7위(4,821회)를 차지하여 2004년 총 발표논문 수 순위 6위(447편)에 비해 다소 저조하다. 2004년 국내연구자에 의해 발표된 논문의 논문 당 평균 인용횟수는 10.78회로 미국의 17.28회에 비해 매우 낮다. 2004년 중국, 독일의 논문 당 평균 인용횟수는 11.5회이고 영국의 논문 당 평균 인용횟수는 13.4회이다.

4. 결과 및 고찰

4.1 기초연구분야

초정밀가공기술은 초정밀절삭가공, 초정밀연삭가공, 초정밀

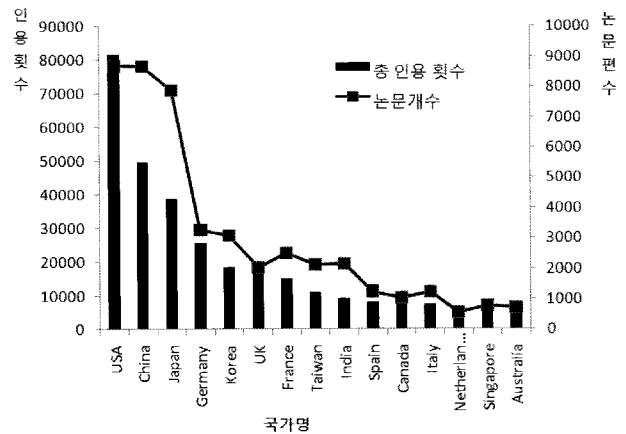


Fig. 6 주요국 인용현황 및 논문 발표 현황

Table 4 주요국 논문당 평균 인용수 (상위 15개국)

(단위 : 편수)

	총 인용횟수(A)	논문개수(B)	논문당 인용수(A/B)
Netherlands	6,119	549	11.15
USA	81,696	8,694	9.40
UK	16,775	2,006	8.36
Singapore	6,064	776	7.81
Germany	25,383	3,270	7.76
Australia	5,440	712	7.64
Canada	7,558	1,044	7.24
Spain	7,948	1,238	6.42
Korea	18,294	3,073	5.95
France	14,808	2,500	5.92
Italy	7,301	1,236	5.91
China	49,495	8,670	5.71
Taiwan	10,796	2,117	5.10
Japan	38,567	7,884	4.89
India	9,092	2,154	4.22
평균	20,356	3,062	6.90

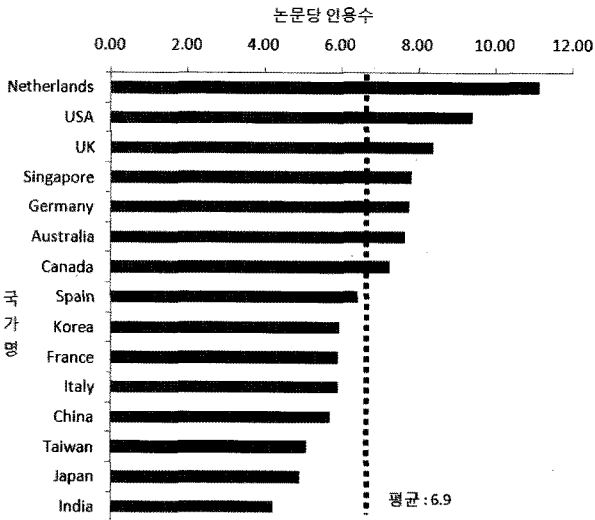


Fig. 7 주요국 논문당 평균 인용수(상위 15개국)

연마가공, 에너지빔가공 등으로 분류해 볼 수 있으며 이를 좀 더 세분류 해보면 초정밀절삭가공은 초정밀다이아몬드절삭가공, 초정밀연삭가공은 ELID연삭가공, 초정밀연마가공은 연마, 랩핑, 폴리싱, 메카노폴리싱, 에너지빔가공은 레이저빔, 전자빔, 이온빔 등 각각 다양한 세부기술분야로 나뉘어진다. 또한 이들을 융합한 새로운 융합기술분야도 만들어지고 있다. 따라서 초정밀가공기술의 중점육성을 위해서는 다양한 기술분야들의 개인연구, 학제간연구, 집단연구 주제들에 대해 과제가 지원되어 연구가 이루어져야 한다.

우리나라의 연구동향을 조사해본 결과에 따르면 초정밀다이아몬드절삭가공분야, 연마가공분야, 레이저가공분야, 이온빔가공분야, 리소그래피기술분야, 전해방전융합가공분야에서 각각 불과 1개 내지 2개의 개인연구과제가 수행되고 있을 뿐이다.

