

글로벌 연구보고서

# MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY

재료과학 및 기술

JUNE 2011

JONATHAN ADAMS  
DAVID PENDLEBURY

EVIDENCE



THOMSON REUTERS™

## 저자

**Jonathan Adams** / Director, Research Evaluation

전,연구성과분석 및 해석전문기업인 영국의 Evidence Ltd의 창립 디렉터

**David Pendlebury** / Consultant on bibliometric analysis

전,투스 로이터의 Contract Research Services Manager

현재 매주마다 타임즈지(誌) 교육 부문에 연구통계 관련 원고 기고 중

본 보고서는 투스 로이터의 자회사인

Evidence에서 출간한 것임

Evidence Ltd.

T/ +44 113 384 5680

F/ +44 113 384 5874

E/ [scientific.enquiries.evidence@thomson.com](mailto:scientific.enquiries.evidence@thomson.com)

Copyright © 2011 Thomson Reuters

ISBN: 1-904431-29-1

# 글로벌 연구보고서

# MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY

## 재료과학 및 기술

“지난 10년을 돌아보면, 재료과학은 물론 그와 관련된 응용기술들이 얼마나 발전해 왔는지 알 수 있다. 또한 잠재적인 연구분야는 기하급수적으로 성장해 왔다. 특히 아시아 태평양 지역의 연구자들은 세계 최고수준의 연구에 일조하며 활발하게 활동하고 있다. 재료과학 분야에서 아시아 태평양 지역의 미래가 한층 밝아지고 있다.”

- “A Bright Future for Materials Research,” NPG Asia Materials, 2010년 1월 21일

## INTRODUCTION

본 보고서는 톰슨로이터의 글로벌 연구보고서 중에서는 최초로 지리적 위치보다 특정 주제에 초점을 맞추었다. 보고서는 핵심연구분야인 재료과학과 기술에 대하여 검토하고 있다. 재료과학은 제조공정이나 획기적인 제품의 기반이 될 수 있는 잠재력을 가지고 있기 때문에 많은 국가에서 큰 관심을 가지고 있다.

2011년은 유네스코가 정한 세계 화학의 해(International Year of Chemistry)로 재료과학과 밀접하게 연관되어 있다. 또한 톰슨로이터의 자료 발간시점에 격년제 컨퍼런스인 제6회 International Conference on Materials for Advanced Technologies가 싱가포르에서 개최된다. 이 컨퍼런스에서 노벨상 수상자를 포함한 여러 명의 저명한 연구자들이 발표하게 된다. 재료과학분야가 그만큼 중요해졌다는 반증이기도 하다.

지리적인 위치도 중요하다. 이제 아시아 지역은 재료과학에 크게 기여하고 있다. 몇 개의 국가별 글로벌 연구보고서에서 강조된 것처럼, 아시아 지역은 세계 과학계에서 점점 위상을 높여가고 있다.

20세기의 전반부는 물리학에서의 기초적인 발견들이 지배적이었으며, 후반부는 DNA구조와 같은 분자 생물학 분야의 발견들이 지배적이었다. 그리고 21세기에는 새로운 분야인 재료연구에서 혁명적 발견들이 나타나면서 사회와 인간의 삶의 방식에 커다란 변화를 주고 있다.

글로벌 연구보고서 시리즈는 변화하고 있는 글로벌 연구지형에 대한 정보를 제공하고 있다. 본 보고서는 재료과학분야의 기원과 성격, 세계적인 발전상황, 주요 연구자들을 알아보게 된다. 그리고 각 분야에서 가장 주목받고 있는 주제인 그래핀(graphene), 금속유기구조, 조직공학에 사용되는 나노섬유지지체 등에 대하여 선별하여 살펴볼 것이다.

# 1. 재료 연구란 무엇인가?

Web of Knowledge<sup>SM</sup>의 Web of Science<sup>SM</sup>는 11,500여 개 저널을 수록하고 있다. 그리고 각 저널들의 중점분야를 바탕으로 250개의 하부분야를 분석하여 인용과 피인용 관계를 추적하고 있다. 하부분야 가운데 '재료과학'과 직접 관련된 분야는 8개고, 간접적으로 관련되어 있는 분야도 최소한 12개 이상이다. 이렇게 자세한 정보들은 분석에 도움이 되기도 하지만, 분야 전체를 개관하기에는 어려울 수도 있다. 대신 이 보고서에서는 Web of Knowledge<sup>SM</sup>의 Essential Science Indicators<sup>TM</sup>에서 제공하는 22개의 범주를 사용하게 된다. 재료과학도 그 속에 포함되어 있다. 참고로 네이처, 사이언스 등에 발표된 논문들은 Essential Science Indicators<sup>3</sup> 내의 적절한 분야에 선별하여 배정하였다.

재료과학은 최신 연구분야라고 할 수 있다. 과거로 비유한다면 금속, 세라믹 등 재료와 관련된 연구자들은 대학교에서 야금(冶金), 공학에 속했을 것이다. 현재 재료과학과의 연구자들의 경우도 예전이라면 물리학과, 화학과, 생화학과 등에 소속되었을 것이다.

요즘은 재료과학 분야와 관련된 구체적인 부서나 저널, 학회 등이 등장했다. 하지만 여전히 재료과학은 본질적으로는 학제적인 성격이 있다. 따라서 이 보고서에서는 다학제적으로 접근하게 된다. 연구결과물들은 재료과학과 관련된 저널에 논문형태로 발표되거나, 또는 다른 다양한 분야의 저널에 발표되기도 한다. 이 보고서는 범주를 단순화시킬 예정이다. 즉 Essential Science Indicators의 정의에 따라 재료과학 분야로 분류된 저널에 발표된 논문들에 집중할 것이다. 따라서 재료과학과 관련된 모든 논문 하나하나를 전부 포함시키지는 않게 된다.<sup>4</sup>

