

HCl(aq) + Mg(s) 반응의 반응속도 정량 측정 방법 개선 - 조작의 편이성과 재현성을 고려하여 -

백종호, 정대홍*

서울대학교 화학교육과, 서울특별시 151-742

Improvement of Quantitative Detection Method of Reaction Rate Between HCl(aq) and Mg(s) - for Simplicity of Manipulation and Reproducibility -

Jongho Baek and Dae Hong Jeong*

Department of Chemistry Education, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

요약

본 연구에서는 고등학교 과학 및 화학II에서 이루어지는 '반응속도 측정을 위한 마그네슘과 염산의 반응' 실험의 측정 방법 측면에서 문제점을 분석하고 개선된 실험 방법을 제안하였다. 교과서에 제시하는 방법인 수상치환법으로 발생하는 수소 기체를 포집했을 때 수소 기체의 발생시점과 부피 측정 시점이 일치하지 않고 반복실험에서 재현성이 떨어지는 문제점이 발견되었다. 부피 측정 방식에서 발생하는 문제점을 해결하기 위해 컴퓨터와 인터페이스된 압력센서를 이용하고 시료의 혼합 방법을 쉽고 간편하게 하여 실험의 재현성을 높이기 위하여 3-way 밸브와 주사기를 이용하였다. 본 방법을 이용하여 3회 반복 실험을 통해 실험 결과의 정확성과 재현성을 확인하였다.

주제어 : 반응 속도 측정, 염산과 마그네슘의 반응, 압력 변화, 실험 개선

서론

화학 수업에서의 실험은 실험기구 및 사용하는 시약의 양에 따라 결과가 다르게 나타날 수 있기 때문에 교과서에 제시되는 실험들에서 오류가 많이 발생한다(고영신 등, 2004). 그래서 화학은 교과서에서 수행하는 실험에 대한 문제점을 정확하게 알고, 개선을 위한 연구가 특히 필요한 과목이다. 많은 연구들에서 이러한 문제점을 파악하고 실험 내용 및 방법 개선을 위한 연구들이 진행되었다.

고등학교 과학교과에서 도입되는 다양한 화학의 개념들 중에서 반응 속도는 화학반응과 관련하여 핵심이 되는 내용으로 그 중요성이 꾸준히 강조되고 있지만, 이 개념은 학생 및 교

사에게 올바른 개념형성이 어려운 주제로 인식되고 있다(엄준원, 1999; 전형채, 2000). 특히 실험조건과 방법이 제대로 구성되지 못하면 복잡한 변인이 들어가게 되고 이는 올바른 개념형성에 방해요소가 작용하게 된다(김재현 등, 2005).

반응속도의 정량적 측정과 관련해서 국내외에서 많은 연구 결과들이 발표되고 있다. Birk and Walters(1993)의 연구에서는 마그네슘과 염산의 반응속도를 측정하는 방법으로 컴퓨터와 인터페이스된 압력센서를 이용하였다. 이 방법으로 정량적인 분석이 가능한 결과를 얻을 수 있었지만, 특수하게 제작된 유리 기구가 필요하고 반응물 혼합 방법이 불편한 단점이 있다. Chebolu and Storandt(2003)는 컴퓨터에 인터페이스된 압력센서를 이용하고 간단한 삼각플라스크를 이용하여 반응 종결 시까지 발생한 총량을 측정하였다. 하지만 반응물을 섞는 초기과정의 통제가 어렵고 반응의 동적인 변화를 관찰할 수 있도록 설계되지 않았다. 방정아 등(2006)은 마그네슘과 염산의 반응

* 교신저자: jeongdh@snu.ac.kr, Tel:02-880-8012, Fax: 02-889-0749

• 2010년 7월 8일 접수, 2010년 8월 6일 수정, 2010년 8월 7일 통과

에 의한 수소기체의 부피를 측정하는 실험에서 수상 치환 실험의 문제점 등을 분석하였다. 이를 통해 개선된 결과를 얻을 수 있는 실험 방법으로 발생한 수소 기체가 수압의 영향 없이 수면위로 전달되어 개선된 실험 결과를 얻을 수 있는 형태의 부피 변화 측정 실험을 제안하였다. 하지만 이 실험 방법은 학교 현장에서 적용해 보았을 때 반응용기와 눈금 실린더를 연결하는 고무관의 내부에 물이 차지 않게 장치하는데 어려움이 발견되었고, 반응물을 섞는 과정에서 리본 형태뿐만 아니라 구 및 가루 형태의 마그네슘을 염산과 섞을 때 재현성이 떨어지는 한계가 나타났다.

