

④ 화학반응의 터전, 물

‘수화’는 유기체의 요람

| 글 | 이강호 경북대 교수 ghlee@bh.knu.ac.kr |



그리스시대부터 “물은 만물의 근원” 주창

물은 지구에서 가장 흔한 물질이자 모든 생명 현상과 다양한 화학 반응이 일어나는 장소이다. 사실 가장 흔하다는 것은 그 만큼 중요하다고 말할 수 있다. 옛날에도 물의 중요성은 마찬가지였다. 고대 그리스 철학자 탈레스(B.C. 640~546)는 “물은 만물의 근원” 이고 “모든 것은 물에서 시작하여 물로 돌아간다”고 하였다. 제나라 음양오행 철학의 시조인 추연(춘추전국시대)은 “만물은 토, 목, 금, 화, 수로 시작된다”고 하였다. 그리스의 아리스토텔레스(B.C. 384~322)는 “물은 대지의 혈기”라고 하였다. 그리고 삼국시대 풍수지리학의 창시자인 도선(827~898)은 “산, 지, 수, 열의 위치, 형태에 따라 인간의 길흉화복을 예언” 하였다.

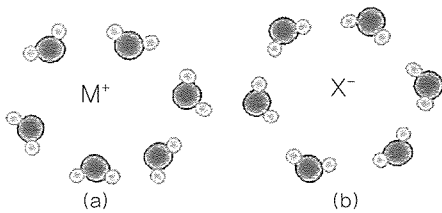
물에서 일어나는 여러 현상이나 반응을 이해하려면 용질과 물 분자와의 상호작용을 이해하는 것이 대단히 중요하다. 물 분자는 1.8D의 쌍극자를 지닌 극성 분자이다. 따라서 용질의 종류에 따라 다양한 형태의 상호

작용을 하고 물에서 일어나는 반응 및 현상에 중요한 영향을 끼친다. 즉, 반응이 진공에서 일어 날 때와 비교하면 상당한 차이가 있다. 물분자와 상호작용은 크게 두 가지로 친수성(hydrophilic)과 소수성(hydrophobic)으로 분류되고 물에 잘 녹는 극성 분자가 전자에 해당하고, 물에 녹지 않는 비극성 분자가 후자에 속한다. 위 두 가지 특성을 모두 가지고 있는 것이 비누이며 용해도는 제한적이고 분자의 소수성 그룹이 뭉쳐서 미셀을 형성한다. 용질이 물에 녹으면 물과 상호작용을 할 때 물이 용질 분자를 둘러싸는 현상을 수화(hydration)라 한다. 물 분자의 수소 원자는 용질분자의 음 하전쪽으로 향하고 물 분자의 산소 원자는 용질분자의 양 하전쪽을 향한다.

수화현상은 용질의 이동, 특성 및 반응에 영향을 미친다. 수용액에서 일어나는 반응 또는 현상에 대해 대표적인 몇 가지를 알아보자.

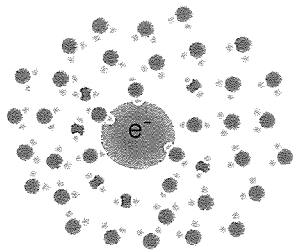
햇빛→물 반응하면 피부암 유발

먼저 수화의 구조를 살펴보자. 금속 양이온 (M^+)은 우리가 마시는 물에 많이 존재한다. 그림 1(a)와 같이 물분자의 산소가 양이온을 향하여 배열하고 음이온



〈그림 1〉

(X^-)일 경우는 그림 1(b)와 같은 형태로 물분자의 수소 원자가 음이온을 향하여 수화가 일어난다. 그러나 전자 일 경우는 어떨까? 물분자는 단한 전자구조를 지니고 있어서 전자를 물분자의 분자궤도함수에 수용될 수 없다. 따라서 물분자는 전자는 멀리하게 되는데 물 속에서 전자는 물분자에 의해 형성된 공동 내에 분포한다(그림 2). 이때 수화 전자는 매우 반응성이 커서 물 속의 다른 분자와 반응하게 된다. 우리가 자외선을 쬐이면



