

산과 염기 개념의 이해

글 | 백성혜(한국교원대학교 화학교육과, shpaik@knue.ac.kr)
원정애(매봉초등학교, wja9844@hanmail.net)



I. 들어가며

산과 염기의 개념은 초등학교부터 대학교까지 가장 자주 다루는 화학 개념 중 하나이다. 그러나 산 염기 개념에 대한 학생들의 이해에는 항상 어려움이 따른다. 이해의 어려움을 확인하기 위하여 먼저 다음 질문에 답을 해보자. 다음에서 산과 염기에 해당하는 것을 고르다면?

〈보기〉

- 가. $\text{HCl}(aq) + \text{NaOH}(aq) \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O}(l) + \text{NaCl}(aq)$
- 나. $\text{NH}_3(g) + \text{HCl}(g) \rightleftharpoons \text{NH}_4\text{Cl}(s)$
- 다. $\text{H}_3\text{O}^+(aq) + \text{S}^{2-}(aq) \rightleftharpoons \text{HS}^-(aq) + \text{H}_2\text{O}(l)$
- 라. $\text{HCO}_3^-(aq) + \text{H}_2\text{O}(l) \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3(s) + \text{OH}^-(aq)$

화학II 교과를 이수한 고등학교 학생들과 대학생, 심지어 과학 교사들조차 이 질문에 정답을 하는 경우가 많지 않다. 그들이 흔히 누락하는 염기로는 $\text{H}_2\text{O}(l)$, $\text{NaCl}(aq)$ (실제로는 물에 녹아 이온의 형태로 존재하는 Cl^-), $\text{HCO}_3^-(aq)$, $\text{S}^{2-}(aq)$ 등이 있고, 산으로는 $\text{HS}^-(aq)$, $\text{H}_2\text{O}(l)$ 등이 있다. 또한 학생들은 기체 상태인 염산과 암모니아가 반응하는 '나'와 같은 반응을 산염기 반응이라고 생각하지 않거나, 중화점에 도달하면 생성되는 물과 염은 중성이라고 생각하기도 한다.

쉽게 관찰 가능하고, 정의가 명료한 것처럼 보임에도 불구하고, 학생들이 왜 산 염기 개념을 어려워하는가에 대한 의견은 다양할 수 있으나, 이 글에서는 산 염기 개념을 학습할 때 필요한 전제 조건에 대한 이해의 부족에서 그 원인으로 찾아보고자 한다.

II. 산과 염기 개념의 발달

산을 뜻하는 acid는 ‘시다’란 의미의 라틴어 ‘acere’에서 왔고, 염기를 뜻하는 alkali는 ‘식물의 재’를 뜻하는 ‘al qualja’에서 왔다. 이러한 어원 때문에 산의 특징은 신맛으로, 양젓물은 알칼리성을 나타내는 대표적인 물질로 받아들여졌다. 산과 염기는 전통적으로 액체의 특징에 따른 분류 개념으로 사용되어 왔다. 특히 연금술이 발달하면서 특정 물질을 용해시킬 때 산과 염기는 용매로 중요한 기능을 하였기 때문에 산과 염기의 개념은 중요한 지식으로 전달되어졌다.

산이 어떤 특징을 가지는가에 주목하여 연구한 과학자 중 한사람이었던 보일은 ‘뛰어난 용해력’과 함께 몇 가지 푸른 채소를 붉게 변화시키는 특징이 있음을 알게 되었다. 또한 염기는 미끌거리는 촉감을 가지고 몇 가지 붉은 채소를 푸르게 변화시키는 특징이 있으며, 또 가장 중요한 특징 중 하나로 산성 용액의 성질을 없애 버린다는 사실을 알았다. 그리고 산성과 염기성이 아닌 또 다른 액성인 중성의 용매도 존재함을 알았다. 이러한 액성을 이용하여 보일은 산과 염기를 관독할 수 있는 지시약을 만들었다. 오늘날 사용하고 있는 ‘푸른색 리트머스 시험지를 붉게 변화시키는 것은 산’, 혹은 ‘붉은색 리트머스 시험지를 푸르게 변화시키는 것은 염기’라는 산과 염기의 정의는 바로 보일의 산 염기 개념으로부터 나온 것이다.

