

간이 온도계 만들기 실험에 관한 정량적 분석

홍영식* · 박일우

서울교육대학교, 서울특별시 137-742

Quantitative Analysis on Experiment of Making Handy Thermometers

Young-Sik Hong* and Il-Woo Park

Department of Science Education, Seoul National University of Education, Seoul 137-742, Korea

요약

본 연구에서는 초등학교 과학 교과서 3학년 1학기 온도계기 단원에서 제시된 야쿠르트 병 간이 온도계에서 빨대 내의 수면이 상승하기 어려운 원인을 분석하였고, 간단한 계산을 통하여 다음과 같은 개선안을 제시하였다. 첫째, 고무찰흙만으로는 틈새를 완전히 막기 어렵기 때문에 고무찰흙 위에 바셀린을 발라 주었다. 둘째, 야쿠르트 병에 물을 가득 채울 경우 상승한 수면의 높이가 낮을 뿐만 아니라 물의 큰 비열로 인해서 상승 속도가 느리기 때문에 물을 약 4/5 정도만 채웠다. 교사용 지도서에서 제시된 방법으로 만든 간이 온도계는 15개 중에 8개가 수면이 4~7 cm 상승하였으나, 그 중 3개는 수면이 다시 낮아졌고 7개는 전혀 변화가 없었다. 고무찰흙 위에 바셀린을 바른 경우 15개 모두 수면이 상승하였으며 그 중 2개가 수면이 다시 낮아졌다. 마지막으로 물을 4/5 정도 채우고 고무찰흙 위에 바셀린을 바른 경우 15개 중에 14개가 수면이 10~20 cm로 많이 상승하였으나 6개가 수면이 다시 낮아졌다. 즉 야쿠르트 병 간이 온도계에서 수면의 상승에 영향을 미치는 가장 큰 요인은 고무찰흙과 빨대 사이의 틈새를 효과적으로 막는 것이다. 또한 수면의 높이는 1) 야쿠르트 병 내에 채운 물의 양, 2) 빨대의 반경, 3) 물의 온도에 크게 영향을 받는 것으로 분석되었다.

주제어 : 간이 온도계, 온도, 부피 팽창

서론

과학 교과서는 교육 과정 상에서 제시된 목표들을 구현하기 위하여 학생들의 인지 능력 발달 정도에 맞게 구성되어야 하는 교수 학습 자료이다. 초등학교에서는 과학과 수업이 국정 교과서와 교사용 지도서에 의해 병행되고 있기 때문에 이들이 차지하는 비중이 매우 크다. 또한 7차 교육 과정에서는 학생들의 창의력을 향상시키기 위하여 과학 교과서를 단순한 지식 전달이 아닌 동기 유발 및 문제 해결 능력을 배양하는 것에 초점을 맞추고 있다. 그러나 교과서 구성이 지식 전달을 위한 기본적인 내용들이 생략되고 학생들의 사고를 유도하는 질문 형식으로

되어 있기 때문에 현장 교사들은 교사용 지도서에 제시된 지침들을 크게 의존하는 과학 수업을 진행하게 된다.

따라서 과학 교과서에 제시된 실험들을 수업에 성공적으로 적용하려면, 교사용 지도서의 내용들이 구체적이고, 예상되는 문제점들에 대해 체계적인 근거와 해결 방안을 제시해야 한다. 그렇지 않을 경우 예상과는 다른 결과에 대해서 교사들의 신속하고 능동적인 대처가 어려울 뿐만 아니라 학생들의 과학에 대한 흥미를 반감시키며 과학에 대한 잘못된 인식을 줄 수 있다. 또한 교사들에게 과학 실험이란 어려운 것이라는 인식과 함께 교과서에 제시된 탐구 활동을 기피하는 원인으로 작용하게 된다.

온도와 열의 개념은 초등학교 과학 교과서의 3학년 1학기 온도계기와 4학년 2학기 열에 의한 물체의 부피 변화, 그리고 5학년 2학기 에너지 단원과 직접적으로 연관되며, 4학년 2학기 모

*교신저자 : njyshong@snu.ac.kr, Tel: 02-3475-2466, Fax: 02-3475-2263

*이 논문은 초청논문임.

