한국광물학회지 제 19 권 제 4 호 (2006년 12월)
J. Miner. Soc. Korea, 19(4), 325-336 (December, 2006)

울산지역 사문암의 형성환경 해석을 위한 예비연구

Preliminary Study on the Formation Environment of Serpentinite occurring in Ulsan Area

고 상 모(Sang-Mo Koh)[1]* · 박 충 구(Choong-Ku Park)[2] · 소 원 주(Won-Ju Soh)[3]

[1]한국지질자원연구원 지질기반정보연구부
(Geology and Geoinformation Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)
[2]방어진 중학교
(Bang-O-Jin Middle School)
[3]울산광역시 교육청
(Ulsan Metropolitan Office of Education)

요약 : 국내에서 산출하는 사문석은 산업원료자원으로 활용되는 있는 주요한 원료광물 중 하나이다. 국내 사문암은 초염기성암의 열수변질산물로 해석되어 왔으며, 울산 철광상지역, 경북 안동지역, 충남 홍성-청양지역 및 경기 가평지역에서 산출하고 있다. 이 연구에서는 울산 철광상 일대에 분포하는 사문암에 대해 주로 야외에서의 산출상태, 광물학적 연구 및 화학성분분석을 통하여 석회암, 철광화작용 및 사문석변질작용의 관련성에 대한 해석이 시도되었다. 울산지역 사문암은 초염기성암인 페리도타이트를 구성하는 감람석이나 휘석의 수화작용에 의해 사문석을 형성시키고, 이 사문석이 다시 변질되어 활석을 형성시킨다. 이러한 변질을 초래시키는 열수유체는 백악기 화강암 관입에 의해 도입되었을 가능성이 가장 높으며, 천수의 혼화에 의해 보다 많은 양의 유체가 공급된 열수순환계에 의해 열수변질작용을 초래 시킨 것으로 해석된다. 변질암들의 SiO_2, Fe_2O_3, MgO 등 일부 주성분원소의 변화는 사문석화작용, 활석화작용 및 철광화작용의 변질세기에 주로 지배되고 있다. 그러나 Al_2O_3와 CaO의 함량범위는 변질되지 않고 잔존된 방해석 및 각섬석이나 변질광물인 녹니석 등 광물의 함량비에 더욱 더 지배된다. 탄산염암의 존재는 해성퇴적기원(천해성 석회암)이든 화성기원(카보너타이트)이든 간에 스카른형 철광상을 형성 시킬 수 있는 지질학적인 환경을 제공 한 것으로 보인다. 지질 및 구성광물의 공생관계로 보아 탄산염암의 형성 → 백악기 화강암 정치 → 사문석변질작용 → 철광화작용의 순으로 형성 되었을 것으로 판단된다.

주요어 : 사문암, 형성환경, 열수변질작용, 사문석화작용, 울산철광상, 철광화작용

ABSTRACT : Domestic serpentinite is one of the important industrial minerals utilizing in the iron manufacturing company such as POSCO in Korea. Serpentinite is distributed in the Ulsan Fe deposit, Andong, Hongseong-Cheongyang, and Gapyeong areas. This study tries to interpret the relationship among the formation of carbonate rocks, iron mineralization, and serpentinite alteration throughout the study of field occurrence, mineralogy, and chemical compositions. Serpentine is formed by the break-down of olivine and pyroxene of parent peridotite. The serpentinization is inferred to be formed by

*교신저자: kohsm@kigam.re.kr

the hydrothermal fluid derived from intruded Cretaceous granite and the addition of meteoric water. Variation of major oxides such as SiO_2, Fe_2O_3, and MgO in serpentinized rocks are controlled by the degree of serpentinization and Fe mineralization. Variation of Al_2O_3 and CaO contents of altered rocks is dependent on the amount of the residual minerals such as calcite and hornblende, and on the degree of chloritization. The presence of carbonate rocks reported in the sedimentary origin or igneous origin (carbonatite) provided a geological environment to form skarn type Fe deposit regardless of its origin. The geological processes of Ulsan Fe deposits are inferred to be formed as the order of the formation of carbonate rocks → the intrusion of Cretaceous granite → serpentinization → Fe mineralization by the interpretation of field occurrence and mineralogical characteristics.

Key words : serpentinite, formation environment, hydrothermal alteration, serpentinization, Ulsan Fe deposit, Fe mineralization

서 론

국내 사문암과 성인적으로 관련되는 초염기성암이 산출하는 지역은 울산 철광상지역, 경북 안동지역, 충남 홍성-청양지역, 경기 가평지역으로 크게 구분된다. 사문석은 국내에서는 제철용 원료광물로 주로 활용되어 왔으며, 일부는 비료용으로도 활용되고 있다. 사문석은 자주공급율(자급도)이 100%에 달하는 주요 산업원료광물 중에 속한다. 2005년 국내 년간 생산량은 약 300,000톤으로서 2000년 이후 다소 감소되고 있는 추세이다(한국지질자원연구원과 산업자원부, 2006).

울산철광상 지역의 사문암에 대한 사문석화작용이나 성인에 대해서 김규한 외(1990; 1993)가 연구한 바 있으며, 안동지역 사문석의 광물학적 연구 및 성인 연구가 황진연 외(1993)에 의해 연구 되었으며, 충남 홍성-청양지역 사문석은 우영균과 강희주(1999), 우영균 외(2001), 송석환 외(2004) 및 김영태와 우영균(2005)에 의해 연구된 바 있다. 이들 연구결과들에 의하면 국내 사문석은 모두 초염기성암인 페리도타이트(peridotite)가 열수변질작용을 받아 형성 된 것으로 해석하고 있다.

이 연구에서는 울산 철광상 일대의 저품위 철광석과 사문암에 대해 주로 야외에서의 산출상태, 광물학적 연구 및 화학성분분석을 통하여 석회암, 철광화작용 및 사문석변질작용의 관련성에 대한 해석을 시도하였다. 지금까지 철광상의 광상학적 연구, 석회암의 성인 및 사문석 변질작용이 서로 연계성 없이 별도로 연구되어 왔으며, 양자간 내지는 삼자간의 관련성에 대한 연구는 시도 된 적이 없다. 그러나 이 연구는 야외에서의 산출상태와 극히 제한된 시료의 광물학적 연구를 통해 이루어졌음으로서 향후 단일광물별 광물화학자료, 안정동위원소자료, 방사성동위원소자료 및 년대 측정 자료 등이 추가 되어야 보다 명확한 관련성이 해석 되리라 본다. 이 연구는 이를 위한 예비연구의 일환임을 부언한다.