라부아지에에는 연소에 필요한 공기 속의 그 ‘무엇’을 산소라고 이름 지었는데 그 이유는, 연소 생성물이 물에 녹으면 산성을 띄기 때문이었다. 따라서 그는 공기 중의 그 기체가 바로 산

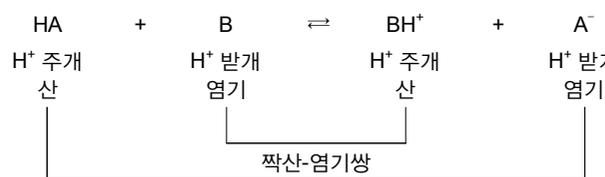
의 원소, 즉 산소라고 생각하였다. 연소 후 생성물인 이산화탄소는 물에 녹아 탄산수가 되는데, 이런 현상에 착안한 것이다. 그러나 당시 유명한 과학자였던 베르톨레(그는 훗날 프루스트와 일정성분비의 법칙을 논쟁한 것으로 유명하다.), 데이비 등은 염산과 플루오린화수소산, 붕산, 시안화수소산 등이 산소를 포함하지 않았다는 점 때문에 산에 산소가 포함되어야 한다는 라부아지에의 주장을 반박하였다. 특히 데이비는 매우 강한 산인 염산이 오직 수소와 염소 원소로만 이루어져 있음을 증명하고, 산의 조건이 산소가 아니라 수소임을 제안하였다. 이러한 데이비의 생각은 아레니우스의 산과 염기 개념에 큰 영향을 주었다.

데이비가 페러데이의 스승으로 전기화학 분야의 발달에 큰 공헌을 하는 과정에서 산과 염기에 대한 개념의 발달은 더욱 활발하게 이루어졌다. 베르셀리우스는 소금물에서 전기분해를 하면 음극에서 염기성이 나타나고, 양극에서 산성이 나타남을 발견하였다. 이를 통해 베르셀리우스는 산과 염기 반응이 단순한 전기적 끌림 현상이라고 생각하였다.

아레니우스는 전기화학을 연구하는 동안 염, 산성, 염기성의 수용액은 전류를 통하게 하는 액체라는 것을 관찰하였다. 1884년 그는 이들 혼합물이 물에 용해되었을 때 ‘이온’이라고 부르는 전기를 띤 입자로 분리된다고 제안하였다. 그는 산은 물에서 해리하여 수소 이온(H⁺)을 생성하는 물질이고, 염기는 물에서 해리하여 수산화 이온(OH⁻)을 생성하는 물질이라고 제안하였다. 그리고 산과 염기가 서로 중화될 때는 염과 물을 형성한다고 보았다. 그러나 생성된 물과 염의 액성에 대해서는 고려하지 않았으므로, 그의 생각에는 ‘중화=중성’이라는 사고가 내포되어 있다고 할 수 있다. 아레니우스의 산과 염기 정의는 수용액에서는 유용하지만, 수용액이 아니거나 H⁺나 OH⁻이 존재하지 않는 기체와 고체 상태의 반응에서는 산과 염기를 구분하는데 부적당하다.

그러나 그의 생각은 비수용성 용매에서 유사한 반응을 설명하는 데 제한점을 가졌다. 플랭클린은 액체 암모니아에서 일어나는 염화알루미늄과 나트륨아미드의 반응도 산과 염기의 반응이라고 볼 수 있다고 제안하였다. 그는 NH₄⁺와 NH₂⁻가 만나서 2NH₃가 만들어지는 반응이 마치 H₃O⁺와 OH⁻가 만나는 반응과 유사하다고 본 것이다. 이러한 생각에 근거하여 1923년 로리와

브뢴스테드는 각각 독립적으로 산과 염기에 대한 일반적인 개념을 제안하였다. 즉, 그들은 암모니아에서 NH₄⁺와 NH₂⁻의 반응에서 상대적으로 양성자를 잃을 수 있는 물질인 NH₄⁺를 산으로 보고, 양성자를 얻을 수 있는 물질인 NH₂⁻를 염기로 보았다. 이것이 바로 ‘브뢴스테드-로리’의 산과 염기 정의이다. 이 정의에 따르면, HA는 A⁻가 되기 위해 양성자를 포기하는 반면에, B는 BH⁺가 되기 위해 양성자를 받는다. 이 경우 생성물도 또한 브뢴스테드-로리의 산과 염기가 된다. BH⁺는 B의 짝산(conjugated acid), A⁻은 HA의 짝염기(conjugated base)이다.



