

天雲山層內 高알루미나鑛石에 對한 鑛物學的 研究

Mineralogical Study on High Aluminous Meta-Claystone from the Chununsan Formation

李 東 鎮(Dong-Jin Lee)* · 李 晟 錄(Sung-Rock Lee)*

韓國動力資源研究所 鑛物研究室

(Korea Institute of Energy and Resources, Seoul 152-020, Korea)

要約: 高알루미나鑛石內에 含有된 高알루미나 鑛物로는 紅柱石(또는 카이아스톨라이트)과 캐올리나이트外에 蠟石, 덕카이트, 나크라이트, 다이아스포어, 보에마이트, 김사이트 및 網玉이 産出되며 그밖에 클로리토이드, 絹雲母, 白雲母, 파라고나이트, 電氣石, 저어콘 등의 硅酸鹽鑛物, 石英, 金紅石, 針鐵石 및 赤鐵石 등의 酸化 또는 水酸化鑛物, 모나자이트, 磷灰石, 제노타임 등의 磷酸鹽鑛物이 産出된다.

鑛石의 類型은 構成鑛物의 種類에 따라 대체로 4가지로 區分되는 바, 紅柱石-캐올리나이트-絹雲母, 캐올리나이트-絹雲母-蠟石, 紅柱石-캐올리나이트-클로리토이드, 그리고 캐올리나이트-클로리토이드-絹雲母 型으로 나누어 진다.

高알루미나鑛物의 生成過程은 알루미나가 풍부한 泥質堆積物이 續成作用을 거쳐 低變成作用을 받으면서 蠟石을 形成하였으며, 溫度가 上昇함에 따라 紅柱石이 形成되었다. 또한 後期의 變質作用에 의해 紅柱石은 局部的으로 캐올리나이트 또는 絹雲母로 變하여 現在와 같은 紅柱石·캐올리나이트 質 鑛石을 이루게 되었다.

變成作用의 程度는 變成鑛物의 安定領域, 雲母의 結晶度, 炭質物의 黑鉛化程度 등으로 미루어 보아 very low grade~low grade에 屬하며, 特히 紅柱石의 生成條件은 4kb未滿, 生成溫度는 400~500°C에 해당된다.

ABSTRACT: The high aluminous meta-claystones are thinly bedded to metasedimentary rocks which belong to Chununsan Formation. Major high aluminous minerals in the ores are andalusite, kaolinite and pyrophyllite. The other significant constituents are sericite, chloritoid and carbonaceous material, etc.

Ores can be classified into 4 types according to mineral compositions; andalusite-kaolinite-sericite, andalusite-kaolinite-chloritoid, kaolinite-sericite-pyrophyllite, and kaolinite-chloritoid-sericite ore.

The formation of ore minerals are resulted from sedimentary, diagenetic, metamorphic and hydrothermal processes. Andalusite are formed by low-grade metamorphism under the conditions of 400~500°C and below 4kb, from the view-point of mineral stability field, illite-mica crystallinity and graphitization degree of the carbonaceous material. Andalusites are partly altered to kaolinite, forming major mineral phase in the ores.

序 言

天雲山層內에서 產出되는 高알루미나鑛石은 礬土頁岩(aluminous shale)으로 알려져 있는 바 이는 원래 滿州 또는 北中國의 炭田地域에서 產出되는 高알루미나質 硬質粘土를 의미하는 것으로 全南 和順郡地域의 天雲山層內에 廣域的으로 產狀이 알려져 部分的으로 開發되고 있다.

天雲山層內에 賦存된 鑛石에는 高알루미나鑛物을 多量 含有한 高品位鑛石과 高알루미나鑛物外 隨伴鑛物이 많이 含有된 低品位鑛石이 혼재되어 함께 產出된다. 本研究에서는 高알루미나鑛物과 隨伴鑛物에 對한 特性, 鑛物相互間의 構造와 組織, 鑛石의 類型, 變成度, 그리고 高알루미나鑛石의 形成等을 규명하고자 한다.

高알루미나鑛石은 현재 耐火物의 主要 素材資源으로 利用되고 있으며 高品位鑛石의 開發은 물론 低品位鑛石에 對해서도 精製開發하여 活用하는 것은 매우 重要하다 하겠다. 현재 高알루미나鑛石을 對象으로 採鑛하여 稼行中인 鑛山은 同福, 碧松 및 天雲鑛山이 있으며 雲谷鑛山은 廢鑛狀態에 있다.

地質 및 鑛床概要

高알루미나鑛石이 賦存된 地域은 全南 和順郡 南面, 春陽面, 寒泉面 및 梨陽面 등으로 이 일대의 地質圖와 鑛體는 Fig. 1에 나타나 있다. 이 일대는 先캠브리아紀의 花崗片麻岩類, 時代未詳의 花崗片麻岩類, 石炭~페름紀(?)의 變成堆積岩類, 白堊紀의 凝灰岩類, 그리고 第四紀의 沖積層으로 構成되어 있다.

變成堆積岩類는 下部로 부터 聳岩山層, 午陰里層, 舍炭層 그리고 天雲山層으로 構成되어 있으며 이는 石炭~페름紀(?)의 龜岩層群으로 名命된 바 있다(徐海吉 外, 1985). 龜岩層群은 전반적으로 變成되어 있으며 아직까지 表準化石이 發見되지 않아 地質時代가 分明하지 못한 실정이다. 그러나 대부분의 既調査者들은 石炭層의 挾在, 일부 化石의 產出(市 村毅, 1927, 金南

長·李河榮, 1962), 構成岩石 및 層序等을 들어 龜岩層群을 平安系(平安累層群)에 對比시키고 있다.

天雲山層은 두께가 約 700m로서 午陰里層 上部의 舍炭帶를 不整合으로 덮고 있으며 또한 壯東里 凝灰岩層에 依해 不整合으로 被覆된다. 天雲山層을 構成하는 岩石은 變成堆積岩類로서 鑛體에 인접된 일대는 회색 또는 회백색의 粗粒質 砂岩 그리고 暗灰色 내지 黑色의 砂岩이 세일과 挾在되어 있다. 砂岩類는 廣域變成作用에 依해 岩石中의 鑛物이 再配列되어 片理가 발달되어 있으며 또한 壓碎變形構造를 보인다. 흑색세일은 지역에 따라 부분적으로 슬레이트 또는 千枚岩化되어 있다.

高알루미나鑛床은 天雲山層內에 賦存되어 있으며 鑛體의 발달양상은 대체로 N20~50°E로서 天雲山層의 層理方向과 유사하다. 대부분의 鑛石은 粗粒質砂岩層에 挾在되어 있고 두께는 2~8m에 달함이 일반적이다. 鑛石은 色 및 構成鑛物에 依해 區別되어 識別되는 바 高알루미나鑛物外에 약간의 炭質物이 含有된 暗灰色 내지 黑色의 鑛石과 그리고 舍鐵鑛物이 含有된 綠灰色, 黃褐色 및 赤紫色 鑛石 등으로 區分된다.

同福 및 碧松鑛山地域一帶의 岩層은 N40~50°E의 走向과 15~30°NW의 傾斜를 보여 주며 鑛體는 粗粒質砂岩內 2~8m의 幅을 지닌 3~4個組가 挾在되어 向斜와 背斜構造에 依해 反復發達하고 있다. 이러한 鑛體는 發達樣에 따라 延長이 계속됨으로서 상당한 매장량에 이를 것으로 判斷된다.

天雲鑛山이 位置한 坪里地域에는 수개의 層準에 鑛體가 發達되는데 대체로 粗粒質砂岩下部에 暗灰色, 綠灰色, 黃褐色 鑛體 및 炭質세일이 發達하며 鑛體의 幅은 3~8m에 달한다.

