

## 한국과 일본의 백악기 일부 열수변질점토광상의 생성환경비교

고상모<sup>1\*</sup>, Tetsuichi Takagi<sup>2</sup>, Kazuki Naito<sup>2</sup>, 김상중<sup>3</sup>

<sup>1</sup>대전시 유성구 가정동 30, 한국지질자원연구원 지질연구부  
(kohsm@kigam.re.kr)

<sup>2</sup>Research Center for Deep Geological Environments,  
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)  
Chuo-7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan.  
(takagi-t@aist.go.jp)

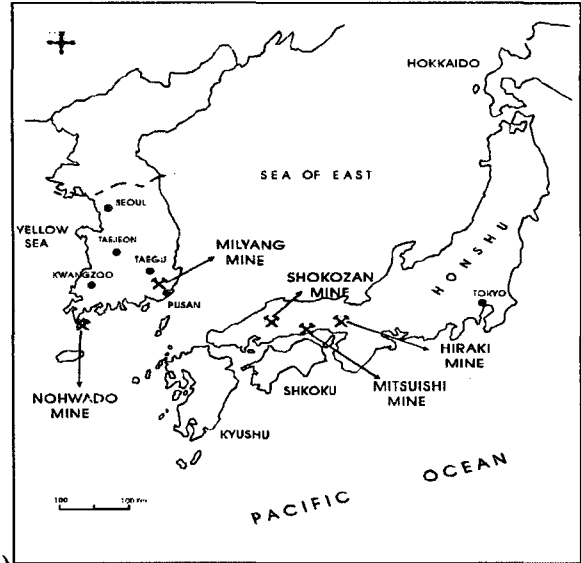
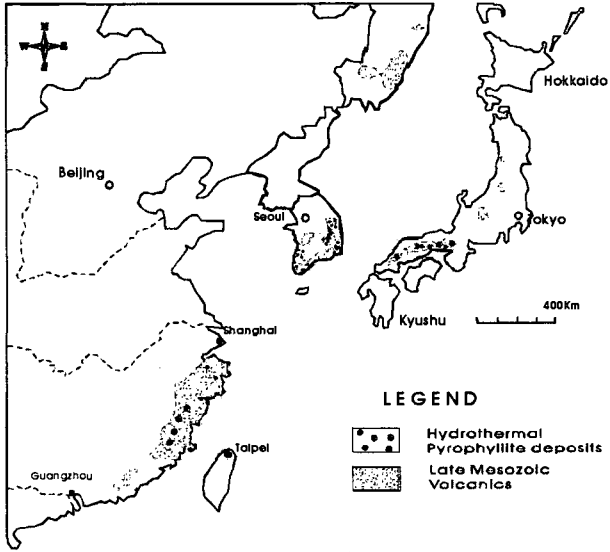
<sup>3</sup>대전시 유성구 궁동 220번지, 충남대학교 자연과학대학 지질학과  
(kimsang@cnu.ac.kr)

### 1. 서론

한국과 일본은 오랫동안 요업원료광물자원중에서 주로 중생대 백악기 화산암지대내 분포하는 열수변질 납석-고령토광상이 국한된 지역내에서 밀집되어 발달하고 있다. 이들 열수변질 납석-고령토광상들은 한국에서는 경상계 백악기 유천층군 화산암지대인 경상남 북도와 전라남도일대에 주로 분포하고 있으며 (Koh, 1996) 일본은 본토 서남부지역 백악기 화산암지대인 兵庫縣(Hogyo Pref.), 岡山縣(Okayama Pref.) 및 廣島縣(Hiroshima Pref.)지역에 밀집 분포되고 있다 (Hida, 1997) (Fig. 1). 이러한 공간적인 분포특성은 한반도와 일부 일본지역(현재 일본 서남일대)이 중생대 백악기에 클라판과 태평양판의 섭입활동에 수반된 화산활동이 활발하게 일어난 고기지열대로서 화산활동과 연속된 후화산활동의 결과 열수변질대가 형성되어 이러한 열수변질납석광상을 형성한 것으로 해석된다. 또한 북동 방향으로 발달하는 열수변질대는 중국남동부로 연결됨은 이러한 지질학적 유사성과 백악기말의 한반도와 일본열도의 지구조적 유사성 때문으로 해석된다 (Fig. 1). 따라서 한국과 일본에서 지질학적 및 광상성인적으로 유사성을 보이는 열수변질 기원의 납석 및 고령토 광상의 산출상태, 광물학적연구, 광상학적연구, 절대년령 측정 및 안정 동위원소 연구와 같은 지구화학적 연구를 수행하여 유사성을 보이는 광상들의 제반특성에 대한 비교연구를 시도 하였다.

