

HCl(g)과 NH₃(g)를 이용한 ‘기체 확산 속도’에 관한 실험의 분석 및 개선 연구 -고등학교 화학 II 단원에서-

김영채, 성숙경¹, 정대홍*

서울대학교 화학교육과

¹서울경일고등학교

Analysis and Improvement of an Experiment on Diffusion Rate of Gases Introduced in High School Chemistry Textbooks

Young Chae Kim, Sukyoung Seong¹, Dae Hong Jeong*

Department of Chemistry Education, Seoul National University, Seoul 151-172, Korea

¹Kyungil High School, Seoul, 133-819, Korea

요약

본 연구는 고등학교 화학 II 교과서에 제시되는 ‘기체의 확산속도 실험’에서 나타나는 문제점을 분석하고 그 원인을 실험과 이론적 고찰을 통해 이해함과 더불어 개선된 실험을 제안하는 것을 목적으로 한다. 교과서에 제시된 확산속도 측정에 관한 전형적인 실험으로 유리관 양 끝에 염산과 암모니아수를 떨어뜨리고 여기서 발생한 염화수소 기체와 암모니아 기체가 확산하여 만나는 지점에서 나타나는 염화암모늄 흰 띠의 위치를 측정하였다. 생성된 흰 띠의 위치가 시간에 따라 일정하지 않고 이동하는 것이 관찰되었다. 이에 대한 원인을 찾기 위해서 순수한 기체 HCl과 NH₃를 사용하여 확산 실험을 수행하였고, 생성된 염화암모늄 흰 띠가 시간에 따라 이동하지 않는 것을 확인하였고 두 기체의 상대적 확산 거리는 Graham의 확산이론과 차이가 나고 Loschmidt의 확산이론과 일치하는 결과를 얻었다. 이 결과를 바탕으로 염산과 암모니아수의 농도를 다양하게 조절하여 두 용액에서 HCl과 NH₃ 기체의 분압이 같아지는 조건을 찾을 수 있었고 이 조건에서 생성된 흰 띠의 위치가 변하지 않았고 그 위치는 이론으로 설명할 수 있었다. 본 연구를 통해 개선된 실험은 학습자의 실험에 대한 이해를 높이고 과학적 개념 도출에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

주제어 : 기체 확산 실험, 염화수소, 암모니아, Graham 확산 실험, Loschmidt 확산 실험

서론

현재 사용되고 있는 고등학교 모든 화학 II 교과서에서 ‘기체의 확산속도 실험’은 염화수소와 암모니아가 만나 형성되는 염화암모늄 띠의 위치를 통해 기체의 확산 속도비를 측정하는 실험으로 제시되고 있다. 그러나 이 실험은 교과서에 제시된 조건으로 실시하였을 경우 결과가 예상과 다르거나 재현성이

없는 결과가 나타나, 교사와 학생들에게 오개념과 혼란을 주고 있다. 이 문제에 대한 연구의 필요성에 의해 지금까지 기체 확산에 대한 다양한 연구가 진행되어 왔다. 교과서 분석이나 오개념과 관련된 연구가 여러 연구자에 의해서 보고되었고(성숙경 외, 2010; 김주현 외, 2000; 허미연 외, 2008; 김문수와 정영란, 1997; 조정일과 이현욱, 1994; 구선아와 채희권, 2008), 실험 조건 및 장치 개선에 관한 보고가 있었다(박동조, 2000; 이세종, 2001; Epp, 1990). 하지만, 실험이 잘 안되는 원인에 대한 분석은 찾아볼 수 없어서 이에 대한 연구가 필요하다.

* 교신저자: jeongdh@snu.ac.kr

• 2011년 1월 3일 접수, 2011년 2월 1일 수정, 2011년 2월 6일 통과

이 연구에서는 교과서에 제시된 기체 확산 속도 실험의 문제점을 확인하고 문제점의 원인을 실험 및 문헌 연구를 통해 분석함으로써 개선된 실험을 제안하고자 한다. 이를 통하여 교사와 학생은 기존의 실험에 대한 이해를 높이고 새로운 실험방법을 교육현장에서 활용할 수 있을 것이다.

연구 내용 및 방법

연구 내용

고등학교 화학 II 교과서에 제시된 '기체의 확산 속도' 실험의 결과가 확산속도 법칙에 어긋나거나 재현성이 떨어지는 원인을 분석하고 이 실험의 문제점을 개선하기 위해 다음과 같이 연구를 수행하였다. 첫째, 제 7차 교육과정에 따른 고등학교 화학 II 교과서에 제시되어 있는 기체 확산 속도 실험과 관련된 내용을 교과서 별로 분석하였다. 둘째, 교과서의 실험을 수행하여 문제점을 분석하였다. 셋째, 실험 및 문헌 연구를 통하여 문제점의 원인을 밝히고 개선안을 제시하였다.

교과서 분석

제 7차 교육과정에 따른 화학 II 교과서 8종에서 기체의 확산속도 실험을 분석하였다. 교과서의 종류는 Table 1과 같다.