연구방법

이 연구를 위해 야외조사를 수행하여 철광화작용, 사문암체내의 변질정도 및 변질양상, 산출상태 등을 파악하였고, 철광상지역 내와 사문암체 내에서 많은 시료를 채취하였다. 이 중에서 다시 가장 대표적인 시료 15개를 선택하여 변질광물의 광물동정 및 조직을 파악하였다. 이를 위해 박편을 제작하여 편광현미경 관찰과 X-선 회절분석기(Rigaku D-Max 1000 series, Japan)를 이용하여 분석하였고 주성분 화학조성 분석은 한국지질자원연구원에서 XRF (X-ray Fluorescence Spectrometry)를 이용하여 분석하였다.

광물동정 및 분석에 이용된 시료는 다음과 같다(표 1). 철광상에서 채취된 시료는 철광화작용이 초래된 대표시료 3개(F-1～F-3)와 방해석 1개 시료(C-1)이다. 철광상 부근 사문암체 내에서 채취된 시료는 사문암 대표시료 7개(S-1～S-7)와 철광석 1개 시료(F-4) 및 맥상으로 관입하는 방해석 1개 시료(C-2)이다. 또한 사문암체 내 관입하는 화강암 2개 시료(S-3-1～S-3-2)를 채취하였다.

Table 1. Representative samples used for this study

Sample No.	Rock type	Sample No.	Rock type	Sample No.	Rock type	Sample No.	Rock type
F-1	니질변질암	F-2	스카른	F-3	스카른(철광석)	F-4	스카른(철광석)
S-1	사문암질암	S-5	사문암질암	S-5	사문암질암	S-7	활석변질암
S-2	사문암	S-3	사문암	S-4	사문암	S-3-1	화강암
S-3-2	화강암	C-1	석회암 (방해석)	C-2	석회암 (방해석)		

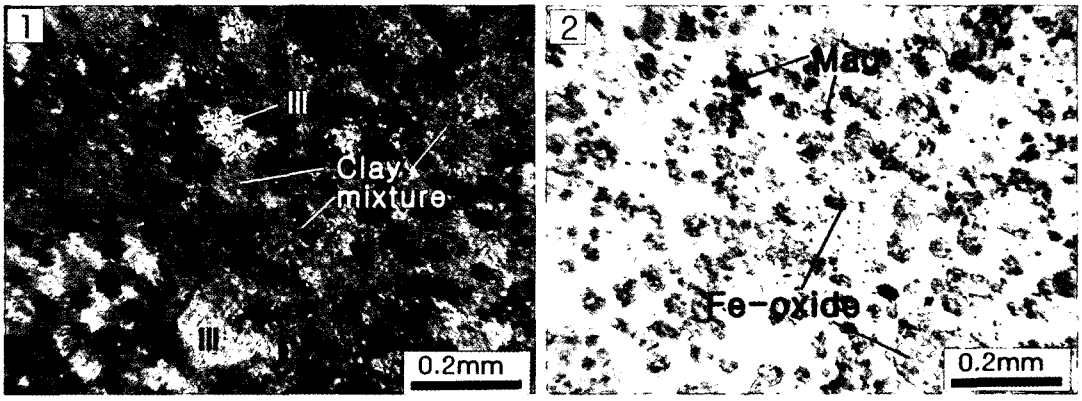

Fig. 1. Microscopic photographs of argillic altered rock occurring near the Ulsan Fe deposit (Ill: illite; Mag: magnetite). Sample number is F-1. Left photograph is under crossed nicol and right one is under open nicol.

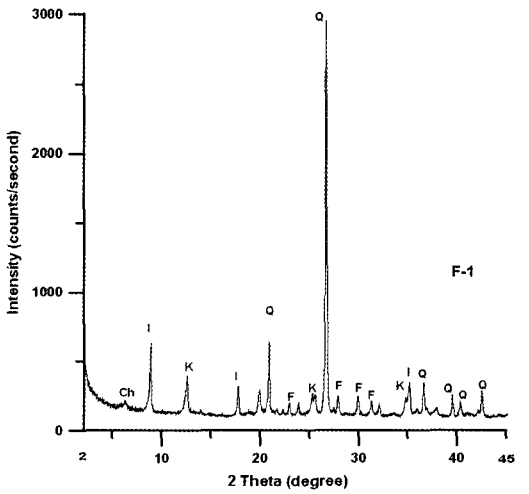

Fig. 2. X-ray diffractogram of argillic altered rock (F-1) near the Ulsan Fe deposit. Q: quartz; I:illite; K: kaolin; Ch: chlorite; F: feldspar.

암석기재 및 암석화학

니질변질암

울산 철광상 부근의 일부 지역은 울산층에 속하는 실트암이 화강암의 관입에 의해 니질변질작용(argillic alteration)을 받아 형성 된 것으로 생각된다. 기질부는 미립의 점토광물류(일라이트 + 녹니석 + 카오린광물)로 구성되고 있으며(그림 1), 결정편으로는 작은 결정의 석영과 장석이 산출된다. 소엽편상 결정의 일라이트(견운모)는 집합체를 이루고 있으며, 이는 장석으로 변질되어 장석의 결정형태를 어느 정도 유지하는 가상(pseudomorph)인 것으로 판단된다. 자철석 결정들이 이차적으로 산화되어 산화철 광물들이 집합체를 이루어 점문조직(spotted texture)을 보인다(그림 1). 현미경관찰과 X-선 회절분석 결과 이 변질암의 주 구성광물

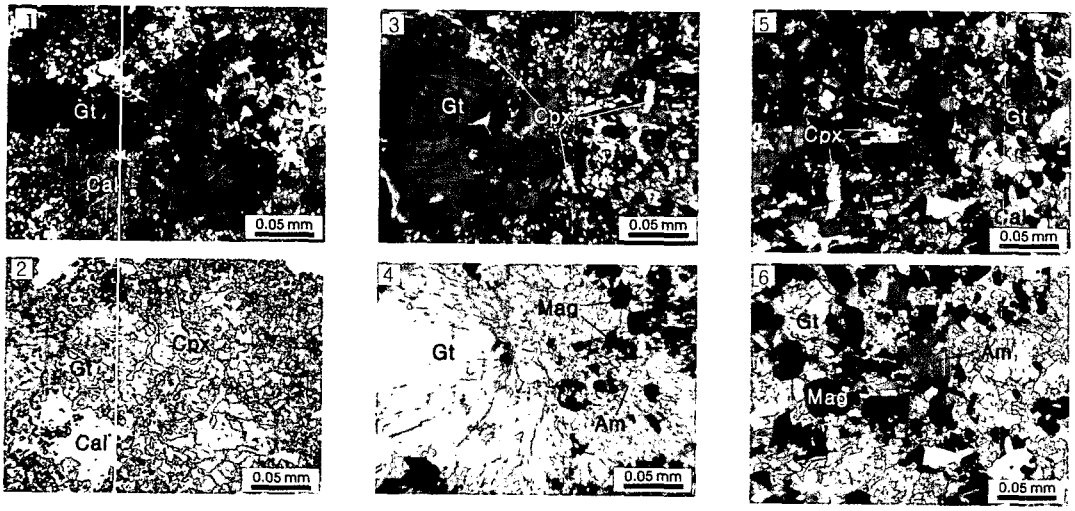

Fig. 3. Microscopic photographs of skarn rocks occurring in the Ulsan Fe deposit (Gt: garnet; Cal: calcite; Cpx: clinopyroxene; Mag: magnetite; Am: amphibole). Sample number is F-2 and F-3. Number 1, 3, and 5 photos are under crossed nicol and number 2, 4, and 6 photos are under open nicol.

