

## 국내 해빈사로부터 유용광물 회수기술 개발 동향

김완태 · 신희영 · 권성원

한국지질자원연구원 자원활용소재연구부

육상 광물자원의 점진적 고갈로 인하여 세계 각국은 오래전부터 해빈 및 해저에 부존하는 해양 광물자원의 개발을 위한 조사와 연구를 수행하여 왔다. 천연 광물자원이 절대적으로 부족한 우리나라의 경우에도 이미 오래전부터 공해 및 배타적 경제수역에 부존하는 해양 광물자원의 개발에 대한 관심이 높았으며, 최근에 들어서는 망간단괴, 가스하이드레이트와 같은 해양자원의 탐사, 개발 및 활용을 위한 연구 활동을 더욱 활발히 진행하고 있다.

한편으로 원료 및 에너지원의 수급과 관련하여 대부분을 해외에 의존할 수밖에 없는 우리나라의 실정에서는 국제 정세 및 금융시장의 불안과 국제 원유가의 상승 등과 같은 불안 요인이 우리 경제에 커다란 위협 요인으로 작용하고 있음을 부인할 수 없다. 이러한 국제 정세의 불안이 결국은 국제 광물시장의 가격 상승을 유발시키는 과거의 예를 고려할 때, 연근해 및 해빈에 부존하는 광물자원에 대한 조사와 활용을 위한 연구는 국제 수지의 악화와 육상 광물자원의 고갈에 대비한 장기적인 국가 정책수립의 일환으로 지속적으로 수행되어야 할 과제로 인식되고 있다.

그동안 우리나라는 사회간접 시설의 확충과 소재 산업에 필요한 원료의 안정적인 공급을 목표로 1970년대 말부터 서·남해안 해빈에 대한 해

양지질학 및 광물학적 연구를 수행한 바 있으며, 1980년대 이후에는 연안 해역 기본 조사 및 해저 지질도 발간 사업, 유용 광물의 품위 및 부존량이 높을 것으로 예상되는 지역에 대한 광물자원 조사 사업 등을 수행한 바 있다. 특히 최근에는 배타적 경제 수역에 부존하는 광물자원의 탐사 활동뿐만 아니라 태평양과 같은 공해상에서의 해양 광물자원 탐사 및 연구 활동을 활발히 수행하고 있어 국가의 미래 자원 확보와 동시에 차세대 국가 자원 정책 수립의 기초 자료로 활용하고 있다. 그러나 그동안 보고되어진 결과를 보면 우리나라의 해빈 및 천해저에 부존되어 있는 유용 광물자원은 육상 자원에 비해 그 양 및 종류가 매우 한정적이며, 개발 측면에서는 지역적 한계 및 국내외 경쟁력에 많은 어려움을 안고 있다. 우리나라의 해사에 포함되어 있는 유용 금속 광물은 주로 티탄철석(ilmenite), 저어콘(zircon), 금홍석(rutile)과 소량의 모나자이트(monazite) 등이며 비금속 광물로는 규선석(sillimanite)이 대표적이다.

우리나라 해빈에 부존하는 유용 광물자원의 조사, 회수 및 유효이용을 위한 기술개발은 최근 몇 년 동안 활발히 진행되어 왔다. 최근에는 건설용 골재 수급과 관련하여 북한산 해빈사가 수입됨에 따라 배타적 경제수역으로부터 채취되는 해사뿐만 아니라 북한산 해빈사를 대상으로

하는 처리 기술 개발에까지 연구 영역을 확대해 나가고 있다. 본 고에서는 주로 우리나라 서남 해안 해빈에 부존하는 유용 광물의 분포 및 조암특성을 소개하고, 현재 진행되고 있는 기술 개발의 내용을 전라남도 서해안 지역 해빈사의 광종별 회수 사례를 통해 살펴보고자 한다.

### 해빈사에 부존하는 유용 광물의 용도 및 광물학적 특성

해빈사에 부존하는 티탄철석, 저어콘, 금홍석, 모나자이트 등에 함유되어 있는 티타늄, 저어콘, 세륨, 란타늄 등은 특수금속, 전자, 광통신, 항공, 우주, 원자력, 첨단화학, 특수 자성재료, 초전도 재료, 촉매재료 등 각종 첨단 산업의 원료소재로

중요한 위치를 차지하며 그 부가가치 또한 매우 높다(표 1)(Reyneke and Westhuizen, 2001). 이와 같은 광물은 비중이 석영(S.G.: 2.7g/cm<sup>3</sup>)보다 높아 일반적으로 중광물이라 칭한다. 해빈사에 부존하는 중광물을 분리, 회수하기 위해서는 우선 각각의 중광물이 가지는 고유한 광물학적 특성을 파악하여야 한다. 표 2는 해빈사의 주요 구성광물의 광물학적 또는 물리화학적 특성을 나타낸 것으로 광물이 가지는 비중, 자력 감응여부 및 감응정도, 전기적인 특성 등에 따라 고비중 및 저비중 광물, 자성 및 비자성 광물, 도체 및 부도체 광물로 각각 분류할 수 있다. 유용 광물 분리기술은 이와 같은 구성 광물이 가지는 광물학적 또는 물리화학적 특성차를 이용하는 것으로 주요 분리기술로는 체가름, 비중선별, 자력선별 및 정전선별 등이 있다.

표 1. 해빈사에 부존하는 중광물의 주요 용도

중광물	용도
티탄철석	철강공업, 석유화학, 항공산업, 무기공업
금홍석	보석, 연마재
저어콘	백색안료, 핵연료내화물, 촉매, 세라믹 원료
모나자이트	광학유리, 컨덴서, 촉매, 열전자 방사
규선석	내화재료

표 2. 해빈사 구성광물의 광물학적 특성

광물명	비중	경도	자기적 성질	전기적 성질
티탄철석(FeTiO <sub>3</sub> )	4.5~5	5~6	◎	○
금홍석(TiO <sub>2</sub> )	4.2~5.6	6~6.5	×	○
저어콘(ZrSiO <sub>4</sub> )	4~5	7.5	×	×
모나자이트(Re(PO) <sub>4</sub> )	4.8~5.5	5~5.5	○	×
규선석(Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> )	3.2	6~7	×	×
석영(SiO <sub>2</sub> )	2.6	7	×	×
녹염석(Ca <sub>2</sub> (Al,Fe) <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>12</sub> (OH))	3.3~3.5	6~7	○	×
각섬석(Ca <sub>2</sub> Mg <sub>4</sub> Al(Si <sub>7</sub> Al)O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub> )	3~3.5	5~6	○	×
백운모(KAl <sub>2</sub> (AlSi <sub>3</sub> )O <sub>10</sub> (OH,F) <sub>2</sub> )	2.8~2.9	2~2.5	×	×
조장석(NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	2.5~2.8	6~6.5	×	×
미사장석(KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	2.5~2.6	6	×	×

### 서남해안 해빈사의 중광물 분포특성

우리나라 서남해안을 경기, 충청지역과 전라 지역으로 분할하여 해빈사가 발달한 지역을 중심으로 중광물의 함량을 조사하였다. 그림 1은 경기, 충청지역 해빈사의 중광물 함량을 조사한 결과로 조사 대상 지역은 크게 강화, 서천, 태안, 보령지역 등이다. 대부분의 조사 지역에서 중광물의 함량은 약 1~3%로 비교적 중광물의 함량이 낮으나 태안군 갈음지역, 강화군 주문도 일원 및 옹진군 덕적도 인근 해저에서 채취한 시료에서는 비교적 높은 중광물 함량을 보였다.

