한국수소 및 신에너지학회 논문집(2006.3), 제17권 제1호
Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society (2006.3), Vol. 17, No. 1, pp. 109~116

탄산염광물화용 활석의 열처리에 따른 결정학적 분광학적 특성변화

최원경*, 조태환*†, 이재근**
*단국대학교 공업화학과, **한전 전력연구원, 구조연구실

Crystallographic and Spectroscopic Characterization of Talc proposed Mineral Carbonation after Heat Treatment

Weon-Kyung Choi*, Tae-Hwan Cho*†, Jae-Keun Lee**
**Department of Industrial Chemistry, Dankook University, 29 Anseo-dong, Cheonan 330-714, Korea*
***Laboratory of Environmental and Structural Engineering, Korea Electric Power Research Institute, 103-16 Munji-Dong, Yuseong-Gu, Daejeon 305-380, Korea*

ABSTRACT

The heat treatment characteristics of natural talc sample was investigated in diverse analytical view point. The mass decrease comes to heat treatment was resulted by the continuous and the discontinuous process and the obtained result show very similar two step profiles with 8.9 % mass decrease. The dehydroxylation of -OH groups contained talc crystal was analyzed by spectroscopic method and the crystallographic variations was also observed after heat treatment. According to XPS result, the magnesium hydroxide($Mg(OH)_2$) of untreated talc powder changed to magnesium oxides(MgO) after heat treatment.

주요기술용어 : Carbon dioxide(이산화탄소), Mineral Carbonation(탄산염광물화), Talc(활석), CO_2 Sequestration(CO_2 포획), Heat Treatment(열처리), Dehydroxylation(탈하이드록시화)

1. 서 론

이산화탄소(CO_2)는 산업용 에너지원, 자동차 연료, 발전소 등 현대 산업사회의 기반시설 전반에 걸쳐서 사용되는 막대한 화석연료의 연소 부산물로 산업혁명 이후 지금까지 대기 중에 배출되어 왔다. 대기 중에 배출된 이산화탄소는 손쉽게 자연계에 순환되지 못하는 화합물로서 대기권의 열 순환을 교란하며 지구온난화와 기후의 변화를 일으키는 온실가스로 지적되었다[1,2]. 온실가스에 의한 지구 온난화 및 자연재해는 막대한 손실을 비롯한 수많은 인명 피해를 열섬 현상이

†Corresponding author : thcho@dankook.ac.kr

심화된 도시지역을 넘어 지구 전체에 걸쳐 현대 사회를 위협하고 있다. 화석연료 소비의 증가와 함께 증가하는 이산화탄소는 산업의 발달과 더불어 대기 중 농도가 급격히 증가하여 온실가스 경감을 위한 주요 대상으로 지목 되었다. 이산화탄소 배출저감을 위한 에너지 절약기술, 배출된 이산화탄소 분리기술, 이산화탄소 저장기술 등의 연구가 막대한 화석연료를 사용하는 국가들을 위주로 다양한 이산화탄소의 저감 방법에 대해 실시되었다. 그리고 현재 실용화를 위해 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 수소에너지나 태양에너지 등의 대체 에너지가 실용화되기 전 까지는 화석연료의 사용은 계속 되어질 것이다[3,4].

