

전라남도 신안군 자은도 해변사의 광물학적 특성

Mineralogy of Beach Sand in Jaeun Island, Shinangun, Chonranamdo

채 수 천 (Soo-Chun Chae) · 신 희 영 (Hee-Young Shin)* · 정 지 성 (Jee-Sung Jung) ·
장 영 남 (Young-Nam Jang) · 배 인 국 (In-Kook Bae)

한국지질자원연구원

(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 350-305, Korea)

요약: 전라남도 신안군 자은도의 둔장해수욕장 해변으로부터 채취한 해변사로부터 중광물 회수공정을 실시하여, 중광물의 특징 및 회수 가능성에 대한 연구를 수행하였다. 채취 시료는 깊이별로 상부, 중부 및 하부시료로 구분한 뒤 각각에 대하여 spiral separation을 실시하여 얻은 중광물군을 초기물질로 3차에 걸친 중광물 선별작업을 실시하였다. 본 역에서 배태되어 있는 중광물로 티탄철석, 저어콘, 금홍석, 아나타제, 모나자이트 및 제노타임 등이 관찰되었다. 3차에 걸친 Table separation을 실시한 결과, 맥석광물인 석영, 정장석, 알바이트 및 백운모가 여전히 존재하였다. 따라서 부가적으로 비중선별이 추가적으로 요구된다. 수선을 통한 중광물의 선별을 실시한 결과, 각 중광물의 다양한 원마도 및 색깔을 보임으로써, 배태된 중광물들이 다양한 성인에 의해 형성되었음을 시사하고 있다.

주요어 : 중광물, spiral 선별, 해변사, table 선별, SIROQUANT

ABSTRACT: Separation process of heavy minerals was performed with sand from Dunjang beach of Jaeundo, Shinangun, Chonnam, and the feasibility study separating heavy minerals was carried out, and their properties were studied. Samples were selected in three parts, which were upper part, middle part and lower part, with depth. Samples of heavy mineral groups separated with the spiral separator were chosen as starting materials, and they were separated with 3 times of table separation. Heavy minerals presenting in this area were ilmenite, zircon, rutile, anatase, monazite, and xenotime. In the results of 3 times of table separation, minor content of quartz, orthoclase, albite and muscovite were existed as gangue minerals. Accordingly, we concluded that additional specific gravity separation was needed. In the results of separation of heavy minerals by hand picking, it was confirmed that heavy minerals had various genesis because of their various roundness and color.

Key words: heavy mineral, spiral separation, beach sand, Table separation, SIROQUANT

*교신저자: hyshin@kigam.re.kr

서 론

중국 및 인도 등 신흥 경제대국의 산업화에 의해 제2의 석유과동이라 일컬을 수 있는 자원 확보 전쟁이 범세계적으로 일어나고 있다. 이러한 세계적인 추세로 인하여, 에너지원의 확보가 필수적이며, 따라서 우리나라와 같은 자원빈국의 경우, 이전에는 경제성 때문에 폐광되었던 석탄광을 비롯한 다양한 종류의 자원에 대한 재조명이 필연적인 숙명이 되었다. 특히 산업발달에 있어 중요 성분의 원료인 금속광물, 비금속 광물 및 희유원소 광물의 확보는 국가의 경쟁력 확보에 있어 무엇보다 중요하다. 그러나 이들 광물은 육상에 주로 분포하고 있고, 대부분 갭내채광에 의존하기 때문에, 개발의 어려움과 더불어 수송상의 문제점 그리고 채광된 광석에 대한 다단계 처리를 통한 단체분리에서 문제 등 경제성 확보가 가장 중요한 요인이다. 이러한 점을 고려할 때, 우리나라는 3면이 바다로 둘러싸여 있는 관계로, 해변이 잘 발달되어 있고, 또한 이러한 해변 모래(이하 해변사) 내의 중광물은 단체분리는 물론, 수송 및 채광상의 용이성 때문에 관심의 대상이 되어 왔다.

일반적으로 해변사 내에 함유된 중광물로는 저어콘($ZrSiO_4$), 티탄철석($FeTiO_3$), 류콕신(leucocoxene: $FeTiO_3$), 금홍석(TiO_2) 및 아나타제(TiO_2) 그리고 희토류 광물인 모나자이트(Ce, La, Y, Th) (PO_4, SiO_4) 및 제노타임(YPO_4) 등이다. 대부분의 함티탄 광물은 페인트, 플라스틱, 고무 및 제지용 백색의 안료인 TiO_2 의 원료로 사용된다. 저어콘의 경우에는 주물사(foundry sand) 및 세라믹 원료로 사용된다. 모나자이트 및 제노타임은 희토류 원소의 원료이며, 특히 촉매로부터 유리제조에 이르는 다양한 용도로 사용되고 있다(Buckley, 2007).

호주의 북서 빅토리아주의 Murray 분지에 대한 광물탐사 결과, 조립질 해변사의 경우, 중광물의 매장량이 약 6천만 톤으로, 이들 중 8백만 톤의 금홍석, 6백만 톤의 저어콘 및 3천만 톤의 티탄철석이 함유된 것으로 조사되었다. 특히 이들을 금액으로 환산한다면 약 130억불에 달하는 경제적 가치를 지닌 것으로 평가된 바 있다(Bryan *et al.*, 2006).

본 연구의 대상 지역인 전라남도 신안군 자은도는 지질 도폭상 자은도로 되어 있으나, 현

재까지 발간된 적이 없으며, 다만 광역지질도에만 간단한 지질이 소개되어 있을 뿐이다. 양재열 등(1969)은 자은도 해변사로부터 규사 정광을 위한 선광법을 연구한 바 있으며, 김승우 및 장정해(1979)에 의해 목포-청산도간 연근해저 퇴적물 조사의 일환으로 자은도가 포함되기도 하였다. 그러나 이들은 광물학적인 연구보다는 퇴적암석이나 퇴적물에 대하여 주로 초점을 맞추었다. 본격적으로 자은도를 광물, 광상학적으로 탐사한 것은 이윤오(1979)에 의하여 이루어져, 지질 및 사광상에 대한 연구가 수행되었다. 또한 김승우 등(1980)은 서해남부 해저퇴적물 연구의 일환으로 흑산도-자은도간의 지질 및 지구물리학적 특성에 대한 연구를 하였다. 그러나 이후에는 이렇다할 연구가 수행되지 못한 관계로 인하여, 이에 대한 연구 자료가 상당히 미흡한 실정이다. 1969년 양재열 등에 의한 해변사로부터의 선광법에 대한 연구가 수행되기는 하였으나, 소위 중광물에 대한 것이 아니라 규사를 대상으로 하였다. 본 연구는 해변사 내에 함유된 중광물의 특성 및 선광공정을 조합한 연구로, 2007년도 해양수산부 사업을 진행하는 과정에서 중광물의 함량이 높게 측정된 전라남도 신안군 자은도 부근의 둔장 해수욕장($N34^{\circ}54'46.34''$, $E126^{\circ}03'04.13''$)을 선정하여(그림 1), 해변사로부터 중광물을 회수하여, 이들의 특성을 밝히고, 이들에 대한 회수 기법을 확립함으로써, 산업계에 널리 사용되고 있는 중광물의 경제적 가능성에 대한 연구를 수행코자 하였다.

지 질

본 연구 대상 지역인 자은도는 중생대 말기의 유문암질 옹회암(rhyolitic tuff)으로 구성되며, 주성분 광물로는 미사장석, 석영, 흑운모, 장석, 기타 광물로 구성된 석기(groundmass)에 암편립으로 나타나고 부성분 광물로 세리사이트, 방해석, 녹염석, 자철석 등이 관찰된다(이윤오, 1979).