湖南炭鑛地域에서는 自形の 柱狀을 보이는 紅柱石이 認知되는 暗灰色 내지 黑色鑛體가 우세하게 產出되며 鑛體의 幅은 2~4m 內外이며 N80°W 또는 N30°E의 方向을 지닌다.

午陰里地域에서는 炭質物의 含有가 비교적 많으며 柱狀結晶의 紅柱石이 含有된 暗灰色 내지 黑色鑛體가 發達하며 龍頭里 및 江聲里地域에서

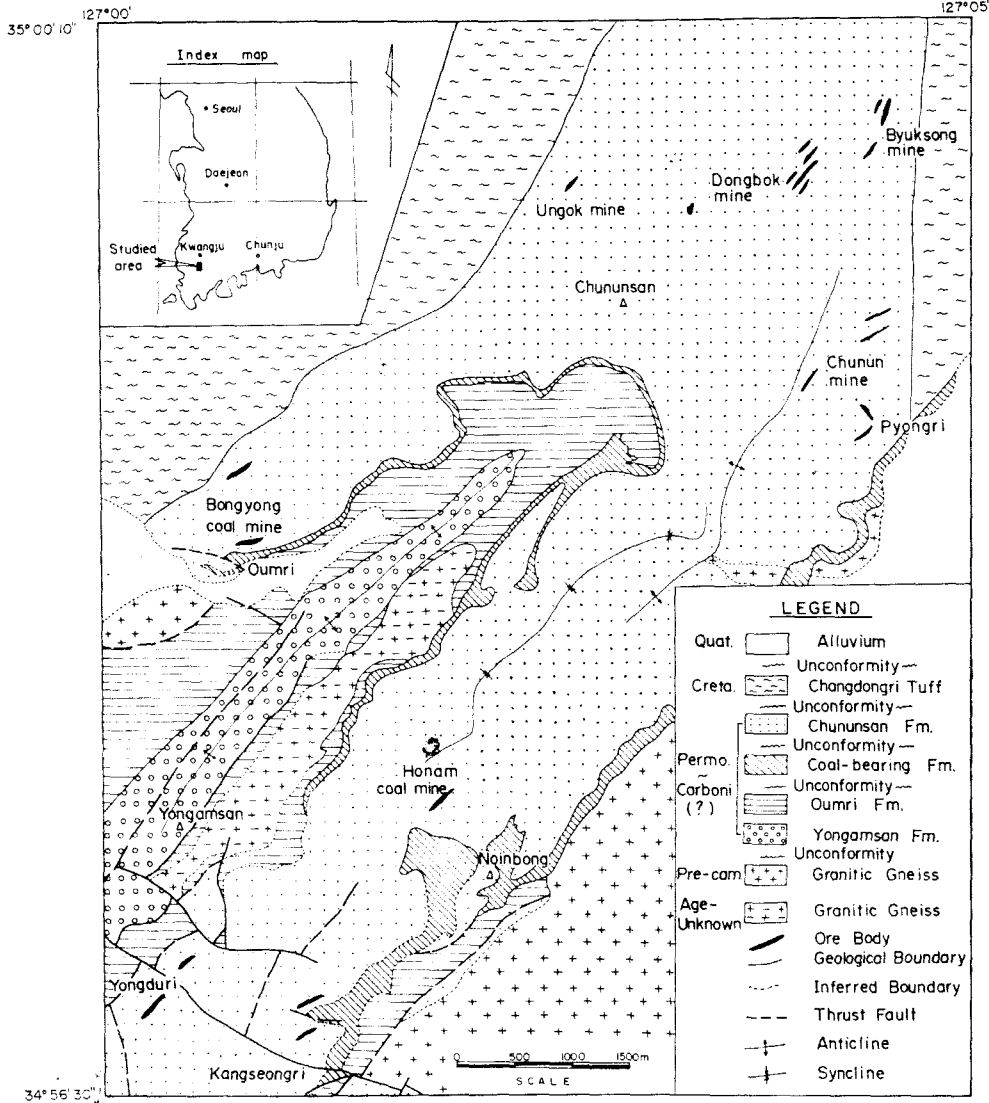


Fig. 1. Geologic map of the studied area (Modified after Suh, 1985 and Park, 1978).

는 暗灰色鑛體外에 黃灰色 및 赤紫色鑛體가 分布하며 幅은 대체로 2~3m에 달한다.

高알루미나鑛石

鑛石의 構成鑛物

高알루미나鑛石은 紅柱石, 카이아스틀라이트, 캐올리나이트, 덕카이트, 나크라이트, 할로이사이트, 蠟石, 다이아스포어, 보에마이트, 김싸이

트, 網玉 등의 高알루미나鑛物과 이에 수반되는 白雲母/絹雲母, 파라고나이트, 石英, 炭質物, 클로리토이드, 루타일, 電氣石, 저어콘, 모나자이트, 磷灰石, 제노타임, 針鐵石, 赤鐵石, 菱鐵石 등으로 구성되어 있다.

鑛石의 類型

高알루미나鑛石을 構成하는 鑛物의 種類에 따라 대체로 다음과 같은 4가지 類型으로 區分된

다.

- (1) 紅柱石-캐올리나이트-絹雲母 型
- (2) 캐올리나이트-絹雲母-蠟石 型
- (3) 紅柱石-캐올리나이트-클로리토이드 型
- (4) 캐올리나이트-클로리토이드-絹雲母 型

紅柱石-캐올리나이트-絹雲母 型 : 紅柱石 및 캐올리나이트가 풍부하고 絹雲母, 蠟石, 石英 등이 隨伴鑛物로 觀察된다. 어두운 灰色을 띄며 粗粒質의 塊狀으로서 매우 단단한 느낌을 주는 것이 特徵인 바 粗粒의 紅柱石粒子들 사이에는 絹雲母, 蠟石 및 石英이 充填되어 있다. 肉眼로 觀察할 때 검은 斑點狀의 紅柱石이 잘 나타나는 鑛石도 本 類型에 屬하는 것으로 斑點狀의 紅柱石內에 微細한 炭質物이 捕獲되어 있어 검게 보인다.

캐올리나이트-絹雲母-蠟石 型 : 캐올리나이트, 絹雲母 및 蠟石이 主成分鑛物이며 石英, 紅柱石 등이 副成分鑛物로 觀察되는 鑛石이다. 캐올리나이트는 紅柱石으로부터 變質된 것으로 少量의 紅柱石 殘存物이 存在한다. 變質된 캐올리나이트 集合體 주변부는 絹雲母, 蠟石, 石英 및 약간의 炭質物로 構成되어 있으며 全體의으로 鑛石은 暗灰色을 띤다.

紅柱石-캐올리나이트-클로리토이드 型 : 紅柱石, 캐올리나이트 그리고 클로리토이드가 主成分鑛物이며 絹雲母, 石英, 蠟石이 副成分鑛物로서 存在한다. 연한 黃褐色을 띄며 클로리토이드가 量的으로 많고 炭質物이 比較的 적은 것이 特徵이다.

캐올리나이트-클로리토이드-絹雲母 型 : 主로 캐올리나이트, 클로리토이드 및 絹雲母로 構成되어 있는 鑛石으로서 弱한 灰色을 띤다. 紅柱石은 캐올리나이트로 거의 變質되어 약간의 紅柱石이 殘存한다.

各 類型에 屬하는 代表的인 鑛石의 X-線廻折圖는 Fig. 2에 나타나 있다.

