**물리학 실험 1 (033)**

**XXX 조교님**

**<에너지의 모습> 보고서**

자연과학대학

물리천문학부

2021-00000

옥토끼의 비밀연구소

(Dated: June 1, 2021)

I. 실험 목적과 개요

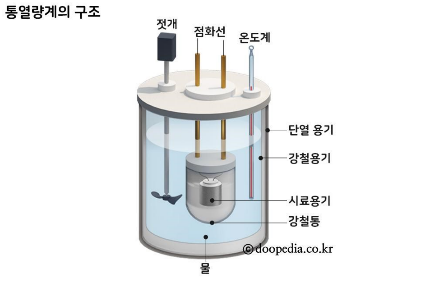
자연현상에서 에너지는 역학적 에너지가 아닌 열의 형태로 나타날 수 있다. 이 때, 외부와 고립되어 있는 계의 열에너지와 역학적 에너지의 총합은 보존된다. 계의 내부 에너지 변화를 측정하여 열의 일당량, 열량계의 열용량, 물체의 비열을 구하고자 한다.

II. 배경이론

II-1. 열역학 제1법칙

계의 내부 에너지 변화량 은 외부에서 유입된 열 와 외부로 한 일 의 차이이다. 내부 에너지, 열, 일은 동등하게 비교할 수 있는 물리량이고, 외부에서 유입된 열이 계의 내부 에너지를 변화시키거나 외부에 일을 한다고 이해할 수 있다. 그 과정에서 역학적 에너지와 열에너지의 총합이 보존된다는 것을 설명하고 있다. 이를 ‘열역학 제1법칙’이라고 한다.

II-2. 열랑계



[그림 1] 열랑계의 구조

(출처 : 네이버 지식백과)

점화선에 전압 의 전류 를 흐르게 하면 매초 의 열에너지가 발생한다. 그에 따라 물의 질량 , 비열 에 대해 매초 의 온도가 상승한다. 이 때, 열에너지 1cal로 변환되는 일의 양을 의미하는 ‘열의 일당량’이 이므로 물의 비열은 이다.

실제로는 물의 온도와 함께 열량계의 온도도 증가하므로 열량계의 열용량 에 대해서 물의 온도는 매초 만큼 증가한다고 할 수 있다. 물의 질량에 따라 실험을 진행하여 x축을 물의 질량, y축을 온도 증가율로 하여 그래프를 그린 다음 기울기와 절편으로부터 열량계의 열용량을 구할 수 있다.

한편, 열량계도 외부와 열 교환을 하여 열이 손실된다. 열량계 겉용기를 통한 열 손실, 열전대를 통한 열 손실, 공기로의 열 전달과 복사로 인한 손실이 있다. 따라서 전류를 흐르게 하지 않았을 때 물의 온도의 변화율 를 측정하여 열량계의 열 손실율 을 고려한다. 이 때, 열량계의 열 손실율과 열용량이 일정하다면 이다.

만약 비열이 이고 질량이 인 물체를 열량계에 추가로 넣는다면 온도 변화율은 이다. 물체의 존재 여부에 따른 온도 변화율을 비교해 물체의 비열을 구할 수 있다.