습을 바꾸는 물과 5학년 1학기 물의 여행 및 6학년 2학기 계절의 변화 단원에서도 적용되는 매우 중요한 과학적 개념 중 하나이다. 따라서 초등학교 3학년 1학기 온도재기 단원에서는 이미 야쿠르트 병을 이용한 간이 온도계 제작에 관한 내용이 제시되어 있다. 이러한 중요성에 비추어 인지갈등 수업 전략을 통한 초등학교의 열에 관한 개념을 분석되었고(이종호, 2006), 실제 실험 활동을 성공적으로 수행하기 위한 간이 온도계 만들기 실험 개선 방안들이 제시되었다(강영주, 2005).

그러나 교사용 지도서에는 야쿠르트 병 간이 온도계(이후 간이 온도계라 한다.) 만들기에서 빨대 내 수면을 원활히 상승시키기 위하여 야쿠르트 병에 채울 물의 양과 사용한 빨대의 직경, 그리고 물의 온도에 따른 수면의 높이에 관하여 정량적인 수치가 제시되지 않았다. 이러한 정량적 분석이 없으며 많은 교사들이 간이 온도계의 작동에 관한 근본적인 원리를 잘 이해하지 못하기 때문에 간이 온도계가 작동하지 않는 이유를 단순히 실험 재료나 실험 과정상의 오류로 해석하고 지나치는 경우가 많다. 즉 교사들의 원활한 탐구 활동을 돕기 위해서는 과학적인 법칙을 이용해서 여러 가지 조건에 따른 간이 온도계 수면의 변화 등을 예상하고, 성공적인 실험을 위한 정확한 조건들을 제시해야 하는 것이다. 실제로 현장 교사의 설문 조사에 따르면, 간이 온도계 만들기에서 가장 큰 어려움은 온도계의 눈금이 변하지 않는다는 답변이 86 %일 정도로 교사용 지도서에 제시된 지침은 심각한 문제를 갖고 있다(강영주, 2005). 이에 많은 교사들은 간이 온도계 만들기 실험에 대한 부정적인 인식을

갖고 있다.

본 연구에서는 간이 온도계를 만들 때, 야쿠르트 병 내부의 공기를 완전하게 밀폐하는 것의 중요성과 여러 조건들에 따른 수면의 높이를 정량적으로 계산하여 실험에 필요한 구체적인 조건들을 제시한다. 간이 온도계 만들기는 대부분이 실패하는 어려운 실험이 아니라 실생활에서 쉽게 접할 수 있는 재료들을 이용하여 쉽게 수행할 수 있는 탐구 활동이다.

연구 내용 및 방법

제 7차 교육 과정에 따라 초등학교 3학년 1학기 온도재기 단원의 간이 온도계 만들기 실험에서 제시된 ①~⑥ 과정 중에서 문제가 되는 것은 ④번과 ⑤번이다(교사용 지도서, 2002). 아래의 ④번에서 약간의 공간이라는 것이 지극히 주관적이면서도 실험에 큰 영향을 미치는 변인이다. 또한 ⑤번에서 고무찰흙으로는 빨대 주변을 완벽하게 밀봉하기가 어렵다.

④ 염색한 물을 야쿠르트 병에 약간의 공간만 남기고 채운다.

⑤ 긴 빨대를 원래 있던 구멍에 꽂은 다음, 고무찰흙으로 조심스럽게 빨대 주변을 막는다.

