

양자점 4P 분석을 통한 기술기획의 효과성 제고 방안

허나영* · 최경선** · 고영주***

I. 연구의 배경

나노테크놀로지는 기존에 존재하는 기술에 혁신을 더하는 연구 테마이며 연구 분야의 융복합에 영향을 미치는 기술이다. 특히 기초연구에 있어 파급력이 크고 응용 분야의 폭이 넓어 더욱 기대되는 기술의 영역이라 할 수 있다.(Islam, 2009) 나노테크놀로지는 기술분야간 융복합과 변화를 제공하는 요인으로 작용할 수 있다. 또한 잠재적 응용 분야가 광범위하여 각국의 나노기술에 대한 투자가 지속적으로 증가해왔으며 이에 대한 연구의 양적, 질적 성과가 누적되었다. 1980년대 나노기술의 태동 이후 2000년대 후반에 들어 나노기술의 상용화가 더욱 근접해 왔고 기술의 구체적인 실용화가 초입기에 들어섰다. 나노기술의 거시적, 장기적 관점 하에서 나노기술 개발은 과거 연구 성과의 집약을 통해 산업화가 진행되고 있다.

특히 나노기술은 화학 분야에서 강한 융복합 경향을 보이고 있으며, 화학 연구에 있어서 중요성과 영향력을 갖는 것으로 나타났다. Isram의 연구에서 화학 분야 내에서 나노기술의 성장과 확대가 강하게 나타났으며 연구의 융복합 비중이 높게 나타났다. 이는 기반 산업으로서 화학 기술이 중요성을 갖는 점과 화학 기술 응용 분야의 다양성에서 기인한 것으로 보이며, 이로 인해 상용화의 가능성이 가장 높게 평가되는 영역으로 분석되었다.

나노기술의 연구가 고도화, 상용화됨에 따라 화학분야와 동반 성장 경향을 보이고 있으며 이는 2014년 현재 귀추가 더욱 주목되는 상황이다. 2000년대 초반 나노기술의 불륨이 확대됨에 따라 나노기술을 둘러싼 전세계적 연구 동향을 조망하고 국가별 연구성과, 국가별 기술개발 포지셔닝 전략, 핵심 연구자, 주요 이슈(Hot topics)를 도출하고자 하는 연구가 활발하게 진행되었다. 이는 나노기술이 양적, 질적 성장을 보임에 따라 나노기술 선점과 기술개발 우위를 확보하고자 하는 각국의 공통된 정세가 반영된 것이나 비교적 나노기술 성장의 초기 단계에 해당하는 데이터를 대상으로 연구가 수행되었다.

그러나 나노기술의 발전이 가속화되어 기술개발과 관련된 환경이 더욱 복잡화되는 경향을 보이고 있으며, 이러한 환경의 변화는 기존의 분석 방법론으로 분석하기 어려운 상황에 도달하였다. 이는 변화하고 있는 환경을 고려하고, 이를 설명할 수 있는 다양한 요인을 포함하는 분석 방법론의 활용을 통해 해결될 수 있다.

이에 본 연구는 분석 방법에 있어 과거 연구들이 활용한 논문과 특허 데이터 이외에, 시장성과 국내 R&D 현황 정보를 파악하기 위한 항목을 포함한 4P 분석을 채택하였다. 분석 항목으로는 특허, 논문, 시장, 국내 R&D 과제 4가지 항목을 포함하며 특허와 논문 분석을 개별적으로 수행하고, 두 가지 결과를 조합하여 연구 동향을 분석하였다. 또한 시장 정보를 통해 상용화 관점에서 새롭게 성장하고 있는 응용 분야에 대한 정보를 파악하였고, 국내에서 수행되고 있는 연구개발 과제를 탐색하여 양자점 기술개발의

* 허나영, 한국화학연구원 UST 과학기술정책전공 연구생, 010-4843-1336, nyheo@kriect.re.kr

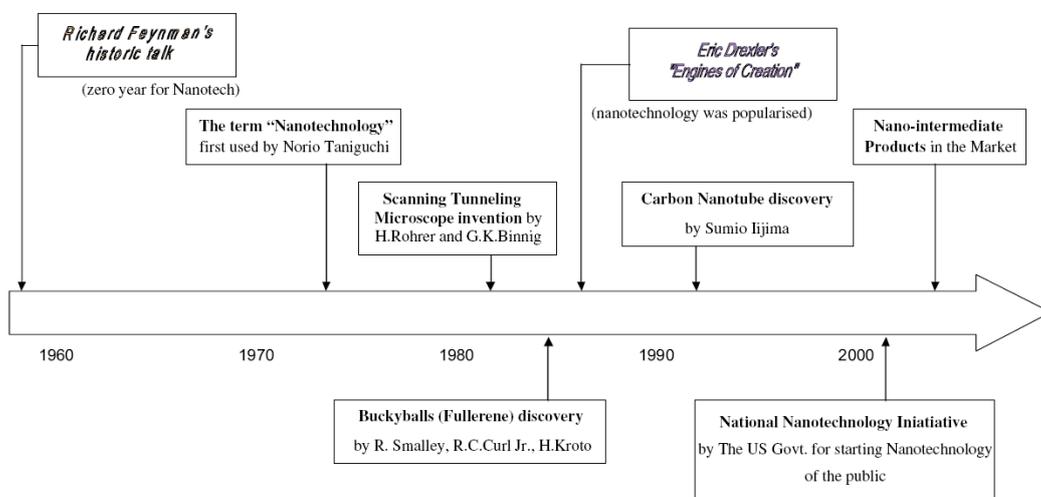
** 최경선, 한국화학연구원 화학정보센터 연구원, chanian@kriect.re.kr

*** 고영주, 한국화학연구원 미래전략본부장 / UST 과학기술정책전공 교수, yjko@kriect.re.kr

국내 연구 현황까지 반영하고자 하였다. 이를 통해 기술기획의 신규한 방법론을 제안하고, 이의 유용성을 검증하기 위한 사례 분석을 수행하였다.

더하여 나노기술 전반을 연구의 대상으로 하지 않고 나노기술 내에서 유망기술로 주목받고 있는 양자점 기술에 초점을 맞추었다. 또한 나노기술의 최신 연구 동향을 상용화 관점에서 접근하고, 어떠한 나노기술의 연구 성과가 달성되었는지 분석하고자 하였다. 상세하게는 양자점 기술의 응용분야를 선정하고 상용화 분야별로 강세를 보이는 연구 분야와 주제, 신규 연구 테마를 도출하고자 하였다.

II. 선행 연구



(그림 1) 나노기술의 발전과 주요 이슈

자료: Miyazaki 외 (2007).

1959년 나노테크놀로지의 역사가 시작되고 1980년대를 거쳐 나노기술의 개발이 가속화되었다. 특히 나노기술의 성장과는 미국의 국가 나노기술개발전략(NNI, National Nanotechnology Initiatives)의 시행에 의해 본격화된다. NNI를 통해 2011년까지 \$14B이 투자되면서 아폴로 프로젝트 이후 가장 큰 S&T 프로그램으로서 나노분야의 성장을 위한 기반을 조성하였다. (Hyun Ju Jung, 2014) NNI의 등장 시기는 나노기술에 대한 과학기술정책 분야의 관심이 증가되는 시기과도 관련성을 갖는다. NNI 전후로 나노기술이 과학기술정책의 영역에 포함되어 연구의 대상이 되기 시작하였으며, 이는 2000년대 중반 이후 본격화된다. 90년대부터 축적되어 온 나노기술의 영향력과 성장세 측정을 시도하는 연구들이 2006년 이후 다수 등장하게 되었으며, 나노기술의 성장을 시기별로 나누고 도출된 연구 성과에 접근하려는 연구가 증가하게 된다.

이준웅(2005)은 양자점 기술이 나노기술 내에서 차지하는 비중이 증가함에 따라 양자점 관련 연구 성과를 특히 관점에서 분석하였다. 미국과 일본의 특허가 주를 이루고 1990년대 벤처기업과 대학의 연구성과가 두드러짐을 밝혔다.

Santo(2006)는 나노기술 예측을 위해 텍스트 마이닝을 이용하여 유망 분야를 도출하였다. 논문 데이터를 활용하여 나노기술 주요 연구 국가의 연구 성과를 비교하고 국가별 연구 동향을 제시하였다. 이 과정에

서 중국과 한국의 연구성과 증가율이 가장 급격히 상승하고 있는 것으로 나타났으며 나노기술내 양자점 연구의 비중이 높은 것으로 나타났다.