특히 덕적도 인근 지역은 해저로부터 건설용 골재를 채취하는 지역으로 이 일대의 해사에 대한 활용 가능성은 매우 높을 것으로 판단되며 보다 상세한 조사가 요구된다.

그림 2는 전라지역 해빈사의 중광물 분포를 나타낸 것으로 대부분의 조사 지역에서 1% 미만의 중광물 함량을 보여 경기, 충청 지역보다 해빈사에 부존하는 중광물의 함량이 낮음을 알 수 있었다. 그러나 신안군 자은도 일부 지역의 해빈사는 중광물 함량이 8.4%로 조사 지역 중 가장 높은 지역으로 평가되었다.

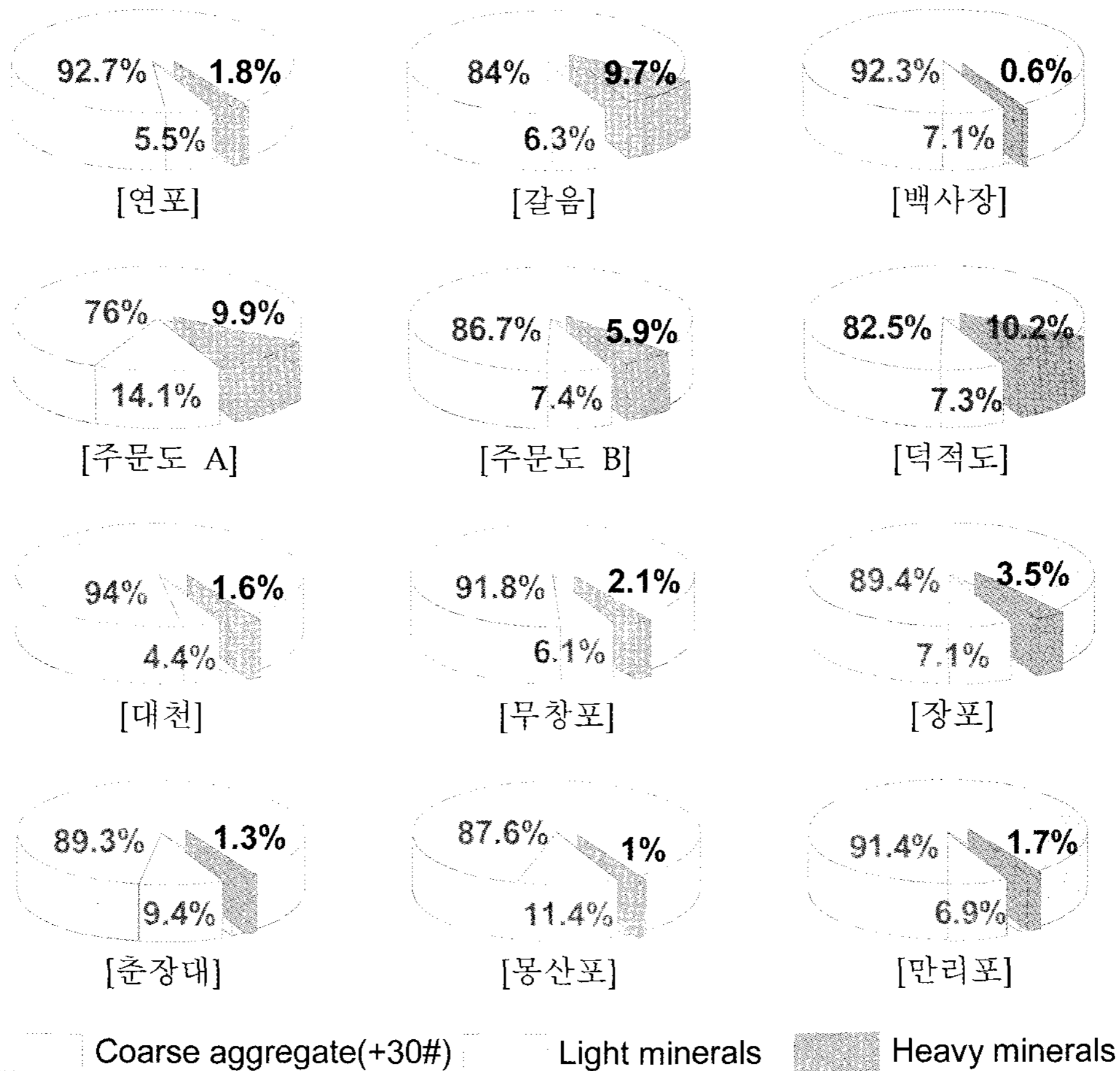


그림 1. 경기 및 충청지역 해빈사의 중광물 분포.