은 석영, 일라이트 및 카오린광물이며 부성분 광물로는 장석, 녹니석, 자철석, 산화철광물이다(그림 1, 2).

이 니질변질암의 화학조성은 SiO_2 58 wt%, Al_2O_3 21.83 wt%, K_2O 4.70 wt% 및 Fe_2O_3 8.89 wt%로서 견운모화작용을 주로 하는 니질변질작용과 약한 철광화작용(Fe-mineralization)을 받은 것으로 보인다(표 2).

스카른

울산 철광상 일대에 분포하는 일부 광석들은 Ca-석류석(andradite or grossular garnet), 방해석, 단사휘석(투휘석), 자철석, 사문석, 각섬석 등으로 주로 구성된다(그림 3, 4). 석류석은 커다란 자형결정으로 산출되거나(그림 3-3, 3-4), 파쇄된 작은 결정편들이 석기를 이루는 방해석 큰 결정 내 산재되어 분포한다(그림 3-5, 3-6). 석류석은 사문석에 의해 교대되고 있음이 흔히 확인된다. 방해석은 거정으로서 기질부를 이루고 있으며, 타 광물들이 표면연정(overgrowth)하여 잔존되어 있기 때문에 변질 후 잔류된 잔유물로서 산출된다(그림 3-1, 3-2). 단사휘석은 주로 투휘석으로서 소량 산출하며, 작은 주상결정으로 산재되어 잔존하고 있다(그림 3-3, 3-4). 자철석은 타형의 큰 결정으로 산출하거나 작은 결정으로 광염(dissemination)되어 산출한다(그림 3-4, 3-5, 3-6). 각섬석은 소량 산출하며 자철석과 접하는 것으로 보아 서로 공존하는 것으로 추측된다. 사문석은 소량 산출하고 석류석을 흔히 교대한다.

Ca-석류석이나 단사휘석, 각섬석, 자철석, 방해석 등의 조성광물로 보아 이 암석들은 전형적인 스카른에 속한다. 이 암석들의 화학조성은 SiO_2 9.3~45.8 wt%, Al_2O_3 0.5~9.5 wt% 및 Fe_2O_3 9.3~81.0 wt%로서 철-광화작용(Fe-mineralization)의 정도에 따라 매우 차별적인 화학조성을 보인다(표 2).

사문암질암 및 사문암

울산 철광상 일대에 분포하는 사문암은 다양한 정도의 사문석화작용(serpentinization)을 받은 것으로 확인된다. 사문석화가 다소 약하게 진행된 변질암(시료번호 S-1, S-5 및 S-8)은 감람석, 사문석, 각섬석 및 사방휘석이 주성분광물을 이루고 있으며 활석, 자철석 및 녹니석 등이 부성분광물로 산출된다(그림 5, 6, 7).

감람석은 가장 풍부하게 산출되는 광물이며 사문석으로 변질되어 단열을 따라 쪼개져 구형이나 타원형의 작은 결정으로 파쇄되어 잔유물로 잔존되어 있다(그림 6). 사문석은 거의 대부

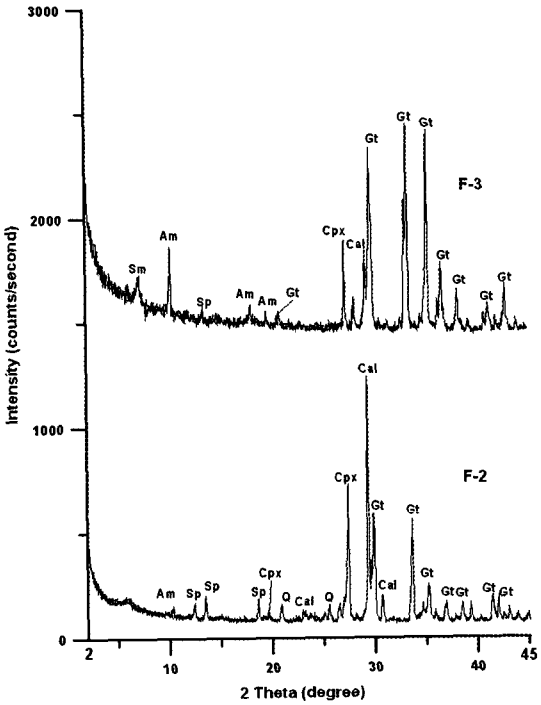

Fig. 4. X-ray diffractograms of skarn rocks occurring in the Ulsan Fe deposit (Sample number is F-1 and F-2). Am: amphibole; Sm: smectite; Sp: serpentine; Gt: garnet; Cpx: clinopyroxene; Cal: calcite).

분 감람석이나 사방휘석으로부터 변질되고 감람석으로의 변질이 보다 뚜렷히 관찰된다. 세맥상으로 발달하면서 감람석을 파쇄화(fragmentation) 시키면서 사문석화가 진행된다(그림 5-1, 5-3). 사문석은 긴 주상 내지는 침상형태(그림 5-3)이나 다소 두꺼운 엽상(그림6-3)의 결정 형태를 보이기도 한다. 각섬석은 침상 결정들이 모여 주상의 형태를 보이며(그림 5-5), 결정 형태로 보아 보통각섬석(hornblende)이 아닌 양기석(actinolite) 또는 투각섬석(tremolite)일 가능성이 크다. 자철석은 주로 사문석 내부에 선상 배열되는 양상이 뚜렷하며(그림 5-4), 사문석 변질과 밀접하게 관련되어 있다.

이 사문암질암의 화학조성은 SiO_2 42.5~44.0 wt% (평균 43.3 wt%), Al_2O_3 0.4~1.9 wt% (평균 1.1 wt%), Fe_2O_3 8.9~10.0 wt% (평균 9.5 wt%), CaO 1.0~1.5 wt% (평균 1.2 wt%), MgO 37.4~40.0 (평균 38.4 wt%)의 매우 균질한 화학조성을 보이는데 이는 사문석화 작용의 정도가 서로 유사함을 의미한다(표 2).