본 연구에서는 그동안 진행된 선행 연구들을 바탕으로 학교 현장에서 반응 속도 단원을 수업할 때, 학생들의 수준에서 동적인 변화에 대한 정량적 측정이 가능하면서 조작이 용이하고 재현성 있는 실험방법을 제안하고자 한다. 개선 실험의 대상은 제 7차 교육과정에 따른 고등학교 '과학' 교과서와 '화학 II' 교과서의 '반응 속도의 측정 실험' 중 '염산과 마그네슘 리본의 반응 속도 측정 실험'이다.

연구 내용 및 방법

본 연구에서 사용된 시약들은 별도의 정제과정 없이 이용하였고, 증류수는 ELGA사의 PURELAB UHQ를 이용하였다. 시약은 마그네슘 리본(99.0%, DAEJUNG), 염산(35.0%, DAEJUNG)을 이용하였고, 마그네슘 리본(폭 3 mm × 두께 0.2 mm)을 4 cm로 잘라 이용하였고, 염산은 35%로 제공되는 시약을 실험 조건에 따라 각각 1 M 농도로 묽혀 사용하였다.

기체의 압력은 Science Cube사의 Microcomputer-based laboratory(MBL) 장치에 포함된 압력센서를 이용하여 측정하였다. 반응 속도를 측정하는 방법으로 부피를 측정할 경우, 동적으로 변하는 과정에서 눈으로 측정하여 생길 수 있는 오차를 줄이기 위해서 비디오 촬영을 했고 실험 후 비디오를 천천히 재생하면서 5초 단위로 부피를 읽었다. 실험 결과의 재현성을 확인하기 위해 3회 반복 실험을 실시하였다.

결과 및 논의

방정아 등(2006)과 남미자 등(2009)의 연구에서 정리한 현행 교과서에 제시된 실험방법을 분석하였고, 이 연구들에 의하면 마그네슘과 염산의 반응을 통한 반응 속도 측정을 제시하는 교

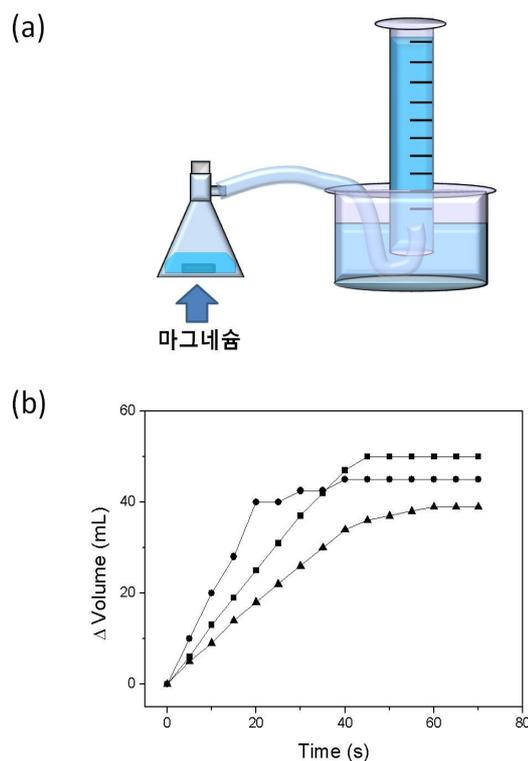


그림 1. 교과서에 제시된 부피측정 방법을 이용한 실험. (a) 실험 장치. (b) 실험 결과.

과서에서는 모두 부피를 측정하는 형태로 실험을 제시하고 있다. 이 방법을 이용하여 다음과 같은 조건으로 실험을 수행하였다. 반응물로는 4 cm의 마그네슘 리본과 1 M 염산 50 mL를 사용하였고, 삼각플라스크에서 반응시켜 눈금실린더를 이용한 수상치환 방법으로 부피를 측정하였다. 실험에 사용한 수상치환 장치와 이를 이용한 실험 결과를 그림 1에 제시하였다. 실험을 3회 반복수행한 결과 각각의 실험 결과(방정아 등, 2006; 남미자 등, 2009)는 기존의 연구 결과와 동일하게 유사 0차 반응의 형태로 나타났다. 하지만 3회 반복 수행의 결과를 비교해 보면, 각각 실험이 종료되는 시점이 다르고, 발생하는 기체의 양도 서로 다르게 나타났다.