실험방법

해빈사로부터 중광물(중사)을 선별하기 위하여, 전라남도 신안군 자은도의 둔장 해수욕장을 대상으로 시료를 채취하였다. 채취된 시료에 대

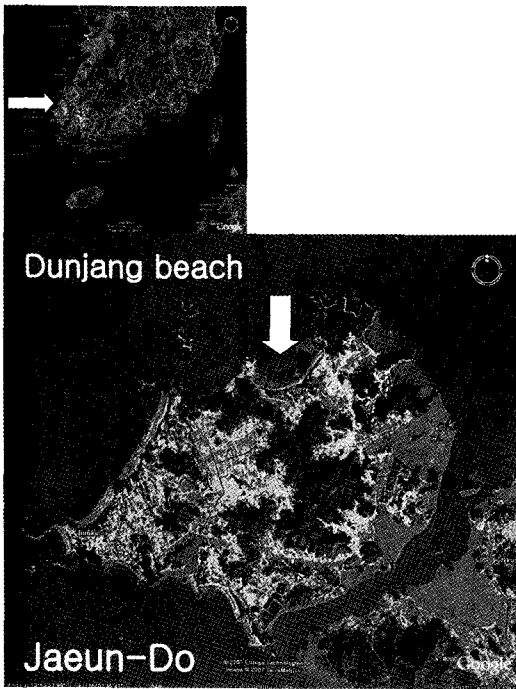


Fig. 1. Location map of sampling site in this study.

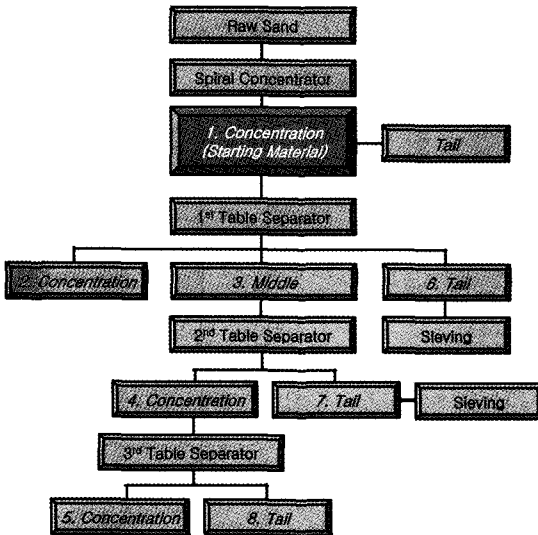


Fig. 2. Procedure of separation of heavy mineral in this study.

하여는 우선 Spiral 비중선별기를 이용하여 분리공정을 실시한 후, 중광물군(concentration)을 초기물질로 선정하였다. 이들 초기물질들은 3차에 걸친 Table separation (Wilfley Laboratory Concentrating Table)을 실시하였다(그림 2). 이

같은 3차에 걸친 선별공정은 각 차수별 공정에서 회수되지 못한 중광물을 재회수하기 위함이었다. 이 같은 다양한 공정 및 단계를 거친 시료에 함유된 광물의 동정은 Phillip사의 X-선 분말 회절기(Model명: X'pert MPD powder diffractometer; Cu-K α tube; accelerate voltage: 40 kV, current: 30 mA)를 사용하였다. 이러한 XRD 분석 결과를 토대로 SIROQUANT 프로그램에 의하여 구성 광물의 함량을 측정하였다. 또한 ICP 및 AA 분석에 의해 각 단계별 시료의 화학조성을 측정하였고, 이를 통한 NORM 계산을 실시하였다. 각 상들에 대한 분포양상 및 성분분석을 위해, SEM/EDS (JSM-5300/xford Link ISIS EDS)장치를 이용하였다.

결 과

광물학적 특성

초기물질의 특성

둔장 해수욕장의 한 장소를 택하여, 폭 1 m × 너비 3 m × 깊이 60 cm로 5개소를 트랜칭하여, 0~20 cm (이하 상부시료), 20~40 cm (이하 중부시료) 및 40~60 cm (이하 하부시료) 깊이에서의 시료를 선별 채취하였다(그림 3a). 이들 채취된 시료(원사: raw sand)의 주구성 광물은 석영, 엘바이트 및 정장석이었다.

채취된 시료는 Spiral 비중선별기를 이용한 선별공정을 실시하여, 중광물군(concentration)과 맥석광물군(tail)으로 구분한 뒤 건조하였다(그림 3b). 이들 중 상부, 중부 및 하부 시료의 중광물군을 초기물질로 간주하였다.

이들 초기물질에 대한 XRD 분석 결과, 석영(quartz), 정장석(orthoclase), 엘바이트(albite), 백운모(muscovite) 및 보통각섬석(hornblende) 등이 공통으로 관찰되며, 특히 중부시료의 경우에는 이러한 광물 이외에, 티탄철석(ilmenite) 및 녹염석(epidote)이 관찰됨으로써, 중부시료가 보다 많은 양의 중광물을 함유하고 있음을 확인하였다(그림 4).

Table 선별에 따른 심도별 광물조합

상부시료

1차 선별 시, XRD 결과 중 최대 회절강도를

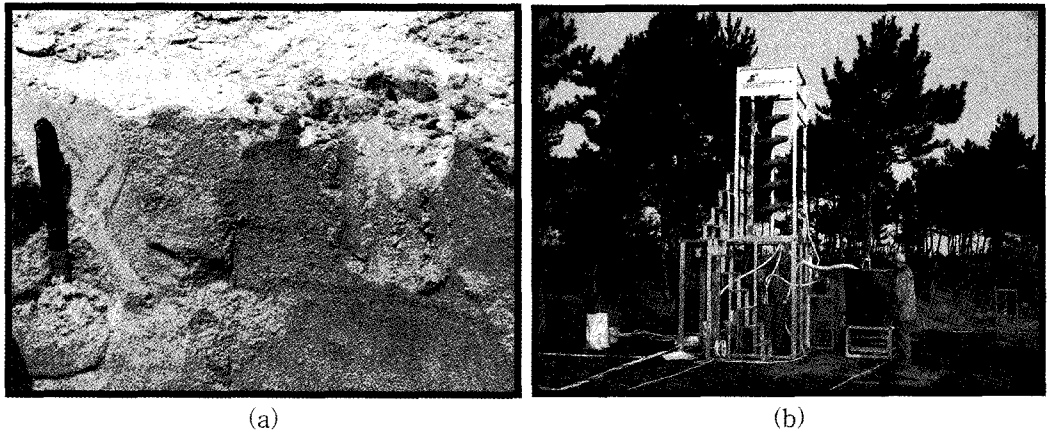


Fig. 3. (a) Cross section of sampling site in trench and (b) spiral concentrator.

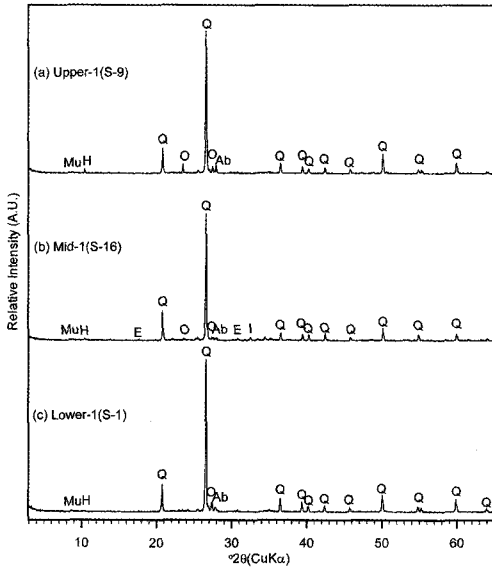


Fig. 4. XRD patterns of (a) upper starting material (S-9), (b) middle starting material (S-16) and (c) lower starting material (S-1) separated from spiral concentrator. Mu: muscovite, Q: quartz, Ab: albite, I: ilmenite, O: orthoclase, H: Hornblend.