이산화탄소 저감에 대책으로 현재까지 알려진 저장법으로 1) 수심 3 km 깊이의 해수에 이산화탄소를 투입하는 해저저장, 2) 폐가스전이나 폐유전에 이산화탄소를 주입하는 지중저장, 3) 지하암반층 및 대수층에 이산화탄소를 주입하는 대수층 저장법이 실현 가능성 있는 방법으로 보고되어 왔다[5-8]. 이산화탄소 저장량이 가장 많은 해저저장법은 해수의 pH를 산성으로 변화 시킬 수 있다. 그러므로 해양생물의 생태계를 위협하는 문제점과, 해수에 저장된 이산화탄소가 해수의 온도차에 의한 용승작용으로 인해 대기 중에 다시 방출될 수 있는 불안정한 방법으로 지적되었다. 폐가스전 및 폐유전을 이용하는 방법은 이산화탄소를 지하에 저장하는 동시에 이로 인한 폐가스전이나 폐유전의 압력을 증가시킴으로써 채굴이 어려웠던 천연가스 및 원유 생산을 유도하는 채가스 공정 및 채유촉진공정이다. 이 방법은 이미 시행되어졌으며 이산화탄소 저장기능을 하고 있으나 거대 가스전이나 유전이 없는 국내 상황과 지질에는 부적절한 방식이다[9,10]. 지하 대수층저장은 지하저장소에 이산화탄소를 저장하는 방식으로 지하에 저장된 온실가스의 지층 간 누출로 인해 이산화탄소가 지하수를 오염시킬 가능성이 있으므로 다시 환경오염이 일어날 수 있다. 그러므로 이러한 저장방식들은 이산화탄소의 안정한 반영구적 저장법으로, 장소나 방식에 제한을 받는 한시적인 저장법으로 평가된다.

이산화탄소의 탄산염광물화 처리기술은 CO_2와 알카리토금속의 규산염을 반응시켜 이산화탄소의 재방출이 없는 안정한 탄산염으로 전환시키는 이산화탄소의 저장방법이다[11,12]. 이산화탄소의 탄산염화 반응원료로 예상되는 K, Mg은 지표면에 풍부하게 존재하며, 이들의 원료광물들의 원활한 재료로서의 가능성을 위한 전처리 연구들이 실시되었다[13,14]. 자연계의 순환과정에서 일어나는 탄산염광물화 반응은 너무 느리게 이루어지므로 화석연료의 사용으로 배출되는 CO_2를 처리하기에는 부적합하다. 인위적인 노력으로 배출 CO_2를 탄산염으로 전환시키기 쉬운 환경과 조건을 만들어 주어야 한다. 다음의 반응식(1)은 CO_2와 금속산화물(MgO)의 탄산염 반응식을 나타냈으며, 반응식(2)는 자연계에 존재하는 활석의 탄산염광물화 반응 기구를 표현했다.

$$MgO(s) + CO_2(g) \rightarrow MgCO_3(s) \quad (1)$$

$$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2(s)\ (talc) + 3CO_2(g) \rightarrow 3MgCO_3(s) + 4SiO_2(s) + H_2O(l) \quad (2)$$

이산화탄소를 저장하여 대기 중에 재방출 되는 것을 영구적으로 안전하게 차단할 수 있는 저장기술을 개발하는 것이 향후 기후협약의 국제적인 제재에 적극적으로 대처하는 방법이다. 본 연구에서는 탄산염광물화 반응을 이용한 이산화탄소의 안전하고 영구적인 저장기술의 선행기술로 열처리 활석의 이산화탄소 저장재료로써의 특성을 평가하였다. 열처리 전후의 활석의 결정학적, 분광학적 및 열적특성의 변화 등에 대해서 고찰하였다.

2. 실 험 방 법

활석(滑石, Talc, $(Mg_3(OH)_2Si_4O_{10})$)은 이산화탄소의 탄산염광물화를 위한 반응원료로 본 연구에서는 탄산염광물화 원료의 전처리에 대한 평가

를 위해서 사용하였다. 이 광물들은 Attrition mill(대화테크)과 Labo, Planetry Potmill(ITOH, LA-PO.4)을, 이용한 기계적 분쇄법으로 건식분쇄 하였다. 분쇄한 시료는 자동 Sieve shaker (CISA)를 이용하여 -125 ㎛의 두 가지 사이즈로 분류하고, 각 실험과 분석 등에 적절한 사이즈를 선택하여 사용하였다. 유도결합 플라즈마 질량분석(ICPMS)을 이용하여 원광활석의 성분 및 함량을 조사하였다.