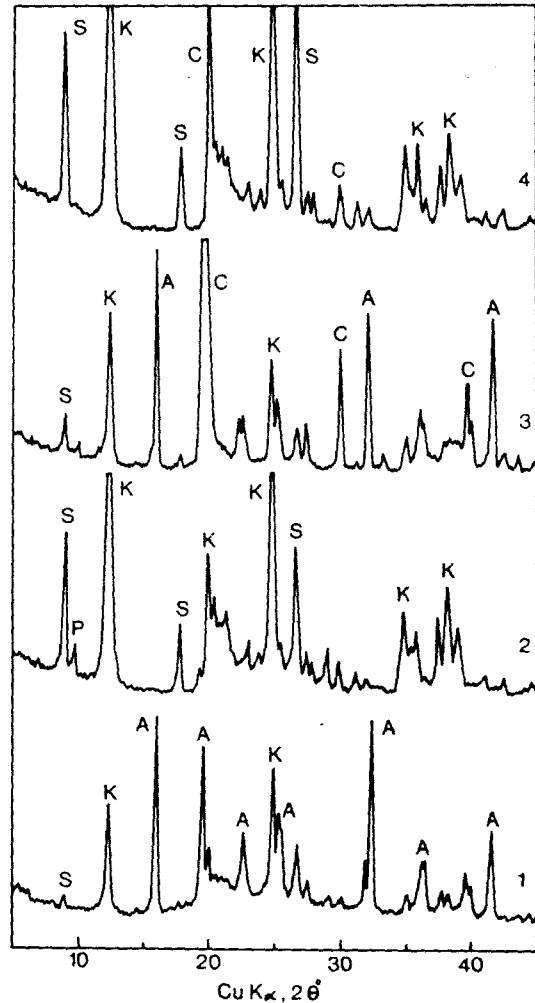


Fig. 2. X-ray diffractograms of high aluminous ores (A : andalusite, K : kaolinite, S : sericite, P : pyrophyllite, C : chloritoid).

(1) andalusite-kaolinite-sericite ore. (2) kaolinite-sericite-pyrophyllite ore. (3) andalusite-kaolinite-chloritoid ore. (4) kaolinite-chloritoid-sericite ore.

鑛石의 構造와 組織

塊狀(massive) : 中粒 또는 細粒의 紅柱石과 캐올리나이트로 主로 構成되어 있는 鑛石으로서 매우 堅固한 느낌을 주며 紅柱石粒子들의 境界部는 絹雲母, 蠟石 또는 石英이 채워져 있다.

變晶狀(porphyroblastic) : 變晶으로 產出되는

鑛物은 紅柱石과 凱올리나이트集合體이며 基質을 形成하는 鑛物은 絹雲母, 石英, 蠟石 그리고 炭質物等이다. 變晶으로 產出되는 紅柱石은 紅柱石의 粒子가장자리를 따라 凱올리나이트로 變質되거나, 또는 紅柱石이 完全히 凱올리나이트集合體로 化한 것 그리고 약간의 紅柱石이 殘存하는 것 등으로 觀察된다. 變晶狀의 紅柱石이 집게 나타나는 것은 紅柱石內의 微細한 炭質物이 基質에서의 炭質物보다 많기 때문이다.

또한 鑛石中의 鱗 變晶은 紅柱石이 凱올리나이트集合體로 거의 變質된 것으로서 基質보다 더 희게 보이는 바, 이는 基質에 微細한 炭質物이 보다 많이 存在하므로 變晶이 相對的으로 희게 보이는 것이다.

細脈狀(veinlet-rich) : 鑛石中에는 石英, 蠟石, 凱올리나이트, 딕카이트 그리고 白雲母/絹雲母 細脈이 다수 存在한다.

高알루미나鑛物 및 隨伴鑛物

高알루미나鑛物

紅柱石(andalusite) : 紅柱石-凱올리나이트-絹雲母 型의 鑛石에 흔히 包含되어 있으며 炭質物이 比較的 많은 鑛石에서는 自形으로 產出된다. 微細한 炭質物과 微粒의 透明 또는 不透明鑛物이 紅柱石에 捕獲되어 나타나며, 紅柱石粒子는 가장자리(rim)를 따라 凱올리나이트로 變質(Fig. 3-1)되어 있다. 自形の 紅柱石粒子는 部分的으로 凱올리나이트로 變質되어 紅柱石이 殘存(Fig. 3-2)되기도 하며, 또한 粒子의 가장자리를 따라 일부 絹雲母로 變質(Fig. 3-3)되어 나타나기도 한다. 紅柱石粒子에는 石英 및 絹雲母 細脈이 發達하며 凱올리나이트細脈(Fig. 3-4)도 다수 認知된다.

카이어스톨라이트(chiastolite) : 카이어스톨라이트는 紅柱石의 變種으로서 結晶內에 炭質物이 一定한 配列을 形成하면서 들어 있는 것이 特徵이다. 카이어스톨라이트結晶을 C-軸에 直角으로

切斷하면 直四角形 또는 正四角形의 斷面에 炭質物이 X-字形으로 들어있는 形態(Fig. 3-5)를 보인다. 本 鑛石에서는 炭質物이 一定한 配列을 보여주고 있으나 自形の 紅柱石이 部分的으로 凱올리나이트로 變質(Fig. 3-2)되거나 또는 모두 凱올리나이트로 變質(Fig. 3-5)된 것이 特徵적이다.

凱올리나이트(kaolinite) : 凱올리나이트는 紅柱石의 變質產物로서 紅柱石이 모두 凱올리나이트로 變質된 것(Fig. 3-6)과 一部 紅柱石이 殘存되고 凱올리나이트로 變質된 것(Fig. 3-2) 그리고 紅柱石의 粒子 가장자리(rim)를 따라 凱올리나이트로 變質(Fig. 3-1)된 것 등으로 나눌 수 있다.

凱올리나이트는 紅柱石粒子內에서 여러 細脈을 形成하며, 또한 鑛石中에 形成된 石英細脈들의 境界部를 充填하기도 한다. 凱올리나이트集合體는 變晶으로서 正方形을 보이기도 한다. 變晶狀으로 產出되는 凱올리나이트를 走査電子顯微鏡으로 觀察하면 板狀의 形態(Fig. 4-1)를 보인다. 凱올리나이트의 X-線 廻折分析結果는 Table 1에 있다.

딕카이트(dickite) : 딕카이트는 紅柱石-凱올리나이트-絹雲母型 또는 紅柱石-凱올리나이트-클로리토이드型의 鑛石中에 絹雲母 및 蠟石과 隨伴되어 細脈을 形成한다. 走査電子顯微鏡下에서의 形態는 板狀結晶이 포개져 쌓여 있는 모양(Fig. 4-2)을 보인다. X-線廻折分析結果는 Table 1에 있다.

나크라이트(nacrite) : 나크라이트는 딕카이트와 함께 매우 드물게 產出되는 鑛物로서 2次的으로 形成된 細脈으로 蠟石과 隨伴되어 產出된다. X-線廻折分析結果는 Table 1에 있다.

할로이사이트(halloysite) : 地表鑛石에 形成된 少空洞에서 矽사이트, 赤鐵石等과 함께 少空洞의 벽면에 微細한 針狀으로 產出된다.