〈그림 2〉

위험한 이유 중 하나가 세포내에서 자외선에 의해 수화 전자가 발생할 수 있고 수화 전자는 곧 세포내 다른 분자(예 : DNA 등)와 반응해 돌연변이 등을 일으키기도 하고, 암을 발생시키기도 한다. 자외선을 쬐면 위험한 이유가 바로 여기에 있다. 따라서 여름철에는 되도록

햇빛에 노출되는 것을 삼가고, 해수욕장에서 노출이 불가피할 때에는 선스크린을 발라주는 것이 좋다. 햇빛이 짹짹 내리 쬐는 여름 날이면 물 1ℓ 당 최대 10^9 개의 전자가 존재할 수 있다. 따라서 여름 철 해수욕장에서 강한 자외선을 쬐면 피부암이 발생할 수 있는데 이는 수화전자와도 밀접한 관련이 있다.

물과 수화 현상이 일어날 때는 항상 열을 수반하는데 보통의 경우는 약간 열을 흡수한다. 예를 들면 소금이 녹을 때 약간의 열이 흡수된다. 그러나 알칼리 금속이 녹을 때는 엄청나게 열이 발생한다. 즉, 알칼리 금속에서, 리튬(Li)에서 루비듐(Rb)으로 갈수록 격렬하게 폭발하면서 일어난다(그림 3). 반응결과 수소와 알칼리 금속 양이온과 수산화 이온이 발생한다. 미국에서 대학원 시절 때의 일인데, 알칼리 금속을 갖고 빔 실험을 한 적이 기억난다. 실험이 끝나면 매번 오븐을 깨끗이 닦아야 하는데, 알칼리 금속을 갖고 실험할 때는 매우 간단하였다. 왜냐하면 그냥 오븐을 물 속에 던져 넣고 한 시간 정도 지나면 남아있던 알칼리 금속이 물과 반응해 없어지기 때문이었다.

생명현상 반응의 기준은 PH7

최근 수용액에서 일어나는 반응에 대해 피코초 (1ps

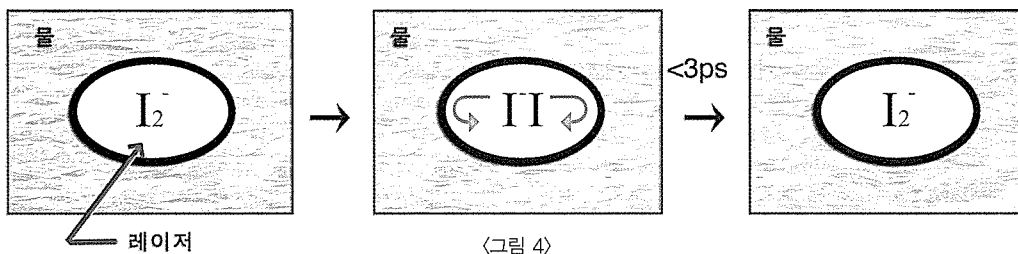


〈그림 3〉

$= 10^{-12}$ s) 펄스 레이저를 사용한 반응 동력학에 대한 분자수준에서 연구가 매우 흥미롭다. 미국 미네소타대학 바바라 교수의 재미있는 연구결과를 소개하면, I_2^- 분자는 수용액상에서 레이저를 쬐이면 분해한다. 즉, $I_2^- \rightarrow I^- + I$ 가 된다. 그러나, 다시 재결합 하여 I_2^- 가 되는데, 그 이유는 물의 수화에 의해 형성되는 공동 때문이다 (그림 4). 공동의 크기는 수화 반경에 해당된다. 그림과 같이 분자수준에서 I_2^- 분자는 물분자의 공동내에 있고 레이저를 흡수하면 I_2^- 가 분해하여 I 및 I^- 원자로 떨어져 가다가 물분자가 공동과 충돌해 다시 돌아오다가 재결합하여 I_2^- 가 되는 것이다. 이와 같은 재결합 현상은 3 피코초 안에 일어나는데 원인은 아마도 물의 수

면 염기성이다. 산 염기 반응의 가장 간단한 예는 강산과 강염기간의 반응이다. 이 경우 생성물은 물과 염(salt)이다. 예를 들면 염산(HCl : 강산)과 수산화나트륨(NaOH : 강염기)이 반응하면 염화나트륨(NaCl : 염)과 물(H₂O)이 생긴다.