Alencar(2007)는 나노기술의 주요 R&D 추진 국가별 기술개발 전략과 경쟁 구도, 기술개발 참여 주체를 특허 데이터를 활용하여 도출하였다. 1975-2005년에 해당하는 기간 동안의 특허 정보를 활용하였고 기술 수명 주기 상에서 가장 높은 주기에 해당하는 나노 복합체 연구가 미국을 중심으로 이루어지고 있음을 밝혔다. 아시아의 기술개발은 한국과 일본 기업의 영향이며, 2002년 이후 중국과 타이완 역시 연구개발을 추격하는 것으로 나타났다. 또한 기술개발 협력에 있어 미국은 기업간 협력이 강하게 나타났으며 대학과 기업간 협력도 기업간 협력 다음으로 빈번하게 나타나는 협력의 형태임을 제시하였다.

Miyazaki(2007)는 나노기술과 관련된 대학의 성과를 대상으로 텍스트 마이닝(Automating minig) 기법을 활용하여 기술개발 주요 국가, 참여 주체, 주요 연구 그룹을 도출하였다. 연구의 결과로 아시아 지역의 나노기술 강세와 대학의 연구 성과가 양적으로 활발함을 제시하였다. 특히 민간 영역에서 일본의 기업과 한국의 삼성이 나노기술 성장을 견인하는 역할을 할 것이라 전망하였다. 나노테크놀로지 분야에서 지식을 생산하는 주체를 대학으로 보았다. 또한 민간의 영역에서 나노테크놀로지 분야를 성장시키는 잠재력이 예상된다고 보았는데 NEC, Samsung, Sony, Hitachi 등이 전자 산업 분야 기업이 나노테크놀로지를 이용하여 향후 두각을 드러낼 것으로 보았다.

Isram(2009)은 나노기술 개발을 물리, 화학, 바이오와 같은 기초 연구의 융복합이 촉진되는 중요 요인임을 밝혔다. 나노기술은 기초 연구에 있어서 기술적 변화를 야기하는 원천이며 이를 유럽과 일본의 사례를 통해 입증하고자 하였다. 또한 나노기술에 있어서 대학의 연구성과가 중요한 축으로 자리잡고 있음을 밝혔다.

바이오 분야와 나노 기술의 접목이 중요한 화두로 떠오름에 따라 Pei and Porter(2011)는 나노생명의공학(Nanobiomedical science) 분야에서 연구성과를 도출하고 있는 핵심 연구 그룹과 연구자(Leading scientists)를 Web of science(WOS) 논문 데이터를 바탕으로 제시하였다. 미국, EU, 일본의 연구자가 나노생명의공학 분야에서 두각을 나타냈고 약리학과 약학(Pharmacology&Pharmacy) 분야가 논문 건수와 피인용 측면에서 가장 높은 비중을 차지했다. 주요 연구자들의 연구 주제를 노출 빈도 수에 따라 상위 순위에 해당하는 키워드에 따라 도출하였다. 분석 결과 암(유방암, 전립선암, 폐암, 종양, 악성 뇌교종), 심장질환, 뇌질환, 난치성, 조기 진단, 약물 전달 등의 단어의 빈도수가 높았다.

앞서 언급한 선행연구에서 공통적으로 제시되고 있는 내용은 NNI 이후 나노기술 개발이 가속화되어 연구 성과의 질적, 양적 성장이 지속되고 있는 점, 이로 인해 2000년대 후반에 접어들면서 나노기술의 적용처와 응용분야가 명시되고 있다는 점이다. 이는 1980년대부터 축적되어 온 나노기술의 연구 성과가 논문과 특허에서 드러나고, 연구 결과가 최근 들어 상용화 수준에 근접해 가고 있는 것에 대한 반증이라 할 수 있다. 또한 나노연구에 있어서 양자점 연구가 나노기술 연구에 있어서 주요한 키워드로 자리잡고 있으며 아시아에서 관련 연구의 잠재력이 기대된다는 점이다.

특히 주목 할만한 점은 기존의 나노기술 정책 연구가 일부 최근 연구에서 특허를 대상으로 기술개발 동향 분석을 시도하였는데, 나노입자, 나노구조와 같이 분야 내에서 널리 사용되는 용어를 제외하면 양자점(Quantum dot) 연구의 비중이 높게 제시되고 있다는 점이다.(Santo, 2006) 양자점은 나노기술 분야의 주요 연구테마로 주목되고 있으며 이미 상당수에 해당하는 연구 성과가 축적되었으나 나노기술의 범주 내에서만 다뤄질 뿐 독립적 연구의 대상이 되지 못하였다. 양자점 기술은 나노기술 중에서도 기술의 고유한 특성으로 인해 타 기술과 차별성을 지니기 때문에 독립적으로 개발 수준에 대한 분석이 요구된다.

<표 1> 선행연구 주요 내용

연구자	분석 방법	주요 내용
이준웅 (2005)	특허 데이터 활용	미국, 일본의 대학과 기업이 주로 특허 출원 양자점 분야 원천 기술은 대학과 벤처기업에서 1990년대 초반 기술개발을 수행. 2000년도에 대기업이 특허권을 보유해 나감
Santo (2006)	논문 데이터 활용 텍스트 마이닝	나노기술 개발 주요국가별 연구 동향 제시 및 유망 분야 도출 한국과 중국의 연구 성과가 증가하는 추세임을 강조 핵심 연구분야: Nanocrystal, Nanoparticle, Quantum-dot 등
Alencar (2007)	특허 데이터 활용	나노기술의 기술수명주기가 국가별로 상이해지고 있는 추세임을 지적 미국을 중심으로 나노복합체 연구가 수행됨 기술개발 협력 형태는 기업간 협력, 대학과 기업간 협력 순
Miyazaki (2007)	논문 데이터 활용 텍스트 마이닝	나노기술 개발 주요국가, 참여 주체, 주요 연구 그룹을 도출 아시아의 나노기술 강세, 대학의 연구 성과가 양적으로 성장함 아시아 내의 기업과 대학은 서로 연결된 히든 링크가 존재 유럽과 미국은 상호 협력에 기반하여 연구 성과 도출
Pei (2011)	논문 데이터 활용	약리학과 약학 분야가 두각, 미국, 유럽, 일본에서 강세 연구형태는 협력적 연구가 아닌 개별 연구 형태가 다수 핵심 연구 그룹이 연구 주제를 파악, 연구의 핵심 키워드 도출

또한 앞선 연구의 대상이 논문 데이터와 특허 데이터만을 중점적으로 활용하였다는 점이다. 나노기술 연구에 있어서 핵심 연구 내용과 연구 그룹 도출에 있어 연구 시기가 빨랐던 점을 고려하면 시장 데이터가 형성되기 이전의 연구이기 때문에 필연적인 한계점이라 할 수 있다. 그러나 2014년 현재 나노기술과 그 하부 기술의 개발이 가속화됨에 따라 증가하고 있는 복잡성, 융합성을 반영한 연구로 보기 어렵다고 할 수 있다. 특히 시장과 기술, 사회속의 기술이 고려되지 않아 단편적 분석에 그치고 있으며 특허, 논문 정보의 연계도 유기적으로 분석되지 않아, 기술을 둘러싼 실제 환경을 반영하였다고 보기 어렵다는 한계가 존재한다.

III. 연구 목적

본 연구의 대상은 NNI 이후 나노기술이 기술개발의 변곡점을 맞이하고 있는 상황과 2004-2014년 최근 10년간의 연구 동향 파악이 필요함에 근거하여 양자점 기술을 선정하였다. 그러나 본 연구는 4P 분석의 적용 사례로 양자점 분야 동향 분석을 수행하였으며, 궁극적으로는 기술기획 방법론으로서 4P 분석의 유의미성을 밝히고자 한다. 또한 4가지 정보원을 활용하여 양자점 분야 동향 분석을 수행하기에 앞서, 구체적인 분석의 관점은 선행연구에서 제시된 연구 질의를 기반으로 하였다. Alencar(2007)는 특허의 양적 증가에 대한 연구를 넘어 질적 수준의 성장을 연구의 대상으로 할 필요가 있음을 강조하였고 Pei(2011)는 나노테크놀로지 전반이 아닌 세부 분야별 분석이 필요함을 지적하였다. 특히 Bozeman(2007)은 나노기술의 기술개발 초기단계 이니셔티브가 중요하고 이 시기에 기술개발에 참여하는 스타트업 기업(Start-up firm)의 역할이 기술 혁신에 중요한 영향을 미침을 시사하였다.

