

## 루비듐 시장 및 회수 동향에 따른 향후 관련 대응방안

§이상훈\*

\*계명대학교 환경학부

### Rubidium Market Trends, Recovery Technologies, and the Relevant Future Countermeasures

§Sang-hun Lee\*

\*Department of Environmental Science, Keimyung University, Korea

#### 요 약

본 연구에서는 알칼리 금속 중 하나인 루비듐의 생산과 수요, 그리고 향후 전망을 분석하였다. 루비듐은 알칼리족 금속으로서 다양한 매질에 대한 반응성이 뛰어나 취급에 유의를 요하지만 환경적으로는 크게 문제시 되지 않은 물질이다. 루비듐은 광전기 장비, 생물의료, 화학산업 등 특수한 분야에서 사용된다. 생산이 어렵고 수요도 제한적이어서 거래 가격이 비교적 높게 형성되어 있지만, 시장 현황이나 성장 가능성과 같은 정보는 불확실한 상황이다. 다만, 양자컴퓨터와 같이 범용성이 있는 초고성능 장비의 대량 생산과 해당 장비 내 루비듐 사용의 필수성이 확실시된다면, 향후 루비듐 시장이 확대될 가능성도 있을 것이다. 루비듐은 종종 리튬, 베릴륨, 세슘과 함께 발견되며, Lepidolite이나 Pollucite 등의 광물을 포함하는 화강암이나 해수나 폐기물에 함유될 수 있다. 루비듐 회수에는 산침출, 배소법, 용매 추출, 흡착 등의 기술이 사용되며, 상기 광물 및 처리기술을 통한 루비듐 최대 회수율이 높다고 알려져 있다. 그러나, 많은 경우 루비듐이 주요 회수 대상은 아니기 때문에 타유가성분, 불순물, 회수 비용, 에너지 소비, 환경 문제 등에 따라 실제 회수율은 변동될 수 있다. 결론적으로 루비듐은 생산 및 소비가 제한되어 있는 반면, 향후 대량 수요처의 대두에 따라 시장변동이 가능한 만큼 이에 관련된 관계기관의 추가 조 사 등이 필요할 것으로 보인다.

**주제어 :** 루비듐, 금속, 시장, 회수, 양자컴퓨터

#### Abstract

This study discussed production, demand, and future prospects of rubidium, which is an alkali group metal that is highly reactive to various media and requires carefulness in handling, but no significant environmental hazard of rubidium has been reported yet. Rubidium is used in various fields such as optoelectronic equipment, biomedical, and chemical industries. Because of difficulty in production as well as limited demand, the transaction price of rubidium is relatively high, but its detail information such as market status and potential growth is uncertain. However, if the mass production of versatile ultra-high-performance equipment such as quantum computers and the necessity of rubidium use in the equipment are confirmed, there is a possibility that the rubidium market will expand in the future. Rubidium is often found together with lithium, beryllium, and cesium, and may be present in granite containing minerals such as lepidolite and pollucite, as well as in seawater and industrial waste. Several technologies such as acid leaching, roasting, solvent extraction, and adsorption are used to recover rubidium. The maximum recovery efficiency of the rubidium from the sources and the processing above is generally

· Received : June 7, 2023 · Revised : June 23, 2023 · Accepted : June 26, 2023

§ Corresponding Author : Sang-hun Lee (E-mail : [shlee73@kmu.ac.kr](mailto:shlee73@kmu.ac.kr))

Department of Environmental Science, Keimyung University, 1095 Dalgubeol-daero, Dalseo-gu, Daegu 42601, Korea

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

high, but, in many practices, rubidium is not the main recovery target, and therefore the actual recovery effects should depend on presence of other valuable components or impurities, together with recovery costs, energy consumption, environmental issues, etc. In conclusion, although the current production and consumption of rubidium are limited, with consideration of the possible market fluctuations according to the emergence of large-scale demand sources, etc., further investigations by related institutions should be necessary.