개선된 간이 온도계 만들기

본 연구에서 이 실험 과정을 다음과 같이 개선하였다. 교사용 지도서에 제시된 방법과의 차이점은 첫째, 야쿠르트 병을 잘

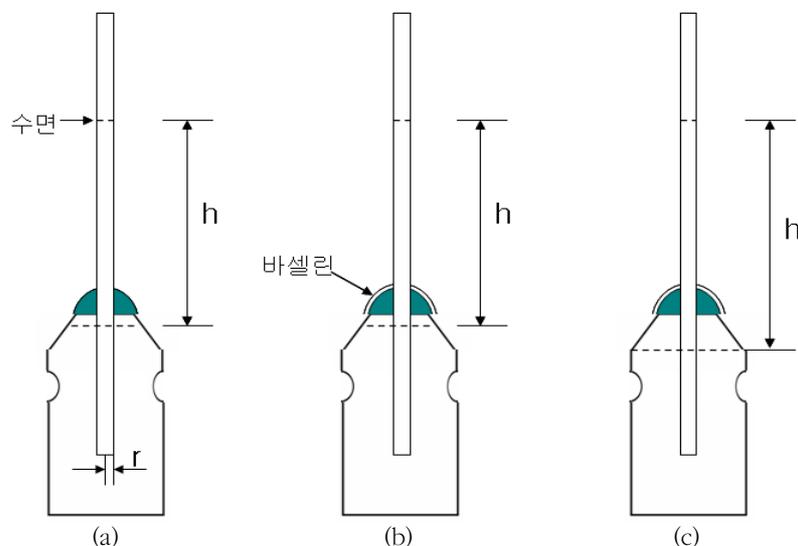


그림 1. (a) 교사용 지도서에 제시된 방법으로 만든 간이 온도계, (b) 고무찰흙 위에 바셀린을 바른 간이 온도계, (c) 물을 4/5 정도 채우고 고무찰흙 위에 바셀린을 바른 간이 온도계.

밀폐하기 위하여 고무찰흙 위에 바셀린을 바른다. 둘째, 수면의 상승을 빠르고 잘 관찰할 수 있도록 정량적인 계산에 의해 야쿠르트 병에 채운 물의 양을 약 4/5로 결정하였다. 개선된 간이 온도계의 효과를 확인하기 위하여 15명의 예비교사를 대상으로 그림 1과 같은 세 종류의 간이 온도계를 만들었다.

기체의 압력 확인 장치 개발

간이 온도계에서 빨대 내 수면 상승의 주요 원인은 기체의 팽창에 의한 것임을 시각적으로 보여주는 기체 압력 확인 장치를 개발하였다(그림 2).

연구 결과 및 논의

빨대 내 수면의 높이 계산

간이 온도계를 만들 때 빨대 주변의 틈새를 완벽하게 막았다면, 온도가 올라갈 때 빨대 내 수면의 높이에 직접적인 영향을 미치는 변인들은 야쿠르트 병 내부의 물과 빈 공간을 차지하는 기체의 부피 변화, 빨대의 반경과 물의 온도이다. 따라서 부피가 65 mL인 야쿠르트 병을 사용했다면, 이러한 변인들을 고려하여 빨대 내 수면의 높이를 이론적으로 계산할 수 있다. 20 ℃, 50 ℃, 60 ℃에서의 물의 밀도는 각각 0.99821 g/cm³,

0.98803 g/cm³, 0.98320 g/cm³이므로 60 ℃와 20 ℃의 물의 부피 비는 1.0153이다(Lide, 2002-2003). 또한 기체는 샤를의 법칙에 의해 기체의 부피는 온도가 1 ℃ 증가할 때마다 1/273 씩 증가하므로 온도가 20 ℃와 60 ℃로 높아질 때 기체의 부피 비는 333 K / 293 K = 1.1465이다. 야쿠르트 병에 채운 물의 양에 따른 부피 증가는 표 1과 같다.

이 때 사용한 빨대의 반경을 r, 빨대 내에서 상승한 수면의 높이를 h라 하면, 상승한 수면의 높이는 총 부피 증가 = $\pi r^2 h$ 식으로 간단히 계산할 수 있다(표 2). 따라서 수면의 높이는 채운 물의 양과 빨대의 반경에 크게 영향을 받게 된다. 표 2의 결과에서, 교사용 지도서에 제시된 방법처럼 약간의 공간(0~5 mL)만을 남기고 반경이 2 mm인 빨대를 사용할 경우 물의 온도가 60 ℃로 증가할 때 수면의 높이는 7.9~13.1 cm 정도로 높아지며, 약 1~2 cm는 고무찰흙에 의해 가려진다. 즉 이론적인 계산에 의하면 교사용 지도서의 지침을 따라서 만든 간이 온도계에서 수면의 상승을 충분히 관찰할 수 있어야 한다.