나노기술 기술개발의 진행상황과 연구 동향에 대한 2000년대의 연구는 논문 데이터를 중점적으로 활용

하였으며, 나노기술 개발이 초기 단계에 머물고 있다는 내용에 동의하는 것으로 보인다. 그러나 이러한 연구는 1990년대의 연구성과를 대상으로 하여 동시간대의 연구 성과를 완전히 반영하였다고 보기 어렵고 나노기술의 상용화 국면을 반영하지 못하였다. 이후 특허 정보를 중심으로 2000년대 후반의 연구 성과를 연구의 대상으로 삼은 연구에서 나노기술의 응용 분야와 급격한 성장을 보이는 연구 분야를 구체적으로 도출하였다.

또한 나노기술 관점에서 전체적인 기술개발 전망을 도출하는 것이 아닌, 나노기술 분야내 유망한 분야로 예측되어 왔던 양자점 분야만에 특화된 분석을 수행하고자 한다. 양자점은 고유의 특성으로 인해 다양한 분야로의 응용이 기대되는 분야이기 때문에 연구의 대상으로서 가치를 지닌다. 양자점 기술개발의 응용분야는 선행연구를 통해 도출한 생명공학, 전자공학 이외에 양자점 분야 전문가 의견을 수렴하여 응용 분야를 추가하고 총 6개 분야를 선정하였다. 선정된 6개 분야는 양자점 기술의 응용분야로서 성장 가능성이 크고 이로 인해 동향 분석의 필요성이 존재하는 주요 연구 분야이다. 선행연구에서 중요하게 지적되었던 2개 분야를 보다 세분화하여 어플리케이션 관점에서 분류하였으며, 바이오 분야 응용을 위해 필수적으로 연구개발이 진행되어야 하는 광검출소자 분야를 추가하였다. 또한 양자점 응용이 폭넓게 진행되고 있는 태양전지 분야를 포함하였다.

- | | |
|-------------------------------|---------|
| • Bio-imaging / Drug Delivery | • QLED |
| • Bio-Sensor | • 태양전지 |
| • LCD BLU | • 광검출소자 |

IV. 연구 방법

연구개발 기획을 수행하기 위한 정량적, 정성적 방법이 지금까지 다양하게 시도되어 왔다. 선진연구자의 리더십이나 전문가를 활용한 의견 수렴의 방법이 적용되어 왔고 이러한 정성적 연구기획 방법론을 보완하기 위해 정량적 틀이 사용되어 왔다. 특히 특허정보에 기반하여 정량적인 데이터에 기반한 연구기획을 수행하고자 하였으며, 이는 최근 연구기획 분야에서 강력한 지지를 받았다. 전문가 직관 중심의 기획은 기획결과와 과정상의 객관성 유지, 신뢰성 확보 측면에서 문제점이 있다고 평가되어 왔고, 비체계적이며 단편적인 기획이라는 지적을 받아왔기 때문이다. (현병환, 2010)

기존의 연구개발 전략 수립 방법론은 특허정보를 기반으로 하는 경우가 다수이나, 특허만으로는 설명되기 어려운 트렌드와 흐름이 존재한다. 특허 이외에 타 정보원을 활용하는 경우도 있으나, 논문이나 시장 및 산업 정보 등의 개별 정보 분석만으로는 과학기술 전략 수립을 위한 방법론으로서 역시 한계를 지닌다. 이와 관련하여 특허, 논문과 같은 연구 결과물을 활용해 연구 성과를 객관적으로 측정할 수 있는지에 대한 의문이 제기되어 왔다. Pudovkin(2004)은 논문 데이터를 통해 특정 학문 분야의 동향을 분석하고자 할 때, 논문 성과를 나타내는 지표의 한계점을 지적하였다. 피인용횟수와 저널영향지수를 예로 들 경우 이들 지표는 학분 분야별 질적 성과를 드러내기 어렵고 논문 데이터만으로 확인하기 어려운 정보가 있다는 점을 확인하였다. 임부루(2011)는 기술적 성과를 제고하기 위해 특허기술동향 조사를 비롯한 선행조사가 보다 체계적으로 이루어져야 함을 주장하였고, 이는 연구개발 초기과정을 넘어 전단계로 확대되어야 함을

피력하였다.

국가 R&D 전략 수립에 있어서 정성적, 정량적 방법론 중에서 단일한 방법론만을 사용하는 것은 각각의 한계점을 수반하게 된다. 이러한 상황 속에서 4P 분석은 전문가 의견이나 단일 정보원에 의해 연구기획을 수행하지 않고 특허, 논문, 시장 및 산업, 국가 R&D 과제 정보를 기반으로 연구개발 전략을 수립한다는 점에서 차별성을 지닌다. 다양한 정보원간의 유기적인 결합을 통해 보다 체계적인 전략 수립이 가능해지며, 이러한 수단을 통해 기존 기획의 한계를 보완할 수 있게 된다. 특허, 논문, 시장, 과제 분석을 통해 누락된 정보 없이 현존하는 정보를 활용한 연구개발 전략 수립이 가능하고, 이는 향후 연구개발 기획을 위한 선도적 방법론으로 잠재력이 기대되는 수단이라 할 수 있다.

4P 분석은 4가지 정보원을 결합하여 향후 추진해야 할 과제로서 경쟁력 있는 연구 분야를 탐색하여 발굴한다는 점에서 차별성을 갖는다. 이를 통해 연구기획 단계에서부터 R&D 성공 확률을 높일 수 있으며 연구 생산성을 확보하는데 기여하는 연구 기획이 가능해진다. 특허분석을 수행함으로써 경쟁력을 갖추고 잠재적 가치를 보유한 지적 재산권에 대한 내용을 파악하고 이러한 동향이 어디에 집중되고 선도적인 연구가 어디에서 진행되고 있는지 파악할 수 있다. 논문분석은 특허분석과 연장선상에서 유사하게 다뤄질 수 있다. 비교적 특허보다 최신 연구 동향을 파악할 수 있으며, 논문 정보가 특허의 과학적 뒷받침으로 작용할 수 있다. 또한 분야 내에서 파급력 있는 이슈와 새롭게 다루고 있는 이슈를 파악할 수 있어 특허정보에서 확인할 수 없는 내용을 탐색하는 것이 가능하다. 시장분석은 기술에 대한 시장성 분석과 경쟁력 분석을 의미한다. 시장성 분석이란 개발 가치가 있는지에 대한 것이고 경쟁력 분석이란 기존의 경쟁자들과 비교하여 어떤 장단점을 가지고 있는지에 대한 분석으로 이와 같은 분석과정을 통해 연구개발의 기회를 평가하고 구체화하는 것을 의미한다. (현병환, 2010) 국가 연구개발 사업 및 과제 정보는 유사한 연구를 수행하고 있는 연구기관이 존재하는지 확인하고, 기존 연구와 차별화된 연구로의 방향 설정이 가능해진다. 국가 연구개발 사업과 관련된 정보는 기존의 특허, 논문, 시장 정보를 대상으로 하던 ‘신연구개발기획기법’에 대한 (현병환, 2006) 보완적 항목으로, 국내의 연구개발의 방향성, 정책 변동을 직간접적으로 반영한다. 이에 대한 분석을 통해 특허, 논문, 시장 정보와 상이하게 현재 진행형으로 추진되고 있는 국내의 연구개발 동향을 파악할 수 있다.