**Key words :** Rubidium, Metal, Market, Recovery, Quantum computer

## 1. 서 론

루비듐은 알칼리족 원소로 전기음성도가 매우 낮은 금속이며, 녹는점이 매우 낮기 때문에 상온에서 액체로 존재할 수도 있다. 루비듐은 19세기 근대 과학자들에 의해 분광기를 통해 lepidolite 광물을 관찰하는 과정에서 발견되었다. 루비듐이라는 이름은 라틴어로 깊은 붉은색을 뜻하는 루비두스(rubidus)에서 유래하였는데 이는 루비듐을 스펙트럼에 쬐이면 검붉은 선이 나타나기 때문이다<sup>1,2)</sup>. 루비듐은 산업적으로는 화공, 전자, 의학 등의 여러 분야에 사용되고 있다. 일단 루비듐은 전자기파를 받으면 쉽게 전자를 내어놓기 때문에 광전기 장치에 사용된다. 이들은 빛 에너지를 전기 에너지로 변환시키는 장치로, 광센서나 광 스위치 등에 이용된다. 또한 루비듐은 열 에너지를 전기 에너지로 전환시키는 열전자 변환기 전극을 코팅하는 데도 사용되며, 진공관에 남아있는 산소를 제거하는 용도로도 쓰인다<sup>1,2)</sup>.

루비듐의 물리화학적 특성으로 인해 루비듐은 소비량 및 시장규모가 적은 데다 선광 및 제련도 쉽지 않은 편이라 특히 선진국에서는 자체 대량 생산 및 보급이 점점 어려워지고 있다<sup>5,6)</sup>. 또한 이러한 이유로 루비듐은 타 금속에 비해 생산/공급/소비 등 공급망이나 관련 경제 정보가 부실한 실정이다. 루비듐은 소비량 대비 생산량이 적어서 타 금속에 비해 비교적 높은 가격대를 형성하고 있으며, 향후 광전기나 양자컴퓨터 등의 발전에 따라 생산량 대비 수요가 확대될 수 있는 소지가 있어서 어느 정도 관심을 둘 필요는 있다<sup>5-7)</sup>. 이에 본 연구에서는 문헌조사를 통해 우선 루비듐의 환경적 유해성이나 위험성을 살펴보고, 루비듐의 주 수요분야를 이해하고 및 향후 수요량 증가 여부를 간단히 점검해보았다. 마지막으로 최근 루비듐의 선광 및 회수 등 생산기술에 대해 논의해보고자 한다.

## 2. 환경적 특성

루비듐은 생체내 칼륨이온과 거동이 유사하여 서로 경쟁 혹은 교환될 가능성이 있어, 루비듐이 생체내 다량 존재할 경우 어느 정도 유해할 수는 있다고 언급된다. 그러나 생체가 다량의 루비듐에 다량으로 노출될 가능성이 크지 않기 때문에 일반적으로 루비듐의 유해성은 유의미하지는 않다고 판단되고 있다<sup>2,8)</sup>. 또한 전세계적으로 루비듐의 소비량 자체가 적기 때문에 루비듐 생산 및 운송 과정에서의 환경적 위험이나 피해도 대두되고 있지 않다<sup>9)</sup>. 그러나 루비듐의 화학적 특성상 반응성이 크기 때문에 취급 및 보관의 위험성은 존재하는데, 순수한 루비듐은 공기 중에서 쉽게 산화되며, 물, 산, 알코올 등과도 활발히 반응하므로 취급 및 보관에 유의해야 한다<sup>1)</sup>. 심지어 루비듐 카바이드의 경우 진한 염산 등과 접촉하면 발화된다고 알려져 있다<sup>10)</sup>.