따라서 초정밀가공기술은 국가과학기술기본계획에서 중점육성분야로 지정하여 육성하고 있는데도 불구하고 각각의 제한적인 분야에 소수의 과제만 지원되어 연구가 진행되고 있어 이 분야의 기초연구 활성화가 시급히 필요한 것으로 파악되고 있다.

4.2 기초연구지원현황

2006년부터 2009년까지 지난 4년간 한국연구재단에서 지원한 기초연구비 규모를 살펴보면 지원과제 수는 연간 평균 25% 지원금액은 연간 평균 30% 정도의 증가율을 나타내고 있으나 초정밀가공분야를 포함하고 있는 재료가공분야의 지원과제 수 규모는 2006년 총 382과제 중 39건으로 10.2%의 점유율에서 2009년 총 750과제 중 56건으로 7.5%의 점유율로 오히려 하락하는 경향을 보이고 있다.

이는 과학기술기본계획(2008~2012)에서 초정밀가공분야가 주력기간산업 고도화기술로 도출된 주요 핵심기술분야 임

에도 불구하고 초정밀가공분야의 지원과제수는 매년 증가하고 있으나 증가율 측면에서는 타분야에 미치지 못하는 것을 나타내고 있다.

4.3 기초연구수준

보다 정량적이고 객관적인 기초연구수준분석을 위해 SCI저널에 수록된 논문데이터를 분석을 시도하였으며 초정밀가공분야를 포함하는 광의의 재료가공분야의 대표 SCI저널 20개를 선정하여 이들 저널에 수록된 논문의 최근 5년간(2004~2008) 데이터를 분석하였다.

분석결과 최근 5년간 전 세계에서 재료가공분야의 SCI논문 발표수는 55,738건이며 이중 한국은 3,073건 발표하여 전체 논문의 5.51%를 점하여 전세계 국가들 중에서 5위로 나타나고 있다. 또한 발표논문수의 증가율면에 있어서도 전 세계는 매년 평균 9% 증가율을 보이고 있으나 동 기간 동안 국내연구자에 의해 발표되는 논문 수는 매년 평균 17% 증가하여 전 세계 증가율을 크게 앞서고 있다.

반면에 논문의 질적 수준의 지표가 되는 논문 당 평균 피인용 횟수 측면에서는 이 기간 동안 전세계는 논문 당 평균 피인용 횟수가 6.90회로 나타났으나 한국은 5.95회에 그쳐 9위에 머무르고 있다.

이를 통해볼 때 우리나라가 논문의 양적인 측면에서는 선진국 수준에 진입하였으나 논문의 질적인 측면에서는 아직 선진국 수준과 많은 차이가 있음을 알 수 있다.

5. 결론

우리나라 초정밀가공기술의 기초연구동향을 분석해본 결과 다양한 초정밀가공관련 기술분야 중에서 일부분에서 연구가 이루어지고 있었으며 또한 2008년부터 국가중점육성기술 분야로 지정되었음에도 지원과제 수 점유율이 오히려 타 분야에 비해 작아지고 있는 등 동 분야의 기초연구활성화가 시급히 필요한 것을 확인하였다. 따라서 이번 분석결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 다양한 분야에 대한 기초연구 활성화 필요
- (2) 개인연구, 학제간 융복합연구, 연구인프라구축에 대한 지원 강화 필요
- (3) 국제학술활동 강화로 논문질적수준 제고 필요

후 기

본 연구는 교육과학기술부 기초연구 기획심사 평가비 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Etsuo M., 1992, *ultra-precision machining*, Corona Publishing, Tokyo, pp.1~5.
- (2) Taniguchi, N., 1996, *Nanotechnology*, Oxford University Press, Oxford New York Tokyo, pp. 1~2.
- (3) Oh, S. J., 2008, *Science and Technology Basic Plan of the Lee Myung Bak Administration*, Ministry of Strategy and Finance, Ministry of Education, Science and Technology, Ministry of Foreign Affairs and Trade, Ministry of Unification, Ministry of National Defense, Ministry of Public Administration and Security, Ministry of Culture, Sports and Tourism, Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries, Ministry of Knowledge, Economy, Ministry For Health, Welfare and Family Affairs, Ministry of Environment, Ministry of Labor, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Office of the Prime Minister, Defense Acquisition Program Administration, National Emergency Management Agency, Rural Development Administration, Korea Forest Service, Small and Medium Business Administration, Korean intellectual Property Office, Korea Food and Drug Administration, and Korea Meteorological Administration, pp 59~60
- (4) Suzuki H., Kawamori R., Yamamoto Y., Okino T., Hijikata Y., and Moriwaki T., 2005, "ultra-precision finishing of micro aspherical surface by ultrasonic vibration assisted polishing," *Key Engineering Materials*, Vols.291~292, PP. 349-354.