

# '20세기 화학' 연구와 교육의 전환점

라이너스 폴링(Linus Pauling)의 '화학결합의 본질(The Nature of the Chemical Bond)'

글\_ 박범순 박사 미국보건연구소 bumsoonpark@yahoo.com



오리건 농과대학을 졸업할 당시의 폴링, 1922년

## 기획연재순서

- 1 닐스 보어
- 2 하이젠베르크
- 3 왓슨과 크릭
- 4 윌리엄 해밀턴
- 5 라이너스 폴링

**수**소는 두 개의 원자가 결합하여 한 분자를 이루는데, 헬륨은 왜 원자 한 개의 상태로 존재할까? 탄소가 네 개의 수소 원자와 결합하면 왜 정사면체 구조의 메탄이 될까? 여섯 개의 탄소와 여섯 개의 수소가 이루어진 벤젠은 왜 정육각형의 모습을 하고 있으며, 왜 일반 탄소화합물과는 다른 독특한 물리화학적 성질을 가지고 있을까? 화학결합은 왜 일어나며 그 본질은 무엇일까?

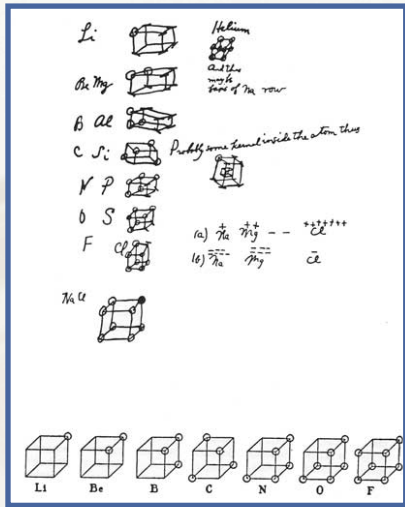
분자의 생성, 구조, 성질을 설명하는데 핵심적인 개념으로 '화학결합'이 사용되기 시작한 것은 19세기 후반 들어서였다. 독일의 케쿨레(August Kekule), 영국의 쿠퍼(Archibald Couper), 러시아의 버틀러로프(Aleksandr Butlerov) 등은 화학 원소가 다른 원소와 결합할 때 정수로 나타낼 수 있는 일종의 결합용량이 있고 이를 '원자가(valence 혹은 valency)'라 불렀다. 예컨대 수소의 원자가는 1이고, 산소는 2, 질소는 3, 탄소는 4이다. 그리고 그들은 원소들간의 화학결합을 직선으로

나타내고 이를 바탕으로 분자들의 구조식을 그리기 시작했다. 이어 프랑스의 르벨(Joseph Achille Le Bel)과 네덜란드 출신의 반트 호프(Jacobus H. Van't Hoff)는 유기화합물의 구조식을 이차원 평면에 서뿐만 아니라 삼차원 입체로 나타낼 것을 제안했고, 스위스의 화학자 베르너(Alfred Werner)는 금속이 섞인 무기화합물의 복잡한 입체구조를 그리는데 성공했다.

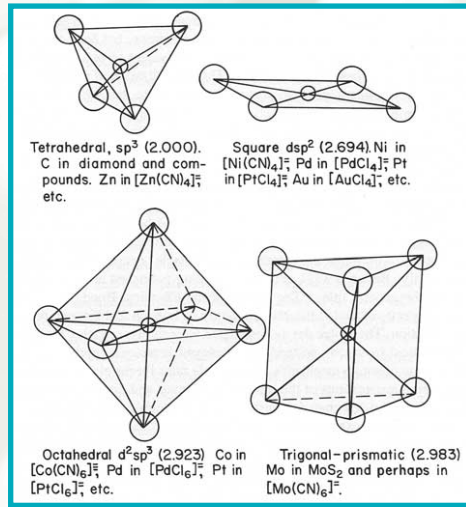
## 화학결합의 이론적 설명

분자의 구조식은 실로 여러 면에서 유용했다. 화학공업의 눈부신 발전과 함께 기하급수적으로 늘어나는 새로운 화합물의 분류에 구조식은 거의 필수적이었고, 특히 분자를 구성하고 있는 원소들의 종류와 개수는 같으나 그들의 공간적 배치가 다르기 때문에 전혀 다른 광학적 성질 또는 화학 반응성을 보이는 이성질체의 존재를 설명하는데 유용했다. 유기화합물에서 흔히 볼 수 있는 이중결합, 삼중결합도 손쉽게 나타낼 수 있었다.