<표 1> ‘4P 분석’의 분석 목적 및 내용

항목	분석 목적	분석 내용
특허 정보	기술의 성숙도와 핵심기술 파악 신규진입자 파악	연도별 특허 출원 추세 주요 특허 출원인 신규 출원인과 출원 특허의 내용
논문 정보	최신 연구 동향 파악	연구 분야별 성장세와 성장 분야 최신 연구 키워드
시장 및 산업 정보	기업, 산업 환경분석 거시적 환경분석	시장의 성장 전망 기술개발 관련 기업과 제품 정보 환경규제 및 관련 법규
국가 연구개발 사업과 과제 정보	동종분야 국가 연구개발 사업과 과제 동향	국내 연구개발 영역과 성장세 연구개발 주체

특허 분석을 위해서 특허와 논문 DB를 포함하는 Thomson Innovation 데이터 베이스를 활용하였다. 특허 분석은 기본 특허 정보 이외에 Derwent World Patents Index에서 제공하는 항목을 추가로 분석에

활용하였다. 특허 데이터는 나노기술 분야 주요 출원국인 미국, EU, 중국, 일본, 한국을 대상국가로 하였으며 검색 기간은 2004-2014년의 특허를 포함하였다. DWPI 제공 필드에서 기본적인 제공 정보 이외에 'Use', 'Novelty'를 중점적으로 활용하여 기술개발의 응용분야와 신규성 측면에서의 기술성을 검토하고자 하였다. 논문 정보 역시 특허와 동일한 검색 조건하에서 데이터를 수집하였으며 특허 데이터 3,570건, 논문 데이터 8,046건을 대상으로 하였다. 특허와 논문 정보 분석을 위해 Thomson社에서 제공하는 'ThemeScope'의 텍스트 마이닝, 자동화 분석 기능을 활용하였다. 시장정보는 응용분야별 시장 전망, 기업 정보를 활용하였으며 국내 R&D 수행 정보는 NTIS에서 제공하는 2004-2014년 기간동안 국내 358개 기관의 사업을 대상으로 하였다. 최종 연구개발 사업 분석 대상은 다차년도 과제의 중복을 제외하여 155건으로 압축하였다.

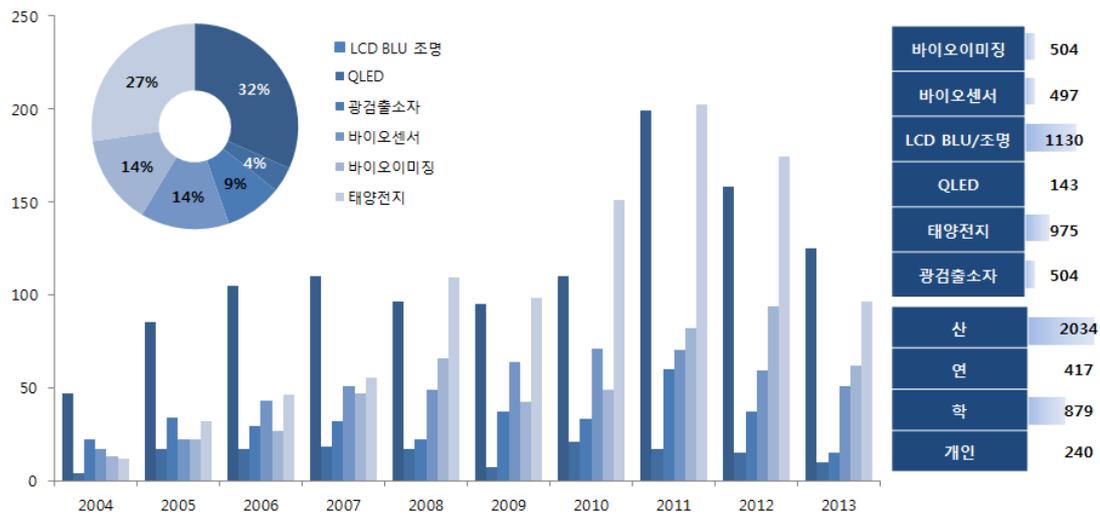
V. 양자점 기술의 우수성과 사업화 가능성

양자점 연구는 나노 연구 관점에서 벌크 재료를 위한 보완적 응용뿐만 아니라 고유의 독특한 특성으로 인해 연구가 활성화되고 있는 분야이다. 새롭게 만들어진 나노물질은 기존의 벌크 및 박막 물질에 비해 광학적 성질, 강도, 탄성, 열 및 전기전도도 등에서 개선된 특성을 나타내며 소자의 소형화에도 기여할 수 있다. 0차원 반도체 결정인 양자점은 모든 방향에 대한 양자구속 효과(quantum confinement effect)에 의해 엑시톤(exciton)들이 양자점에 공간적으로 제한되어 벌크 형태에서 보이는 물질의 고유한 특성과 비교해 전기적, 광학적 특성이 크게 변하게 된다. (홍현선, 2012) 이러한 특성으로 인해 양자점은 높은 기술적 잠재력과 응용 분야의 다양성이 기대되는 연구개발 분야라 할 수 있다. 양자점은 기존의 나노 크기 구조에서 발견되지 않았던 효과를 보이며, 발광 파장을 조절할 수 있고 발광이 안정하다. 더불어 높은 양자 효율을 보이며 넓은 파장 흡수가 가능하다. 또한 양자점을 용액에 분산시켜 저비용의 프린트 기술이나 코팅 기술에 접목시키는 것이 가능하기 때문에 산업적 활용 가능성이 높다. 이러한 특성으로 인해 양자점의 용도로는 생체 이미징, 디스플레이, 조명, 태양전지 분야 등으로 응용의 폭이 넓고, 이 외에도 더욱 다양한 용도와 목적으로 활발하게 연구되고 있다. 최근 일반적 양자점에 활용되는 카드뮴의 독성 문제 해결을 위한 연구가 진행중이며, 이를 통해 양자점 기술의 한계를 극복하고 응용처를 다양화하기 위한 시도가 지속되고 있다.

VI. 분석 결과

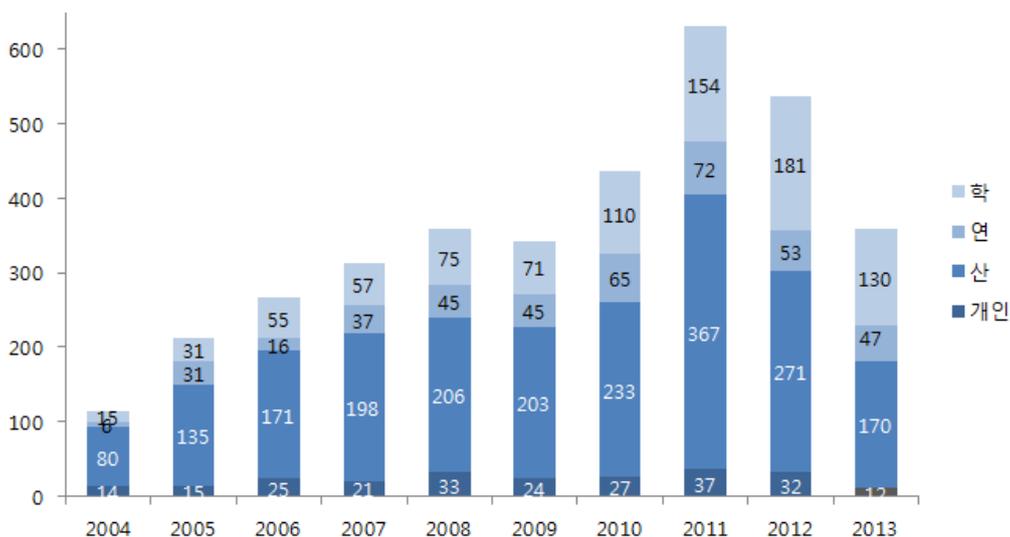
1. 응용분야별 양자점 특허 증가세

양자점 분야의 특허출원은 LCD 백라이트와 조명 분야에서 가장 활발한 출원 동향을 보이고 있다. 2011년 최고치를 달성하였으며, QLED 분야 특허와 함께 디스플레이 분야 특허가 가장 높은 비중을 차지한다. 태양전지 분야 역시 2011년 특허 출원 최고치를 달성하였으며 지속적인 특허 출원이 이어지고 있다.



(그림 2) 응용분야별 양자점 특허 출원 추이

나노기술 분야의 정착(Institutionalization)이 2000년대 이후 이루어지고 있다는데 연구자들의 의견이 모아지면서(Munari, 2014), 이와 동시에 양자점 기술내 산업체 참여 비중이 증가세를 보이고 있다. 특허분석 대상기간인 2004년부터 2011년에 이르기까지 산업체의 특허 건수가 지속적으로 증가하고 있다. 양자점 기술개발 주요 기업을 중심으로 연도별 동향을 확인한 결과, LG, Honeywell, Merck, Dai Nippon Printing과 같이 1990년대부터 나노기술의 핵심 기업으로 평가받던 글로벌 대기업들이 특허 비중이 높게 나타났다. 또한 상대적인 특허 건수는 적지만 2004년 이후 양자점 분야 특허를 지속적으로 확보하고 있는 Nanosys, Nanoco, QD Vision, QD Solution과 같은 Start up 기업이 존재한다.