실험 방법

교과서에 제시된 실험을 재현하기 위해서 교과서에 가장 많이 제시된 실험조건을 선택하였다. 8종의 교과서 중 6종의 교과서에서 진한 염산과 진한 암모니아수를 사용하는 것으로 표현하였다. 진한 염산과 진한 암모니아수에 대한 별도의 언급이 없어서 구입한 그대로의 염산(HCl, Merck, 37%)과 암모니아수(NH₃, Sigma-Aldrich, 33%)를 진한 염산과 진한 암모니아수로

Table 1. List of 'Chemistry II' Textbooks.

| Symbol | Publisher | Year |
|--------|-------------------------------|------|
| A | Kyohaksa Inc. | 2002 |
| B | Geumseoung Inc. | 2002 |
| C | Daehan Textbook Co. | 2002 |
| D | Jungangkyoyuk Research Center | 2002 |
| E | Jihaksa Inc. | 2002 |
| F | Hyungseul Inc. | 2002 |
| G | Chunjae Edu. Co. | 2002 |
| H | Cheongmungak Inc. | 2002 |

받아들이고 실험을 수행하였다. 솜을 미리 유리관에 끼워놓고 주사기를 이용하여 솜에 2 mL의 시약을 주입하여 실험하였다. 유리관은 내경이 1.2 cm, 길이가 50 cm 인 것을 사용하였으며, 양쪽 끝에서 시약을 떨어뜨린 위치 사이의 거리는 43 cm로 중간 지점에 0을 기준으로 1 cm 간격으로 -21.5 cm 에서 +21.5 cm 까지 눈금을 표시하였다(Figure 1). 염산 쪽은 (-), 암모니아 쪽은 (+)로 표시하여 기록하였다.

시약의 농도에 따른 실험 결과의 차이를 분석하기 위해 여러 농도의 염산 및 암모니아수를 이용하여 확산 실험을 수행하였다. 염산은 3, 6, 9, 12 M을 이용하고 암모니아수는 3, 6, 9, 12 M을 이용하여 총 16 set의 실험을 수행하여 분석하였다. 앞서 실험한 방법과 같이 솜을 유리관에 끼운 상태에서 주사기로 시약을 주입하는 방법 또한 솜의 부피 때문에 시약이 묻히는 위치가 달라지는 등의 문제점이 있어 확산이 시작되는 위치를 좁게 하고 정확하게 하기 위하여 각각의 염산과 암모니아수를 유리로 된 마이크로 주사기(SUPELCO, 100 μL)를 사용하여 유리관의 양쪽 끝에 10 μL의 양만큼 떨어뜨렸다. 각각의 실험은 시약의 종류와 양이 동일한 조건에서 3번 반복하여 평균값을 사용하였다.

용액으로 실험한 결과와 비교하기 위해 99% 이상의 순도를 가진 HCl 및 NH₃ 기체를 이용하여 확산 실험을 수행하였다. 이

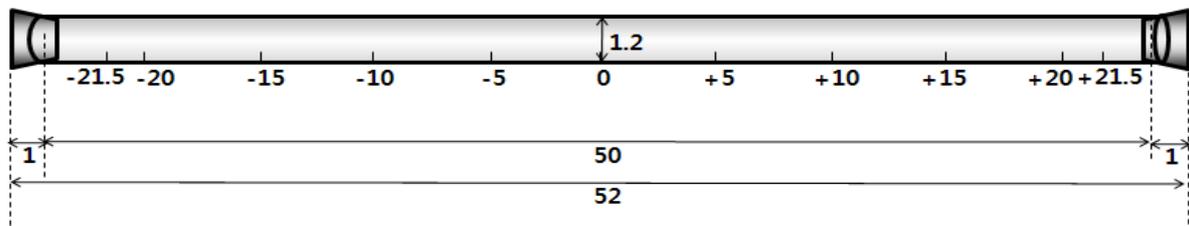


Figure 1. A glass tube for diffusion experiment using HCl(aq) and NH₃(aq) (Diameter is 1.2 cm and length is 50 cm).

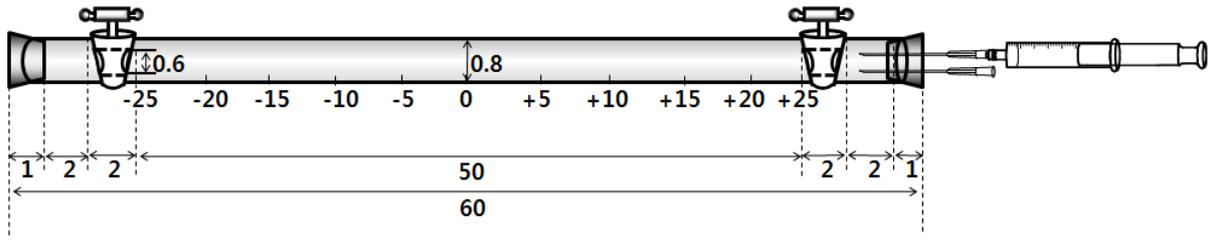


Figure 2. A glass tube with stop cocks for diffusion experiment using HCl and NH₃ gases (Diameter is 1.2 cm and length is 50 cm).