기준으로, 중광물군(concentration)에서 티탄철석, 저어콘, 금홍석, 아나타제, 석영 및 모나자이트가, 중맥석광물군(middle)에는 석영, 금운모, 정장석, 엘바이트 및 보통각섬석이 그리고 맥석광물군(tail)에는 석영, 정장석 및 엘바이트가 관찰되었다(그림 5). 이들 시료 중, 중맥석광물군에 속하는 시료에 대한 2차 선별 시, 중광

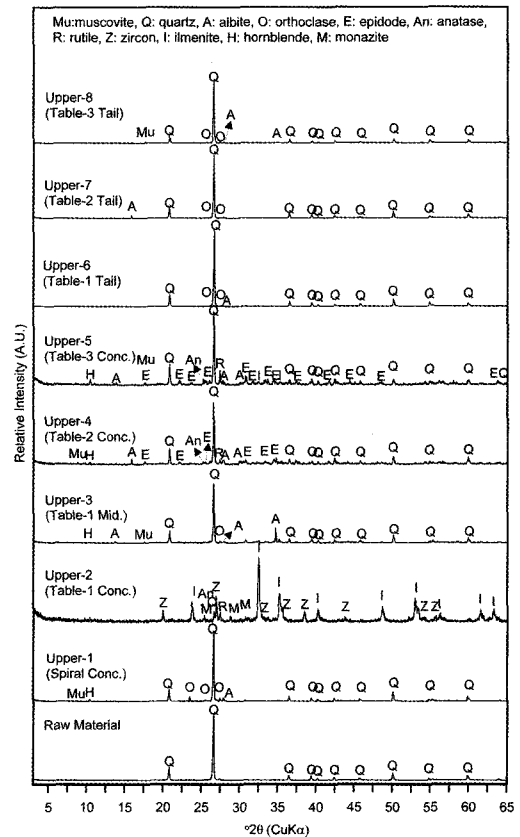


Fig. 5. XRD patterns of upper samples with various steps.

물군에 속하는 광물로 1차 선별 시 중맥석광물군에 존재하였던 석영과 엘바이트가 여전히 관

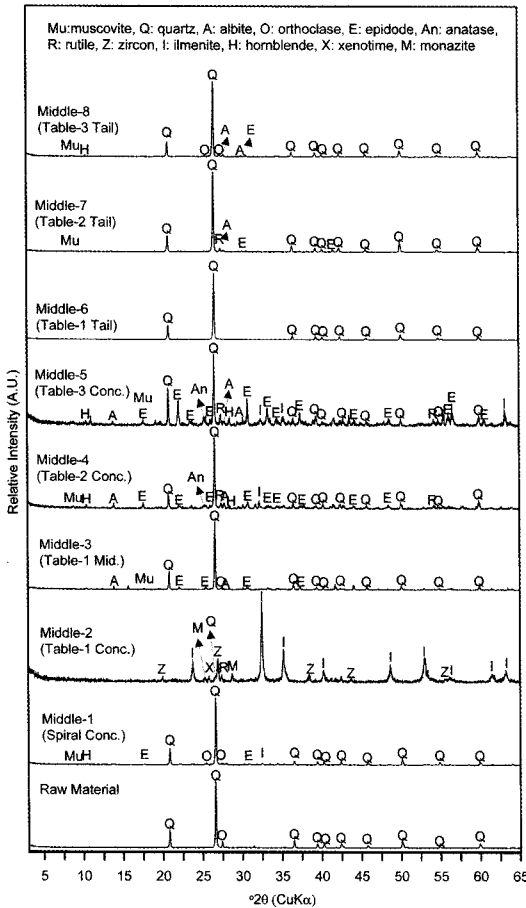


Fig. 6. XRD patterns of middle samples with various steps.

찰되는데 반하여, 정장석의 부재, 그리고 금홍석, 아나타제 및 녹염석 등 중광물들이 처음으로 관찰되는 특징을 보였다. 2차 선별에서 얻어진 중광물군에 대한 3차 선별을 실시한 결과, 이러한 중광물의 종류 및 회절강도가 증가하여, 중광물군에서 2차 선별 시 관찰되지 않았던 티탄철석이 관찰되었고, 그밖에 금홍석, 아나타제 및 녹염석의 회절강도가 증가되어, 차수별 중광물의 농집현상이 두드러졌다.

표 1은 분석된 XRD 자료를 통해 구성광물의 정량적인 함량을 SIROQUANT 프로그램에 의하여 측정된 자료이다. 표에서 지시하듯이 주요 중광물인 아나타제, 티탄철석, 저어콘, 모나자이트 및 금홍석은 1차 선별의 중광물군에서 각각 2.5, 71.6, 9.5, 7.8 및 6.1%의 함량을 가진 것으로 측정되었다. 따라서 주요 중광물의 농집은

최초의 선별과정에서 발생되었으며, 이후 차수에서의 선별된 중광물군에서는 매우 미약한 중광물의 함량을 보였다. 특히 각 차수별 맥석광물군에서는 중광물이 거의 관찰되지 않는다는 점에서 선별이 초기에 일어나며, 이후 차수의 선별은 큰 의미를 지니고 있지 않음을 시사하고 있다.

중부시료

1차 선별 시, 중광물군(concentration)에서 티탄철석, 저어콘, 금홍석, 모나자이트, 제노타임 및 석영이, 중맥석광물군(middle)에는 석영, 정장석, 엘바이트, 각섬석, 금운모, 녹리석 및 녹염석이, 그리고 맥석광물군(tail)에는 석영, 정장석, 엘바이트 및 금운모가 관찰되었다(그림 6). 이들 시료 중, 중맥석광물군에 속하는 시료에 대한 2차 선별 시, 중광물군에 속하는 광물로 1차 선별 시 중맥석광물군에 속하는 석영 및 녹염석이 여전히 관찰되는데 반하여, 정장석의 부재, 그리고 보통각섬석, 금홍석 및 티탄철석의 존재가 특징적이었다. 이러한 2차 선별 시 중광물군에 속하는 시료에 대한 3차 선별을 실시한 결과, 중광물군에서 속하는 광물은 2차 선별과정 시, 중광물군에 속하는 것과 동일하지만, 회절강도가 보다 증가된 광물조합을 보임으로써, 상부시료에서의 경향과 일치하였다.

SIROQUANT 프로그램에 의해 계산된 정량 분석치도 상부시료와 마찬가지로 1차 선별 중광물군에서 티탄철석, 저어콘, 모나자이트이 금홍석 각각 76.9, 6, 8.8 및 4%를 함유하며, 특히 유일하게 제노타임이 미량이지만 1.5% 함유된 것으로 측정되었다(표 1).