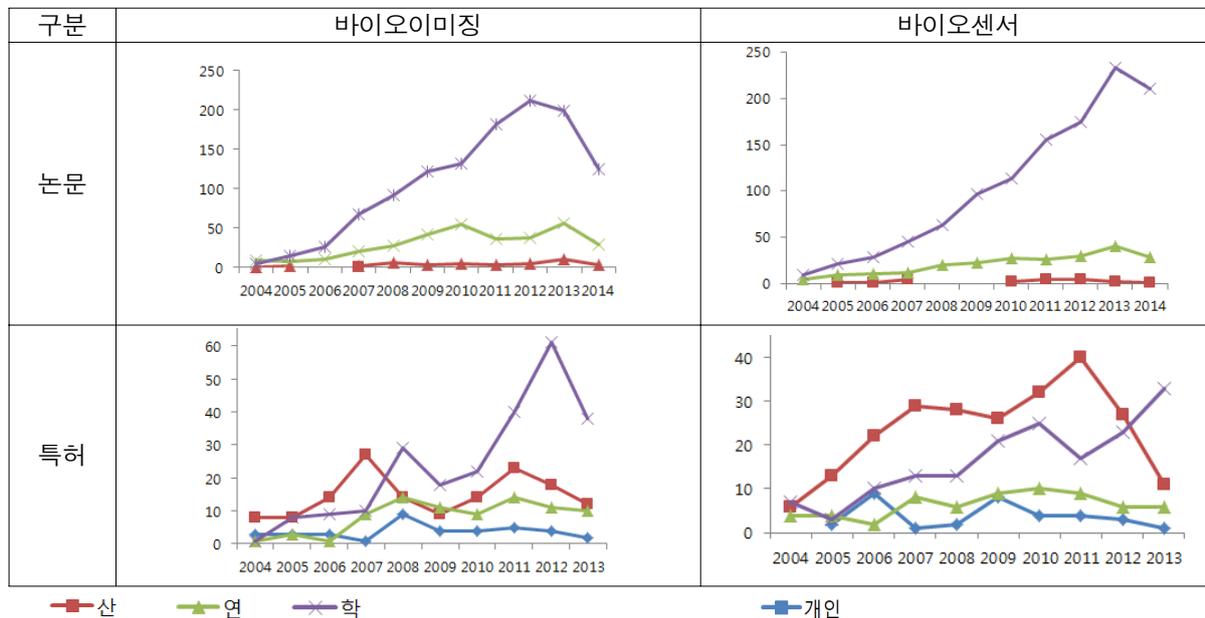


(그림 3) 양자점 특허 출원 동향 - 산학연 비중

또한 바이오이미징, 바이오센서 분야는 대학의 특허 비중이 높게 나타나는데, 특히 바이오이미징 분야

의 경우 기업의 특허 출원 비중보다 대학의 특허 출원 비중이 높게 나타나, 대학의 연구가 활발함을 확인하였다. 이는 대학에서 논문과 특허 성과를 동시에 도출하고 있는 것을 의미한다.

<표 2> 바이오분야 논문·특허 성과 비교



2. 응용분야별 특허출원 기업과 다분야 출원

산업체의 특허 비중이 증가하는 것은 기술의 제품화와 사업화가 빠르게 추진되고 있음을 의미한다고 볼 수 있다. 이를 확인하기 위해 양자점 관련 특허를 보유한 기업 정보를 상세히 확인하고 어떠한 분야에서 특허를 출원하고 있는지 확인하였다.

양자점 분야 특허를 출원하고 있는 주체는 삼성, LG, MERCK, DOW 등으로 디스플레이와 태양전지 분야 기업이 주를 이루고 있다. 삼성과 LG는 디스플레이 분야 점유율과 경쟁력을 바탕으로 양자점 활용에 대한 특허를 보유해 나가고 있으며 벤처기업 역시 특허권 확보를 위한 노력을 기하고 있다. 디스플레이와 태양전지 분야 이외에 광검출소자 관련 특허의 출원이 증가 추세를 보이고 있으며 일본 후지쯔(FUJITSU)가 광검출소자 분야에서 압도적인 특허권을 확보한 상황이다. 이러한 상황을 바탕으로 양자점 기술개발에 참여하고 있는 기업을 Incumbents와 Start-up 기업으로 구분할 수 있다.

2개 이상의 응용분야에 특허를 출원하고 있는 Incumbents 기업은 총 14개 기업이다. Samsung의 경우 6개의 양자점 응용 전분야에서 특허권을 확보하고 있으며, Eastman Kodak의 경우 바이오센서 분야와 디스플레이 분야에 특허를 출원하고 있다. Eastman Kodak과 같이 바이오 분야와 전자 분야에서 동시에 특허권을 확보해 나가는 기업으로는 BOE Technology, CANON, FIO, FUJITSU, KONINK PHILIPS, MERCK, SEIKO EPSON이 포함된다. 특히 BOE Technology와 FIO의 경우 바이오이미징 분야와 관련 장치 개발을 동시에 추진하고 있다. 이는 양자점의 바이오 분야 적용을 위해 장치 개발이 반드시 수반되어야 한다는 점을 보여주고 있는 사례로 바이오이미징 분야와 광검출소자 분야에서 동시에 특허권을 확보하려고 하는 움직임으로 볼 수 있다. 또한 디스플레이 분야와 태양전지 분야는 Samsung, Eastman Kodak, LG, Dai Nippon Printing에서 공통적으로 타겟팅하고 있는 분야로 나타났다. 광검출소자 분야의 경우 바

이오분야 특허권을 확보하려는 기업의 출원 비중이 높게 나타났으나, SORAA의 경우 바이오분야 특허 출원 없이 광검출소자 특허를 출원하였다.

<표 3> 주요 출원기업의 역점기술 및 공백 분야 - Incumbents

기업명	바이오 이미징/DDS	바이오센서	LCD BLU/조명	QLED	태양 전지	광검출소자
SAMSUNG	●	●	●	●	●	●
EASTMAN KODAK		●	●	●		
LG			●	●	●	
BOE Technology	●			●		
CANON		●	●			
Dai Nippon Printing				●	●	
FIO	●					●
FUJITSU		●				●
GE			●			●
KONINK PHILIPS		●	●			
MERCK		●			●	
SEIKO EPSON		●	●			
SORAA					●	●
TOSHIBA			●	●		

Start-up 기업은 기업의 단일한 주력 분야를 타겟팅하여 특허권을 확보하는 것으로 나타났다. 양자점 분야 신규 진입자에 속하는 이들 기업은 Incumbents에 비해 좁은 기술개발 영역에 참여하여 특허 성과를 도출하고 있다. 그러나 Nanosys와 Nanosquare의 경우 폭넓은 분야에서 기술개발을 진행, 특허권을 확보해 나가고 있는 것으로 나타났다. 이는 Incumbents 기업과 유사한 형태를 보이고 있는 것이며, Start up 기업도 다양한 분야에서 특허를 확보하고자 하는 예외적 사례이다.

또한 Start-up 기업의 특허가 디스플레이 분야에 집중되는 현상이 나타났다. 이 결과 Incumbents와 Start-up 기업의 경쟁이 디스플레이 분야에서 심화될 것으로 보이며, 양자점 응용 분야 중에서 가장 빠른 상용화가 기대되는 부분도 디스플레이 분야라 할 수 있다.