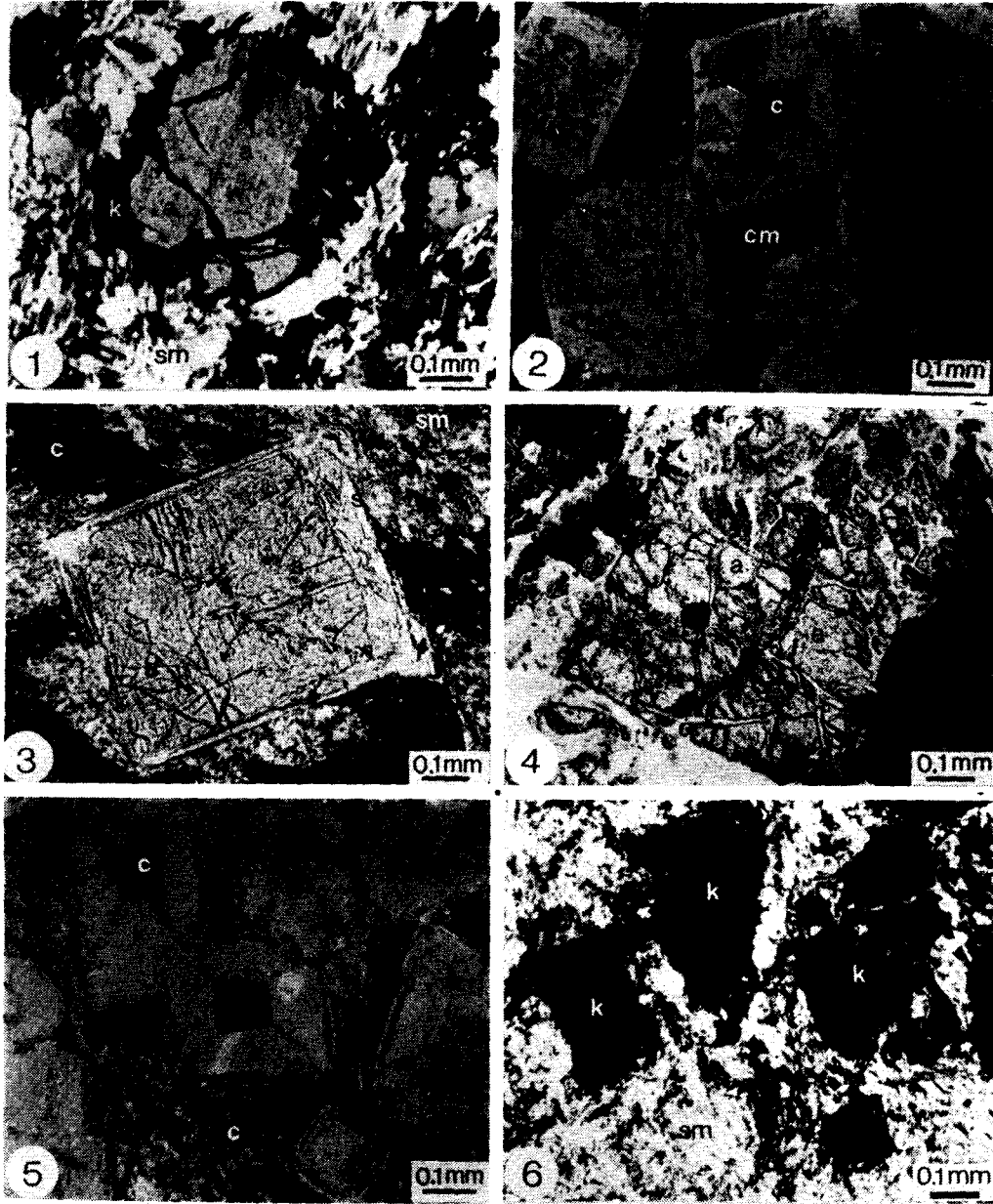


Fig. 3. Microphotographs of andalusite(a) and kaolinite(k) in the high aluminous ores. (1) Andalusite porphyroblast in a sericitic matrix(sm). Note andalusite altered to kaolinite along the rim. Crossed N. (2) Square form of porphyroblasts in carbonaceous-rich matrix(cm). Note andalusite relics after alteration to kaolinite. Open N. (3) Euhedral andalusite in a carbonaceous (c)-sericitic matrix(sm) altered to sericite(s) along the rim. Crossed N. (4) Kaolinite veinlets formed in andalusite grain. Note a fine-grained monazite(m) inclusion. Open N. (5) Square and cross form of carbonaceous(c) material included in altered kaolinite aggregate from carbonaceous(c)-rich ore. Open N. (6) Kaolinite aggregate in a sericitic matrix(sm). Note kaolinite altered from andalusite. Crossed N.

Table 1. X-ray diffraction data of the high-aluminous minerals.

kaolinite		dickite		nacrite		pyrophyllite		diaspore		boehmite		gibbsite	
<i>d</i> (Å)	<i>I</i> / <i>I</i> ₀	<i>d</i> (Å)	<i>I</i> / <i>I</i> ₀	<i>d</i> (Å)	<i>I</i> / <i>I</i> ₀	<i>d</i> (Å)	<i>I</i> / <i>I</i> ₀	<i>d</i> (Å)	<i>I</i> / <i>I</i> ₀	<i>d</i> (Å)	<i>I</i> / <i>I</i> ₀	<i>d</i> (Å)	<i>I</i> / <i>I</i> ₀
7.16	100	7.13	100	7.16	100	9.17	80	4.71	6	6.17	100	4.86	100
4.46	26	4.36	6	4.44	14	4.59	45	4.00	100	3.17	50	4.37	30
4.36	25	4.26	4	4.38	19	3.32	15	3.21	20	2.35	40	3.10	5
4.18	24	4.12	7	4.14	22	3.06	100	2.56	48	1.99	30	2.42	25
3.87	10	3.79	9	3.95	6	2.55	11	2.43	10	1.86	25	2.39	20
3.76	9	3.57	100	3.59	100	2.53	10	2.39	10	1.85	20		
3.58	90	3.43	7	3.48	11	2.41	14	2.32	32				
2.55	17	2.79	5	3.42	14	2.30	5	2.17	22				
2.53	11	2.51	5	3.07	18	1.84	8	2.08	42				
2.49	17	2.39	35	2.52	8	1.63	5						
2.42	11	2.32	13	2.43	16								
2.33	25	1.98	9	2.40	26								
2.30	15	1.79	45	2.32	7								

납석(pyrophyllite) : 캐올리나이트-絹雲母-蠟石型의 鑛石에서 주로 産出되며 微粒의 flake集合體(Fig. 4-3)로 形成되어 있다. 캐올리나이트, 石英等과 함께 微細한 細脈을 이루며 紅柱石粒들의 境界部를 따라 絹雲母 및 石英과 함께 充填하기도 한다. 地表鑛石의 表面에는 放射狀을 이루는 針狀의 形態로 캐올리나이트와 함께 皮腹되어 있다. X-線廻折分析에 의하면 結晶構造는 3.06Å廻折線이 강한 monoclinic으로서 그 結果는 Table 1에 있다.

다이아스포어(diaspore) : 캐올리나이트, 클로리토이드 및 絹雲母가 풍부한 鑛石에서 少量 認知된다. 顯微鏡下에서 色이 없거나 연한 하늘色을 띠며 柱狀 내지 針狀을 보인다. 크기는 0.3 × 0.03mm內外로서 絹雲母 基質內에 柱狀結晶(Fig. 4-4)으로 存在한다. X-線 廻折分析結果는 Table 1에 있다.

網王(corundum) : 分析走査電子顯微鏡에서 觀察된 網玉은 parting이 發達되어 있고 조가비모양의 깨짐(conchoidal fracture)을 보이며 50 × 30 μm內外의 微細한 結晶(Fig. 4-5)으로 되어 있다.

보에마이트(boehmite) : 캐올리나이트-紅柱石-클로리토이드型의 鑛石에서 少量 確認된다. 結晶形態는 微粒의 柱狀으로 X-線廻折分析結果는 Table 1에 있다.

깁사이트(gibbsite) : 캐올리나이트, 클로리토이드, 絹雲母 等과 더불어 微細한 粒子들의 集合體로 少量 産出된다. 또한 鑛石에 形成된 小空洞內에 할로사이트, 赤鐵石等과 함께 六角形의 外觀을 지닌 柱狀結晶(Fig. 4-6)으로 存在한다. X-線 廻折分析結果는 Table 1에 있다.