III. 실험 방법

<준비물>

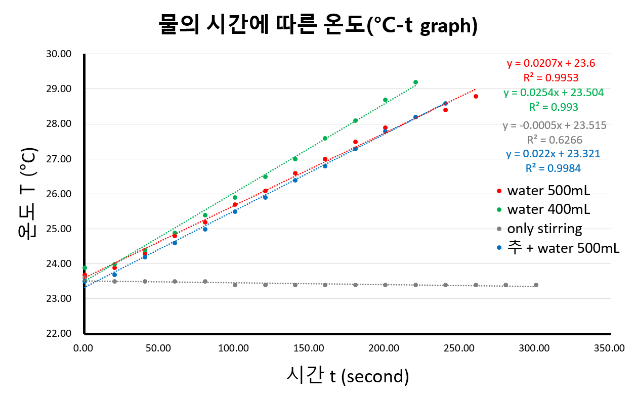
디지털 온도계, 메스실린더, 직류 전원 장치, 열량계, 전선 2개

III-1. 실험 과정

1. 메스실린더를 이용해 열량계에 물 500mL를 담는다.
2. 열의 출입이 최소화되도록 열량계의 뚜껑을 잘 닫는다.
3. 디지털 온도계의 작동 상태를 확인한다.
4. 직류 전원 장치를 설정하고 전원을 켠 뒤 전압을 1V로 맞춘다.
5. +단자의 전선과 -단자의 전선을 연결하고 전류값을 설정해 최대 허용 전류를 3A 이하로 맞춘다.
6. 직류 전원 장치에 열량계 내부에 열을 가하고 열량계 물의 온도를 측정한다. 이 때, 전원 장치의 전압과 전류의 값, 온도를 일정한 주기로 측정한다. 그리고 젓개를 이용해 물을 골고루 섞어준다.
7. 시간에 따른 온도 그래프를 그린다.
8. 물의 질량을 달리하여 같은 실험을 반복한다.
9. 물체를 열량계에 추가하여 같은 실험을 반복한다.
10. 열량계의 열용량, 물체의 비열을 구한다.

IV. 실험 결과 및 토의

IV-1. 실험 결과



[그래프 1] 시간에 따른 물의 온도 그래프

[그래프 1]은 약 5분동안 열량계 안의 물의 온도를 온도계로 측정한 값을 시간에 따라 나타낸 그래프이다. 18.9V의 전압으로 2.76A의 전류를 점화선에 흘려주었을 때 발생하는 열로 물의 온도가 상승하게 된다. 열을 가하고 물 500mL, 물 400mL에 대해서 실험하고, 열을 가하지 않고 젓개만 저었을 때, 열을 가하고 추를 물 500mL에 같이 넣은 상황에서 추가적으로 실험을 진행하였다.

네 번의 실험에 대하여 관측값을 점으로 표시하고 선형 추세선을 점선으로 나타냈다. 이 때, 열을 가하고 물을 500mL, 400mL 넣었을 때와 물 500mL에 추를 함께 넣은 실험에서 모두 결정계수가 이다.

그러나, 열을 가하지 않고 오직 젓개만 저었을 때(only stirring)는 결정계수가 으로 매우 높은 편은 아니다. 열을 가한 경우와는 달리 오히려 온도가 시간이 흐름에 따라서 감소하는 경향을 보이고, 온도가 감소했다가 증가하는 구간이 나타나는 것으로 보아 다소 불규칙한 온도 변화가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

[표 1] 각 실험에서 시간에 따른 온도 변화율(°C/s)

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 물 500mL | 물 400mL | only  stirring | 추와 물 500mL |
|  | 0.0207 | 0.0254 | -0.0005 | 0.0220 |

[표 1]은 네 번의 실험에서 [그래프 1]에서 그린 선형 추세선의 기울기를 토대로 시간에 따른 온도 변화율을 나타낸 표이다. 젓개만 저었을 때를 제외하고는 모두 온도가 상승하고 있음을 확인할 수 있다. 그리고 온도 변화율의 크기를 비교해보면 물 400mL를 넣었을 때가 가장 크고 그 다음은 물 500mL와 추를 넣었을 때, 물 500mL를 넣었을 때 순으로 크다.

IV-2. 결과 분석(토의)

먼저, [그래프 1]의 결과를 분석해보자. 열을 가한 실험에서 모두 결정계수가 이므로 관측값에 대해서 선형 추세선의 설명력이 높다고 할 수 있다. 즉, 시간이 흐름에 따라 물의 온도 변화율은 일정하다고 가정할 수 있다. 따라서, [표 1]과 같이 선형 추세선의 기울기로부터 시간에 따른 온도 변화율 을 구한 것은 타당하다고 할 수 있다. 이론적 배경 II-2에서 알아보았듯이 시간에 따른 온도 변화율 이 일정하다는 열역학적 배경 이론이 타당하다고 할 수 있다.

열을 가하지 않고 젓개만 저었을 때는 결정계수가 상대적으로 낮게 나타났다. 물론, 일반통계학에서 일반적으로 결정계수가 0.6보다 크면 설명력이 좋은 편이라고 할 수 있다. 그러나, 온도의 증감이 일관적이지 않고 불규칙한 것으로 보아 선형 추세선을 그리는 것이 타당하지 않을 수 있다. 그리고 젓개를 젓는 행위는 역학적 에너지가 물의 열에너지로 전환될 수 있는 현상이지만 실제로는 온도가 증가하지 않고 오히려 전체적으로 감소하는 경향이 나타났다. 따라서, 외부로 방출되는 열로 인한 온도 감소 효과가 젓개를 젓는 행위로 나타나는 온도 증가 효과보다 더 크다고 추론할 수 있다.