사문석화가 강하게 진행된 변질암(시료번호 S-2, S-3 및 S-4)은 주로 사문석과 자철석으로 구성되고 소량의 녹니석이 수반된다(그림 8, 9). 사문석은 엽상의 소결정편들이 서로 연정(intergrowth)을 이룬다(그림 8-5). 자철석은 단

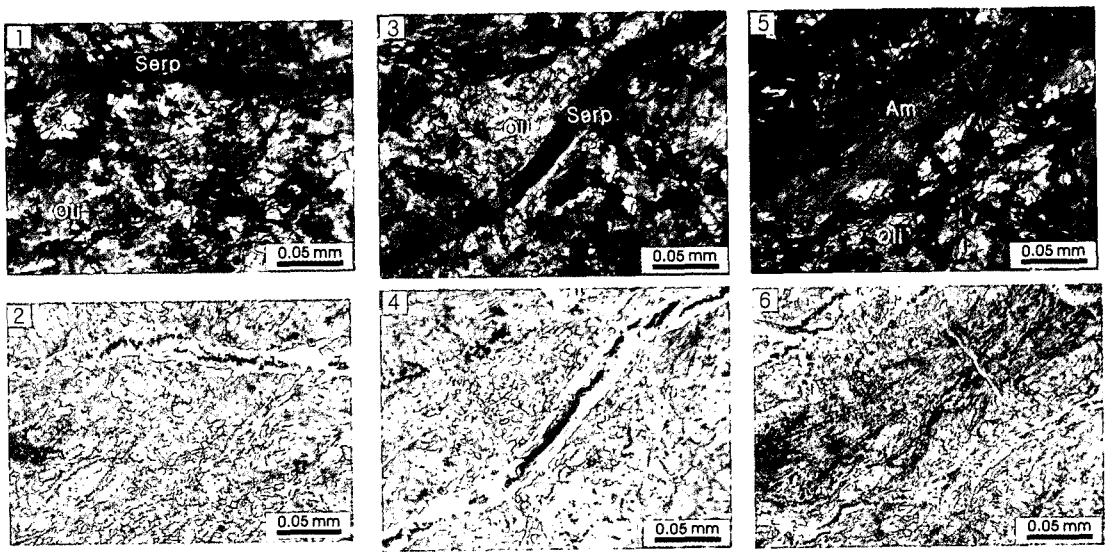

Fig. 5. Microscopic photographs of serpentinized rocks occurring in the Ulsan Fe deposit (Serp: serpentine; Oli:olivine; Am: amphibole). Sample number is S-5. Number 1, 3, and 5 photos are under crossed nicol and number 2, 4, and 6 photos are under open nicol.

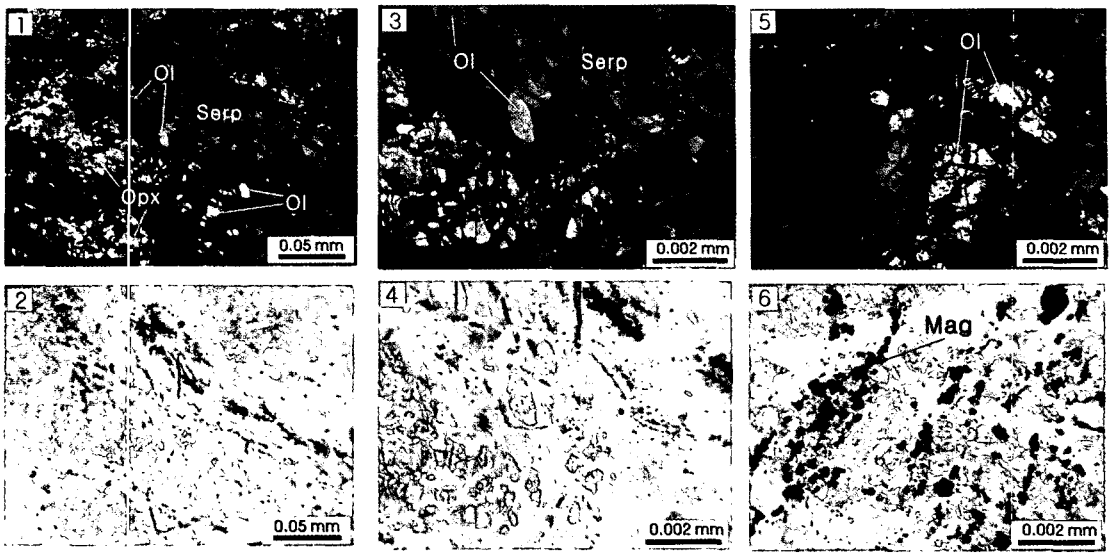

Fig. 6. Microscopic photographs of serpentinized rocks occurring in the Ulsan Fe deposit (Serp: serpentine; Oli:olivine; Opx: orthopyroxene; Am:amphibole). Sample number is S-1. Number 1, 3, and 5 photos are under crossed nicol and number 2, 4, and 6 photos are under open nicol.

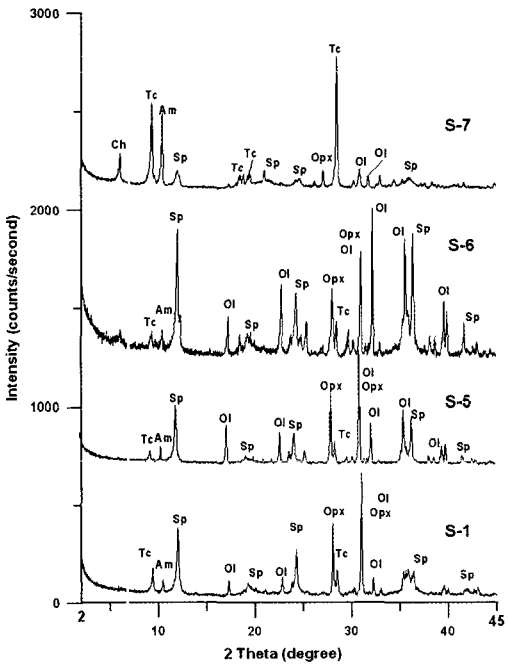

Fig. 7. X-ray diffractograms of serpentinized rocks occurring in the Ulsan Fe deposit (S-5, S-6, and S-7). Ch: chlorite; Tc: talc; Sp: serpentine; Am: amphibole; Ol: olivine; Opx: orthopyroxene.

열을 따라 선상 배열되는 산상을 나타낸다(그림 8-4, 8-6).