원료광물의 전처리공정의 일부 과정인 원료광물의 열처리 과정을 각각 10 ℃/min의 승온단계, 설정온도에서의 90 min 열처리단계, 자연냉각단계의 세 단계를 구분하여 실시되었다.

강열감량은 열처리 후 시료의 질량변화를 비교하여 평가하였으며 100 ℃ 온도 간격으로 200 ~ 1100 ℃ 하소온도 범위에서 실시하였다. 대기 중의 수분의 흡착을 방지하기 위해서 열처리 전의 시료의 질량은 120 ℃에서 90분간 진공 건조한 후 칭량하였다. 열처리 후 시료의 중량변화 역시 대기 중 수분의 영향을 막기 위해 전기로로부터 채취한 시료를 황산 데시게이터에서 2시간 방랭 후 칭량하였다.

탄산염광물화 원료광물의 전처리 공정의 개발연구에 사용된 시료들의 결정학적 구조를 조사하기위해 X-ray Diffractometer(Rikaku Co.)를 사용하였다. 측정조건은 30 kV tube voltage와 30 mA tube current에서 Cu-Kα선(λ = 1.542 Å)을 사용하였으며 측정범위는 5° ~ 75°로 설정했다. 전처리 전후의 시료들의 열적특성을 조사하기 위해서 TGA(TA Instrument, SDT-2960 V 3.0 F)을 이용하였다. 측정조건은 승온속도 10 ℃/min으로 1100 ℃까지 측정하였으며, 열처리 질량변화와 비교하기 위하여 산화방지 가스를 주입하지 않았다.

전처리 전후 활석의 hydroxy(OH)기의 변화는 FT-IR 분광기(Bio-Rad. FTS 135)를 이용하였고 KBr disk를 이용하여 시료를 고정하여 4000 ~ 400 cm^{-1}의 측정범위에서 분광학적 조사 하였다. 시료들의 산화안정성 및 산화상태를 조사하기 위해서 X-선 광전자 분광법(XPS, Thermo VG Scientific, ESCALAB 210)을 실시했으며, 측정은 Mg K-α(1253.6 eV) 선을 이용한 60 W의 환경에서 이루어졌다.

3. 결 과 및 고 찰

기계적 분쇄법으로 분쇄한 활석의 구성 성분과 조성을 조사하기 위해 화학적 전처리한 후 유도결합 플라즈마 질량분석(ICPMA)을 실시하였다. Table 1에 이들 결과를 바탕으로 활석을 구성하는 산화물의 종류와 함량을 나타내었다. 활석을 구성하는 산화물로는 SiO_2(55.34 %)와 MgO (29.43 %)가 주성분으로 전체의 80 %이상을 차지하고 있었다. 소량의 K_2O(2.08 %)와 CaO(4.16 %)가 주성분 이외의 산화물로 포함되고 기타 미량의 Fe_2O_3, Al_2O_3, Na_2O 그리고 TiO_2로 구성된 것이 확인되었다. 활석의 높은 마그네슘산화물(MgO) 함량을 고려해볼 때 이산화탄소 고정을 위한 탄산염광물화 원료광물로 가능성이 충분한 재료로 평가된다.

특히 이들은 자연계에 천연광물로서 존재하기 때문에 탄산염광물화 공정을 위한 부가적인 정제공정이나 복잡한 선광공정 등이 거의 필요 없을 것으로 생각된다. 비교적 간단한 원료 생산 공정은 경제적 관점에서도 탄산염광물화 원료로서 활

Table 1 Contents of oxides and volatile substance for talc powders analyzed by ICPMA

Oxides	Contents / %
Silicon oxide / SiO_2	55.34
Magnesium oxide / MgO	29.43
Iron oxide / Fe_2O_3	0.38
Calcium oxide / CaO	4.16
Aluminium oxide / Al_2O_3	0.28
Sodium oxide / Na_2O	0.09
Potassium oxide / K_2O	2.08
Titanium oxide / TiO_2	0.02
Volatile substance / H_2O	8.23

석의 가능성을 높여 줄 것이다.