다음으로, 이론적 배경 II-2에서 알아본 시간에 따른 온도 변화율에 대한 관계식 , , , 를 적용한다. 이론값과 실험값을 비교할 수 있는 경우에는 두 값을 비교하고, 같다고 가정하여 물질에 대한 정보를 알 수 있을 때는 물질의 물리량을 계산하고자 한다. 이 때, 매초 발생하는 열에너지를 계산하면 모든 실험에서 이다. 물의 밀도가 일정하고 라는 가정을 한다면 물 500mL의 질량은 이다. 같은 방법으로 물 400mL의 질량도 구할 수 있다. 물의 비열은 이론적 배경 II-2에서 알아본 값 을 사용한다. 섭씨온도와 절대온도의 단위 눈금 간격이 같으므로 이 값을 사용할 수 있다.

[표 2] 시간에 따른 온도 변화율 실험값 (°C/s)과 이론값 (°C/s) 비교와 오차율 (%)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | 물 500mL | 물 400mL |
|  | 0.0207 | 0.0254 |
|  | 0.0248 | 0.0311 |
|  | 16.532% | 18.328% |

[표 2]에서 시간에 따른 온도 변화율의 실험값과 이론값 (°C/s)을 비교하였다. 오차율이 20% 이하로 낮은 오차율을 보이며 시간에 따른 온도 변화율이 일정하고 그 값이 열역학적 이론이 타당하다는 것을 알 수 있다. 그러나, 10% 이상의 유의미한 오차를 보이고 있으므로 가정과 배경이론이 근사적으로만 옳다는 것을 확인할 수 있다. 실제로는 열을 가하면 열량계에도 열이 전달되어 열량계의 온도도 증가하므로 열량계의 열용량도 고려해야 한다.

[표 3] 각 실험에서 계산한 열량계의 열용량 (J/K)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | 물 500mL | 물 400mL |
|  | 0.0207 | 0.0254 |
|  | 420.000 | 373.701 |

열량계의 열용량 (J/K)를 고려하면 이다. 시간에 따른 온도 변화율의 실험값과 이론값이 같다고 가정하면 열량계의 열용량을 계산할 수 있다. 따라서 으로 계산한 값을 [표 3]으로 나타내었다. 두 값의 평균값인 396.851을 열량계의 열용량으로 택하고자 한다.

이 실험에서 더 고려해야 할 사항은 열량계도 외부와 열 교환을 한다는 점이다. 겉용기와 열전대를 통해서 열이 손실되고, 공기를 통해서 열이 전달될 수 있다. 따라서, 점화선에 전류를 흘리지 않았을 때, 즉 오직 젓개만 저었을 때의 온도 변화율 를 이용하여 열량계의 열 손실율 를 계산하고 이를 고려한 시간에 따른 온도 변화율을 으로 다시 계산하고자 한다.

젓개에 의한 온도 상승을 무시한다면 [표 1]의 결과에 따라 (K/s)이고 이를 이용하면 (J/s)이다. 이 때, 는 에너지 손실율이므로 그 자체가 에너지 감소의 의미를 담고 있기 때문에 양수값인 1.24843J/s를 택하고자 한다.

[표 4] 시간에 따른 온도 변화율 실험값 (°C/s)과 이론값 (°C/s) 비교와 오차율 (%)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | 물 500mL | 물 400mL |
|  | 0.0207 | 0.0254 |
|  | 0.0204 | 0.0245 |
|  | 1.511% | 2.452% |

[표 4]에서 시간에 따른 온도 변화율은 소수점 넷째 자리까지, 오차율은 소수점 셋째 자리까지 나타내었다. 에너지 손실을 고려한 결과 두 실험에서 모두 오차율이 약 15% 감소하였다. 따라서, 열 손실을 고려하여 계산한 이론적 값이 열역학적 자연현상을 설명하는데 더 타당하고 합리적이라는 사실을 알 수 있다. 열량계의 열용량과 물의 밀도와 부피 값이 잘 적용되었다는 사실도 알 수 있다.