사문암은 SiO_2 37~41 wt% (평균 40 wt%), Al_2O_3 0.2~0.8 wt% (평균 0.5 wt%), Fe_2O_3 7.7~8.9 wt% (평균 8.2 wt%), CaO 0.1~2.5 wt% (평균 0.9 wt%), MgO 36~39 (평균 38 wt%)의 화학조성을 보인다(표 2). 사문암은 사문석질암 보다 다소 낮은 SiO_2 함량비와 높은 MgO 함량비를 나타내는데 이는 사문석과 자철석의 광물함량비에 따라 지배된 결과이다(표 2).

활석변질암

사문암 변질대내에는 일부 활석변질대도 확인된다. 활석변질암(시료번호 S-7)은 활석, 각섬석, 사문석 및 녹니석으로 주로 구성되고 소량의 감람석, 적철석, 자철석과 방해석이 수반된다(그림 7, 10). 이 변질암은 활석이 기장 풍부하게 산출되며 작은 엽상집합체를 이루고 있다(그림 10-1). 활석은 각섬석으로부터 변질되어 각섬석의 잔유물이 확인된다(그림 10-3).

활석변질암의 화학조성은 SiO_2 55.56 wt%, Al_2O_3 0.76 wt%, Fe_2O_3 4.68 wt%, CaO 5.48 wt%, MgO 25.07 wt%이다(표 2).

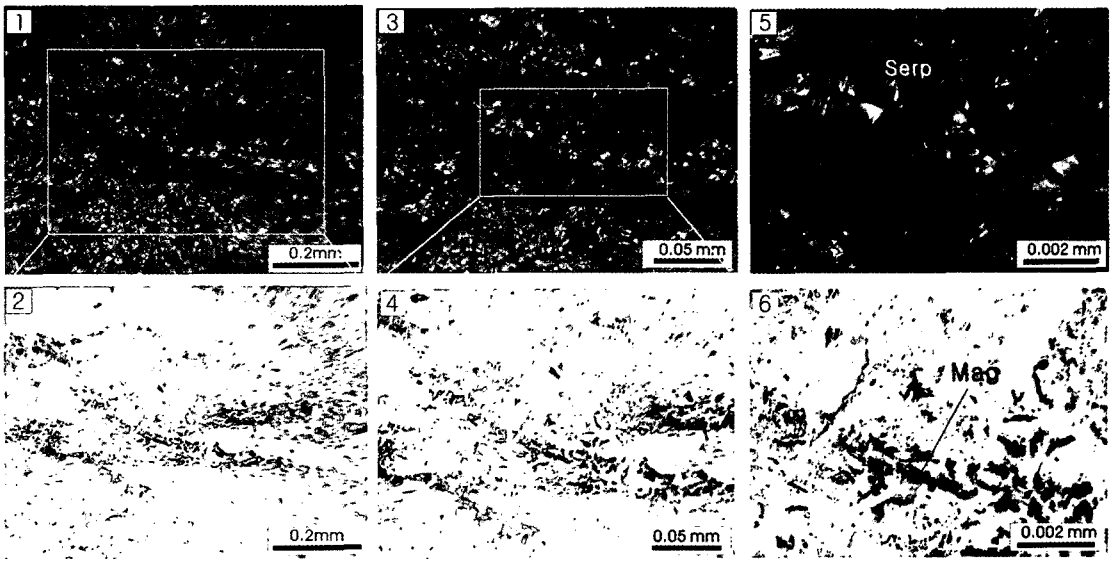

Fig. 8. Microscopic photographs of serpentinite occurring in the Ulsan Fe deposit (Serp: serpentine; Mag:magnetite). Sample number is S-2. Numbers 1, 3, and 5 photos are under crossed nicol and number 2, 4, and 6 photos are under open nicol.

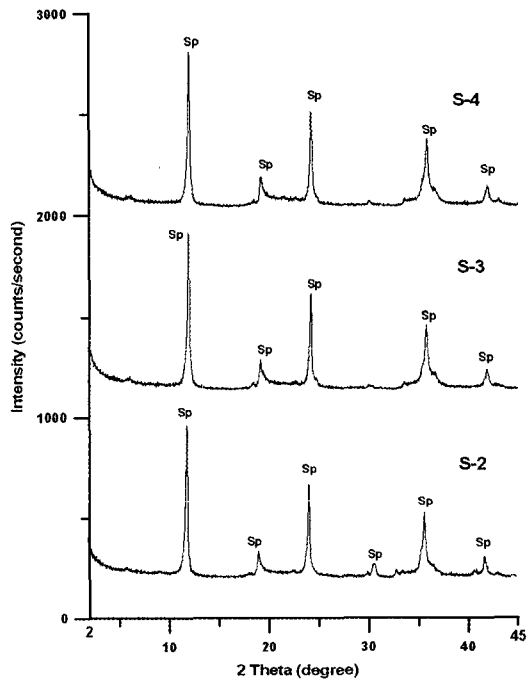

Fig. 9. X-ray diffractograms of serpentinite occurring in the Ulsan Fe deposit (S-2, S-3 and S-4). Sp:serpentine.

미문상 화강암

연구지역에서 산출하는 화강암은 중립질의 흑운모화강암에 속한다. 석영, 사장석, K-장석, 흑운모로 주로 구성되고 각섬석, 스핀, 인회석, 저어콘 등이 수반된다. 석영은 타형의 불규칙한 형태를 띠고 특히 K-장석 내 내부성장(intergrowth)하여 미문상조직(micrographic texture)을 띤다(그림 10-5). 사장석은 누대구조(zonal structure)를 흔히 나타내고 약하게 견운모화(sericitization) 되어있다. K-장석은 미퍼사이트(microperthite)가 대부분이고 특징적으로 미문상의 석영이 내부성장하여 미문상조직을 띠기 때문에 미문상화강암으로 칭한다. 흑운모는 다소 두꺼운 엽편을 이루며 약하게 녹니석화(chloritization) 되어 있다.

화강암의 화학조성은 SiO_2 75.6~76.0 wt%, Al_2O_3 12.5~13.3 wt%, Fe_2O_3 0.3~1.2 wt%, Na2O 3.4~5.5 wt%, K2O 1.5~4.4 wt%, CaO 0.4~0.5 wt%, MgO 0.8~1.1 wt%이다(표 2).