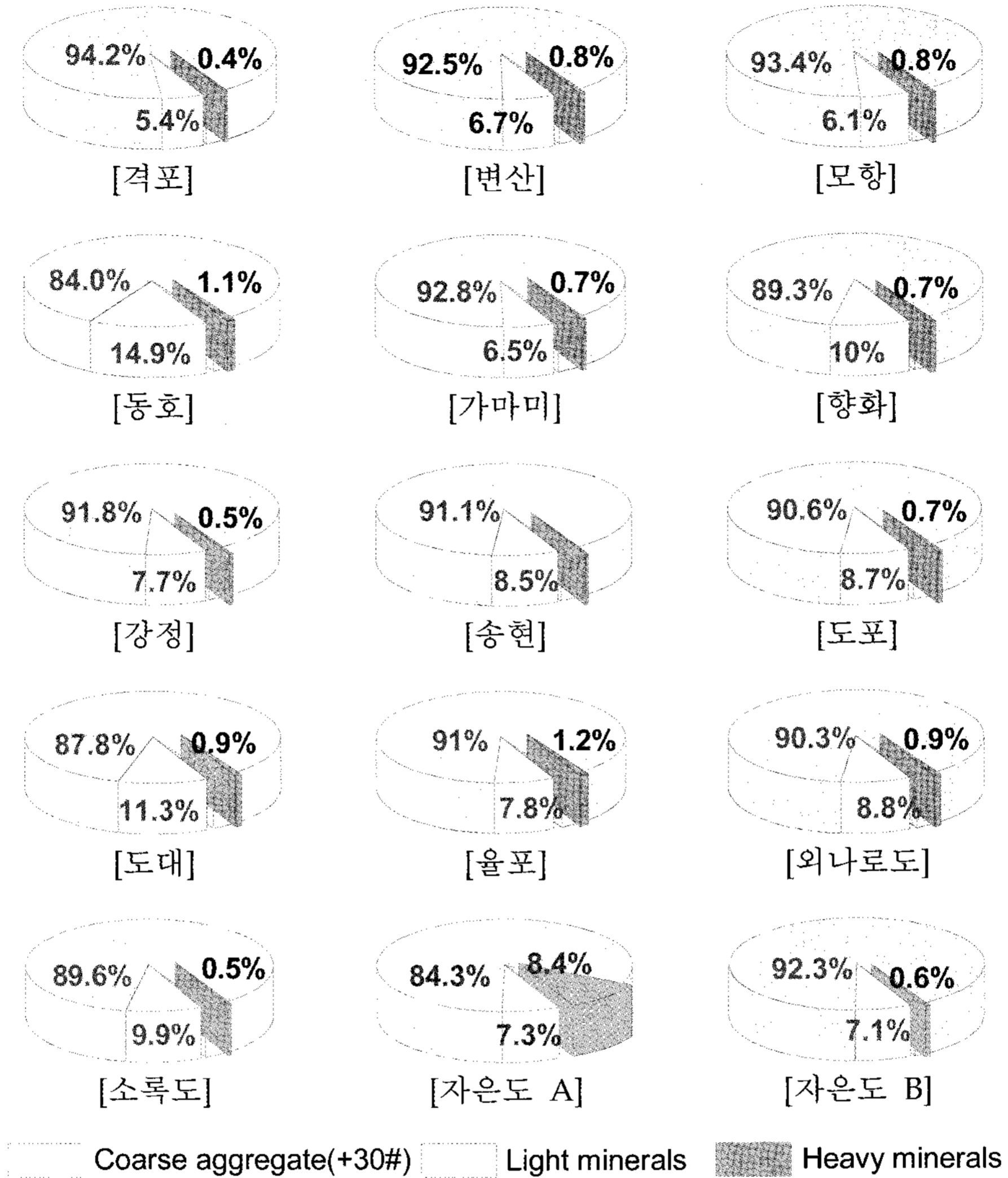


그림 2. 전라지역 해변사의 중광물 분포.

## 중광물 회수 공정의 적용

### 회수 공정의 설계 및 운용

해빈사로부터 중광물 회수를 위한 공정 확립을 위해서는 우선 채취한 해빈사로부터 유용 광종의 광종별 분리에 이르기까지 각각의 물리적 단위선별 공정을 적절히 조합하고 이를 연속적

으로 운용하는 공정제어 기술의 확립이 요구된다. 본 고에서는 전라남도 신안군 자은도 일원의 해빈사를 대상으로 유용 광종별 중광물의 회수를 위한 물리적 단위공정을 개발하고 이를 현장에 적용한 사례를 소개하고자 한다. 중광물의 광종별 분리를 위한 물리적 단위공정은 크게 비중선별, 자력선별 및 정전선별 공정으로 구분되며 공정도는 그림 3과 같다.

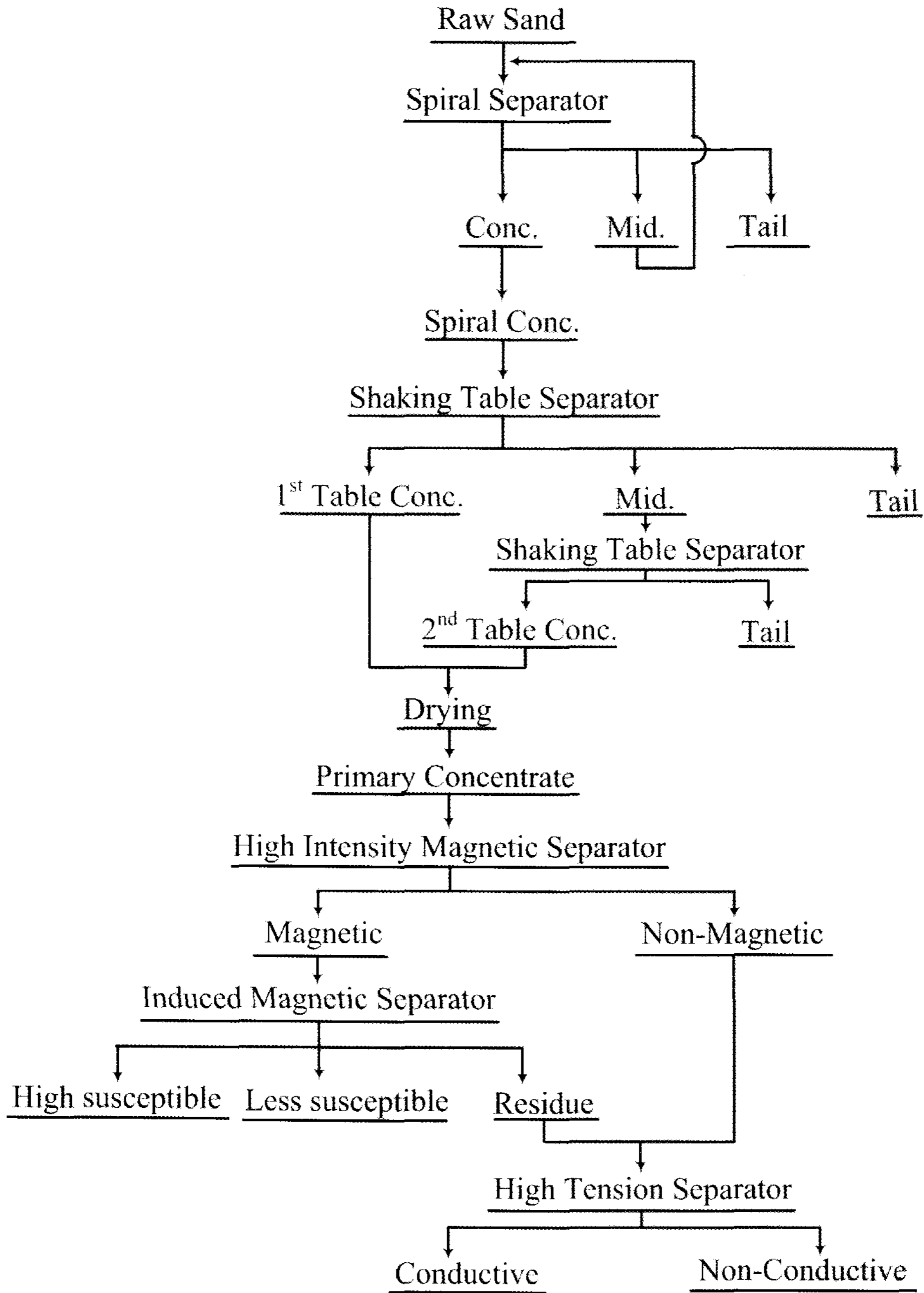


그림 3. 자은도 해빈사의 처리 공정도.