를 위해서 일정 부피에 순수 기체를 채운 뒤 동시에 양쪽 끝에서 확산이 시작될 수 있도록 콕(cock)이 장착되어 있는 확산 유리관을 제작하여 사용하였다(Figure 2).

염화수소(Sigma-Aldrich, ≥99%)와 암모니아(금성가스, 99.999%) 가스통으로부터 Tedlar 기체표집용기(가스택코)를 이용하여 순수한 염화수소 기체와 암모니아 기체를 각각 포집하였다. Tedlar 기체표집용기에서 기체를 뽑을 때에는 학교 실험실에서 일반적으로 사용하는 50 mL 플라스틱 주사기를 이용하였으며 주사기를 통해 염화수소 기체와 암모니아 기체를 유리관의 양쪽 끝에 여러 번 주입하여 기존에 있던 공기가 완전히 교체되도록 하였으며 이 때 양쪽 기체는 대기압과 같은 압력으로 유지하였다.

연구결과 및 논의

교과서 분석

염산과 암모니아를 이용한 '기체의 확산 속도 실험'이 화학

II 교과서 8종에 모두 제시되어 있었다. 교과서에 제시된 실험 내용을 분석한 결과는 Table 2와 같다.

6종의 교과서에서 시약의 농도를 명시하지 않고 '진한'이라고 제시하고 있었고, F 교과서만 염산(36%, 2 mL), 암모니아수(11%, 2 mL)라고 정확한 농도와 용량을 언급하고 있었으며, A 교과서에서는 시약의 농도에 대한 언급이 전혀 없이 염산과 암모니아수로만 제시되어 있었다. 유리관의 굵기나 길이를 정확한 수치로 제시한 교과서는 C, D, F, H 4종이었으며 E, G는 단지 길이에 대해서만 언급하고 있었다. 유일하게 C 교과서는 지름 0.4 cm, 길이 12 cm로 Small-Scale Chemistry 실험을 제시하고 있었다.

대부분의 교과서에서 시약은 면봉이나 솜에 묻혀서 하도록 되어 있었다. 실험과정 설명을 기준으로 솜을 사용하도록 한 교과서는 6종이었으며, C 교과서에서는 면봉을 사용하였고 D 교과서에서는 솜이나 면봉 대신에 꼭지 달린 삼각플라스크에 진한 염산과 진한 암모니아수를 담고 콕이 장착되어 있는 유리관과 연결하여 실험하도록 제시하고 있었다. 솜을 사용하도록

Table 2. Experimental conditions in the textbooks.

| Textbook | Concentration of reagents | | Glass tube | | Stopper | Sampling parts |
|----------|---------------------------|--------------------|---------------|---------------|------------------|----------------------|
| | Hydrochloric acid | Ammonium hydroxide | Diameter (cm) | Length (cm) | | |
| A | Not mentioned | Not mentioned | Not mentioned | Not mentioned | Not used | Cotton balls |
| B | Concentrated | Concentrated | Not mentioned | Not mentioned | Rubber | Cotton balls |
| C | Concentrated | Concentrated | 0.4 | 12 | Not used | Cotton bud |
| D | Concentrated | Concentrated | 1.5 | 50 | Cork is attached | Glass tube with cork |
| E | Concentrated | Concentrated | Not mentioned | 50 | Rubber | Cotton balls |
| F | 36 %, 2 mL | 11 %, 2 mL | 2 | 60 | Rubber | Cotton balls |
| G | Concentrated | Concentrated | Not mentioned | 50 | Rubber | Cotton balls |
| H | Concentrated | Concentrated | 1.5 | 50 | Rubber | Cotton balls |

제안한 교과서는 모두 마개를 사용하도록 제시되어 있었다. 마개를 사용하면 공기의 출입이 없는 상태에서 액체의 증발로 인해 유리관 내부에 부분적인 압력의 차이를 유발하지만 숨을 유리관에 딱 맞게 끼워 넣도록 설계하면 시료를 놓는 부분에서부터 압력 경사가 생기는 것을 막을 수 있다.