하부시료

1차 선별 시, 중광물군(concentration)에서 저어콘의 회절강도가 가장 강한 경향을 보였으며, 티탄철석, 석영, 금홍석, 아나타제, 녹염석, 엘바이트 및 보통각섬석이, 그리고 중맥석광물군(middle)에는 석영, 정장석, 엘바이트, 금운모 및 각섬석이, 맥석광물군에는 석영 정장석 및 엘바이트가 관찰되었다. 그러나 2차 및 3차 선별 시에는 앞서 기술한 상부 및 중부시료와는 상당한 차이를 보였다. 즉 중광물군에는 어떠한 중광물도 관찰되지 않음으로써, 하부시료의 경우, 상부나 하부시료에 비하여, 중광물의 함량

Table 1. Mineralogical compositions of raw sand and each concentrates analyzed by SIROQUANT from X-ray powder diffraction data

Upper Part									
RAW Mat.	Upper-1	Upper-2	Upper-3	Upper-4	Upper-5	Upper-6	Upper-7	Upper-8	
Light Minerals									
QUARTZ	91.5	71.8	2.6	59.6	39.6	33.7	93.4	90.9	85.5
ALBITE	3.5	8.7	0	7.1	8.3	5.3	3.3	5.3	3.3
ORTHOCLASE	5	8	0	2.8	0	0	3.4	3.8	3.3
HORNBLLENDE	0	6.8	0	14	11.3	13.2	0	0	0
MUSCOVITE	0	4.7	0	16.5	9.4	7.7	0	0	7.9
EPIDOTE	0	0	0	0	25.1	28.4	0	0	0
subtotal	100	100	2.6	100	93.7	88.3	100.1	100	100
Heavy Minerals									
ANATASE	0	0	2.5	0	1.6	1.9	0	0	0
ILMENITE	0	0	71.6	0	0	1.9	0	0	0
ZIRCON	0	0	9.5	0	0	0	0	0	0
MONAZITE	0	0	7.8	0	0	0	0	0	0
RUTILE	0	0	6.1	0	4.7	7.9	0	0	0
subtotal	0	0	97.5	0	6.3	11.7	0	0	0
total	100	100	100.1	100	100	100	100.1	100	100
Middle Part									
Raw	Mid-1	Mid-2	Mid-3	Mid-4	Mid-5	Mid-6	Mid-7	Mid-8	
Light Minerals									
QUARTZ	88.8	68.7	2.7	54.8	39.3	19.5	89.3	80.5	71.1
ALBITE	4.4	4	0	4.2	6.4	10.3	2.5	5.5	4.8
ORTHOCLASE	6.8	4.5	0	4.9	0	0	3.4	4.2	4.2
HORNBLLENDE	0	5.4	0	10.9	10	8	0	0	7
MUSCOVITE	0	5.9	0	7.6	5.7	3.7	4.9	6.7	7.4
EPIDOTE	0	9.5	0	16.2	26.8	43.4	0	2.6	5.4
CHLORITE	0	0	0	1.5	0	0	0	0	0
subtotal	100	98	2.7	100.1	88.2	84.9	100.1	99.5	99.9
Heavy Minerals									
XENOTIME	0	0	1.5	0	0	0	0	0	0
ANATASE	0	0	0	0	2.1	2.5	0	0	0
ILMENITE	0	2.1	76.9	0	3.6	7.9	0	0	0
ZIRCON	0	0	6	0	0	0	0	0	0
MONAZITE	0	0	8.8	0	0	0	0	0	0
RUTILE	0	0	4.1	0	6	4.7	0	0.5	0
subtotal	0	2.1	97.3	0	11.7	15.1	0	0.5	0
total	100	100.1	100	100.1	99.9	100	100.1	100	99.9
Lower Part									
RAW Mat.	Lower-1	Lower-2	Lower-3	Lower-4	Lower-5	Lower-6	Lower-7	Lower-8	
Light Minerals									
QUARTZ	87.2	73.3	8.5	71.3	67.2	64	81	81.4	82
ALBITE	3.2	7.8	7.2	8	12.6	11.3	8.8	5	6.5
ORTHOCLASE	9.6	6.4	0	4.8	5.9	3.3	10.2	6.7	5.1
HORNBLLENDE	0	5	19.3	7.3	4.9	8.8	0	0	0
MUSCOVITE	0	7.6	0	8.7	9.4	12.6	0	6.9	6.4
EPIDOTE	0	0	18.5	0	0	0	0	0	0
subtotal	0	2.1	97.3	0	11.7	15.1	0	0.5	0
Heavy Minerals									
ANATASE	0	0	3.7	0	0	0	0	0	0
ILMENITE	0	0	27.8	0	0	0	0	0	0
ZIRCON	0	0	9.6	0	0	0	0	0	0
RUTILE	0	0	5.4	0	0	0	0	0	0
subtotal	0	0	29.5	0	0	0	0	0	0
total	100	100.1	100	100.1	100	100	100	100	100

Sample numbers (i.e. Upper-1) indicate procedure numbers in Fig. 2.

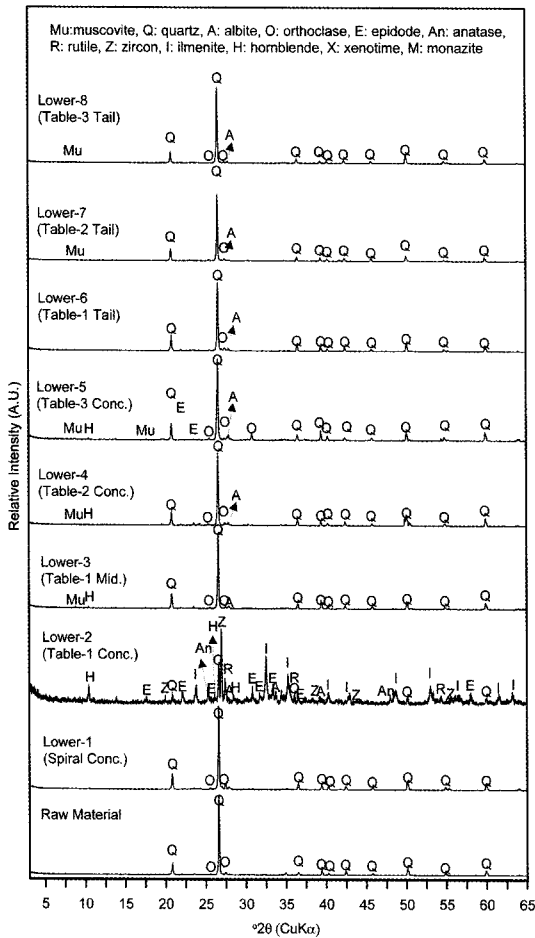


Fig. 7. XRD patterns of lower samples with various steps.

이 매우 적음을 시사하고 있다(그림 7).

하부시료 역시 앞서 기술한 상하부의 시료와 유사한 특성을 보였으나 전반적으로 산출되는 중광물의 함량이 극히 낮았다. 이들과의 차이점이라면, 1차 선별 중광물군을 제외하고는 어느 곳에서도 중광물이 산출되지 않는다는 점인데, 이는 본 지역에서의 중광물의 분포의 한계를 지시한다. 즉 40 cm 이하의 깊이에서는 중광물의 함량이 급속도로 낮아짐을 지시하고 있다(표 1).

SEM/EDS 분석 결과

각 심도별 시료 중, 중부시료의 경우, 상대적으로 맥석광물의 종류가 적고, 중광물의 종류가

많은 점에서, 타 심도별 시료에 비하여 중광물이 농집되어 있음이 확인되었다. 따라서 중부시료를 대상으로 SEM/EDS 분석을 실시하여, 구성 광물의 특성을 조사하였다.

초기물질의 광물조합

그림 8은 중부시료의 초기물질에 대한 SEM/EDS 분석 자료이다. EDS분석에 따른 원소분포 그림에서 보여주는 바와 같이, 주구성 광물로 석영이 지배적이었으며, 소량의 정장석, 엘바이트, 녹염석 및 티탄철석이 관찰됨으로써 XRD 결과와 유사하였다.