비중선별 공정은 채취한 해빈사로부터 스파이럴 선별기(Spiral separator)를 이용한 1차 정광 제조(그림 4)와 요동테이블 선별기(Shaking

table separator)을 이용하여 1차 정광의 농축을 통해 비중정광을 제조하는 공정으로 구성된다. 비중선별을 통해 회수된 정광은 건조 과

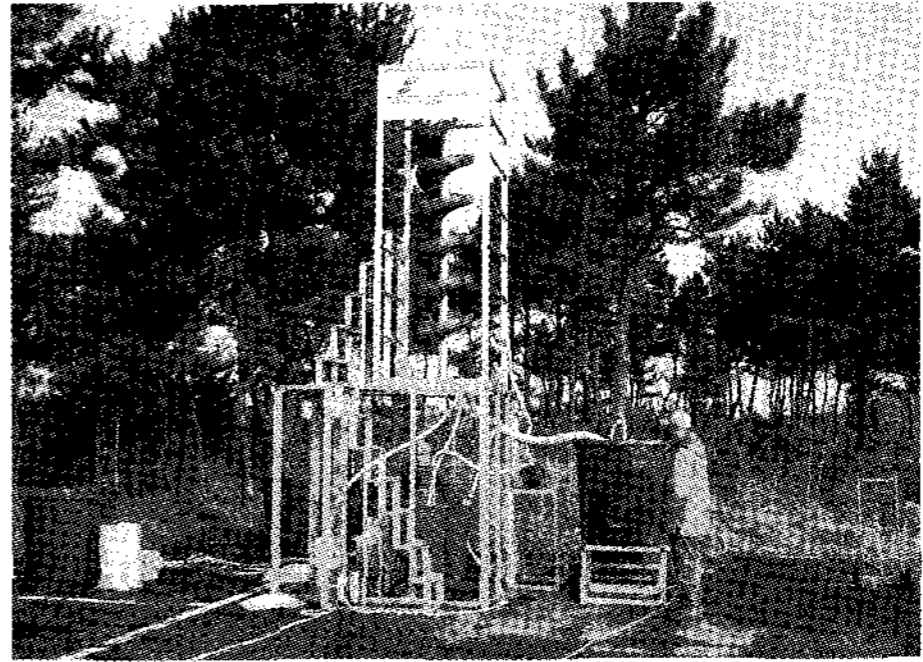
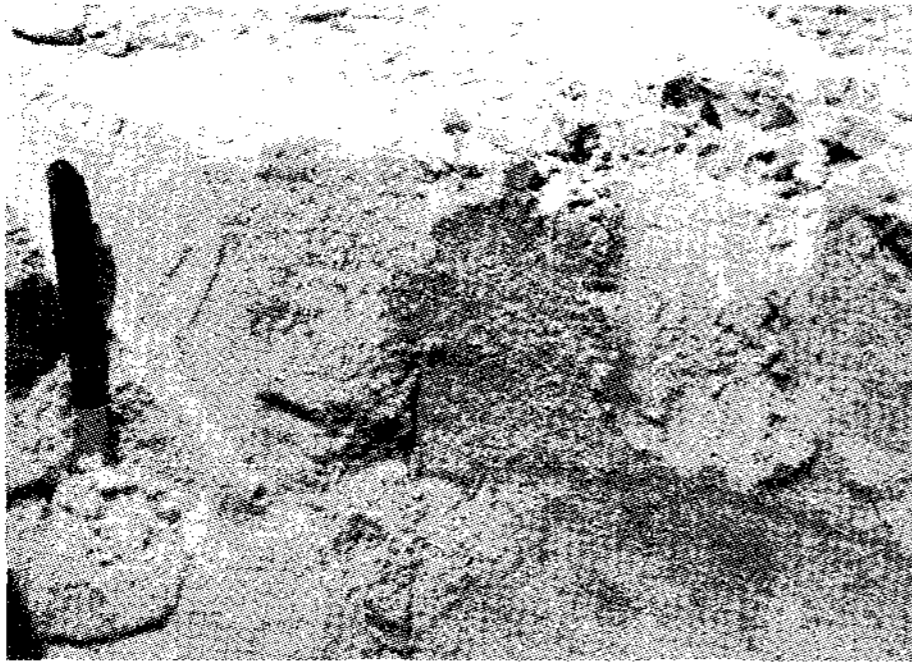


그림 4. 자은도 해빈사 및 비중선별(스파이럴) 장치의 현장 적용 시험.

정을 거친 후 자력선별 공정에 투입되며, 자력선별 공정은 비중정광으로부터 자성산물과 비자성산물을 우선적으로 분리하는 고밀도자력선별 공정(High-intensity magnetic separation)과 여기서 분리된 자성산물 중의 구성광물들이 가지는 각각의 자력감응력의 차이에 따라 자성산물을 다시 광종별로 분리하는 유도자력선별 공정(Induced magnetic separation)을 이용하여 자성산물을 분리하는 공정으로 이루어져 있다. 따라서 두 단계의 자력선별 공정으로부터 분리되는 산물은 각각 강자성 산물, 약자성 산물 및 비자성 산물이며, 고밀도자력선별 공정에서 분리되는 비자성 산물과 유도자력선별 공정에서 분리되는 미반응 산물(Magnetic residue)을 모두 비자성 산물로 분류가능하다. 이는 유도자력선별 공정에서 분리되는 미반응 산물의 경우 구성 광물입자가 가지는 자력감응도가 상대적으로 매우 낮으며, 또한 비자성 산물의 광물학적 조성과의 유사한 경향을 보이고 있어 전체적인 중광물 회수 공정상 정전선별 공정에 동시에 투입하는 것이 타당할 것으로 판단하기 때문이다. 정전선별(Electrostatic separation)은 각각의 구성 광물입자들이 가지는 정전기적 특성을 이용

하여 일정한 조건을 가지는 정전기장 내에서 전도체(Conductive)와 비전도체(Non-conductive) 입자를 분리하는 방식으로 본 공정에서는 코로나 방전형 정선선별기의 적용을 고려하였다.

### 자은도 해빈사의 중광물 함량 및 분포 특성

일반적으로 우리나라 해안 및 천해저에 부존하는 해빈사는 지역에 따라 다소 차이를 보이고 있으나, 주로 석영, 장석류 및 운모류 광물이 대부분을 차지하며 소량의 회수 가능한 유용 중광물을 포함하고 있다. 그 중 유용 중광물종으로는 티탄철석, 저어콘, 금홍석, 아나타제 및 규선석 등이며, 중광물의 함량은 전체 시료 중량의 약 1.5~15.5% 정도로 심한 지역적 편차를 보인다.