교과서에 제시된 실험의 문제점

교과서에 제시된 대로 진한 염산(약 12 M)과 진한 암모니아수(약 17 M), 즉 시약을 처음 구입한 그대로의 원액으로 실험을 수행하였다. 그러나 교과서에 제시된 실험설계 그대로 수행하기에는 몇 가지 문제점이 있었다. 숨에 염산이나 암모니아수를 문힌 후 유리관으로 옮겨서 실험을 하면 유리관에 넣는 과정에서 숨에 적신 시약이 밑으로 흐르거나 유리관 외부로 통해서 확산된 기체에 의해서 염화암모늄이 생성되기도 하였다. 이 문제를 피하기 위하여 교과서에 제시된 그대로 실험을 하되 숨을 미리 유리관에 끼워놓고 주사기를 이용하여 숨에 시약을 주입하여 실험하였다. 각각의 용액을 주사기를 통해 숨에다 주입한 후 1분 간격으로 20분 동안 염화암모늄에 의한 흰 띠의 위치를 확인하였다. 실험을 3번 반복하여 평균값을 구하였다. 그 결과는 Figure 3과 같다. 0은 정중앙, (-)는 중앙에서 염산 쪽, (+)는 중앙에서 암모니아수 쪽을 의미한다.

처음 관찰된 흰 띠는 -5 cm 위치에서 나타나는데, 그 위치가 시간에 따라 (-)쪽으로 점차 이동하여 20분이 되었을 때 약 -10 cm까지 이동하였다. 교과서에서 상대적 확산 속도를 이동 거

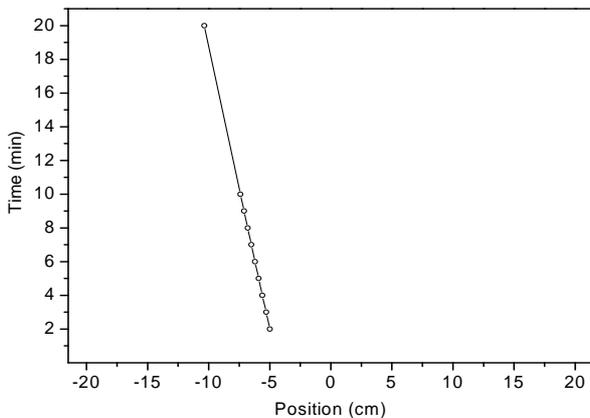


Figure 3. The position of a white ring of $\text{NH}_4^+\text{Cl}(s)$ in a diffusion tube shown in Figure 1 when the diffusion experiment was performed according to the experimental condition from textbook analysis, (-) side is to the HCl source and (+) side is to the NH_3 source.

리의 비로 분석하는데, 이를 적용하여 단순하게 해석하면 확산 속도가 시간에 따라 달라진다는 것을 나타낸다. 이는 잘못된 해석으로 이 실험 조건 및 상황이 흰 띠의 위치를 통해 상대적 확산속도를 측정할 수 있다는 가정이 성립하지 않는다고 판단 된다.

원인 분석 및 개선

교과서에 제시된 실험 방법으로 실험을 수행한 결과 나타난 염화암모늄의 흰 연기 띠의 위치가 시간이 경과함에 따라 이동하는 문제점의 원인을 분석하였다. HCl과 NH_3 기체의 확산을 관찰하는 실험이지만 두 기체를 직접 공급하지 않고 염산과 암모니아 수용액을 사용하였다. 두 수용액을 유리관 끝에 떨어뜨리면 이로부터 HCl과 NH_3 기체가 발생하고 확산을 하게 된다. 이 과정에서 실제 발생한 기체의 양이 얼마나 되는지 정확히 통제되지 못하는 실험 조건이다. 이 문제를 해결하기 위해서 순수한 기체를 사용하여 확산 실험을 수행하도록 실험을 다음과 같이 설계하였다.

염산과 암모니아수를 이용하는 앞의 실험이 갖는 몇 가지 문제점 중에서 HCl과 NH_3 기체의 초기 양을 일정하게 통제하기 위하여 HCl 기체와 NH_3 기체를 직접 유리관 양 끝에 공급하는 실험 장치를 제작하였다(Figure 2). 확산 시작 시간을 정확하게 조절하기 위해서 유리관 양 끝 부분에 콕을 장착하고 고무마개로 유리관 끝을 막아 두 기체가 간헐있도록 하였다(Figure 2). 특히, 두 기체를 주입할 때 용기 내부에 있던 기체가 완전히 교체되도록 하기 위해서 고무관을 통과하는 주사기 바늘을 두 개 꽂아서 한 쪽으로 충분한 기체를 주입하면서 다른 주사기 바늘을 통해서 내부의 기체가 빠져나가면서 기체의 교환이 일어나도록 하였다. 또한 이렇게 함으로써 유리관 끝의 시료부 내부 압력이 대기압과 같도록 설정할 수 있었다.

