

원하는 물질 만들어 ‘新산업혁명’ 이끈다

글_ 조성일 서울시립대학교 화학공학과 교수 sijo@uos.ac.kr

기획연재순서

- ④ 21세기의 수학
- ⑤ 21세기의 천문학
- ⑥ 21세기의 해양학
- ⑦ 21세기의 지질학
- ⑧ 21세기의 생태학
- ⑨ 21세기의 기상학
- ⑩ 21세기의 생명과학
- ⑪ 21세기의 생물정보학
- ⑫ 복잡성의 과학
- ⑬ 재료과학
- ⑭ 고고학
- ⑮ **결정학**
- ⑯ 광과학

결정학이라고 하면 흔히 다이아몬드와 같은 보석이 먼저 떠올라 광물학의 한 분야로만 생각하기 쉽다. 그러나 결정학은 비단 광물학뿐만 아니라 물리학, 화학, 금속학, 생물학 등에서 광범위하게 적용된다. 거의 모든 무기 및 유기 화합물들도 결정질 구조를 가지고 있다. 즉, 나프탈렌, 벤젠, 셀룰로오스, 단백질, 비타민, 인슐린 등도 결정질로 되었으며, 각종 금속 합금 도자기 건축재료 등도 결정질로 구성되어 있다. 또한 인체내의 혈관과 신장에 생기는 담석도 결정질의 형성과 관계가 있으며, 뼈와 치아도 결정질이다.

결정학을 연구하는데 필수적인 도구는 X-선 회절장치이며,

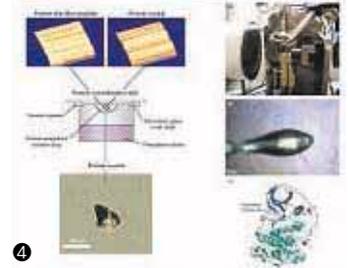
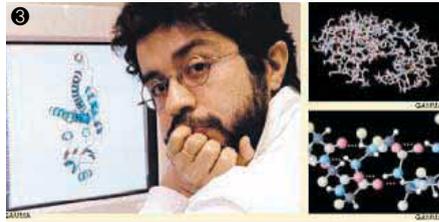
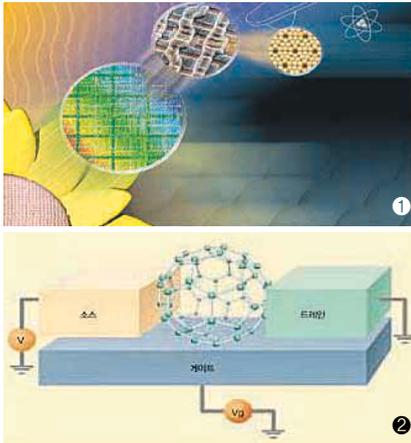
각종 X-선 회절장치의 개발과 컴퓨터의 대형화로 데이터 수집과 처리 계산이 빨라져서 결정을 구성하는 원자들의 배열상태를 예전보다 훨씬 쉽고 빠르게 알아낼 수 있다. 물질들의 모든 성질은 그 물질을 구성하는 화학원소 등, 분자의 배열과 결정 구조에 의하여 이루어지기 때문에, 결정학은 물질을 다루는 화학, 물리학, 생물학 등에서 지극히 중요한 학문이며, 모든 물질과학의 기초 연구분야이다.

외형으로 보면 결정은 소재 분야에 천연 보석의 감별은 물론 인조 보석의 결정성장이 각광을 받고 있다. 고온에서 흑연에 충격파를 보내 다이아몬드를 만들어 “불과 몇 마이크로초 동안에 백만장자가 되었다”고 한 P.W. 브리지먼이 유명하며, 그 인조 다이아몬드를 사용하여 해저유전도 개발하고, 고속도로, 지하철 굴착작업 등을 가능하게 하였다.

결정학의 신기원 ‘나노 결정화 기술’

인조 보석의 결정성장 방법으로는 결정핵을 이용해 용융상태에서 결정으로 키우는 초크랄스키법, 고온고압하에서 원료 보석을 결정시키는 수열법, 원료 물질에 플럭스를 넣어 낮은 온도에서 용융한 뒤 냉각하여 결정하는 플럭법, 원료물질을 높은 온도의 불꽃 속으로 통과시켜서 순간적으로 용융시킨 후 다시 단결정으로 결정하는 베르누이법 등이 있다. 이러한 결정성장법들을 이용해 다이아몬드, 루비, 사파이어 등 합성 보석을 만들고 있다. 또한 비슷한 방법으로 실리콘과 같은 반도체의 결정 성장에 널리 응용되고 있다.