간이 온도계를 이용한 온도 측정

그림 3(a)는 교사용 지도서에 제시된 방법으로 만든 그림 1(a)의 간이 온도계를 60 ℃의 물에 넣고 관찰한 것이다. 약 5분 후에 그림과 같이 15개 중에 8개가 수면이 상승하였으나 그 중 3개는 다시 수면이 낮아지고, 7개는 변화가 없었다. 이것은

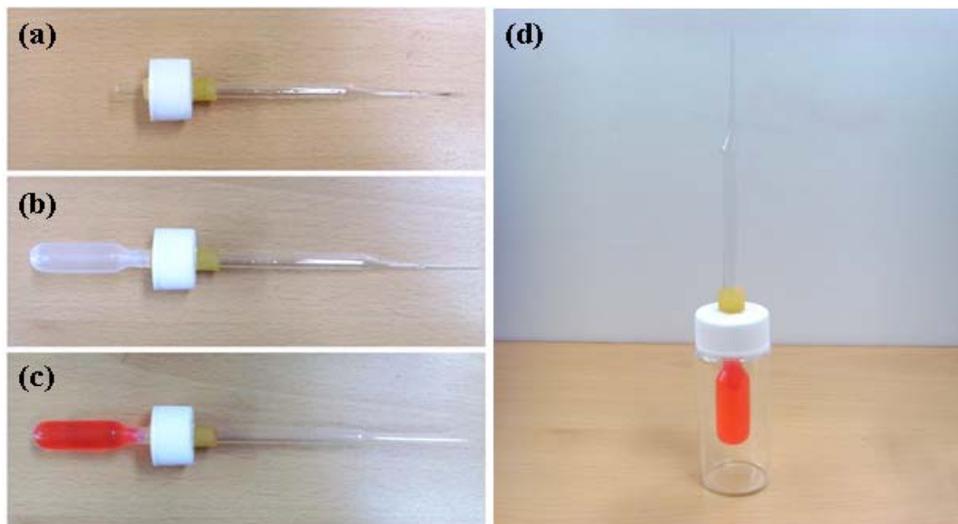


그림 2. 기체 압력 확인 장치

- (a) 병마개에 $\phi = 9$ mm인 구멍을 뚫고 고무관을 끼운 다음 $\phi = 7$ mm인 일회용 유리 스포이트를 고무관에 끼운다. (b) 일회용 플라스틱 스포이트의 밸브를 잘라서 유리관에 끼운다. (c) 염색한 물을 밸브에 채운다. (d) 완성된 장치.

간이 온도계 만들기 실험에 관한 정량적 분석

표 1. 용량이 65mL인 야쿠르트 병에 채운 물의 양과 온도가 20 ℃에서 60 ℃로 증가할 때, 야쿠르트 병 내부의 부피 증가

물의 양 (mL)	기체의 부피 (mL)	60 ℃에서 물의 부피 (mL)	60 ℃에서 기체의 부피(mL)	총 부피 증가(mL)
65	0	65.99	0	0.99
60	5	60.92	5.73	1.65
55	10	55.84	11.47	2.31
50	15	50.77	17.20	2.96
45	20	45.69	22.93	3.62
40	25	40.61	28.66	4.27

표 2. 물의 온도가 20 ℃에서 60 ℃ 증가할 때, 빨대 내 상승한 수면의 높이 (cm)

물의 양	빨대의 반경			
	1.5 mm	2 mm	2.5 mm	3 mm
65	14.1	7.9	5.1	3.5
60	23.3	13.1	8.4	5.8
55	32.6	18.4	11.7	8.2
50	41.9	23.6	15.1	10.5
45	51.2	28.8	18.4	12.8
40	60.5	34.0	21.8	15.1