## 3. 루비듐 시장 특성

루비듐은 현재 캐나다, 짐바브웨, 나미비아, 모잠비크 등지에서 리튬의 부산물로 산출되고 있다. 그러나 연간 소비량이 미국의 경우 수톤에 불과해 정확한 가격 형성 과정이 파악되지 않은 실정이다<sup>1)</sup>. 2000년대 초반의 경우만 해도 루비듐 생산은 현재보다 더 활발한 것으로 보인다. 그 당시 루비듐은 유사광물이면서 수요가 더 많은 세슘을 생산하는 회사에 의해 추출되었다. 그 당시에도 전세계에 걸쳐 소수의 업체만이 루비듐 함유 광석을 처리하여 루비듐 및 관련 화합물을 생산하였다<sup>9)</sup>. 이후 점진적으로 각국의 루비듐 생산이 중단되고 최근에는 상당수 루비듐이 중국 등 일부 지역에서만 처리/생산되고 있다고 추정된다. 독일 등지에도 루비듐 화합물 처리 공장이 있지만 생산량이 예전에 비해 줄어든 것으로 알려져 있다. 현재 처리량을 고려할 때 중국을 제외한 전세계의 루비듐 비축량이 곧

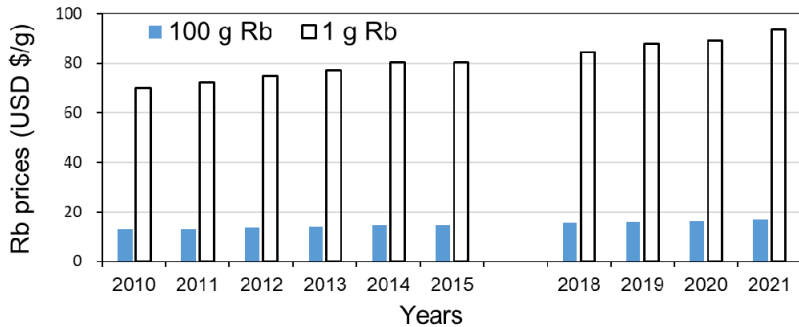


Fig. 1. Annual price increases of rubidium per gram for 100 g and 1 g Rb ampoules<sup>1,5,6)</sup>.

고갈될 우려가 있는 것으로 보고된다<sup>3)</sup>. 더구나 현재에도 광석에서 루비듐을 추출 및 회수하는 공정이 복잡해서 생산하기가 어렵고 이는 결국 루비듐의 높은 가격 형성에 영향을 미친 것으로 보인다. 참고로 USGS(2020)의 데이터에 따르면 금속 루비듐 100g 당 가격 최고치는 무려 \$1600에 육박하였다<sup>6,7)</sup>. 게다가 최근 몇 년 동안 광전지, 원자 시계 및 레이저 기술 등의 발달로 루비듐에 대한 수요가 증가할 수 있다는 의견이 대두되고 있어 유의를 요한다<sup>7)</sup>. 참고로 Fig. 1에 루비듐 가격대 및 연도별 가격상승 추세를 도시하였다<sup>1,5,6)</sup>. 이는 향후 루비듐 수요 급증 시 가격 상승 또는 공급 부족 문제가 대두될 수 있음을 암시한다. 이에 본 연구에서는 후술할 단락에서 루비듐 수요처를 살펴보고 수요 급증에 기여할 수 있는 분야의 향후 루비듐 활용성을 점검해보고자 한다.

루비듐의 수요처를 보면 서론에 언급되었던 광전기나 전극코팅제 등 여러 특수장비에 쓰인다<sup>1-7)</sup>. 주목할 만한 수요처는 원자시계인데, 루비듐은 원자 시계(원자의 전자가 안정된 바닥상태와 불안정한 들뜬 상태를 주기적으로 반복하는 현상을 이용해 만든 초정밀 시계)를 만드는 데 사용되어 왔다<sup>2,11)</sup>. 물론 원자시계에 사용되는 원자로는 루비듐 이외에 세슘이나 이터븀이 있고 이들은 사실 루비듐 시계보다 더 정밀하다. 반면, 루비듐 시계는 상대적으로 제작 및 사용이 용이하고 가격이 저렴하여 활용성이 우수하다<sup>2,11)</sup>. 루비듐 화합물 중에서는 염화 루비듐(RbCl)은 화학약품으로 많이 사용된다. 또한 화학실험에서 염화 루비듐은 실험실 내 과염소산 테스트 혹은 나노와이어를 제조하는데 사용된다. 일반 화학공업 분야에서는 휘발유의 첨가제나 전기/전자분야에서 유기발광 다이오드 혹은 메모리 저장장치 성능 향상에 이용되기도 한다<sup>12)</sup>. 탄산루

비듐(Rb<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)은 반응성이 낮으며 안정하여 특수유리를 만드는 데 주로 사용된다. 이는 TV 브라운관 등의 유리에 탄산루비듐을 첨가하면 전기전도성이 저하되어 안전성과 내구성이 증진되기 때문이다<sup>2)</sup>.