21세기는 신산업혁명을 주도할 IT, BT, NT 분야에서 원자



① 20세기는 마이크로의 세계였지만 21세기는 나노의 세계가 될 것이다. 나노 크기의 재료는 기존의 기술로 달성할 수 없었던 강도와 인성을 동시에 나타내, 기계와 소재 산업분야에 큰 파장을 가져올 것이다. ② 탄소나노튜브 트랜지스터 모형도 ③ 단백질의 고유 구조인 접힘 현상을 밝히는데 관심이 집중되고 있다. 접힘 현상을 규명하면 세계적인 질병의 진단과 치료에 획기적인 변화를 가져올 수 있을 뿐 아니라, 새로운 효소와 촉매를 개발할 수 있는 등 그 활용범위가 넓기 때문이다. ④ 나노 결정학을 이용한 결정화 신기술

나 분자를 조작하여 새로운 물질을 합성하고 그 구조를 밝혀내 새로운 기능을 창출하는 첨단기술개발 경쟁시대이다. 즉, 물질의 설계도인 결정구조에 맞춰 화학적으로 적절히 결합시킴으로써 원자들로부터 우리가 필요한 물질을 제조하는 설계도에 따라 물질을 합성하여 구조를 밝히고, 그 물질의 기능을 연구하는 결정학의 전성시대이다.

요즘 널리 쓰이고 있는 실리콘 트랜지스터는 완전 실리콘 결정에 결정결합을 만들어서 소스에서 드레인으로 흐르는 전류를 제어하는 방식이다. 이 실리콘 트랜지스터의 대안으로 탄소나노튜브 트랜지스터, 실리콘 나노와이어 트랜지스터, 분자 크로스바, 상 변화 물질, 스피트로닉스가 현재 활발히 연구중이며, 이러한 신소자의 구조를 설계하고, 확인해 보는 작업이 우선적으로 행해져야 하므로 그 어느 때보다 결정학의 중요성이 부각되고 있다.

반도체 산업은 메모리뿐만 아니라 TFT-LCD로 대표되는 비메모리 분야 모두 급격한 성장이 이루어지고 있다. 우리나라의 2004년도 전체 수출액인 2천500억 달러의 30%에 해당하는 750억 달러가 반도체, 디스플레이, 핸드폰, 가전 등의 IT 산업에서 벌어들인 수출액이다. 시장조사 기관인 아이서플라이는 올해 세계 반도체 시장 규모가 2천371억 달러로 2004년 대비 4.7% 증가할 것으로 보고 있다. 이처럼 반도체 시장이 세계 시장에서 중요 부분을 차지함에 따라 반도체산업을 뒷받침해 줄 수 있는 기초연구가 IT-NT의 융합이나 IT-NT-BT 융합분야에서 활발하게 진척될 것으로 예상된다.

상온에서 액체 상태인 단백질이나 유전인자 지놈 같은 물질

을 저온 상태에서 결정화하여 X-선을 이용하여 거대분자의 구조를 규명하고 그들의 성질과 기능에 대해 생명공학 분야에서 활발하게 연구되고 있다. 국내에도 단백질 또는 지놈의 분자구조에 관하여는 서울대 서세원 교수, 연세대 백용기 교수, 한국과학기술연구원 유명희 교수 등이 활발히 연구하고 있다.

포스트지놈시대 도래 이후, 수많은 단백질들이 알려졌고, 그 기능을 알아보고자 결정상태의 거대분자구조를 통하여 단백질들의 기능을 도출하고자 하는 구조 단백질이 발전해 나가고 있다. 그 가운데 이탈리아 그룹에서 발표된 나노 결정화 기술은 결정을 얻어 낼 수 있는 신기원을 보여 주었다. 이는 단백질 결정의 특성을 파악하여 비슷한 원리로 얇은 나노 바이오 필름막에 단백질의 소형 결정을 길러내고 이를 마이크로결정용 방사광을 이용하여 구조를 결정해내는 이른바 나노 결정학 방법을 발표하였다. 신약 개발에 이러한 구조 연구가 그 동안의 구조 규명 기술의 축적으로 보다 정확한 분자, 원자 수준의 3차원 정보를 제공하고 이를 바탕으로 신약 디자인 기술과 접목되어 신약 연구에 획기적 결과를 얻게 될 것이다.