白雲母/絹雲母(muscovite/sericite), 파라고나이트(paragonite) : 白雲母/絹雲母는 量的으로는 差異가 있으나 모든 類型의 鑛石에 全盤적으로 産出된다. 絹雲母는 캐올리나이트集合體 또는 紅柱石이 變晶을 이루는 鑛石에서 다른 隨伴鑛物과 더불어 基質을 形成하며(Fig. 3-6), 또 캐올리나이트, 딕카이트 및 蠟石과 더불어 鑛石內에서 細脈을 이룬다. 炭質物이 비교적 많은 鑛石에서는 自形의 紅柱石粒 가장자리가 絹雲母로 變質(Fig. 3-3)되어있으며 또한 變晶을 이루는 紅柱石粒이 모두 絹雲母化되어 나타나기도 한다. 파라고나이트는 午陰里地域에서 絹雲母와

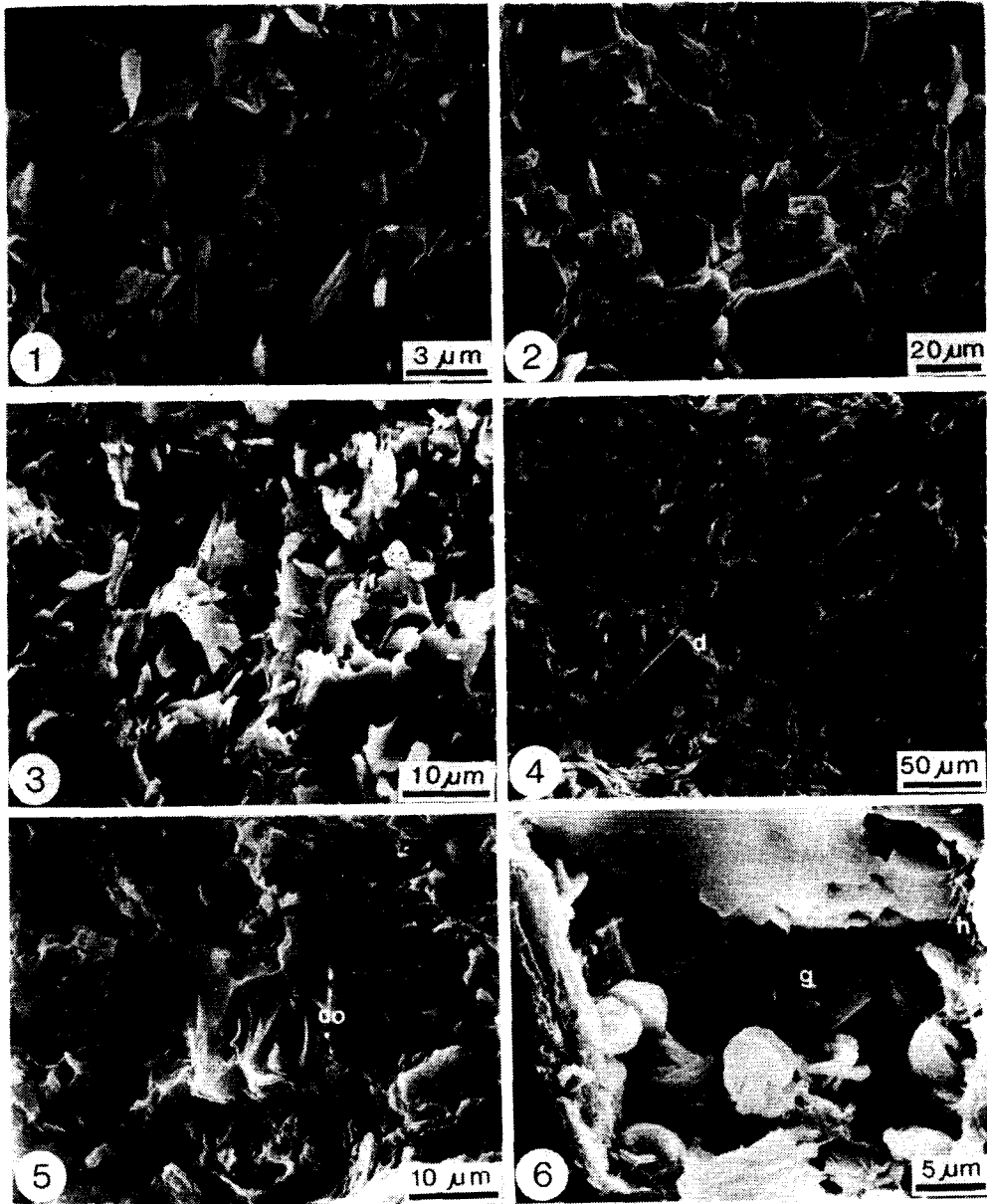


Fig. 4. Scanning electron micrographs of high-aluminous minerals in the ores. (1) Platy kaolinite. (2) Platy dickite forming stacks. (3) Platy pyrophyllite. (4) Tabular diaspore(d) in a sericitic matrix. (5) Corundum(co) crystals showing well-developed parting and conchoidal fracture. (6) Prismatic gibbsite(g) showing a hexagonal outline, and acicular halloysite(h).

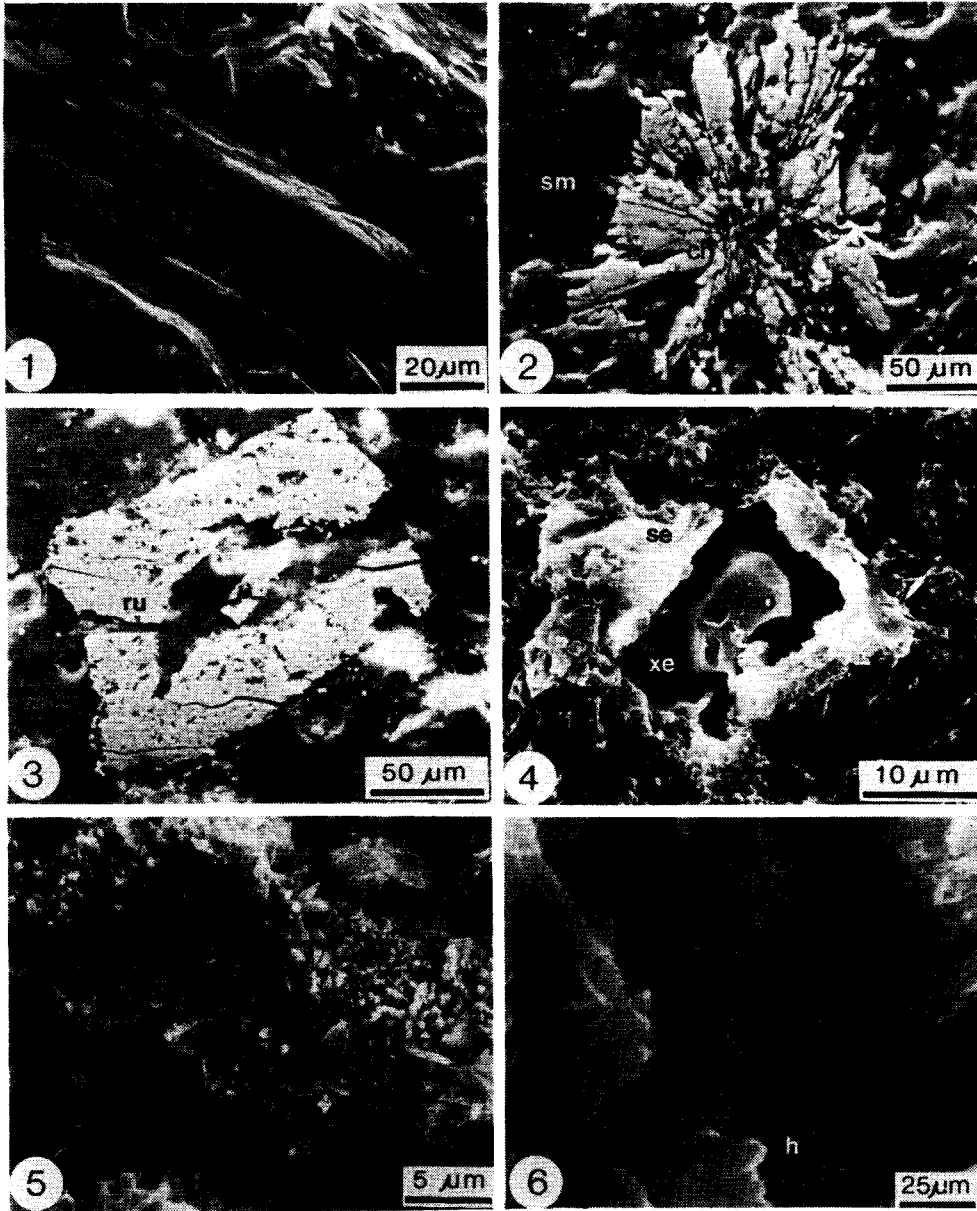


Fig. 5. Scanning electron micrographs of major and accessory minerals in the high aluminous ores.

