

생화광물(生化鑛物)과 우리 생활

Biominerals and Our Livings



글 / 朴 政 奉
(Park, Jeong Bong)
화약류관리기술사,
기술사사무소 (주)덕원엔지니어링 대표이사.
E-mail: debe5505@korea.com

Biominerals are mean of biochemical mineralization and forming for ore deposits of limestone, iron, phosphate and energy minerals, etc.

Our Country need in large quantity of biominerals, for example, about a hundred million ton of limestones, fifty million tons of iron ores, three million tons of phosphates, seven hundred million brrels of crude oil, eleven million ton of LNG and sixty million ton of coals per year.

1. 머리말

생물의 광화작용(Biomineralization)이란 생명의 생리화학적 활동이나 생물활동에 의한 경조직형성 즉, 생화광물(Biomineral)을 만들어 내는 것을 뜻한다.

여기에서 생물의 생리화학적 활동에 의해 경조직(Hard tissue)을 만들어 내는 광화작용은 조개, 산호 등과 같이 석회질골격이나 껍질을 만들어 생체적으로 성장시키는 것을 뜻하며 생물의 단순한 활동에 의해 경조직을 만들어 낸다는 것은 생물배설물 중 함유된 유·무기물에 의한 경조직형성과 남조류(藍藻類), 석회조(石灰藻) 등의 미생물이 성장 사멸하여 만들어지는 경조직을 뜻한다.

경조직(硬組織, Hard tissue)이라는 것은 기능과 형태를 갖는 세포의 집단이 굳어진 것으로 석회석, 철광석, 석탄, 백아(고령토의 일종) 등이 이에 속한다.

이러한 경조직들은 조직과 형태에 따라 생활용구, 장신구, 장식품, 의약품, 산업용 등으로 다양하게 쓰인다.

이와 같은 생물의 광화작용은 지구의 고환경(古環境), 고생물학(古生物學), 고고학(考古學), 지질학(地質學), 광물학(鑛物學), 광상학(鑛床學), 암석학(岩石學) 등 연구범위를 확대함에 따라 바이오산업 전반에 걸쳐 빼어 놓을 수 없는 근간이 된다.

2. 생물의 광화작용

생물의 광화작용연구는 세포조직학, 생리학, 생화학, 분자생물학, 광물학, 지질학, 고생물학 등 기초과학 연구에 빼놓을 수 없다.

생물의 광화작용연구는 문헌상 고대그리스의 철학자 플라톤(Platon, BC427~347)과 아리스토텔레스(Aristoteles, BC384~322)의 제자인

테오프라스트스(Theophrastus, BC371~287)가 산호(珊瑚)와 해면(海綿)생성에 대해 연구한 것이 효시라 할 수 있다.

지구상에서 현재까지 발견된 바이오미네랄(Biominerals)은 56계 생물문(生物門) 중 70여종의 생물이 생물광화작용에 의해 광물을 만들어 낸다.

영국의 생물학자 크럼베인(W.E.Krumbein)에 의하면 '바이오미네랄'은 미생물까지 포함 250종에 이른다.

〈표 1〉은 일반적으로 쓰이는 위타카(R.H. Whittaker 1969)의 분류법으로 탄산염, 인산염, 규산염 광물 순으로 분류하고 있는데 필자는 탄화물(석탄, 천연가스, 석유 등)을 포함하여 다시 분류해 보았다.

〈표 1〉 생물에 의해 만들어진 바이오미네랄 (Howenstam and Weiner, 1989과 필자분류 포함)

광물별	조류	균계	식물계	동물계	합계	비고
탄산염	13	1	3	11	28	
인산염	11	1	0	10	22	
할로겐화합물	0	0	0	4	4	
유산염	6	0	0	2	8	
규산염	10	0	6	5	21	
산화철	4	2	1	4	11	
산화망간	2	0	0	0	2	
유화물	1	0	0	0	1	
금속	0	0	0	1	1	
구연산염	0	0	1	1	2	Citric acid
수산염	2	4	7	4	17	Oxalic acid 蔞酸鹽
탄화물	0	0	6	1	7	석탄, 석유, 천연가스 포함
기타	0	0	1	2	3	
					127	