수면의 상승에 영향을 미치는 요인에는 채운 물의 양, 빨대의 반경, 그리고 물의 온도보다 더 중요한 요인이 있음을 의미한다. 기존의 연구에 의하면 간이 온도계 실험에서 수면이 상승하지 않는 경우가 86 %이며, 그 원인으로는 빨대 주변을 꼼꼼히 막지 못해서(60 %), 병 안에 넣는 액체의 종류가 적절치 않아서(17 %), 따뜻한 액체의 온도가 적절하지 않아서(13 %) 등으로 응답하였다(강영주, 2005). 즉 60 %의 교사들은 빨대 내

수면이 상승하지 않는 원인이 빨대 주변의 틈새를 완벽하게 막지 못한 것으로 인식하고 있다. 이와 마찬가지로 본 연구에서 주목할 점은 수면이 상승하던 8개 중에 3개는 수면이 다시 하강한다는 것이다. 이것은 간이 온도계에서 틈새를 차단하는 것의 중요성을 나타낸다. 예를 들어 채운 물의 양이 60 mL일 경우 틈새를 완벽하게 막지 못한다면 온도가 상승할 때 처음에는 기체의 압력에 의해 물을 빨대 내로 밀어 올리지만, 기체의 압

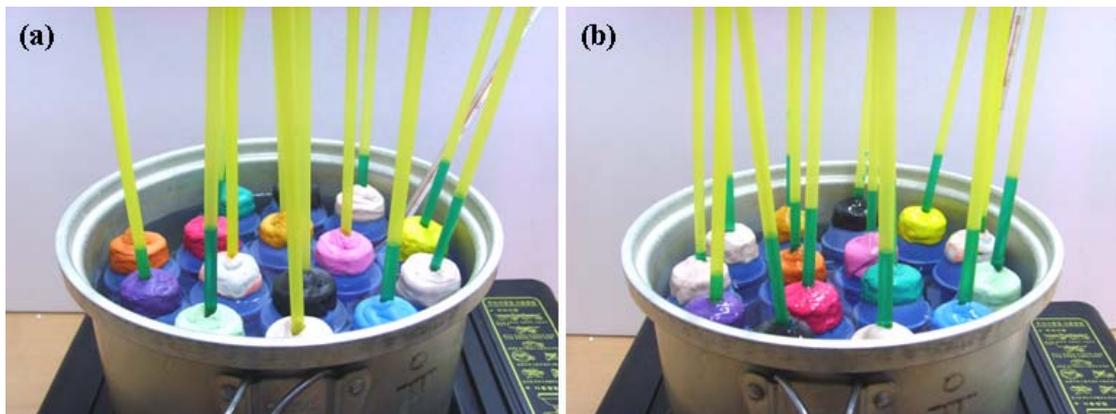


그림 3. 60 ℃의 따뜻한 물에 넣은 간이 온도계의 수면 변화. (a) 교사용 지도서에 제시된 방법으로 만든 간이 온도계, (b) 고무찰흙 위에 바셀린을 바른 간이 온도계.

력이 점점 커지면 틈새 사이로 기체가 새어 나가서 압력이 감소하고 수면이 낮아지게 된다. 따라서 표1에서 총 부피 증가는 1.65 mL가 아니라 0.92 mL이며, 이것도 빨대 내로 상승하는 것이 아니라 단지 야쿠르트 병 자체에서 물의 높이만 60.92mL로 더 높아지는 것이다. 따라서 간이 온도계에서 수면의 상승은 빈 공간 내부에서 팽창한 기체의 압력에 의해 야쿠르트 병 내부의 물과 기체의 부피 팽창된 양만큼 빨대 사이로 물을 밀어 올리는 것이다. 이처럼 기체가 관련된 실험에서 가장 중요한 것은 기체의 압력을 유지시키는 것으로서 간이 온도계에 사용된 고무찰흙만으로는 틈새를 완전히 차단할 수 없다.