새로 고안한 유리관(Figure 2)의 왼쪽 콕과 고무마개 사이의 일정 부피의 공간에는 염화수소 기체를 채우고 오른쪽의 공간에는 암모니아 기체를 채운 뒤 동시에 콕을 열어 양쪽 끝에서 확산이 시작되도록 하였다. 이때 콕 사이의 튜브에는 공기가 대기압으로 채워져 있다. 같은 조건에서 같은 방법으로 3번 반복하여 실험하였으며 시간에 대한 흰 띠의 위치를 평균값으로 Figure 4와 같이 나타내었다. 3번의 실험 모두 약 3분 후에 염화암모늄의 흰 연기 띠가 관찰되기 시작했으며 -2.5 cm 지점에서 나타났고 그 위치가 변하지 않았다. 유효한 확산 공간이 전체 50 cm라고 본다면, HCl 쪽으로부터의 거리는 22.5 cm이고

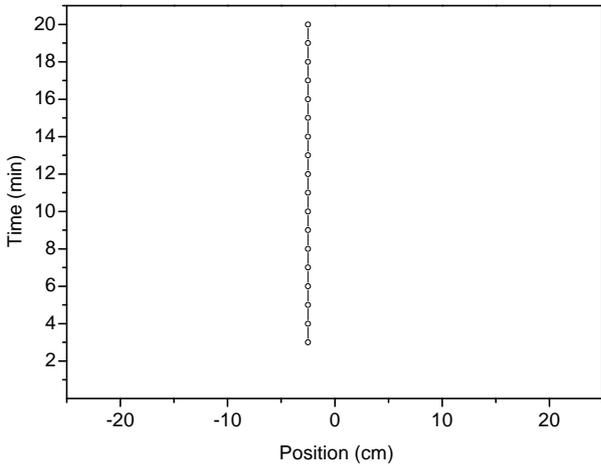


Figure 4. The position of a white ring of NH₄⁺Cl⁻(s) when the diffusion experiment was performed by HCl(g) and NH₃(g) with time.

NH₃ 쪽으로부터의 거리는 27.5 cm로 거리의 비는 1 : 1.22가 되었다.

교과서 및 학교현장에서 이 실험의 결과 분석을 하는 이론으로 Graham의 확산 속도식을 종종 이용한다. Graham의 확산 속도비는 다음과 같이 HCl과 NH₃ 기체의 분자량에 의해서 결정된다.

$$\frac{D_{\text{NH}_3}}{D_{\text{HCl}}} = \left(\frac{M_{\text{HCl}}}{M_{\text{NH}_3}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

이 식을 이용하여 이론적으로 얻어진 값은 1 : 1.46으로 1 : 1.22 와 차이가 있었다.

Graham의 확산 실험은 미세 다공성 계면을 중심으로 서로 다른 기체가 등압 조건에서 계면을 통과하는 속도의 차이를 측정하는 것인데(Graham, 1833 & 1995), 위의 확산 실험은 콧을 열면서 염화수소 및 암모니아 기체가 콧 위치를 경계로 양쪽으로 섞여 가는 과정으로 Graham의 확산 실험이 아니라 Loschmidt의 확산 실험에 해당한다(Mason and Kronstadt, 1967). 따라서 Graham의 실험에서 HCl의 확산 속도는 HCl의 분자량에 의해서 영향을 받지만 Loschmidt의 실험에서 HCl의 확산 속도는 HCl 기체와 경계를 이루고 있는 공기 기체와의 상호 섞임에 의한 확산속도로 HCl과 공기 분자 간의 확산질량에 의해서 영향을 받는다(Mason and Kronstadt, 1967).

따라서 본 실험에서 관찰한 상대적인 거리의 비는 HCl과 공기 분자가 섞이면서 확산되어간 거리(L_{HCl})와 NH₃와 공기 분자가 섞이면서 확산되어간 거리(L_{NH₃})의 공기의 비이다(Mason and Kronstadt, 1967).

$$\frac{L_{\text{NH}_3}}{L_{\text{HCl}}} = \frac{D_{\text{NH}_3,\text{air}}}{D_{\text{HCl},\text{air}}} = \left(\frac{M_{\text{HCl}}}{M_{\text{NH}_3}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{M_{\text{air}} + M_{\text{NH}_3}}{M_{\text{air}} + M_{\text{HCl}}} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{S_{\text{HCl},\text{air}}}{S_{\text{NH}_3,\text{air}}}$$

- L : Length of diffusion
- D : Diffusion coefficient
- M : Molecular mass
- S : Collision cross-section

공기의 평균 분자량은 29로 S_{HCl,air}/S_{NH₃}의 비는 1.04 로 하여 (Mason and Kronstadt, 1967) 거리의 비를 구하면 1 : 1.28 이 되며, 이는 실험값 1 : 1.22 와 매우 근사하다. 이 결과로부터 HCl과 NH₃ 기체의 양을 일정하게 통제하여 실험하였을 때, 확산을 통해 만난 두 기체가 반응하여 만든 NH₄Cl 염의 흰 띠가 시간의 영향을 받지 않고 일정하게 나옴을 확인할 수 있었다. 또 두 기체의 상대적인 확산 거리비가 Graham의 이론식으로는 정확하게 설명되지 않으며 Loschmidt의 이론식으로 잘 설명되어짐을 알 수 있었다. 하지만, 학교 현장에서 기체 통을 사용하고 정확하게 양을 조절하여 실험하는 것은 쉽지 않은 일이다. 이에 학교 실험실 상황에서 사용할 수 있으며 이론적으로 의미 있는 결과를 얻을 수 있는 실험 조건 및 방법을 찾을 필요가 있다.

