

## 이산화탄소 포획 원료용 사문석의 수용액 전처리 평가

최원경<sup>†</sup>

단국대학교 공학대학

### Characterization of Aqueous Solution Pretreatment for Serpentine Used Carbondioxide Sequestration Material

WEONKYUNG CHOI<sup>†</sup>

School of Engineering , Dankook Univ.  
29 Anseo-dong, Cheonan 330-714, Korea

#### ABSTRACT

Dissolution process of serpentine in distilled water was systematically investigated for study on pre-treatment of serpentine which was a candidate material for carbon dioxide sequestration. The metallic ions(Ca, Si, Mg etc.) were dissolved in distilled water at ambient condition and their concentrations were changed with dissolution time. The precise evaluation of dissolution process for serpentine dissolved solvent was performed by ion conductivity and pH measurement. Serpentine dissolution in distilled water was evaluated as a stable pre-treatment process without changes of crystallographic structure and chemical structure changes.

**KEY WORDS** : mineral carbonation(탄산염광물화), serpentine(사문석), CO<sub>2</sub> sequestration(CO<sub>2</sub>포획), conductivity(전도도), mineral solubility(광물용해도)

#### 1. 서 론

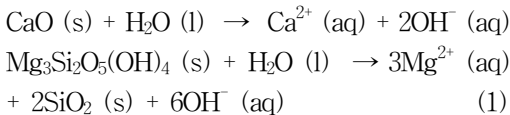
화석연료의 부산물 연료가스인 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)는 대기 중의 온실가스로서 산업의 발달과 더불어 그 농도가 급격히 증가하여 지구온난화와 기후의 변화를 가져온 물질로 알려졌다. 이산화탄소는 60% 이상의 온실효과를 유발하는 기체로서

온실가스 경감을 위한 주요 대상이 되고 있다<sup>1,2)</sup>. 아직까지 화석연료는 저렴한 에너지원으로 세계 에너지 공급량의 85%이상을 점유하고 있지만 최근 소비의 급증으로 유가상승 등의 원인이 되고 있으므로 그 대체 에너지에 대한 관심이 높아지고 있다. 화석연료를 대체 할 수 있는 태양에너지, 수력, 풍력 에너지량은 세계적인 에너지수요를 충족시키기 에 부족하다. 수소에너지를 비롯한 대체 에너지 매체도 아직은 연구단계에 머물러 있다<sup>3,4)</sup>.

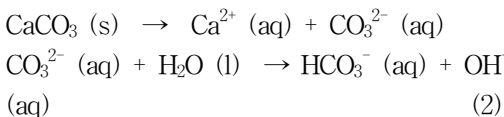
<sup>†</sup>Corresponding author : cwk5145@hanmail.net

이산화탄소 배출저감을 위한 에너지 절약기술, 배출된 이산화탄소 분리기술, 이산화탄소 저장기술 등의 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 화석연료 연소로 발생하는 CO<sub>2</sub> 저장법이 경쟁력 있는 비용으로 모든 국가에서 적용가능하고, 충분한 저장용량으로 후대에 부담이 되지 않도록 영구적으로 저장가능하다. 탄산염광물화는 CO<sub>2</sub>와 알카리토금속의 규산염을 발열 반응시켜 열역학적으로 안정한 탄산염으로 전환시키는 반응이다<sup>5,6)</sup>. 탄산염반응은 자연계에서 실제로 발생하고 있는 탄소순환과정의 일부이지만 자연계에서의 탄산염반응은 매우 느리게 진행되므로 인류활동으로 발생하는 CO<sub>2</sub>를 처리하기에는 역부족이다. 반응원료인 알카리토금속은 지구 지표면에 풍부하게 존재하며, 탄산염 형성에 필요한 기본성분인 산화마그네슘 함량이 많은 감람석(Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>)과 사문석(Mg<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>)에 관심이 집중되고 있다.

산성인 CO<sub>2</sub>와 반응하기 위해선 광물은 알카리성이어야 한다. 모든 알카리금속이나 알카리토금속이 알카리성을 보이는 것은 아니다. 예를 들어, NaCl은 알카리원이 아니다. 알카리성은 산화물과 수산화물로부터 나온다. 이는 용해시 일어나는 과정으로 설명가능하다.