루비듐 수요에 관련된 특히 흥미로운 분야는 레이저 기술 기반의 양자컴퓨팅 분야이다. 레이저 기술 중 특히 광자의 선택적 흡수를 유발하여 원자의 속도를 줄이는 레이저 냉각 기술이 있는데, 이 경우 루비듐 같은 알칼리 원자가 우수한 냉각 성질을 가진다고 알려져 있다. 그리고 이러한 원리로 루비듐을 포획하여 양자컴퓨터 구현이 가능하다. 루비듐의 수요에서 양자컴퓨터가 주목을 받는 이유는 전 세계 양자컴퓨팅의 엄청난 시장 잠재력 때문인데 양자컴퓨터의 상용화 및 범용화가 적정 수준에 이르면 연평균 시장 성장률이 30%를 상회할 것으로 전망되고 있다<sup>13,14)</sup>. 참고로 양자란 더 이상 작게 나눌 수 없는 에너지의 최소 단위를 의미하며 중첩성 등 고유한 물리적 특성을 지니고 있다. 중첩성이란 예를 들면 이진수 0과 1 상태의 중첩상태(즉 0이면서 동시에 1인 상태)의 선형결합을 형성할 수 있는 성질을 의미하는데, 양자컴퓨터는 이를 이용해 대용량 초고속의 정보처리가 가능하다. 이는 기존의 컴퓨터가 0과 1 각각에 대해 한번에 단일 숫자만 계산을 수행할 수 있는 방식인 반면, 양자컴퓨팅은 양자 정보 단위인 큐비트(qubit)를 정보처리의 기본단위로 하는 양자병렬처리를 통해 정보처리 및 연산 속도를 지수 함수적으로 증가시킬 수 있는 획기적인 기술이다. 문제는 양자의 거동이 불안정할 경우가 있는데 양자컴퓨터를 상용화하려면 이러한 불안정함을 줄이는 것이 중요하다. 이 문제를 해결하기 위해 중성원자 기반 큐비트 기술이 연구 중인데 이러한 중성원자 중 기존 레이저 제어 등의 관련 기술에 많이 쓰였

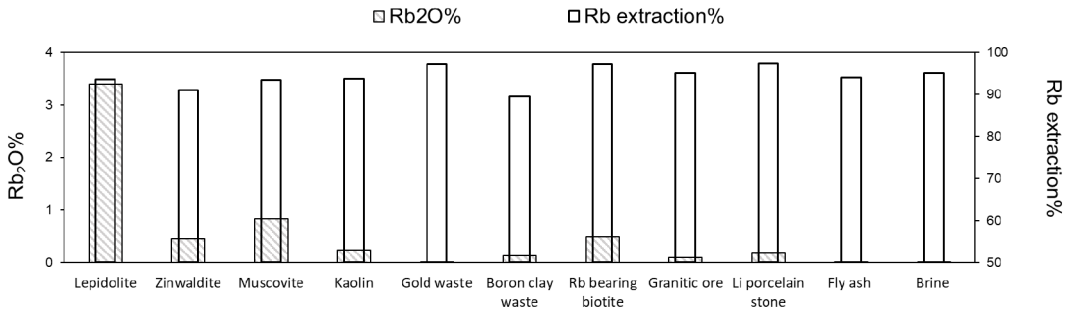


Fig. 2. Rb<sub>2</sub>O content ratio (slashed bar) and lab-scale rubidium extraction efficiency (void bar) from each rubidium source.

