|  |
| --- |
| **실험18. 옥살레이트-철 착화합물의 합성과 광화학 반응**  **결과보고서** |
| |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | | **실험일** | **제출함 No.** | **담당교수** | **점수** | | **May 11, 2023** |  | **박민진** |  | | **학과** | **학번** | **이름** | | **화학과** | **2023160236** | **정원준** |  1. **Abstract**   많은 금속 착화합물은 특징적인 색상을 가지며, 따라서 금속 착물은 여러 분야에서 색채의 재료로 자주 활용됐다. 19세기 허셜은 도면의 사본을 그리기 위해서 철착화합물을 이용한 청사진을 만드는 방법을 고안했다. 본 탐구에서는 광화학반응을 통해 turnbull’s blue를 합성하고, 광화학반응의 특성을 파악하며 최종적으로는 청사진을 직접 제작하는 것을 그 목적으로 한다.  우선 의 반응을 이용하여 1.4861g의 와 2.7596g의 로부터 를 1.7354g, 70.751%의 수득률로 얻을 수 있었다. 이후 0.1009g의 생성물을 취해 농도의 용액 20mL를 제조했으며, 이중 10mL의 용액을 150mL의 묽은 황산(1:150)과 섞어 시험관에 넣을 용액을 제조했다. 이중 10mL를 취하여 각각 0분, 3분, 5분 동안 광화학반응을 일으켰으며, 반응이 완료된 시험관은 약 0.1M의 1mL와 반응시켜 turnbull’s blue를 얻었다. 이를 UV-Vis spectrophotometer를 통한 분광분석과 Beer-Lambert Law를 활용하여 광화학반응 이후 용액의 concentration을 계산하였다.  화학양론적으로 광화학반응 이 완결된 경우 cell의 농도는 로 나타날 것으로 계산됐다. 계산값과 비교했을 때 0분, 3분, 5분 반응시켰을 때 실측값은 (농도, percent yield)가 차례대로 (, 36.0%), (, 39.1%), (, 130%)로 나타났다. 5분에 해당하는 cell에서 초과 수율이 얻어진 것은 cell 속 용액의 농도가 너무 진해 나타난 분광분석법의 문제로 사료되며, 0분, 3분에 해당하는 cell에서 차이가 거의 나지 않는 것은 실험 condition에서 light leak, 차등 조광 등의 문제가 있었던 것으로 추정된다.  일련의 용액들을 사용하여 청사진을 얻을 수 있었으며, 이 과정에서 paper를 매끄러운 평면 위에서 건조시킬 때 바닥의 무늬가 남지 않는 이미지를 얻을 수 있었다. 교양실험 수준에서 실험을 개선하기 위해서는 bath를 사용하거나, 암실조건을 유지할 수 있도록 부가적인 도구를 활용하는 등의 해결책이 필요할 것으로 사료된다. |

|  |
| --- |
| **실험18. 옥살레이트-철 착화합물의 합성과 광화학 반응**  **결과보고서** |
| 1. **Data & Results**   **II.1. [실험 A] K3[Fe(III)(C2O4)3]∙3H2O의 합성**   |  |  | | --- | --- | | 사용한 K2C2O4∙H2O의 양 | 2.7596 g | | 사용한 K2C2O4∙H2O (184.23 g/mol)의 몰수 |  | | K3[Fe(C2O4)3]∙3H2O의 이론적 생성 몰수 |  | | K3[Fe(C2O4)3]∙3H2O (491.25 g/mol)의 이론적 생성량 | 2.4528g | | K3[Fe(C2O4)3]∙3H2O의 실제 생성량 | 1.7354g | | K3[Fe(C2O4)3]∙3H2O의 수득률 | 70.751% |   **II.2. [실험 B] K3[Fe(III)(C2O4)3]∙3H2O의 광화학 반응** (ε690nm = 1700 cm-1M-1 )   |  |  | | --- | --- | | 광화학반응 수율 계산 | 단위 | | K3[Fe(III)(C2O4)3] 용액의 몰농도 |  | | 시험관 용액의 몰농도 |  | | 시험관 용액 속 몰수 |  | | 광화학반응이 100% 진행되었을 때의 농도 |  |  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | | 시험관 | A | B | C | | 광화학반응 시간 (분) | 0min | 3min | 5min | | 흡광도 (A690nm) | 0.357 | 0.388 | 1.286 | | 생성물의 농도 (M) |  |  |  | | 반응 수율 (%) | 36.0% | 39.1% | 130% |   **실험 B. 