석회암

석회암은 거의 다 결정질 방해석으로 구성된다(그림 10-6). 화학조성은 CaO 54~55 wt%

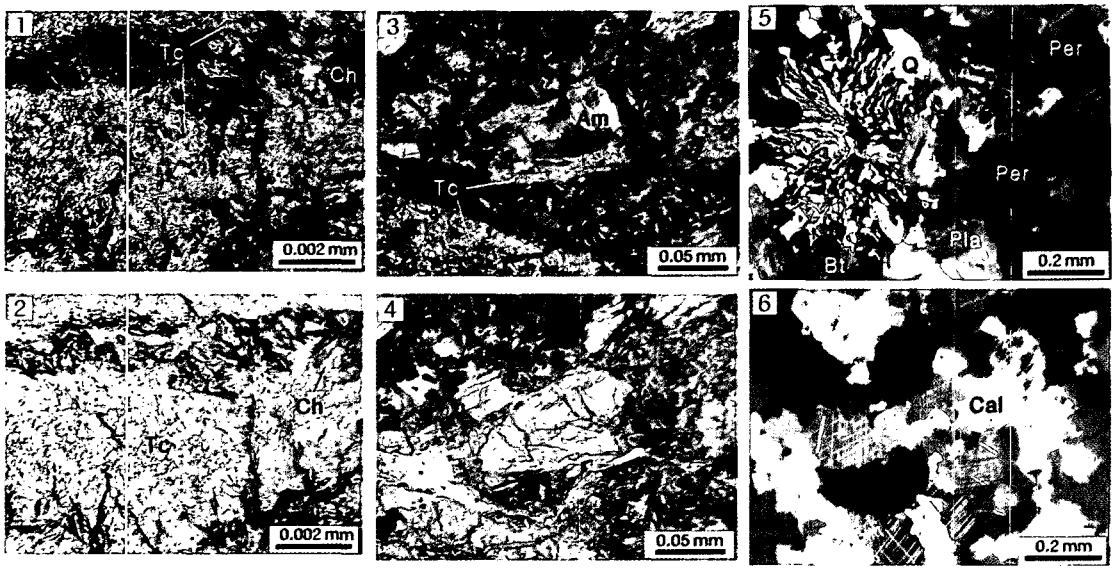

Fig. 10. Microscopic photographs of serpentinized rocks occurring in the Ulsan Fe deposit (Tc: talc; Ch: chlorite; Am: amphibole; Q: quartz; Per: perthite; Bt: biotite; Pla: plagioclase; Cal: calcite). Sample number is S-7 (1, 2, 3, and 4), S-3-1(5) and C-1 (6). Number 1, 3, 5, and 6 photos are under crossed nicol and number 2 and 4 photos are under open nicol.

Table 2. Chemical compositions of altered rock, skarn, Fe-ore, serpentinite, granite and limestone occurring in the Ulsan Fe deposit (unit: wt%)

Sample No.	Rock type	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	Na_2O	K_2O	CaO	MgO	MnO	P_2O_5	ig-loss	total
F-1	니질변질암	58.00	0.84	21.83	8.89	0.37	4.70	0.12	0.51	0.03	0.02	4.36	99.67
F-2	스카른	45.77	0.34	9.46	9.26	0.04	3.08	21.07	2.81	0.83	0.08	6.42	99.16
F-3	스카른(철광석)	27.93	0.11	3.16	44.66	0.03	0.07	20.00	1.60	0.95	0.07	1.12	99.70
F-4	스카른(철광석)	9.29	0.14	0.47	81.03	0.06	0.06	6.50	1.40	0.41	0.07	0.10	99.53
S-1	사문암질암	43.94	0.04	0.36	8.90	0.01	<0.01	1.22	37.41	0.13	<0.01	8.00	100.03
S-5	사문암질암	42.54	0.05	1.09	9.96	0.05	<0.01	0.98	40.04	0.14	<0.01	4.96	99.83
S-6	사문암질암	43.45	0.08	1.90	9.50	0.07	<0.01	1.49	37.88	0.14	<0.01	4.99	99.52
S-7	활석변질암	55.56	0.05	0.76	4.68	0.05	<0.01	5.48	25.07	0.05	<0.01	8.27	99.99
S-2	사문석	37.45	0.05	0.23	8.89	<0.01	<0.01	2.51	36.44	0.10	<0.01	14.78	100.48
S-3	사문석	40.10	0.05	0.78	7.70	<0.01	<0.01	0.11	38.72	0.13	<0.01	12.84	100.46
S-4	사문석	41.20	0.04	0.47	8.09	<0.01	<0.01	0.11	37.86	0.15	<0.01	12.60	100.55
S-3-1	화강암	75.60	0.24	12.54	1.23	3.42	4.39	0.53	0.79	0.05	0.04	0.95	99.78
S-3-2	화강암	76.01	0.26	13.27	0.31	5.46	1.51	0.37	1.13	0.03	0.04	1.40	99.79
C-1	석회암	1.30	0.02	0.13	0.29	<0.01	0.11	54.42	0.23	0.40	<0.01	42.40	99.32
C-2	석회암	0.24	0.02	0.03	0.07	<0.01	0.03	54.84	0.86	<0.01	0.02	43.43	99.56

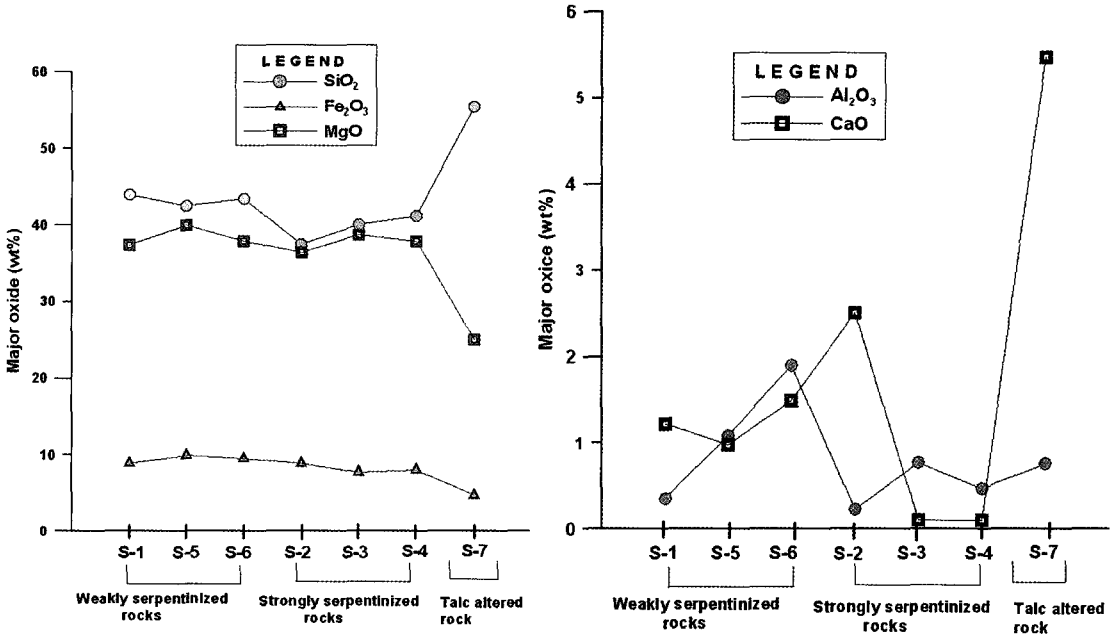

Fig. 11. Variation diagram of SiO_2, Fe_2O_3, MgO contents (left diagram) and Al_2O_3 and CaO contents (right diagram) according to alteration intensity and type.