### 2. 연구범위 및 방법

이 연구는 한국에 분포하는 대표적 납석광상인 밀양납석광상과 노화도납석광상 및 이와 지질환경이 유사한 일본 본토 남서부 지역 규모가 크고 대표적 열수변질 납석광상



인 兵庫縣(Hogyo Pref.)에 위치한 平木(Hiraki) 고령토광상, 岡山縣 (Okayama Pref.)에 위치한 三石(Mitsuishi) 납석광상지역 및 廣島縣 (Hiroshima Pref.)에 위치한 勝光山

Fig. 1. Distribution map of late Cretaceous volcanic belt and hydrothermal pyrophyllite deposits in East Asia.

Fig. 2. Locality of studied hydrothermal clay deposits (pyrophyllite and kaolin) in Korea and Japan.

(Shokozan) 납석광상에 대한 광물학적 및 지질학적특성과 형성시기를 비롯한 형성환경에 대한 비교연구를 시도 하였으며 이를 위하여 야외조사를 통한 변질광물의 산출상태규명과 변질대의 특성규명, 변질광물동정 및 광물공생관계 (XRD 및 현미경관찰), 변질광물형성시기 규명 (K-Ar dating), 변질점토광물의 안정동위원소 (H, O) 연구 및 황철석과 같은 유화광물을 대상한 황(S) 동위원소연구를 수행하였다.

### 3. 결과

#### 1) 지질학적 및 지체구조적 비교

한반도의 경상남북도와 전라남도로 연결되고 있는 중생대 백악기 화산암대는 열수변질납석광상의 주 분포지이다 (Fig. 1). 이러한 화산암대는 일부 일본서남일대와 중국남동부로 연결되고 있으며 또한 열수변질납석광상역시 이 화산암대내 밀집 분포한다 (Fig. 1). 이러한 화산활동-열수변질작용-심성활동은 중생대 백악기에 콜라판과 태평양판의 섭입활동에 수반된 화산활동이 활발하게 일어난 고기지열대로 설명되고 있다. 이 대 내에서의 납석광상들은 백악기 화산활동과 연속된 후화산활동의 결과 열수변질대가 형성되어 열수변질납석광상들을 형성하였을 것이며 북동방향으로 발달하는 열수변질대는 중국남동부

로 연결됨은 이러한 지질학적 유사성과 백악기말의 한반도와 일본열도의 지구조적 유사성 때문으로 해석된다.

## 2) 광상형성환경비교

### 가. 황동위원소연구

납석광상을 형성시킨 열수변질유체로부터 기원된 것으로 생각되는 유화광물들의 황동위원소값 ( $\delta S^{34}$ )은 노화납석광상이 0.1~3.4 ‰, 밀양납석광상이 -3.7~1.7 ‰ (문희수, 1994; 전효택외, 1991), 오히라납석광상이 -2.6~-2.7 ‰, 히라키카오린광상이 1.8 ‰, 쇼코잔납석광상이 -10.4~-7.1 ‰이다 (Table 1). 노화납석, 밀양납석, 오히라납석 및 히라키카오린광상은 마그마기원으로 생각되는  $\delta S^{34}$  가 0 ‰ 값 부근에 대체로 해당되나 쇼코잔납석광상은 다른 광상에 비해 상당히 결핍된 값을 보인다.

Table 1. Sulfur isotopic compositions of pyrites occurring in the pyrophyllite-kaolin deposits of Korea and Japan.

Deposit name	$\delta^{34}S$ (‰)	Reference	Deposit name	$\delta^{34}S$ (‰)	Reference
Nohwa	1.9	Koh et al.(2000)	Milyang	-2.4	Chon et al.(1991)
	2.2			-0.5	
	0.5			-0.6	
	1.2			-2.3	
	0.1			-3.7	
	0.5			-0.2	
	3.4			-0.8	
Milyang	1.7	Moon(1994)	Ohira	-2.4	Koh et al.(2000)
	-0.3	Chon et al.(1991)		-0.9	
	-0.6		-2.7		
	-3.5		-2.6		
	-2.4		1.8		
	-2.5		-10.4	Koh et al.(2000)	
	-0.5	-7.1			