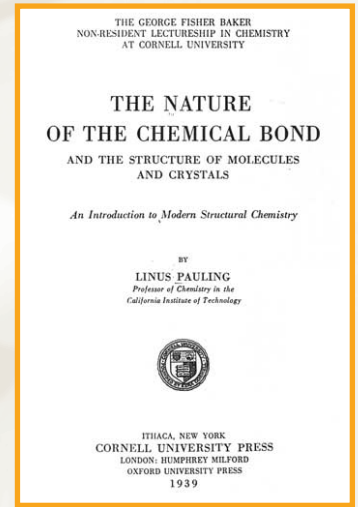
그러나, 직선으로 간단히 나타낸 화학결합이 과연 무엇을 의미하는지, 거기에 어떤 종류의 힘이 작용하고 있는 것인지, 왜 원소들은 각기 특정한 원자가를 갖는



원자의 구조에 관한 루이스의 1922년 노트



분자의 입체구조에 대한 양자화학적 설명. 폴링의 '화학결합의 본질' 논문에서, 1932년



폴링의 책, 『화학결합의 본질』, 1939년

지를 비롯한 화학결합의 본질에 관한 근본적인 의문들은 여전히 베일에 가려져 있었다. 이러한 의문들은 20세기초 물리학에서의 새로운 발견과 이론적 발전에 자극을 받은 과학자들에 의해 연구되기 시작했다. 무엇보다도 먼저, 원자가 더 이상 쪼개질 수 없는 존재가 아니라 양전하를 가진 원자핵과 음전하를 가진 전자로 구성되어 있다는 사실과 전자가 원자핵 주위의 어떤 궤도로 돌고 있다는 이론은, 화학결합에 있어서 전자가 어떤 역할을 담당하고 있을 것이라는 생각을 하게 만들었다. 그리고 전자가 여러 궤도 사이를 이동하면서 방출하거나 흡수하는 에너지 관계를 잘 설명해주는 양자이론의 발전과 함께, 화학결합의 이론적 분석이 가능할 것이라는 희망도 커졌다. 실제로 양자이론의 주창자인 덴마크의 보어(Niels Bohr)는 1913년 수소 원자의 구조와 복사선 방출에 대한 연구를 마친 뒤 곧 비슷한 방법으로 수소 분자에서 전자의 움직임을 분석하기 시작했다. 보어에 따르면, 수소 분자의 두 전자들은 화학결합을 이루고 있는 축 주위를 빙글빙글 돌고 있으며 에너지를 받거나 방출하면 크기가 다른 궤

도로 이동했다. 보어의 분자 모델은 참신한 면이 많았으나 이것을 수소보다 조금 크거나 복잡한 분자들에 적용하기에는 힘들었다.

한편, 미국 버클리대의 화학자 루이스(G. N. Lewis)는 보어의 것과는 조금 다른 원자와 분자 모형을 제시했다. 루이스에 따르면, 보어의 원자 모형에서처럼 원자핵은 마치 양파의 껍질같이 서로 다른 에너지층으로 겹겹이 싸여있고, 각껍질마다 전자를 안정되게 최대한 수용할 수 있는 개수는 한정되어 있었다. 예컨대 핵에서 가장 가까운 껍질은 전자 2개, 그 다음 껍질은 전자 8개이다. 그러나, 보어와는 달리 루이스는 이 전자들이 궤도를 따라 움직이는 것으로 보지 않고 껍질의 어느 구석(가령 정육면체의 8개 꼭지점들)에 고정되어 있는 것으로 생각했다. 그리고, 원자와 원자 사이에 만들어지는 화학결합은 바깥 껍질에 있는 전자를 서로 공유하거나 한쪽 원자로 완전히 옮겨져서 생긴 결과라고 주장했다.