브뢴스테드-로리 산-염기 반응은 다양한 용매에서 발생할 수 있고, 염산과 암모니아 가스의 예에서처럼, 용매가 없는 가스 상태에서도 발생할 수 있다. 또한 용매들은 브뢴스테드-로리 산 또는 염기로서 기능할 수 있다. 물이 HCl을 위한 용매로 반응할 때 물은 염기(양성자 받개)이지만, NH₃와 반응할 때는 산(양성자 주개)이다. 산 또는 염기로 반응할 수 있는 물과 같은 분자는 양쪽성(양성자를 받거나 잃을 수 있는 능력)이라고 부른다.

브뢴스테드-로리 이론에서 반응은 평형의 의미를 포함하게 되는데, 산-염기 반응을 기본적으로 역반응도 가능한 가역 반응(산+염기⇌짝염기+짝산)으로 정의하게 된다. 또한 브뢴스테드-로리 이론에서 반응의 방향은 어떤 용매에서든지 항상 반응물보다 약한 산이나 약한 염기가 형성되는 쪽으로 향한다.

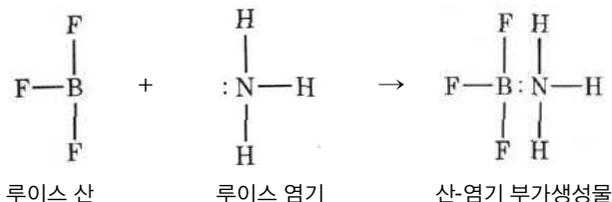
그 후 Germann은 1925년 염화알루미늄이 산으로 작용하는 포스겐에서 용해된다는 것을 보여주었는데, 이 시스템 속에는 양성자가 없었다. 염화알루미늄의 효과는 용매 양이온 COCl⁺의 농도가 증가하는 것이었다. Germann은 산-염기 시스템을 결정하는 용매가 있다는 결론을 내렸다. 용매-시스템 이론은 암모니아 시스템에 관한 플랭클린의 생각에서 비롯되었다고 볼 수 있다. Germann은 주로 비양성자적 용매를 포함하기 위

해 플랑클린의 이론을 확장했다. 용매-시스템 이론은 산을 용매 양이온 농도를 증가시킨 용질로 정의하였고, 염기는 용매 음이온 농도를 증가시키는 용질로 정의하였다. 용매-시스템 이론이 다른 산-염기 이론들에 비해 적용 범위가 더 넓고 일반적이기는 하지만, 산-염기 반응에서 용매가 있어야 하고 용매가 다소 이온화되어 있을 때만 적용할 수 있다는 제한점을 가지고 있다.

브뢴스테드-로리의 양성자 이론은 산-염기 반응이 양성자 전달에 제한되었고, 플랑클린의 용매-시스템 이론은 산-염기 반응이 다소 이온화된 용매에서만으로 제한되었다. 이 두 이론이 산과 염기 정의의 폭을 넓히기는 하였지만, 알려져 있는 모든 산-염기 반응을 포함하기에는 일반성이 충분하지 못하였다. 1939년, 러시아 화학자 Usanovich에 의해 제안된 ‘positive-negative’ 이론은 좀 더 보편적인 산-염기 개념을 만들기 위한 시도였다.

Usanovich는 산을 양이온을 포기할 수 있는 어떤 물질의 능력(H^+ 또는 다른 것) 또는 음이온과 결합하는 것으로 정의하였고, 염기를 음이온을 포기할 수 있거나 양이온과 결합하는 어떤 물질로 정의하였다. 예를 들어, SO_3 는 O^{2-} 음이온과 결합해서 SO_4^{2-} 를 만들 수 있기 때문에 산이다. 그러나 Usanovich의 이론은 이온의 중요성과 염의 형성을 너무 많이 강조하였고, 대부분의 화학자들이 받아들이지 않던 생각인 산-염기 상호작용의 특별한 형태인 산화-환원 반응까지 확장했기 때문에 비판 받았다.