이제 지금까지의 실험 분석을 바탕으로 새로운 물질의 비열을 구하고자 한다. 이론적 배경 II-2에서 알아보았듯이 비열이 이고 질량이 인 물질을 열량계에 추가로 넣는다면 온도 변화율은 이다. 따라서 로 물질의 열용량을 계산할 수 있다. 이 실험에서는 물질은 ‘추’에 해당한다.

[표 5] 추의 열용량 (J/K)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| 추와 물  500mL | 0.0220 | -182.507 |

추의 열용량이 -182.507(J/K)로 0보다 작은 값으로 계산되었다. 물질의 질량과 비열이 음수가 될 수 없으므로 분석 결과는 타당하지 못하다고 할 수 있다. 이러한 결과가 나온 이유는 추가 존재 여부에 따른 시간에 따른 온도 변화율을 통해서 알아볼 수 있다. 추가 존재하면 전체 열용량이 증가하기 때문에 같은 열을 가했을 때 온도 변화를 일으키기 더 어려워진다. 따라서, 물 500mL만 있을 때보다 추가 같이 존재할 때 시간에 따른 온도 변화율의 실험값 는 더 작은 값이어야 한다. 그러나, 실제로는 추가 있을 때는 이고 추가 없을 때는 이므로 추가 있을 때 더 크다는 결과가 나왔다. 이러한 이유로 추의 열용량이 음수가 나왔다는 것을 알 수 있다.

IV-3. 오차 분석(토의)

이 실험에서 시간에 따른 온도 변화율의 이론값과 실험값이 차이가 나게 된 오차 원인들이 있다. 먼저, 시간에 따른 온도 변화율에 대한 이론과 가정에 결함이 있다. 그리고, 측정 과정에서 발생할 수 있는 오차가 있다.

또한, 열량계와 추의 열용량을 계산하는 과정에서도 오차가 발생할 수 있다. 특히, 추의 열용량이 음수가 되는 일이 발생하였는데 열역학적으로 불가능한 현상이 일어난 것처럼 보이는 이유를 알아보고자 한다.

1. 온도에 따른 물의 밀도 변화

물의 질량을 계산할 때 물의 밀도가 일정하며 그 값이 라고 가정하였다. 하지만 온도에 따라서 물의 밀도는 달라진다. ITS-90에 의하면, 온도 에 따른 물의 밀도는 로 근사하여 나타낼 수 있다. 이 때, 온도의 단위는 °C이다. 시간에 따른 온도는 계속해서 변하고, 이에 따라 물의 밀도와 부피도 변하는데, 부피에 대한 정보를 고정시켰으므로 물의 밀도도 실험 내 평균 온도에 대해서 구하여 고정하고자 한다. 물 500mL 실험에서 평균 온도는 26.29286°C이고 이 때 물의 밀도는 996.7034이다. 물 400mL에서 평균 온도는 26.3°C이고 물의 밀도는 996.7015이다. 추와 물 500mL 실험에서 평균 온도는 25.96154°C이고 물의 밀도는 996.7919이다. 이를 반영하여 물의 질량 를 계산하고 시간에 따른 온도 변화율 이론값을 으로 다시 계산하였다.

[표 6] 시간에 따른 온도 변화율 실험값 (°C/s)과 이론값 (°C/s) 비교와 오차율 (%)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | 물 500mL | 물 400mL |
|  | 0.0207 | 0.0254 |
|  | 0.02045 | 0.02486 |
|  | 1.229% | 2.176% |

시간에 따른 온도 변화율 실험값과 이론값을 [표 6]으로 다시 나타내었다. [표 4]와 비교하였을 때 오차율이 약 0.3% 감소한 것을 확인할 수 있다. 따라서, 정확한 실험을 위해서는 물의 온도에 따른 밀도 변화를 고려해야 한다.

1. 온도에 따른 물의 비열 변화

물의 열용량을 계산할 때 물의 비열이 일정하다고 가정하였는데 밀도와 마찬가지로 온도에 따라서 물의 비열은 달라진다. 평균 온도를 통해서 Heat Capacity of Liquid Water 표를 보고 비열을 계산하였을 때 모든 실험에서 이다.