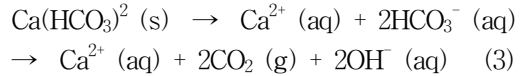
또 다른 약알카리성은 탄산염으로 이는 방해석의 용해반응과 탄산의 2차 분해반응을 예로 들 수 있다.



비록 탄산염을 중탄산염으로 전환하는 것이 규산염 무기물을 탄산염화하는 것보다 쉽지만, 산화물과 수산화물이 더 유리하다. 중탄산염이 쉽게 용

해되는 것에 비해 탄산염은 물에 거의 용해되지 않으므로 탄산염 형태가 유일한 저장법이다.

중탄산염이 빗물에 용해될 때, 격리된 이산화탄소 중 일부가 방출될 것이다.



칼슘과 마그네슘은 자연계에 금속산화물의 형태로는 거의 존재하지 않고 규산염의 형태로 존재한다. 이들 무기물은 탄산염화가 가능한데 이는 탄산이 규산보다 강산이기 때문이다.

본 연구에서는 사문석을 탄산염광물화의 원료로 사용하기위한 전처리에 대한 연구로 사문석을 물과 접촉시키는 과정에서 알칼리 환경으로 변화하는 과정에 대해서 고찰하고자 증류수를 용매로 선택하여 용해시킨 후의 사문석의 용해 특성과 전기화학적 평가를 통해 pH, 전도도의 변화 등을 평가하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 용해 전후 사문석의 분석

온실가스 주요 원인 물질인 이산화탄소 처리를 위한 탄산염광물화 포획 후보 물질로 국산 사문석(蛇紋石, Serpentine) 원광을 사용하였다. Attrition mill(대화테크)을 이용하여 원료광물을 1차 분쇄하였고, 입도의 균일화를 위해 labo, planetary potmill(ITOH, LA-PO.4)을 이용한 기계적 분쇄법으로 건식 2차 분쇄를 하였다. 분쇄한 시료는 자동 sieve shaker(CISA)를 이용하여 53 μm 이하의 사이즈를 선택하여 실험에 사용하였다.

사문석을 용해시키는 용매로는 증류수를 사용하였으며 용해 반응은 투명한 밀폐용기에서 이루어졌다. 증류수에 용해한 용액의 변화를 조사하기 위해서 각 시간별로 사문석을 용해시킨 증류수 용액을 여과하여 여액과 침전물을 분리했다. 여과 공정은 지름 0.45 μm의 cellulose nitrate membrane filter가 사용 되었다. 사문석을 용해시킨 증류수

용액 내 금속 이온 농도의 변화를 조사하기 위해 여과를 통해 얻어진 여액은 회석이나 후처리 공정 없이 ICPMS를 이용하여 성분분석을 실시했다. filter에 걸리진 사문석 침전물은 다른 용매를 사용하여 회석하지 않고 건조 하였다. 사문석의 건조는 표면에 흡착한 수분을 완전히 제거하기 위하여 120°C의 convection oven에서 24시간 건조하였다.

유도결합 플라즈마 질량분석(ICPMS, JOBIN-YVON, JY 38 Plus)을 이용하여 사문석의 정성분석과 정량분석을 실시하였고 농도함수로서 사문석을 구성하는 물질의 이온수와 내부 표준물 이온수의 비율을 도정한 검량곡선에 의해 함량을 조사하였다. RF-Generator는 40.68MHz, 2.3kW의 조건에서 스펙트럼 범위 160~800 nm에서 측정이 진행되었다.

탄산염광물화 원료광물의 전처리 공정의 개발 연구에 사용된 시료들의 결정학적 구조를 조사하기 위해 X-ray Diffractometer(Rikaku Co.)를 사용하였다. 전처리 전후의 분말시료를 유리홀더에 고정하여 2θ = 20° ~ 80° 범위에서 측정조건 40 kV 관전압과 30 mA 관전류에서 Cu-Kα선(λ = 1.542 Å)을 사용하였다.