Table 선별 후의 중광물군의 광물조합

1차 Table 선별 공정을 마친 시료의 경우, 중광물군에는 석영, 티탄철석, 저어콘, 금홍석, 모나자이트 및 제노타임(?)이 XRD 분석결과 관찰된 바 있다. EDS분석(면분석 및 점분석) 결과, 티탄철석이 가장 많았으며, 저어콘, 모나자이트 및 금홍석이 그 다음의 순서였다(그림 9). 티탄철석의 경우, 대체로 원마도가 불량하였으며, 입도는 수십-200 μm였다. 또한 연마편을 관찰한 관계로 인하여, 형태가 주상으로부터 원형에 이르는 매우 다양한 양상을 보였다. 저어콘의 경우, 50~200 μm의 입도를 가지고 있으며, 모나자이트와 금홍석의 입도는 100~200 μm 정도로, 금홍석의 경우에는 비교적 자형으로 관찰되었다.

3차 Table 선별공정을 마친 시료의 경우, 중광물군에는 티탄철석, 녹염석, 금홍석(아나타제 포함), 규선석 및 미량의 석영이 관찰되었다. 티탄철석의 경우, 주상 내지 타원형의 입도 100 μm 내외였으며, 일부 녹염석의 경우에는 거의 타원형을 보이며 입도가 100 μm였다(그림 10).

Table 선별 후의 맥석광물군의 광물조합

1차 Table 선별 후의 맥석광물로 석영이 대다수를 차지하였으며, 일부 정장석과 극소량의 규선석이 관찰되었다. 이들의 입도는 대략 0.1~0.2 mm였다(그림 11). 2차 Table 선별 후의 맥석광물로 석영이 대다수를 차지하였으며, 소량의 정장석, 엘바이트 및 규선석 그리고 중광물로 미량의 녹염석, 티탄철석 및 금홍석이 관찰되었다(그림 12).

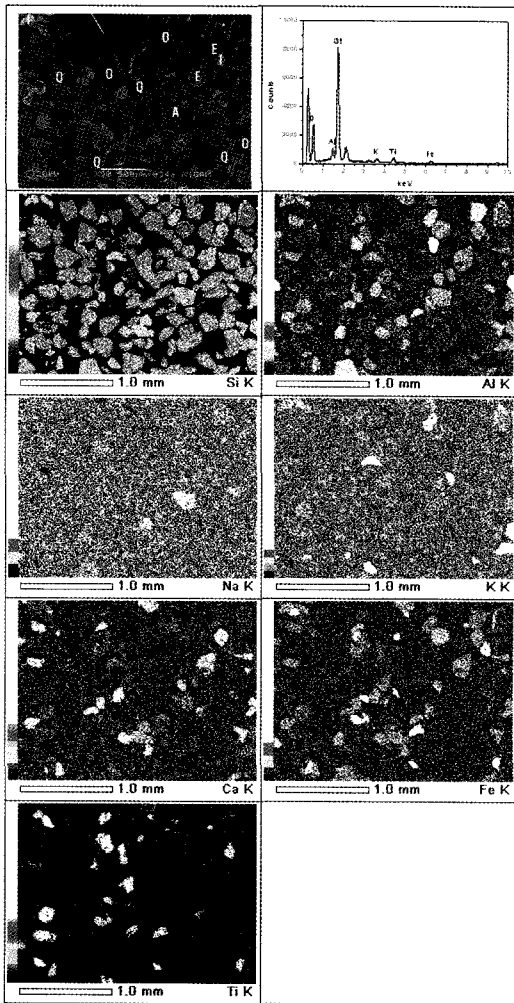


Fig. 8. SEM and mapping images of starting material.

중광물의 형태

자은도에서 채취된 해빈사 내에 함유된 주요 광물로는 녹염석, 저어콘, 티탄철석, 금홍석, 규선석 및 모나자이트 등이 있다. 해빈사는 색깔 별로, 각각 노란색 및 갈색시료, 흰색시료 및 검정색시료로 구분될 수 있는데(그림 13a~13c), 이들로부터 수선선별(hand picking)하여, 각 광물의 형태를 관찰하였다. 모나자이트의 경우에는 함량이 매우 적었기 때문에 手選에 의해 선별하지 못하였다. 녹염석의 경우(그림 13d), 무색내지 연노랑색으로 원형, 타원형 및 주상의 형태를 가지고 있었고, 원마도가 다양하며, 입도는 0.1~0.4 mm였다. 저어콘의 경우(그림

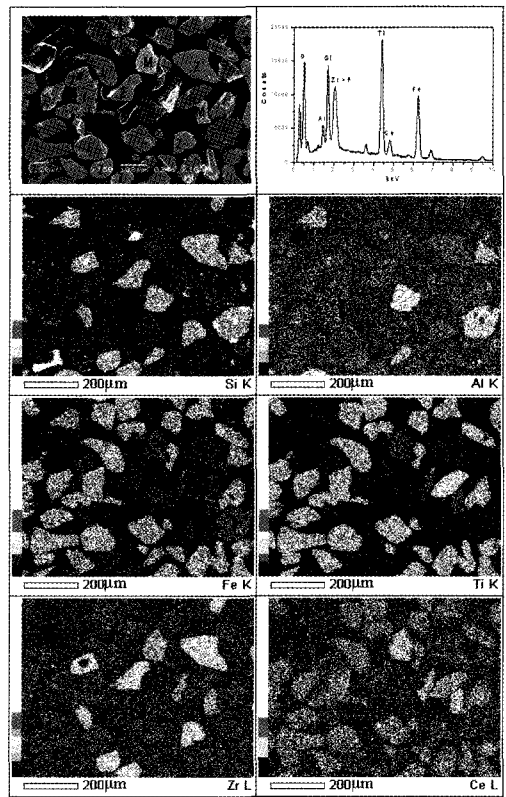


Fig. 9. SEM and mapping images of concentration after 1st Table separation.

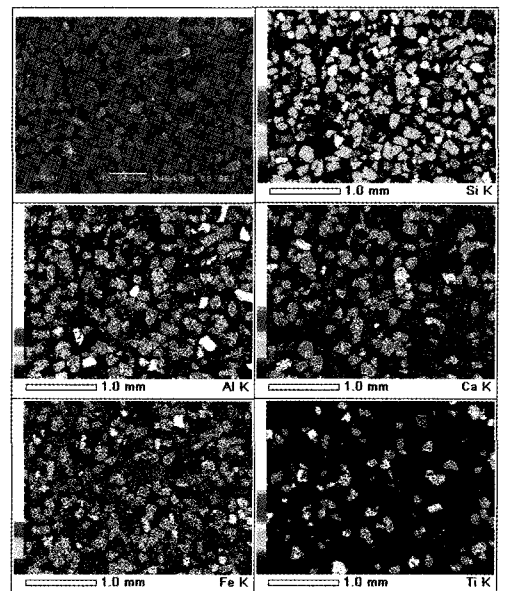


Fig. 10. SEM and mapping images of concentration after 3rd Table separation.

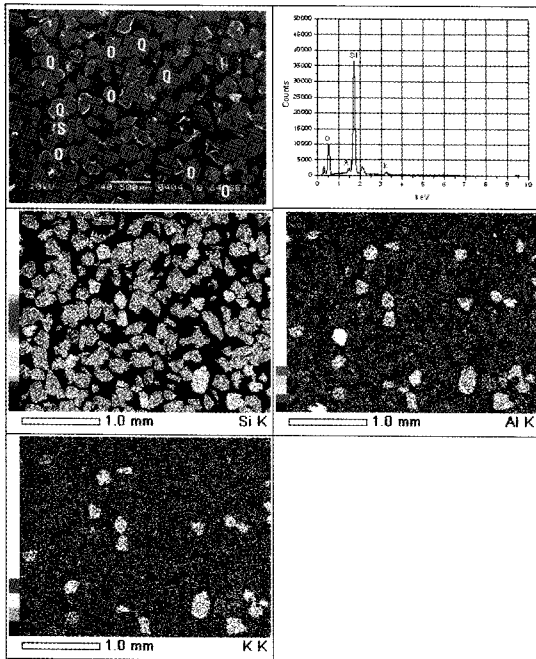


Fig. 11. SEM and mapping images of tail after 1st Table separation.