역대 노벨상 12%가 결정학 관련 연구

오늘날의 눈부신 과학의 발전은 결정학의 발판 위에서 이루어졌다고 해도 과언이 아니다. 그 동안 100년간 노벨상 과학분야 수상자 300여 명 중 36명(12%)이 결정학 관련 연구업적으로 상을 받았다. 첫 노벨 물리학상을 수상한 독일의 뢰트겐은 X-선을 발견함으로써 결정학의 새 시대를 열었고, 그 후 독일 라우에의 X-선 회절, 영국 브래그의 브래그 법칙(nλ

역대 노벨 과학상 수상자 중 결정학 분야 인물

연도	수상자	국가	업적
노벨 물리학상			
1901	빌헬름 뢰트겐	독일	X선을 발견하고 탄성, 유체의 모세관 작용, 기체의 비열, 결정 안에서의 열전도, 기체에 의한 열흡수, 압전기 등을 연구
1914	막스 폰 라우에	독일	결정에 의한 X선 회절(回折)의 연구. 1912년 처음으로 결정을 사용해 X선을 회절시키는데 성공. 이 실험으로 X선이 빛과 비슷한 전자기 복사임을 증명
1915	윌리엄 브래그(父) 로렌스 브래그(子)	영국 영국	X선을 이용한 결정구조 분석 윌리엄 브래그는 로렌스 브래그의 아버지
1917	찰스 바클라	영국	X선이 물질을 통과하다가 원자내 전자들에 의해 편향(偏向)될 때 일어나는 X선 산란에 대한 연구
1924	카를 시그반	스웨덴	X선 분자학에 대한 연구. 1916년 X선 방출 스펙트럼에서 새로운 파장 군(群)인 M계열을 발견했으며, X선 파장을 정확히 측정할 수 있는 장치와 기법 개발
1927	아서 홀리 콕프턴	미국	전자와 충돌할 때 X선 파장이 변한다는 사실을 발견. 콕프턴 효과로 불리는 이 효과는 광자에서 전자로의 에너지 전달에 의해 일어난다.
1953	프리체 제르니케	네덜란드	위상차 현미경 완성
1956	윌리엄 쇼클리 존 바딘 윌터 브래튼	미국 미국 미국	반도체 연구 및 트랜지스터 효과를 발견하여 컴퓨터와 각종 전자기기의 상용화에 기여
1973	에사키 레오나 이바르 예이베르 브라이언 조지프슨	일본 미국 영국	반도체와 초전도체의 터널 효과연구. 에사키는 터널 효과에 의해 순방향 전류에 음저항이 생기는 소자 에사키 다이오드라고 불리는 이중 다이오드를 발명
1987	J. 게오르크 베드노르츠 K. 알렉스 뮐러	독일 스위스	절대온도 35K의 바륨-란탄-구리산화물에서 초전도현상발견
2000	조레스 I. 알페로코 허버트 크리머 잭 S. 킬비	러시아 미국 미국	고속 광전자공학에서 사용되는 반도체 헤테로구조체 발견. 현재 헤테로구조체 기술을 사용하여 자동차 브레이크 빛, 교통신호등의 빛, 기타 각종 경고등의 빛 등에 사용될 강력한 빛을 내는 다이오드가 개발되고 있다. 집적회로 개발

$=2d_{hkl} \sin\theta$)을 통한 결정구조의 확립을 가져오면서 결정학을 통해 수많은 물질의 구조를 파악하여 그 성질을 이해할 수 있게 되었다.

프레드릭 생거는 소의 인슐린 단백질 구조를 완전하게 밝혀 인슐린을 성공적으로 합성할 수 있는 기반을 마련하였으며, DNA와 RNA 분자의 뉴클레오타이드 서열을 결정하는 방법을 개발하였다. 미국의 윌리엄 N. 립스컴은 X선 기법을 개발해 수많은 수소화붕소 화합물(보란)과 그 유도체들의 분자구조를 그릴 수 있었는데, 이 X선 기법은 그 후 응용화학 분야에 유용하다는 사실이 밝혀졌다. 생리학·의학 분야에서 영국의 프랜시스 H.C. 크릭과 모리스 윌킨스, 미국의 제임스 D. 왓슨은 디옥시 리보핵산(DNA)의 분자구조를 밝혀냈다. 이것은 생물학 분야



Wilhelm Konrad Röntgen, Sir William Lawrence Bragg, William N. Lipscomb, James Battey Sumner, Francis H. C. Crick

본문에 나오는 역대 노벨수상자

에서 20세기 최고의 발견이라고 할 만큼 대단한 발견이라고 할 수 있다. 이와 같이 보았을 때 결정학 분야야말로 노벨상의 텃밭인 셈이다.

