

조를 가진 경우는 없습니다. 당연히 내부 전자들의 선 스펙트럼이 관측된 적도 없습니다. 다만 한 가지 예상은 가능합니다. g오비탈이 f오비탈보다 더 많이 갈라져서 보다 넓은 영역에 퍼져있는 형태로 확인될 것이라는 점입니다.

아직 관찰된 적 없는 원소의 이름을 미리 정하지 않듯 g오비탈 역시 특별한 사유나 근거로부터 이름이 정해지지 않았습니다. 단순히 알파벳 순으로 나열한다면 f 다음에 g가 나오기 때문에, f오비탈의 다음 오비탈이라는 의미로 g오비탈이라고 부르고 있습니다. 앞으로 발견될 원자번호 118번 이상의 원소들은 바로 이 g오비탈이 유효하게 작용할 것입니다.

g오비탈 다음에 오는 오비탈의 이름은 아마도 h오비탈이 될 가능성이 높습니다. 보통 원자가 보유한 전자의 상태를 집약적으로 표현하기 위해 ‘항 기호(Term symbol)’라는 기호 표현 방식을 사용하는데, 여기서 이미 오비탈과 맞춰 S, P, D, F의 기호를 사용하고 있고, G, H, I 등 이후의 기호들도 알파벳 순으로 이미 사용하고 있기 때문입니다.

Q

원자끼리 사중결합을
형성할 수 있나요?

26



원자들이 모여 화합물을 만드는 과정에서 어떤 방식으로 얼마나 강하게 서로 연결될 수 있는가는, 그 물질의 안정성과 특성을 결정짓는 매우 중요한 요소 중 하나입니다. 이를 예측하기 위해 우리는 원자의 종류(원소)에 따른 특성들을 판단하며, 이를 정성적 혹은 정량적으로 구분해 가능한 결합의 종류들과 성분을 파악합니다.

원자 혹은 분자에 작용하는 힘은 가장 대표적으로 주위에 존재하는 전자들의 순간적인 편향으로부터 발생하는 정전기적 인력인 판데르발스 힘(van der Waals force)이 있습니다(적은 양의 양전하와 음전하 간의 약한 인력을 상상해보세요!). 원자나 분자가 전자를 끌어당기는 능력인 전기음성도(electronegativity)에서 유래하는 이온결합과 공유결합이 주는 힘도 작용합니다.

이온결합은 중성 원자가 전자를 잃어버려 형성되는 양이온과, 반대 기작으로 형성되는 음이온이 결합해 만들어지는 매우 강한 결합의 한 종류

입니다. 대표적인 예로 소듐 양이온(Na^+)과 염화 이온(Cl^-)이 형성하는 염화 소듐(소금)이 있습니다. 공유결합은 원자들이 전자를 서로 일정한 개수씩 공유하며 형성하는 단일 혹은 다중 결합입니다. 공유결합을 통해서 수많은 유기 및 고분자화합물들이 형성됩니다.

공유결합은 단일결합(single bond), 이중결합(double bond), 삼중결합(triple bond) 등으로 세분화 돼 있습니다. 그렇다면 자연스럽게 궁금증이 생기죠. 사중결합이나 오중결합, 또는 그 이상도 가능할까요?

최외각 전자 8개로 사중결합 가능할까

이에 대한 충분한 답을 구하기 위해서는 오비탈(orbital)이라는 개념에 대해서 조금 더 자세히 들여다봐야 합니다(자세한 내용은 163쪽 25번 질문 참조). 이온이 아닌 원자의 형태로 공유결합을 하는 원소들의 경우 수소를 제외하고는 대부분이 13~17족의 전형원소(typical element)에 해당합니다. 이들이 만든 대표적인 분자가 암모니아(NH_3), 이산화탄소(CO_2), 메테인(CH_4), 물(H_2O) 등입니다.