13e)에는 무색의 전형적인 주와 양추가 결합된 취형으로 존재하며, 대체로 양호한 원마도를 보여주고 있으며 입도는 0.2~0.5 mm였다. 티탄철석(그림 13f)은 주상의 형태를 가지고 있으며, 대체로 원마도가 불량하였고, 입도는 비교적 작아 0.1~0.2 mm 정도의 것이 일반적이었다. 금홍석(그림 13g)은 붉은 갈색을 띠고 있어 육안으로도 쉽게 구별되는데, 주상내지 이권트상을 보이는 것도 다수 관찰되었다. 입도는 0.2~0.3 mm였다. 규선석(그림 13h)은 흰색내지 회색으로 벽개면이 잘 발달되어 있으며, 주상의 형태를 갖고, 입도가 0.3~0.7 mm였다. 이들 주요 광물들은 원마도 및 색깔의 차이를 보임으로써 다양한 기원의 암석으로부터 유래되었음을 시사하고 있다.

화학조성에 의한 증광물 정량

X선 분말 회절분석은 수% 미만의 광물함량에 대하여는 배경치 때문에 신뢰도가 떨어지고, 주요 증광물인 모나자이트, 저어콘, 스피넬, 자철석, 적철석 및 티탄철석 등은 회절선이 미약하여 함량을 산출하기가 매우 어렵다. 따라서 X-

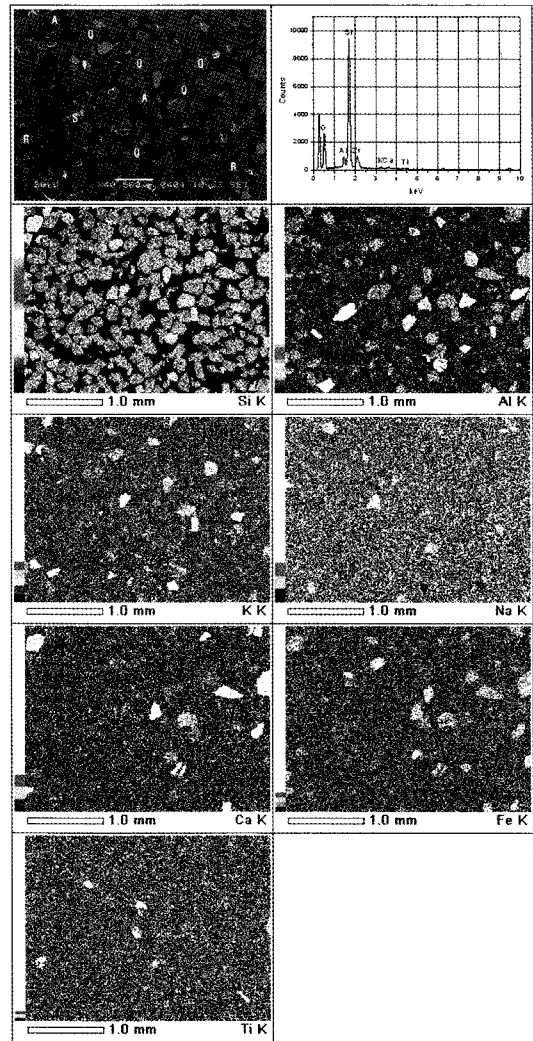


Fig. 12. SEM and mapping images of tail after 2nd Table separation.

선 분말 회절분석 자료와 화학분석 자료를 통합적으로 사용하여 광물함량을 산출하는 방법이 제시된 바 있다. 본 고에서는 장세원 외(2005)에 의해 고안된 Norm 산출원리를 이용하여 원사 및 정광의 화학조성에서 함유된 각 증광물의 증광비를 계산하였다. 분석 결과는 표 2~4에 제시하였다. 계산된 증광물의 함량은 상부, 중부 및 하부시료의 경우, 각각 0.15~72%, 0.27~78% 및 0.13~40%였으며, 농집 구간 역시 1차 Table시의 증광물군(Upper-2, Mid-2 and Lower- 2)에서 높게 나타났다.

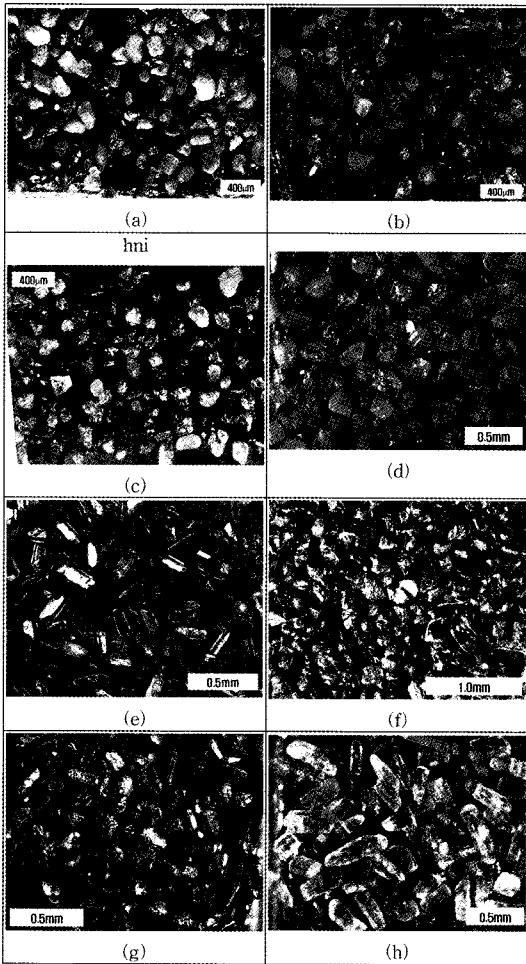


Fig. 13. Microphotographs of (a)-(c) samples separated with color of minerals, and those of (d) epidote, (e) zircon, (f) ilmenite, (g) rutile and (h) sillimanite separated by hand picking.

결 론

전라남도 신안군 자은도의 둔장해수욕장 해변으로부터 채취한 해빈사로부터 중광물 회수 공정을 실시하여, 중광물의 특징 및 회수 가능성에 대한 연구를 수행하였다. 시료는 깊이별로 상부, 중부 및 하부시료로 구분하여 채취한 뒤 각각에 대하여 spiral separation을 실시하여 얻은 중광물군을 초기물질로 3차에 걸친 중광물 선별작업을 실시하였다.

초기물질의 광물조성은 석영, 정장석, 엘바이트, 백운모, 보통각섬석, 티탄철석 및 녹염석 등

이었다. 1차 Table separation을 통한 선별공정에서 얻은 상부, 중부 및 하부시료의 중광물군의 경우, 중광물로는 티탄철석, 저어콘 및 금홍석이 공통적으로 배태하고 있었고, 그밖에 상부시료의 경우에는 모나자이트가, 중부시료의 경우에는 모나자이트와 일부 제노타임, 그리고 하부시료의 경우에는 아나타제가 포함되어 있었다.