전자를 공유하거나 옮겨진 결과로 전자 쌍을 얻으면 화학결합이 이루어진다는 루이스 이론은 여러 장점이 있었다. 먼저 수

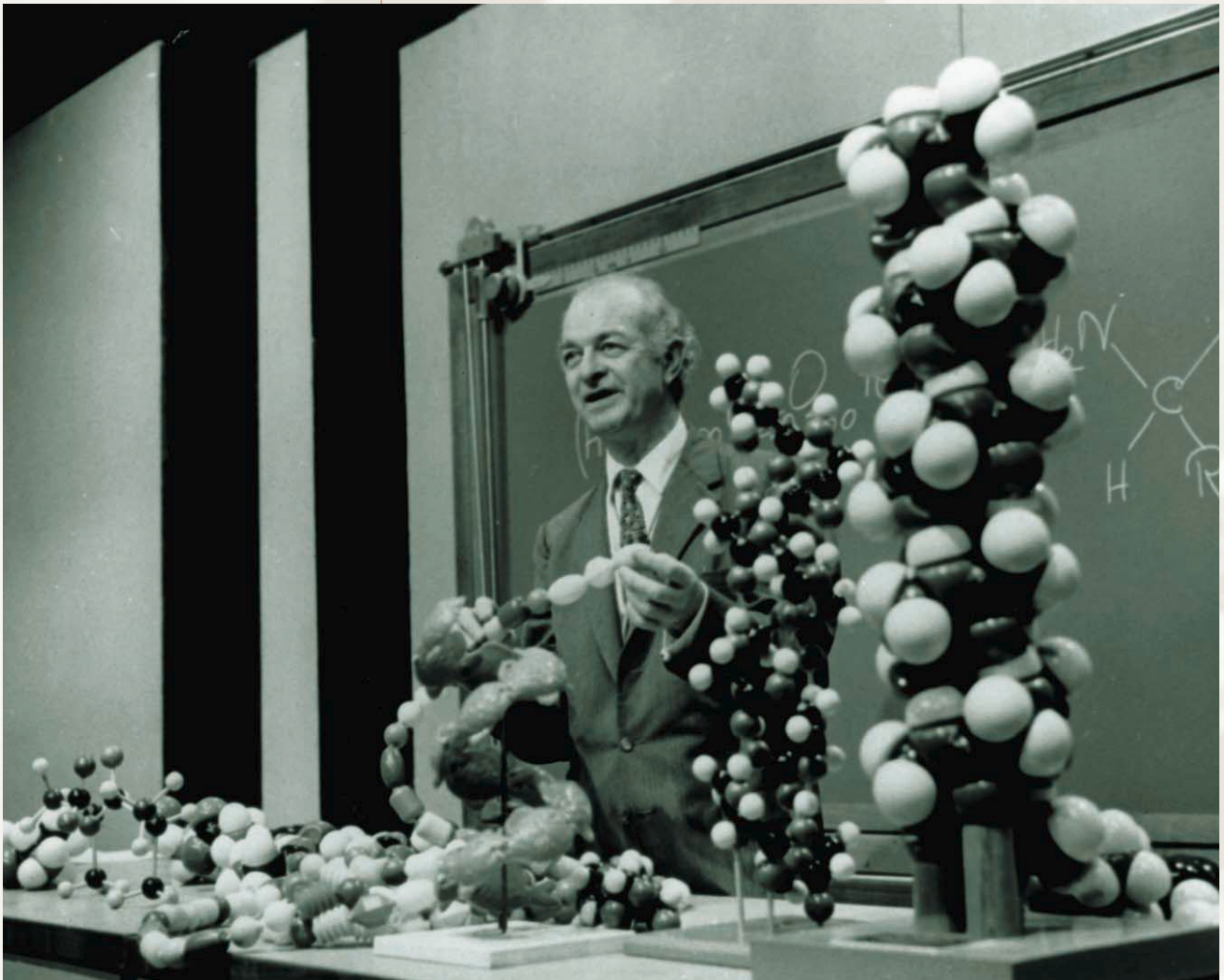
소 분자와 같이 똑같은 원자로 이루어진 분자의 화학결합과 염화소듐과 같이 극성을 띠는 분자의 화학결합이 한 이론체계 안에서 설명되기 시작했다. 다시 말해 공유결합과 이온결합의 차이는 전자를 얼마나 공유하는지 혹은 얼마나 이전시키는지와 같은 정도의 차이에 불과하다는 것이었다. 그리고, 루이스는 한 원자의 가장 외부 껍질에 있는 전자를 점으로 나타내어서 전자의 공유와 이동을 손쉽게 알아볼 수 있게 해 주었다. 이 때부터 루이스의 점식은 화학자들의 편리한 도구로 사용되기 시작했다.