그림 3(b)는 바셀린을 바른 그림 1(b)와 같은 간이 온도계를 60 °C의 물에 넣고 관찰한 것이다. 이 경우에는 15개 중에 15개가 수면이 4~7 cm 상승하였고 2개만이 수면이 상승하다가 낮아졌다. 이처럼 고무찰흙 위에 바셀린을 바른 경우에는 대부분 성공하였다. 즉 간이 온도계에서 수면의 변화가 나타나지 않는 가장 큰 원인은 고무찰흙만으로는 틈새를 완벽하게 막을 수 없기 때문이다. 그러나 한 가지 주목해야 할 것은 물의 비열은 4.19 J/g·°C로서 매우 크기 때문에 수면의 상승을 관찰하려면 약 5분 정도의 시간이 소요된다. 그러나 이 과정에서 외부의 따뜻한 물과 간이 온도계의 물이 열적인 평형을 이루기 때문에 실제 온도는 처음 온도인 60 °C보다 낮아진다. 예를 들어 500 mL 비커에 물을 250 mL 채우고 60 °C로 가열한 다음 물을 끄고, 물을 가득 채운 야쿠르트 병을 넣었을 때 비커의 물과 야쿠르트 병 내부의 물의 온도는 약 5분 후에 50 °C 정도가 된다(그림 4). 따라서 수면의 높이는 간이 온도계를 60 °C의 따뜻한 물에 넣었더라도 7.9~13.1 cm 보다 낮은 4~7 cm가 된다. 이것은 물의 온도를 50 °C로 가정하여 계산한 5.3~9.0 cm와 비슷한 결과이다(표 3).

그러나 조건에 따라서 수면의 높이는 더 낮아질 수 있기 때

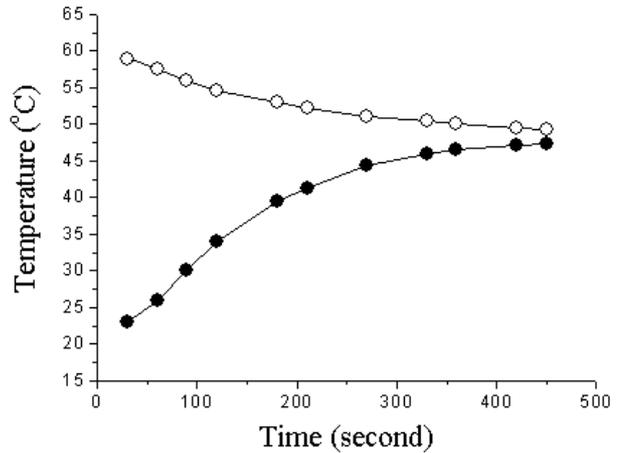


그림 4. 시간에 따른 비커와 야쿠르트 병 내부에 있는 물의 온도 변화.

문에 확실하게 관찰할 수 있도록 15 cm 정도로 상승시키려면 표 3에서 계산된 것처럼 물을 4/5 정도만 채워야 한다. 또한 이 경우 빈 공간에 남아있는 기체(공기)의 비열(1.006 J/g·°C)이 물(4.18 J/g·°C)보다 훨씬 작기 때문에 수면의 상승을 관찰하기 위한 시간이 훨씬 짧아진다. 이것은 초등학교생이라는 점을 고려하면 중요한 요소이다. 그림 5는 물을 4/5 정도 채우고 고무찰흙 위에 바셀린을 바른 그림 1(c)의 간이 온도계를 60 °C의 물에 넣고 30초 후에 관찰한 것이다. 이 경우 15개 중에 14개가 30초 내에 수면이 10~20 cm 정도로 올라갔으며 1개는 변화가 없었다. 그러나 14개 중에 5개는 중간에 수면이 다시 낮아졌다. 이것은 비록 바셀린으로 틈새를 막았더라도 간이 온도계의 온도가 증가할 때 기체의 압력이 크게 높아져서 바셀린 층도 뚫고 기체가 새어나오기 때문이다. 따라서 이 경우 간이 온도계를 적당한 시간 내에 수면의 높이 변화를 관찰할 수 있었지만 온도가 높아지면 일부는 기체가 새어나간다. 따라서 공기의 압

표 3. 물의 온도가 50 °C일 때 빨대 내 상승한 수면의 높이 (cm)

물의 양	빨대의 반경			
	1.5 mm	2 mm	2.5 mm	3 mm
65	9.5	5.3	3.4	2.4
60	16.0	9.0	5.8	4.0
55	22.5	12.6	8.1	5.6
50	29.0	16.3	10.4	7.2
45	35.5	20.0	12.8	8.9
40	42.0	23.6	15.1	10.5



그림 5. 물을 4/5 정도 채우고 고무찰흙 위에 바셀린을 바른 간이 온도계.