위와 같은 문제점이 발생하는 이유는 선행 연구에서 논의된 것과 같이 몇 가지를 들 수 있다(방정아 등, 2006). 첫 번째로는 수상치환 방법을 이용하기 때문에 수소기체가 물을 밀고 올라오기가 어렵다. 또 물에 의한 수압으로 발생한 수소기체가 모두 눈금실린더로 전달되지 못하게 된다. 두 번째로 마그네슘이 다 반응하지 않아도 부피가 변화하지 않는 경우가 생긴다. 이는 반응의 종결 시점이 가까워지면 기체 발생량이 줄어들게 되고, 관

속의 물을 밀어낼 만큼 압력이 충분하지 않아 부피변화가 관찰되지 않게 된다. 마지막으로 기체가 계속 올라오는 동적인 과정이므로 각 시각마다 부피를 정확히 읽는 것이 어려웠다.

이 세 가지 문제 중에서 앞의 두 가지는 발생한 기체가 고무관 속의 물을 밀고 나와야 하는 구조 때문에 발생하는 것으로, 이를 해결하기 위해 방정아 등의 연구(방정아 등, 2006)에서 기체 포집을 위한 고무관의 입구가 수면보다 위에 놓이도록 해서 문제를 해결했다. 하지만, 사범대학 학생들을 대상으로 실험을 수행해 보았을 때, 고무관에 물이 차지 않게 연결하는 작업에서 실패하는 사례가 빈번했고 삼각플라스크에 들어있는 염산에 마그네슘을 떨어뜨리는 동작이 어렵고 재현성이 떨어졌다. 한편, 부피 측정을 눈으로 직접 측정하게 하였을 때 반응과 동시에 부피가 바로 변하기 때문에 부피 변화 속도가 빨라서 눈금실린더의 눈금을 정확하게 읽기가 어려웠다.

본 연구에서는 전통적인 수상치환법과 방정아 등(2006)의 연구에서 제안한 방법의 문제를 해결하고 실험방법을 개선하기 위하여 다음과 같은 접근을 하였다. 동적인 변화 중 측정을 해야 하므로 컴퓨터 인터페이스된 센서를 이용하였고, Birk and Walters(1993)가 제안한 압력을 측정하였다. Birk and Walters의 방법에서 사용하는 번거로운 유리 기구를 사용하는 대신에 Chebolu and Storandt(2003)가 사용한 것처럼 삼각플라스크를 사용하되 반응물의 혼합 시기를 정확하게 조절할 수 있고 재현성을 높이기 위하여 반응물 혼합 장치를 개선하였다. 개선된 혼합 장치에서는 마그네슘을 삼각플라스크에 넣어 둔 상태에서 3-way 밸브로 연결된 주사기로 염산을 넣어주게 된다. 이 장치의 개략적인 구조는 그림 2에 나타내었다. 이렇게 함으로써 반응물을 재현성 있게 혼합할 수 있었다. 염산으로부터 염화수소 기체가 발생하므로 실험 안전을 고려하여 부식의 위험이 적은 플라스틱, 고무 재질로 만들어진 재료를 이용하였다.

실험 장치는 그림 2와 같이 크게 세 부분으로 나뉜다. 첫 번째는 염산을 주입하는 주사기와 3-way 밸브로 이루어진 부분으로 그림 2의 Part 1 부분이다. 염산을 주입할 때는 삼각플라스크와 주사기가 통하도록 하고, 수소 기체가 발생할 때는 삼각플라스크 쪽이 주사기 및 외부와 차단되도록 하고, 실험이 종결된 후에는 삼각플라스크 안의 기체가 대기로 빠져나가도록 플라스크와 외부가 통하도록 한다.