(1) Flaky paragonite. (2) Chloritoid(ch) showing radial tabular form in a sericitic matrix(sm). Polished thin section. (3) Rutile(ru) showing square basal section in a sericitic matrix(sm). Polished-thin section. (4) Apatite(ap) and xenotime(xe) crystals formed in a cavity within kaolinite(ka) and sericite(se)-rich ore. (5) Acicular goethite(go) associated with platy kaolinite(ka). (6) Oval-shaped hematite(h) in a cavity.

함께 一部 産出되고 있는 바 葉片狀(Fig. 5-1)을 보이며 EDX定性分析結果 Na, Al, Si 및 K의 元素가 認知된다.

炭質物(carbonaceous material), 石英(quartz): 炭質物이 비교적 많은 低品位鑛石에서는 石英의 量이 增加하는 樣相을 보인다. 炭質物은 變晶을 이루는 自形的 캐올리나이트集合體內에서 規則적인 配列(Fig. 3-5)을 보이며, 基質內에서 다른 隨伴鑛物과 더불어 不規則하게 存在한다.

클로리토이드(chloritoid): 클로리토이드는 黃褐色, 또는 灰色을 띠는 鑛石(紅柱石-캐올리나이트-클로리토이드型, 캐올리나이트-클로리토이드-絹雲母型)에서 흔히 觀察된다. 柱狀結晶으로서 集合體를 이룬 것은 multiple twinning을 보이며 放射狀(Fig. 5-2)을 이루기도 한다. 클로리토이드는 結晶構造가 monoclinic과 triclinic으로 區分되는 바 3.25Å의 triclinic이 優勢하게 나타난다.

루타일(rutile), 電氣石(tourmaline), 저어콘(zircon): 各 類型의 鑛石에 副成分鑛物로서 微量 存在한다. 루타일은 微粒의 結晶으로 柱狀 또는 針狀을 보이며, 柱狀結晶이 C-軸에 直角으로 切斷된 面에서는 대체로 正方形(Fig. 5-3)을 보인다. 針狀結晶은 極微粒으로 石英內에 捕獲되어 있으며 炭質物이 비교적 많은 鑛石에서는 絹雲母質 基質內에 隨伴되어 微量 存在한다. 電

氣石은 黃灰色을 띠는 塊狀鑛石의 基質內에 微粒으로 散在하거나 細脈狀으로 存在한다.

저어콘은 絹雲母基質內에 微量 存在한다.

모나자이트(monazite), 磷灰石(apatite), 제노타임(xenotime): 微量 存在하는 磷酸鹽鑛物로서 모나자이트는 紅柱石內에 極微粒으로 捕獲(Fig. 3-4)되어 있으며 EDX 定性分析結果 P 外에 La, Ce 및 Th元素가 認知된다. 磷灰石은 鑛石內에 形成된 小空洞에 제노타임과 함께 存在한다(Fig. 5-4). 또한 제노타임은 極微粒의 集合體狀으로 觀察되기도 한다.

針鐵石(goethite), 菱鐵石(siderite), 赤鐵石(hematite): 針鐵石은 地表鑛石의 表面에서 캐올리나이트와 隨伴되어 針狀의 形態로 存在한다(Fig. 5-5). 菱鐵石은 클로리토이드와 密接히 隨伴되어 微量 認知된다. 赤鐵石은 地表鑛石에 形成된 小空洞內에서 oval-shape의 形態를 보인다(Fig. 5-6).

炭質物의 黑鉛化程度와 變成度

高알루미나鑛石中에 含有된 炭質物의 黑鉛化程度는 炭質物의 X-線廻折分析을 통해 알 수 있다(Landis, 1971). 鑛石中에 含有된 炭質物을 分離하여 X-線廻折分析을 實施하면 (002)面은 變成程度 即 黑鉛化程度에 따라 廻折曲線의 形態가 變하게 된다. 炭質物 試料에 對해 X-線廻

Table 2. Graphitization degree of carbonaceous material.

Sample No.	Height/width at 1/2 height	d(002)Å (at I max.)	d(002)Å (at 1/2 width at 1/3 height)	Degree by Landis(1971)
2-12	3.89	3.40	3.46	d ₁ A
1-11	1.0	3.40	3.44	d ₁ A
6-11	12.3	3.40	3.43	d ₁ A
6-13	2.64	3.35	3.49	d ₁ A
13-12	9.9	3.39	3.45	d ₁ A
134-14	10.7	3.37	3.37	d ₁
42-7	6.4	3.38	3.39	d ₁ A
144-13	15.8	3.36	3.37	d ₁

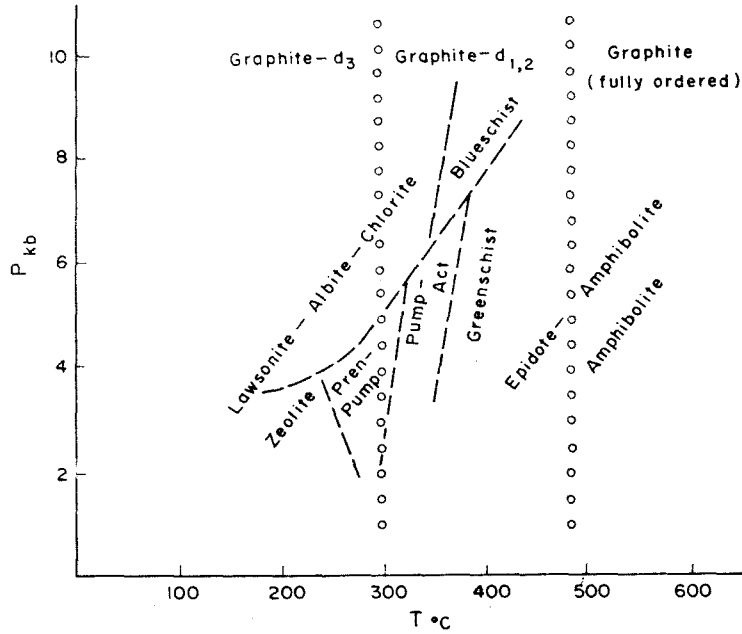


Fig. 6. P-T facies of metamorphic grid, showing estimated conditions at which graphite occurs. Estimated field boundaries of graphite and graphite-d indicated by open circles(Landis, 1971).

折分析을 實施한 後 Landis(1971)의 黑鉛化程度와 比較한 結果는 Table 2 와 같다.

炭質物의 黑鉛化程度를 graphite (fully ordered), graphite-d₁, d_{1A}, d₂, d₃로 區分(Landis, 1971)할 때 高알루미나鑛石內에 있는 炭質物은 대체로 graphite-d_{1A} 및 d₁에 該當된다. 이를 Landis(1971)의 變成度와 比較한 P-T diagram (Fig. 6)에 適用하면 graphite-d_{1A} 및 d₁의 變成溫度는 300°~500°C에 該當되고 變成相은 대체로 greenschist facies(일부 pumpellyite - actinolite facies 포함)에 屬한다.