중광물의 함량은 채취한 시료를 중액(Tetra-bromoethane, S.G.: 2.96) 처리한 후 건조한 중량을 기준으로 판단한 것으로 실제 회수가능한 중광물의 함량과는 다소 차이를 보인다. 자은도 해빈사는 석영으로부터 기인한 SiO<sub>2</sub>가 주를 이루고 있으며, 그 외에 약 3.3%의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량을 나타내고 있다. 이는 X선 회절분석을 통한 광물 감정으로 부터 백운모, 미사장석, 조장석 및 규선

표 3. 자은도 해빈사의 화학조성

성분	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>	Total
함량(wt%)	91.57	3.36	1.10	0.56	0.07	1.06	0.41	0.85	0.037	99.02

석에 기인한 것으로 판단할 수 있다. 또한, 중광물인 티탄철석과 금홍석과의 구성 성분인 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 TiO<sub>2</sub>는 각각 1.1% 및 0.85%로 나타났으며, 저어콘의 구성 성분인 ZrO<sub>2</sub>는 약 0.04%로 미량 존재하고 있다(표 3). 표 4는 입도별 화학조성으로 입자가 작아질수록 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 TiO<sub>2</sub>의 함량이 증가하는 경향을 보여 티탄철석 및 저어콘의 함량이 증가하고 있음을 알 수 있다. 각 입도에 따른 X선 회절분석 결과는 그림 5와 같다. 전체 입단의 약 92.4%를 차지하는 +100mesh의 경우 석영이 대부분을 이루고 있으나 -100mesh의 경

우 석영 및 규산염 광물의 상대적인 강도는 낮은 반면 각섬석, 티탄철석 및 저어콘이 상당량 존재하는 것으로 판단할 수 있다. 즉, 입자의 크기가 작아질수록 중광물의 함량이 증가하는 경향을 보이며, 저어콘의 경우는 -140mesh에 주로 분포하는 경향을 보이고 있다.

### 비중선별 공정의 적용 특성

현재 상용되고 있는 비중선별 장치는 환경친화적이며 단위시간당 처리량이 높은 스파이럴

표 4. 자은도 해빈사의 입도에 따른 화학조성

Size(mesh)	Chemical composition(wt.%)								
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>
+50	95.77	1.77	0.35	0.34	0.00	0.66	0.26	0.08	0.001
-50/+70	96.73	1.56	0.21	0.21	0.00	0.65	0.22	0.07	0.005
-70/+100	92.35	3.65	0.71	0.51	0.06	1.22	0.37	0.43	0.006
-100/+140	74.94	9.26	4.35	2.47	0.41	2.10	0.92	3.93	0.008
-140	40.98	4.91	20.30	2.30	0.58	0.59	0.56	27.36	0.128

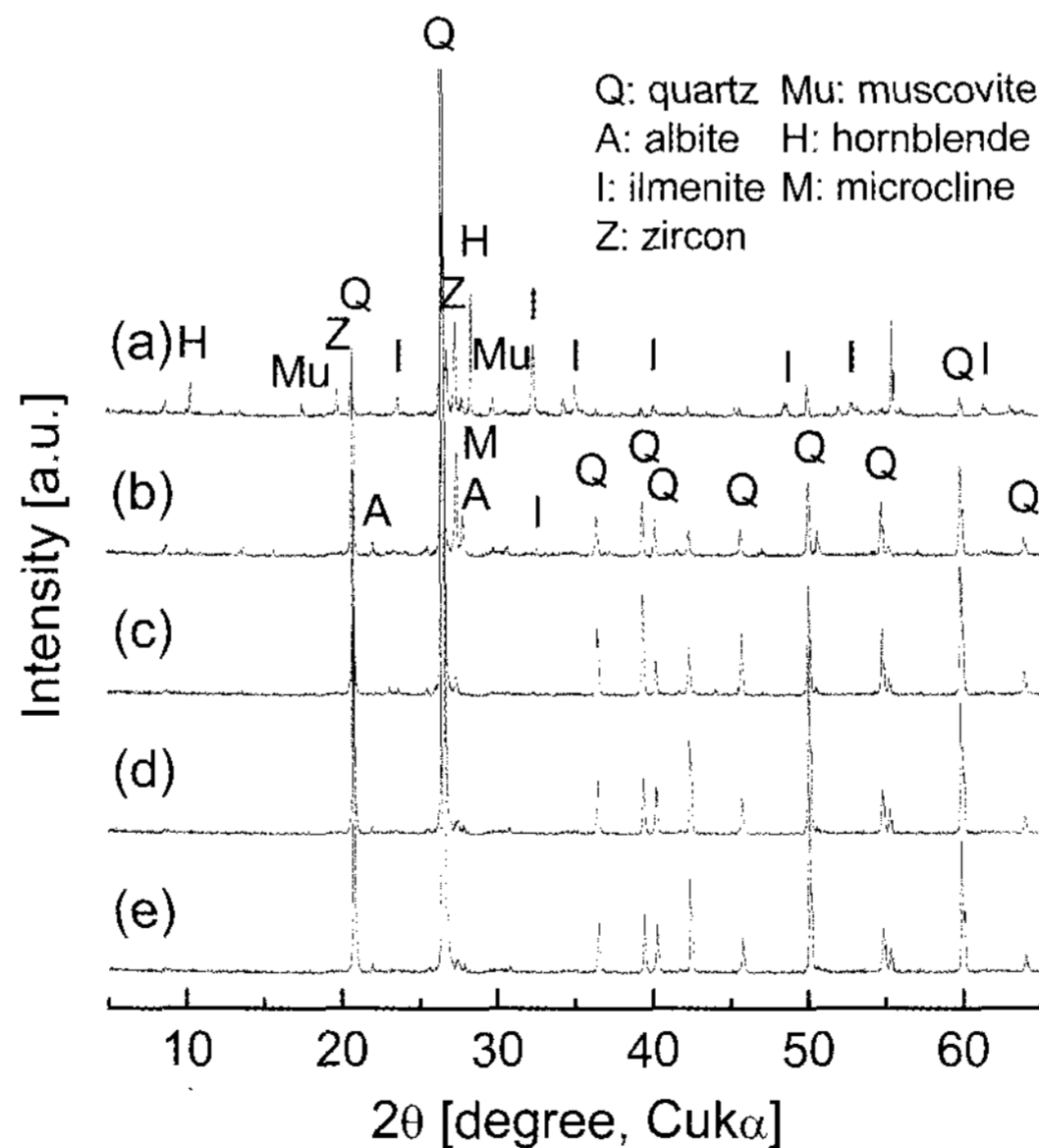


그림 5. 자은도 해빈사의 X선 회절분석((a) -140, (b) -100/+140, (c) -70/+100, (d)-50/+70, (e) +50mesh).