1차 Table separation에서 얻은 중간시료에 함유한 중광물을 회수하기 위한 2차 Table separation 선별공정을 실시한 결과, 티탄철석, 금홍석, 또는 아나타제 등 중광물들이 관찰되었다. 이들 중광물들은 맥석광물인 석영, 정장석, 알바이트, 보통각섬석, 녹염석 또는 백운모와 공존하지는 않지만 3차 Table separation을 실시한 후에 보다 농집되는 경향을 보였다.

수선을 통한 중광물의 선별을 실시한 결과, 각 중광물의 다양한 원마도 및 색깔을 보임으로써, 배태된 중광물들이 다양한 성인에 의해 형성되었음을 시사하고 있다.

사 사

본 연구는 해양수산부의 연구개발과제인 “해수/해사 중 유용광물 회수기술 개발”의 일환으로 수행되었다. 이에 깊은 사의를 표한다.

참고문헌

- 김승우, 장정해 (1979) 목포-청산도간 연근해저 퇴적물조사, 조사연구보고, 제 5호, 자원개발연구소, p. 5-44.
- 김승우, 장정해, 정송수, 조규장, 김철민, 박관순, 김원식, 신원철, 박근필 (1980) 서해남부 해저퇴적물 연구(흑산도-자은도간), KIGAM Bulletin-11, 자원개발연구소, 24p.
- 양재열, 현전기, 민중기 (1969) 자은도 해변사에 대한 선광시험, 선광시험연구보고 제 2호, 국립광업연구소, p. 181-211.
- 이윤오 (1979) 전남 신안군 일대 사개도서(자은도, 비금도, 우이도, 도초도) 사광자원조사, 조사연구보고, 제 5호, 자원개발연구소, p. 45-84.
- 장세원, 김완태, 최현수, 신희영, 이재천 (2005) 화학조성과 X-선 회절자료를 병용한 해사 정광의 광물정량, KIGAM Bulletin, 9, p. 17-34.
- Buckley, R. (2007) Heavy Mineral Sand, Mineral Notes, State of Victoria, Department of Primary

Table 2. Chemical composition, Mineralogical contents (wt%) of raw sand and each concentrates, calculated from the combined method of norm and SIROQUANT

	Upper Part								
	RAW	S-9	Upper-C	S-15	S-14	S-13	S-10	S-11	S-12
	Upper-0	Upper-1	Upper-2	Upper-3	Upper-4	Upper-5	Upper-6	Upper-7	Upper-8
SiO2(%)	93.2	82.8	11.4	67.5	56.3	53.8	94.5	89.6	83.9
TiO2(%)	0.35	1.7	31	4.87	7.14	8.62	0.12	0.38	0.85
Al2O3(%)	2.58	7.82	3.85	10.2	14.3	14.9	2.58	5.99	7.82
Fe2O3(%)	0.75	1.9	8.1	4.1	5.59	6.11	0.45	1	1.79
FeO(%)	0.14	0.97	22.7	1.61	2.28	2.07	0.02	0.02	0.19
MnO(%)	0.02	0.09	1.31	0.18	0.26	0.26	0.01	0.01	0.02
MgO(%)	0.06	0.33	0.5	0.89	1.23	1.27	0.17	0.26	0.45
CaO(%)	0.2	1.51	1.82	4.79	6.89	7.78	0.15	0.31	1.05
Na2O(%)	0.29	0.71	0.04	0.45	0.44	0.4	0.27	0.47	0.59
K2O(%)	1.21	1.53	0.09	1.01	0.88	0.8	0.99	1.23	1.36
P2O5(%)	0.017	0.043	0.58	0.023	0.025	0.018	0.011	0.013	0.016
SrO(%)	0.0053	0.015	0.012	0.031	0.044	0.049	0.0039	0.0079	0.011
BaO(%)	0.012	0.011	0.011	0.0086	0.013	0.016	0.0068	0.0037	0.021
NiO(%)	0.0005	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001
Cr2O3(%)	0.001	0.002	0.046	0.006	0.011	0.008	0.001	0.001	0.001
ZrO(%)	0.036	0.18	10.5	0.2	0.25	0.26	0.015	0.026	0.04
V2O5(%)	0.03	0.13	3.45	0.3	0.41	0.46	0.019	0.5	0.098
Nb2O5(%)	0.0094	0.011	0.12	0.087	0.093	0.094	0.0089	0.009	0.082
La2O3(%)	0.0014	0.0086	0.32	0.0078	0.01	0.012	0.0006	0.0013	0.0019
Ce2O3(%)	0.0025	0.02	0.65	0.016	0.021	0.024	0.0007	0.0021	0.0035
Y2O3(%)	0.0001	0.0024	0.042	0.0041	0.0053	0.0061	< 0.0001	0.0001	0.0006
HfO2(%)	<0.01	<0.01	0.17	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
ThO2(%)	0.001	0.009	0.206	0.007	0.008	0.009	0.000	0.001	0.001
LOI(%)	0.34	0.75	0	1.53	1.27	1.34	0.37	0.64	0.86
SUM	99.26	100.54	96.92	97.82	97.47	98.31	99.70	100.48	99.16
SIROQUANT Results									
QUARTZ	90.98	69.62	27.96	55.48	38.04	33.86	93.17	90.50	84.57
ALBITE	3.48	8.44	0.00	6.61	7.97	5.33	3.29	5.28	3.26
ORTHOCLASE	4.97	7.76	0.00	2.61	0.00	0.00	3.39	3.78	3.26
HORNBLLENDE	0.00	6.59	0.00	13.03	10.85	13.26	0.00	0.00	0.00
MUSCOVITE	0.00	4.56	0.00	15.36	9.03	7.74	0.00	0.00	7.81
EPIDOTE	0.00	0.00	0.00	0.00	24.11	28.54	0.00	0.00	0.00
subtotal	99.43	96.96	27.96	93.08	90.01	88.72	99.85	99.56	98.91
Norm Results									
ILMENITE	0.33	2.18	50.63	3.61	5.13	4.68	0.03	0.02	0.36
ZIRCON	0.05	0.27	15.62	0.3	0.37	0.39	0.02	0.04	0.06
MONAZITE	0.01	0.04	1.46	0.04	0.05	0.06	0.00	0.01	0.01
RUTILE	0.18	0.55	4.33	2.97	4.44	6.15	0.10	0.37	0.66
subtotal	0.57	3.04	72.04	6.92	9.99	11.28	0.15	0.44	1.09
total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Table 3. Chemical composition, Mineralogical contents (wt%) of raw sand and each concentrates, calculated from the combined method of norm and SIROQUANT