활석에 포함된 금속산화물 이외 휘발성분이 제거된 활석 분말의 물리적, 화학적 특성 변화를 관찰하기 위해서 열처리를 실시하고 열처리 전후의 변화를 조사하였다. 열처리는 200 ℃에서 1100 ℃까지 100 ℃ 간격으로 실시하였고, 열처리에 수반하여 나타나는 질량의 감소를 측정하여 Fig. 1에 나타내었다. 미처리 시료의 질량은 표면 흡착수분 및 광물의 생성 과정에서 포함되는 휘발분 등이 포함되어 있다. 결정성 화합물의 결정구조 내부에 포함된 휘발성 성분과 표면에 흡착한 휘발성분의 분해 및 연소 등이 원인으로 활석의 열처리는 질량변화가 나타난다.

본 연구에서 사용한 활석은 400 ℃ 이상의 온도에서 1차 질량 감소가 나타나기 시작하고 700 ℃ 이후에 2차 질량감소가 나타나고 있다. 1차 질량감소의 폭은 약 2 % 정도의 적은 질량감소 폭이 나타나지만 이후 2차 질량감소가 7 % 정도로 나타났고 최종 질량 감소는 9 %로 확인되었다. 이들 결과는 활석 내부에 포함된 수분이나 기타 휘발성분 등의 분해가 단일 과정이 아닌 400 ℃와 700 ℃에서 두 단계의 과정을 거치는 비연속적 반응으로 일어나는 것과 활석에 포함된 휘발성분, 흡착수분, 화합물중의 수분 등이 제거되는 온도가 밝혀졌다. 표면에 흡착된 휘발분이 제거되는 온도가 120 ℃ 전후에서 이루어지는 것을 고려하면 400℃와 700℃에서 나타난 단계적 질량 감소는 활석($Mg_3(OH)_2Si_4O_{10}$)의 결정 구조 내에 포함된 (OH)기를 비롯한 휘발성분들의 분해에 따라 나타난 것으로 사료된다. 이 질량감소 결과는 활석의 화학식을 고려해볼 때 금속산화물 성분 이외의 하이드록시기의 이론적인 질량과 거의 일치한다. ICP분석에서 얻어진 수분의 함량과도 큰 차이가 없는 결과를 보이고 있으므로 본 실험에서 실시된 활석의 열처리 온도와 열처리 시간 등의 조건이 활석의 구조에 포함된 휘발성분 제거에 적당한 것으로 판단된다.

열중량분석법(TGA)을 이용하여 상온에서 1100 ℃까지 가열과정에서 나타나는 활석의 연속적 질량 변화 특성을 알아보았고, 다음 Fig. 2에 그 결과를 나타냈다. 초기 상온부터 온도증가가 시작되면서 질량 증가가 나타나기 시작했고, 530 ℃ 부근까지 질량 증가가 계속되어 질량 증가분은 약 1.2 %정도였다. 활석의 열분석에서 나타나는 초기 질량 증가는 활석에 포함된 불순물상의