Ft-IR은 적외선 영역의 빛의 파장을 변화시키며 시료에 조사할 때 그 물질의 고유한 특정 파장의 빛을 흡수하거나 산란하는 성질을 이용하여 그 intensity를 측정함으로써 물질의 화학 구조를 알아낼 수 있는 분석 장치이다. 유기화합물 정성분석의 영역은 다음에 나타내듯이 광원 에너지의 크기에 따라 시료 분자들의 화학적결합의 형태를 알아낼 수 있다. 무기물의 스펙트럼은 cross section이 크므로 에너지가 작아도 감지되기 때문에 대부분이 지문영역에서 나타난다. 사문석의 hydroxy (-OH)기의 변화는 수소 신축진동 영역에서 조사할 수 있다. 전처리 전후 사문석의 -OH기와 금속 산화물의 변화는 FT-IR 분광기(Bio-Rad. FTS 135)를 이용하여 분광학적 조사 하였다. 탄산염광물화를 위한 원료광물의 전처리 전후의 분말 광물 시료 1 mg 정도를 약 100~300배의 KBr 가루와 섞여 상온, 상압에서 5 ton/cm<sup>2</sup>정도의 압력으로 가

압 성형하여 스펙트럼을 얻기 위한 KBr pellet을 만들어 측정영역 400~4000 cm<sup>-1</sup> 영역에서 분석하였다.

## 2.2 사문석의 용해 특성 분석

고체의 용해도를 측정하는 방법 중 질량을 정량하는 방법을 사용하여 본 연구에서 실시된 용해도를 평가하였다. 용해도를 100g의 용매에 녹을 수 있는 최대 용질의 양이라 하면 다음 식으로 용해도를 계산하였다.

$$\frac{S}{100} = \frac{[m_2 - m_0]}{[m_1 - m_2]} \quad (4)$$

여기서, S : 용해도 (g/100g 용매), m<sub>0</sub> : 증발 용기의 질량(g), m<sub>1</sub> : 용기 및 포화용액의 질량(g), m<sub>2</sub> : 증발, 건조 후 질량(g) 이다.

전기전도도는 용액이 전류를 운반할 수 있는 정도로 용액중의 이온세기를 평가할 수 있는 항목으로서 전기저항의 역수 ohm<sup>-1</sup> 또는 mho로 나타내며 S(siemens) 단위가 통용되고 있다. 측정원리는 용액에 담겨있는 2개의 전극에 일정한 전압을 가해주면 가한 전압이 전류를 흐르게 하며, 이때 흐르는 전류의 크기는 용액의 전도도에 의존한다는 사실을 이용한 것으로 전도체의 저항 R은 다음 식으로 표시할 수 있는 데 여기서 ρ는 저항도(Ω·cm)이고 ℓ은 두 전극간의 거리(cm), A는 단면적(cm<sup>2</sup>)

$$R(\Omega) = (\rho \cdot \ell) / A \quad (5)$$

이므로 전기전도도 L은 다음 식과 같다.

$$L = 1/R = (A/\ell) \cdot K \quad (6)$$

여기에서 K(= 1/ρ)는 비전도도(mho.cm)이며 동일 측정계를 사용할 경우 셀의 규격은 일정하므로 두 전극간의 거리와 단면적은 무시할 수 있다. 따라서 측정결과는 측정된 시료의 전기전도도 값

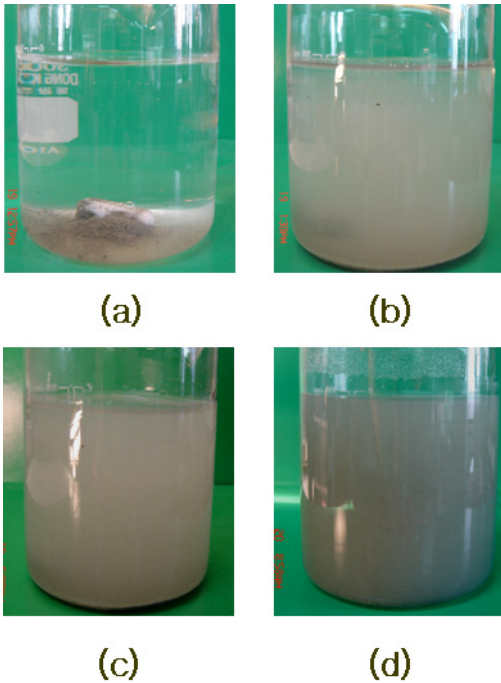


Fig. 1 Photographs of serpentine dissolution at various reaction time; (a) 0 h, (b) 0.5 h, (c) 5 h (d) 20 h.