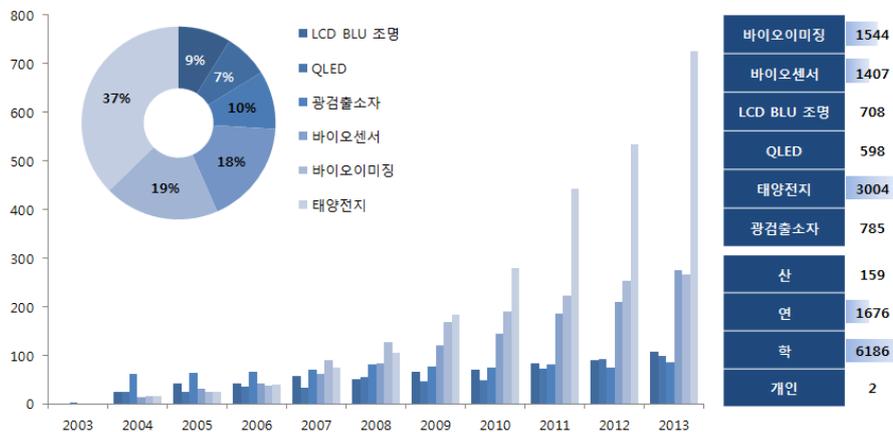
디스플레이 분야의 행보와 대조적으로, 바이오이미징, 약물전달, 바이오센서 분야의 특허 출원은 디스플레이 분야보다 상대적으로 기업 참여도가 낮은 것으로 나타났다. 전체 특허를 대상으로 작성한 특허 지형도에서 기업이 차지하는 위치는 디스플레이, 태양전지, 광검출소자의 영역에 해당하는 곳으로 나타났다. 일부 바이오 분야에서 특허 출원 동향이 나타나나, 다수의 특허가 밀집되는 현상은 나타나지 않았다.

<표 4> 주요 출원기업의 역점기술 및 공백 분야 - Start-up firm

기업명	바이오 이미징/DDS	바이오센서	LCD BLU/조명	QLED	태양 전지	광검출소자
NANO CHEM-TECH					●	
NANOCHIPS		●				
NANOCO					●	
Nanoprobes	●					
Nanosensing Technologies					●	
NANOSQUARE		●	●		●	
Nanosys			●		●	●
QD LASER		●				
QD solution			●	●		
QD VISION	●		●			
QUANTUM DYNAMICS		●				
QuNano					●	●

3. 응용분야별 양자점 논문 증가세

양자점 기술의 응용분야별 논문 발표 추이는 2009년 이후 지속적인 증가세를 보이고 있으며 태양전지 분야(37%)에서 급격한 증가를 나타내고 있다. 바이오이미징과 바이오센서 분야의 논문 게재 건수도 증가하고 있으며, 두 분야를 합산할 경우 전체 건수 중에서 37%를 차지하여 태양전지 분야와 비견할 만큼 높은 비중을 차지한다.



(그림 4) 응용분야별 양자점 논문 발표 추이

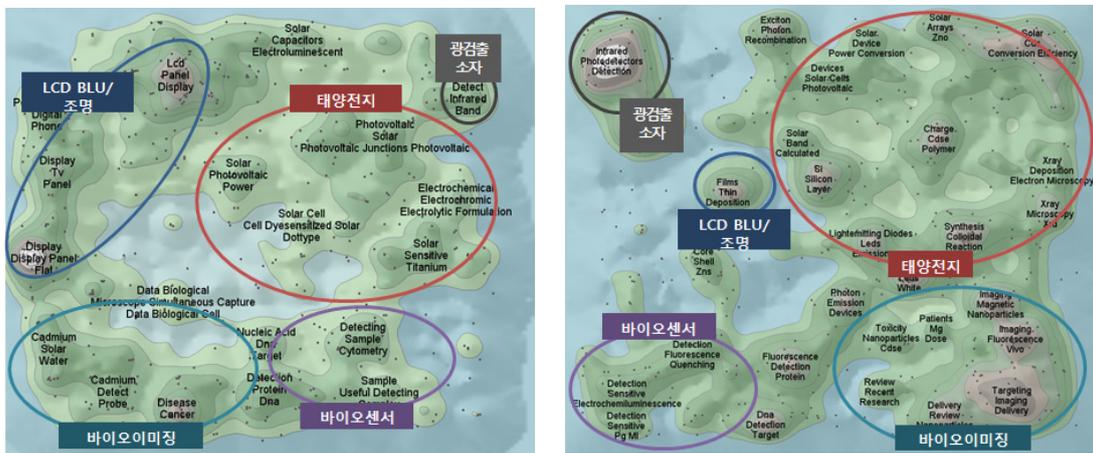
논문 발표 상황과 특허 출원 상황을 비교했을 때, 논문은 태양전지, 바이오분야에서 강세를 보이고 있으며 특허는 디스플레이, 태양전지 분야에서 성장이 나타나고 있다. 디스플레이와 태양전지 분야를 이어 바이오이미징, 바이오센서, 광검출소자 분야의 특허 역시 지속적 성장세를 보이고 있다. 태양전지 분야의 경우 논문과 특허 모두 활발한 연구 성과가 도출되고 있으며 디스플레이 분야는 논문보다 특허에서 강세를 보이고 있다. 바이오 분야의 경우 바이오이미징, 바이오센서 관련 논문 성과가 다수 발표되고 있으며, 특허에서도 유사한 양상이 나타나고 있다. 다만 광검출소자의 경우 특허에서 증가세를 나타내고 있으며

논문의 발표 비중은 낮은 것으로 나타났다.

4. 양자점 연구 주요 기술군과 키워드

논문 데이터를 바탕으로 수행한 텍스트 마이닝을 수행한 결과 태양전지, 바이오 분야 키워드의 출현 빈도가 높게 나타났다. LCD 백라이트와 조명, 광검출소자 분야의 키워드도 클러스터를 소규모로 구성하였으며, 독립적인 기술군을 형성하였다. 다만 QLED 분야의 연구는 키워드 클러스터가 구성되지 않아, 독립적인 기술군을 형성하기에는 논문 성과의 비중이 낮은 상황이다. 특히 광검출소자 기술군의 등장은 특히 데이터 결과와도 일치하는 내용으로, 광검출소자 분야 연구가 활성화되고 있다고 볼 수 있다.

특히 데이터를 대상으로 텍스트 마이닝을 수행한 결과 디스플레이, 태양전지, 바이오분야의 키워드 출현 빈도가 높게 나타났다. 논문 데이터 분석 결과와 달리 디스플레이 분야의 특히 비중이 높게 나타났고, 마찬가지로 광검출소자 기술이 독립적인 클러스터를 구성하였다.



(그림 5) 양자점 연구 주요 기술군과 키워드 (좌측: 특허, 우측: 논문)

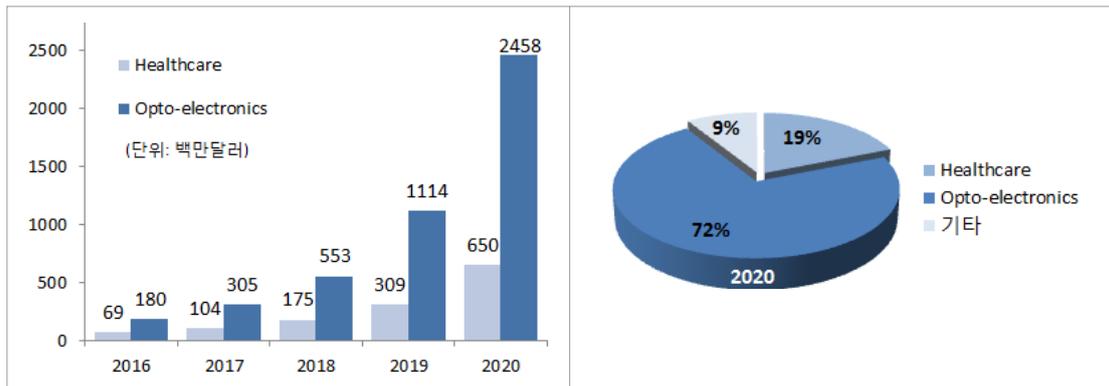
특허 분석과 논문 분석의 결과가 유사성을 갖는 것은 학문적 수준의 양자점 연구가 빠르게 상용화되고 있음을 시사한다. 특허와 논문 분석 결과에서 유사한 키워드와 기술군이 등장하고 있으며 다양한 분야에서 양자점을 활용한 기술이 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 바이오 분야의 특허는 대학의 비중이 높는데 이는 아직 기업의 바이오 분야 참여가 저조하고, 양자점의 바이오 분야 적용과 상용화가 미미한 상황임을 나타낸다.