# 2. 세계적으로 재료과학의 점유율이 높아지고 있다

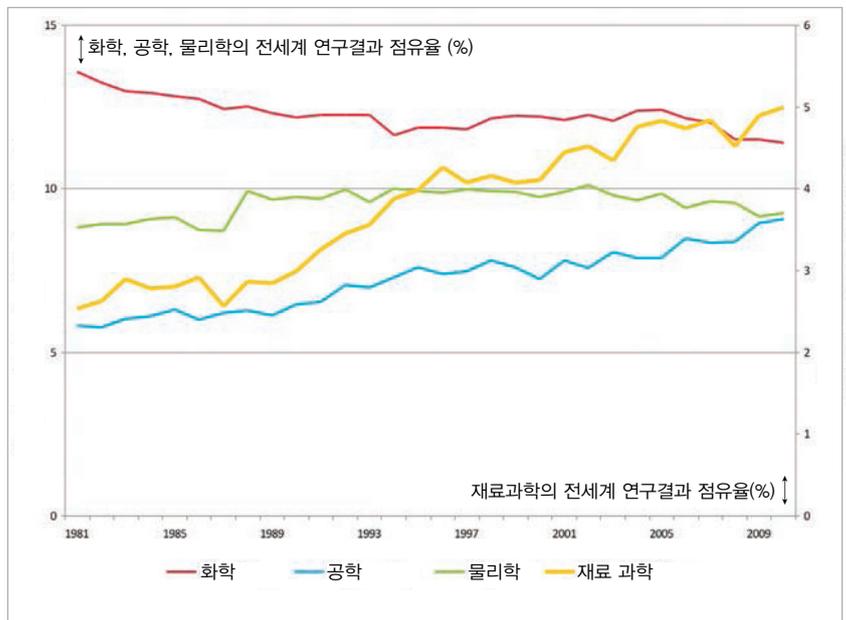
1981년부터 30년 동안, 재료과학 연구결과물(중요한 논문, 리뷰)의 성장속도를 확인해보자. 지난 30년간 톰슨로이터에서 제공하는 논문과 리뷰의 숫자는 2배 이상 증가했다. 매년 110만 편 이상이 증가한 셈이다. 왜 이렇게 성장한 것일까? 각각의 연구분야가 전세계 과학계에서 차지하는 비율을 살펴보자.

[그림 1]은 핵심적인 특허분야인 화학, 공학, 물리학, 재료과학 등 4개 분야에 대한 세계 연구결과물의 점유율을 보여준다. 그중 재료과학은 가장 적은 비율을 차지하다가 1981년부터 거의 4배나 성장했다. 참고로 전 분야를 통틀어 연구결과물의 수는 2배정도 증가했을 뿐이다. 화학분야는 전체적인 성장율의 평균수준이고, 공학은 최근에 와서 약 3배로 물리학에 비해 빠르게 성장하였다. 재료과학은 해마다 6만 편에 달하는 연구논문과 리뷰가 발표되어, Web of Science에서 제공되는 모든 과학분야 논문의 약 5%를 차지하고 있다. 화학, 공학, 물리학은 현재 각각 11.5%, 9%, 9%를 차지한다.

재료과학분야의 성장은 투자에서도 반영된다. Battelle 연구소의 2011 Global R&D Funding Forecast에 따르면, 글로벌 경기침체에도 불구하고 R&D 지출이 지난 3년 동안 10% 증가하였다고 한다. 이 보고서는 미국 공공부문에서 나노기술에 지속적으로 투자하고, 화학과 고급재료분야에 실질적인 투자가 지속되고 있음을 보여주고 있다.<sup>5</sup>

[그림 1]

1981년부터 재료과학 분야에서 Web of Science에 색인된 논문(연구논문, 리뷰)의 전세계 점유율에 대한 것이다. 그리고 화학, 공학, 물리학의 점유율을 비교하여 보여준다. 별도의 축선이 재료과학분야이다.



자료: Thomson Reuters Web of Knowledge<sup>SM</sup>

주) 검색 조건에는 "\*"이 사용되었다. 예를 들자면 단수와 복수형 단어를 포함하여 동일하게 검색되도록 해주는 검색조건이다.

### 3. 가장 빠르게 성장하고 있는 지역과 국가는?

재료과학 분야의 연구결과물이 증가한 데에는 아시아 지역의 놀라운 성장이 한 몫을 차지한다. 중국은 1981년에 논문수가 50편도 안되었다. 하지만 지금은 일본과 미국을 앞질러 단일국가로서는 최대의 논문생산국이 되었다. 유럽연합 15개 국가의 탄탄한 연구경제그룹인 EU-15의 연구생산물 합계에도 육박할 기세다. [그림 2]

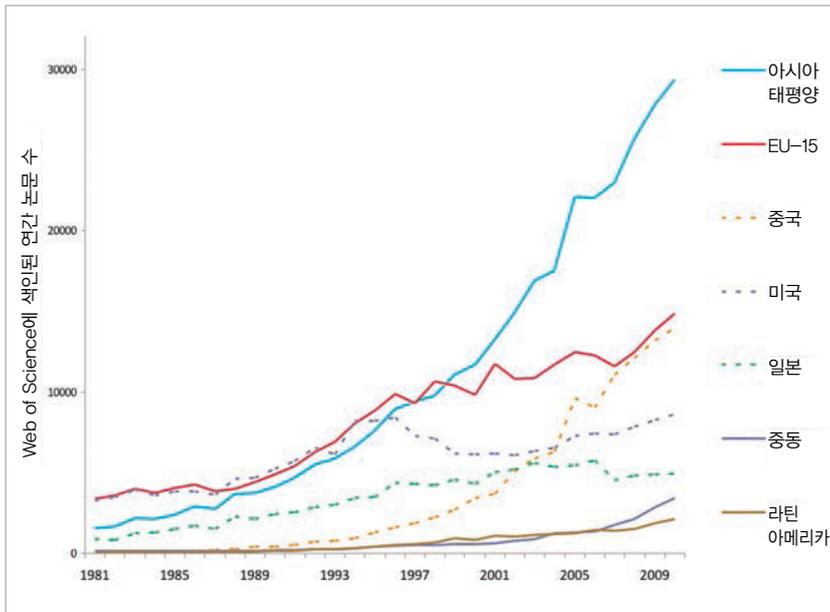
미국은 1980년대까지 이 분야에서 단연 선두였다. 하지만 1990년대 중반에 정점을 찍은 후에 출판물 숫자에서 하향세를 보이고 있다. 재료과학 논문분야에서, 1980년대 초부터 현재까지 미국의 세계점유율은 28%에서 15%로 거의 절반이나 감소했다.

유럽연합(EU)의 세계점유율은 1990년대 증가했다가 점차 감소해서 지금은 1980년대 중반 수준으로 돌아갔다. 미국과는 다르게 EU그룹의 논문 생산량의 숫자가 감소하지는 않았다. 반면 현재 아시아 태평양 지역은 재료과학분야 전세계 논문의 약 50%를 점유하고 있으며, 그 가운데에서 중국이 거의 절반을 차지한다.

[표 1]에 있는 30개 이상의 국가들은 지난 5년간 재료과학분야에서 각각 1천 편 이상의 연구논문과 리뷰를 만들었다. 그 중에서 아시아 태평양 지역의 국가들이 압도적이다.

[그림 2]

1981년 이후 주요 지역과 국가들의 재료과학 연구결과물의 성장. (Web of Science의 색인 제공)



자료: Thomson Reuters Web of Knowledge<sup>SM</sup>

논문의 수가 논문의 질을 보장해 주는 것은 아니다. 아시아 지역 논문들을 살펴보자. 논문 한편당 인용수는 선진국가들에 비하여 더욱 빠르게 성장하여 활발하게 성장해가고 있다. 물론 인용 수치가 논문의 질을 말하는 것은 아니다. 하지만 논문의 영향력과 중요성에 대한 합리적인 지표가 되므로 전문가 리뷰처럼 평가되기도 한다. 분석가들은 평균 인용수에 대한 지수를 '인용 영향도(citation impact)'라 부르기도 한다.