흡광도 그래프 실험 C. 청사진 만들기**   |  |  |  | | --- | --- | --- | | [Figure 1] Absorption Spectrum of Products |  | [Figure 2] Blueprint |  1. **Calculation & Analysis**   **III.1. [실험 A] K3[Fe(III)(C2O4)3]∙3H2O의 합성**  (1) 사용한 K2C2O4∙H2O의 몰수는 사용한 K2C2O4∙H2O의 질량을 K2C2O4∙H2O의 몰질량(184.23g/mol)으로 나누어 구하였다.  (2) K3[Fe(C2O4)3]∙3H2O의 이론적인 생성 몰수(theoretical yield in molar scale)는 다음의 화학 반응식에서 비례 관계를 이용하여 계산하였다.  이때 반응한 K2C2O4∙H2O의 몰수와 생성되는 K3[Fe(C2O4)3]∙3H2O의 몰수 사이에는 3 : 1의 비율이 성립하므로 생성되는 K3[Fe(C2O4)3]∙3H2O의 이론적(화학양론적) 생성 몰수는 다음과 같이 구할 수 있다. 이때 실험 과정에서 사용한 의 양은 1.4861g으로, 몰질량 270.30g/mol을 이용하면 의 양에 해당함을 알 수 있다. 이때 이므로 한계 반응물은 이다. 따라서 생성된 K3[Fe(C2O4)3]∙3H2O는 다음과 같이 화학양론적으로 계산할 수 있다.  (3) K3[Fe(C2O4)3]∙3H2O의 이론적인 생성 질량(theoretical yield in mass scale)은 앞서 구한 이론적인 생성 몰수에  K3[Fe(C2O4)3]∙3H2O의 몰질량 491.25 g/mol을 곱해서 계산할 수 있다.      (4) 실험 결과 K3[Fe(C2O4)3]∙3H2O의 실제 생성량(actual yield, g)은 1.7354g이므로 percent yield는 다음과 같이 계산할 수 있다.  **III.2. [실험 B] K3[Fe(III)(C2O4)3]∙3H2O의 광화학 반응**  (1) K3[Fe(III)(C2O4)3] 용액을 만들기 위해서 **III.1.**에서 합성한 K3[Fe(C2O4)3]∙3H2O 0.1009g을 취하여 증류수 20mL에 녹여 사용했다. 이때 용해시킨 K3[Fe(III)(C2O4)3]의 몰수는 용해된 K3[Fe(C2O4)3]∙3H2O의 몰수와 상응하므로 다음과 같이 계산할 수 있다.  이때 용매(≒용액)의 부피는 20mL이므로 몰농도는 용해시킨 용질의 몰수를 용액의 부피(L)로 나누어 구할 수 있다.  (2) 이때 시험관에 넣은 용액은 (1)에서 제조한 용액을 10mL 취한 뒤, 묽은 황산(1:150) 150mL에 용해시켜 만들었다. 따라서 시험관에 넣은 용액의 몰농도는 (1)에서 계산한 용액의 몰농도에 0.01L를 곱하고 이를 용액의 전체 부피인 0.16L로 나누어 구할 수 있다.  (3) 이때 시험관에는 (2)에서 제작한 용액 10mL를 취하여 넣었으므로 시험관 용액 속 의 몰수는 (2)에서 구한 시험관 속 용액의 몰농도에 0.01L를 곱하여 얻을 수 있다.  (4) 이때 Turnbull’s blue를 형성하는 과정을 개괄적으로 정리하면 다음과 같다.     * 책에 따라서는 수화물이 아닌 자체로 메커니즘을 기술하기도 함. 따라서 (1)-(3)에서는 수화물 표시를 인용하지 않았으나, (4)에서는 교재 기준으로 반응식을 작성함.   이때 반응물인 와 생성물인 turnbull’s blue의 몰수비가 1 : 1이므로  로부터 생성되는 turnbull’s blue의 몰수는 이다.  (5) (4)의 반응에서 turnbull’s blue를 제조하기 위해 3.2901g을 100mL의 증류수에 녹인 후 (3)의 시험관에 1mL 첨가하는 데 사용하였다. 이때 의 몰질량은 329.94g/mol이므로 3.2901g은 이다. 이는 반응물의 몰수 에 비해 매우 큰 양이므로 과량(in excess)으로 존재한다고 볼 수 있다. 따라서 (4)의 근사는 타당하다. 