보어의 모형이 전자의 움직임을 수학적 으로 계산하기 위한 것이라면, 루이스의 모형은 공간에 고정되어 있는 전자가 화학결합에 어떻게 참여하는가를 설명하기 위한 것이었다. 물리학자들의 입장에서 본다면 정적인 루이스의 모형은 허술하기 짝이 없었다. 그러나 반면 화학자들의 입장에서 본다면 동적인 보어의 모델은 쓸모가 거의 없었다. 이 두 모형의 차이, 좀더 정확히 말해 화학결합을 바라보는 물리학적 전통과 화학적 전통의 차이는 1920년대 중반 양자역학의 출현과 함께

해소되기 시작했다. 슈뢰딩거(Erwin Schrödinger), 하이젠베르크(Werner Heisenberg) 등 이론물리학자들은 보어의 양자이론의 한계점을 지적하고, 원자 내부의 역학 관계를 다룰 수 있는 새로운 이론체계를 정립하여, 수소보다 복잡한 원자와 분자를 다룰 수 있는 길을 열어주었다. 실제로 1927년 독일의 물리학자인 하이틀러(Walter Heitler)와 런던(Fritz London)은 양자역학을 사용하여 수소 분자의 결합에너지와 결합길이를 계산하는

데 성공했고, 여기에 자극을 받은 젊은 과학자들이 양자역학을 더 복잡한 시스템에 적용하는 일에 달려들었다. 이들은 대부분 탄탄한 수학지식의 배경을 가진 이론물리학자들이었으나, 소수의 화학자들도 있었다. 그 중의 하나가 캘리포니아 공과대학(칼텍) 출신의 폴링(Linus Pauling)이었다.

**참다운 스승 밑에 뛰어난 과학자가 나온다**  
폴링의 성장기와 교육과정을 살펴보면,



여러 분자 모형을 쌓아놓고 강의하는 폴링, 1960년대

개인의 투철한 의지와 불굴의 노력이 본인의 능력개발에 얼마나 중요한 요소인지 알 수 있으며, 이에 못지 않게 학생의 잠재된 능력을 발굴하고 인도해주며 후원자 역할을 하는 스승의 영향이 얼마나 큰지도 알 수 있다. 폴링은 1901년 오리건 주의 포틀랜드에서 태어났다. 폴링의 아버지는 정규 교육을 받지 못하고 자수성가한 약제사였고, 어머니는 서부개척자 집안 출신이었다. 비교적 순탄하던 폴링의 어린 시절은 9세 때 아버지가 돌아가시면서 어려움에 처하게 되었다. 어머니는 악성빈혈에 시달리면서도 하숙을 쳐야 했고 폴링은 어린 두 여동생을 돌보아야 할 입장이 되었다.