또 중심에서 다른 원자들과 결합을 이루고 있는, 소위 중심 원자를 살펴보면 가장 바깥쪽 전자껍질에 8개의 전자를 채우며 가장 안정한 형태의 결합을 만드는 ‘옥텟 규칙(Octet rule)’을 만족시키고 있다는 사실도 알 수 있습니다. 이때 전자가 8개여야만 하는 이유는, 전형원소가 주기율표상에서 s오비탈이 핵심을 이루는 1족과 2족, p오비탈이 핵심을 이루는 13~18족에 배열돼 있기 때문입니다. s오비탈에 1개의 양자 상태가 존재하고, p오비탈에 3개의 양자 상태가 존재하는 점을 고려하면 4개의 양자 상태를 가득 채우는 상황, 즉 8개의 전자를 선호하게 됩니다. 이처럼 옥텟 규칙을

기반으로 공유결합의 한계를 추산한다면, 전자 2개가 하나의 결합을 형성한다는 기준 하에 사중결합까지 기대할 수 있습니다.

물론 8개의 전자를 가장 안정한 상태로 규명하고 그 이상의 전자를 금지하는 옥텟 규칙의 한계를 넘는다면 삼중결합 이상의 공유결합에 대한 기대감은 조금 더 높아질 것입니다. 이를 위해서는 더 많은 오비탈 종류와 개수를 가질 수 있는, 주기율표에서 조금 더 아래쪽 주기에 있는 원소들이 필요합니다.

실제로 2주기에 위치한 질소(N)나 산소(O)의 경우 옥텟 규칙을 만족시켜야한다는 강요를 받지만, 같은 족 3주기 원소인 인(P)이나 황(S)의 경우 더 많은 전자를 보유하는 상태가 에너지적으로 허용됩니다. 이를 ‘확장된 옥텟 규칙(expanded Octet rule)’이라고 칭하며, 중심 원자가 10개 또는 12개의 전자를 보유한 오염화 인(PCl_5)이나 헥사플루오린화 황(SF_6)과 같은 분자들이 이에 해당합니다.

하지만 이처럼 더 많은 전자를 가질 수 있는 가능성이 생겨난 분자들의 경우에도 실제적인 결합은 단일, 이중 또는 삼중결합의 한계를 벗어나지 못합니다. 아무리 큰 원소라도 전형원소의 경우에는 말입니다.

탄소-탄소 오비탈 결합의 한계는?

우리에게 익숙하며 수많은 유기화합물의 기본이 되는 탄소(C)로 돌아와 사중결합이 존재하지 않는 이유에 대해 다시 생각해보겠습니다. 전자 발견 확률이 90% 이상인 영역을 표현한 형태를 의미하는 오비탈이 종류에 따라 크기와 형태가 다르다는 사실에서부터 모든 것은 시작됩니다.

탄소는 s오비탈과 p오비탈을 보유하고 있고, 실제로 사용할 수 있습니

다. s오비탈은 모든 방향에 대해 대칭적인 형태를 갖는 구형의 오비탈이고, p오비탈은 x, y, z로 대표되는 서로 직교하는 세 방향으로 이뤄진 3차원 좌표(카르테시안 좌표)의 아령 모양 오비탈입니다.