[표 7] 시간에 따른 온도 변화율 실험값 (°C/s)과 이론값 (°C/s) 비교와 오차율 (%)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | 물 500mL | 물 400mL |
|  | 0.0207 | 0.0254 |
|  | 0.02054 | 0.02496 |
|  | 0.804% | 1.758% |

시간에 따른 온도 변화율 실험값과 이론값을 [표 7]으로 다시 나타내었다. [표 6]과 비교하였을 때 오차율이 약 0.4% 감소한 것을 확인할 수 있다. 따라서, 정확한 실험을 위해서는 물의 온도에 따른 비열 변화를 고려해야 한다.

1. 온도에 따른 물의 밀도와 비열 변화에 따른 에너지의 시간에 대한 손실율과 열량계의 열용량 변화

열량계의 열용량은 으로 다시 계산할 수 있다. 물 500mL와 물 400mL 실험에서 열량계의 열용량은 각각 437.338246, 387.614560이다. 아래의 계산을 위하여 평균값 412.4764를 택한다.

시간에 따른 에너지 손실율도 으로 다시 계산할 수 있다. ‘only stirring’ 실험에서 평균 온도는 23.4375°C이고 물의 밀도는 997.4323이며 비열은 이다. 이를 반영하면 이다. 이 때 자체가 에너지 손실의 의미를 담고 있으므로 양수값 1.24855을 택한다.

[표 8] 시간에 따른 온도 변화율 실험값 (°C/s)과 이론값 (°C/s) 비교와 오차율 (%)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | 물 500mL | 물 400mL |
|  | 0.0207 | 0.0254 |
|  | 0.020205 | 0.02479 |
|  | 2.4522% | 2.4522% |

두 실험에서 온도 변화에 따른 물의 밀도와 비열 변화를 고려하여 시간에 따른 에너지 손실율과 열량계의 열용량을 다시 계산한 결과 오차율이 2)에서보다 증가하였다. 더 이상 오차율이 감소하지 않는 것으로 보아 중요하게 작용하는 그 외 오차 요인이 존재한다는 것을 알 수 있다. 남은 오차는 4), 5), 6), 7)에서 알아본다.

1. 온도에 따른 열량계의 열용량 변화

열량계의 열용량 는 상수가 아니라 온도에 따라 변하는 값이다. 물의 질량과 비열과는 무관하게 열량계를 이루는 물질의 특성에 따라서도 달라질 것이다. 따라서 이를 상수 취급하고 시간에 따른 온도 변화율을 이론적으로 계산할 때도 사용하였으므로 이에 따른 오차가 발생할 수 있다. 열량계의 구성을 정확하게 알지 못하므로 정량적 오차 분석은 할 수 없고 이에 따른 오차는 보정할 수 없다.

1. 시간에 따른 온도 변화율의 비일관성

시간에 따른 온도 그래프에서 선형 추세선의 결정계수가 1이 아니기 때문에 시간에 따른 온도 변화율은 일정하지 않다. 따라서 이 실험적 값을 상수 취급하는 것은 엄밀하지는 않다. 다만, 이론값과 비교를 위해 상수 취급해야 하기 때문에 그래프의 기울기를 대푯값으로 상수 취급하는 것이 바람직하다고 할 수 있다. 그러나, 실험적 값과 이론적 값이 모두 시간에 따라 일정하고 그 값이 서로 같다는 조건 하에 열량계의 열용량을 구하였으므로 시간에 따른 온도 변화율의 비일관성은 실험값과 이론값에서 모두 오차를 발생하는 원인이 될 수 있다.

1. 시간에 따른 에너지 손실율의 비일관성

시간에 따른 에너지 손실율 가 일정하다고 가정하였는데 실제로는 외부 환경과의 상호작용에 따라서 매순간 달라진다고 할 수 있다. 실제로 [그래프 1]에서 ‘only stirring’ 실험에 대하여 온도가 감소했다가 다시 증가하는 구간이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 따라서 시간에 따라서 에너지 손실은 불규칙하게 나타난다고 할 수 있다. 따라서 이에 따른 오차가 발생하였다. 외부 환경을 단순하고 상호작용을 최소화하도록 구성하여 이 오차를 줄일 수 있다.