교과서에서 염산과 암모니아수를 사용하는 것은 기체를 직접 다루는 것보다 쉽고 편리하게 다룰 수 있기 때문으로 해석된다. 그래서 염산과 암모니아수를 사용하지만 HCl 과 NH₃ 기체의 양을 정확하게 조절할 수 있는 방법을 찾는 것이 필요할 것으로 여겨진다. 이에 기준에 제시된 실험 방법에서 발생하는 HCl 과 NH₃ 기체의 양을 알아보기 위해서 용액의 농도에 따른

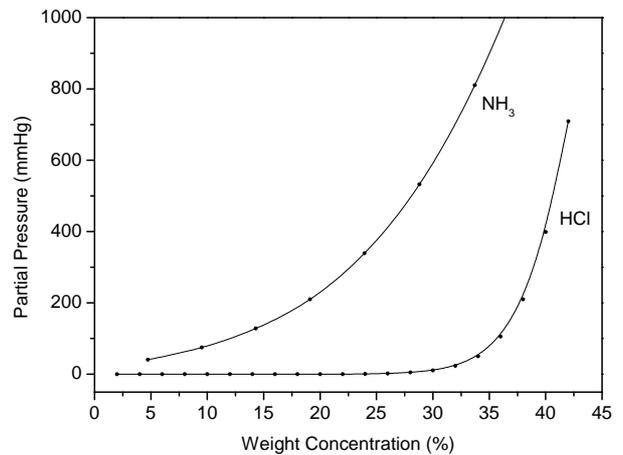


Figure 5. (a) Partial Pressure of HCl(g) over weight concentration of HCl(aq) at 20 °C. (b) Partial Pressure of NH₃(g) over weight concentration of NH₃(aq) at 20 °C (Perry, 1997).

Table 3. Experimental results from 16 sets with various concentrations of HCl and NH₃.

| | NH ₃ 12 M | NH ₃ 9 M | NH ₃ 6 M | NH ₃ 3 M |
|----------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|--|
| HCl 12 M | Detectable/ Ring moved to HCl | Detectable/ Ring moved to HCl | Possible/ Ring invariant | Detectable/ Ring moved to NH ₃ |
| HCl 9 M | Not detected | Not detected | Not detected | Not detected |
| HCl 6 M | Not detected | Not detected | Not detected | Not detected |
| HCl 3 M | Not detected | Not detected | Not detected | Not detected |

두 기체의 분압을 조사하였다. Figure 5는 염화수소-물 혼합물의 농도에 따른 HCl(g)의 분압과 암모니아-물 혼합물의 농도에 따른 NH₃(g)의 분압을 나타낸 것으로, 이 그래프를 보면 염산과 암모니아 수용액의 농도가 각각 원액(염산 37%, 암모니아수 33%)일 때, HCl의 분압보다 NH₃의 분압이 3배 이상 큰 것을 확인할 수 있다. Figure 3에서 흰 띠가 처음 생긴 위치에서 염산 쪽으로 이동하는 것은 상대적으로 과량의 NH₃가 계속 공급되기 때문에 처음 흰 띠를 만든 위치에서 남은 NH₃가 염산 쪽으로 확산되면서 흰색 염화암모늄을 생성하기 때문으로 이해된다.

이를 고려하여 공급되는 기체의 양을 일정하게 유지하는 조건을 찾는 것이 필요하다. 그 조건을 찾기 위해서 염산과 암모니아수의 농도를 변화시키면서 실험을 반복하였다(Table 3). 염산 3, 6, 9, 12 M과 암모니아수 3, 6, 9, 12 M을 각각 조합하여 총 16세트로 실험하였다.

Table 3은 실험 결과를 간단하게 요약 정리한 것으로 염산

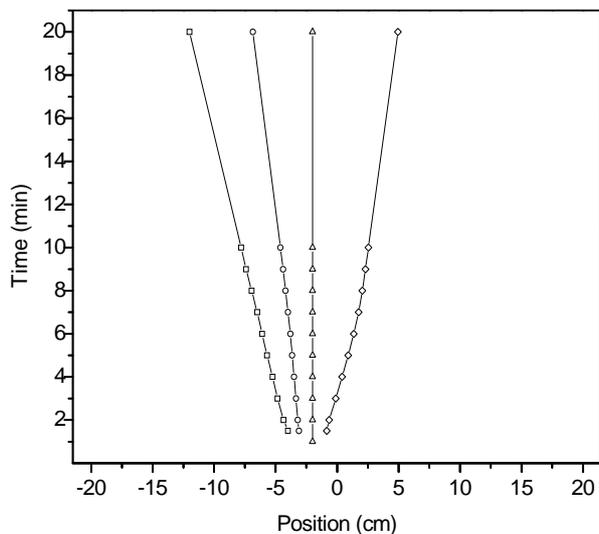


Figure 6. The position of a white smoke ring of ammonium chloride(-□- : HCl 12 M & NH₃ 12 M, -○- : HCl 12 M & NH₃ 9 M, -△- : HCl 12 M & NH₃ 6 M, -◇- : HCl 12 M & NH₃ 3 M).