로서(표 2) 거의 순수한 석회암에 속한다.

석회암형성, 사문석화작용 및 철광화작용

석회암 형성

연구지역에서 석회암은 동서 450 m, 남북 200 m의 불규칙한 타원의 형태로 소규모로 분포하고 있다. 북편에는 화산암류, 동편에는 울산층, 서편은 화강암류에 의해 접하여 이들 암석 사이에 끼여 있는 산상이다.

지금까지 보고된 이 석회암의 성인은 크게 두 가지로 보고되고 있다. 첫째는 고생대 조선계 석회암이 양산주향이동단층을 따라 약 120 km 남측으로 전이된 것으로 해석하여 고생대 해성퇴적층으로 해석한 경우이다(김규한 외, 1990). 김규한 외(1990)는 이 지역 탄산염암의 주성분과 미량성분조성이 해성기원의 탄산염암과 유사하다고 해석하였다. 둘째는 화성기원의 탄산염암인 카보너타이트(carbonatite)가 최초 김옥준(1985)에 의해 제안되었고, 김정진 외(1987)에 의해 해석한 바 있다. 최근 들어 양경희와 황진연(1999)은 방해석 유체포유물 연구를 통하여 방해석 내 포함된 열수가 카보너타이트 마그마에서 용리된 고압의 유체이며 이 유체에 의해 철 광화작용 및 열수변질작용을 초래 하였다고 주장하였으나, 그 이후 방해석의 산소 및 탄소 동위원소비가 전형적인 맨틀 기원의 카보너타이트가 아닌 지각 내에서 형성된 2차적 재용융 마그마로 해석하였다(양경희 외, 2001). 이는 초염기성암 마그마가 상승하다 지각 내에 있던 석회질암을 용융시켜 탄산염질 마그마를 형성하고 현재의 장소에 관입한 것으로 추론하고 있다.

사문석화작용

사문암은 초염기성암의 열수변질작용이나 백운암질 석회암의 열수변질작용에 의해 일반적으로 형성된다(김규한 외, 1993).

연구지역의 사문암의 성인에 대해 김규한 외(1990)는 연구지역 사문암이 감람석, 사방휘석, 사문석 및 자철석 등으로 주로 구성되고 이 광물조성은 페리도타이트(peridotite)와 유사하고, 탄소 및 산소 동위원소조성비($\delta^{13}C$ = -9.7~-8.4 ‰, $\delta^{18}O$ = +9.7~+12.4 ‰)가 매우 균질

하고 심부열수기원과 유사함으로써 심부기원의 페리도타이트를 원암으로 해석하였다. 또한 사문암의 화학조성 중 Cr, Ni, Co 등의 원소가 부화되어 있기 때문에 맨틀기원의 초염기성암 지화학성과 유사하다고 해석 한 것이다. 김규한 외(1993)는 위의 사실 외에 사문석의 산소 및 수소 동위원소비 조성값(δD = -96~106 ‰, $\delta^{18}O$ = +1.7~ +7.1 ‰)이 대륙지각의 사문석(antigorite)에 대비된다고 주장하였으며 형성온도는 488~646°C로서 고온형으로 해석하였다.

양경희 외(2001)는 초염기성암 마그마가 사문암체를 형성시킨 것으로 생각하고 있으며, 탄산염질 마그마 정치 이전에 파쇄대를 따라 관입 한 것으로 보고 있다. 특히 연구지역은 심부파쇄대가 발달한 곳으로 심부 마그마 관입이 용이한 지질구조적 요건을 갖추고 있다고 해석 한 듯하다.

황진연 외(1993)는 안동지역 사문암체의 광물학적 연구를 통하여 이 지역 사문암체가 페리도타이트로부터 유래 되었다고 해석하고, 기원 마그마가 상승하는 도중 열수변질작용에 의해 사문석화가 진행 된 것으로 보고 있다.

충남지역 사문석암체는 기원암인 더나이트(dunite)와 하즈버자이트(harzburzite)가 녹색편암상에서 백립암상까지 이르는 변성작용 시 변성수의 주된 영향으로 생성되었다고 해석하였다(김영태와 우영균, 2005).

연구지역의 사문암은 감람석, 휘석 및 각섬석류들이 사문석화 되고 잔존하고 있는 것으로 보아 초염기성인 페리도타이트가 원암일 가능성이 가장 크다. 사문석화를 초래시킨 열수유체는 화강암으로부터 유래 되었을 가능성이 가장 높으며 화강암 관입 이후 잔여열수와 천수의 혼합수가 열수계를 형성시켜 열수순화계의 중심대에서는 사문석 변질대가 형성되고 외곽으로 갈수록 활석변질대로 전이 되었을 가능성이 크다. 사문석은 포스터라이트(forsterite: Mg_2SiO_4)와 같은 Mg-감람암이나 투휘석(diospide)의 수화작용(hydration)에 의해 사문석(antigorite or chrysotile: $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$)이 다음과 같은 반응에 의한 변질작용으로 가정하고 있다(황진연 외, 1993).

$$5Mg_2SiO_4 + 4H_2O \rightarrow 2Mg_3Si_2O_5(OH)_4 + 4MgO + SiO_2$$

포스터라이트 → 사문석

$$3CaMg(Si_2O_3)_2 + 2H_2O \rightarrow Mg_3Si_2O_5(OH)_4 + 3CaO + SiO_2$$

투휘석 → 사문석

위의 반응에서 유리된 이산화규소는 이미 형성된 사문암과 반응하여 활석을 형성시킬 수 있다.

$$Mg_3Si_2O_5(OH)_4 + H_2O + 2SiO_2 \rightarrow Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$$

사문석 → 활석

변질정도와 변질유형에 따른 주성분원소의 변화도를 보면 사문석화의 변질세기가 높으면 SiO_2의 감소 경향은 뚜렷히 확인되나 MgO는 큰 변화를 보이지 않는다(그림 11). 이는 변질산물인 사문석과 모체인 감람석의 함량비에 따라 좌우 될 것이다. 그러나 활석 변질작용이 세어지면 SiO_2는 급격히 증가되고 MgO와 Fe_2O_3는 감소된다(그림 11). CaO는 사문석이나 활석의 변질작용 세기보다도 잔유물로 잔존된 방해석의 함량비에 더욱 더 지배되고 있다. 그림 11에서 활석 변질암인 S-7 시료의 CaO 함량이 매우 높은 것은 변질되지 않고 잔존된 각섬석의 함량비가 높기 때문이다. Al_2O_3 역시 변질세기보다 녹니석과 같은 Al를 함유한 광물의 함량비에 더욱 더 지배된다.