물분자는 반응속도에 영향을 준다. $A + B \rightarrow C$ 반응을 생각해 볼 때 반응 속도는 아레니우스 이론에 따르면 A 및 B의 농도와 A와 B 간의 충돌에너지에 의존한다. 여기서, A와 B의 농도가 크면 A와 B간의 충돌 수는 증가한다. 수용액에서 물은 반응속도에 어떠한 영향을 끼칠까? 반응속도는 물과 각 반응 분자간의 상호작용에 의존한다. 물과의 상호작용이 크면 수화가 많이



소결합에 의해 공동이 어느 정도 단단하게 형성되어 있기 때문이다.

산염기 반응은 대표적인 물의 화학반응이다. 특히 물의 산도(pH)는 대단히 중요하다. 대부분 생명현상에서 일어나는 반응은 거의 산도가 7인 중성에서 일어난다. 그러나 화학반응은 종류에 따라 산도에 민감하게 달라질 수 있다. 물에서 일어나는 대표적인 화학반응 가운데 가장 흔한 것은 산-염기 반응일 것이다. 아레니우스 이론에 따르면 산은 물 속에서 양성자(H⁺)을 내놓는 물질이고 염기는 물 속에서 히드록시 이온(OH⁻) 내놓는 물질이다. 물 자신도 자동 이온화 반응에 의하여 H⁺/OH⁻를 내는데 그 농도가 각각 10⁻⁷이다. 따라서 양성자 이온 농도가 이보다 크면 산성이고, 이보다 작으

되어서 반응에 장애가 된다. 즉, 반응분자는 물분자로 수화되어 있어 이동이 장애를 받아 반응속도는 느리게 된다. 특히 하전이 큰 원자나 분자일수록 수화반경이 커서 이동속도가 느리고 따라서 반응속도도 느려지게 된다. 이는 물분자의 차단효과 및 반응분자의 이동에 대한 끌림 효과 때문이다. 물분자는 유전상수(80.2)가 매우 커서 물 자체는 저항이 2메가옴이고 이온의 전기장을 효과적으로 차단시킨다. 따라서 수용액에서 분자간의 전기적 인력은 단거리 인력이 중요하게 작용하게 된다.

가수분해 반응은 물과의 반응이다. 몇 가지 예를 들어보자. 물은 자동차 배기가스인 산화질소(NO), 이산화질소(NO₂), 이산화황(SO₂) 및 삼산화황(SO₃)과 반응

해 아질산(HNO₂), 질산(HNO₃), 아황산(H₂SO₃) 및 황산(H₂SO₄)을 만든다. 이것이 대도시에 내리는 산성비의 주원인이다. 심한 경우는 pH=2 정도에 해당하는 산성비가 내린다. 다른 가수분해 반응의 예는 건축재료인 시멘트의 경화이다. 시멘트에 모래나 돌을 섞은 후 물을 붓고 말리면 경화가 이루어진다. 이 과정을 살펴보면 시멘트의 주원료인 산화칼슘(CaO)이 물과 반응해 수산화칼슘(Ca(OH)₂)이 만들어지기 때문이다. 또 하나는 염을 물에 녹였을 때 양이온과 음이온으로 분해되고 분해된 각 이온은 다시 물과 가수분해 반응을 해서 원래 산과 염기로 되돌아가는 반응이다. 이 과정은 염의 구성 이온이 약산 또는 약염기로부터 왔을 때 발생한다.