〈표 2〉 주요 생화학광물(Lowenstam and Weiner, 1989)

광종별	광물명	화학성분	비고
탄산염	Amorphous calcium carbonate	CaCO ₃	비정질탄산칼슘
	Calcite	CaCO ₃	방해석
	Aragonite	CaCO ₃	하석(霞石)
	Vaterite	CaCO ₃	
	Monohydrocalcite	CaCO ₃ · H ₂ O	일수염방해석
	Protodolomite	CaMg(CO ₃) ₂	백운석(古회석)

광종별	광물명	화학성분	비고
탄산염	Amorphous hydrous carbonate	CaCO ₃ · H ₂ O	비정질수산화석회
	Siderite	FeCO ₃	능철광
	Hydrocerussite	Pb ₃ (CO ₃) ₂ (OH) ₂	수백연광
유산염	Gypsum	CaSO ₄ · 2H ₂ O	석고
	Celestite	SrSO ₄	천청석(天靑石)
	Barite	BaSO ₄	중정석(重晶石)
	Jarosite	KFe ³⁺ ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	철명반석
규산염	Opal	SiO ₂ · nH ₂ O	담백석
산화철	Magnetite	Fe ²⁺ Fe ³⁺ O ₄	자철광
	Goethite	α-FeO(OH)	침철광
	Lepidocrocite	γ-FeO(OH)	인섬석(鱗鐵石)
	Ferrihydrite	5Fe ₂ O ₃ · 9H ₂ O	
	Amorphous iron oxide	FeO	비정질산화철
산화망간	Amorphous ilmenite	FeTiO ₃	비정질타타철광
	Todorokite	(Mn ²⁺ Ca, Mg)Mn ⁴⁺ O ₇ · H ₂ O	광석(礬石)
인산염	Bernesite	Na ₃ Mn ₁₀ O ₂₇ · 9H ₂ O	
	Hydroxyapatite	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH)	함수인회석
	Octacalcium phosphate	Ca ₈ H ₂ (PO ₄) ₆ · 5H ₂ O	
	Francolite	Ca ₅ (PO ₄) ₃ F	탄산인회석
	Dahlite	Ca ₅ (PO ₄ CO ₃) ₃ (OH)	함수인회석
	Ca, Mg, phosphate	Ca ₃ Mg ₃ (PO ₄) ₄	인산고토석
	Whitlockite	Ca ₈ H ₂ (Mg, Fe ²⁺) ₂ (PO ₄) ₆	
	Struvite	Mg(NH ₄)(PO ₄) · 6H ₂ O	
	Brushite	Ca(HPO ₄) · 2H ₂ O	
	Amorphous pyrophosphate		
	Amorphous calcium phosphate		
	ACP(dahlite precursor)		함수인회석 선구체
	ACP(brushite precursor)		
	ACP(whitlockite precursor)		
	ACP(francolite precursor)		탄산인회석 선구체
	Amorphous Mg Ca phosphate		
	Amorphous hydrous Fe phosphate	KNa ₃ (Fe ₃ Mg ₂)(PO ₄) ₃ (OH) ₃	
Hydro-K Na Fe Mg phosphate			
Vivianite	Fe ²⁺ (PO ₄) ₂ · 8H ₂ O	남철광(藍鐵礦)	
할로겐화합물	Brucite	Mg(OH) ₂	수활석
	Fluorite	CaF ₂	형석
	Amorphous fluorite	CaF ₂	비정질형석
	Hieratite	K ₂ SiF ₆	
유화물	Pyrite	FeS ₂	황철광
	Hydrotroilite	FeS · nH ₂ O	수단(水單)유철광
	Pyrrhotite	Fe _{1-x} S(x=0~0.2)	자류철광
	Sphalerite	ZnS	섬아연광
	Wurzite	ZnS	섬유아연광
	Galena	PbS	방연광
	Greigite	Fe ²⁺ Fe ³⁺ S ₄	
Mackinawite	(Fe, Ni) ₃ S ₈		
유황	Sulphur	S	유황
수산염	Whewellite	CaC ₂ O ₄ · H ₂ O	
	Weddeite	CaC ₂ O ₄ · (2+x)H ₂ O(x(0.5)	
	Glushinskite	MgC ₂ O ₄ · 4H ₂ O	
	Mn oxalate	MnC ₂ O ₄ · 2H ₂ O	
	Cu oxalate	CuC ₂ O ₄ · nH ₂ O	
	Ca oxalate	CaC ₂ O ₄	망간수산염(蔞酸鹽)