틈틈이 책읽기와 광물 모으기에 취미를 붙여 생활하던 폴링은 14세 때에 우연히 친구 집에서 화학놀이기구 세트를 가지고 놀면서 화학반응에서 나오는 연기와 냄새, 용액 색깔의 변화 등 신비로운 화학의 세계에 흥미를 갖게 되었다. 폴링은 집의 지하실 한 구석에 간단한 실험기구를 갖추고 실험을 하는 한편 화학관련 책들을 읽기 시작했다. 폴링의 관심과 재주를 유심히 본 고등학교 과학 선생님은 그에게 특별지도를 해주었고, 이 도움으로 폴링은 16세 때에 오리건 농과대학(현 오리건 주립대학)에 입학했다. 가정형편상 돈을 벌며 공부를 해야했던 폴링은 수업조교와 개인교습 등을 시작했고, 그의 능력을 높이 산 화학과 교수들은 학부생이던 그에게 일반화학 수업을 맡기기도 했다.

1922년 대학을 졸업한 폴링은 칼텍의 박사과정에 진학했다. 로스앤젤레스 근처의 소도시인 패서디나에 위치한 칼텍은

그 전신인 트루프공과대학(Throop College of Technology)에서 이름을 바꾼 지 채 10년도 안됐지만, 서부의 MIT가 되겠다는 야심하에 발전을 거듭하고 있었다. 이 발전의 주역은 미국의 대표적 천문학자인 헤일(George Ellery Hale)이었다. 헤일은 개인적으로 뛰어난 과학자이자 동시에 영향력 있는 과학행정가이기도 했다. 제1차 세계대전 중 헤일은 미국과학원 안에 정부와 과학계 사이의 긴밀한 협조를 담당할 기구인 국가연구위원회를 만들어 전쟁 중 이 기구를 이끌었다. 그리고 전쟁 후에는 기름방울 실험으로 유명한 시카고대학의 물리학자 밀리칸(Robert Millikan)과 MIT대학의 물리화학자인 노이즈(Arthur Noyes)를 영입해 물리와 화학에 기초한 공학의 프로그램을 새롭게 만들어갔다. 1920년대 후반에 이르러, 박사과정 프로그램으로 수학, 생물학, 지질학, 항공공학 등이 추가되면서 칼텍은 기초과학과 공학의 명문으로서의 자리를 공고히 다졌다.

폴링을 칼텍의 박사과정에 선발한 노이즈는 당시 미국 화학계의 중진이자 열역학 분야에서는 꽤 알려진 화학자였으나, 그의 인생에서 가장 중요한 업적은 다름이 아니라 폴링을 발견한 일이었다. 그는 폴링이 당시 선진 기술인 X선 결정학을 배우도록 추천하였고, 1925년 졸업 후 구겐하임 장학금을 받고 유럽에서 양자역학을 배울 수 있도록 도와주었으며, 1927년 유럽에서 돌아온 폴링을 칼텍의 화학과 교수로 채용하고, 1937년에는 폴링에게 학과장 자리를 물려주었다. 폴링에 대한 노이즈의 믿음은 실로 대단했다. 일화에 따르면 그는 칼텍의 재정적 지원의 상당 부분을 담당하고 있던 록펠러 재단의 임

원에게 다음과 같이 말했다고 한다. “만일 (칼텍의) 화학과가 모두 없어진다 하더라도 폴링만 남아 있다면, 여전히 세계에서 가장 중요한 화학과의 하나로 존재할 것입니다.”