영향도 부문에 있어 당분간은 분명히 격차가 있을 것이다. 이제 아시아와 유럽의 격차도 줄어들 수도 있을 것으로 보인다. 하지만 미국의 경우, 논문 평균인용 수의 점유율은 점점 줄어들지만 여전히 중국의 2배에 달한다. [표2]

[표 1]

최근 5년 동안 1천 편 이상의 연구논문과 리뷰를 생산한 국가들의 순위 (Web of Science에 색인된 재료과학 연구논문 수 기준)

국가	논문 수	국가	논문 수	국가	논문 수
중국	55,003	이탈리아	5,990	포르투갈	2,503
미국	38,189	폴란드	5,168	벨기에	2,299
일본	25,473	호주	4,642	체코	2,217
독일	16,832	터키	4,142	오스트리아	2,044
한국	15,261	루마니아	3,958	멕시코	1,961
인도	12,693	브라질	3,891	그리스	1,663
프랑스	12,344	우크라이나	3,714	이집트	1,628
영국	11,611	스웨덴	3,176	핀란드	1,408
러시아	7,927	싱가포르	2,958	이스라엘	1,323
대만	7,410	이란	2,942	슬로베니아	1,099
캐나다	6,593	스위스	2,807	말레이시아	1,006
스페인	6,429	네덜란드	2,785		

## 4. 가장 영향력있는 연구기관과 대학은?

재료과학 분야에서 선도적인 연구기관은 어디일까? 다음 3가지 방법으로 살펴볼 수 있다: 가장 많은 논문을 발표한 기관; 가장 자주 인용된 논문을 발표한 기관; 가장 높은 인용영향도를 기록한 기관이다. 톰슨리터는 2001년 초부터 2011년까지 10년 동안의 자료를 검토하였다. [표 3]에서는 논문 수, 인용 수, 인용영향도 별로 상위 20개 기관을 보여주고 있다.

결과를 보면 출간된 논문 수가 많을수록 인용 수가 많아지는 경향을 보인다. 예를 들어 중국 과학아카데미(Chinese Academy of Sciences)는 가장 많은 논문 수와 인용 수를 기록했다. 논문 수에서 상위 20위 안에 든 기관들을 보면, 그 중 절반 이상은 역시 인용 수에서도 20위 안에 들어있다.

논문 수, 인용 수 항목은 중국, 일본, 싱가포르, 한국 등에 있는 아시아 기관들이 차지하고 있다. 인용영향도 항목을 보면, 지난 10년간 500편 이상의 연구논문 또는 리뷰를 발표한 연구기관 및 대학들이 전세계에 고르게 퍼져 있다.

2개 항목에 랭크된 기관들도 여럿 있다. 3개 항목 모두에서 순위에 든 기관은 단 한 곳이다. 독일의 막스 플랑크 학회(Max Planck Society) 뿐이다. 인용영향도 순위에서는 미국기관들이 지배하고 있지만, 생산력 측면(논문 수 항목)에서는 많이 뒤처져 있다. 실제로 인용영향도 상위 10개 기관이 지난 10년 동안 발표한 논문은 1천 편 미만이다. 캘리포니아 주립대학교 버클리(University of California Berkeley)만이 1,259 편으로 간신히 넘어섰지만, 논문 수 상위 20위 내에 들지는 못했다.

아시아 연구기관 중에서 가장 높은 인용영향도를 기록한 곳은 일본 과학기술진흥기구(Japan Science & Technology Agency: JST)다. 1,444 편의 논문을 발표하고 13.98의 인용 영향도로 24위에 올랐다. 싱가포르 국립대학교(National University of Singapore)는 2,309 편의 논문과 13.75의 인용 영향도로 27위를 차지했다.

### [표 3]

재료과학 논문 수(연구논문, 리뷰), 인용 수, 인용 영향도별 연구기관 및 대학 순위, 2001 - 2011년. (Web of Science의 색인 기준)

기관	논문 수	순위	기관	인용 수	순위	기관	영향도
중국 과학 아카데미	14,019	1	중국 과학 아카데미	104,104	1	워싱턴 대학교	30.41
러시아 과학 아카데미	6,769	2	막스 플랑크 학회, 독일	56,720	2	캘리포니아 주립대학교 산타 바바라	27.41
도후쿠 대학교	5,511	3	도후쿠 대학교	40,135	3	캘리포니아 주립대학교 버클리	26.58
칭화 대학교	5,129	4	일본 물질재료연구기구(NIMS)	36,578	4	그로닝겐 대학교	25.07
인도 공과대학교	4,522	5	MIT, 미국	35,329	5	하버드 대학교	24.46
하얼빈 기술 연구소	4,059	6	일본 산업 기술 종합 연구소(AIST)	33,868	6	MIT	21.61
AIST	4,052	7	캘리포니아 주립대학교 버클리	33,460	7	서던 캘리포니아 대학교	21.11
NIMS	3,952	8	싱가포르 국립대학교	31,740	8	캘리포니아 주립대학교 로스앤젤레스	19.23
오사카 대학교	3,618	9	칭화 대학교	31,698	9	스탠포드 대학교	18.34
중국 중남 대학교	3,464	10	캠브리지 대학교	27,909	10	미네소타 대학교	17.35
상해 교통 대학교	3,380	11	스페인 국립 연구 협의회(CSIC)	27,285	11	막스 플랑크 학회	17.31
막스 플랑크 학회	3,277	12	조지아 공과 대학교	27,201	12	조지아 공과 대학교	17.02
CSIC	3,191	13	오사카 대학교	26,217	13	미국 노스웨스턴 대학교	16.39
북경 과학기술원	3,065	14	서울대학교	25,564	14	코넬 대학교	16.06
동경 대학교	2,960	15	프랑스 국립 과학 연구소(CNRS)	25,132	15	미시건 대학교	15.70
CNRS	2,953	16	캘리포니아 주립대학교 산타 바바라	24,343	16	메사추세츠 대학교	15.62
중국 절강 대학교	2,721	17	워싱턴 대학교	24,240	17	드렉셀 대학교	15.53
서울대학교	2,560	18	펜실베이니아 주립대학교	24,086	18	아인트호벤 공과대학교	15.29
교토 대학교	2,541	19	동경 대학교	24,080	19	피에르 & 마리 퀴리 대학교	14.96
도쿄 기술연구소	2,520	20	인도 기술연구소	22,297	20	렌슬러 폴리테크 연구소	14.71