기 획 특 집

광종별	광물명	화학성분	비 고
기 타 유 기 결 정	Sodium urate	NaC ₅ H ₃ N ₃ O ₃	
	Uric acid	C ₅ H ₄ N ₂ O ₃	
	Paraffin hydrocarbon		
	Wax(long chain)		
	Ca tartrate	CaC ₄ O ₆	
	Ca malate	CaC ₄ H ₂ O ₄	
Earlandite	Ca ₃ (C ₆ H ₅ O ₇) ₂ · 4H ₂ O		
탄 화 물	Peat		토탄
	Lignite		갈탄
	Bituminous coal		역청탄
	Anthracite		무연탄
	Amorpus graphite		토상흑연
	Crud Oil		석유
	Liquefied natural gas		천연액화가스

3. 생화광물(Biominerals)

탄산염광물은 Ca, Mg, Fe, Pb 등 각종 금속 성분과 함께 화합물상태로 생물체내에 들어 있다.

따라서 탄산염광물은 바이오미네랄을 대표하며 퇴적암의 조암광물로서 중요한 위치를 차지하고 화성암, 변성암, 열수광상 등에도 섞여 있다.

인산염광물은 천연상태에서 100여종에 이르나 이중 바이오성 인산염광물은 20여종 정도다.

규산염광물 중 은미정질석영(隱微晶質石英, SiO₂, nH₂O)은 대부분이 바이오미네랄에 속하고 물을 4~9%, 많은 것은 20%나 함유하며 오팔(Opal)과 규화목(矽化木), 규조토(矽藻土) 등이 합수규산염광물에 속한다.

수산염(蓆酸鹽) 광물로서는 수산석회석(蓆酸石灰石, Whewellite, CaC₂O₄ · H₂O)가 바이오광물에 속하며 독일탄전지대와 남극대륙에 다량 부존된다.

산화광물 중에는 산화철인 자철광, 적철광 등이 이에 속하며 바다에 살던 철박테리아의 유해가 바다 밑에 쌓여 철광층을 이루어 동력변질을 받아 자철광과 적철광이 되었다.

이와 같이 바이오미네랄은 대부분이 한데 모여 규칙정연하게 결정돼 대규모 광상을 만들어 냈다.

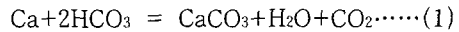
4. 생물 경조직의 종류와 구조

'바이오미네랄'에 속하는 생물의 경조직은 조직의 화학성분과 형태에 따라 다음과 같이 다양한 생물들이 만들어 냈다.

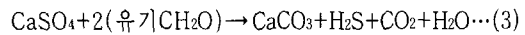
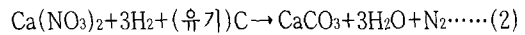
4.1 균류(菌類)

'바이오미네랄'을 만들어 내는 균류는 남균(藍菌), 세균(細菌), 지의(地衣) 등이며 이들이 바이오미네랄을 만드는데 중요역할을 하고 있다.

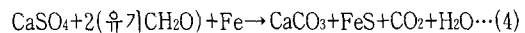
예를 들면 광합성세균이나 남균 등은 이산화탄소와 광화작용하여 다음 화학식과 같이 석회석을 만든다.