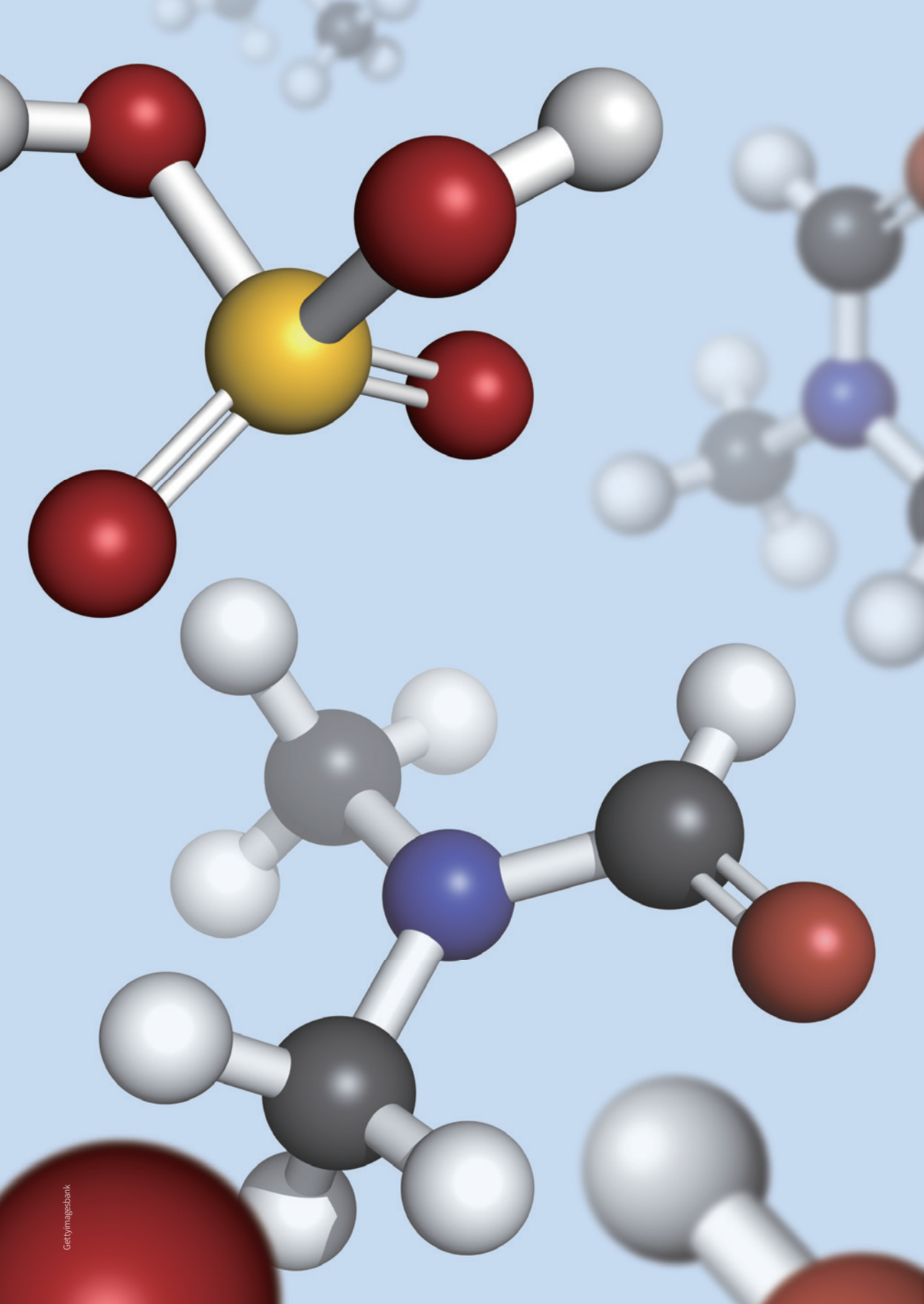
여기서 실제로 사용할 수 있는 오비탈로 한정 지은 것은, 탄소에 더 다양하고 많은 오비탈들이 양자화학적으로 존재하고 있으나, 실제로 탄소가 보유 중인 전자의 개수를 고려할 때 이들은 너무 높은 에너지 준위에 자리잡고 있어서 결합이나 화학반응에 참여하는 것이 불가능하기 때문입니다.

결국 탄소가 다른 탄소와 만나 결합을 이룰 때에는 각각 s오비탈 하나와 세 개의 p오비탈만을 가지고 모든 결합을 만들어 내야 합니다. 이렇게 원자와 원자가 만나 분자를 형성하면서 조금 더 복잡하고 다양한 오비탈들의 조합을 구성한 것을 ‘분자 오비탈(molecular orbital)’이라고 합니다.