두 번째 부분은 화학 반응이 일어나는 가지달린 삼각플라스크 부분으로 그림 2의 Part 2 부분이다. 삼각플라스크 안에는 마그네슘 리본을 넣고, 마개 부분은 염산이 담긴 주사기를 연결

하고, 가지 쪽은 압력센서 쪽으로 연결한다. 교과서에서 추출한 실험 방법에서 사용되는 염산은 1 M 농도 50 mL 이고, 마그네슘 리본의 양은 4 cm 로 반응 당량으로 비교하여 염산이 약 10배 과량이다. 이 때 발생하는 수소의 양은 마그네슘의 양에 의해서 결정되고 대기압 상태로 비교하면 수소기체가 약 40 mL 정도 발생한다. 반응 용기 및 장치의 내부 부피를 결정하는 삼각플라스크의 부피가 작으면 발생하는 수소 기체로 인해서 장치 내부의 압력 변화가 커지고 압력에 의해서 연결부위에 틈이 생길 수 있다. 내부 압력이 과하게 높아지지 않도록 하기 위하여 250 mL 용량의 가지달린 삼각플라스크를 이용하였다. 이는 발생할 기체 부피의 약 6배에 해당하는 것으로 밀폐된 상태에서 반응 종결 시점에서의 압력이 초기 압력의 약 15% 정도 높아지는 설계이다. 이 정도의 압력 증가는 생성 기체에 의한 폭발 위험은 없는 것으로 판단되고 보편적으로 제공되는 MBL 압력센서의 측정 한계가 ±650 mbar임을 고려할 때 적절한 측정 범위라고 사료된다.

교과서에서 사용하는 염산은 몰농도로 환산 시 약 1 M에 해당한다. 이로부터 발생하는 부식성이 높고 유독한 염화수소의 발생 양을 확인하였다. 문헌에 의하면(JSIA, 1982) 염산의 부분 압력은 4% 용액을 기준으로 하여 25 °C에서 0.00044 mmHg로 매우 낮은 것을 확인할 수 있었다. 그러나 소량이지만 염화수

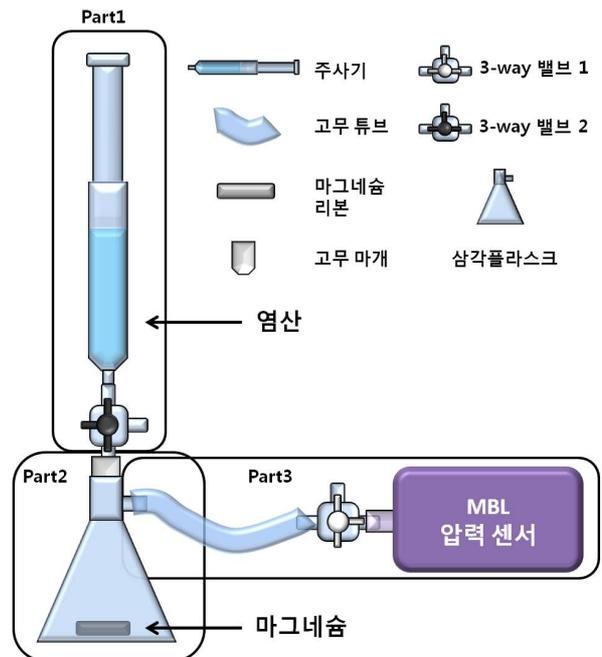
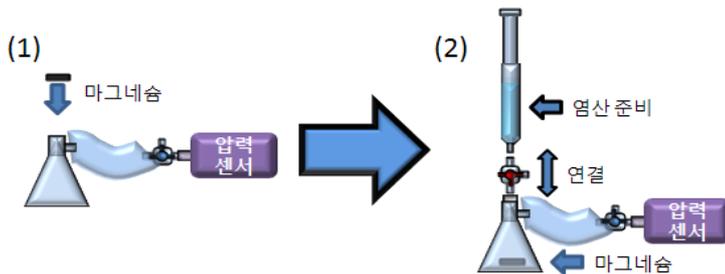


그림 2. 개선된 형태의 반응 속도 측정 실험 장치.

실험 제목: 마그네슘과 염산의 반응속도 측정 실험

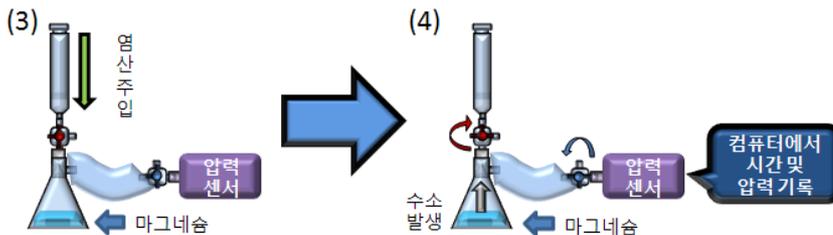
준비물: 마그네슘 리본 (폭 ~3 mm × 두께 ~0.2 mm), 염산 1 M 용액, 가지달린 삼각플라스크 (250 mL), 고무마개, 플라스틱 주사기 (용량 50~100 mL), 고무관 또는 유연한 플라스틱 튜브, 3-way 밸브, 테플론 테이프, 가위 또는 칼, 컴퓨터와 인터페이스된 압력센서 (예, MBL 압력센서), 컴퓨터 또는 Notebook