또한 유기영양세균은 초산칼슘이나 유산칼슘을 환원시켜 방해석(석회석)을 결정해내 수중에 침전시켜 석회석광상을 만든다.



이밖에 철박테리아에서 분리된 철이온은 석회석과 분리되어 유화철(FeS)을 만들어 낸다.



남균류의 집단인 스트로마톨라이트(Stromatolite)도 조류성 유기물이 광합성에 의해 암석을 만들고 있는데 이러한 조암작용은 호주 북부해안 일대에서 지금도 볼 수 있다.

이와 같이 균류가 만들어낸 바이오미네랄은 대규모 석회석, 철광석, 인광석 광상을 형성하여 산업광물로서 중요하게 쓰이고 있다.

4.2 원생생물(原生生物)

원생생물인 방산충(放散蟲), 규조(矽藻) 등은 바이오미네랄을 만드는 원생생물에 속한다.

원생생물 중에 규산이온을 물에서 흡수하게 되면 규화작용이 일어나 오파과 같은 여러 형태의 규산광물로 변한다.

유공충이 석회화 되면 석회석이 되고 규화되면 규조토가 된다.

따라서 원생생물의 종류와 형태에 따라 다양한 바이오미네랄이 만들어진다.

4.3 조류(藻類)

모든 조류들은 바이오미네랄을 만드는 중요생물에 속한다.

갈조강(褐藻綱), 홍색조강(紅色藻綱), 녹조강(綠藻綱) 등 조류가 방해석(석회석)을 만드는 중요조류에 속한다는 것은 일찍이 알려진 사실로 방해석의 다양한 탄산염, 규산염, 인산염, 수산염 광물들을 만들어 내고 있다.

Padina, Corallina, Chara 등이 바이오미네랄을 만들어 내는 주요 조류에 속한다.

4.4 식물과 동물

식물과 동물도 그 생김새와 조직에 따라 각종 광물을 만들어 낸다.

규화목과 같이 나무의 세포조직이 규산과 치환 교대하여 규산광물로 변해 나무화석이 되어 산출되고 있으며 바다에 사는 해면동물(海綿動物), 산호와 같은 강장동물(腔腸動物), 절족동물(節足動物), 편형동물(扁形動物), 유형동물(維形動物), 연체동물(軟體動物 : 조개, 진주 등), 패각(貝殼) 등도 그들의 모양을 그대로 화석화하여 바이오미네랄이 된다.

이렇게 만들어진 바이오미네랄은 원시 인류의 생존과 문명사회 건설에 절대적인 역할을 해 왔다.

5 생화학물의 생성조건

바이오미네랄의 생성조건을 살펴보면 첫째, 성장소에 따라 영향을 많이 받는다.

특히 생물광화작용은 남균, 지의, 세균, 균류 등에 의해 활발히 일어난다.

즉, 생물로부터 체외 배출된 물질이 주변에 있는 다른 물질과 직접 반응하거나 다른 물질이 생물체 내로 흡수되면서 바이오미네랄이 생성된다.

이와 같이 만들어진 바이오미네랄은 미생물의 몸 밖(세포막 표면)에서 직접 정출된다.

스트로마트라이트나 석회화와 같은 미생물의 개체나 집단은 주위에 있는 탄산칼슘, 규산염, 수산칼슘, 수산동 등과 함께 층상, 주상, 괴상 등 다양한 형태로 퇴적되어 광상을 형성한다.

이렇게 만들어진 바이오미네랄 집합체의 형태나 조성은 생물체의 생리적 조건에 따르거나 환경물질의 성질과 생성온도, pH, 압력 등 생성환경 등 물리화학적 조건에 의해 달라진다.

두 번째는 생물자체의 성장, 즉 생물 내적 성장 정도에 따라 바이오미네랄의 형성과정이 다르다.

조개류나 산호류의 골결형성은 외부환경에 직접 영향을 받지만 생물자체 내 성장형태에 따라 광화작용 정도가 정해진다.

즉, 체내 형성은 세포 외, 세포 내, 세포와 세포 사이 형성으로 구분하여 생각할 수 있다.