력이 너무 크지 않도록 간이 온도계를 이용하여 약 50 ℃(실제로는 약 40 ℃)의 물의 온도를 측정할 경우 80 % 이상 성공하였다.

기체 압력 확인 장치

간이 온도계에서 수면이 높아지는 것은 물을 채우고 난 후 비어있는 공간의 기체에 의해 발생한 압력으로 물을 빨대 사이로 밀어 올리는 것이다. 그러나 간이 온도계도 알코올 온도계처럼 액체의 부피 팽창에 의해 수면이 높아지는 것으로 잘못 인식하는 경우가 대부분이다. 실제로 온도가 증가할 때 기체의 압력이 어떻게 작용하는가를 확인할 수 있는 간단한 기체 압력 확인 장치와 그 작동을 그림 6에 나타내었다. 이 장치를 끓는 물에 넣으면 유리병 내부의 공기가 팽창하면서 플라스틱 스포이트 내부의 밸브를 누르고, 밸브의 내부에 있던 물이 상승하게 된다. 즉 외부에서 유리병 내부로 전달된 열이 내부에 있는 기체들의 운동을 활발하게 하면서 손가락으로 스포이트를 누르는 것과 동일한 압력을 스포이트에 가한다. 이것은 간이 온도계에서 수면의 상승이 간이 온도계 내부의 기체가 열에 의해 팽창하면서 수면을 상승시키는 것과 동일한 원리임을 보여준다.

결론 및 제언

이 연구는 제 7차 교육 과정의 초등학교 과학교과서 3학년 1학기 온도재기 단원에서 탐구 활동으로 만든 간이 온도계가

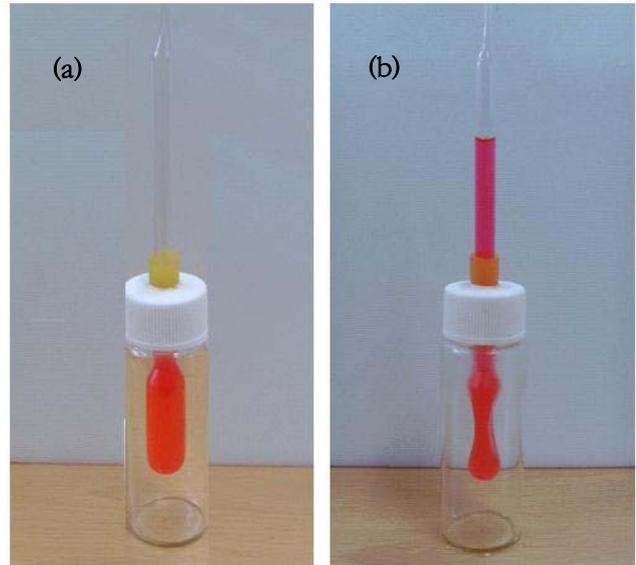


그림 6. 기체 압력 확인 장치의 작동. (a) 상온, (b) 끓는 물에 넣고 난 후

잘 작동하지 않는 원인을 분석하고 그 개선안을 제시하였다. 비교적 간단한 실험임에도 불구하고 현장에서 액체와 기체의 부피 팽창 및 기체의 성질에 대한 이해의 부족으로 인해 실험이 제대로 수행되지 않고 있다. 간이 온도계를 제작할 때에는 빨대 주변의 틈새를 확실하게 막는 것이 가장 중요하며, 본 연구에서는 바셀린을 이용하여 밀봉하였다. 또는 고무찰흙보다 밀봉 효과가 뛰어난 지점토와 같은 재료를 사용하는 것도 효과적이다.