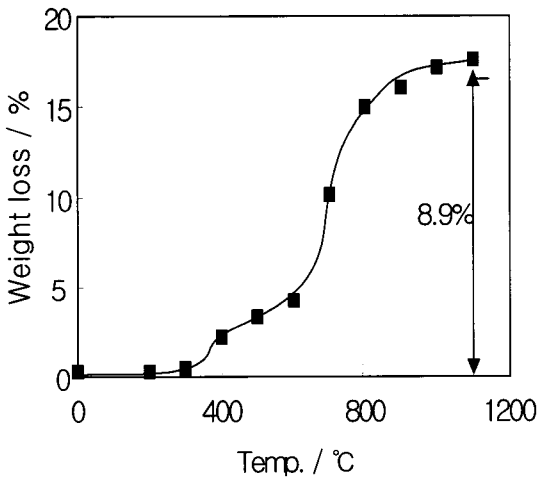

Fig. 1 Mass decrease profile of heat treated talc powders at various temperature

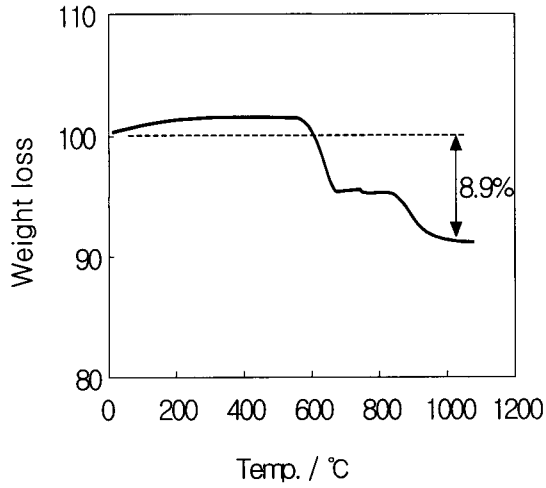

Fig. 2 Thermogravimetic analysis curve for talc powders

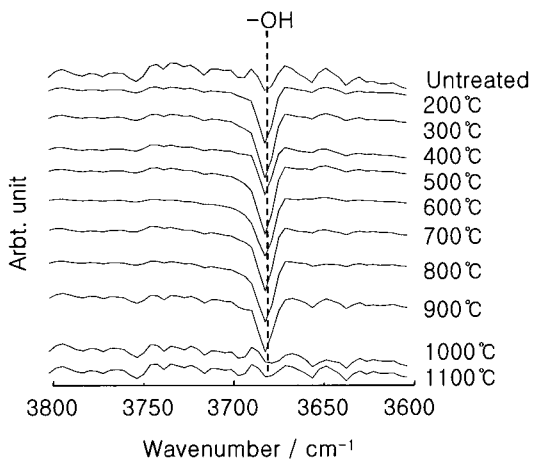

Fig. 3 FT-IR spectra of untreated and heat treated talc powders at various temperature

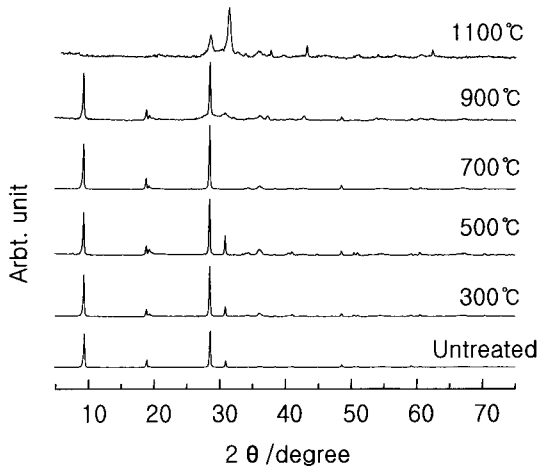

Fig. 4 Xray diffraction patterns of untreated and heattreated talc powders at various temperature

