

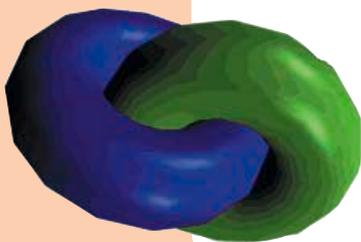
화학 합성의 신기원 '보로미아 고리'

글_이주영 연합뉴스 기자 yung23@yna.co.kr

과학 분야에서 과학과 예술의 경계를 넘나드는 대표적인 분야 중 하나가 바로 화학 합성이다. 1960년대 바서만(E. Wasserman)과 페더슨(C.J. Pederson)의 카테네인(catenane)합성, 우드워드(R. Woodward) 등의 비타민 B₁₂ 합성, 최근 활발히 연구되는 로탁세인(rotaxane) 등은 모두 합성의 예술품으로 꼽힐 만하다.

로스앤젤레스 캘리포니아대(UCLA) 연구진이 최근 여기에 화학 합성의 역사에서 걸작으로 기록될 만한 또 하나의 작품을 내놨다. 오랫동안 과학자들을 괴롭혀온 과제 중 하나인 보로미아 고리(Borromean Rings)를 전합성 방법으로 합성해낸 것이다. UCLA의 캘리포니아 나노시스템 연구소 소장이자 나노시스템과학 프레드 카블리 석좌교수인 프레이저 스토다트(Fraser Stoddart) 교수 연구진이 바로 주인공들이다. 이들은 최근 과학저널 '사이언스(5월 28일자)'에 발표한 『분자 보로미아 고리(Molecular Borromean Rings)』 논문에서 고리형 분자 3개가 서로 아름답게 얽혀 있는 보로미아 고리를 합성하는 데 성공했다고 발표했다.