브뢴스테드와 로리가 양성자 이론을 소개한 같은 해인 1923년에, 미국의 화학자 루이스는 좀 더 기본적인 이론을 제안하였다. 루이스 이론은 전에 나온 모든 다른 산-염기 이론들과는 차이가 있었다. 루이스는 염기가 양성자를 받을 때 새로운 공유결합을 형성하는 양성자와 고립전자쌍을 공유한다는 것에 주목하고, 산-염기 반응을 배위 공유 결합의 형성으로 보았다.



루이스는 염기를 전자 공급자(전자쌍 주개)로 보았고, 산을 전자 수용자(전자쌍 받개)로 보았다. 모든 양성자 받개는 공유전자쌍을 가지며 모든 전자쌍 주개는 양성자를 받을 수 있으므로, 염기에 대한 루이스 정의와 브뢴스테드-로리의 정의는 같은 성질에 대한 서로 다른 관점의 설명이다. 따라서 모든 루이스 염기는 브뢴스테드-로리 염기이고, 모든 브뢴스테드-로리 염기는 루이스 염기이다. 그러나 산에 대한 루이스 정의는 브뢴스테드-로리 정의보다 훨씬 더 일반적이어서, H^+ 뿐 아니라 루이스 염기에 의해 제공된 전자쌍을 공유하여 수용할 수 있는 빈 원자가 껍질을 갖는 다른 양이온과 중성분자도 포함한다. 따라서 루이스의 이론은 수용액에서의 전통적인 산-염기 반응뿐만 아니라, 용매나 양성자 전달과 관련이 없는 산-염기 반응에도 잘 적용될 수 있다. 이러한 루이스의 산과 염기의 정의는 화학적인 상호작용이 보다 안정한 전자 배열의 분자를 형성하기 위해 일어난다는 화학의 기본적인 원리와의 일치하면서 널리 받아들여지게 되었다.

III. 산과 염기 중화반응에 대한 교과서 시각

지난 300년 동안 제안되어온 모든 산-염기 이론들 중에서 가장 유용한 것으로 남아있는 세 가지는 아레니우스, 브뢴스테드-로리, 루이스의 이론이다. 현재 우리나라의 화학교육과정에서는 아레니우스와 브뢴스테드-로리 이론까지 가르치도록 되어 있으나, 많은 교과서들이 읽기 자료 형태로 루이스 이론을 설명하고 있다. 이러한 특징은 외국의 경우도 비슷하다. 대부분의 교과서에서는 아레니우스 정의가 수용액에서만 한정되기 때문에 비수용액 조건을 설명하기 위하여 브뢴스테드-로리 정의가 제안되었다고 제시하였다.

과학자들은 오랫동안 여러 가지 면에서 아레니우스의 산과 염기의 정의가 적절한 것으로 믿어왔으나 수용액이 아닌 경우에는 산·염기의 반응을 설명할 수가 없었다. 따라서 과학자들은 산과 염기의 개념을 물질의 구조와 관련지어 확장해야 할 필요를 느끼게 되었다.

수용액이 아닌 경우에도 산·염기의 반응을 설명하기 위하여 1923년에 덴마크의 브뢴스테드와 영국의 로우리는 각각 아레니우스의 정의를 확장한 새로운 제안을 하게 되었다.

그림 1. 화학II 교과서의 브뢴스테드-로리 정의 도입 설명(교과서, 2010, p.264).

또한 산-염기 반응이 가역반응이라는 것과 같은 물질이 산이나 염기로 반응할 수 있는 양쪽성 물질이 될 수 있음을 설명하고 있다.

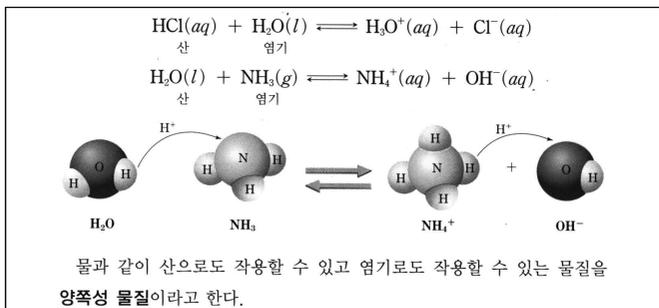


그림 2. 화학II 교과서의 양쪽성 물질 설명(교학사, 2010, p.265).