## 공명과 혼성화

박사 후 연구원 기간 중 폴링은 뮌헨에 있는 조머펠트(Arnold Sommerfeld)의 연구소에서 많은 시간을 보냈지만, 코펜하겐의 보어, 괴팅겐의 보른(Max Born), 취리히의 슈뢰딩거 등을 차례로 방문하면서 유럽의 이론물리학자들을 많이 만났고, 양자역학의 출현을 직접 목격하는 행운을 가졌다. 칼텍으로 돌아온 후 폴링은 마치 계시를 받은 전도사처럼 “화학도 곧 양자역학이 만든 고속도로를 달릴 날이 올 것”임을 학생들과 일반 대중을 상대로 수시로 강연했다. 그가 그토록 확신 있게 본 화학의 미래는, 화학이 물리학에 완전히 환원되어 오로지 수치계산만을 근거로 하는 학문이 되는 것이 아니라, 화학의 기본 개념들이 물리학의 기본 원리들에 합당하고 충실하게 설명되는 가운데 화학의 이론을 발전시키는 것을 의미했다. 따라서 그는 루이스의 전자쌍, 전자공유와 같은 개념들이 양자역학을 바탕으로 설명될 수 있는 단초를 발견하고 기뻐했던 것이다.

그 중요한 단초는 하이젠베르크가 1926년 헬륨의 원자를 다루면서 도입했던 ‘공명(resonance)’이란 개념이었다. 헬륨의 선스펙트럼을 분석하면 마치 두 종류의 헬륨이 함께 존재하는 것처럼 서로 다른 두 가지 스펙트럼이 나타나는데, 사실 이 문제는 오랫동안 이론물리학자들

을 괴롭혀왔던 난제 중의 하나였다. 하이젠베르크는 이 문제의 해답을 헬륨이 갖고 있는 두 전자의 '구별불가능성(indistinguishability)'에서 찾았다. 전자에 무슨 표시를 해 놓은 것도 아니므로 한 원자내의 두 전자를 구별하는 일은 불가능한데, 파울리(Wolfgang Pauli)의 '배타원리'에 따르면 "두 전자는 어떤 상황에서도 같은 양자상태, 즉 똑 같은 세트의 양자수들을 가질 수 없으므로", 하이젠베르크는 두 가지 가능성을 상정했다. 한 가지는 두 전자의 스핀상태가 서로 다르고 나머지 양자수는 모두 같은 경우였고, 다른 한 가지는 두 전자의 스핀상태가 서로 같지만 다른 양자수 중 하나가 다른 경우였다. 이를 고려해서 헬륨의 문제를 양자역학에 따라 풀다보니 마치 고전역학에서 소리 공명이나 전자와 공명을 다룰 때와 비슷한 수학식이 나왔고, 두 가지 시스템의 에너지 차이를 구할 수 있었다. 따라서 하이젠베르크는 이 두 시스템이 '공명의 관계'에 있다고 말했다.

1920년대말 폴링은 수소와 같이 두 원자로 이루어진 분자뿐만 아니라 메탄과 같이 여러 개의 원자로 구성된 분자를 다루는 방법을 모색하였다. 여기서 어려웠던 점은 결합에너지와 결합길이 뿐만 아니라 화학결합의 방향성, 즉 결합각도 설명해야 한다는 것이었다. 폴링은 이를 전자 궤도함수의 '혼성화(hybridization)'라는 개념을 도입해 풀었다. 예를 들어 메탄이 정사면체의 구조를 가지는 이유는, 그 중심에 있는 탄소의 주위를 돌고 있는 전자들 중 2s의 궤도함수를 가지는 전자 두 개와 2p의 궤도함수를 가지는 전자 두 개가 서로 혼성하여 에너지 상태가 똑같은 새로운 궤도함수(sp<sup>3</sup>)를 만들고 이 함수는 중심에서 정사면체의 꼭지점을 향한 모습을 한다는 것이었다. 이렇게 메탄의 문제를 풀고 나서 자신감을 가진 폴링은 공명과 혼성화의 개념을 이용하여 다양한 화합물의 구조와 성질을 설명하기 시작했다. 이 연구의 성과는 1931년에 시작해서 1933년까지 '화학결합의 본질'이라는 공통의 제목을 가진 일곱 편의 논문에 나뉘어 실렸다. 예컨대 일산화탄소의 경우 탄소와 산소 사이의 화학결합이 이중결합인지 삼중결합인지 화학자들 사이에 논란이 많았는데, 폴링은 이를 이중결합의 구조와 삼중결합의 구조가 서로 '공명'하는 구조라고 설명했다. 마찬가지로 수십 년간 논란이 거듭되던 벤젠의 구조도 단일결합과 이중결합을 섞어서 그릴 수 있는 다섯 가지의 대표적 구조가 서로 '공명'하는 것이라고 설명했다. 그리고, 금속이 섞인 무기화합물의 복잡한 구조도 금속이 바깥 껍질에 있는 전자의 궤도함수의 혼성화를 가지고 설명했다.