	Middle Part								
	RAW	S-16	Mid-C	S-22	S-21	S-20	S-17	S-18	S-19
	Mid-0	Mid-1	Mid-2	Mid-3	Mid-4	Mid-5	Mid-6	Mid-7	Mid-8
SiO2(%)	93.5	71.8	7.58	58.8	48.2	44.3	93.4	86.6	78.7
TiO2(%)	0.22	6.07	34.7	6.71	9.12	11.3	0.18	0.62	1.68
Al2O3(%)	3.03	7.37	2.89	15.9	14.5	15.8	3.88	7.28	9.89
Fe2O3(%)	0.5	3.29	8.1	4.82	6.21	7.36	0.48	1.32	2.19
FeO(%)	0.04	2.58	24.5	2.67	3.68	4.18	0.06	0.2	0.47
MnO(%)	0.01	0.23	1.42	0.26	0.37	0.47	0.006	0.02	0.05
MgO(%)	0.08	0.69	0.52	1.14	1.36	1.54	0.14	0.42	0.84
CaO(%)	0.29	3.51	0.97	5.99	8.55	9.81	0.2	0.91	1.88
Na2O(%)	0.28	0.6	0.03	0.43	0.39	0.31	0.29	0.52	0.65
K2O(%)	1.3	0.93	0.08	0.91	0.75	0.56	0.95	1.21	1.28
P2O5(%)	0.011	0.032	0.4	0.017	0.013	0.023	0.011	0.014	0.018
SrO(%)	0.0055	0.023	0.0081	0.04	0.052	0.056	0.0041	0.0079	0.014
BaO(%)	0.011	0.023	0.0056	0.012	0.013	0.012	0.022	0.0051	0.012
NiO(%)	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001
Cr2O3(%)	0.001	0.006	0.053	0.007	0.010	0.011	0.001	0.002	0.003
ZrO(%)	0.021	0.23	11.1	0.25	0.32	0.4	0.015	0.031	0.054
V2O5(%)	0.021	0.61	3.32	0.37	0.52	0.55	0.025	0.076	0.2
Nb2O5(%)	0.0087	0.089	0.12	0.094	0.097	0.094	0.0088	0.0095	0.084
La2O3(%)	0.0008	0.02	0.29	0.0095	0.012	0.013	0.0008	0.0016	0.0027
Ce2O3(%)	0.0011	0.041	0.58	0.02	0.026	0.031	0.0011	0.0028	0.0049
Y2O3(%)	< 0.0001	0.0049	0.029	0.0055	0.0073	0.0068	< 0.001	0.0003	0.0015
HfO2(%)	<0.01	<0.01	0.18	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
ThO2(%)	0.001	0.016	0.167	0.008	0.009	0.011	0.000	0.001	0.001
LOI(%)	0.35	0.51	0	1	1.13	0.68	0.36	0.7	1.06
SUM	99.68	98.68	97.04	99.46	95.34	97.52	100.04	99.95	99.09
SIROQUANT Results									
QUARTZ	88.56	63.73	21.75	49.45	38.65	19.27	89.01	80.29	69.74
ALBITE	4.39	3.71	0.00	3.79	6.29	10.18	2.49	5.49	4.71
ORTHOCLASE	6.78	4.17	0.00	4.42	0.00	0.00	3.39	4.19	4.12
HORNBLLENDE	0.00	5.01	0.00	9.84	9.83	7.90	0.00	0.00	6.87
MUSCOVITE	0.00	5.47	0.00	6.86	5.61	3.66	4.88	6.68	7.26
EPIDOTE	0.00	8.81	0.00	14.62	26.36	42.88	0.00	2.59	5.30
CHLORITE	0.00	0.00	0.00	1.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
subtotal	99.73	90.91	21.75	90.32	86.74	83.89	99.78	99.24	97.99
Norm Results									
ILMENITE	0.05	5.45	54.4	5.39	7.6	8.75	0.04	0.17	0.51
ZIRCON	0.03	0.34	16.51	0.37	0.48	0.6	0.02	0.05	0.08
MONAZITE	0.00	0.10	1.29	0.05	0.07	0.07	0	0.01	0.01
RUTILE	0.19	3.20	6.05	3.87	5.11	6.69	0.16	0.53	1.41
subtotal	0.27	9.09	78.25	9.68	13.26	16.11	0.22	0.76	2.01
total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Table 4. Chemical composition, Mineralogical contents (wt%) of raw sand and each concentrates, calculated from the combined method of norm and SIROQUANT

	Lower Part								
	RAW	S-1	Lower-C	S-7	S-6	S-5	S-2	S-3	S-4
	Lower-0	Lower-1	Lower-2	Lower-3	Lower-4	Lower-5	Lower-6	Lower-7	Lower-8
SiO2(%)	88.4	87.4	26	84.7	83.3	81.5	90.6	90.3	88.8
TiO2(%)	0.12	0.42	19.3	0.53	0.65	0.87	0.06	0.085	0.13
Al2O3(%)	5.48	5.72	11.3	7.41	7.56	8.13	4.64	4.9	5.25
Fe2O3(%)	0.79	1.27	10.3	1.84	1.98	2.46	0.68	0.91	1.2
FeO(%)	0.06	0.2	11.3	0.27	0.41	0.49	0.03	0.03	0.01
MnO(%)	0.01	0.03	0.95	0.04	0.04	0.06	0.01	0.01	0.01
MgO(%)	0.12	0.24	1.49	0.5	0.66	0.82	0.17	0.2	0.48
CaO(%)	0.37	0.51	8.21	0.91	1.2	1.36	<0.01	<0.01	0.06
Na2O(%)	0.83	0.78	0.14	0.94	1	0.96	0.69	0.78	0.82
K2O(%)	2.41	1.93	0.28	1.83	1.78	1.72	1.99	1.81	1.75
P2O5(%)	0.02	0.026	0.4	0.037	0.039	0.048	0.017	0.018	0.02
SrO(%)	0.0077	0.0087	0.039	0.01	0.011	0.012	0.0058	0.0067	0.0068
BaO(%)	0.012	0.0076	0.017	0.0091	0.0085	0.011	0.0075	0.0061	0.0083
NiO(%)	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000
Cr2O3(%)	0.001	0.001	0.029	0.002	0.003	0.003	0.001	0.001	0.001
ZrO(%)	0.025	0.057	5.4	0.058	0.065	0.079	0.025	0.022	0.023
V2O5(%)	0.025	0.057	1.61	0.085	0.11	0.13	0.022	0.028	0.039
Nb2O5(%)	0.0085	0.0088	0.11	0.0088	0.0094	0.01	0.0086	0.0083	0.0086
La2O3(%)	0.0041	0.0059	0.17	0.0062	0.0067	0.0072	0.0035	0.0039	0.0042
Ce2O3(%)	0.0006	0.0063	0.26	0.0058	0.007	0.0085	0.0022	0.0025	0.0029
Y2O3(%)	< 0.0001	0.0005	0.03	0.0008	0.0012	0.0012	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
HfO2(%)	<0.01	<0.01	0.12	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
ThO2(%)	0.000	0.001	0.085	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000
LOI(%)	0.88	0.74	0	0.84	1.04	1.05	0.52	0.66	0.76
SUM	99.57	99.42	97.54	100.03	99.88	99.73	99.48	99.78	99.38
SIROQUANT Results									
QUARTZ	87.01	72.70	9.52	70.60	66.44	63.07	80.89	81.29	81.85
ALBITE	3.19	7.74	8.07	7.92	12.46	11.14	8.79	4.99	6.49
ORTHOCLASE	9.58	6.35	0.00	4.75	5.83	3.25	10.19	6.69	5.09
HORNBLLENDE	0.00	4.96	21.63	7.23	4.84	8.67	0.00	0.00	0.00
MUSCOVITE	0.00	7.54	0.00	8.61	9.29	12.42	0.00	6.89	6.39
EPIDOTE	0.00	0.00	20.73	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
subtotal	99.78	99.28	59.95	99.12	98.87	98.55	99.87	99.86	99.82
Norm Results									
ILMENITE	0.11	0.42	25.46	0.51	0.76	0.93	0.04	0.03	0.02
ZIRCON	0.04	0.08	8.03	0.09	0.10	0.12	0.04	0.03	0.03
MONAZITE	0.01	0.02	0.67	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
RUTILE	0.06	0.20	5.89	0.26	0.25	0.38	0.04	0.07	0.12
subtotal	0.22	0.72	40.05	0.88	1.13	1.45	0.13	0.14	0.18
total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Industries, p. 1.

Bryan, I., Harding, D., Scott, I. and Hondros, J.
(2006) Innovation road maps for Victoria's Earth
Resources, Final Report, the STEM Partnership

Pty Ltd, 144p.

2007년 12월 10일 원고접수, 2007년 12월 17일 게재승인.