雲母의 結晶度와 變成度

일라이트의 結晶度는 續成作用과 變成作用을 區分하는 尺度로서 많이 利用되고 있으며 測定하는 方法으로는 (002)面의 廻折線으로부터 10Å 廻折線의 높이와 10.5Å 廻折線의 높이를 比較하는 sharpness ratio法(Weaver, 1960)과 10Å 廻折線의 1/2높이에서의 너비를 計算하는 方法(Kisch, 1980) 등이 있다.

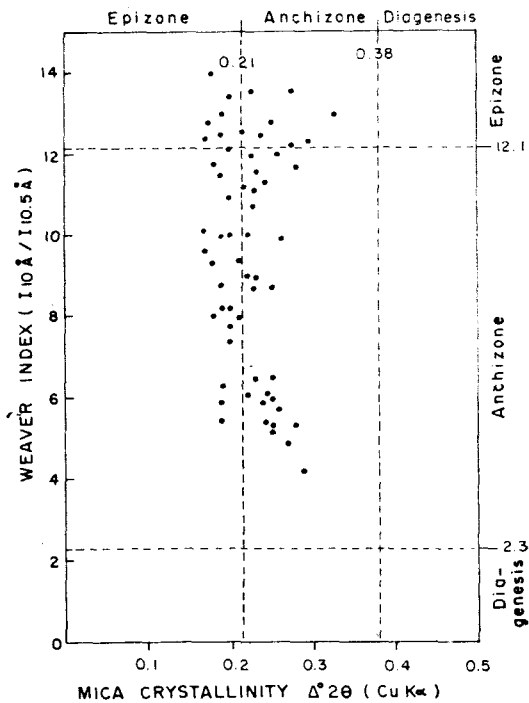


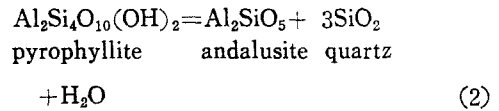
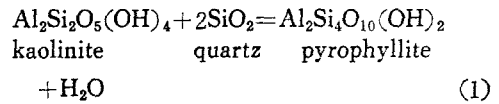
Fig. 7. Plots for the value of mica crystallinity from Weaver index and Kisch crystallinity value.

天雲山層의 各 地域에서 採取된 試料에 對해 上記 方法들에 依해 얻어진 結晶도를 plot한 結果는 Fig. 7에 나타나 있다. Weaver(1961)는 그의 實驗結果에서 그 比가 2.3以下는 續成作用帶, 2.3~12.1은 變成作用이 始作되는 anchizone, 그리고 12.1 以上은 低變成作用帶인 epimetamorphic zone으로 區分하였고, Kisch(1980)는 各 區分點을 0.38° 및 0.21°로 設定하였다. 위의 두 方法은 서로 逆關係가 成立되어 Kisch의 값은 적을수록, Weaver의 값은 클수록 變成度가 높아짐을 알 수 있다. 이러한 區分에 適用할 때 天雲山層의 鑛石中에 含有된 雲母의 結晶도는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 high anchizone 내지 low epizone에 該當되며 變成度는 very low grade~low grade 變成作用에 이를 것으로 判斷된다.

高알루미나鑛石의 形成

石, 캐올리나이트, 蠟石, 클로리타이드, 雲母類 등으로서 이러한 鑛物의 生成過程을 밝히는 것이 本 鑛石의 形成을 糾明하는데 重要하다 하겠다.

續成作的이 始作되기 前 캐올리나이트, 일라이트 또는 스�멕타이트 등이 풍부했으리라 推測되는 堆積物中에서 캐올리나이트는 續成作用을 거쳐 very low grade 또는 low grade 變成作用을 받으면서 石英과 反應하여 蠟石을 形成할 수 있고 점차 溫度가 上昇하면서 蠟石은 紅柱石으로 變하였을 것으로 推측된다. 이러한 過程을 反應式으로 表示하면 다음과 같다.



高알루미나鑛石을 構成하는 主要 鑛物은 紅柱 上記 (1)의 反應式은 Thompson(1970)의 實驗結

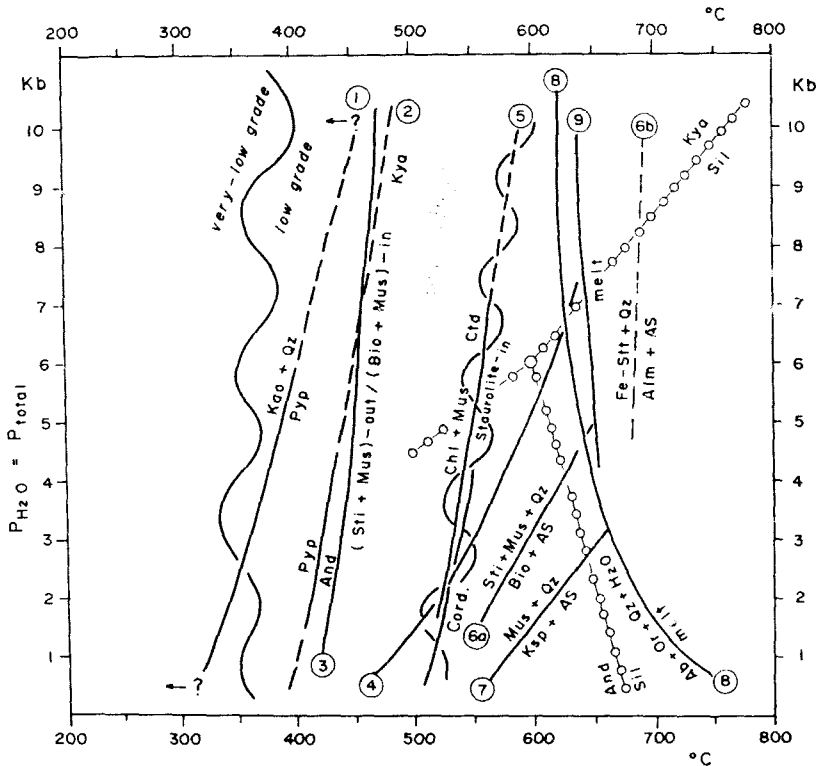


Fig. 8. Metamorphic reactions in pelitic rocks (After Winkler, 1976).

果에 의해 $P_{H_2O}=P_{total}$ 일때 1kb, $325^{\circ}C \pm 20^{\circ}C$; 2kb, $345^{\circ}C \pm 10^{\circ}C$; 4kb, $375^{\circ}C \pm 15^{\circ}C$ 에서 各各 反應式을 얻고 있다.

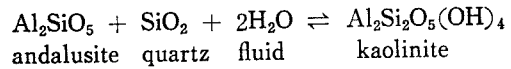
(2)의 反應式은 Hemley(1967) 등의 實驗結果에 의해 $P_{H_2O}=P_{total}$ 일때 1.0kb, $400^{\circ}C \pm 15^{\circ}C$; 1.8kb, $410^{\circ}C \pm 15^{\circ}C$; 3.9kb, $430^{\circ}C \pm 15^{\circ}C$ 에서 各各 反應式을 求하고 있다. 이러한 結果는 Winkler(1976)에 의해 提示된 Fig. 8의 曲線 ①, ②에 잘 나타나 있다.

鑛石內에 含有된 炭質物과 雲母의 結晶度로부터 鑛石이 賦存한 一帶가 very low~low grade에 該當되는 點으로 보아 Fig. 8의 low grade에 있는 形成關係가 잘 適用된다. Fig. 8의 曲線 ②에서 紅柱石은 $400^{\circ}C$ 이상에서 형성되는 것을 알 수 있다.

또한 Holdaway(1971), Richardson *et al.*, (1969) 등에 의한 Al-silicate polymorph의 安定 領域(Fig. 9)과 比較하여 볼 때, 鑛石內에서

는 硅線石, 藍晶石 등이 產出되지 않는 點으로 보아 紅柱石은 대체로 壓력 4.0kb($P_{H_2O}=P_{total}$) 未滿의 環境下에서 形成되었으며 生成溫度는 대체로 $400^{\circ} \sim 500^{\circ}C$ 에 該當되는 것으로 判斷된다.