산성비의 주범도 물의 화학반응

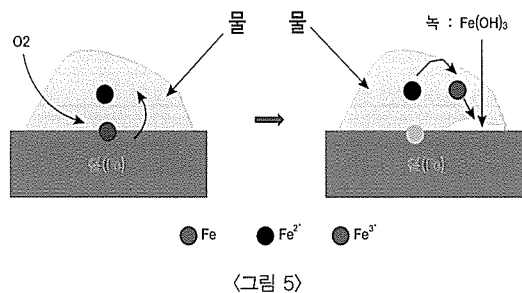
유기반응의 용매로 사용하는 물은 유기용매에 비하여 물은 다음과 같은 장점이 있다. (1) 값이 싸다 (2) 생성물이 불용성일 때 분리가 용이하다 (3) 환경 친화적이다 (4) 유기용매는 발화성인데 반해 물은 비발화성이어서 안전하다. 따라서, 쓸 수만 있다면 산업용으로는 으뜸이다. 몇 가지 공업적 사용 예를 들어보면, 첫째로 아디포니트릴(NC(CH₂)₄CN)의 합성을 들 수 있다. 아디포니트릴은 나일론-66 합성에 사용되는 중요한 화합물이고 매년 수백만 톤이 소비된다. 합성은 수용액에서 크릴로니트릴(CH₂CHCN)을 가수분해 / 환원시켜 만든다. 다른 한 예는 와커-케미의 산화과정으로 잘 알려진 반응으로 올레핀(CH₂=CH₂)을 금속촉매하에서 산소와 반응시켜 아세트알데하이드(CH₃CHO)를 합성하는 반응이다. 이 때 물이 용매로 사용된다. 이외에도 많은 다양한 유기반응이 수용액에서 일어난다.

또한 무기화학 반응에서 모든 금속 양이온은 물과 배위화합물을 형성할 수 있다. 물 분자의 산소 원자가 가

지고 있는 비공유 전자쌍을 금속 양이온에 제공함으로써 리간드로서 배위결합을 형성한다. 금속 양이온의 크기에 따라서 4~8 정도의 물분자가 양이온 금속과 배위결합을 하게 된다. 즉, M(OH₂)_xⁿ⁺ (x=4~8)이다. 금속 양이온의 하전이 크면 물분자는 배위결합을 하는 것 외에도 두 번째 껍질에서 여러 물분자가 금속 양이온을 에워 싸게 된다.

물 없으면 녹슬지 않는다

화학반응에서 전자의 이동이 있는 반응은 산화-환원 반응이라 하고, 물질이 전자를 받으면 환원되었다고 하고 반대로 전자를 내놓으면 산화되었다고 한다. 다양한 전기화학 반응이 수용액에서 일어난다. 자동차의 납축 전지도 수용액에서 일어난다. 자동차에서 철이 녹스는 것을 볼 수 있다. 녹스는 현상은 철과 공기중의 산소 및 물과의 전자화학반응으로 수산화 철(Fe(OH)₃)을 생성하는 과정이다(그림 5). 수산화철은 철의 표면을 보호하지 못하고 얼마 후 벗겨져 나가므로 철이 계속 녹슬게 된다.



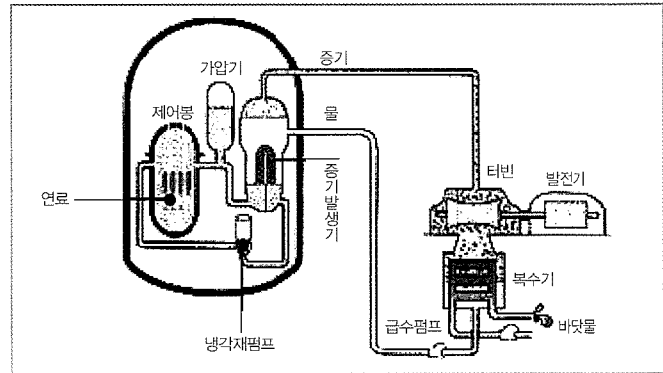
화학반응에서 생성물이 불용성일 때 생성물은 침전 반응을 일으키는 것이다. 보통 물 속에서 용해도가 0.02 mol/L 이하일 때 불용성이라 한다. 염의 용해도는 용해도 곱을 사용해 정의한다. 용해도를 이용하여 수용액에 녹아있는 많은 이온을 분리할 수 있다. 물 속