(mho)에 셀 정수( $\text{cm}^{-1}$ )를 곱하여 시료의 전기전도도 값( $\mu\text{ohms/cm}$ )으로 표시한다.  $\text{mS/m}$ ,  $\mu\text{S/cm}$  단위로 측정결과를 표기하고 전기전도도는 온도차에 의한 영향(약  $2\%/^{\circ}\text{C}$ )이 크므로 측정 결과 값은  $25^{\circ}\text{C}$ 에서의 값으로 환산하여 기록한다. KEM conductivity meter(CM-117, kyotoelectronics)를 사용하여 본 연구의 전도도 측정을 실시하였다.

증류수에 용해된 용해 특성을 조사하기 위한 방법으로 사문석의 용해 시간에 따른 용액의 pH 변화를 조사하였다. 일반적으로 용매에 용해된 염의 이온화나 금속의 이온화 등이 일어나면 이들 금속 이나 염으로부터 해리된 이온들은 용매에 분산되어 활성을 갖게 되며 이온들의 농도가 이온 활성화에 직접적인 영향을 주게 된다. 수소이온의 농도 변화에 따라 나타내는 pH(수소이온지수 또는 수소이온농도)는 단순한 산의 세기와 용액이나 슬러리 등에 포함된 이온 활동도의 평가 기준으로도 사용할 수 있다. 본 연구에서는 SevenEasy pH

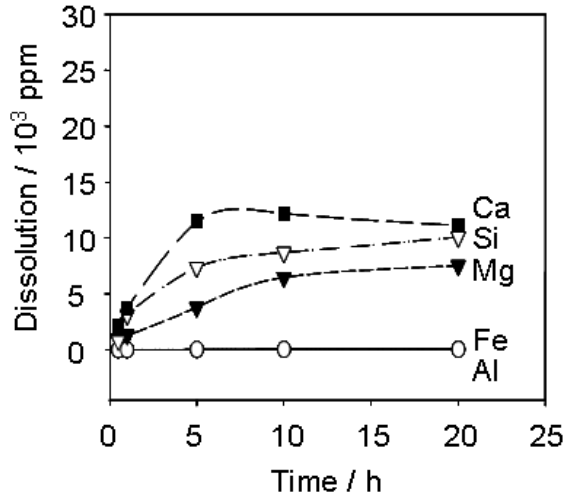


Fig. 2 Dissolved metallic ion content changes of serpentine powder in distilled water at various time

meter (s20-KS, Mettler Toledo)를 사용하여 pH 측정을 실시하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 사문석의 용해 특성 분석

사문석 분말의 용해 특성을 알아보기 위하여 증류수를 용매로 사문석 분말을 용해시켰다. 사문석 분말의 용해과정 중 용매의 증발을 방지하기 위해 정해진 반응이 완료될 때까지 밀폐된 용기에서 용해 실험을 실시했다. 용매로 사용한 증류수와 사문석 분말의 접촉이 충분히 이루어지도록 용해 과정은 일정한 교반과 함께 반응을 진행시켰다. 분말 사문석을 첨가한 증류수 용액의 용해 시간에 따른 변화는 아래 Fig. 1에서와 같이 용해 반응 시간이 증가하면서 용액의 색이 변화하는 것으로 관찰되었다. 사문석을 증류수에 첨가 후 교반을 시작하자 분말사문석이 증류수에 분산되며 용액은 점차적으로 혼탁해졌고 용해 시간이 5시간, 10시간, 20시간으로 증가하면서 용액은 점차 짙은 색으로 변화되었다. 용해 전후의 변화를 조사하기 위하여 30 분, 5 시간, 10 시간 20 시간이 경과한 용액을 대기 중에서 개별적으로 여과 하였고 여액과 침전물을

Table 1 Total contents changes of dissolved element of serpentine in distilled water at various dissolution time

	Dissolution time / min				
	0	60	300	600	1200
Total contents of dissolved elements / ppm	0	0.81	2.26	2.74	2.87

분리 하였다. 증류수 용액에 용해된 사문석 구성원소의 정성분석과 정량분석은 유도결합플라즈마 질량분석을 통해서 분석되었다. Fig. 2에 나타난 유도결합플라즈마 질량분석결과를 통해 용해시간의 변화에 대한 사문석 구성원소의 용해 특성이 관찰되었다.