실험 장치 준비



- 가. 가지달린 삼각플라스크에 마그네슘을 넣고, 압력센서를 고무관과 밸브-1로 연결한다. (과정 1)
- 나. 고무마개와 연결된 3-way 밸브를 이용해 삼각플라스크의 입구를 막아주고, 염산이 든 주사기를 밸브-2와 연결한다. 염산을 삼각플라스크에 주입하기 전까지는 밸브를 닫아두어 염산이 새어나오지 않도록 한다. (과정 2)
- 다. 압력센서는 컴퓨터와 연결하고 MBL 측정 프로그램을 가동하여 시간과 압력이 기록되게 준비한다.

실험 과정



- 가. 염산을 주입하기 전에 밸브-1의 방향은 삼각플라스크와 대기가 통하고 압력센서와는 차단되는 방향으로 하고, 밸브-2의 방향은 주사기와 삼각플라스크만 통하도록 한다. (과정 3)
- 나. 컴퓨터에서 측정을 시작하고 주사기의 염산을 빠르게 주입한다. 그 즉시 밸브-1의 방향을 삼각플라스크와 압력센서가 통하고 대기와는 차단되게 하며 밸브-2의 방향은 삼각플라스크가 주사기 및 대기와 차단되게 한다. (과정 4)
(참고: 이 과정이 빠른 시간에 진행되므로 2인 1조로 수행하면 수월하게 실험할 수 있다.)
- 다. 마그네슘과 염산의 반응이 종결되어 압력변화가 없게 되면 측정을 종료한다.

주의 사항

- 가. 염산은 부식성 물질인 염화수소를 발생하고 반응으로 가연성 물질인 수소기체가 생성되므로 환기가 잘되는 환경에서 실험한다.
- 나. 실험을 종료하면 밸브-1의 방향을 삼각플라스크와 대기가 통하도록 하여 발생된 기체로 인하여 높아진 내부압력이 해소되도록 한다.

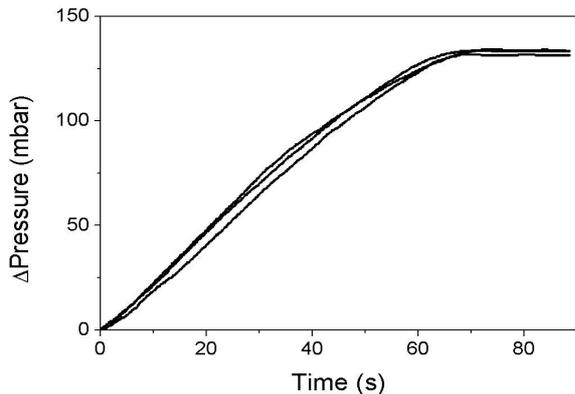


그림 3. 개선된 실험 방법을 이용한 반응 속도 측정 결과.

소 기체가 발생하므로, 환기가 잘되는 환경에서 실험을 수행해야 한다.

마지막 부분은 삼각 플라스크와 압력센서를 연결하는 고무관과 압력센서 그리고 둘 사이에 있는 3-way 밸브로 이루어진다(그림 2의 Part 3). 염산을 주입하는 순간까지는 내부와 대기가 통하고 압력센서 쪽으로는 단히게 밸브 방향을 조절하여 염산을 주입할 때 장치 내부의 압력이 높아지지 않게 하고 압력이 압력센서에 전달되지 않도록 한다. 염산 주입한 직후에는 외부와 차단하고 압력센서와 삼각플라스크가 통하도록 밸브 방향을 변경하여 발생한 기체에 의한 압력이 측정되도록 한다.

이 실험 방법을 학교현장에 사용할 수 있도록 실험 준비 및 절차에 대한 내용만 요약하면 위에 제시한 내용과 같다.