생물체내에 있어 세포 외 광물형성은 외충류(渦蟲類)와 같이 석침골(石針骨)을 중심으로 상피조직의 세포를 지지하는 기저막 중에서 경조직을 키워 나간다.

유공충이나 방산충도 외충류와 같은 형태로 체내 경조직을 키워 나가 결국 방해석을 만든다.

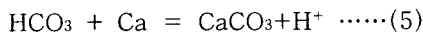
따라서 생물에 의한 광화작용은 광물의 화학성분(이온)을 생체 내로 끌어들이어 유기질 합성이 이루어진다.

수생식물이나 수생하등 동물의 경우 담수나 해수 중 Ca이온 농도는 0.5~10mM 정도인데 세포 내 농도는 1/1,000mM(1μM)밖에 안되기 때문에 전기화학적 전위차에 의해 환경수를 경유 직접체내로 빨려 들어가게 된다.

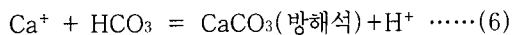
이러한 현상은 조개류, 석회조, 산호 등에서 나타나는데 세포 내 석회농도가 1/1,000mM 이상이 되면 세포에게는 치명적이기 때문에 ATP (Adenosine triphosphate) 효소에 의해 분해되어 과잉석회는 체외로 배출된다.

따라서 체외로 배출된 석회는 체외각에 쌓여 석회질 껍데기를 누적시켜 나가는데 굴(석화)종류나 산호에서 이러한 현상을 관찰할 수 있고 석회화 성장 속도가 특히 빠르게 나타난다.

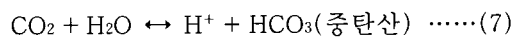
중탄산이온은 탄산탈수효소에 의해 탄산칼슘이 만들어진다.



또한 석회(Ca)이온은 중탄산과 다시 반응하여 방해석(석회석)을 만들어 낸다.



탄산가스는 물과 반응하여 수소이온을 발산시키고 중탄산을 만들어 낸다.



즉, 탄산가스는 물과 반응하여 수소이온과 중탄산을 만들어낸다.

여기에다가 조류의 광합성은 조류의 석회화를 더욱 촉진시키는데 조류가 석회화되면서 발생하는 수소이온(H⁺)은 바닷물 중 중탄산(HCO₃)을 이산화탄소(CO₂)로 바꾸어 광합성을 촉진시켜 결국

석회화를 촉진하여 석회석을 다량 정출시킨다.

6. 지구상 생물광화작용의 출현

지구의 생성년대는 약 46억년 정도로 지구상에 생명체가 처음 나타난 시기는 40억년 쯤이다.

지구상에 처음 나타난 남균(藍菌)에 의해 만들어진 '스트로마토라이트'(Stromatolite)가 35억년 전에 퇴적된 지층에서 발견된 것으로 미루어 남균류가 지구상 최초의 원시 생명체라 보여진다.

그러나 본격적인 생물광화작용은 20억년 전쯤으로 지층 중 단일자기성(單一磁氣性)을 띠는 작은 자철광 결정이 발견되고 있는데 이는 무기성 산화철이 아니고 자기성 세균에 의해 정출(晶出)된 산화철이다.

당시 자기성 균류는 혐기성으로 현 대기 중 산소량(21%)보다 아주 적은 1% 내외의 산소농도에서나 생존 가능한 생물이기 때문이다.

그 후 생물들은 대기 중 점점 늘어나는 산소에 적응하면서 서서히 호기성 생물로 진화를 거듭하게 됐고 다세포체계의 후생 생물이 10억년 전쯤 나타나기 시작하여 약 5억8천만년 경(고생대초기)에 해면류와 방산충이 해수 중 번성하여 때문에 오늘날 이들 화석이 해저지층에서 발견된다.