유도결합 플라즈마 질량분석은 원소의 검출 한계가 낮고, 감도가 높고, 정밀도와 정확도가 우수하기 때문에 광물, 무기물 등의 원소의 정량분석, 반정량분석, 정성분석에 많이 사용될 수 있으므로 본 연구의 분석에도 적용하였다. 칼슘(Ca), 실리콘(Si) 그리고 마그네슘(Mg) 성분은 Fig.2에 나타나듯이 용해 시간의 증가와 함께 증가했으며 알루미늄(Al)과 철(Fe) 성분의 변화는 20 시간 용해과정 중 증가 없이 거의 일정한 것으로 나타났다<sup>7-10</sup>. 칼슘, 실리콘 그리고 마그네슘 성분의 용해는 사문석 용해 시작 후 5 시간까지 이들 금속 성분의 농도가 지속적으로 증가하는 유사한 경향이 나타났고, 5시간 이후 용해 반응을 마친 20 시간 까지는 농도의 변화가 거의 나타나지 않는 경향이 나타나고 있다. 용해 반응을 통해서 나타난 전체 성분의 정량변화는 ICPMS분석 결과로 얻어진 각 성분 금속의 농도를 전부 합해 Table 2에 나타내었다. 증류수에서 사문석의 용해도는 처음 60분간은 0.74%로 급격히 증가하고 이후 용해도의 증가량은 서서히 변화하기 시작하여 20시간이 지난 뒤에

는 1.26%의 용해도 증가가 관찰되었다. 각 성분별 농도의 합으로부터 얻어진 이 결과는 칼슘, 실리콘 그리고 마그네슘 성분들의 용해와 유사한 경향을 보여주고 있으므로 사문석을 구성하는 주성분 원소들이 증류수에서도 주로 용해되는 성분 원소로 확인되었다.

증류수에 용해된 사문석 성분원소의 용해 특성을 평가하기 위하여 용해 시간에 따른 전도도 변화를 조사하였다. 수용액의 전도도는 이온전도도

로서 수용액에 이온의 농도 증가와 더불어 증가하는 경향을 나타낸다. Fig. 3에는 사문석을 증류수에 용해시키면서 변화한 전도도를 용매로 사용하는 증류수 부피(100 ml, 300 ml)에 따라 비교하여 나타낸 결과이다. 사문석의 용해 시간 증가에 따라 전도도의 초기 증가율은 크게 나타나지만 1시간이 경과한 이후 전도도 증가는 급격한 변화가

Table 2 Solubility of serpentine powder in distilled water

Time (min)	0	60	300	600	1200
Solubility (%)	0	0.74	0.92	1.32	1.58

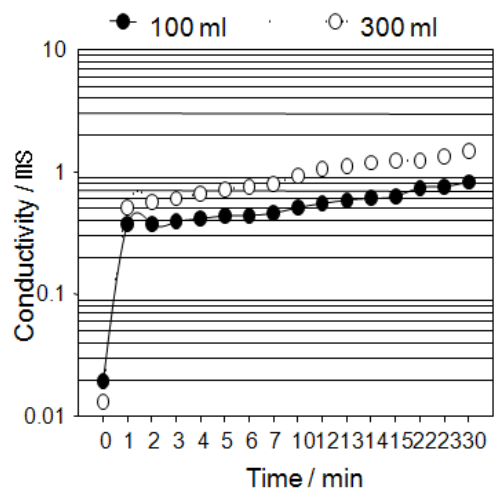


Fig. 3 Conductivity changes of serpentine powder in distilled water at various time