### [표 2]

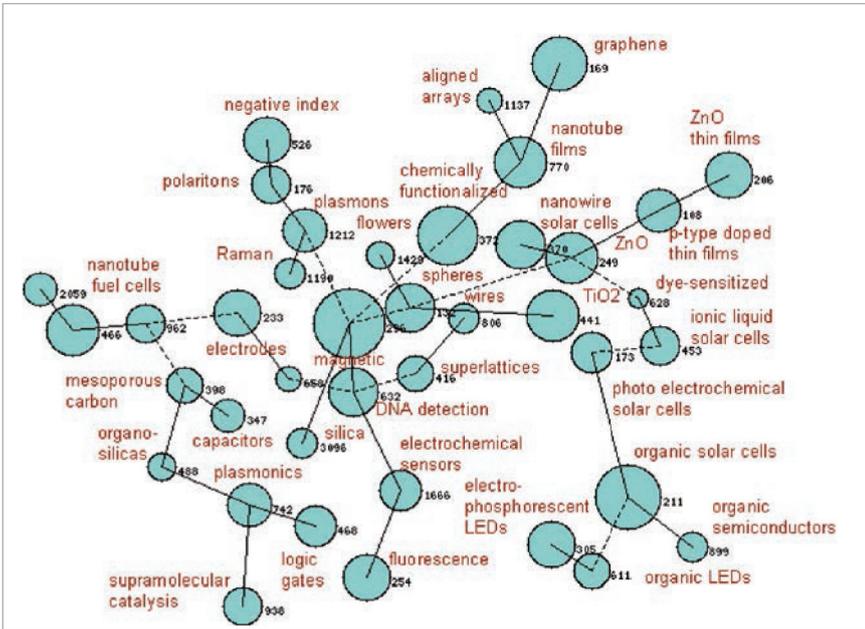
아시아 태평양 지역의 선두국가들과 주요 2개 국가의 재료과학 연구논문 수, 인용 수, 논문별 인용 수(영향도) 점수. 영향도 별로 정렬(2005 - 2009년). (Web of Science의 색인 기준)

국가	논문 수	인용 수	인용 영향도
미국	38,189	222,552	5.83
EU-15	53,283	216,712	4.07
일본	25,473	85,866	3.37
대만	7,410	23,303	3.14
한국	15,261	47,334	3.10
중국	55,003	143,665	2.61
인도	12,693	32,411	2.55

[표 3]의 논문 수 항목에서 나타나는 연구결과물 생산능력에서는 주로 대학보다는 여타 연구기관들이 많이 차지한다. 반면 인용영향도는 주로 대학과 연관되어 있는 것으로 보인다. 각각 서로 다른 과제와 활동 포트폴리오를 가지고 있기 때문일 수도 있다. 대학이 실시하는 기초지향적 연구는 학술적으로 영향력이 커서 더 많이 인용될 가능성이 높다. 반면 국립연구기관 등에서 실시하는 응용지향적 연구는 경제적 혁신 및 사회재라는 또 다른 방식으로 영향을 미치기 때문일 것이다.



서로 다른 형태로 두 차례 나타난다. 생의학과 관련된 주제들은 세 번이나 등장한다(10, 14, 17). 가장 높은 인용영향도 점수는 그래핀, 폴리머 태양전지와 관계되어 있다. 가장 새로운 핵심문헌은 분자논리회로(20), 상향 변환 형광 희토류 나노 결정(19), 자기조립 초분자 나노구조 겔상 물질(13) 등과 관련되어 있다.



[그림 4] Essential Science Indicators에 나타난 선도 연구분야 자료를 바탕으로 한 나노과학 지도

[표 4] 재료과학분야의 상위 20개 선도 연구분야. (2006-2010년, Essential Science Indicators의 총 인용수 순으로 정렬). 재료과학의 438개 선도 연구영역에서 선택된 것으로, 자연 및 사회과학 전분야 6,641개 선도 연구영역 중 6.6%를 차지한다.

순위	재료 과학 내 분야에 대한 설명	핵심 논문 수	인용 수	인용 영향도	핵심 논문의 평균 발표 연도
1	그래핀의 전자적 속성	6	9,524	1587.3	2005
2	폴리머 태양 전지	15	6,656	443.7	2007
3	다강체 및 전자기 재료	31	6,509	210.0	2006
4	염료 감응형 태양 전지에서 이산화티타늄 나노튜브 배열	47	5,645	120.1	2007
5	폴리머 합성에서의 ATRP와 클릭 화학	34	5,129	150.85	2006
6	그래핀 산화물 시트	16	4,815	300.9	2007
7	초소수성 표면	47	4,732	100.7	2007
8	산화 아연 희석 자성 반도체에서의 초고온 강자성체	48	4,667	97.2	2006
9	고도 선택 형광 화학 센서	46	4,581	99.6	2007
10	조직 공학용 전기 방사 나노 섬유 지지체	45	4,577	101.7	2006
11	연성 벌크 금속 유리	41	4,267	104.1	2006
12	단일 분자 자석	47	4,013	85.4	2007
13	자가조립 초분자 나노 구조 겔상 재료	33	3,810	115.4	2007
14	약물전달 및 생체 감지용 메조포러스 실리카 나노입자	34	3,693	108.6	2007
15	나노 결정 금속의 기계적 속성	45	3,682	81.8	2007
16	유기 반도체용 판상형 액정	30	3,637	121.2	2006
17	화상진단 및 플라즈몬 광열항암 요법을 위한 금 나노막대	21	3,506	166.9	2006
18	고정렬 메조포러스 폴리머와 카본 프레임워크	25	3,362	134.5	2006
19	상향 변환 형광 희토류 나노 결정	49	3,351	68.4	2007
20	분자 논리 회로	47	3,315	70.5	2008

## 6. 특별한 Topics

지금부터 활발하게 활동하고 있는 3가지 중요한 분야를 살펴보기로 하자. 그래핀, 금속유기구조, 조직공학용 전기방사 나노섬유 지지체를 말하며, 각각 대규모, 중규모, 소규모의 세부 연구분야를 대표한다. 이들은 전자, 에너지 저장, 생의공학(biomedical engineering) 분야에서 혁신을 일으킬 가능성을 가지고 있다. 따라서 전세계나 국가적 차원에서 경제적으로 중요한 잠재력을 가지고 있다.

연구문헌 측면에서 본다면, 이들 세 분야는 처음 등장한 시점부터 대단히 빠른 성장을 보인다. [그림 5]는 이들의 성장패턴을 함께 비교하고 요약해서 보여준다.

### Topic 1 : 그래핀 (Graphene)

지난 10년 동안 재료과학분야의 발전에 대한 모든 리뷰들을 살펴보자. 반드시 원자 하나 두께의 탄소필름인 그래핀에 대해 언급했을 것이다. 그래핀은 전자, 기계, 열, 광학적 속성을 가지고 있다.

[표 5]

2004년부터 2011년 5월까지, 그래핀 관련 연구출판물에 대한 저널분류를 기반으로 한 그래핀 연구분야 요약. 일부 저널은 1개 이상의 분야에 할당되었기 때문에 논문 수의 합계가 순 총계보다 클 수도 있다.