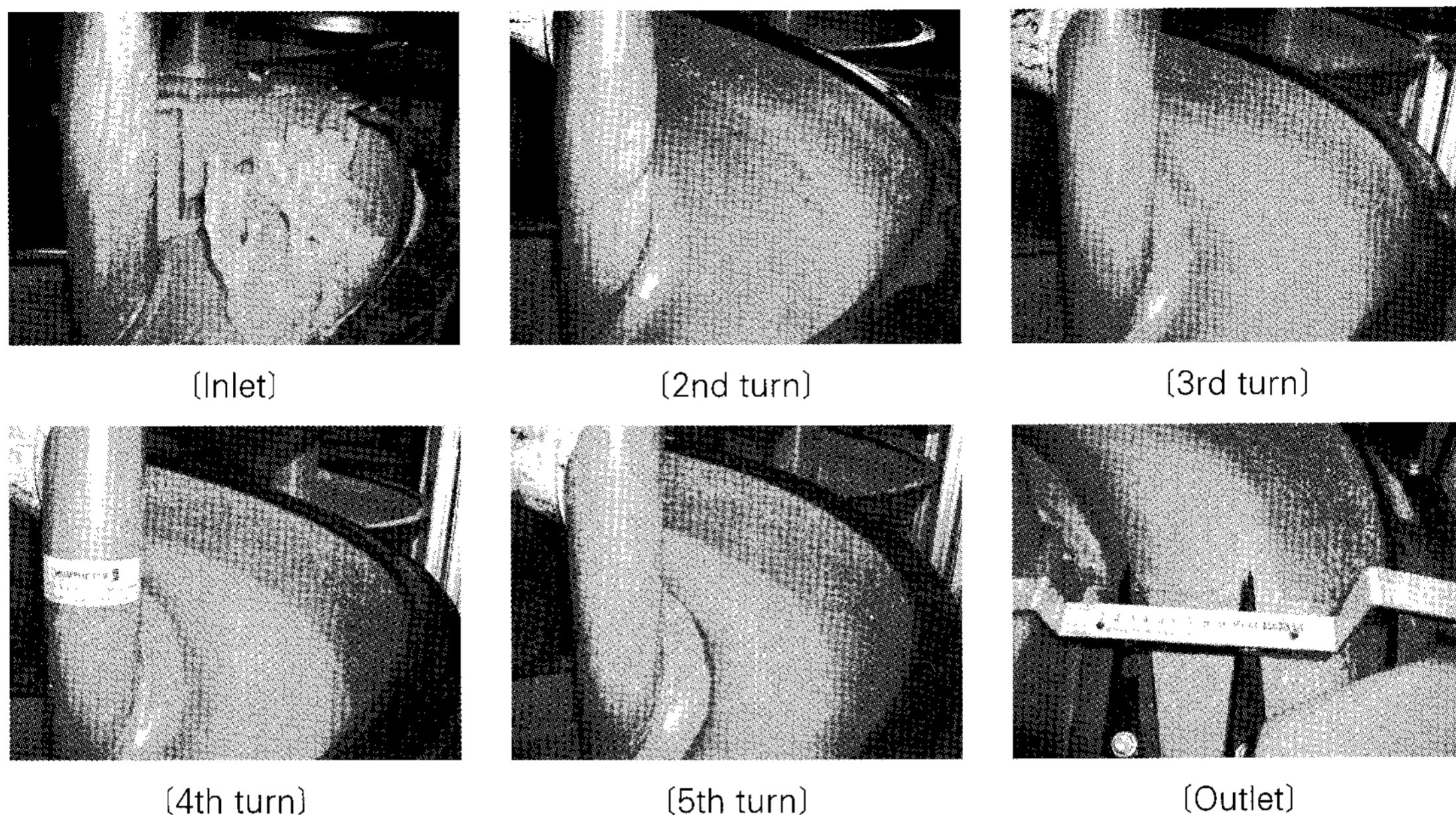


그림 6. 스파이럴을 이용한 1차 정광의 회수 공정.

선별기와 요동테이블 선별기가 주를 이루고 있다. 본 공정에서는 해빈사로부터 맥석 광물을 제거하기 용이하고 현장 적용에 적합한 스파이럴 선별기를 사용하여 1차 정광을 제조하고 요동 테이블은 1차 정광의 농축을 위해 사용한다.

그림 6은 스파이럴 선별기(Humphreys, LC3000)의 실제 운용을 보여주고 있다. 스파이럴 선별기의 현장 적용시에는 단위시간당 투입되는 수량, 시료량 및 정광 회수량을 변화시키며 적절한 운전 조건을 확보하고자 하였다(Atasoy

and Spottiswood, 1995). 그림 7은 현장에서 분리된 스파이럴 선별기의 각 산물에 대한 중액 실험 결과를 보여준다. 왼쪽은 정광, 중간은 미들링, 오른쪽은 테일의 중액 실험 결과로 선별기의 운용 조건을 제어할 수 있는 참고자료로 사용된다. 그림 8은 회수된 1차 정광으로부터 2차 비중정광을 얻기 위한 요동 테이블(Wilfely, Standard 13A) 선별기의 실제 운용을 보여주고 있다.

표 5는 비중선별 공정 운용시 회수되는 산물의 중량비 및 산물의 화학조성을 나타낸 것으로

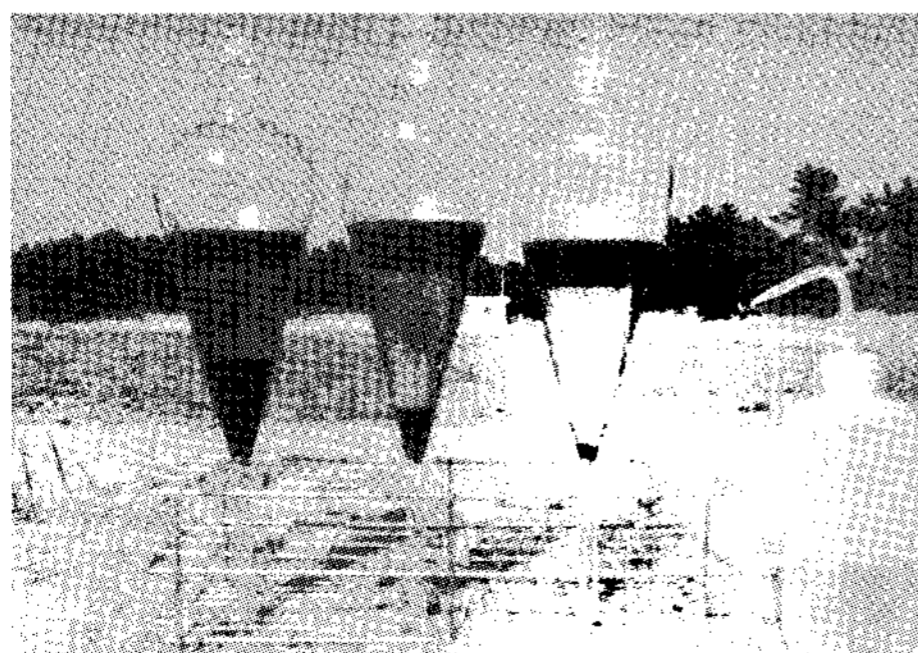


그림 7. 현장 중액 실험.