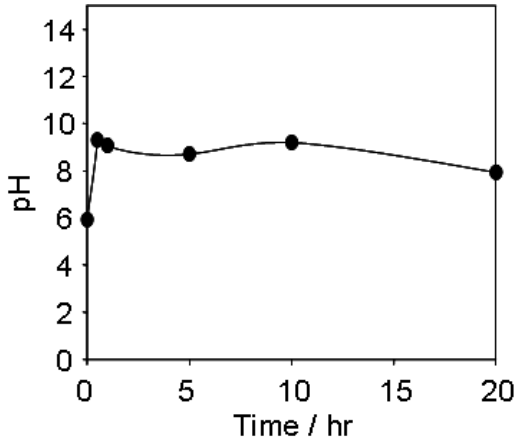


Fig. 4 pH changes of serpentine powder in distilled water at various time

없는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 앞에서 언급한 ICPMS 결과와 유사한 경향을 보이지만 사문석을 구성하는 금속성분의 용해가 안정해지는 시간이 전도도 측정에서는 용해 시작 후 1 시간, ICPMS 분석의 결과는 5 시간으로 차이가 나타나고 있다. 이러한 시간 차이는 본 전도도를 나타낸 그래프의 형식의 차이로 설명된다<sup>11,12)</sup>. 전도도 변화는 수용액에 증가하는 이온 농도가 조금만 변화여도 전도도 변화폭은 크게 나타나기 때문에 전도도 변화 측정 실험 결과는 로그함수를 이용해서 그래프를 나타내었다. 그러므로 전도도 측정의 결과와 ICPMS분석 결과가 거의 유사하게 얻어진 것으로 생각된다. 전도도의 측정은 ICPMS분석 보다 측정 간격이 좁기 때문에 더 정밀한 사문석의 용해 특성이 측정된 것이므로 증류수에서 사문석의 용해가 초기 1 시간 이내에 주로 진행되는 것을 알 수 있다. 100 ml의 증류수에 용해한 전도도가 300 ml의 증류수에 용해한 전도도 보다 조금 높게 나타났으며 이 결과는 사문석의 초기 용해단계를 지나 최종 단계까지 거의 유사하게 나타났다. 증류수에서 사문석의 용해는 용매로 사용한 증류수의 용량에는 크게 의존하지 않는 것으로 보아 사문석의 용해는 용매와 처음 접촉하는 초기 과정에 의존하는 것으로 판단된다.

Fig. 4 에는 사문석을 용해한 용액의 반응 시간 증가에 대한 pH 변화를 도시 하였다. 사문석을 용해한 용액의 초기 pH 변화는 급격한 상승을 보이고 있으며 이후 pH 변화의 경향은 초기의 급격한 변화와 달리 pH의 큰 감소나 증가가 나타나지 않고 있다. pH 변화는 수소 이온의 농도에 영향 받기 때문에 사문석의 용해에 따른 pH 변화는 사문석으로부터 해리된 금속성 원소 이온이 증가하면서 용액 중 수소 이온은 감소하는 것을 설명하고 있다. 전기화학적 local-cell mechanism에 의해 사문석을 구성하는 칼슘, 실리콘, 마그네슘 등 금속 성분이 양이온으로 용출되면서 분리되는 전자들과 수용액에 용존된 수소이온들이 결합하여 가스화되고 용액 중 수소이온이 감소하므로 pH의 증가가 나타난 것으로 판단된다.

이 결과는 사문석의 증류수 용해에 대한 전도도의 변화에서 나타난 결과와 동일한 것으로 ICPMS분석의 결과와 비교하면 용해된 사문석의 용해 특성은 사문석을 구성하는 주성분 원소 칼슘, 실리콘 그리고 마그네슘 성분이 이온으로 해리 되어 증류수에 용해되는 반응을 충분히 설명할 수 있다. 본 연구에서 측정된 pH변화는 ICPMS분석에서 나타난 용해 시간 증가에 따른 용해 성분 농도의 변화와 전도도 변화와 유사한 경향을 보이는 것을 설명하고 있다.

### 3.2 사문석분말 용해 전후의 분광분석

사문석의 증류수 용해 전후의 화학적 구조 변화를 조사하기 위하여 미처리 사문석 분말과 각 시간별로 증류수에 용해 후 건조한 사문석의 FT-IR 스펙트럼을 Fig. 5(a)에 나타냈다. 사문석의 화학적 구조의 변화를 알 수 있는 FT-IR 스펙트럼 3688, 3643  $\text{cm}^{-1}$  밴드에서 나타나는 -OH기의 변화이다<sup>13,14)</sup>. 사문석의 증류수 용해에서는 3688, 3643  $\text{cm}^{-1}$  밴드에서 나타나는 -OH기의 변화는 전혀 나타나지 않는 것이 확인되었다. 이 FT-IR 스펙트럼 결과들로부터 증류수에 용해된 사문석의 화학적인 구조에는 아무 변화가 일어나지 않은 것