그러나 브린스테드-로리 정의 대신 아레니우스 정의를 가지고 있는 학생들은 이러한 설명을 통해서 물이라는 중성 물질이 상대적으로 산, 혹은 염기가 될 수 있다는 사고를 못할 수 있다. 그렇게 될 때 처음 제시한 4가지 종류의 반응에서 산이나 염기로 물과 같은 물질을 고르기 어려울 것이다.

산, 염기의 이론에 따라서도 반응하는 중화반응에 대한 시각도 달라진다. 일반적으로 화학II 교과서에서는 중화반응을 아레니우스의 정의로 설명한다. 즉, 중화반응이 수용액 상태에서 이루어지며, 생성된 물과 염은 중성이라는 전제를 하고 있다.

그러나 브린스테드-로리의 정의에 따르면, 물은 염기가 변한 짝산이라고 할 수 있고, 염의 음이온은 산이 변한 짝염기라고 할 수 있다. 그리고 생성물인 물도 다른 생성물인 염과 산-염기 반응을 하기 때문에 중화 후 액성이 중성이 되지 않을 수 있다. 따라서 중화의 개념은 중성이 아니라, 산과 염기가 만나서 각기 그 성질을 잃어버리는 반응이라고 정의하는 것이 필요하다.

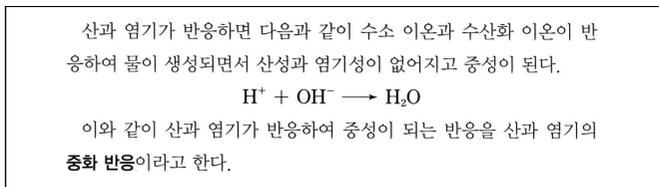


그림 3. 화학II 교과서의 중화반응 설명(천재교육, 2010, p.268).

그러나 같은 교과서 안에서도 다른 시각, 즉 브린스테드-로리의 중화 개념을 동시에 제시하고 있다. 하지만, 이렇게 다른 시각이 공존하는 상황에 대한 설명이 제대로 제시되지 않았다.

산과 염기의 중화 반응

산과 염기가 중화 반응을 할 때의 반응은 $\text{H}^+ + \text{OH}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ 이므로 수소 이온과 수산화 이온의 양은 1 : 1로 반응한다.

그러면 산과 염기를 반응시켰을 때 그 수용액의 액성은 어떻게 될까?

중화 반응의 결과는 항상 중성일까?

과정

그림 III-80은 수산화나트륨 수용액에 묽은 염산을 넣어 중화시킬 때의 반응을 모형으로 나타낸 것이다.

(가)

(나)

(다)

그림 III-80 산과 염기의 중화 반응

정리

- ① 반응 후 수용액 (가), (나), (다)의 액성은 각각 어떻게 되겠는가?
- ② 반응 후 수용액 (가), (나), (다)의 액성을 확인할 수 있는 방법에 대해 인터넷을 이용하여 조사해 보자.

© 관련 인터넷 사이트
경상대학교 과학교육학부
<http://gce.gsu.ac.kr/~gifted/gifted/chem/indi-exp.html>

그림 III-80의 (가)와 같이 수산화 이온의 양보다 가해준 수소 이온의 양이 적으면 부분적으로 중화 반응이 일어나지만 용액 중에 수산화 이온이 남으므로 액성은 염기성이 되며, (나)와 같이 수소 이온의 양과 수산화 이온의 양이 같으면 반응 후에 수소 이온과 수산화 이온이 남지 않으므로 용액은 중성이 되는데, 이 경우를 완전 중화되었다고 한다. 한편, (다)와 같이 수산화 이온의 양보다 가해준 수소 이온의 양이 많으면 부분적으로 중화 반응이 일어나지만 용액 중에 수소 이온이 남으므로 액성은 산성이 된다.

그림 4. 화학II 교과서의 중화반응 설명(천재교육, 2010, p.269).