순위	분야	논문 수
1	물리학, 응집물질	3,405
2	재료과학, 다학제적	3,144
3	물리학, 응용	2,577
4	화학, 물리	2,528
5	나노 과학 & 나노 기술	2,134
6	화학, 다학제적	1,644
7	물리학, 다학제적	1,294
8	물리학, 원자, 분자 & 화학	464
9	공학, 전기 및 전자	357
10	전기 화학	268

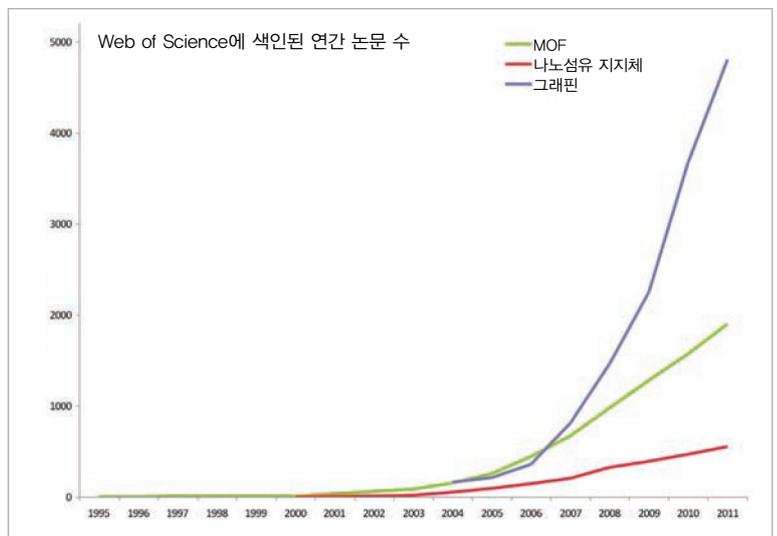
[표 6]

2004년부터 2011년 5월까지, 그래핀 관련 논문발표 상위국가와 기관

논문 수	국가	순위	기관	논문 수
3,263	미국	1	중국 과학 아카데미	440
1,957	중국	2	싱가포르 국립대학교	232
1,022	일본	3	스페인 CSIC	225
846	독일	4	러시아 과학 아카데미	190
593	영국	5	캘리포니아 주립대학교 버클리	182
543	한국	6	칭화 대학교	170
529	프랑스	7	난양 기술 대학교	166
450	스페인	8	프랑스 CNRS	155
384	싱가포르	9	미국 MIT	150
363	러시아	10	텍사스 오스틴 대학교	147

[그림 5]

1995~2011년, Web of Science에 색인된 특별 주제 논문의 수. (2011년은 예상수치) MOF은 ["metal-organic framework\*"], 나노섬유 지지체는 ["electrospun or electrospin\*" and "scaffold\* or tissue\*"], 그래핀은 ["graphene"]을 검색어로 사용하여 제목, 초록, 키워드에 해당 단어가 나타난 논문을 선택하였다.



자료: Thomson Reuters Web of Knowledge<sup>SM</sup>

2004년부터 영국 맨체스터 대학과 러시아 Chernogolovka의 Institute for Microelectronics Technology의 연구자들, 즉 Andre K. Geim과 Konstantin S. Novoselov, 그리고 동료 연구자들에 의한 혁신적인 연구가 진행되고 있다.<sup>9</sup> 그래핀에 대한 논문은 활발하게 증가하고 있다. 1985년 풀러렌에 대한 연구, 1986년의 큐프레이트-페로브스카이트 고온 초전도체에 대한 연구와도 비슷한 형태다.

Web of Science 데이터베이스를 살펴보자. 2004년 발간된 논문 중 제목, 초록 또는 키워드에 그래핀(graphene)을 포함하고 있는 논문 수는 164편이었다. 2010년까지는 3,671 편이 기록되었다. 그리고 2011년 5월 현재, 총 누적 논문수는 10,527 편이다. 2011년에는 4,800여 편에 달하는 그래핀 관련 논문이 발표될 것으로 예상된다. [그림 5]

Geim과 Novoselov의 발견은 대단히 중요한 것이었다. 이들은 2010년, 논문이 발표된 지 단 6년만에 노벨 물리학상을 수상했다. '2차원 재료 그래핀에 대한 혁신적 실험'의 공로를 인정받은 것이다. 2004년 발표된 논문과 2005년 네이처에 발표된 또다른 논문에 대해 빠르게 누적되고 있는 인용 수를 보면 이들 연구의 영향력은 분명해진다.<sup>10</sup> 이러한 자료를 바탕으로 톰슨로이터는 이미 2008년에 Geim과 Novoselov가 노벨상을 수상할 것이라 예측한 바 있다.<sup>11</sup> 2004년, 2005년의 두 논문은 각각 4,300회와 3,000회 이상 인용되었다. 지난 10년 동안 물리 과학의 전 분야에서 가장 많이 인용된 상위 20개 논문 중의 하나가 되었다.

그래핀은 독특하면서도 향후 다양한 형태로 활용할 수 있는 가능성이 있다. 이 때문에 다른 분야의 많은 연구자들이 이 새로운 소재로 관심을 돌렸다. [표 5]는 2004년부터 2011년 5월까지 10,527편의 그래핀 관련 논문이 발표된 저널들을 대상으로 분야별 순위를 보여준다. 이 자료를 보면 그래핀 연구가 물리학, 화학, 재료과학, 나노과학에서 주로 이루어졌고, 공학분야에서는 상대적으로 저조했음을 알 수 있다.

[표 6]은 2004년부터 국가별, 기관별로 그래핀 관련 연구의 양을 보여준다. 미국은 논문 수에서 선두를 지키고 있다. 아시아 국가들의 활동이 두드러져서 중국이 2위, 일본이 3위, 한국이 6위, 싱가포르가 9위에 올라있다. 싱가포르는 상대적으로 연구 기반의 규모가 작아서 향후 행보가 주목할 만하다. 기관별 순위에서는 다양한 국가연구기관들의 순위가 돋보인다. 이들은 서로 다른 곳에 위치한 연구실을 거대한 네트워크로 연결하여 활동한다. 1위에 오른 중국 과학아카데미와 스페인의 CSIC, 러시아 과학아카데미, 프랑스 CNRS 등이 그 예이다. 대학의 경우 미국의 캘리포니아 주립대학교 버클리, MIT, 텍사스 오스틴 대학교가 상위 10위 안에 들어있다. 중국의 칭화대학교와 싱가포르 국립대,南洋 기술대학교 역시 순위에 이름을 올렸다.