카테네인



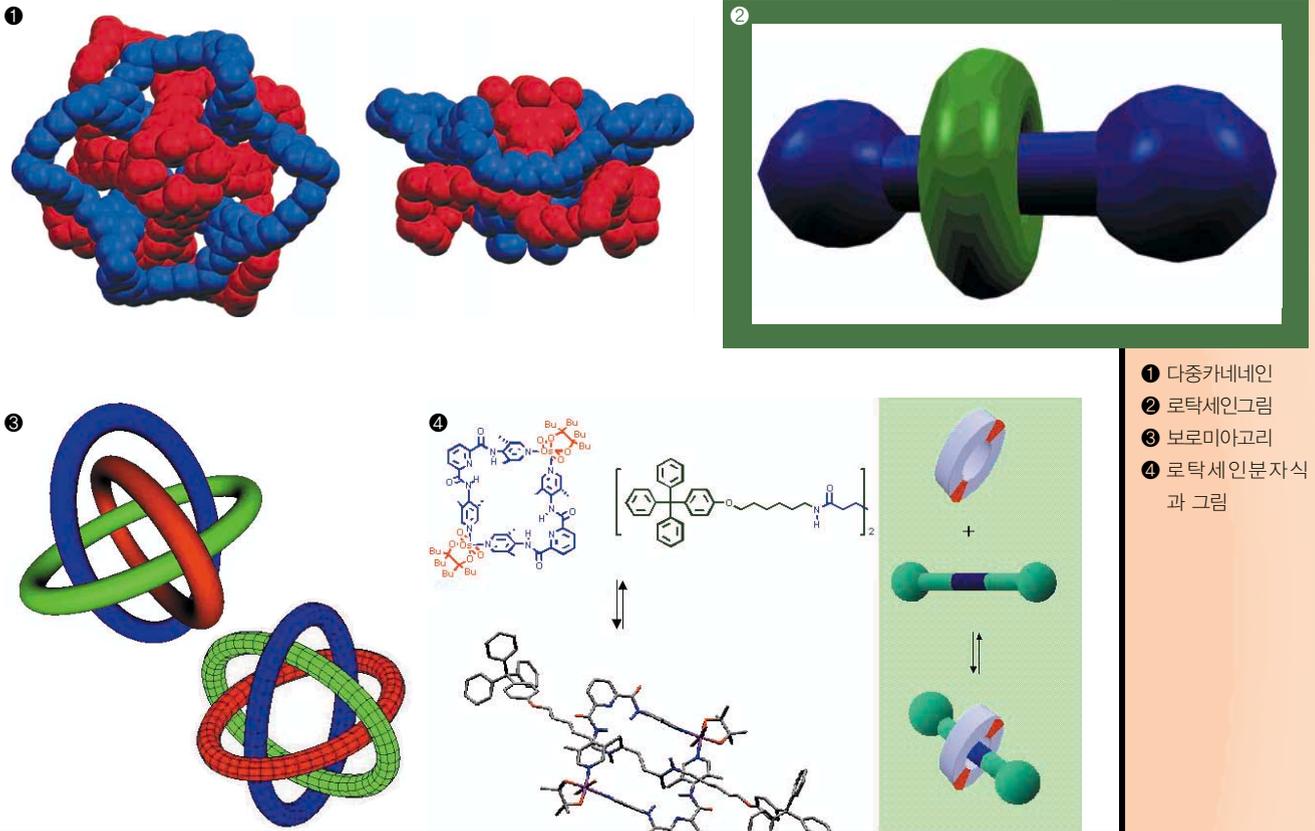
과학을 넘은 예술 수준의 나노과학

사실 보로미아 고리는 인터넷 검색 엔진으로 찾아보면 결과가 2천개 이상 나올 정도로 널리 알려져 있는 구조지만 과학 분야보다는 역사나 예술

등에 더 어울리는 형태라고 할 수 있다. '보로미안'이라는 말은 '보로미아(Borromea)'라는 이탈리아 귀족 가문에서 유래된 것으로 보로미아 고리는 세 개의 고리가 서로 얽혀 있으면서 하나가 끊기면 나머지 두 개도 자동적으로 풀어지는 독특한 구조를 가지고 있다. 서로 얽혀 있는 3개의 고리는 14세기 이탈리아 스포르짜 가문과 비스콘티 가문, 보로미아 가문 등 3개 가문의 결속을 상징하고 있다.

보로미아 고리는 역사적으로 15세기 보로미아 가문에서 갑옷 위에 입던 덧옷의 문장에 처음으로 등장하며, 지금도 보로미아 가문 소유인 이탈리아 북부 마지오레 호수내 3개의 섬에 있는 건물들에는 이 문장이 남아있다. 보로미아 고리는 또 중세 기독교에서는 삼위일체의 상징으로 쓰이기도 했으며, 고대 그리스·로마신화와 북구 게르만 민족의 신화에도 등장한다.

스토다트 교수는 "이것이 바로 나노 과학이지만 그 이상의 의미가 있다"며 "보로미아 고리는 수학, 물리, 화학뿐만 아니라 예술과 신학, 신화, 문장학(紋章學)에 널리 퍼져 있다"고 말했다. 그는 또 "보로미아 고리를 완전 합성 분자 형태로 구현하는 것은 형상화학에서 가장 야심 차고 어려운 목표로서 일종의 '고르디아 매듭' 같은 것이었다"고 설명했다. 수십 년 동안 과학자들을 애태웠던 보로미아 고리 합성의 성공이 알렉산더 대왕이 고르디아 매듭을 칼로 내리쳐 푼 것과 같은 발상의 전환이 있었기 때문에 가능했음



① 다중카네네인
 ② 로탁세인그림
 ③ 보로미아고리
 ④ 로탁세인분자식
 과 그림

을 암시하는 말이다.

고르디아 매듭은 그리스 신화에 나오는 이야기로 프리기아의 왕 고르디우스(황금의 손 미다스의 아버지)의 수레 채에 매어진 시작과 끝을 알 수 없는 매듭이다. 이 매듭을 푸는 사람은 아시아(당시의 세계)의 지배자가 된다는 신의 예언이 있었는데, 먼 훗날 원정 도중 이곳을 지나던 알렉산더 대왕이 매듭을 풀기 위해 고민하다 칼로 내리쳐 끈을 끊고 매듭을 풀었고, 그 후 실제로 아시아의 지배자가 됐다.

직경 2.5nm, 부피 0.25nm³ 보로미아 고리

이 연구에서 고르디아 매듭을 푼 사람은 1999년 당시 스토다트 연구진에 대학원생으로 참여했으며 지금은 UCLA 화학 및 생화학 과 강사 겸 연구원으로

재직중인 스튜어트 캔트릴(Stuart Cantrill) 박사였다. 그는 당시 동료 대학원생으로 컴퓨터 천재인 앤터니피즈(Anthony Pease)의 도움으로 6개의 금속 원자 형판 주위로 세 개의 똑같은 고리가 서로 얽혀 있는 구조를 형성하는 게 가능함을 보여주는 모델을 만들었다. 캔트릴 박사는 “그 모델은 너무나 완벽하고 아름다워 보였다”며 “우리는 모두 컴퓨터 화면을 보면서 그것이 성공할 수밖에 없다고 생각했다”고 당시를 회상했다.