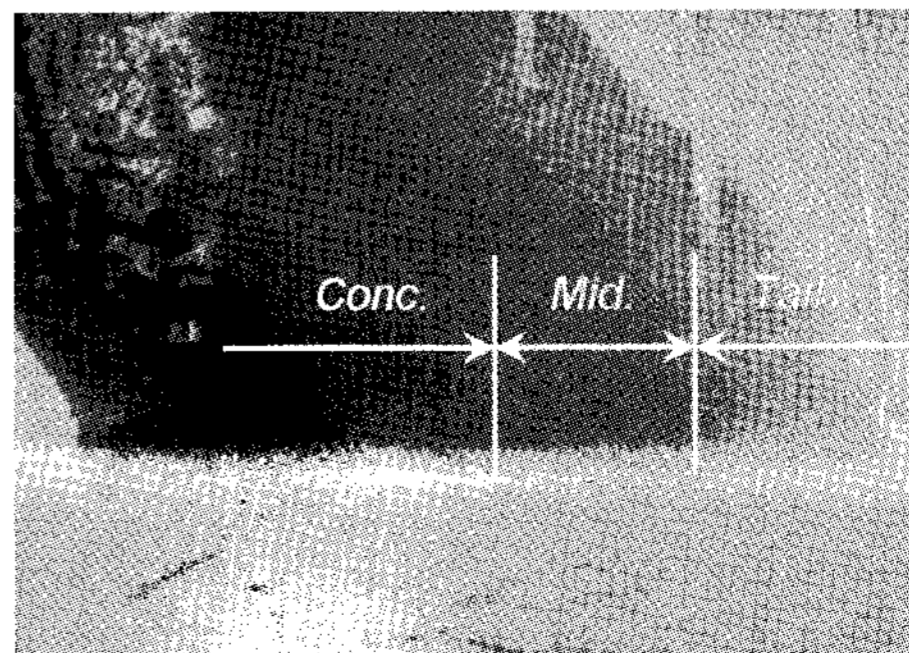


그림 8. 요동 테이블의 운용 예.



표 5. 비중 선별 공정에서 회수되는 산물의 화학조성

Product	wt(%)	Chemical composition(wt%)								
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>
As received	100.00	91.57	3.36	1.10	0.56	0.07	1.06	0.41	0.85	0.037
Feed	96.40	90.67	4.10	1.43	0.70	0.21	1.35	0.24	1.06	0.051
Spiral Conc.	22.90	62.86	11.09	8.89	4.60	0.78	1.04	0.38	9.23	0.426
Spiral Tail	73.50	94.20	3.17	0.53	0.21	0.14	1.36	0.20	0.17	0.005
Table Conc.	6.60	32.68	15.06	17.81	9.10	0.96	0.39	0.13	22.4	1.097
Table Tail	16.30	77.68	10.68	3.28	3.19	0.77	1.24	0.41	2.47	0.029

전체 시료 투입량의 약 6.6%를 최종 비중정광으로 회수하였음을 알 수 있다. 각 산물의 화학 조성의 변화를 보면, SiO<sub>2</sub>의 경우 32.7%로 크게 감소하였으며, 반면 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> 및 ZrO<sub>2</sub>의 경우는 각각 17.8%, 22.4% 및 1.1%로 증가함을 알 수 있다. 각각의 단위공정으로부터 회수되거나 제거되는 산물의 광물학적 감정 및 화학조성을 통해 회수율 및 공정의 운용 효율성 등을 평가하여야 한다.

### 자력선별 공정의 적용 특성

비중선별을 통해 회수한 정광은 고밀도 자력선별기를 이용하여 자성 및 비자성 산물을 분리한다. 고밀도 자력선별기를 사용한 결과 비중정광의 약 77.6%가 자성 산물로 분리되어 비중정광의 대부분이 자력감응력을 보이는 광물 입자로 구성되어 있음을 알 수 있다. 그림 9는 고밀도 자력선별기로부터 분리된 자성 및 비자성 산물의 X선 회절분석 결과로 자성 산물의 구성 광물은

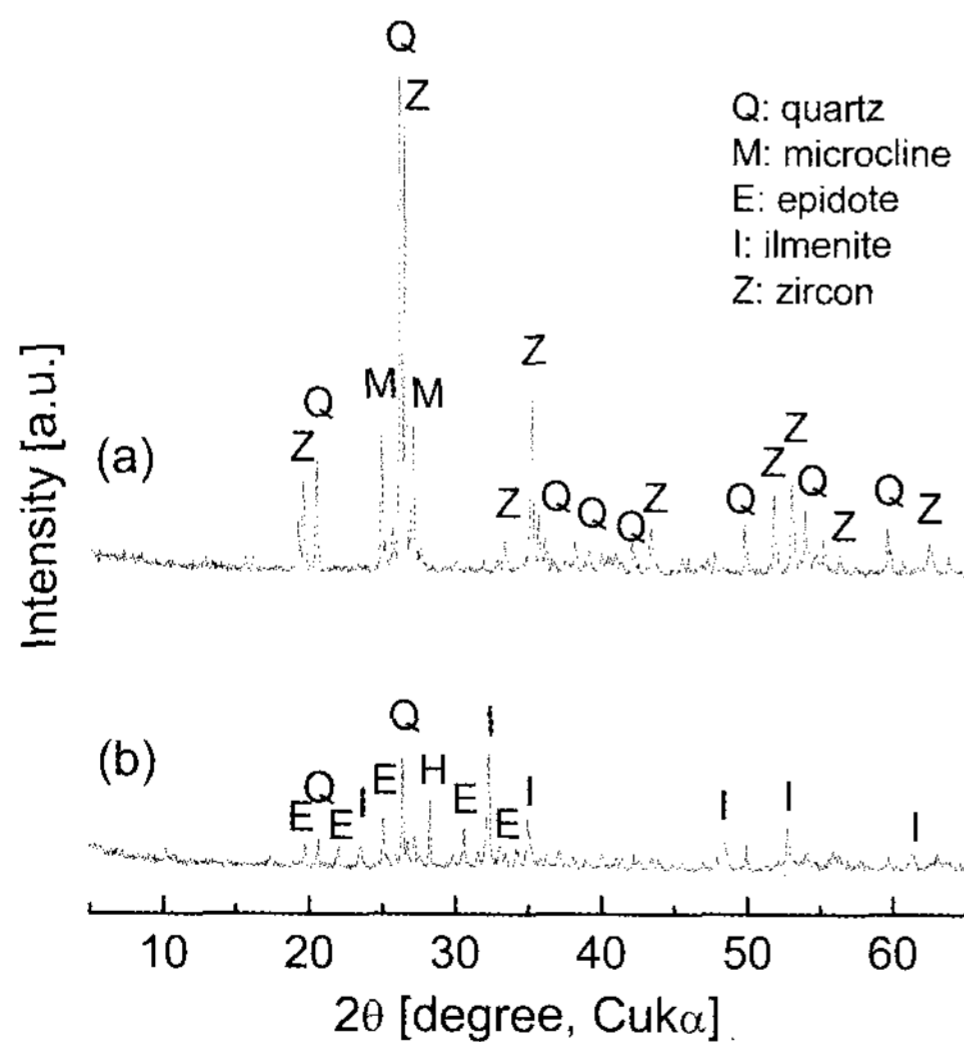


그림 9. 고밀도 자력선별기를 이용한 자성 및 비자성 산물의 분리  
(a) 비자성, (b) 자성.