한편 캐올리나이트는 紅柱石으로 부터 變質되어 形成되었는 마 이러한 特徵은 顯微鏡下에서 紅柱石이 캐올리나이트集合體로 交代된 樣相으로 부터 잘 알 수 있다. 紅柱石이 後期에 熱水 變質에 의해 캐올리나이트로 化하는 過程은



로 추측할 수 있다.

또 綠灰色鑛石中에 흔히 含有되어 있는 클로리토이드는 대체로 very low grade와 low grade 變成作用의 境界線近處에서 形成되기 시작하여 low grade 變成作用 地域에 存在하는 것으로 알려 져 있으며 이의 反應式은,

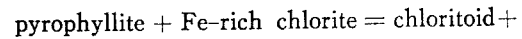


Table 3. Paragenetic sequence of major and accessory minerals in the high aluminous ore.

mineral	stage	sedimentary	diagenetic	metamorphic		hydrothermal	supergene
				very low	low		
andalusite						
kaolinite halloysite							
dickite							
nacrite							
boehmite							
diaspore							
gibbsite							
pyrophyllite						
illite							
sercite/muscovite							
paragonite							
quartz							
carbonaceous matter							
chloritoid							
rutile							
monazite							
zircon							
apatite							
xenotime							
siderite						
hematite							
goethite							

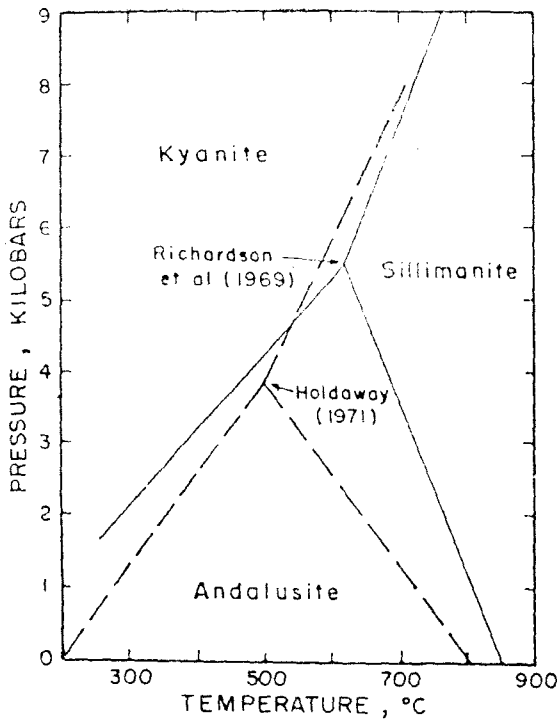


Fig. 9. Phase diagrams for the Al-silicate polymorphs determined by Richardson *et al.*, (1969), and Holdaway (1971).

quartz + H₂O로 나타난다 (Frey, 1978).

파라고나이트는 very low grade 變成作用時 最初로 形成되는 Na-雲母類鑛物로서 形成反應式은 Na-montmorillonite + albite = paragonite + quartz kaolinite (pyrophyllite) + albite = paragonite + quartz + H₂O (Chatterjee, 1972 and Zen, 1960) 로 나타나며 low grade 變成作用時에도 계속 存在할 수 있다.

高알루미나鑛石을 구성하는 重要鑛物의 產出 狀態 및 組織等 諸 特性으로 부터 鑛物生成順序에 따라 sedimentary, diagenetic, metamorphic (very low grade, low grade), hydrothermal 그리고 supergene stage 등으로 分類하면 Table 3 과 같다.

結 論

天雲山層內에서 產出되는 高알루미나鑛石은 地 域的으로 產出樣相의 差異를 보여주고 있는 바

대체로 캐올리나이트와 紅柱石이 優勢한 鑛石으로 代表될 수 있다.

鑛石中에 含有된 高알루미나 鑛物로는 캐올리 나이트와 紅柱石外에 덕카이트, 나크라이트, 할 로이사이트, 蠟石, 다이이스포이, 綱王, 모에마 이트 및 김싸이트가 產出되며 그 外 클로리토이 트, 絹雲母/白雲母, 파라고나이트, 電氣石, 저 어콘 등의 硅酸鹽鑛物, 石英, 루타일 등의 酸化鑛 物, 모나자이트, 磷灰石, 제노타임 등의 磷酸鹽 鑛物 등이 隨伴된다.

高알루미나鑛物의 生成過程은 알루미나가 充 부한 泥質堆積物이 續成作用을 거쳐 低變成作用 을 받으면서 蠟石을 形成하였으며 溫度가 上昇 함에 따라 紅柱石의 變成鑛物을 產出하였다. 또 後期의 變質作用에 의해 紅柱石은 캐올리나이트, 絹雲母 등으로 變하여 현재와 같은 캐올리나 이트質鑛石을 이루게 되었다.

變成作用의 程度는 各 變成鑛物의 安定領域, 雲母의 結晶度, 炭質物의 黑鉛化程度 등으로 미 루어 보아 very low grade~low grade에 屬하여, 特히 紅柱石의 生成條件은 壓力이 대체로 낮은 4.0kb 未滿의 環境으로서 生成溫度는 400~500°C 에 該當되는 것으로 判斷된다.

參 考 文 獻

金南長·李河榮(1962) 和順炭田 試錐調查報告 文. 炭田地質調查報告, 3卷, 國立地質調查所, 40p.
 朴正緒·蔣允換·黃仁典(1978) 石炭資源調查報 告書 第1號, 湖南炭田(I). 資源開發研究所 39p.
 徐海吉·林淳福·裴斗鍾·白相鎭(1985) 石炭資 源調查報告書 第7號(寒泉西部-春陽地域). 韓 國動力資源研究所, 48p.
 市村毅(1927) 和順無煙炭田調查報告. 朝鮮炭 田調查報告, 第二卷, 朝鮮總督府 燃料選鑛研 究所, 23p.
 Chatterjee, N.D.(1972) The upper stability limit of the assemblage paragonite+quartz and its natural occurrences. Contr. Mineral.

- Petrol., 34, 288-303.
- Frey, M.(1978) Progressive low-grade metamorphism of a black shale formation, Central Swiss, Alps. *J. Petrology*, 19, 95-135.
- Hemley, J.J.(1967) Stability relations of pyrophyllite, andalusite and quartz at elevated pressures and temperatures. *Am. Geophys. Union Trans.*, 48, 224 (abs.).
- Holdaway, M.J.(1971) Stability of andalusite and the aluminum silicate phase diagram. *Am. J. Sci.*, 271, 97-131.
- Kisch, H.J.(1980) Illite crystallinity and coal rank associated with lowest-grade metamorphism of the Tavayanne greywacke in the Helvetic Zone of the Swiss Alps. *Eclogae geologicae Helvetiae.*, 73, 753-777.
- Landis, C.A.(1971) Garphitization of dispersed carbonaceous material in metamorphic rocks. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 30, 34-45.
- Richardson, S.W., Gilbert, M.C. and Bell, P. M.(1969) Experimental determination of kyanite-andalusite and andalusite-sillimanite equilibria: the aluminum silicate triple point. *Am. J. Sci.*, 267, 259-272.
- Thompson, J.B., Jr.(1970) Geochemical reaction and open system. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 34, 529-551.
- Weaver, C.E.(1960) Possible uses of clay minerals in search of oil. *AAPG. Bull.*, 44, 1505-1518.
- Winkler, H.G.F.(1976) *Petrogenesis of Metamorphic Rocks*. Springer-Verlag, N.Y. 334p.
- Zen, E-an(1960) Metamorphism of lower Paleozoic rocks in the vicinity of the Taconic range in west-central Vermont. *Am. Mineral.*, 45, 129-175.