그러나 스토다트 교수는 “재료들을 컴퓨터상에서 서로 결합시키는 것과 그것들을 실험실에서 화학적으로 실제 합성하는 것은 별개의 문제”라며 “6개의 조각으로 된 3개의 세트 중 2개는 구입이 가능했지만 나머지 하나는 복잡한 7단계의 합성을 통해 만들어

야만 했다"고 말했다.

켄트릴과 피즈는 2001년 마지막 합성 단계를 남겨 놓은 채 대학원을 졸업했고 남은 연구진은 3년여의 고된 작업 끝에 직경이 2.5nm이고 부피가 0.25nm³인 아름다운 작품을 이 세상에 내놨다. 사이언스 편집진은 이 논문에 대한 자체 보도자료를 통해 "복잡하고 서로 얽혀 있는 분자를 합성하는 화학이 놀랍고 새로운 차원에 도달했다"고 평가했다. 일부 과학자들은 이쯤 되면 과학과 예술은 경계가 모호해진다고 말한다.

노벨화학상 수상자인 로얼드 호프만 박사는 그의 저서 『같기도 하고 아니 같기도 하고』에서 한 개의 수소 원자와 결합되어 있는 탄소 원자 8개가 정육면체 모양을 이루고 있는 분자인 큐베인(cubane) 합성

을 찬양하며 "합성은 화학의 핵심이 되는 멋진 활동으로서, 합성이 있기 때문에 화학은 예술에 가깝게 된다"고 말하기도 했다. 그는 또 "합성은 창조적이기도 하면서 분자를 만드는 전략을 찾아내는 컴퓨터 프로그램을 만들 수 있을 정도로 상당한 논리성을 가지고 있기도 하다"며 "창조는 좋은 것이다. 인간의 이런 창조도 역시 감동적"이라고 말했다.

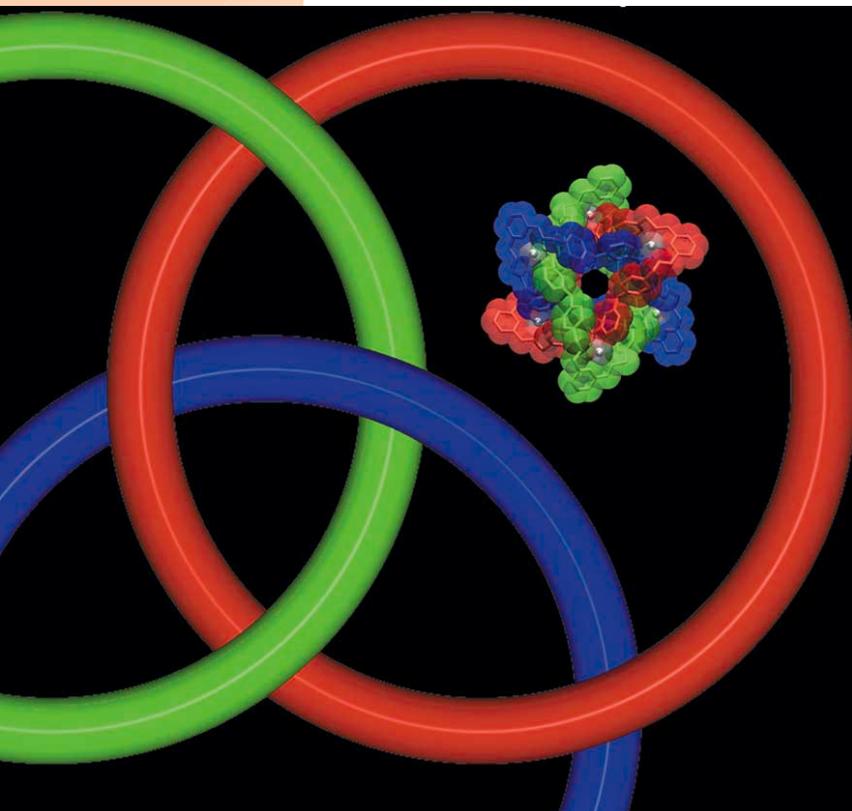
그러나 이런 연구가 단순히 과학적 가능성을 실험하고 예술적 아름다움을 추구하기 위해 이뤄지고 있는 것은 아니다. 분자수준에서 이뤄지고 있는 이런 연구들이 바로 최근 미래의 과학으로 각광받고 있는 나노과학의 핵심이기 때문이다. 실제로 보로미아 고리보다 훨씬 먼저 합성된, 얽혀 있는 고리형 분자인 카테네인(catenane)과 로탁세인(rotaxane)은 컴퓨터 논리회로나 분자 기계 등에 활용하기 위한 연구가 세계적으로 활발하게 진행되고 있다.