### 나. 산소 및 수소 동위원소연구

노화납석광상의  $\delta D$ 값이 -76~-121 ‰,  $\delta O$ 값이 3.5~5.6 ‰, 밀양납석광상은 각각 -82~-93 ‰, 2.8~5.9 ‰이다. 일본 오히라납석광상의  $\delta D$ 값은 -71~-77 ‰,  $\delta O$ 값이 -1.4~2.5 ‰이고, 히라키카오린광상의 수소 및 산소 동위원소값은 각각 -81~-85 ‰, 3.2~10.6 ‰이고, 쇼코잔납석광상은 -71~-90 ‰, 0.4~6.7 ‰을 각각 보이고 있다 (Table 2). 상위의 5개 광상의 동위원소값은 거의 유사한 범위를 보이고 있고 마그마수영역 (Taylor, 1974)의 주변부에 도시되는 양상을 보인다. 이러한 특성은 광상을 형성시킨 열수유체가 지표부근으로 상승하면서 마그마수/천수 혼화율이 적었다는 것을 의미한다.

다. K-Ar 연대

한국에서의 열수변질점토광상 (납석-고령토-명반석-견운모)은 대부분 백악기말에 형성된 유천층군 화산암내에 분포하고 있으며, 화산활동과 관련된 열수변질작용기가 66-81 Ma (전남지역; 72-81 Ma, 경상분지; 66-79 Ma)로서 Santonin~Maastrichtian기에 해당

Table 2. Oxygen and hydrogen isotopic compositions of pyrophyllites and sericites occurring in the pyrophyllite deposits of Korea and Japan.

Deposit name	$\delta D$ (‰)	$\delta^{18}O$ (‰)	Reference	Deposit name	$\delta D$ (‰)	$\delta^{18}O$ (‰)	Reference
<b>Korea</b>				<b>Japan</b>			
Nohwado	-97	4.4	Koh et al. (2000)	Ohira	-71	2.5	Koh et al. (2000)
	-100	4.9			-75	-1.4	
	-76	4.9			-71	2.2	
	-101	4.5			-77	-1.4	
	-85	5.3		Hiraki	Koh et al. (2000)	-85	4.5
	-98	5.5				-84	3.8
	-121	3.5				-85	3.2
	-79	5.5				-81	10.6
	-90	4.5				Shokozan	Hida(1997)
-81	5.6	-90	6.4				
Milyang	-92	4.0	-71	2.0			
	-82	4.2	-87	6.3			
	-86	2.8	-88	6.7			
	-88	4.6	-83	6.3			
	-92	4.2	-77	0.4			
	-87	3.2	-74	2.3			
	-86	3.8					
-93	5.9						

Table 3. K-Ar ages of hydrothermally altered minerals in the study area.

Deposit name	Sample No.	Analyzed mineral	K (wt.%)	Rad. <sup>40</sup> Ar (10 <sup>-8</sup> ccSTP/g)	Age (Ma)	Non-Rad. <sup>40</sup> Ar(%)	Reference
Nohwado	NHW-SER	Sericite	7.39±0.15	2122.6±21.5	72.6±1.6	1.9	Koh et al.(2000)
					71.0±3.5		Naito et al.(1999)
					72.7±3.6		Naito et al.(1999)
Milyang	MRA-37	Sericite	5.33±0.16	1468.8± 5.7	69.7±2.1	8.6	Koh et al.(2000)
Ohira	99OP-1	Sericite	7.25±0.15	2307.7±23.4	80.2±1.8	0.9	Koh et al.(2000)
Ohira	99OP-5	Sericite	6.95±0.14	2216.9±22.3	80.4±1.6	1.1	Koh et al.(2000)
Shokozan					66.6~68.8		Kitagawa et al. (1988)
Hiraki					63.8±1.5		Myint et al. (1995)

된다고 해석되었다 (Koh, 2000). 이 연구에서도 전남지역의 노화광상의 변질대에서 분리

된 견운모의 형성시기가 71.0~72.6 Ma, 경남지역의 밀양광상은 69.7 Ma, 일본의 남서쪽에 위치한 오카야마 현, 三石 (Mitsuishi)지역에 위치한 오히라납석광상은 백악기 화산암을 모암으로 하며 변질대에서 채취된 견운모의 연령은 80.2와 80.4 Ma로서 전남지역 및 경남지역의 광상보다는 다소 오랜연령을 보이고 있다. 또한 쇼코잔납석광상은 67~69 Ma (Kitagawa et al., 1988), 히라키카오린광상은 64 Ma (Myint et al., 1995)으로 오히라납석광상의 연령을 제외한 다른 광상들의 생성시기는 거의 비슷한 연령을 보인다 (Table 3).