당시 지구 바다는 용존칼슘은 비교적 적었던 반면 탄산나트륨(Sodium Carbonate, Na₂CO₃)이 많이 섞여 있어 산성을 띄다가 그 후 차차 pH8 정도의 염화나트륨(Sodium Chloride, NaCl)성 바다로 변하기 시작하여 탄산칼슘 농도가 서서히 높아지면서 현재와 같은 염화나트륨이 약 3.5%정도 섞인 바닷물로 변했다.

고생대 초기인 캄브리안(Cambrian)에 이르러 다양한 생물이 본격적으로 나타나기 시작해 오도비시안(Odovician)에 이르러서는 원생생물(原生生物), 해면류(海綿類), 강장류(腔腸類), 속피

류(楝皮類), 완족류(腕足類), 연체류(軟體類), 절족류(節足類) 등이 번성하여 석회석, 철광층 등 대규모 광상을 퇴적시켜 오늘날 우리가 필요로 하는 광물자원을 만들어냈다.

〈표 3〉 고생대의 생물계

시대	隱生	寒武	奧陶	后島	泥盆	石炭	二疊
생물	Pre-Cam	Cambrian	Ordovician	Silurian	Devonian	Carboniferous	Permian
식물	분얼균·분열조류						
	녹조						
동물	갈조						
	홍조						
원생해면	프랑크푸르트방산충						
	유공충						
강	해면						
	Archaeocyathus						
장	하이드로충						
	충공충						
속	필석						
	수형류						
패	정필석류						
	사사산호						
도형	팔사산호						
	상관산호						
의연체	질수모						
	고누라리아류						
연체	해림금						
	해고						
절	Edriasteroidea						
	선체, 불가사리						
주	도형						
	선충						
초	고혈						
	부혈						
주	신혈						
	전혈						
주	중혈						
	부족						
주	복족						
	오우무조개						
주	Volborthelella						
	환충						
주	삼엽충						
	소절						
주	다절						
	광린						
주	광의						
	공검미						
주	사리리류						
	Ribeiria						
주	패형						
	물고기(어)						

주 : Pre-Cambrian : (5억7천만년전) Cambrian : (5억7천~5억년)
 Ordovician : (5억~435백만년) Silurian : (435백만~395백만년)
 Devonian : (395백만~345백만년) Carboniferous : (345백만~280백만년)
 Permian : (280백만~230백만년)

7. 결론

우리나라가 필요로 하는 광물자원 중 가장 많이 쓰이는 것이 석회석으로 연간 소요량은 8,000만톤에 달하며 그 다음이 철광으로 연간 4,000만톤, 인광석이 연간 150만톤 순으로 상위 3개 광종이 모두 생물이 만들어낸 바이오미네랄이다.

또한 전세계인류가 필요로 하는 에너지의 경우도 석유 3,500백만TOE(구성비 40%), 천연가스 2,100만TOE(구성비 24%), 석탄 2,300만TOE(구성비 26%)로 바이오에너지 광물의 연간 수요는 7,900백만TOE나 돼 전체 에너지 소비량에 약 90%나 차지한다.

(TOE = Tonnage oil equivalent, 석유환산톤)

이상과 같은 바이오미네랄은 우리가 일반적으로 알고 있는 것 이상 우리 생활과 밀접한 관계가 있으며 이러한 천연광물의 생성원이 극미세한 세균으로부터 올랐던 상립에 이르기까지 모두 생물이 만들어냈다는 사실이 놀랍다.

우리나라의 경우 시멘트, 철강 등 모든 원자재를 바이오미네랄에 의존하고 있는데 수억년 동안 장구한 세월에 걸쳐 만들어진 바이오미네랄을 지난 세기와 금세기에 한꺼번에 너무 많이 낭비하고 있지 않나 걱정이 된다.

참고로 최근 국내 바이오에너지 수급현황 및 전망을 살펴보면 2001년도부터는 연간 석회석 1억톤, 철광석 5,000만톤, 인광석 300만톤, 석유의 경우 연간 약 7억 Barrel, 액화천연가스(LNG) 1,100만톤, 석탄은 연간 6,000만톤이 필요하다.

(원고 접수일 2001. 5. 14)