던 루비듐 원자가 종종 활용되고 있다<sup>14)</sup>. 그러나 이러한 연구개발 노력에도 불구하고 양자컴퓨터 구현은 기초연구 단계이며 이에 관련한 루비듐 시장의 관련 성장 여부 및 시점도 아직은 불확실하다고 판단된다.

#### 4. 회수 특성

현재 광물에서 루비듐을 추출하는 공정은 복잡하고 어려워 생산량이 적고 가격이 비싸다<sup>7)</sup>. 일반적으로 루비듐 광물 내 독립적으로 존재할 수는 없다. 루비듐은 보통 리튬, 베릴륨이나 세슘 등 다양한 희귀 금속과 공존하며 Lepidolite나 Pollucite, 흑운모, 장석 등에 흔히 존재한다. 또한 광물 외 염호 및 해수에서도 저농도의 루비듐이 발견된다<sup>7)</sup>. 루비듐은 주로 산침출 또는 배소-침출을 통해 회수되는데, Lepidolite 또는 Pollucite로부터 리튬/세슘 처리과정의 중간 생성물로 회수된다. 여기서 산침출은 상기 광물이 산에 의해 쉽게 분해된다는 점을 이용하며, 이 공정에서 리튬, 세슘, 루비듐 공침출 후 결정화, 침전 또는 용매추출(SX) 등을 통해 회수된다<sup>15-18)</sup>. 배소법은 Lepidolite나 Pollucite에 나트륨이나 칼슘염을 첨가하고 고온 배소하여 리튬, 루비듐, 세슘을 용해성 염으로 전환 후 물로 침출하는 방법이다. 최근 연구에 따르면 운모 및 칼륨 장석과 같은 광물에서 루비듐을 고압조건에서 알칼리 침출시키는 방법도 개발되었다<sup>19)</sup>. 알칼리성 침출 용액의 루비듐은 특수한 용매로 추출가능하다.

전술된 Lepidolite이나 Pollucite 같은 광물은 루비듐 함량(약 1-3%)이 비교적 높아 루비듐의 주 공급원으로 간주된다<sup>7,20)</sup>. 이 중 Lepidolite는 리튬과 루비듐 및 세슘을 함유하는 가장 일반적인 운모 광물이다. 보통 루비듐은 수요가 가장 많은 리튬 추출의 부산물로 회수된다. 즉, 대

부분의 현 공정에서는 루비듐이 일차적인 회수 타겟이 아니기 때문에 루비듐 회수율이 높지 않을 수도 있다<sup>7)</sup>. 산침출이나 배소법은 레피돌라이트 및 폴루사이트의 분해에 효과적인 상용기술이다. 산침출은 에너지 절약 측면에서 유리하나 다량의 알루미늄이 공침출될 경우 후단의 분리정제 공정이 추가되어야 한다. 또한 배소공정은 금속 추출 효율이 높으나 에너지 소비가 높고 폐가스, 폐잔류물 등 환경문제가 존재한다. 이에 비하면 최근 개발된 고압 알칼리 침출 공정은 운모 및 장석 광물을 효과적으로 분해하여 루비듐을 효과적으로 회수할 수 있으며, 폐잔류물인 침출잔사는 흡착물질 등으로 재활용이 가능하여 배소공정에 비해 친환경적이라고 볼 수 있다<sup>7)</sup>.

최근 이러한 광물자원(농집된 루비듐 광상)도 점차 고갈되면서 염호와 해수 같은 용액 내 저농도 루비듐 회수가 논의되고 있다. 염호나 해수 등으로부터 루비듐을 회수하는 과정은 주로 용매 추출이나 흡착 등의 공정으로 이루어지는데 이들은 비교적 간단하고 친환경적이다<sup>7,21)</sup>. 문제는 염호 내 루비듐 함량이 낮다는 점과 불순물 원소인 칼륨과 나트륨의 존재이다. 즉 이들 불순물이 없는 상태에서는 상당히 높은 루비듐 회수율을 보이나 불순물 존재하에서는 회수율이 부진할 수 있다<sup>7)</sup>. 상기에 언급된 공급원 이외에도 광미나 비산재 같은 폐자원에서의 루비듐 회수도 연구되고 있으며 주 공급원과 유사한 처리 과정을 거쳐 비교적 높은 루비듐 회수율(90% 이상)을 보이고 있다<sup>22-25)</sup>. Fig. 2에는 문헌에서 보고된 각 루비듐 공급원 내 루비듐(Rb<sub>2</sub>O 상당함량)과 각 공급원 내 추출율을 나타낸 것이다<sup>7,17-36)</sup>. 물론 이는 전세계에 걸쳐 보고된 연구자들의 자료로 더 정확한 정보는 다양한 현장조건 및 추출단계에서의 추가적인 실증연구를 통해 밝혀져야 한다.