1962년 백악관 앞에서 반핵 시위를 하는 폴링



폴링의 노벨 화학상(1954년)과 평화상(1962년)

폴링이 공명 개념에 주목한 이유는 이를 다른 경우에 확장 적용할 수 있다고 생각했기 때문이었다. 가령 하이틀러와 런던이 분 수소 분자의 경우에도 전자의 스핀 상태에 따라 두 가지 해, 즉 두 가지 에너지 시스템이 나왔다. 두 전자의 스핀이 서로 다른 경우에는, 수소 분자가 가장 안정적인 상태, 다시 말해 화학결합이 형성되는 상태를 가질 수 있는 반면, 전자의 스핀이 서로 같을 경우에는 그렇지 못했다. 스핀이 서로 다른 전자 두 개가 한 쌍을 이루면서 안정된 상태, 폴링은 바로 여기서 루이스의 전자쌍의 이론적 근거를 보았다.

## 일반화학 교과서의 변화

‘화학결합의 본질’이란 논문 시리즈가 출판됨과 동시에 폴링의 명성도 널리 알려지게 되었다. 1931년 30세의 나이로 칼텍의 정교수가 된 폴링은 2년 뒤 역대 최연소자로 미국과학원의 회원으로 선출되는 영예도 얻었다. 특히 폴링은 관심을 사로잡는 강의로도 유명했다. 풍부한 화학 지식, 전설적인 기억력, 정확한 표현력, 그리고 화학결합에 대한 깊은 이해를 바탕으로 그는 수많은 화합물들의 성질과 구조, 반응성 등을 흥미진진하게 강의할 수 있었다. 그리고, 그의 양자화학 강의도 인기 있었다. 폴링은 1935년 당시 박사 후 연구원이던 윌슨(E. Bright Wilson)과 함께 미국 최초의 양자화학 교과서인 ‘양자역학 입문, 화학에의 적용과 함께 (Introduction to Quantum Mechanics, with Applications to Chemistry)’를 저술하여 이 분야가 정착하는데 큰 공헌을 했다. 1937년 폴링은 코넬대학의 베이커 특별강의교수로 초빙되어 일년 동안 머물면서 화학결합에 관한 수업을 진행하였고 이 때 만든 수업 노트를 바탕으로 1939년 ‘화학결합의 본질’이라는 책을 출판했다. 흔히 20세기 화학의 최고의 걸작이라고 불리는 이 책은 다수의 외국어로 번역되어 오랫동안 전세계 화학자들의 필독서가 되었다.

폴링은 양자화학, 화학결합의 본질과 같이 특정 주제에 대해 고학년을 대상으로 하는 수업뿐만 아니라 대학 신입생들을 위한 일반화학 수업을 즐겨 했고, 늘 효과적인 교육방법의 개발에 대해 고민했다. 1941년 폴링은 자신의 일반화학 강의 노트를 등사하여 학생들에게 나누어주기