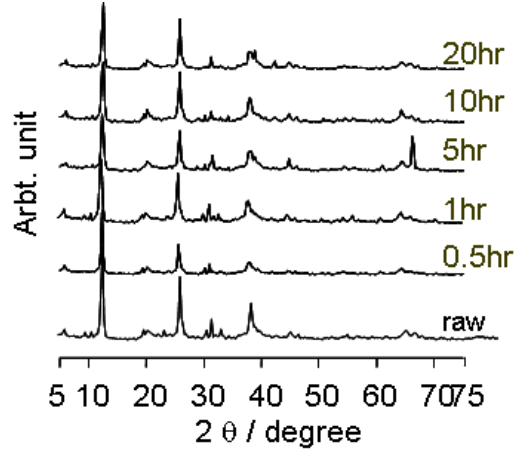
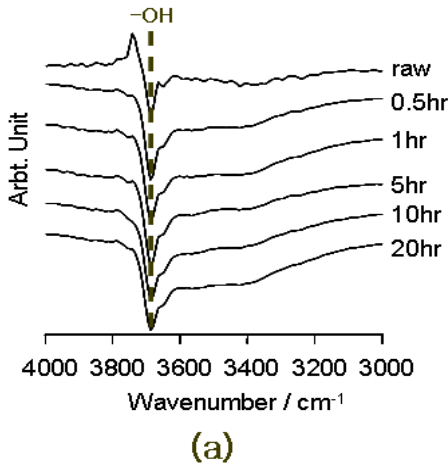


Fig. 6 X-ray diffraction patterns of untreated serpentine powder and distilled water treated serpentine powder

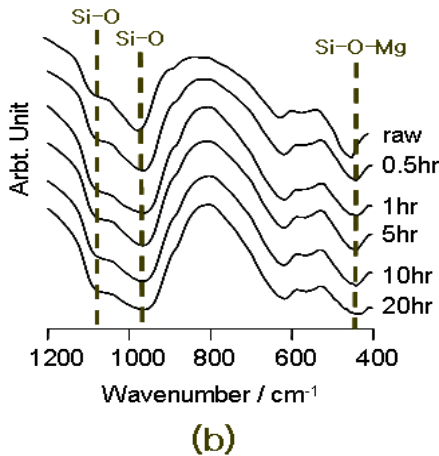


Fig. 5 FT-IR spectra of untreated serpentine powder and distilled water treated serpentine powders at various dissolution time

을 알 수 있다. 사문석은 증류수 용해 이후 성분 금속이 이온으로 해리하는 결과를 가져오지만, 사문석의 화학적 구조에는 아무 영향을 주지 않는 것이 확인되었다.

Fig. 5(b)는 파장 1200-400  $\text{cm}^{-1}$  영역의 스펙트럼에서 1080과 965  $\text{cm}^{-1}$ 의 peak는 Si-O 결합의 신축진동이고 450  $\text{cm}^{-1}$ 의 피크는 Si-O-Mg 결합을 나타내는 것이다. 미처리 사문석과 각 시간별로 증류수에 처리한 사문석의 스펙트럼 역시 동일한 결과를 보여주고 있다. 증류수 처리가 사문석의 화학

적 구조에는 아무런 영향을 미치지 않고 사문석을 구성하는 성분 금속 원소를 이온으로 용액에 해리시키는 것이 다시 확인 되었다.

증류수 용해 전후의 X선회절패턴은 사문석의 결정구조 변화와 다양한 정보를 제공한다. 미처리 사문석의 결과로부터 삼사정계의 결정구조를 갖고 있으며 사문석의 입체적 결정구조와 미처리 사문석의 다양한 결정학적 특성은 이전 연구에서 자세히 설명되었다<sup>13,14</sup>. Fig. 6은 미처리 사문석으로부터 0.5 시간, 1 시간, 5시간, 10 시간, 20 시간 증류수에 용해시킨 후 여과를 통해 얻어진 침전물을 120°C에서 24시간 건조한 후 조사한 XRD의 결과이다. 미처리 사문석과 용해 시간별로 조사한 사문석의 X-선회절패턴은 동일한 결과를 보이고 있으며 회절 강도에 있어서도 차이는 나타나지 않는 유사한 패턴을 보이고 있다. 이와 같은 결과는 사문석의 증류수 용해 실험을 통해 결정학적 변화는 없으며 표면으로부터 구성 성분이 용매에 이온화되어도 사문석의 결정구조에는 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다<sup>15,16</sup>.