## 5. 루비듐 회수 관련 시사점 및 향후 국내 전략

루비듐은 주로 작은 시장 내 특수분야에 활용되고 있어 정보가 불충분하고 가격체계가 불확실하여 향후 전략을 수립하는데 어려움이 있지만 최근 문헌에 언급된 바에 따라 하기의 시사점과 그에 따른 전략을 도출해 볼 수 있겠다. 현재까지 루비듐의 작은 시장규모와 특수분야에 국한된 수요특성에 따라 중국을 제외한 전세계적인 루비듐 공급망이 감소세에 있는 것으로 보이며, 이에 향후 루비듐 공급시장을 특정국가가 독점할 가능성이 있다. 그러나 향후 양자컴퓨터 등 보다 범용성이 있는 고성능 장비에 루비듐이 필요할 경우, 루비듐 시장의 규모가 증가할 가능성도 있다. 이는 양자컴퓨터가 기존 컴퓨터에 비해 계산역량이 탁월하지만 아직 성능이 불안정하므로 범용화를 위해 연구개발이 더 필요하다. 즉, 양자컴퓨터의 상용화와 상용화된 양자컴퓨터 내 루비듐의 가용성이 검증된 후에야 루비듐 시장 성장 여부 등이 더 확실해진다고 볼 수 있다. 기술적인 측면에서도 주의가 필요한데, 루비듐의 특성상 처리나 회수가 쉽지 않은데다, 시장의 주요 공급원인 광물 내 고함량 루비듐 자원의 고갈 우려로 인해 염소나 폐기물 등 대체 공급원에서의 루비듐 회수의 필요성도 논의되고 소수의 연구자들에 의해 연구개발이 진행되고 있다. 이러한 시사점을 기반으로, 향후 루비듐 고갈 문제, 공급망 과집중 및 시장 규모 증가 가능성에 대비하기 위해 국내에서는 원천 기술 및 상세 정보 확보와 더불어 비상시의 공급망 확보에도 관심을 가져야 할 필요가 있다. 구체적으로, 향후 양자컴퓨터 등 고성능 장비의 상용화와 관련 산업 내 루비듐 활용 확대 여부를 주시하면서 국내 광석이나 폐자원에서의 루비듐 함량 조사와 회수 기술 확보를 어느 정도 지원하는 것이 바람직하다고 판단된다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 기술이나 산업적 측면에서 많이 다루지 않는 알칼리 금속 중 하나인 루비듐의 생산/수요 및 향후 전망에 대해 분석하였다. 루비듐은 알칼리족 금속으로 빛이나 물 등 다양한 매질에 대한 반응성이 뛰어나 취급 및 보관에 각별한 주의를 요하나 환경적 유해성은 크지 않다고 보고된다. 루비듐은 광전기 장비나 생물의료, 화학산업 등 다양하고 특수한 분야에 널리 이용되나 생산이 쉽지