산화에 의한 것으로 설명된다[11]. 질량 증가가 끝나고 급격한 질량감소가 시작되어 680 ℃ 부근까지 약 5 %의 1차 질량 감소가 나타났으며, 850 ℃ 부근까지 질량감소가 없는 평탄한 곡선이 이어졌다. 850 ℃를 2차 질량감소가 나타나기 시작하여 950 ℃ 까지 급격한 질량 감소가 관찰 되었고, 이후 안정화된 질량 감소는 1100 ℃까지 지속되었으며 전체 질량 감소는 약 8.9 %로 확인되었다. 열분석에서 나타난 질량 감소의 원인 역시 활석의 결정구조에 포함된 -OH기가 제거된 dehydroxylation 반응에 의한 것으로 설명된다. Fig. 1에 나타난 불연속적인 열처리 질량변화와 비교하면 2단계의 질량변화가 나타나는 유사점을 갖고 있다. TGA 결과에서는 활석의 질량 감소가 시작되는 온도가 열처리 질량변화에서 얻어진 온도보다 200 ℃ 정도 높은 온도에서 이루어지는 차이점이 관찰되었다. TGA 분석은 연속적인 가열 과정에 대한 평가로 cap에 담긴 시료 분말의 결정구조 내에서 기화 중에 질량이 기록되기 때문에 설정된 온도에서 충분한 시간 동안 가열하는 열처리질량변화의 결과보다는 질량감소가 시작되는 온도가 높게 나타난다. 2단의 질량감소가 일어나는 유사한 결과들을 볼 때 열질량분석(TGA)과 열처리질량변화(Fig. 1)는 동일한 메카니즘에 의한 현상으로 생각된다. 특히 최종적인 질량감소 양이 8.9 %로 일치하기 때문에 연속적 공정이나 비연속적 공정에서의 활석의 열처리 결과는 dehydroxylation에 따라 휘발성분들이 제거되는 동일한 결과를 얻을 수 있는 것이다.

원료광물 활석의 열처리에 따른 화학적 구조변화를 조사하기 위하여 미처리 활석 분말과 200 ℃ ~ 1100 ℃에서 열처리한 활석 분말들을 적외선분광법(FT-IR)으로 측정하고 그 결과를 Fig. 3에 나타냈다. 미처리 활석의 FT-IR 스펙트럼에 나타나는 OH기의 범위(3700 to 3400 cm^{-1})내 3678 cm^{-1}에서 나타나는 hydroxyl groups에 해당하는 stretching vibrations을 나타낸다[12]. 미처리 활석에서 적외선분광분석은 3678 cm^{-1} 밴드에서 peak가 뚜렷하지 않고 hydroxyl groups의 흔적만이 나타나고 있다. 200 ℃ ~ 900 ℃에서 열처리한 활석 분말들의 적외선분광분석 결과는 peak의 형태가 뚜렷하게 나타나고 있으므로 900 ℃까지의 열처리에도 hydroxyl groups이 제거되지 않고 활석의 결정구조 내부에 존재하는 것으로 생각된다. 1000 ℃와 1100 ℃에서 열처리한 분광분석 결과에는 아무런 peak 흔적이 없는 스펙트럼을 보이고 있으므로 900 ℃까지 존재하던 hydroxyl groups이 활석으로부터 제거된 것으로 판단된다.

이들 결과로부터 열처리질량변화 실험에서 관찰된 활석분말의 열처리에 따른 질량감소 원인과 TGA분석에서 나타난 활석분말의 질량감소의 원인이 설명된다. 900 ℃에서 열처리한 시료에서도 나타나는 hydroxyl groups의 peak가 1000 ℃의 열처리 이후 사라지는 것은 다음 일련의 과정으로 생각된다. 열처리 온도가 900 ℃ 이상에서 활석에 포함된 hydroxyl groups과 다른 금속성분과의 결합이 끊어질 수 있을 정도의 느슨한 상태가 되고 결국 금속성분과의 결합이 끊어진다. 이후 후 분리된 hydroxyl groups들은 기화되는 dehydroxylation에 따라 활석분말의 질량감소가 나타나는 것이다.