12 M을 사용한 실험을 제외한 나머지 12 개의 실험에서는 흰 띠를 관찰할 수 없었다. 대부분의 실험이 흰 띠가 생성되기까지 시간이 오래 걸렸고 생성되더라도 선명하지 않아 육안으로 확인이 어려웠으며 염산을 묻힌 솜 쪽에 인접하여 나타나서 측정을 할 수가 없었다.

염산의 농도가 9, 6, 3 M인 경우 흰 띠의 관찰이 잘 되지 못한 이유는 염산의 증기압이 거의 0에 가깝기 때문으로 이해할 수 있다. 즉, 이 조건에서는 HCl 기체의 발생량이 매우 적은 반면 암모니아수는 대부분의 농도에서 상대적으로 NH₃ 기체의 발생량이 많다. 따라서 확산된 NH₃ 기체가 확산하면서 HCl 기체를 만나도 그 양이 관찰할 수 없을 정도로 적고 염산을 떨어뜨린 부근에서 겨우 흰 띠가 관찰되게 된다.

12 M 염산을 이용한 4가지 실험 조건에서 얻은 결과를 Figure 6에 나타내었다. 염화암모늄 흰 띠의 위치는 1분 간격으로 20분간 관찰하였다. 유리관 양 끝에 시약을 각각 떨어뜨린 후 약 1분 30초가 경과하자 염화암모늄의 흰 띠가 생성되기 시작하였다. 염산과 암모니아수의 농도에 따라서 염화암모늄의 흰 띠가 처음 생성되는 위치가 달랐다. 12 M 및 9 M 암모니아수를 사용했을 경우는 시간에 따라 흰 띠의 위치가 염산 쪽으로 이동하는 것이 관찰되었고 3 M 암모니아수를 사용했을 경우는 시간에 따라 흰 띠의 위치가 암모니아수 쪽으로 이동하는 것이 관찰되었으며 6 M 암모니아수를 사용했을 때는 시간에 따라 흰 띠의 위치가 변하지 않았다.

염산 12 M과 암모니아수 6 M의 실험에서 유일하게 염화암모늄의 흰 띠가 이동하지 않는 이유는 앞서 언급한 염산과 암모니아수의 증기압이 비슷하기 때문이다. 염산 12 M의 질량 백분율은 36%이며 20 °C에서 증기압이 약 100 mmHg 이다 (Perry et al., 1997). 이에 해당하는 암모니아수의 농도는 질량 백분율로 약 12%이고 몰농도로 약 6.5 M 이었다.

이 조건의 실험에서 흰 띠는 -2.0 cm 지점에서 관찰되었다. 이는 염산 쪽에서 19.5 cm이고 암모니아수 쪽에서 23.5 cm에 해당하는 거리이며 HCl에 대한 NH₃의 거리 비는 1 : 1.21 ±

0.05로 얻어졌다. 이는 Loschmidt 이론에 의한 예측 값과 매우 유사한 것으로 비록 실험 조건이 앞서 수행한 일정한 기체를 이용한 실험보다 정밀하고 정확하지는 않지만 학교 실험실 현장에서 확산에 대한 정량적인 확인을 경험하는 실험으로 충분히 정확하다고 볼 수 있다.

결론

기체의 성질을 나타내는 '기체 확산'은 고등학교 화학 II의 모든 교과서에 걸쳐 소개되는 중요한 내용이다. 그럼에도 교과서에 제시된 '기체의 확산 속도' 실험은 이론과 일치하지 않는 실험결과가 얻어지거나 실험결과가 낮은 재현성 등의 문제점이 있어 학생들의 과학개념에 혼란을 줄 수 있는 과학실험 중의 하나이다. 이에 본 연구에서는 기체 확산 속도 실험의 문제점을 분석하고 문제점의 원인을 실험 및 문헌 연구를 통해 분석하여 이를 바탕으로 학교에서 실현이 가능한 실험 방법과 실험 장치를 구안하였다.

교과서에 제시되어 있는 실험조건으로 실험을 수행해 본 결과 크게 두 가지 문제점이 있었다. 첫 번째, 염화암모늄의 흰 연기 띠가 생성된 후 시간이 경과함에 따라 생성 위치가 변하였다. 두 번째, 흰 연기 띠가 교과서에 제시된 Graham의 법칙에 근거해서 예측되는 값과 다른 위치에서 발생하였다.