1. ‘only stirring’ 실험에서 역학적 에너지의 열 에너지로의 전환

시간에 따른 에너지 손실율 를 알기 위해서 ‘only stirring’ 실험을 진행하였는데 젓개를 통해서 물을 회전시키면 그에 따른 마찰열이 발생하여 온도가 상승할 수 있다. 따라서 시간에 따른 에너지 손실율은 실제로 더 큰 값을 가질 것이다. 따라서 시간에 따른 온도 변화율의 이론값은 더 작은 값을 가질 것이다. [표 8]에서 이론값이 작아지면 오차율은 더 커진다는 것을 알 수 있다.

따라서 1)~7)에서 정량적으로 보정 가능한 오차 외의 랜덤한 요인에 의해서 2.4522% 이상의 오차가 발생한다는 사실을 알 수 있다. 이것은 시간에 따른 온도 변화율 0.00049546701°C/s만큼의 오차에 해당하므로 매우 작은 오차라고 할 수 있다. 따라서, 이 오차는 8)부터 분석하는 랜덤 오차로 할 수 있다.

1. 온도계의 온도 측정 오차 : 정밀성과 열 교환

0.1°C 단위로 온도를 측정하므로 정밀성에 따른 오차가 발생할 수 있다. 또한, 온도계와의 열평형을 이루는 과정에서 열 교환이 발생하여 온도가 왜곡되었을 가능성이 있다. 측정 행위가 측정 대상의 물리량을 변화시키므로 정확한 온도를 측정하는 것은 불가능하다. 온도 랜덤 오차가 존재한다는 것은 이상적인 물리적 상황을 가정했을 때 선형 회귀식의 결정계수가 1이 아니라는 사실에서 알 수 있고 SST에서 회귀식으로 설명할 수 있는 SSR의 비율이 약 99%이고 나머지는 랜덤 오차에 해당한다는 것을 알 수 있다.

9) 전류와 전압 측정 오차 : 정밀성

0.01A와 0.1V 단위로 전류와 전압을 측정하므로 정밀성에 따른 오차가 발생할 수 있다.

10) 시간 측정 오차 : 정밀성

20초 단위로 시간을 측정하므로 정밀성에 따른 오차가 발생할 수 있다.

1. 추와 물의 열교환

이 오차는 추의 열용량을 계산하는 실험에 해당하는 오차이다. 만약 추의 초기 온도가 물보다 더 높았다고 한다면 온도를 상승시키는데 더 적은 열량이 필요하여 시간에 따른 온도 변화율이 추가 없을 때보다 더 높게 나타날 수 있다. 이에 따라 추의 열용량이 음수로 계산되었을 수 있다. 물과 추가 충분히 열평형을 이룬 상태에서 측정을 시작하여 이 문제를 해결할 수 있다.

모든 오차를 종합적으로 살펴보자면 물리량이 다른 요인(시간, 온도 등)에 의해서 변화하지만 일정하다고 가정한데서 나오는 오차가 있고, 측정에 의해서 발생하는 오차가 있다. 다른 관점에서 보자면, 열역학적 이론으로 유의미한 분석을 할 수 있는 오차도 있고, 이 이론으로 설명할 수 없는 랜덤 오차도 있다.

V. 결론

열량계 실험에서 시간에 따른 온도 변화율을 구하고 이를 바탕으로 열역학적 이론의 정확성을 확인하고, 열량계와 물질의 열용량을 계산하였다. 이 때 발생하는 오차를 보정하기 위해서 시간과 온도에 따른 물리량들의 변화를 고려하였고 오차율이 크게 감소하여 더욱 정밀한 이론으로 분석할 수 있음을 알아보았다. 그 외 측정 장비와 외부 환경에서 발생하는 오차가 있으므로 보다 나은 실험을 위해서는 정밀하고 통제된 실험 환경을 조성해야 할 것이다.

참고문헌

[1] David Haliday, Robert Resnick, Jearl Walker, Principles of Physics, 11th edition, Wiley(2020)

[2] 김우철 외 4명, 일반통계학, 영지문화사(2006)

[3] Frank E. Jones, ITS-90 Density of Water Formulation for Volumetric Standards Calibration, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology(1992)

[4] 물리학 실험 1 매뉴얼, 서울대학교 물리천문학부