열처리전후 활석의 결정구조 변화를 조사하기 위하여 미처리 활석분말과 300 ℃, 500 ℃, 700 ℃, 900 ℃ 그리고 1100 ℃에서 열처리한 활석 분말들의 XRD 측정결과를 Fig. 4에 나타냈다. 미처리 활석분말과 900 ℃ 이하의 온도에서 열처리한 활석 분말들은 동일한 X선 회절패턴을 나타내고 있다. N. Chandra들이 보고한 연구에서도 950 ℃ 이하의 온도에서 열처리한 활석은 tri-layer monoclinic 구조를 가지고 있다는 동일한 결과들이 보고되어 있다[15]. 한편 1100 ℃에서 열처리한 활석 분말의 X선 회절패턴은 900 ℃ 이하의 온도에서 열처리한 활석 분말들과는 상이한 결과를 보이고 있다. 이 결과는 열처리 과정 중에 dehydroxylation이 일어나는 화학적 변성과 더불어 원광 활석의 결정구조와 다른 구조를 갖는 $MgSiO_3$(enstatite)로 변형된 것이다[16]. 활석분말의 열처리과정 중 활석 표면에 흡착된 수분이나 휘발성 물질의 기화 및 활석 결정구조에 포함된 hydroxyl groups이 제거되므로, 활석 결정을 구성하는 층상구조간의 변화와 성분원자 사이의 화학결합이 이완된다. 열처리온도가 더 높아지면서 구성성분들 사이에 확산, 용해 등의 반응이 수반되면서 처음 활석의 성분들이 재배열이 일어난다. 열처리가 끝나고 냉각과정 중에 성분물질들은 재배열이 일어나고 각 상간의 분리가 일어나면서 hydroxyl groups을 포함하지 않는 활석으로 변화된다.

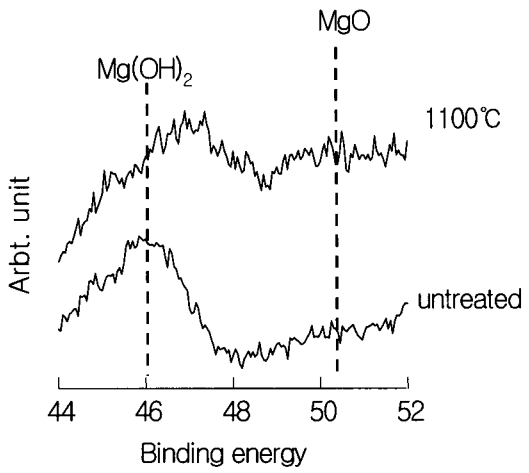

Fig. 5 XPS core spectra of untreated and 1100 ℃ heattreated talc powders

원료광물 활석의 열처리전후 성분금속 원소의 화학적 결합상태를 XPS를 이용하여 조사하였고, 그 결과를 Fig. 5에 나타냈다. 미처리 시료분말에 대한 XPS 결과로부터 활석을 구성하는 마그네슘이 hydroxyl groups과 결합한 $Mg(OH)_2$에 해당하는 결과가 얻어졌다. 한편 열처리 후의 활석을 구성하는 마그네슘은 열처리 과정 중 dehydroxylation이 일어나면서 hydroxyl groups과 모든 결합이 사라지고 마그네슘과 산소가 결합한 MgO의 형태로 변화된 것이 확인되었다. XPS 분석에서 나타난 열처리 전의 마그네슘에 결합한 -OH와 열처리 후에 마그네슘에 산소가 결합된 결과를 볼 때 활석의 열처리는 dehydroxylation에 따라 휘발성분이 제거되면서 미처리 활석과는 결정화학적인 특성이 다른 변화가 일어난 것을 알 수 있다.

4. 결 론

이산화탄소 탄산염광물화를 위한 원료로써 활석의 열처리 공정에 대한 연구를 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 활석을 구성하는 주성분으로 SiO_2와 MgO가 각각 55.34 %와 29.43 %이고 주성분 이외의

산화물로 CaO(4.16 %), K_2O(2.08 %) 등을 포함하는 것이 확인되었다.