이 방법으로 실험한 결과를 그림 3에 제시하였다. 반응이 진행되는 동안 압력은 선형적으로 증가했고, 마그네슘이 모두 반응한 이후에는 압력이 일정해졌다. 실험 전후로 약 130 mbar 정도 압력 변화가 생긴 것으로 나타났고, 3회 반복 실험에서 각각의 실험 결과들이 거의 비슷한 형태로 나타났다. 반응이 완결되는 시점은 약 60초로, 부피 측정을 통한 방법으로 반응이 약 40초에 반응이 종결된 것보다 더 오래 반응이 진행되고 있음을 알려준다. 이는 압력센서를 이용한 경우는 반응 후반의 미량 발생하는 기체까지 정밀하게 측정이 되고 있음을 의미한다. 또한 압력 측정을 통한 반응 속도 측정 실험에서는 반응이 완결되는 시점 역시 균일하게 나타났다. 부피측정 실험에서 동일한 조건에서 실험을 3회 반복 실시해도 수소 기체가 물을 밀고 올라가는 수준이 차이가 발생했기 때문에 부피의 증가가 멈추는 지점이 서로 다르게 나타났었는데, 수소 기체가 결과로 반영되는데 장애가 되는 요소가 제거가 되었기 때문에 실험 결과

가 균일하게 나타난 것으로 보인다.

앞서 제시한 부피 측정을 통한 실험에서의 문제점들은 개선된 장치를 이용한 실험에서는 해결할 수 있었다. 부피 측정의 경우 물을 밀어내거나 주사기의 피스톤을 밀어내야 하기 때문에 발생한 기체의 양이 모두 실험결과에 반영되지 못하는 경우가 생기지만, 압력센서를 이용한 경우에는 위와 같은 문제점이 해소될 수 있다. 또한 부피를 측정하는 경우에 비해 압력을 압력센서로 측정하는 경우, 측정의 결과가 컴퓨터에 자동으로 저장되므로 동적인 변화과정의 측정에 도움이 되었다. 3-way 밸브와 주사기를 이용한 시료 혼합 방법의 개선으로 반복 실험에 따른 오차를 줄여 실험의 재현성이 높아졌다.

위의 실험 조건은 마그네슘의 양에 비해 염산의 양이 과량 존재하므로 유사 0차 반응의 형태를 나타내게 된다. 이 결과는 방정아 등(2006)이 보고한 실험 조건과 같이 염산이 과량으로 염산의 농도가 반응이 진행되는 동안 반응속도에 영향을 미치지 않기 때문에 나타나는 유사 0차 반응이 나타나기 때문이다. 비록 부피측정 방법과 달리 압력을 측정하는 방법이지만 유사한 실험 조건에 같은 현상을 비슷한 수준으로 정밀하고 정확한 결과를 얻을 수 있었고, 더 나아가 실험 수행이 더 간단하고 이 때문에 실험의 재현성을 높일 수 있었다.

결론

고등학교 ‘과학’ 및 ‘화학 II’ 교과서에서 반응 속도의 측정 실험으로 많이 다루어지는 ‘염산과 마그네슘 리본의 반응 속도 측정 실험’을 교과서에 제시된 형태로 수행하여 문제점을 발견하고 문헌에 제시된 방법을 활용 및 더 발전시켜서, 간편하면서 정량적이고 재현성이 좋은 실험방법을 모색하였다.

교과서에서 많이 사용하는 부피 측정의 방식에서 생기는 문제점들을 해결하기 위해 컴퓨터와 인터페이스된 압력센서를 이용하고, 3-way 밸브와 주사기를 이용하여 시료 혼합 과정을 단순화한 실험 방법을 개발하였다. 개선된 방법의 효과를 확인하기 위하여 문헌에서 확인된 유사 0차 반응의 조건으로 실험을 수행하였고, 얻어진 결과가 유사 0차 반응의 결과를 확실하게 보여주었으며, 3 회의 반복실험에서 매우 재현성이 높은 결과를 보여주었다.

본 연구에서 제안하는 실험 방법은 컴퓨터와 인터페이스된 압력센서로 측정하는 방법을 사용하기 때문에 학생 스스로 측정해서 기록하고 이를 다시 필요에 따라서 변환하는 등 교육적