않고 수요량도 제한되어 있다. 따라서 거래가격 자체는 높은 편이나 시장 현황정보나 성장가능성 등이 불확실한 상황이다. 다만, 양자컴퓨터 같이 범용성이 있는 초고성능 장비의 대량 생산/보급이 현실화되고 해당 장비의 성능에 루비듐의 사용이 필수 불가결하다면 향후 루비듐 시장이 확대될 가능성도 있을 것으로 조심스럽게 예측해 볼 수 있다. 루비듐은 종종 리튬, 베릴륨 및 세슘과 함께 존재하며, 광석 외에도 해수나 폐기물 내에 함유될 수 있다. 루비듐 회수기술로는 산침출, 배소법, 용매 추출, 흡착 등이 사용된다. 가장 주요한 공급원은 Lepidolite 및 Pollucite 같은 화강암 내 광물이며, 회수율은 높다고 알려져 있으나 대체로 루비듐이 일차적인 회수 target이 아니기 때문에 타유가성분, 불순물, 회수비용, 에너지 소비나 환경문제에 따라 실제 회수율은 변동이 있을 수 있다. 결론적으로 루비듐은 생산 및 소비가 제한되어 있는 반면, 향후 대량 수요처의 대두에 따라 시장변동이 가능한 만큼 이에 관련된 관계기관의 추가 조사 등 정보 확보 및 대책이 어느 정도 필요할 것으로 보인다.

## 감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 주요사업인 ‘국내 부존 바나듐(V) 광물자원 선광/제련/활용기술 개발(GP2020-013)’의 위탁과제의 지원으로 수행되었습니다.

## References

1. KOMIS (Korea Mineral Resource Information Service), 2023 : Rubidium ; KOMIS report 2023.
2. LG, 2019 : [https://blog.lgchem.com/2019/01/23\\_rb/](https://blog.lgchem.com/2019/01/23_rb/). Accessed 1 June 2023.
3. USGS (United States Geological Survey), 2023 : Mineral commodity summaries – Rubidium.
4. USGS (United States Geological Survey), 2020 : Mineral commodity summaries – Rubidium.
5. USGS, 2022 : Mineral commodity summaries – Rubidium.
6. USGS, 2020 : Mineral commodity summaries – Rubidium.
7. Xing, P., Wang, C., Chen, Y., et al., 2021 ; Rubidium extraction from mineral and brine resources: A review, *Hydrometallurgy*, 203, pp.105644.
8. Budnicka, M., Sobiech, M., Kolmas, J., et al., 2022 : Frontiers in ion imprinting of alkali- and alkaline-earth metal ions - Recent advancements and application to environmental, food and biomedical analysis, *Trends in Analytical*