시작했으며, 이를 기초로 쓴 교과서, ‘일반화학’을 1947년에 출판했다. 이 책은 곧 한 해에 9천부 이상이 팔리는 베스트셀러가 되었다. 이전의 교과서들이 당량 계산, 이온의 성질연구, 열역학 법칙의 소개를 중심으로 화학을 소개한 것과는 달리, 폴링의 교과서는 원자, 분자의 구조와 화학결합의 종류 등을 중심으로 화학의 지식체계를 설명해나갔다. 이후의 화학교과서들은 거의 모두 이런 구조를 따랐고, 그런 이유로 폴링의 교과서가 화학교육을 ‘혁명적’으로 바꾸었다고 말한다. 예컨대 1959년에 출판된 한 일반화학 교과서는 서문에서 폴링의 관점을 그대로 전하고 있다: “화학은 물리과학에 속한다. 좀 더 넓게 말해, 화학은 분자 안의 원자들의 배치, 이들이 만드는 화학결합을 다룬다. 화학은 실험과학이지만 폭넓고 세련된 구조의 이론체계를 가지고 있다.”

## 학문의 경계를 넘어서

물리학과 화학의 경계를 자유롭게 넘나들던 폴링은 1935년 단백질의 구조와 성질을 탐구하면서 생물학, 의학 분야로 자신의 연구 대상을 넓혀갔다. 제2차 세계대전 중에는 폭발물, 면역화학에 관한 연구도 했다. 전쟁 후 이 분야에서 중요한 연구성과들이 나오기 시작했다. 1949년에 그는 세 명의 공동연구자와 함께 “‘낫모양(鎌形)의 적혈구 빈혈증, 분자 질병(sickle cell anemia, a molecular disease)’이라는 제목의 논문을 발표하여 의학계에 큰 반향을 일으켰다. 그들에 따르면, 흑인에게서 흔히 보이는 이 질병은 피에서 추출한 적혈구의 비정상적인 모양, 즉 분자구조의 변형에서 비롯되는 것

이었다. 그리고 곧이어 1950년대초 폴링은 단백질의 알파 나선구조를 밝혔고, 잘 알려진 대로 DNA의 구조를 규명하는 일에도 깊숙이 관여하고 있었다.

1954년 화학결합의 본질과 분자의 구조에 관한 연구로 노벨 화학상을 수상한 폴링은 비타민 C와 같이 몸에서 꼭 필요로 하는 분자들이 생체내에서 어떤 역할을 하는지, 그들이 정신병, 감기, 암과 같은 질병의 예방과 치료에 도움이 되는지 연구했다. 그리고, 냉전 중 미국과 소련이 경쟁적으로 핵무기를 개발하고 환경에 대한 영향을 고려하지 않은 채 핵무기를 시험하는 것을 보고, 과학자의 사회적 책임을 느껴 반핵 운동을 주도하였고, 이 공로로 1962년 노벨 평화상을 받았다.

1993년 92세의 나이로 세상을 떠날 때까지 폴링은 지칠 줄 모르는 연구와 대중강연 활동을 보였다. 20세기의 대표적 화학자로 수많은 난제를 해결했지만, ‘분자의 공명 구조의 본질’, ‘분자 질병’, ‘DNA의 삼중나선구조’, ‘비타민 C의 암 치료’, ‘과학자의 사회참여’ 등 그의 인생 행로에는 많은 논쟁이 따라 다녔다. “나는 세상을 이해하고 싶었습니다”, 어느 인터뷰에서 그가 밝힌 것처럼 폴링의 인생 목표는 과학으로 세상을 이해하고 이를 통해 사회에 공헌하는 일이었다. **SD**



글쓴이는 서울대 화학과를 졸업하고 과학사 및 과학철학 협동과정에서 석사학위를, 미국의 존스홉킨스 대학에서 박사학위를 받았다. 양자화학의 역사에 관한 다수의 논문을 썼으며, 현재 미국보건연구소(National Institutes of Health)에 근무하고 있다. 이 연구소의 역사에 관한 책을 쓰면서 의학과 과학의 발전에 대한 정부의 역할을 살펴보고 있다.