또한 이 과정에서 용액의 부피가 15mL에서 16mL로 변했으므로 이를 보정해야 한다. 따라서 광화학반응이 100% 진행된 후의 농도는 다음과 같이 계산할 수 있다.  (6) 생성물의 농도는 Beer-Lambert law 를 사용했으며, wavelength는 690nm를 택했고, 이 condition에서의 몰흡광계수 ε690nm = 1700 cm-1M-1을 사용했다. Beer-Lambert law를 정리하면 이고, cell thickness(b)=1cm이므로 0분, 3분, 5분 반응 조건에 따른 용액의 최종 농도를 구할 수 있다.=   |  |  | | --- | --- | | Time of reaction(min) | Calculation of final concentration  ( | | 0 |  | | 3 |  | | 5 |  |   **[Table 1]** Calculation of Final Concentration  (7) (6)에서 구한 concentration은 정부피를 상정하기에 theoretical yield로 이해해도 무리가 없다. 따라서 (5)에서 구한 theoretical (final) concentration과 (6)에서 구한 final concentration을 비교하여 percent yield를 계산할 수 있다. Percent yield(%) = 100 × (actual yield) / (theoretical yield)를 이용하여 계산하였다.   |  |  | | --- | --- | | Time of reaction(min) | Calculation of final concentration  ( | | 0 |  | | 3 |  | | 5 |  |   Table 2 Calculation of Percent Yield (of Turnbull’s Blue-(abbreviated))  **＊ (제언)** UV-Vis는 고농도의 용액을 사용하면 측정값의 재현성이 떨어지는 경우가 있다. 5분 광화학 반응을 진행시킨 solution의 yield가 100% 이상이 나오는 것은 생성된 용액의 농도가 너무 진하기 때문으로 사료되며, 용액을 묽혀 사용하면 재현성 있는 측정을 얻을 수 있다고 사료된다. 다만 이 경우 0분, 3분에서 변별 가능한 yield 값을 얻을 수 있는 적합한 농도 선정이 필요하다. 또한 0분, 3분 반응시켰을 때의 yield가 3%만 차이가 나는 것은, 0분에 해당하는 용액에 light exposure가 존재했거나, 3분에 해당하는 용액이 충분히 광화학 반응이 일어나지 않은 것으로 사료된다. 이 경우 condition을 보다 세밀하게 조정하면 재현성 있는 측정을 얻을 수 있으리라 사료된다. Photochemical reaction을 차단하기 위해 시험관대의 크기와 정확히 일치하는(실험자의 부주의로 인한 용액의 누출을 방지하기 위함이다) 상자를 만들어 cell의 용액을 취할 때만 상자의 lid를 연다면(상부에 lid를 만드는 방식으로도 변경 가능하다) 알루미늄 호일로 감는 것보다 light exposure를 최소화할 수 있을 것으로 사료된다.   1. **Discussions**   **IV.1. 이 외의 광화학 반응에 대하여 알아보자[[1]](#endnote-1).**  **IV.1.1. 광화학반응(photochemical reaction)의 정의**  광화학반응(photochemical reaction)이란 빛을 받아들이면서 일어나는 화학 반응을 의미한다[[2]](#endnote-2). 광화학반응에서 빛은 특정 결합을 절단하는 에너지를 제공하거나, 반응성이 높은 중간체를 만들어 반응을 가속시키는 등 반응의 추진력(driving force)을 제공하는 역할을 한다. 광화학반응은 우리 주변에서 어렵지 않게 찾아볼 수 있으며, 대기과학, 독립영양종의 양분 합성 과정에서 쉽게 찾을 수 있다. 이러한 반응의 메커니즘은 분자분광학(molecular spectroscopy)을 통해 규명되었다.  **IV.1.2. 대기과학에서의 광화학 반응**  대기과학에서 광화학 반응이 일어나는 대표적인 사례는 오존의 합성과 분해 과정을 생각할 수 있다. 먼저 오존 생성 과정의 간단한 메커니즘은 다음과 같다.    [Figure 3] Brief Reaction Mechanisms of Ozone cycle[[3]](#endnote-3)  이때 \*은 여기 상태(excited state of molecule)을 나타낸 것이다. 1번째 줄의 반응식에서 빛은 산소 분자의 결합을 절단하는 에너지를 제공한다. 이때 요구되는 빛의 파장은 자외선인데, 이는 성층권에 존재하는 오존층이 자외선을 흡수하는 기능을 한다는 설명에 타당성을 부여한다. 2번째 줄의 반응식에서 높은 에너지에서 결합이 이루어지므로 생성되는 오존은 여기 상태에 존재한다. 이때 이 여기 상태의 완화(해소)가 필요한데, 그 에너지적 relaxation은 3번째 반응식에서 오존이 주변 분자를 들뜨게 하고 본인은 안정화되는 방향의 반응이 일어나게 된다. 4번째 반응식은 relaxation된 오존이 자외선을 흡수한 경우 다시 산소 원자와 산소 분자로 광분해되는 반응식을 나타낸 것이다. 이때 흡수되는 빛 또한 자외선으로, 1번째 줄의 반응식과 더불어 오존층의 자외선 흡수 기능을 담당한다. 이렇게 오존이 광분해되어 만들어진 산소 원자와 산소 분자는 다시 cycle의 재료가 되어 참여한다. 이때 오존이 분해되는 과정은 5번째 반응식 또한 존재한다. 5번째 반응식에서는 오존 분자가 주위의 산소 원자와 충돌하여 산소 분자로 다시 분해된다. 이때 5번째 반응식은 반응 속도가 느린 단계로, 일련의 속도를 결정하는 단계로서(rate-determining step; rds)의 역할을 수행한다. 하지만 rds의 반응 속도가 느리기에 성층권에서 오존층은 무한히 붕괴되지 않으며, 따라서 일종의 광정류상태[[4]](#endnote-4)(photostationary state, Kim et al., 1998에서 인용)에 도달한다.  하지만 자외선에 의해 분해되어 반응성이 높은 radical을 형성하는 분자의 경우 상황이 달라진다. 예를 들어 프레온가스(CFCs)를 사용한 경우 다음과 같은 광분해 반응을 통해 반응성이 매우 높은 라디칼인 염소 원자가 형성된다.    [Figure 4] Formation Reaction of Chlorine Radical from CFCs[[5]](#endnote-5)  이때 형성된 염소 원자는 오존의 분해 반응을 촉매한다. **[Figure 4]**의 반응에서도 CFCs에서의 M-Cl 결합을 절단하기 위한 driving force로 빛에너지가 사용됐으며, 이는 이전의 맥락으로 이해하는 데 어려움이 없다. 형성된 염소 라디칼은 촉매로 작용하여 오존을 분해시켜 산소 분자를 형성하는데, 일련의 메커니즘을 **[Figure 5]**에 나타냈다.    [Figure 5] Catalytic Decomposition of Ozone Molecules[[6]](#endnote-6)  **[Figure 5]**의 반응식에서 나타나듯 염소 라디칼은 일련의 반응을 촉매하여 원형으로 회수되며, 기존의 경로보다 반응 속도가 빠른 대체 경로를 제공한다. 따라서 오존의 분해는 이전보다 가속되며, 기존의 광정류 상태에 변화가 생기게 된다.  **IV.1.3. 생화학에서의 광화학 반응[[7]](#endnote-7)**  **IV.1.3.1. 광합성(photosynthesis)**  일반적인 광합성 반응식은 다음과 같다.    따라서 이산화 탄소와 물로부터 macromolecule인 포도당을 합성하는 것은 매우 비자발적이다. 모든 광합성의 단계에 빛이 필요한 것은 아니다. 하지만, 초기 단계(명반응, light reaction)에 빛이 필요하며, 명반응을 통해 생성된 NADPH는 Kelvin cycle의 재료가 된다. 명반응의 구체적인 메커니즘을 알아보면 다음과 같다. 우선, 빛이 가해진 경우 PSII의 중심인 여기된(excited) P680에서 물의 전자를 뺏어 물을 광분해시킨다.    이후 전자는 여러 분자들을 여기시키면서 명반응을 일으킨다. 그 구체적인 도식은 **[Figure 6]**에 나타냈다.  [Figure 6] Light Reaction by PSII and PSI[[8]](#endnote-8)  **[Figure 6]**에서 나타나듯 이 과정에서 빛은 Photosystem의 중심인 P680과 P700의 excitation을 유발하며, 따라서 linear electron flow가 가능하게 하여 일련의 photochemical reaction을 이룬다.  **IV.1.3.2. Relationship Between Light-Dependent Reactions and Photochemical Reactions in Plants[[9]](#endnote-9)**  식물에서 일어나는 다양한 반응들은 대개 광의존성을 갖지만, 모든 반응이 photochemical reaction인 것은 아니다. **[Figure 6]**에서 물이 광분해되면서 H+의 농도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 식물이 빛에 과하게 노출되면 수용액의 pH가 낮아지며, 낮아진 pH는 violaxanthin de-epoxidase를 activation시켜 violaxanthin을 quenching을 통해 zeaxanthin으로 de-epoxidation시킨다. 이처럼 식물에서 반응이 광의존성을 갖는 원인을 그 반응이 photochemical reaction이라는 것으로 귀결시키는 데는 오류가 있을 수 있지만, 해당 반응 또한 photosynthesis(또는 light reaction)이라는 photochemical reaction에서 기인한 조건 변화로부터 발생한다는 사실에는 변함이 없다.  **IV.2. 천연 킬레이트와 합성 킬레이트의 종류와 그 쓰임새를 알아보자.[[10]](#endnote-10)**  **IV.2.1. 킬레이트의 정의**  킬레이트란 1개의 리간드가 금속 이온과 2자리 이상에서 배위 결합을 하여 만들어진 착화합물이다[[11]](#endnote-11). 이때 여러 자리에서 배위 결합을 하는 리간드를 여러 자리 리간드 또는 킬레이트 리간드라고 부른다. 대표적인 킬레이트 리간드로는 ethylenediaminetetraacetic acid(EDTA), ethylenediamine(en) 등이 있다. 킬레이트는 화학의 여러 분야에서 다양하게 사용되며, 합성 방법에 따라 자연적으로 합성되는 천연 킬레이트와 인위적으로 합성하여 제조한 합성 킬레이트로 분류할 수 있다.  **IV.2.2. 천연 킬레이트**  식물에서 천연 킬레이트의 예시는 상술한 엽록소(chlorophyll)을 그 예로 들 수 있다. Chlorophyll은 **[Figure 8]**에서 묘사된 것과 같이 마그네슘이 중심에 위치하고, 그 주위를 포르피린 고리가 둘러싼 형태를 갖는다. 착화합물은 분광학적 특성을 가짐이 널리 알려져 있으며, 따라서 착화합물인 엽록소 또한 분광학적 특성을 갖는다. **[Figure 7]**은 chlorophyll a, b의 absorption spectrum을 나타낸 것이다.  Chlorophylls absorbs visible light of wavelength(a) 400 - 500 nm only(b)  300 - 400 nm only(c) 600 - 800nm only(d) 400 - 500 nm and 600 - 700 nm Chlorophyll - Structure and Function, Chloroplast  [Figure 7] Absorption Spectrum of Chlorophyll a & b[[12]](#endnote-12) [Figure 8] Structure of Chlorophyll[[13]](#endnote-13)  **[Figure 7]**에서 나타나듯 chlorophyll은 초록색 색상의 빛에 대해 낮은 흡수율을 보이며, 따라서 우리 눈에는 초록색으로 보이는 분광학적 특성을 갖는다. 동시에 chlorophyll a와 b의 center인 P700, P680은 photochemical reaction에 참여하여 photosynthesis를 일으키며, 그 자세한 기작은 **IV.1.3.1**절에서 자세히 언급했다.  동물에서 혈색소인 헤모글로빈 또한 킬레이트의 일종이다. 헤모글로빈의 구조식은 **[Figure 9]**에 나타냈다.  헤모글로빈 알아보기 1 Absorption spectra of the oxygenated and deoxygenated hemoglobin... |  Download Scientific Diagram  [Figure 9] Structure of Hemoglobin[[14]](#endnote-14) [Figure 10] Absorption Spectrum of Hemoglobin[[15]](#endnote-15)  **[Figure 9]**에서 나타나듯 헤모글로빈은 중심 원자로 철을 가지며 그 주위를 포르피린 고리가 둘러싸고 있는 구조를 갖는다. 