카테네인은 두 개의 고리가 서로 얽혀 있는 구조이고 로탁세인은 아령처럼 양쪽 끝의 부피가 큰 구조체 중간에 고리형 구조체가 들어 있어 빠져 나올 수 없는 모양을 한 분자이다. 이들 분자들은 특이한 형태로 인해 지금까지 알려진 분자들과는 다른 독특한 전기적 특성을 띠거나 분자수준에서 특이한 기계적 성질을 보여주고 있어 컴퓨터와 분자 기계 등에 활용이 가능할 것으로 기대되고 있다.

카테네인, 로탁세인에 이은 화학합성의 걸작품

최근 미국 컴퓨터 업체 휴렛-패커드(HP)의 과학자들은 카테네인 분자를 이용해 바이러스보다 작은 16비트 회로를 만드는 것을 검토중이라고 밝혔으며, 로탁세인으로 분자칩을 만들 수 있다는 연구결과도 나왔다.

UCLA와 휴렛-패커드 연구진은 1999년 '사이언스'에서 로탁세인 분자를 이용한 분자칩을 만들었다는 연구결과를 발표, 분자컴퓨터의 실현이 시간문제



보로미아 고리 적녹청 원그림



임을 보여줬다. 분자칩은 분자를 이용해 컴퓨터의 논리연산을 처리하는 것으로 현재 최첨단이라는 평가를 받으며 정보화 사회의 엔진 역할을 하고 있는 실리콘 칩이 소형화의 한계에 직면하고 있는 반면 분자칩의 발전 가능성은 거의 무한하다고 할 수 있다.

이들이 만든 분자칩은 아령 사이를 오가는 고리형 구조체를 이용해 논리회로를 구성한다. 즉 전기 흐름의 유무에 따라 로탁세인의 아령구조가 연결되거나 끊기면서 전자가 고리형 구조체를 타고 맞은편으로 건너갈 수도 있고 건너가지 못할 수도 있는데 이를 논리회로에 이용한 것이다. 지금은 단순히 데이터를 저장하는 원시적인 수준이지만 연구진은 앞으로 이 분자칩을 활용한 컴퓨터가 펜티엄급 컴퓨터보다 1천억배 이상 빠르게 정보를 처리할 수 있을 것이라고 전망했다.

또한 실리콘칩의 정보 저장량은 물리적 구조에 의존하기 때문에 극히 제한적일 수밖에 없지만 이 분자칩은 하나의 논리회로 크기가 분자 수준으로 매우 작고 전기부호를 이용하기 때문에 저장량을 거의 무한대로 늘릴 수 있을 뿐 아니라 전력소모도 거의 없어 분자칩 컴퓨터는 실현되지만 하면 말 그대로 꿈의 컴퓨터인 셈이다.

또 영국 워릭대학(Warwick) 데이비드 A. 레이(David A. Leigh) 교수와 이탈리아 볼로냐대학 프란

체스코 제르베토(Francesco Zerbetto) 교수 연구팀도 2000년 로탁세인을 교류 전기장에 놓으면 중간 고리 구조가 회전하며 그 회전 속도가 교류 전기장의 세기에 따라 달라진다는 연구결과를 내놓았다. 이들의 발견은 분자 수준의 회전식 십자문이나 분자 모터 같은 나노미터 크기의 분자 동력장치를 만드는 분자 기계 개발 분야의 발전을 가져올 수 있는 획기적인 연구결과로 평가되고 있다.

화학 합성의 예술품인 카테네인이나 로탁세인이 당장 인류의 생활수준을 향상시켜줄 기술이나 제품으로 등장할 것으로 전망하기는 어려울지도 모른다. 그러나 스위스 취리히대학 유기화학연구소의 시겔(J. S. Siegel) 교수는 ‘사이언스’ 같은 호에 실린 리뷰논문에서 지금이 바로 이들 분자들의 응용 가능성을 적극 검토할 때라고 강조했다. 그는 서로 얽힌 구조의 분자를 합성하는 연구의 역사와 미학, 과학적 측면을 논하면서 “화학은 연구 대상을 스스로 창조하는 과학”이라며 “그렇기 때문에 어떤 종류의 물질 합성법이 정복돼야만 그 물질에서 나타나는 새로운 화학적 현상의 활용 가능성을 밝혀낼 수 있다”고 지적하고 “형상화학은 이제 화학자들이 복잡한 형태의 분자를 자신있게 설계하고 합성할 수 있는 단계에 도달했다”며 “이는 이들 분자들의 잠재적 기능을 개발할 때가 무르익었음을 의미한다”고 말했다. ⑤

- ① 이탈리아 매지오레섬
- ② 보로미아 문장