순수한 HCl 와 NH₃ 기체를 이용하여 실험했을 때 시간에 따라 염화암모늄 흰 띠의 위치가 변하지 않는 것을 확인하였으며, 흰 띠의 위치는 Graham의 확산에 의한 이론적 예측값과는 차이가 있고 Loschmidt의 확산에 의한 이론적 예측값과 일치하는 것을 확인하였다. 염산과 암모니아수를 사용하는 실험에서 시간에 따라 흰 띠의 위치가 움직이는 것이 HCl 및 NH₃ 두 기체의 분압 차이 때문임을 밝혔다. 학교 현장에서 활용 가능한 실험 방법을 찾기 위해서 염산과 암모니아수의 농도를 조절하여 실험하였고 염산과 암모니아수의 농도가 각각 12 M 과 6 M 일 때 염화암모늄 흰 띠가 생성된 후 시간이 경과함에 따라 위치가 변하지 않고 한 지점에서 계속 흰 띠가 생성되었으며 그 결과가 Loschmidt 확산 실험의 이론적 예측값으로 설명되었다.

개선된 실험 조건으로 실험을 수행할 경우 흰 연기 띠가 한 지점에서 형성되고 반복하여 실험을 수행할 경우에도 재현성 있는 결과를 얻어 분자량에 따른 기체의 확산 속도를 설명하기에 더욱 효과적인 것으로 기대된다. 한편, Loschmidt 확산 속도식이 복잡한 단점을 고려하여 수식이 직관적이고 간단한 Graham 확산 속도식을 이용할 수 있는 간편한 실험 방법을 개

발하는 것도 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 서울대학교 BK 사업단의 지원을 받아 수행된 연구 결과물입니다.

Abstract

This study is to analyze the problems observed in the experiment on 'diffusion rate of gases' in high school Chemistry II text books and investigate the reason followed by suggestion of an improved experimental method. As typically introduced in textbooks, a few drops of HCl(aq) and NH₃(aq) were dropped at both ends of a glass tube, and then the position of ammonium chloride white ring created by the reaction with HCl(g) and NH₃(g) was measured. The position of the white ring changed with time. In order to investigate the reason of such change, the experiment was repeated using HCl and NH₃ gases, and the position of white ring did not change with time. Meanwhile, the relative diffusion distance did not match with the theoretical expectation of the Graham's diffusion experiment but did with that of the Loschmidt's diffusion experiment. Based on this result experimental condition allowing equal partial pressure of HCl and NH₃ gases in hydrochloric acid and aqueous ammonia solution, respectively was found, and under the obtained condition the position of white ring did not change and was consistent with the theoretical expectation. This study is anticipated to help learners to understand the scientific concept of diffusion through the improved experiment.

Key words: diffusion experiment of gas, HCl, NH₃, Graham's experiment, Loschmidt's experiment

참고문헌

- 구선아, 채희권 (2008) 7학년 교과서의 확산현상 기술에 대한 분석과 과학교사들의 확산개념에 대한 이해도 조사. 한국과학교육학회지 28(5): 383-394.
- 김주현, 이동준, 김선경, 강성주, 백성혜 (2000) 입자론의 관점에서 본 확산과 용해 개념에 관련된 과학 교과서 및 인터넷 자료 분석과 컴퓨터 수업 보조자료의 개발. 대한화학회지 44(6): 611-624.
- 김문수, 정영란 (1997) 확산과 삼투 개념에 관한 학생들의 이해

- 도 및 오개념의 원인으로서의 교과서 분석. 한국과학교육 학회지 17(2): 191-200.
- 박동조 (2000) 중학교 과학 교과서 중 원소의 불꽃반응과 확산 실험의 분석 및 개선에 관한 연구. 한국교원대학교 대학원 석사학위논문.
- 성숙경, 백종호, 정대홍 (2010) 분자확산에 대한 이론적 고찰과 탐구실험을 통한 예비교사의 개념변화. 한국과학교육학회지 30(1): 80-93.
- 이세중 (2001) 확산과 삼투 및 투석개념에 관한 교재와 학습안의 개발. 충북대학교 대학원 석사학위논문.
- 조정일, 이현옥 (1994) 확산과 삼투 분자운동 모형을 활용한 수업의 개념변화에의 효과. 한국과학교육학회지 14(3): 293-303.
- 허미연, 전혜숙, 백성혜 (2008) 용해, 확산과 관련된 혼합현상에 대한 고등학생들의 개념 유형 분석. 대한화학회지 52(1): 73-83.
- Epp DN (1990) Overhead projection of Graham's law of gaseous diffusion. Journal of Chemical Education 67(12): 1061.
- Graham T (1833) On the law of the diffusion of gases. The London and Edinburgh Philosophical Magazine and Journal of Science 2: 175-190, 269-276, & 351-358.
- Graham T (1995) On the law of the diffusion of gases. Journal of Membrane Science 100(1): 17-21.
- Mason EA and Kronstadt B (1967) Graham's laws of diffusion and effusion. Journal of Chemical Education 44(12): 740-744.
- Perry RH, Green DW and Maloney JO (1997) Perry's chemical engineers' handbook, 7th Ed. McGraw-Hill. p 76 & p 87.