그래핀에 대한 연구는 활발하다. 2004년부터 발표된 그래핀 관련 논문에 대한 총 인용수는 현재 163,000회를 넘어섰으며, 지금도 계속 늘어나고 있다. *Essential Science Indicators*에 올라와있는 논문 중 지난 10년 동안 발표된, 그래핀 관련 인용상위 논문은 503편이다. 이는 재료과학, 화학, 물리학 분야의 인용상위(전세계 상위 1%) 논문수의 2.1%에 불과하다. 지난 2년 동안 발표된 인용상위 논문 중 제목에 그래핀을 포함하고 있는 논문을 파악해 보자. 재료과학 분야에서는 85편 중 13편(15%), 화학분야에서는 195편 중 23편(12%), 물리학분야에서는 123편 중 10편(8%)이다. 그 중 하나가 Geim의 2009년 리뷰논문인 “Graphene: Status and Prospects”인데, 이미 600회 이상 인용되기도 했다.<sup>12</sup> 다른 논문들 역시 그래핀 연구의 논문이력과 미래예측을 다루고 있다.<sup>13</sup>

## Topic 2 : 금속 유기 구조 (Metal-Organic Frameworks)

금속 유기 구조(Metal-organic framework: MOF)에 대한 연구는 화학, 특히 분자조정화학과 강하게 연계되어 있다. 물리학에 치우쳐 있는 그래핀과는 대조적이다. 노벨상 수상자인 Harry Kroto 경의 최근 설명을 빌리자면, MOF는 ‘진보된 기능을 지닌 더욱 복잡한 시스템의 나노 차원에서의 분자별 결합’과 ‘21세기의 고급 화학’의 좋은 예다.<sup>14</sup>

[표 7]

2004년부터 2011년 5월까지 발표된 금속유기구조 관련 연구출판물에 대해, 저널분류를 기반으로 한 연구분야 요약. 일부 저널은 하나 이상의 분야에 할당되었기 때문에 논문 수의 합계가 순 총계보다 클 수도 있다.

순위	분야	논문 수
1	화학, 다학제적	2,669
2	화학, 무기 & 핵	2,105
3	결정학	1,260
4	화학, 물리적	1,210
5	재료 과학, 다학제적	1,150
6	나노 과학 & 나노 기술	379
7	공학, 화학적	164
8	물리학, 응집 물질	158
9	물리학, 원자, 분자 & 화학	142
10	화학, 응용	132

[표 8]

2004년부터 2011년 5월까지, 금속유기구조 관련 논문발표 상위국가 및 기관

논문 수	국가	순위	기관	논문 수
2,584	중국	1	중국 과학 아카데미	450
1,398	미국	2	난징 대학교	314
447	독일	3	난카이 대학교	189
393	일본	4	동북 보통 대학교	156
388	영국	5	길림 대학교	130
355	프랑스	6	중산 대학교	120
292	인도	7	교토 대학교	118
250	한국	8	미시건 대학교	101
240	스페인	9	노스웨스턴 대학교	96
160	호주	10	서북 대학교, 시안	86

MOF는 특정한 기능성을 갖도록 분자 수준의 ‘빌딩 블록 (building blocks)’을 사용하여 하나하나 설계된, 유기 브리징 리간드로 이어진 금속 이온으로 구성된 다공성 결정성 고체이다. 현재 캘리포니아 주립대학교 로스엔젤레스에 있는 Omar Yaghi는 1990년대 말부터 MOF설계 및 합성을 주도해 왔다.<sup>15</sup> 그 이후로 그의 연구진을 비롯한 전세계의 연구자들이 2천 종이 넘는 MOF를 발표하였다.

MOF의 기록표면과 특정 용도에 맞는 구조설계(Yaghi가 망상 합성(reticular synthesis)이라 지칭하는)로 인해, MOF는 가스저장(수소, 메탄, 기타 가스) 및 가스정화, 분리, 촉매 등에 적합하다. MOF의 또 다른 용도는 고도 선택 센서이다. 이들의 에너지 저장에 대한 잠재력은 많은 과학 연구계를 비롯한 폭넓은 분야의 호기심을 불러일으켰다.

21세기를 확인해보자. MOF 관련 연구출판물은 2000년에는 수십 편에 불과하던 것이, 2011년에는 1,900 편으로 추산될 정도로 크게 증가해 왔다(그림 5). 1995년부터 2011년 5월까지 발표된 논문만 살펴보자. 제목이나 초록, 키워드에 “metal-organic framework\*”를 포함하고 있는 MOF와 관련된 논문은 6,313편에 달한다. 이들 논문은 지금까지 147,000회 이상 인용되었다. 기간이 좀더 길기는 하지만, 그래핀 관련 논문의 인용 수와 맞먹는 수치이다.

MOF와 관련한 논문이 발표된 저널을 기준으로 볼 때 6,313편의 논문에서 가장 자주 나타나는 학문분야는 화학이다. 하부분야로는 다학제적 화학, 무기 및 핵화학, 결정학, 물리화학 등이며, 다학제적 재료과학이 그 뒤를 쫓고 있다(표 7).

1995년부터 발표된 MOF관련 논문 수에서 중국은 2위인 미국의 2배에 가깝다. 유럽(독일, 영국, 프랑스, 스페인)과 나머지 아시아태평양 국가들(일본, 인도, 한국, 호주)은 중국이나 미국에 비하면 매우 뒤쳐져 있다.

따라서 기관별 순위표(표8)를 보면 중국 연구기관이나

대학들이 당연히 상위를 차지하고 있다. 상위 10개 기관 중 7개가 중국의 연구기관 또는 대학이다. 1위부터 6위까지는 전부 중국기관이다. 중국 연구자들과 중국 정부가 MOF연구에 우선 순위를 두고 있다는 뜻이다. 단순히 학문적인 관심뿐만은 아닐 것이다. MOF가 에너지 저장은 물론 기타 산업적으로 응용할 수 있는 가능성을 가지고 있기 때문이다.

### Topic 3 : 전기방사 나노섬유 지지체 (Electrospun Nanofibrous Scaffolds)

재료과학의 세부 연구분야 인용순위에서 10위를 차지한 (표 4) 선도분야는 무엇일까? 조직공학용 전기방사 나노섬유 지지체(Electrospun nanofibrous scaffolds for tissue engineering)이다. 재료과학, 폴리머 화학 및 나노기술과 의공학이 결합된 분야로, 다학제적 탐구분야의 한 예다.

전기방사 기법은 새로운 것은 아니다. 하지만 최근 이 기술은 나노미터 직경의 장섬유를 만드는 데에 사용되고 있다. 구조적, 기능적으로 천연세포 외 기질과 유사한 지지체를 만들기 위한 것이다. 다양한 생체적 합성재료를 기반으로 한 이 지지체는 도포된 세포들을 줄 수 있다. 또한 섬유의 다공성으로 인해, 세포부착과 증식을 촉진하고 항생제, 항암제 등을 수용하고 방출할 수 있는 단백질을 담을 수 있다. 전기방사는 지지체를 만들기 위한 한 가지 접근법만을 보여주고 있다. 하지만 지금까지 얻은 결과로 본다면, 조직 및 장기재생과 관련하여 놀라운 가능성을 보여주고 있다.