- Chemistry, 156, pp.116711.
9. USGS, 2005 : Mineral commodity profiles: Rubidium ; USGS Open-File Report 03-045.
  10. NIER (National Institute of Environmental Research), 2011 : Hazardous material properties, toxicity, and management information abstract: Hydrogen chloride, NIER official report.
  11. Georgescu, I., 2015 : Rubidium round-the-clock, Nature Chemistry, 7, 1034.
  12. Suba, A., Selvarajan, P., Devadasan, J.J., 2022 : Rubidium chloride doped magnesium oxide nanomaterial by using green synthesis and its characterization, Chemical Physics Letters, 793, pp.139463.
  13. Shin, Y-I., 2017 : Rediscovery of gas: very cold quantum gas, <https://horizon.kias.re.kr/18713/>, Accessed 1 June 2023.
  14. Chung, J.H., Choi, B.C., 2019 : Quantum computer, the dream computer that calculates at the speed of light, KISTEP Issue Paper, 2019. 7.
  15. Vieceli, N., Nogueira, C.A., Pereira, M.F.C., et al., 2018 : Recovery of lithium carbonate by acid digestion and hydrometallurgical processing from mechanically activated lepidolite, Hydrometallurgy, 175, pp.1-10.
  16. Liu, J., Yin, Z., Li, X., et al., 2019 : Recovery of valuable metals from lepidolite by atmosphere leaching and kinetics on dissolution of lithium, Trans. Nonferrous Metals Soc. China, 29, pp.641-649.
  17. Yan, Q., Li, X., Wang, Z., et al., 2012 : Extraction of lithium from lepidolite by sulfation roasting and water leaching, Int. J. Miner. Process, 110-111, pp.1-5.
  18. Zhang, X., Tan, X., Li, C., et al., 2019 : Energy-efficient and simultaneous extraction of lithium, rubidium and cesium from lepidolite concentrate via sulfuric acid baking and water leaching, Hydrometallurgy, 185, pp.244-249.
  19. Mulwanda, J., Senanayake, G., Oskierski, H., et al., 2021 : Leaching of lepidolite and recovery of lithium hydroxide from purified alkaline pressure leach liquor by phosphate precipitation and lime addition, Hydrometallurgy, 201, pp.105538.
  20. Ertan, B., 2021 : Rubidium extraction ; Current Approaches in Science and Technology Research, 15, pp.53-59.
  21. Naidu, G., Jeong, S., Choi, Y., et al., 2018 : Valuable rubidium extraction from potassium reduced seawater brine, J. Clean. Prod., 174, pp.1079-1088.
  22. Nygrén, E., 2019 : Recovery of rubidium from power plant fly ash, Ph.D. Dissertation, University of Jyväskylä.
  23. Tavakoli Mohammadi, M.R., Javad Koleini, S.M., Javanshir, S., et al., 2015 : Extraction of rubidium from gold waste: Process optimization, Hydrometallurgy, pp.151, 25-32.
  24. Ertan, B., Erdogan, Y., 2016 : Separation of rubidium from boron containing clay wastes using solvent extraction, Powder Technology, 295, pp.254-260.
  25. Zhou, L., Yuan, T., Li, R., et al., 2015 : Extraction of rubidium from kaolin clay waste: Process study, Hydro-metallurgy, 158, pp.61-67.
  26. Paukov, E.I., Kovalevskaya, Y.A., Kiseleva, I.A., et al., 2010 : A low-temperature heat capacity study of natural lithium micas—heat capacity of zinnwaldite, J. Therm. Anal. Calorim., 99, pp.709-712.
  27. Shan, Z.Q., Shu, X.Q., Feng, J.F., et al., 2013 : Modified calcination conditions of rare alkali metal Rb containing muscovite, (KAl<sub>2</sub>[AlSi<sub>3</sub>O<sub>10</sub>](OH)<sub>2</sub>), Rare Metals, 6, pp. 632-635.
  28. Zheng, S., Li, P., Tian, L., et al., 2016 : A chlorination roasting process to extract rubidium from distinctive kaolin ore with alternative chlorinating reagent, Int. J. Miner. Process, 157, pp.21-27.
  29. Ertan, B., Erdogan, Y., 2016 : Separation of rubidium from boron containing clay wastes using solvent extraction, Powder Technology, 295, pp.254-260.
  30. Zeng, Q., Huang, L., Ouyang, D., et al., 2019 : Process optimization on the extraction of rubidium from rubidium-bearing biotite, Miner. Eng., 137, pp.87-93.
  31. Xing, P., Wang, C., Wang, L., et al., 2018 : Clean and efficient process for the extraction of rubidium from granitic rubidium ore, J. Clean. Prod., 196, pp.64-73.
  32. Wang, J., Hu, H., Wu, K., 2020 : Extraction of lithium, rubidium and cesium from lithium porcelain stone, Hydro-metallurgy, 191, pp.105233.
  33. Vu, H., Bernardi, J., Jandova, J., et al., 2013 : Lithium and rubidium extraction from zinnwaldite by alkali digestion process: Sintering mechanism and leaching kinetic, Int. J. Miner. Process, 123, pp.9-17.
  34. Yan, Q., Li, X., Wang, Z., et al., 2012 : Extraction of valuable metals from lepidolite, Hydrometallurgy, 117-118, pp.116-118.
  35. Lv, Y., Xing, P., Ma, B., et al., 2020 : Extraction of lithium and rubidium from polyolithionite via alkaline leaching combined with solvent extraction and precipitation, ACS Sustain Chem. Eng., 8(38), pp.14462-14470.
  36. Tian, L., Gong, A., Wu, X., et al., 2020 : Non-isothermal kinetic studies of rubidium extraction from muscovite using a chlorination roasting-water leaching process, Powder Technol., 373, pp.362-368.

---

## 이상훈

- 현재 계명대학교 환경학부 환경과학전공 부교수
  - 당 학회지 제27권 6호 참조
-