#### 4. 결론 및 토의

##### 1) 광상형성환경비교

한국의 밀양광상, 노화광상, 일본 쇼코잔광상의 차이는 광상형태의 차이에서 찾아볼 수 있다. 노화와 쇼코잔광상은 모암인 유문암질응회암의 지층구조와 정합적으로 형성된 sheet형광상으로 특징되고 있으나 (Naito et al., 1999) 밀양광상은 상부로 갈수록 팽창되면서 가지처럼 분리되는 일종의 풍선(balloon)형의 광체모양을 가진다 (Takagi et al., 2000). 노화광상의 경우는 주로 유문암질 용암 또는 유문암질 응회질퇴적암류가 모암인데 반해 밀양광상은 안산암질용암 및 안산암질 응회암이 모암이며 쇼코잔광상은 석영-안산암 및 유문암질응회암과 일부 용암류가 모암이다.

따라서 이들 광상은 모암과 주변층의 투수율에 크게 지배되어 광상형의 규모와 형태면에서 차별성을 보이고 있는 것으로 해석된다. 즉 밀양광상의 경우 치밀한 안산암용암층에서

수평적으로 발달하는 층상 내지는 sheet상 광상이 형성되기가 불가능하였을 것이다. 따라서 밀양광상은 수직적으로 발달하여 지표부근에서 팽배해지는 일종의 mushroom형과 유사한 ballooon형광상이 형성되었을 것이다. 두 번째 차이는 aluminosilicate 광물의 산상과 광물조합의 차이이다. 열수변질작용의 최고정점에서 노화광상과 쇼코잔광상은 corundum + diaspore 또는 corundum + diaspore + andalusite 의 광물조합을 흔히 보이는데 반해 밀양광상에서는 diaspore+andalusite의 광물조합은 산출되나 corundum이 수반되지 않는다. 밀양광상에서 corundum이 산출되지 않는 것은 변질정점에서 열수용액의 온도가 노화광상과 쇼코잔광상보다 낮았다는 것을 의미한다. 따라서 이들 변질경로가 열수용액의 화학성에 따라서 차별성을 보여주고 있다. 대조적으로 노화광상과 쇼코잔광상의 silica 활동도가 변질온도가 300℃를 초과 하였을 때 떨어지기 시작할 것이다. Silica의 활동도의 감소는 열수유체의 비등에 기인될 것이며 이는 열수유체의 SiO<sub>2</sub> 와 같은 비휘발성물질은 증기상에 거의 포함되지 않기 때문이다 (Fournier, 1985). 사실 노화납석광상의 다이아스포아가 보통 석영과 공존하는 것은 비등현상을 지시해주는 비평형상태임을 말한다 (Naito et al., 1999). 열수유체의 비등온도는 계의 압력에 대단히 예민하며 열수계의 감압이 비등온도의 급격한 감소를 초래시킨다 (Bodnar, 1995). 이러한 점에서 밀양광상이 다른 광상과의 차별성을 추측한다면 비등온도의 차이는 형성심도가 노화광상과 쇼코잔광상보다 더욱 더 깊었음을

지시해준다.

## 2) 광화유체의 기원

앞에서 언급된 바와같이 황, 수소 및 산소동위원소분석값을 토대로 광화유체의 기원을 유추하고자 한다. 황동위원소의 값은 쇼코잔납석광상을 제외하고는 대체로 0 %의 근사 값을 갖는다. 이러한 값은 비교적 마그마기원의 유체에 기인한 광상으로 추정할수 있다. 쇼코잔납석광상은 상당한 부의 값을 갖고 있는데 이는 마그마기원의 유체가 주변의 모암과 상당한 반응관계에서 광상이 형성되었다는 것을 암시한다. 산소 및 수소동위원소의 결과를 보아도 대부분의 분석치가 마그마영역의 주변부에 투영되고 있다는 사실은 광화유체의 산소 및 수소도 마그마에 기원되며 열수기동안 주변과의 반응이 많지 않았다는 것을 암시한다 하겠다. 그러나 지질학적 유사성 (유문암-안산암성분)에도 불구하고 다소의 차이를 갖는 것은 광상이 형성될 당시의 광화유체의 물리화학적 조건이 상이하였을 가능성이 있다는 것을 나타낸다.