으로 유용한 활동들을 생략하게 되는 한계를 가진다. 하지만, 반응에 의한 변화가 빠른 물성을 측정하는 것 또한 과학에 중요한 가치를 지니고 있다. 실제 이 실험 및 방정아 등(2006)의 개선된 부피 측정 방법에서 변화의 속도가 빨라서 눈으로 관찰하고 기록하기에는 오차가 심하고 불가능한 측면이 있었다. 이런 경우에 정확한 측정 방법의 도입은 필요하다고 사료된다. 더불어 이 실험은 장치 설치 이후 반응의 관찰 시간이 1 분 정도로 매우 짧다. 즉, 장치 설치와 실험 관찰을 포함한 전 실험 과정이 오래 걸리지 않기 때문에 1 시간의 수업 중에 반복 실험을 수행할 수 있고, 실험 결과를 정리하고 분석하고 토의할 수 있는 시간을 확보할 수 있는 장점을 확인할 수 있다. 이 실험 방법은 앞으로 실제 학교 현장에서 적용, 수행해 봄으로서 현장에서 사용하기에 적합한지 후속 연구가 필요할 것이다. 또한 기존의 탐구 실험 방법과 비교하여 학생들이 관련 개념을 학습하는데 더 효과적이었는지 조사가 필요할 것이다. 한편, 개선된 실험 장치는 학교 현장에서 활용할 때 2인 1조의 실험 형태로 진행할 것을 추천한다.

본 실험 방법에서의 유의해야할 점은, 압력을 측정하는 방법이기에 때문에 장치 내부의 압력이 너무 높지 않도록 실험 조건과 방법을 조절하는 것이다. 본 실험에서 제시한 조건으로 실험을 하였을 때 압력 증가는 15% 이내에서 일어났고 이로 인해 수소기체가 용기에서 터져 나오는 위험은 전혀 없었다. 하지만 실험 안전의 측면에서 반응이 종결된 후 밸브를 열어 대기와 용기 내부가 통하도록 해서 높아진 내부압력을 해소하는 것은 꼭 필요하다. 또 염산으로부터 발생하는 부식성 염화수소 기체 및 반응으로 발생하는 인화성 수소기체에 대한 안전을 고려하여 환기가 잘 되는 환경에서 실험을 수행해야 한다.

감사의글

마그네슘과 염산을 혼합하는 장치 세트를 제공해주신 우신 고등학교 홍종화 선생님께 감사드립니다.

Abstract

The experimental method for 'Measurement of Reaction Rate in the Reaction between Hydrochloric acid and Magnesium' introduced in the high school science and chemistry II textbooks was analyzed to propose an improved method. When the experiment was carried out by the water displacement

method introduced in textbooks, time points of hydrogen generation and measurement of volume change did not agree and observed results for 3 measurements were not reproducible. A pressure sensor interfaced with computer was adapted to avoid the water displacement method and 3-way valve and syringe were utilized to simplify mixing of samples promoting reproducibility. Correctness and reproducibility were checked through three sets of independent experiments using the proposed method.

Keywords: Reaction Rate Measurement, Reaction between Hydrochloric acid and Magnesium, Pressure Change, Experiment Improvement

참고문헌

- 고영신, 김세경, 이혜경 (2004) 초등학교 과학과 이산화탄소 발생실험의 개선에 관한 연구. *초등과학교육* 23(2): 152-158.
- 김재현, 전창순, 장낙한 (2005) 고등학교 과학의 실험 개선에 관한 연구: 화학영역의 물질 단원을 중심으로. *과학교육연구* 32: 59-76.
- 남미자, 윤희숙, 정대홍, 채희권 (2009) '반응속도' 단원의 학습 내용에 적합한 탐구 실험의 제안: 묶은 염산과 마그네슘 리본의 반응을 중심으로. *대한화학회지* 53(1): 1-11.
- 방정아, 윤희숙, 최원호, 정대홍 (2006) 기체의 부피변화를 이용한 화학반응속도 측정 실험의 이해 및 개선 연구: HCl 수용액과 고체 Mg의 반응에 대하여. *대한화학회지* 50(5): 404-414.
- 엄준원 (1999) 화학 반응 속도에 대한 고등학생들의 개념 조사. *이화여자대학교 교육대학원 석사 학위 논문*.
- 전형채 (2000). 고등학교 학생들의 화학 반응속도에 관한 개념 형성 연구. *연세대학교 교육대학원 석사 학위 논문*.
- Birk JP and Walters DL (1993) Pressure measurements to determine the rate law of magnesium-hydrochloric acid reaction. *J. Chem. Educ.* 70(7): 587-589.
- Chebolu V and Storandt BC (2003) Stoichiometry of the reaction of magnesium with hydrochloric acid. *J. Chem. Educ.* 80(3): 305-306.
- JSIA (Japan Soda Industry Association) (1982) Safe Handling of Hydrochloric Acid.