철 광화작용

울산 철광상은 석회암을 교대한 전형적인 석회질 스카른 광상으로써 직립에 가까운 파이프상 광체로 산출되며, 자철석과 함께 북측 호온펠스와의 경계부에 회중석이 부분적으로 광염되어 있는 것으로 알려져 있다(Choi and Imai, 1993). 이 광상은 Fe, W 외에 Cu, Pb, Zn, As, Bi, Ni, Co, Cr, Ag, Sn, In, Te, Sb 등이 수반된 다금속광화작용(polymetallic mineralization)의 특성을 보여준다. Choi와 Heo (2000)는 철

광화작용의 시작온도가 약 464°C 이상이며 염농도(salinity)는 46 wt%로 보고하였으며, 광화작용은 고 산성마그마티즘(felsic magmatism)과 기원적으로 관련되어 있어 이 지역의 가대리 화강암체가 관계화성암으로 추론하고 있다.

결론 및 고찰

1) 탄산염암은 주변의 화강암, 화산암 및 퇴적암(울산층)에 의해 둘러싸여 있는 소규모 동심원상으로 노출되어 있어 포획암의 산상을 보여주는 것 같으나 수직단면도에서는 깔대기형으로서 화성기원의 카보너타이트일 가능성도 제안된 바 있다.

2) 울산 철광상은 Ca-석류석(andradite or grossular garnet), 방해석, 단사휘석(투휘석), 자철석, 사문석, 각섬석 등으로 주로 구성되는 석회질 스카른형에 속한다.

3) 사문암은 초염기성암인 페리도타이트를 구성하는 감람석이나 휘석의 수화작용에 의해 사문석을 형성시키고, 이 사문석이 다시 변질되어 활석을 형성시킨다. 이러한 일련의 변질을 초래시키는 열수유체는 화강암으로부터 유래 되었을 가능성이 가장 높다. 그러나 소규모지만 사문암체를 형성시키기 위해서는 화강암으로부터만 유래된 유체로는 넓은 지역에 변질을 초래시키기가 불가능하며, 천수의 혼화에 의해 보다 많은 양의 유체가 공급되어 열수순환 대류계를 형성시켜야 연구지역 사문암체 정도의 변질작용을 초래 시킬 수 있을 것이다.

4) 열수변질작용은 초염기성암 외 울산층의 퇴적암에도 니질변질작용이 초래되었으나 사문석변질작용과의 관련성은 제한된 시료에서 파악키가 어렵다.

5) 변질암들의 SiO_2, Fe_2O_3, MgO 등 일부 주성분원소의 변화는 사문석화작용, 활석화작용 및 철광화작용의 변질세기에 주로 지배되고 있다. 그러나 Al_2O_3와 CaO의 함량범위는 변질되지 않고 잔존된 방해석 및 각섬석이나 변질광물인 녹니석 등 광물의 함량비에 더욱 더 지배된다.

6) 탄산염암의 존재는 해성퇴적기원이든 화성기원이든간에 스카른형 철광상을 형성시킬 수 있는 지질학적인 환경을 제공하였다.

7) 지질 및 구성광물의 공생관계로 보아 탄산염암의 형성 → 화강암 정치 → 사문석변질작용→철광화작용의 순으로 형성되었을 것으로 판단된다.

8) 탄산염암의 형성은 사문석 변질작용과 철광화작용과의 관련성이 없을 수 있으나 사문석 변질작용과 철광화작용은 시기를 달리 하겠지만 동일 심부관입체로부터 유래된 열수유체에 의해 초래되었을 가능성을 제시한다.

사 사

이 논문이 예비연구라 부족한 점이 많은데도 불구하고 자세하게 심사하고 교열해 주신 충남대학교 김원사 교수님과 익명의 심사위원께 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

김규한, 박재경, 양종만, 吉田尙弘 (1990) 울산철광산의 탄산염암과 사문암의 성인. 지질학회지, 26, 407-417.

김규한, 박재경, 양종만, 佐竹 洋 (1993) 울산철광산 지역의 사문암의 사문석화작용에 대한 연구. 광산지질, 26, 267-278.

김영태, 우영균 (2005) 충남지역 사문암내 감람석과 휘석의 사문석화작용. 한국지구과학회지, 26, 297-304.

김옥준 (1985) 울산철산의 성인. 제18차 광산지질학회 학술발표요약문, 190p.

김정진, 최수용, 이효민 (1987) 울산광산에서 산출되는 탄산염암 복합체에 관한 고찰. 제42차 대한지질학회 학술발표 요약문 13p.

송석환, 최선규, 오창완, 서지은, 최성호 (2004) 충남 홍성 및 광천지역 초염기성암의 암석 및 지구화학. 자원환경지질학회지, 37, 477-497.

양경희, 황진연 (1999) 경상분지 남동부 울산 탄산염암체의 열수유체. 한국지구과학회지, 20, 242-249.

양경희, 황진연, 옥수석 (2001) 울산광산에 분포하는 탄산염암체의 성인에 관한연구: 카보너타이트의 가능성. 한국암석학회지, 10, 1-12.

우영균, 강희주 (1999) 충남 홍성군 월현사문석광상 사문암의 변질작용. 한국지구과학회지, 20, 189-198.

우영균, 김영태, 박종삼, 박성덕 (2001) 충남 청양군 비봉사문석광상 사문암의 기원암과 사문석화작용. 2001년도 한국지구과학회 추계학술발표회 요약집.

한국지질자원연구원, 산업자원부 (2006) 2005년도 광산물수급현황. p. 334.

황진연, 김정진, 옥수석 (1993) 안동지역 사문석광상의 구성광물 및 성인에 관한 연구. 광산지질, 26, 1-10.

Choi, S. and Heo C. (2000) Genetic implication of Fe-W mineralization at Ulsan mine, Southeastern Korea. 대한자원공학회, 대한자원환경지질학회, 한국지구물리학회 2000년 춘계 공동학술발표회 요약집.

Choi, S. and Imai, N. (1993) Magnetite and scheelite-bearing skarns in Ulsan mine, Korea. Jour. Korean Inst. Mining Geol. 26, 41-54.

2006년 12월 9일 원고접수, 2006년 12월 18일 게재승인.