브린스테드-로리의 산과 염기를 반응시켰을 때, 그 수용액의 액성이 모두 중성이 되는 것은 아니다. 따라서 브린스테드-로리의 산-염기 정의를 제시할 때에는 비수용액 상태로 제시하고, 생성된 염과 물의 새로운 산-염기 반응에 초점을 둬으로써 아레니우스의 정의와 차별화할 필요가 있으며, 그 후 아레니우스의 정의를 브린스테드-로리의 정의에 포함시키면서 전제 조건의 차이를 인식하도록 제시하는 것이 필요하다. 브린스테드-로리의 산-염기 개념을 받아들일 때 <보기>에 제시한 4개의 반응은 모두 중화반응으로 인식할 수 있을 것이다.

IV. 글을 마치며

산-염기의 개념과 중화반응의 개념은 대부분 아레니우스의 정의에 국한되어 있고, 브뢴스테드-로리의 정의를 제시한 경우에도 시각의 차이가 명확하지 않아서 학생들이 그 변화를 제대로 인식하기 어렵게 되어 있다. 예를 들어 암모니아가 염기라는 것을 설명하는 경우에도 물에 녹아서 OH⁻를 내기 때문이라고 설명함으로써 브뢴스테드-로리의 정의가 아니라 아레니우스의 정의로 다시 환원하여 제시하는 경향이 있다.

어떤 개념을 학습하기 위해서는 그러한 개념이 만들어지게 된 배경과 전제 조건 등에 대한 인식이 필요하다. 산-염기의 개념은 과학적 이론이 어떻게 만들어지고 도입되는지를 생각해 볼 수 있는 소재들 중 하나이다. 이를 위해 산-염기 개념의 변천 과정을 살펴보고, 이를 통해 만들어진 다양한 산-염기 이론에 대해서 알아보았다.

산-염기 개념은 앞서 산-염기 개념의 변천 과정에서 보인 바와 같이 공통성을 가지는 액체들의 분류의 기능을 갖는 것에서 시작했다고 볼 수 있다. 과학의 일차적 기능이기도 한 분류의 기능은 과학적 개념을 형성하는데 가장 기본이 되는 특징이다. 또한 보다 명확한 분류 기능을 위해서 새로운 물질이 나타날 때마다 분류의 틀을 개선해 가는 과정에서 산-염기 개념에 대한 이론이 발달하게 된 것이다.

훌륭한 과학 개념이나 이론의 특성을 엄밀하게 서술할 수는 없지만, 지극히 다양한 현상에 대해서 체계적으로 통일된 설명을 제공하는 것을 추구한다는 점은 분명하다. 또한 어떤 제한된 개념이나 이론이 명확한 의미를 가지기 위해서는, 그 이론을 구성하는데 사용된 전제 조건들에 대한 이해가 필요하다. 새로운 이론적 개념이 그 이론에 앞서 분명한 의미로 사용되고 이해되기 위해서는 객관적으로 명확하게 정의되어야 하지만, 완전한 정의는 없기 때문에 명확한 의미를 가지는 이론은 존재하지 않는다. 결국 이론이나 개념이 더 포괄적이고 정확한 설명에 도달할 수는 있으나, 개념에 대한 완전한 정의를 내릴 수는 없다는 한계를 가지고 있다는 것을 인식할 필요가 있다.

이론은 어떤 제한된 적용 범위 안에서 근사치로서만 성립한다. 그러므로 이론을 이해하기 위해서는 반드시 이론이 가지는 제한된 적용범위를 알아야 한다. 이 제한된 적용범위는 이론이 개념을 정의하는데 근거에 있었던 전제조건에서 비롯된다. 이를 알기 위해서는 이론이 만들어진 배경과 과정에 대한 고찰이 필요하며, 이는 과학교육에서 과학사를 도입해야 한다는 다양한 연구 결과를 토대로 한 주장과도 일맥상통한다. 과학적 연구에서 얻어진 이론적 해석이란 모든 가정들과 전제들이 잠정적으로 용인된 기반 위에서 일시적으로 허용되는 가능한 여러 대안적 해석 중에 하나이기 때문이다. 따라서 이론이 어떤 전제를 바탕으로 정의되었는가를 아는 것은 학생들이 개념을 학습하면서 이를 제대로 이해하도록 도울 수 있을 것이다.