다시 Web of Science 데이터베이스를 활용해보자. 검색어 “electrospun OR electrospin\*”AND “scaffold\* OR tissue\*,”를 이용하여 제목, 초록, 키워드에 해당 문자열을 포함하고 있는 논문을 검색해보자. 2000년부터 2011년 5월까지 전기방사에 의해 생성된 나노섬유 지지체에 대한 논문이 1,899편 발표되었음을 확인할 수 있다. 이 논문들의 총 인용횟수는 31,000회 이상이다. 지난 10년 동안 이 주제에 대한 논문 수는 획기적으로 증가했다. 2000년에서 2002년 사이에는 논문 수가 10편에도 미치지 못했다. 하지만 2011년에는 550편에 달할 것으로 추산된다. [그림5]

[표 9]를 살펴보면 이 연구의 다학제적 속성, 특히 재료과학과 생의학 사이의 상호작용을 잘 보여준다.

2000년부터 발표된 전기방사 나노섬유 지지체에 대한 연구논문수의 순위를 보면, 미국이 선두에 서 있다.

[표 9]

전기방사 나노섬유 지지체 연구가 나타난 연구분야 요약. 2004년부터 2011년 5월까지, 관련 연구출판물에 대한 저널분류 할당을 바탕으로 하였다. 일부 저널은 1개 이상의 분야에 할당되었기 때문에 논문 수의 합계가 순 총계보다 클 수도 있다.

순위	분야	논문 수
1	공학, 생의학	629
2	재료 과학, 생체 재료	581
3	폴리머 과학	480
4	재료 과학, 다학제적	276
5	나노 과학 & 나노 기술	223
6	생명공학 & 응용 미생물학	193
7	화학, 다학제적	156
8	물리학, 응용	146
9	세포 생물학	136
10	화학, 물리적	114

[표 10]

2004년부터 2011년 5월까지, 전기방사 나노섬유 지지체 관련 논문발표 상위국가 및 기관

논문 수	국가	순위	기관	논문 수
657	미국	1	싱가포르 국립 대학교	144
448	중국	2	동화 대학교	120
438	한국	3	뉴욕 주립대학교 스토니 브룩	58
161	싱가포르	4	버지니아 커먼웰스 대학교	56
92	영국	5	서울대학교	53
80	이탈리아	6	중국 과학 아카데미	42
70	독일	7	충남대학교	35
66	일본	8	태국 출라롱콘 대학교	34
49	호주	9	오하이오 주립대학교	28
39	태국	10	펜실베이니아 대학교	27

그 다음은 모두 아시아의 국가들로 중국, 한국, 싱가포르가 차지한다. 세 국가의 논문 수를 합하면 미국을 훨씬 능가한다. 톰슨로이터의 *Science Watch* 뉴스레터는 최근 싱가포르 과학에 대한 특집 기사를 다룬 적이 있다. 그 기사를 참고하면 싱가포르는 생의공학, 세포 및 조직공학 분야에서 예상보다 2배에 달하는 논문을 생산해 왔다. 또한 이 논문들은 세계 평균보다 각각 67%, 25% 더 많이 인용되었다.<sup>16</sup>

[표 10]을 보면 아시아에서는 일본이 8위, 태국이 10위에 올라있다. 기관별 순위를 보면 상위 10개 기관 중 4곳이 미국 대학이다. 나머지 6곳은 싱가포르 국립대학교, 중국 동화대학교와 과학아카데미, 한국의 서울대와 충남대, 태국의 출라롱콘 대학교 등 아시아의 대학과 연구기관이다.

Seeram Ramakrishna는 이 분야의 선도적 연구자로, 현재 싱가포르 국립대학교의 기계공학과 교수이며 연구전략 부학장이다. 그는 향후 연구초점은 '합성 나노섬유 지지체에 있어 간엽줄기세포(MSC) 분화의 다능적 가능성을 어떻게 효과적으로 연구할 것인가'일 것이라 말한다.<sup>17</sup>

## SUMMARY

이 분야를 잘 모르는 사람들에게는 재료과학과 기술이 불분명한 영역으로 보일 수도 있다. 이 분야에는 다양한 용어를 설명해주는 방대한 전문용어집이 있다. 난해하고 이해할 수 없을 것만 같은 다양한 지식과 기술들을 모두 담고 있다. 하지만 이 분야를 도전해 볼 만한 이유 중 하나는 재료과학의 다양성과 성장세이다. 그리고 그것은 획기적인 제품이나 공정으로 응용되어 향후 경제적인 성장과 사회적 변화에 큰 역할을 하게 될 것이다.

인류의 역사는 재료를 사용하고 개발하는 과정이라고 할 수 있다. 기술의 역사를 살펴보면 새로운 재료를 발견하거나 어떤 재료에 대한 새로운 용도를 발견하면서 혁명적인 변화가 시작된다. 청동은 철에 자리를 넘겨주고, 철은 다시 강철에, 그리고 다른 의견도 있겠지만 강철은 실리콘에 그 자리를 넘겨주었다. 그럼 몇 가지 질문을 던져보자. 전자분야에서 그래핀이 실리콘을 대체할 것인가? 자동차가 MOF에 저장된 수소에서 연료를 공급받을 것인가? 나노섬유 지지체에서 자란 줄기세포로 손쉽게 장기교체를 하게 될 것인가? 이런 질문을 던질 수 있다는 것은 그만큼 최근 재료과학과 기술이 많이 발달했다는 뜻이다. 이 보고서에서 제시한 것처럼, 어쩌면 우리는 지금 완전히 새로운 고급소재의 시대에 들어서고 있는지도 모른다.

누가 이 변화에 앞장설 것인가? 아시아 국가와 기관들은 신소재에 집중하여 연구하고 있다. 유럽의 일부와 북미국가들은 아시아국가만큼 노력하고 있는 것 같지는 않다. 특히 미국의 경우 재료과학 연구논문 점유율이 지난 30년 동안 절반으로 떨어졌다. 오히려 1990년대 말과 2000년대 초반에는 논문 수 자체가 줄어들기도 했다. 현재의 논문 수는 1996년 수준을 간신히 회복한 정도에 불과하다.

그럼에도 불구하고 미국의 연구는 여전히 월등한 위치를 차지하고 있다. 재료과학 분야에서 미국의 논문들은 세계 평균에 비해 73% 더 많이 인용되고 있다. 사실 미국은 다른 모든 분야보다 재료과학 분야에서 가장 높은 상대 인용도를 보이고 있다. 서유럽도 평균 인용도가 높은 편이다. 그러나 아시아와 유럽, 북미 간의 인용 영향도는 그 격차가 줄어들기 시작했다. 아시아 지역의 신소재 연구자들 수천 명의 경험이 전문성을 만들어가고 있기 때문이다.