야쿠르트 병 간이 온도계의 대안으로 제시되는 필름통 간이 온도계에서는 필름통 뚜껑을 닫을 때의 압력으로 수면이 빨대 위로 올라오기 때문에 처음의 높이를 관찰할 수 있다. 그러나 필름통 간이 온도계를 만들 때 필름통 뚜껑에 빨대를 끼우는 과정에서 빨대 끝이 변형이 되므로 야쿠르트 병과 마찬가지로 틈새를 확실하게 막는 것이 가장 중요하다. 따라서 간이 온도계는 야쿠르트 병에 물을 4/5 정도 채우고 바셀린을 바른 다음 약 50 ℃의 따뜻한 물의 온도를 측정하는 것이 재료의 준비나 제작 과정에서 가장 효과적인 것이다. 간이 온도계에서 수면이 상승하다가 낮아지는 것은 간이 온도계의 작동 원리를 정확하게 이해한다면, 기체의 압력과 관련시켜 설명함으로써 과학에 대한 흥미와 호기심을 유발할 수 있을 것이다. 또한 기체의 압력이 온도에 따라 팽창한다는 것을 기체 압력 확인 장치를 통하여 실제로 확인할 수 있기 때문에 학습 효과가 더 높아질 것이다.

그러나 온도재기 단원에서 제시된 온도계는 액체의 부피 팽

창을 이용한 알코올 온도계이므로 기체와 액체의 부피 팽창을 이용하는 야쿠르트 병 간이 온도계와는 개념이 다르다. 또한 기체의 성질은 6학년 1학기에서 제시되기 때문에 기체의 팽창을 이용한 간이 온도계를 3학년 과정에서 포함시키는 것은 개념의 전개상에 문제가 있다(강영주, 2005). 그렇지만 간이 온도계는 쉽게 구할 수 있는 재료들을 이용하여 본 논문에서 서술한 것과 같은 기체와 액체의 부피 팽창과 같은 과학적 개념뿐만 아니라 고무찰흙으로 밀봉한 다음 바셀린을 이용하여 틈새를 완전히 막는 기술적인 내용을 포함하는 중요한 실험이라 하겠다. 따라서 향후 교과서 개편 과정에서 간이 온도계 만들기는 기체의 개념을 이해하고 난 후 초등학교 고학년에서 지구과학 영역의 일기예보나 계절의 변화 단원과 연계한 탐구 활동으로 활용할 것을 제안한다.

ABSTRACT

In this study, the problems for the making of handy thermometers presented in the elementary science textbook were analyzed, and the improved methods to rise water surface were proposed through a simple calculation. First, because a gap between the yogurt bottle and the straw can not be sealed only a rubber clay, it was pasted with a vaseline. Second, about 80% of yogurt bottles were filled with water because, if it is fully filled, the height of water surface is too low to observe and, due to large specific heat of water, the rate of water rising

is a little bit slow. Eight handy thermometers among fifteen made by the instruction of teachers guide book were operated and the height of water surface rose up to 4~7 cm. However, three of them were lower again. In the case of using vaseline, the water surfaces of all fifteen thermometers rose, and then two of them were decreased again. Finally, in the case of using vaseline and filling about 80 % of yogurt bottle, the water surface of fourteen handy thermometers highly rose up to 10~20 cm, but six of them went down. That is, the important factors on the rising of water surface are not the position and type of straw, but the sealing the gap between the yogurt bottle and the straw. The height of water surface depends largely on 1) the amount of water inside yogurt bottle, 2) the radius of straw, and 3) the temperature of water.

Key words : handy thermometer, temperature, volume expansion

참고문헌

이종호 (2006) 인지갈등 수업 전략을 통한 초등학생의 열 개념 변화. 서울교육대학교 석사학위 논문.
 강영주 (2005) 초등학교 과학 내용 중 간이 온도계 만들기 실험 개선 연구. 서울교육대학교 석사학위 논문.
 교육인적자원부 (2002b) 초등학교 교사용 지도서 과학 3-1. 대한교과서주식회사.
 Lide DR (2002-2003) CRC Handbook of Chemistry and Physics 83th Ed. CRC Press, Chap 6.