5. 주요 응용분야별 시장 전망

양자점 기술을 적용한 응용분야 중에서 가장 시장성있게 평가되는 분야는 디스플레이 분야(Opto-electronics)이다. 기존 디스플레이 생산 인프라와 기술을 활용하여 양자점 디스플레이 상용화를 앞당길 수 있을 것으로 보인다. 전체 양자점 특허 중에서도 디스플레이 분야가 높은 비중을 차지하며 주요 기업들의 가장 치열한 경쟁을 벌이고 있는 분야라 할 수 있다. Markets and Markets(2014)에 의하면 양자점 디스플레이 분야 시장은 2020년 24억달러 규모까지 성장하여 연평균 성장률 75%를 달성할 것으로 전망된다. 또한 조명 분야 역시 성장세가 기대되는 분야로, 디스플레이 분야와 유사한 수준의 성장세를 보이며 스마트 조명,

고효율 조명에 대한 수요를 중심으로 시장이 확대될 것으로 예측된다.

디스플레이 분야와 더불어 시장 성장세를 보이는 분야는 바이오 분야(Healthcare)로 나타났다. 바이오 분야는 2020년까지 6억달러 규모까지 확대될 것이며 연평균 성장률은 52%로 예측되었다. 이와같이 양자점 응용 분야 중에서 디스플레이 분야를 제외한 가장 성장률이 높은 분야로 평가되고 있다. 2020년까지 디스플레이 분야의 시장 점유율은 72%, 바이오 분야는 19%까지 확대될 것으로 보인다.



(그림 6) 양자점 관련 시장 전망 - 디스플레이, 바이오 분야

「KOITA Tech-Issue Paper」에 의하면 양자점 응용 분야 중에서 가장 빠르게 진행되는 기술의 사업화는 QD Vision과 Nanosys 등에 의해 주도되고 있으며, 주력 분야는 양자점을 활용한 조명과 디스플레이 분야이다. 미국, 독일, 영국, 한국내 기업들은 자사의 기술력을 바탕으로 사업화 추진을 위한 협력 관계를 형성하고 있으며, 이를 바탕으로 QD 기술의 제품화를 추진하고 있다.

<표 5> 양자점 제품 동향

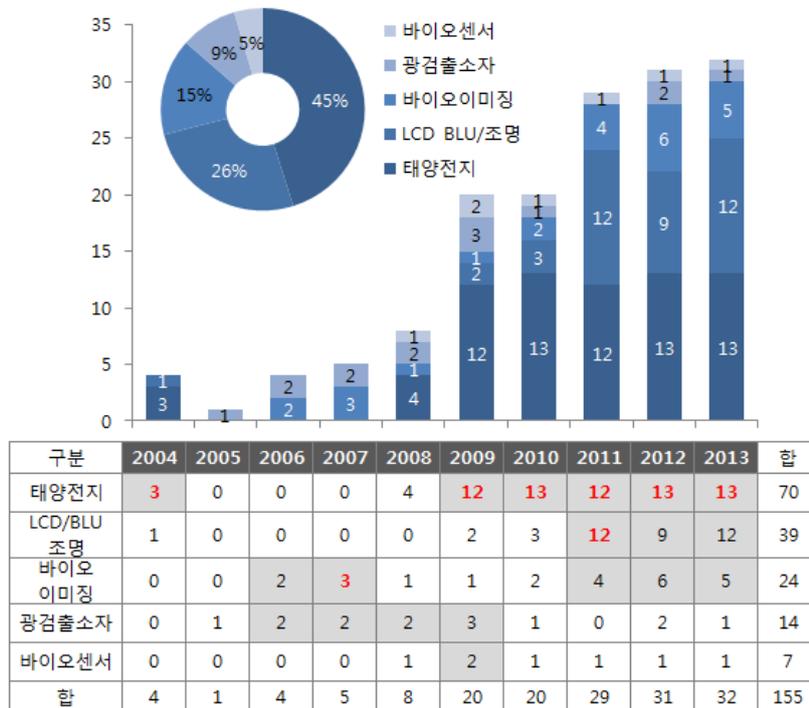
구분	보유 기술	적용 제품
QD-Vision (미국)	Color IQ	Sony Bravia Sony Xperia Sony Vaio
	Quantum Light	Nexus Lighting
Nanosys (미국)	QDEF	(3M과 공동 제품개발)
	Quantum Rail	(LG Inoteck과 공동 제품개발)
3M (미국)	QDEF	(Nanosys와 공동 제품개발)
Qsram opto semiconductors (독일)	MicroSideled3806	스마트폰, 태블릿용 조명
Nanoco (영국)	Cd-Free QD	(Dow chemical과 공동 제품개발)
LMS (한국)	-	양자점 필름
Nanosquare (한국)	-	디스플레이용 양자점
Quantum Materials (미국)	-	디스플레이용 양자점
Pacific Lighting Tech (미국)	-	조명용 양자점
NN Labs (미국)	QShift Coral	조명용 양자점
	QShift Lucid	

양자점 규제와 관련하여 ‘전기·전자제품내 유해물질제한지침(RoHS, Restriction of Hazardous Substances)’

이 존재하고, 이로 인해 일본과 유럽은 카드뮴을 활용한 양자점 연구개발에 제한을 겪고 있는 상황이다. RoHS는 유럽에서 시작되어 이후 일본이 유럽과 동일한 규제치를 채택하였다. 이러한 RoHS에 대한 대응으로 카드뮴 등의 물질의 대체가 과학적, 기술적으로 불가능한 경우에 한하여, RoHS에 대한 예외조항 요청과 이에 대한 평가를 통한 개정이 가능한 상황이다. 2013년 RoHS 예외조항 항목으로 요청된 5건의 내용중 카드뮴 관련 내용은 2건으로 QD-Vision과 3M에서 요청한 내용이다. 예외조항 갱신을 통해 조명 및 디스플레이 제조업체가 제품에 사용되는 양자점을 활용한 제품을 시장에 출시할 수 있도록 하고자 하며, 카드뮴 활용 양자점 기술에 대한 대체기술이 없어 예외조항 인정이 가능한 상황이다. 현재 QD-Vision과 3M이 요청한 변경 내용은 예외조항 만기일이 2017년 7월 1일로, 만기 이후 대체물질 기술개발에 대한 연구개발이 필요한 상황이다.

6. 국내 연구개발 사업 및 과제 분석

국내 양자점 R&D 수행 과제 중에서 태양전지 분야의 비중이 가장 높게 나타났으며, 이는 2009년 수행 건수의 증가가 나타났으며, 이후 성장세가 지속적으로 유지되고 있다. 태양전지 이외에 디스플레이 분야의 응용을 타겟팅하고 있는 연구의 비중이 높게 나타났고, 바이오 분야의 양자점 적용을 위한 질병 진단, 생체 이미징 관련 연구의 비중도 높게 나타났다. 다만 바이오센서 분야의 연구는 타 응용분야 대비 낮은 비중을 차지했다.



(그림 7) 국내 양자점 R&D 사업 추진 동향

특히 국내 연구에서도 광검출소자와 바이오이미징에 대한 활발한 연구개발이 진행되는 것으로 나타났으며 이는 양자점 연구의 세계적인 트렌드가 국내 연구에서도 반영되어 나타난 것으로 볼 수 있다. 또한 2013년 양자점 관련 연구가 32건으로, 국내 양자점 관련 연구가 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다.

양자점 연구개발의 주체는 대학이 차지하는 비중이 높고, 양적 연구성과에 있어 상위권을 차지하는 기관 역시 대학의 비중이 높다. 그러나 파스퇴르, (주)나노에피와 같이 기업의 연구개발 참여도 진행되고 있는 상황이다. 파스퇴르의 경우 양자점의 형성과 세포내 전달, (주)나노에피의 경우 양자점 광증폭기 제작 기술 개발을 수행하고 있어, 국내 기업의 바이오이미징, 약물전달 분야에 대한 관심도를 확인하였다.

7. 결론 및 연구의 한계

4P 분석은 논문, 특허, 시장, 국내 R&D 과제 정보를 통해, 양자점 기술의 응용분야별로 사업화 측면의 신규한 양자점 기술개발 이슈를 도출하였다. 이는 점차 가속화되는 양자점 기술개발 상황과 상용화 속도를 반영한 구체적, 복합적인 분석으로, 선행연구들이 포함하지 않았던 분석의 영역까지 확대하여 최신 동향을 적절히 분석한 것이라 할 수 있다. 4P 분석을 활용하여 연구개발 기획 기법 측면에서 기존의 방법론을 보완하고자 했고, 특히 특허, 논문, 시장 분석 정보를 국내 연구개발 상황과 접목시켜 양자점 R&D 방향을 제시하였다.