2) 열처리 후 활석분말은 약 8.9 %의 질량감소가 2단계의 과정으로 나타났고, TGA 분석에서도 동일한 질량감소가 확인되었으며 이 결과는 활석 내부에 포함된 수분이나 유기물 등이 제거된 것으로 생각된다.
3) 활석분말의 FT-IR 스펙트럼에 나타나는 -OH기(3678 cm^{-1}) peak는 900 ℃의 열처리까지 나타났고 1000 ℃ 이상의 열처리에서는 나타나지 않으므로 활석의 결정구조에 포함된 hydroxyl groups의 dehydroxylation이 일어난 것으로 판단된다.
4) 미처리 활석 말로부터 900 ℃까지 열처리한 활석분말의 X선 회절패턴은 동일하게 나타났다. 900 ℃ 이상의 온도에서는 열처리한 활석분말의 X선 회절패턴에서 상이한 형태를 나타내고 있으므로 열처리 과정을 통해서 활석 구성 성분들이 재배열된 것으로 판단된다.
5) XPS를 이용하여 조사한 원료광물 활석에는 마그네슘이 $Mg(OH)_2$의 형태로 존재하였으며, 열처리 후의 활석에는 MgO가 확인되었다.

후 기

이 연구 논문은 2003년도 산업자원부 지원으로 수행하는 전력산업연구개발사업의 일환으로 수행된 연구개발의 일부입니다.

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 2002, Tucson, Arizona.
2) E.Bryant, "Climate process and change", Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997. p. 209.
3) R. Pierce, "Greenhouse gas mitigation technologies, an overview of the CO_2 capture, storage and future activities of the IEA Greenhouse Gas R&D programme", Energy Conversion and Management, Vol. 37, 1996, p. 665.
4) P. Freund and W. Ormerod, "Progress toward storage of carbon dioxide Energy Conversion and Management", Vol. 38, 1997, p. 199.
5) M. Peter, "Impacts on the marine environment from direct and indirect ocean storage of CO_2 Waste Management", Vol. 17, 1998, p. 323.
6) K. Cole, P. Freund and W. G. Ormerod, "Predicting future variability of dissolved inorganic carbon in the ocean Fuel and Energy", Vol. 37, 1996, p. 145.
7) M. Holtz, P. Nance and R. Finley, "Reduction of greenhouse gas emissions through CO_2 EOR in Texas", Environ Geosci 2001, p. 99.
8) H. Koide and K. Yamazaki. "Subsurface CO_2 disposal with enhanced gas recovery and biochemical carbon recycling", Environ Geosci, 2001, p. 24.
9) K. Lackner, D. Butt and C. Wendt, "Progress on binding CO_2 in mineral substrates," Energy Convers Manage, Vol. 38, 1997, p. 259.
10) K. Lackner, C. Wendt, D. Butt, E. Joyce and D. Sharp, "Carbon dioxide disposal in carbonate minerals", Energy, Vol. 20, 1995, p. 1153.
11) R. Schulze, M. Hill, R. Field, P. Papin, R.Hanrahan and D. Byler, "Characterization of carbonated serpentine using XPS and TEM", Energy Conversion and Management, Vol. 45, 2004, p. 3169.
12) J. Post and L. Borer, "High-resolution infrared spectra, physical properties, and micromorphology of serpentines", Applied Clay Science, Vol. 16, 2000, p. 73.
13) 최원경, 문승현, 조태환, 이재근, "이산화탄소 탄산염광물화용 사문석의 열처리 및 특

성평가"한국수소 및 신에너지 학회논문집, 2005. 16, Vol. 16, No. 1, pp.74-81.
14) 최원경, 문승현, 조태환, 이재근, "Mineral Carbonation 원료용 수활석 전처리에 대한 연구, 2005. 16, Vol. 16, No. 3, pp. 277-283
15) N. Chandra, N. Agnihotri, and S. K. Bhasin, "Sintering characteristics of talc in the presence of phosphatatic and alkali carbonate sintering activators", Ceramics International, 30, 2004, p. 643.
16) L. A. Perez-Maqueda, A. Duran and J.L. Perez-Rodriguez, "Preparation of submicron talc particles by sonication", Applied Clay Science, Vol. 28, 1-4, 2003, p, 245-255.