에는 Ca^{2+}/Mg^{2+} 가 많이 녹아 있으면 이를 센물이라 하는데 보통 Ca^{2+} 가 물에 많이 녹아있다. 센물은 가정용 및 산업용으로 부적합하다. 가정에서 주전자를 오래 사용하면 하얀 얇은 막이 보이는데 탄산칼슘($CaCO_3$) 때문이다. 미국에서는 겨울철 난방용으로 스팀을 사용하는데 Ca^{2+} 를 제거한 후 사용한다. 즉, 탄산소듐(Na_2CO_3)을 사용해 탄산칼슘($CaCO_3$) (s) 불용성 화합물을 침전시켜 제거한 후 사용한다. Ca^{2+} 는 난방용 파이프의 안쪽 벽에 들러 붙어 관의 내경을 좁게한다. 탄산칼슘($CaCO_3$) (s)를 제거 할 때는 염산(HCl)을 가해 가용성인 염화칼슘($CaCl_2$) (aq)을 만든다.

생명의 원천인 단백질 구조도 결정

물은 유기체와 상호작용을 한다. 생명현상과 관련된 모든 반응은 물에서 일어난다. 그 만큼 물은 유기체가 살아가는데 가장 적합한 장소에 해당한다. 유기체는 물과 상호작용을 하면서 물은 유기체에 결합한다. 세포 속에 있는 물의 일부는 $-70^{\circ}C$ 까지 얼지 않는 성질을 가지고 있다. 순수한 물은 어는 점이 $0^{\circ}C$ 이지만 물에 용질이 녹아 있으면 어는 점을 내려간다. $-70^{\circ}C$ 까지 얼지 않는 물은 세포내의 단백질 분자와 결합해서 결합 수 상태로 존재한다. 물은 단백질의 구조를 결정하는 역할도 한다. 단백질은 여러 아미노산이 사슬모양으로 연결되어있는 거대분자이다. 단백질은 3차원적으로 복잡한 구조로 되어 있는데, 이것은 물에 녹지 않는 아미노산들이 서로 가까워져서 3차원 구조를 만들기 때문이다. 세포에 결합한 결합 수는 보통의 물보다 1000배 이상 움직임이 느리다고 한다. 그리고 결합 수를 둘러싼 물은 보통의 물보다 100배 정도 움직임이 느리고 $-10^{\circ}C$ 정도에서 언다고 한다. 그러나 세포 밖의 물은 보통의 물로서 빠르게 움직이고 $0^{\circ}C$ 에서 언다.

물은 자원이다. 우리 식생활에서부터 시작하여 농업



〈그림 6〉

용, 산업용까지 광범위하게 쓰인다. 현재 우리가 소비하는 에너지 중 전기에너지는 가장 큰 비중을 차지한다. 즉, 전철을 보면 알 수 있다. 앞으로 고속전철이 개통되면 전기에너지는 더욱 더 필요하게 된다. 수력 및 화력발전은 전기에너지를 공급하는데 한계가 있다. 따라서 원자력이 필수적이다. 경수로로는 보통 가압 경수로서 우라늄 235가 2~5% 들어 있는 저농축 연료를 사용한다(그림 6). 원자로내의 물은 중성자의 운동에너지를 감소시키는 감속제와 원자로의 열을 냉각시키는 냉각제로 사용된다. 원자로계통을 약 150기압으로 가함으로써 원자로 내에서 물이 끓지 못하도록 하며, 고온으로 가열된 물은 증기발생기내에서 열교환을 통해 급수를 증기로 만들고 이 증기는 터빈을 돌려서 전기를 발생시킨다. ㉔



글쓴이는 고려대 화학과 졸업.
미국 존스홉킨스대학 이학박사 학위를 받았다.