본 연구에서 양자점 기술의 응용분야를 중심으로 특허, 논문, 시장, 국내 R&D 사업 과제 측면에서 동향을 분석한 결과 양자점 기술개발은 상용화 초기 단계로서 성장세가 지속되는 것으로 나타났다. 특허 분석을 통해 바이오이미징, 바이오센서, LCD 백라이트와 조명 분야의 발전을 확인하였고 Start up 기업이 Incumbents와 유사하게 다양한 응용 분야에 참여하고 있는 것을 확인하였다. 논문에서는 태양전지와 바이오 분야, 특허에서는 태양전지와 디스플레이 분야 연구 성과가 가장 활발하게 진행되어 왔고 대학의 참여가 바이오 분야에서 두드러졌음을 파악하였다. 또한 텍스트 마이닝을 통해 논문과 특허에 나타난 주요 연구 키워드를 분석한 결과 5개 응용분야가 독립적인 기술 클러스터를 형성하였다. 광검출소자가 비중은 작으나 독립적인 키워드 클러스터를 형성하여, 분야가 성장하고 있음을 시사하였다. 시장 분석 결과로는 디스플레이 분야에서 양자점 기술의 빠른 사업화가 진행되고 있음을 도출하였다. 디스플레이 분야는 양자점을 활용한 기술개발과 제품화가 상당부분 추진되었는데, 이는 출원 비중이 높고 기업간 경쟁이 심화되고 있는 디스플레이 분야 특허 분석 결과와 일치한다. 국내에서 수행되고 있는 R&D 사업 과제는 디스플레이, 태양전지 분야의 연구 비중이 높고, 바이오 이미징과 광검출소자 분야의 연구가 새롭게 등장하고 있다. 이는 전세계적 양자점 연구와 궤를 같이하는 것으로 국내에서도 양자점 연구가 활발하게 진행되고 있음을 의미한다.

4P 분석의 내용을 종합하면, 디스플레이 분야가 양자점 제품 시장을 형성하는 상황과 더불어, 바이오 분야에서 활발한 연구가 진행되고 있다. 바이오 분야 논문이 두드러진 증가세를 보이고 있으며, 양자점 기술의 바이오 분야 적용을 위한 광검출소자 분야 기술도 동반 성장세를 보이고 있다. 국내 연구개발 상황 역시 바이오 분야를 추진하고 있으나 여전히 디스플레이 분야와 태양전지 분야 연구에 주력하고 있는 상황이다. 또한 산업체는 기술의 응용과 사업화가 빠르게 진행되고 있는 디스플레이 분야에 참여, 바이오 분야는 아직까지 산업체의 참여 비중이 낮은 상황이다. 이러한 상황으로 미루어 볼 때, 바이오 분야는 핵심기술을 확보하여 시장을 선점할 수 있는 가능성이 높은 분야로 판단된다. 앞으로는 시장성이 기대되는 바이오이미징, 바이오센서 분야 육성이 필요하고 이를 바탕으로 제품 경쟁력을 확보, 바이오 분야 시장 진입이 가능해질 것이다.

그러나 국내에서 수행되는 기술기획은 4P 분석과 같이 다양한 관점에서 기술을 둘러싼 환경을 분석하

려는 시도가 부족한 실정이다. 여전히 특허를 중점적으로 활용하는 기획이 다수이며 기술과 관련된 환경을 복합적으로 반영하려는 움직임이 부족하다. 또한 다양한 요인을 반영하려 해도 방법론이 체계화되어 있지 않다. 이러한 상황 속에서 4P분석은 기술기획의 효과성을 제고할 수 있는 방식으로 의미를 갖는다. 또한 4가지 분석 모듈별 분석 결과가 연계성과 정합성을 가져 유의미한 기획 내용을 도출할 수 있기 때문에 유용성을 지닌다. 향후 정책, 법·규제와 같은 항목을 4P에 추가하여 4P 분석을 더욱 체계화하는 것이 가능하고, 이러한 노력을 통해 기술기획 방법론으로서의 정착이 가능해질 것이다.

참고문헌

- 국제환경규제기업지원센터 (2014), 「국제환경규제기업지원센터 분석보고서 312-14-021」, 서울:산업통상자원부.
- 신승후, 현병환 (2008), “특허 및 논문분석을 이용한 연구생산성 분석 기법에 관한 연구”, 「기술혁신학회지」 11(3).
- 이준웅 (2005), 「나노물질 기술동향 분석 보고서」, 서울:한국과학기술단체총연합회
- 임부루, 박규호, 이근 (2011), “선행기술조사가 국가연구개발사업의 성과에 미치는 영향: 특허성과를 중심으로”, 「기술혁신연구」, 19(1).
- 전현배, 문성배 (2013), “경쟁과 기술혁신: 기존기업과 진입기업”, 「한국산업조직학회지」, 21(1), 1-25.
- 현병환, (2010), “3P 분석 이용해 국가연구개발 생산성 높인다 1”, 「과학과 기술」.
- 현병환, (2010), “3P 분석 이용해 국가연구개발 생산성 높인다 2”, 「과학과 기술」.
- 현병환, (2010), “3P 분석 이용해 국가연구개발 생산성 높인다 3”, 「과학과 기술」.
- 현병환, (2007), “어떻게 연구생산성 높일 수 있을까?”, 「식물생명공학학회지」 34(2).
- 현병환, 윤진효, 서정해(2006), 「신연구개발기획론」, 경문사
- 홍현선, 박경수, 이찬기, 김범성, 강이승, 진연호 (2012), “양자점(Quantum dot) 기술의 현재와 미래”, 「Journal of Korean Power Metallurgy Institute」 19(6).
- Berry Bozeman, Philippe Laredo, Vincent Managematin (2007), “Understanding the emergence and development of nano S&T”, Research policy.
- Czarnitzki Dirk, Kornelius Kraft (2004), “An Empirical Test of the Asymmetric Models on Innovation Activity: Who Invest More into R&D, the Incumbent or the Challenger?” Journal of Economic Behavior and Organization, 54(2), 153-173.
- Federico Munari, Laura Toschi (2014), “Running ahead in the nanotechnology gold rush. Strategin patenting in emerging technologies”, Technological Forecasting and Social Change.
- Frank T. Rothaenrmel, Marie Thurby (2007), “The nanotech versus the biotech revolution: Sources of productivity in incumbents firm research”, Research policy.
- Frost&Sullivan (2012), “Opportunities for Quantum Dot Display and Lighting ? Emerging Technology Set fo Revolutionize Display Industry”, Frost&Sullivan.
- Hyun Ju Jung, Jeongsik Jay Lee (2014), “The impacts of science and technology policy interventions

on university research: Evidence from the U.S National Nanotechnology Initiative”, Research policy.

Kumiki Miyazaki, Nazrul Islamm (2007), “Nanotechnology system of Innovation ? An analysis of industry and academia research activities”, Technovation.

Marico de Mirandi Santo, Gilda Massari Coelho, Dalci Maria dos Santos, Lelio Fellows Filho (2006), “Text mining as a valuable tool in foresight exercises: A study on nanotechnology”, Technological Forecasting and Social Change.

M.S.M Alencar, A.L. Porter, A.M.S Antunes (2007), “Nanopatenting patterns in relation to product life cycle”, Technological Forecasting and Social Change.

Nazrul Islam, Kumiko Miyazaki (2009), “Nanotechnology innovation system: Understanding hidden dynamics of nanoscience fusion trajectories”, Technological Forecasting and Social Change.

OECD (2005), 「Proposed Guidelines for Collection and Intepreting Technological Innovation Data: Oslo Manual」, 3rd Edition, Paris: OECD.

Pudovkin. A. I, E. Garfield (2004), “Rank-normalized impact factor: a way to compare journal performance across subject categories”, Proceeding of the 67th ASIS&T Annual Meeting.

Ruimin Pei, Alan L. Porter (2007), “Profiling leading scientists in nanobiomedical science: interdisciplinarity and potential leading indicators of research directions”, R&D Management.