앞서 엽록소와 동일한 맥락에서 헤모글로빈은 분광학적 특성을 갖는다. **[Figure 10]**에서 나타나듯 헤모글로빈은 붉은색 빛에 대해서 낮은 흡수율을 보이며 반대로 보색인 푸른색 빛에 대해서는 높은 흡수율을 보인다. 따라서 헤모글로빈은 붉은색을 띠는 분광학적 특성을 갖는다. 헤모글로빈은 산소로 산화(또는 포화, Campbell에서 인용)되어 혈장에서 산소를 수송하는 역할을 하며, 외부와 혈장, 그리고 혈장과 세포 사이의 산소 교환에 관여한다.  **IV.2.3. 합성 킬레이트[[16]](#endnote-16)**  합성 킬레이트의 경우 특정한 목적에 의해 킬레이트 합성 반응(synthesis)과 킬레이트 화합물 자체가 활용된다. 예를 들어 EDTA는 여섯 자리 리간드로, EDTA는 en(에틸렌다이아민), 폼알데하이드, 물, 시안화 소듐으로부터 합성할 수 있다. 이때 EDTA는 납(Pb2+), 칼슘(Ca2+) 등의 금속 이온들과 강한 친화력을 갖는다. 따라서 Metal-EDTA complex formation reaction은 여러 용도로 활용될 수 있다. 예를 들어 토양 조건에서 Pb 등의 중금속에 EDTA를 chelate시키면 [Pb(EDTA)]2-를 형성하여 토양에서 Pb를 제거할 수 있다. 또한 생체 조건에서 과량의 Pb에 노출된 사람을 생각하면 부분적으로 saturated EDTA complex(그냥 EDTA를 사용하는 경우 생체 내 필수로 존재해야 하는 금속 이온 또한 EDTA로 chelate되어 문제가 생긴다)를 활용하여 [Pb(EDTA)]2-를 생성시켜 Pb 중독을 치료할 수 있다. 또한 화장실 때를 형성하는 원인이 되는 Ca2+를 제거하기 위한 방법으로도 [Ca(EDTA)]2-를 활용할 수 있다. 따라서 EDTA는 화장실 세제의 주성분으로도 활용된다.  EDTA-Pb complexes. Dotted bonds to Pb are coordinate. | Download Scientific  Diagram Molecular structure of Ca-EDTA complex. | Download Scientific Diagram  [Figure 11] [Pb(EDTA)]2- Structure[[17]](#endnote-17) [Figure 12] [Ca(EDTA)]2- Structure[[18]](#endnote-18)  EDTA에서 4개의 acetate를 제하여 구조인 en은 2자리 리간드로 작용한다. 이때 en, EDTA 모두 리간드로서 착물 형성에 관여한다. 더불어 킬레이트는 단일 자리 리간드(monodentate)로 배위됐을 때보다 높은 수용성을 나타낸다. 따라서 이러한 성질을 활용하여 적정(titration)에 응용할 수 있으며, 이를 킬레이트 적정(chelatometry)이라고 한다. 킬레이트 적정을 위해서는 금속 지시약이 이용되며, 그 대표적인 사례로 EBT(Eriochrome Black T) 시약을 들 수 있다. EBT 시약은 Ca2+, Mg2+ 등 이온과 반응하면 적색을 나타낸다. 이때 EDTA 표준 용액을 첨가하는 상황을 생각해 보자. EDTA는 여섯 자리 리간드로, 상술했듯 금속과 높은 친화력을 갖는다. 따라서 EBT 시약보다 EDTA와 착물을 형성하는 것이 더욱 에너지적으로 안정하며, 따라서 무색의 [M(EDTA)]2- 착물을 형성하게 된다. 이때 남아 있는 EBT는 푸른색을 띠므로 적정이 진행됨에 따라 용액은 점차 보라색으로 바뀐다. 반응이 종결되면 EBT는 중성 용액에서 청색을 띠기에 청색 용액을 나타나게 되며, 이때까지의 양을 통해 산화-환원 적정, 중화 적정에서와 같이 소비량을 계산하여 화학양론적으로 원하는 화학종의 양을 실험적으로 구할 수 있다. |

1. **Reference**

1. Oxtoby, 현대 화학, 7/ed., Cengage, 2018, pp941-1031 [↑](#endnote-ref-1)
2. 지질과학백과사전(n.d.).