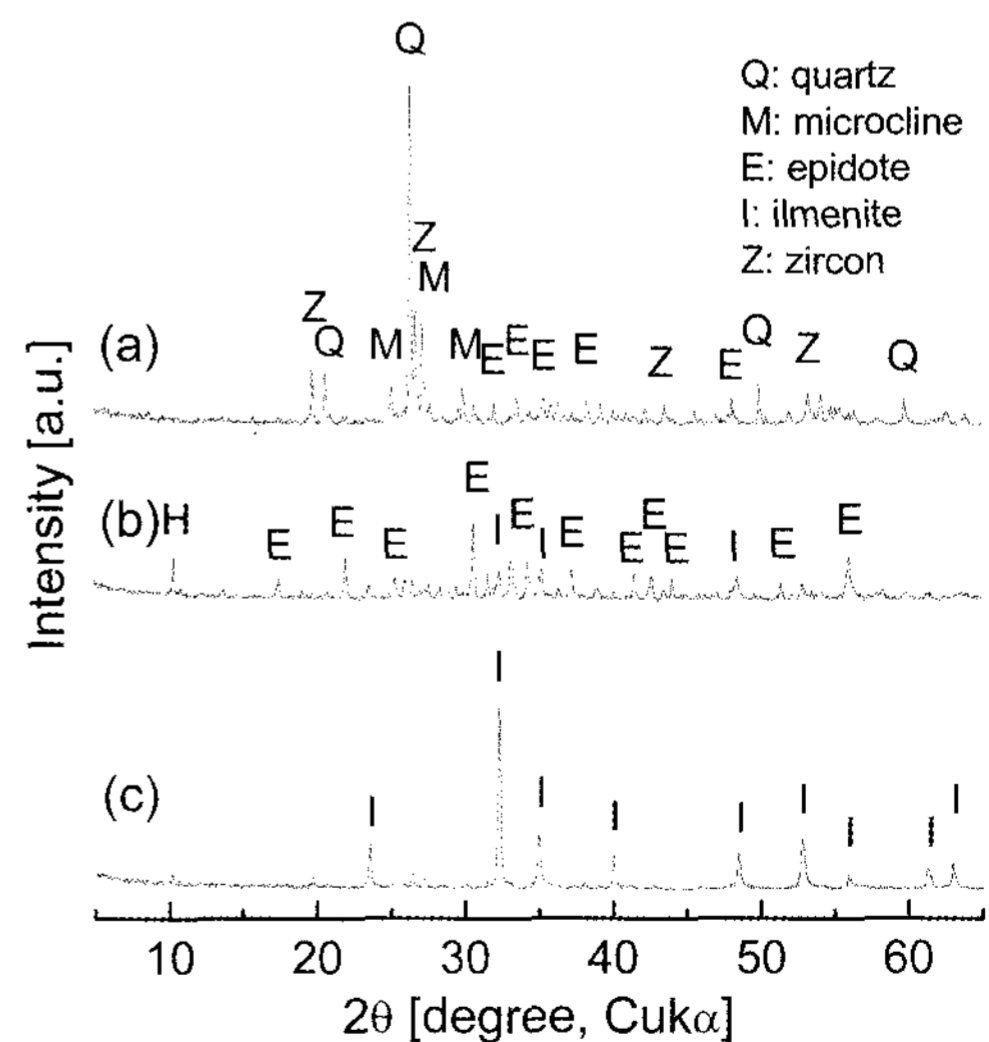


그림 10. 유도 자력선별기를 이용한강자성, 자성 및 약자성 산물의 분리  
(a) 약자성, (b) 자성, (c) 강자성.

주로 티탄철석이며 석영 및 미사장석 등이 자성 입자로 일부 분리되는 경향을 보이고 있으며, 티탄철석보다는 자력감응력이 낮은 약자성의 특성을 보이는 각섬석 및 녹염석 등이 분리됨을 알 수 있다. 석영이 자성산물로 분리되는 것은 강력한 자장을 부여하는 고밀도 자력선별기의 특성상 영구자석에 의해 형성된 높은 자기력에 의해 일부 입자가 자화되거나 또는 자성 입자에 포획되어 함께 분리되는 현상에 기인하는 것으로 판단할 수 있다(Arvidson and Henderson, 1997).

고밀도 자력선별기를 이용하여 회수한 자성 산물을 대상으로 유도자력 선별기를 이용하여 자성 입자 고유의 자력감응도에 따른 2차 자력 선별에 투입하며 그 결과는 그림 10과 같다. 유도자력 선별기에 의해 분리된 산물은 강자성 산물, 약자성 산물 및 약자성 산물이며, 약자성 산물은 실제로는 비자성 입자들로 14 Tesla 이상의 자장 세기에서도 자력감응을 보이지 않고 비자성 영역으로 분리되는 산물로 주 구성 광물은 석영과 저어콘 등이다. 이는 고밀도 자력선별기를 사용하는 경우 비자성 입자로 분리되는 산물과 유사한 광물 조성을 보인다. 자력의 세기 9Tesla에서 자성 입자로 분리되는 산물은 대부분 티탄철석이며 티탄철석과 같은 강자성 입자의 경우는 약한 자력만으로도 쉽게 자화되는 특성에 기인한다. 약자성 산물의 경우 티탄철석에 비해 자력감응도가 낮은 녹염석이 주를 이루었으며, 각섬석 및 일부 분리가 이루어지지 않았던 티탄철석이 일부 포함되어 있다.

## 결 언

정전선별 공정은 처리 가능한 광물의 종류와 입도에 대한 제한, 운전시 광물의 건조와 단체

분리 정도, 엄격한 작업 조건 및 처리 능력의 저하 등과 같은 문제를 안고 있다. 따라서 자력선별 공정에서 비자성 산물로 분리되는 저어콘(비전도성)과 루타일(전도성)의 분리에 적용 가능한 운용 조건을 도출하기 위해서는 충분한 적용 가능성 검토를 통해 전체 공정상에 도입 여부를 결정하여야 할 필요가 있다. 현재까지 진행된 해빈사로부터 유용광물 회수기술은 비중 및 자력선별을 통해 각종 유용 광물이 혼합된 형태의 중광물군의 분리 기술이며 현재는 이러한 중광물군으로부터 유용 광물의 광종별 분리기술 개발이 진행되고 있다.

## 참고문헌

- Arvidson, B. R. and Henderson, D. (1997) Rare-earth magnetic separation equipment and applications developments. *Minerals Engineering*, 10, 127-137.
- Atasoy, T. and Spottiswood, D. J. (1995) A study of particle separation in a spiral concentrator. *Minerals Engineering*, 8, 1197-1208.
- Chatterjee, A. (1998) Role of particle size in mineral processing at Tata Steel. *Int. J. Miner. Process*, 53, 1-14.
- Reyneke, L. and Van Der Westhuizen, W. G. (2001) Characterization of a heavy mineral-bearing sample from India and the relevance of intrinsic mineralogical features to mineral beneficiation. *Minerals Engineering*, 14, 1589-1600.