#### 4. 결 론

증류수에서 이산화탄소의 포획 원료인 사문석

의 용해특성을 조사하여 산성가스와의 반응에 적절한 알칼리성 광물로 변화에 대해 조사한 결과는 다음과 같다.

- 1) 사문석은 증류수와 반응하여 접촉이 시작되는 초기 1시간 이내에 금속성분들이 용해되는 것으로 확인되었다.
- 2) 증류수에 금속성분들이 용해된 후 사문석의 결정학적 화학적 구조는 변화가 없이 안정한 형태를 유지하는 것이 확인되었다.

### 참 고 문 헌

- 1) C. Schmidt, S. Klara and R. Srivastava, "DOE Carbon Sequestration Program", US Department of Energy. Proceeding of the Electric Utilities Environmental Conference, Tucson, Arizona. 2002.
- 2) E. Bryant, "Climate process and change", Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997. p. 209.
- 3) 김미선, 윤영수, 심상준, 박태현, 이정국, "각종 혐기성 미생물 발효에 의한 유기산 및 수소생산", 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 13, No. 4, 2002, p. 330.
- 4) 심규성, 김창희, 박기배, "물의 전기분해에 의한 수소 제조기술과 경제성 분석", 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 15, No. 4, 2004, p. 324.
- 5) K. S. Lackner, D. P. Butt and C. H. Wendt, "Progress on binding CO<sub>2</sub> in mineral substrates", Energy Convers Manage, Vol. 38, 1997, pp. 259-264.
- 6) K. S. Lackner, C. H. Wendt, D. P. Butt, E. L. Joyce and D. H. Sharp, "Carbon dioxide disposal in carbonate minerals", Energy, Vol. 20, Issues 11, 1995, pp. 1153-1170.
- 7) J. L. Post and L. Borer, "High-resolution infrared spectra, physical properties, and micromorphology of serpentines", Applied Clay Science, Vol. 16, Issues 1-2, 2000, pp. 73-85.
- 8) R. W. Luce, R. W. Bartlett, G. A. Parks. "Dissolution kinetics of magnesium silicates", Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 36, Issue 1, 1972, pp. 35-50.
- 9) F.-C. Lin, C. V. Clemency. "The dissolution kinetics of brucite, antigorite, talc, and phlogopite at room temperature and pressure". American Mineralogist, Vol. 66, 1981, pp. 801-806.
- 10) P. Tartaj, A. Cerpa, M. T. García-González, C. J. Serna, "Surface instability of serpentine in aqueous suspensions", J. Colloid Interface Sci, Vol. 231, Issue 1, 2000, pp. 176-181.
- 11) 藤嶋昭, 相澤益男, 井上徹, 電氣化學測定法, 東京: 技報堂, 1994.
- 12) 逢坂 哲彌, 小山 昇, 大坂 武男, 電氣化學法: 基礎測定マニュアル 東京: 講談社, 1994.
- 13) 최원경, 문승현, 조태환, 이재근, "이산화탄소 탄산염광물화용 사문석의 열처리 및 특성평가", 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 16, No. 1, 2005, pp. 74-81.
- 14) 최원경, 조태환, "이산화탄소 포획을 위한 serpentine의 열처리와 물리화학적 특성 변화 연구", 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 18, No. 3, 2007, pp. 3016-308.
- 15) Wilson, M. Jeffrey, "A Handbook of Determinative Methods in Clays Mineralogy", Chapman and Hall, New York, 1987.
- 16) R. K. Schulze, M. A. Hill, Robert D. Field, P. A. Papin, Robert J. Hanrahan, D. D. Byler, "Characterization of carbonated serpentine using XPS and TEM", Energy Conversion and Management, Vol. 45, Issue 20, 2004, pp. 3169-3179.