글로벌 연구를 경쟁적 관점에서 바라볼 필요는 없다. 하지만, 국가간의 성과를 상대적으로 비교하는 일이 유용할 수도 있다. 지금까지 살펴본 내용들이 바로 같은 맥락이다. 특히 재료과학 연구는 경제성장과 밀접하게 연관되어 있다. 따라서 미국과 유럽 위원회의 대표와 정책결정자들은 이제 미래를 위해 고민해야할 수도 있다. 미국의 국가 나노기술 개발전략(National Nanotechnology Initiative)이나 유럽위원회의 지원뿐 아니라, 그 이상으로 재료과학 연구에 투자하는 것이 필요한지 말이다.

재료과학 연구가 산업적으로 응용된다면, 다른 국가들에 이익이 되고 G7국가들을 새로운 소재에 대한 수출국에서 수입국으로 바꾸어놓게 될까? 미국의 예를 들어 보자. 미국은 물리학, 화학, 재료과학에 비해 생의학 연구분야에 대한 지원을 상당히 증가시켰다. 인용영향도 측면에서 볼 때 재료과학분야의 선도적 연구기관들은 여전히 미국 대학들이다. 하지만 어쩌면 이제 새로운 균형점을 생각해봐야 할 지도 모르겠다.

앞서 살펴본 주제별 표를 보면 막스 플랑크 학회, CNRS와 CSIC 등 유럽의 연구기관이 두드러진 모습을 보이고 있다. 유럽의 대학들은 그리 두드러진 모습을 보이지 않는다. 중요한 혁신을 일으킨 연구자들이 포진되어 있음에도 불구하고 말이다. 인용영향도를 살펴보면 더 많은 대학들이 드러나긴 한다. 하지만 이제 고등교육기관에 대한 연구지원 전략을 재고려해야 할지도 모른다. 만약 지금까지 쌓아온 지적 자산들이 제대로 수립된 연구경제 속에서 풍성한 결과를 맺기를 원한다면 말이다.

## REFERENCES

1. Anonymous editorial, "A bright future for materials research," *NPG Asia Materials*, January 21, 2010 (<http://www.natureasia.com/asia-materials/editorial.php?id=687> 참조)
2. 이전에 출간된 톰슨로이터의 글로벌 연구 보고서는 <http://researchanalytics.thomsonreuters.com/grr/>에서 확인할 수 있다. 이들 보고서에서 다룬 국가나 지역은 순서대로 중국, 인도, 브라질, 러시아, 호주 & 뉴질랜드, 아프리카, 일본, 미국, 중동이다.
3. 이 절차에 대해서는 <http://www.sciencewatch.com/about/met/classpapmultijour/>을 참조하면 된다.
4. 톰슨 로이터가 재료과학 분야로 할당한 356개의 저널목록은 <http://sciencewatch.com/about/met/journalist/>에서 확인할 수 있다.
5. Martin Grueber and Tim Studt, "2011 Global R&D Funding Forecast," *R&D Magazine*, 52 (7): 31-64, December 2010 (<http://www.battelle.org/aboutus/rd/2011.pdf> 참조)
6. <http://sciencewatch.com/dr/rfm/mos/10marmosGLOBAL/> 참조
7. 추가 정보는 <http://sciencewatch.com/about/met/core-rf/>와 <http://sciencewatch.com/about/met/rf-methodology/> 참조
8. <http://sciencewatch.com/dr/rfm/mos/10aprmosNANOSCI/> 참조
9. K.S. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S.V. Dubonos, I.V. Grigorieva, and A.A. Firsov, "Electric field effect in atomically thin carbon films," *Science*, 306 (5696): 666-669, October 22, 2004.
10. K.S. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov, D. Jiang, M.I. Katsnelson, I.V. Grigorieva, S.V. Dubonos, and A.A. Firsov, "Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene," *Nature*, 438 (7065): 197-200, November 10, 2005.
11. <http://science.thomsonreuters.com/press/2008/8481910/> 참조.
12. A.K. Geim, "Graphene: Status and prospects," *Science*, 324 (5934): 1530-1534, June 19, 2009. 또한, 다음을 참조: A.K. Geim and Philip Kim, "Carbon wonder," *Scientific American*, 298 (4): 90-97, April 2008, and A.K. Geim and K.S. Novoselov, "The rise of graphene," *Nature Materials*, 6 (3): 183-191, March 2007
13. 다음을 참조: Mazdak Taghioskoui, "Trends in graphene research," *Materials Today*, 12 (10):34-37, October 2009; Li Wang and Yun-tao Pan, "Research frontiers and trends in graphene research," *New Carbon Materials*, 25 (6): 401-408, December 2010; and Peng Hui Lv, Gui-Fang Wang, Yong Wan, Jia Liu, Qing Liu and Fei-cheng Ma, "Bibliometric trend analysis on global graphene research," forthcoming in *Scientometrics* (<http://www.springerlink.com/content/19027072k6618168/>)
14. Paul Jump, "Tiny steps to a new world, but UK is stumbling," *Times Higher Education*, February 24, 2011에서 인용 (<http://www.timeshighereducation.co.uk/story.asp?storycode=415261> 참조)
15. 다음을 참조: Omar M. Yaghi, Guangming Li and Hailian Li, "Selective binding and removal of guests in a microporous metal-organic framework," *Nature*, 378 (6558): 703-706, December 14, 1995; Omar M. Yaghi, Hailian Li, Charles Davis, David Richardson and Thomas L. Groy, "Synthetic strategies, structure patterns, and emerging properties in the chemistry of modular porous solids," *Accounts of Chemical Research*, 31 (8): 474-484, August 1998; and, Hailian Li, Mohamed Eddaoudi, M. O'Keefe and Omar M. Yaghi, "Design and synthesis of an exceptionally stable and highly porous metal-organic framework," *Nature*, 402 (6759): 276-279, November 18, 1999
16. Christopher King, "Tracking Singapore's rise," *Science Watch*, 22 (3): 1-2, May/June 2011
17. Molamma P. Prabhakaran, Laleh Ghasemi-Mobarakeh, and Seeram Ramakrishna, "Electronspun composite nanofibers for tissue regeneration," *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 11 (4): 3039- 3057, April 2011



## 추가 정보

보다 자세한 제품정보를 원하시면 톰슨로이터 한국지사 담당자에게 연락주시기 바랍니다.

### Science Head Offices

#### Americas

Philadelphia +1 800 336 4474  
+1 215 386 0100

#### Europe, Middle East and Africa

London +44 20 7433 4000

#### Asia Pacific

Singapore +65 6775 5088  
Tokyo +81 3 5218 6500

### 톰슨로이터 IP & Science – 한국지사

**Web** science.thomsonreuters.co.kr  
**Email** ts.info.korea@thomsonreuters.com  
**Tel** 02-2076-8100

For a complete office list visit:

[science.thomsonreuters.com/contact](http://science.thomsonreuters.com/contact)