문제는 이 오비탈들의 조합이 주먹구구식으로 짝지어 지는 것이 아니라 오비탈들의 대칭성과 형태에 따른 접근성을 고려해 이뤄진다는 사실입니다. 이로부터 두 가지 종류의 결합을 정의할 수 있는데, 직접적으로 오비탈들이 겹쳐져서 만들어지는 시그마(σ) 결합과 서로 평행으로 위치한 두 오비탈이 간접적으로 상호작용해서 만들어지는 파이(π) 결합이 대표적입니다.

두 개의 탄소 원자들은 결합과 같은 방향에 위치한 각각의 p오비탈끼리 직접 중첩해서 만들어낸 하나의 시그마 결합과, 이와 직교하고 있는 다른 두 개의 p오비탈들간의 간접적 상호작용에 의해 만들어진 두 개의 파이 결합으로 삼중결합까지 형성할 수 있습니다.

만약 하나의 결합을 더 형성하기 위해서는 탄소 원자의 남아있는 s오비탈들이 직접적인 결합을 통해 또 하나의 시그마 결합을 형성해야 합니다.



하지만 이 경우 결합의 차수가 증가함에 따라 결합의 세기 역시 강해져 두 탄소 원자가 너무나 가까운 위치에 자리 잡게 되며, 그 결과 원자와 원자 사이 공간에 존재하는 전자들끼리 반발력이 발생합니다. 결국 사중결합인 ‘탄소:::탄소’는 불안정해져 존재할 수 없게 됩니다.

탄소는 이와 같은 에너지 상태를 감당하기에 부적합한 원소라 판단할 수 있으며, 우리가 접하는 많은 유기 및 고분자화합물들은 탄소를 기반으로 이뤄져 있기에 그동안 삼중결합이 공유결합의 한계라고 여겨왔던 겁니다.

육중결합 넘어 칠중결합 나올까

혹시 전형원소가 아닌 오비탈을 더 다양하게 많이 가지고 있는 원소들, 즉 전이금속(transition metal) 원소의 경우에는 어떨까요? 전이금속 원소들은 주기율표에서 3~12쪽에 해당하며, s와 p오비탈을 넘어선 d오비탈이 핵심적인 역할을 하는 원소들의 집단입니다.

총 5개의 양자 상태를 갖는 d오비탈이 추가됐기 때문에, 안정한 형태를 위해 선호되는 최대 전자의 개수 역시 옥텟 규칙의 8개(s와 p오비탈로부터 $2+6=8$)가 아닌 18개(s, p, d오비탈로부터 $2+6+10=18$)로 증가하게 됩니다.

원자의 크기와 사용 가능한 오비탈이 증가했으니 원자 사이에 더 많은 결합이 가능해질 겁니다. 이를 통해 삼중결합의 한계를 넘는 화합물들도 손쉽게 만들어질 수 있습니다. 대표적으로 크로뮴(Cr), 몰리브데넘(Mo), 텅스텐(W), 레늄(Re)과 같은 6족과 7족 원소들이 사중결합을 형성하곤 합니다. d오비탈의 네 개의 로브(lobes)의 중첩으로부터 형성되는 델타(δ) 결합이 추가돼 사중결합 이상의 다중 결합도 형성할 수 있습니다.

그렇다면 다중 결합은 어디까지 가능할까요? 6족 원소인 크로뮴, 몰리브데넘, 텅스텐은 오중결합(quintuple bond), 육중결합(sextuple bond)까지 형성할 수 있다고 알려져 있습니다. 이를 넘어선 칠중결합(septuple bond)의 경우 원자번호 100번 이하의 원소들에 대해서는 성립할 수 없다는 연구 결과가 있습니다.

물론 원자번호 100번 이후의 원자들의 경우에는 아직 연구가 많이 이뤄지지 않았기 때문에 이 같은 연구 결과를 단정 지을 수는 없습니다. 칠중결합의 발견 시기와 가능성은 예측할 수 없지만, 실제로 존재한다면 또 다른 흥미로운 사실이 아닐 수 없습니다.

Q

화학자에게
없어서는 안 될 원소
세 가지는 무엇인가요?

27