이렇게도 노벨상 제정 100년이 넘는 역사 동안 우리 나라는 과학 분야에서 수상자가 한명도 나오지 못했지만, 현재 노벨상

연도	수상자	국가	업적
노벨 화학상			
1936	P.드베이어	네덜란드	1916년 X선을 이용해 분말형태로 된 고체의 결정구조를 연구할 수 있다는 사실을 밝힘으로써 구조를 잘 알 수 있는 결정을 얻는 데 필요한 어려운 단계를 없앴다.
1946	제임스 섬너 존 노스롭 웬델 스탠리	미국 미국 미국	1946년 최초로 효소를 결정으로 만들고 효소의 단백질의 특성에 관한 연구 순수형태의 효소 및 바이러스 단백질 제법
1958	프레드릭 생거	영국	인슐린 분자의 구조를 밝힘으로써 이후 단백질의 정체를 파악하는데 결정적 역할을 함
1962	존 C. 켄드루 막스 F. 페루츠	영국 영국	결정단백질의 X선해석이라는 분야를 새로이 개척하여 1958년 단백질 미오글로빈 결정의 개략적인 3차원 모델을 제출하고 2년 후 완전한 분자구조를 밝혀냄
1971	게르하르트 헤르츠베르크	캐나다	자유 라디칼의 전자구조와 기하학적 구조 결정에 관해 연구
1975	J. W. 콘퍼스 블라지미르 프렐로그	영국 스위스	분자와 착물내에서 원자의 공간적인 배열에 따라 화합물의 성질이 어떻게 달라지는가를 연구하는 입체화학 연구
1976	윌리엄 N. 립스کم	미국	보란의 구조
1980	폴 버그 윌터 길버트 프레드릭 생거	미국 미국 영국	최초로 혼성 DNA 제조 DNA 구조의 생물학적, 화학적 분석법 개발
1985	헤르트 A. 하우스프르먼 제롬 카를	미국 미국	X선을 회절시킬 때 형성되는 회절무늬로부터 화합물의 분자구조를 추론하는 수학적 방법 개발
노벨 생리학·의학상			
1962	프랜시스 H.C. 크릭 제임스 D. 왓슨 모리스 윌킨스	영국 미국 영국	다옥시리보핵산(DNA)의 분자구조 발견



피터 김 박사 데니스 최 박사 김성완 교수 김성호 교수
현재 노벨상에 가장 가까운 한국인 과학자들은 대부분 해외에서 결정학 분야의 생명공학을 연구하는 분들이다.

에 가장 가까운 한국인 과학자들은 대부분 해외에서 활동하고 있는 결정학 분야에서 생명공학을 연구하는 분들이다. 대표적으로 에이즈 바이러스의 침투원리를 밝혀낸 미국 Merck사 R&D 사장인 피터 김 박사, 뇌졸중 치료의 길을 연 미국 Merck사 신경과학담당 부사장 데니스 최(최원규) 박사, 치료

유전자 전달을 연구하는 전 유태대학교 김성완 교수(현 한양대학교 생명공학과 석좌교수), 세포내 신호전달체계의 비밀을 밝힌 미 국립보건원(NIH)의 이서구 박사, t-RNA의 구조를 밝혀낸, 단백질 구조 결정 분야의 세계적 권위자 캘리포니아주립대학교 김성호 교수 등이 꼽힌다.

이 분야를 비롯한 다양한 분야에서 세계적인 석학이 많이 나와 서구에서 독점하고 있는 노벨상이 우리 한국인들에게도 돌아올 것으로 기대하고 있으며, 특히 결정학은 21세기 미래산업의 기반을 튼튼히 하는 기초학문이므로 한국의 첫번째 노벨상 수상자가 결정학 분야에서 나올 가능성은 매우 크다. **ST**



글쓴이는 서울대학교 화학과에서 박사학위를 받았다. 미국 피츠버그대학교 교환교수를 지냈으며, 현재 한국결정학회 회장을 겸임하고 있다.