   <http://geowiki.korearth.net/index.php/%EA%B4%91%ED%99%94%ED%95%99%EB%B0%98%EC%9D%91> [↑](#endnote-ref-2)
3. *Image source:* Oxtoby, 현대 화학, 7/ed., Cengage, 2018, pp999 [↑](#endnote-ref-3)
4. Kim S.E., Lee K.W. & Kim K.R. (1998). 서울시 대기 중 오존의 광정류상태에 대한 연구. *한국대기환경학회 학술대회논문집(1).* 265-266. <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE00194370> [↑](#endnote-ref-4)
5. Oxtoby, 현대 화학, 7/ed., Cengage, 2018, pp1001 [↑](#endnote-ref-5)
6. Oxtoby, 현대 화학, 7/ed., Cengage, 2018, pp1001 [↑](#endnote-ref-6)
7. Campbell, Biology a global approach, 11/ed., Pearson, 2018, pp259-283 [↑](#endnote-ref-7)
8. Campbell, Biology a global approach, 11/ed., Pearson, 2018, pp269 [↑](#endnote-ref-8)
9. Latowski. D., Kuczynska. P. & Strzalka. K. (2011). Xanthophyll cycle – a mechanism protecting plants against oxidative stress. *Redox Report, 16(2).* 78-90. PMCID: PMC6837671 [↑](#endnote-ref-9)
10. Wikipedia. (n.d.). Chelation. <https://en.wikipedia.org/wiki/Chelation> [↑](#endnote-ref-10)
11. Wikipedia. (n.d.). 킬레이트. <https://ko.wikipedia.org/wiki/%ED%82%AC%EB%A0%88%EC%9D%B4%ED%8A%B8> [↑](#endnote-ref-11)
12. *Image source:*

    <https://www.vedantu.com/question-sets/714abc35-bd3f-458d-b4e0-3fb2341066d6243030736676764489.png> [↑](#endnote-ref-12)
13. *Image source:* <https://cdn1.byjus.com/wp-content/uploads/2022/04/Structure-of-chlorophyll.png> [↑](#endnote-ref-13)
14. *Image source:* <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/be/Heme_b.svg/220px-Heme_b.svg.png> [↑](#endnote-ref-14)
15. *Image source:* <https://www.researchgate.net/profile/Ayal-Romem/publication/264009809/figure/fig1/AS:213862549856261@1428000213761/Absorption-spectra-of-the-oxygenated-and-deoxygenated-hemoglobin-molecules-Notes-In-the_Q640.jpg> [↑](#endnote-ref-15)
16. Yoon H.R. (2015). 약품분석학2 강의노트. <http://contents.kocw.net/KOCW/document/2015/duksung/yoonhyeran1/2-1.pdf> [↑](#endnote-ref-16)
17. *Image source:* <https://www.researchgate.net/profile/Cheng-Jiang-Ruan-2/publication/38043144/figure/fig1/AS:885087952445440@1588032820446/EDTA-Pb-complexes-Dotted-bonds-to-Pb-are-coordinate.ppm> [↑](#endnote-ref-17)
18. *Image source:* <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTf3LA-lEn5xTwWlwhvhc4TYUCns_6qRCKzEo97JYOAaA&s> [↑](#endnote-ref-18)