## 3) 광상의 형성시기

한국의 남부지역에 배태된 열수변질점토광상들은 화산호환경에서 백악기말에 관입 또는 분출한 화산암과 관련된 광상들이다. 따라서 한국의 대부분의 광상들은 유천층군 화산암내에 분포하고 있고, 열수변질시기도 66-81 Ma (전남지역; 72-81 Ma, 경상분지; 66-79 Ma)로 Santonoan-Campanian-Maastrichtian기에 해당된다고 해석되어 왔다 (Koh and Chang, 1997; Koh et al., 2000). 이 연구에서도 전남지역의 노화광상이 71.0~72.6 Ma, 경남지역의 밀양광상은 69.7 Ma, 일본의 남서쪽에 위치한 오히라광상이 80.2와 80.4 Ma로서 전남지역 및 경남지역의 광상보다는 다소 오랜연령을 보이고 있다. 또한 쇼코잔납석광상은 67~69 Ma (Kitagawa et al., 1988), 히라키카오린광상은 64 Ma (Myint et al., 1995)로서 오히라납석광상의 연령을 제외한 다른 광상들의 생성시기는 거의 비슷한 연령을 보인다. 이러한 연대의 유사성은 동일시기의 화산호환경의 마그마활동과 관련되어 생성된 광상으로 생각된다. 이러한 광화작용-마그마활동시기에 한국과 일본은 동일판의 선상에 위치하고 있었다는 것을 나타낸다 할 수 있다.

## 5. 참고문헌

- 문희수 (1994) 경상분지내 요업원료광물의 광물학적 특성 및 생성기구 : 경상분지내 금속-비금속 광상의 생성환경. KOSEF, 91-06-00-03, 183-305.
- 전효택, 정영욱, 김인준 (1991) 경남 및 전남 일부 납석광상의 산소-황 동위원소 조성파광상성인. 광산지질, 24, 97-105.
- Bodnar, R. J. (1995) Fluid-inclusion evidence for a magmatic source for metals in porphyry copper deposits. In: Magmas, fluids, and ore deposits (J.F.H. Thompson

- ed.), Short course series, Mineralogical Association of Canada, 23, 139-152.
- Fournier, R. O. (1985) The behavior of silica in hydrothermal solutions. In: *Geology and geochemistry of epithermal systems* (B. R. Berger and P. M. Bethke eds.), *Reviews in Economic Geology*, 2, 45-61.
- Hida, T. (1997) Pyrophyllite mineralization of southwest Japan related to acidic igneous activities of Late Cretaceous age -Genesis of the Shokozan pyrophyllite deposits, Hiroshima Prefecture-. Ph.D. Thesis, Akita University, 160p.
- Hida, T., Ishiyama, D., Mizuta, T., and Ishikawa, Y. (1996) Geological characteristics and formation environments of the Yano-Shokozan pyrophyllite deposit, Hiroshima prefecture, Japan volcanic successions and hydrothermal alteration processes. *J. Clay Soc. Japan*, 36, 62-72 (in Japanese with English abstract).
- Kitagawa, R., Nishido, H. and Takeno, S. (1988) K-Ar ages of the sericite and kaolin deposits in the Chugoku district, southwest Japan. *Mining Geology*, 38, 279-290.
- Koh, S. M. (1996) Geochemical characteristics of the Cretaceous volcanic rocks and Bukok hydrothermal deposits in the Haenam volcanic field, Chollanamdo. Korea. Ph.D. Thesis, Seoul National University, 210p.
- Koh, S. M. and Chang, H. W. (1997) Comparative anatomy of the hydrothermal alteration of Chonnam and Kyongsang hydrothermal clay alteration areas in Korea. *Econ. Environ. Geol.*, 30, 81-87.
- Koh, S. M., Takagi, T., Kim, M. Y., Naito, K., Hong, S. S., and Sudo, S. (2000) Geological and geochemical characteristics of the hydrothermal clay alteration in South Korea. *Resource Geol.* 50, 229-242.
- Myint, K. K., Watanabe, M and Nishido H. (1995) K-Ar ages of the felsic magmatism and their significance on volcanostratigraphy and kaolin mineralization at the Hiraki mine, Hyogo prefecture, SW Japan. *Resource Geol.* 45, 341-345.
- Naito, K., Kim, M. Y., Takagi, T., Koh, S. M., Hida, T., and Sudo, S. (1999) Geology and alteration zoning of the Nohwado pyrophyllite deposit, southwest Korea (1). On the No. 1 deposit of the Nohwa mine. *Resource Geol.* 49, 163-173 (in Japanese with English abstract).
- T. Takagi, S. M. Koh, M. Y. Kim, K. Naito and T. Sudo (2000) Geology and hydrothermal alteration of the Milyang pyrophyllite deposit, southern Korea. *Resource Geol.*, 50, 243-256.
- Taylor, H.P. (1974) The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alterations and ore deposition. *Econ. Geol.*, 69, 843-883.