

원동 중석 스카른대에서의 관입암류와 스카른광물에 대한 U-Pb(SHRIMP) 및 K-Ar 연대

U-Pb(SHRIMP) and K-Ar Age Dating of Intrusive Rocks and Skarn Minerals at the W-Skarn in Weondong Deposit

박 창 윤(Changyun Park)¹ · 송 윤 구(Yungoo Song)^{1*} · 지 세 정(Se Jung Chi)² ·
강 일 모(Il-Mo Kang)² · 이 기 욱(Keewook Yi)³ · 정 동 훈(Donghoon Chung)¹

¹연세대학교 지구시스템학과

(Department of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea)

²한국지질자원연구원

(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea)

³한국기초과학지원연구원

(Division of Earth and Environmental Science, Korea Basic Science Institute, Ochang 363-883, Korea)

요약 : 원동지역은 스카른형 다중금속 광상으로서, 최근에는 회중석을 포함하는 텅스텐 광체의 유망광구로 주목받고 있다. 본 연구는 관입암체와 스카른 광물에 대한 연대측정을 통하여 스카른 형성 시기에 대한 지질연대학적 정보를 제공하고자 한다. 원동 지역의 층서는 석탄기와 트라이아스기, 캄브리아기와 오르도비스기의 층으로 이루어져있다. SHRIMP U-Pb 연대측정으로 원동지역 일대에 분포하고 있는 관입암류인 석영반암(79.37 ± 0.94 Ma)과 장석반암암맥(50.64 ± 0.44 Ma)의 정치고결시기를 결정하였다. K-Ar 연대측정으로 거정질의 금운모(49.1 ± 1.1 Ma), 괴상의 금운모(49.2 ± 1.2 Ma), 스카른광물과 공생하는 금운모(49.9 ± 3.6 Ma), 그리고 열수변질작용의 산물인 일라이트(48.3 ± 1.1 Ma)의 생성시기를 밝혀내었다. 열수 변질된 석영반암에서의 SHRIMP U-Pb 연대는 59.7~38.7 Ma까지 다양한 연대분포를 보이는데, 저어콘의 조직과 관련하여 메타미틱제이션(metamictization) 받은 저어콘 조직에서는 Pb 손실이 발생하여 연대 신뢰도가 떨어지는 반면, 용해-침전작용을 받은 부분의 연대 값은 동위원소 재평형 작용의 가능성이 있어 또다른 열수변질시기 혹은 화성활동시기에 대한 정보를 제공할 수 있다. 연대측정 결과와 광물 공생관계, 그리고 야외조사에서 확인된 석영반암 내 혹은 균열대에 발달해 있는 스카른용액 침투흔적으로 볼 때, 연구지역에서의 중석 스카른 광화시기는 약 50 Ma일 가능성이 높지만, 스카른 광체 선후관계 및 장석반암과 스카른 광체의 지질학적 연관관계에 대한 연구가 추가적으로 이루어져야 할 필요가 있다.

주요어 : 원동광상, 저어콘 U-Pb(SHRIMP) 연대측정, K-Ar 연대측정, High Uranium 저어콘, 저어콘 메타미틱제이션, 저어콘 용해-침전작용

*Corresponding author: +82-2-2123-2671, E-mail: yungoo@yonsei.ac.kr

ABSTRACT: The geology of the weondong deposit area consists mainly of Cambro-Ordovician and Carboniferous-Triassic formations, and intruded quartz porphyry and dyke. The skarn mineralized zone in the weondong deposit is the most prospective region for the useful W-mineral deposits. To determine the skarn-mineralization age, U-Pb SHRIMP and K-Ar age dating methods were employed. The U-Pb zircon ages of quartz porphyry intrusion (WD-A) and feldspar porphyry dyke (WD-B) are 79.37 Ma and 50.64 Ma. The K-Ar ages of coarse-grained crystalline phlogopite (WD-1), massive phlogopite (WDR-1), phlogopite coexisted with skarn minerals (WD-M), and vein type illite (WD-2) were determined as 49.1 ± 1.1 Ma, 49.2 ± 1.2 Ma, 49.9 ± 3.6 Ma, and 48.3 ± 1.1 Ma, respectively. And the ages of the high uranium zircon of hydrothermally altered quartz porphyry (WD-C) range from 59.7 to 38.7 Ma, which depend on zircon's textures affected by hydrothermal fluids. It is regarded as the effect of some hydrothermal events, which may precipitate and overgrow the high-U zircons, and happen the zircon's metamictization and dissolution-reprecipitation reactions. Based on the K-Ar age datings for the skarn minerals and field evidences, we suggest that the timing of W-skarn mineralization in weondong deposit may be about 50 Ma. However, for the accurate timing of skarn mineralization in this area, the additional researches about the sequence of superposition at the skarn minerals and geological relationship between skarn deposits and dyke should be needed in the future.

Key words: Weondong deposit, zircon U-Pb (SHRIMP) age dating, K-Ar age dating, high Uranium zircon, zircon metamictization texture, zircon dissolution-reprecipitation texture

서 론

한반도를 기준으로 한 판구조운동과 관련하여 중생대에서 제삼기까지의 각 시기마다 다른 유형의 화성활동을 제시하면서, 다양한 지역과 유형의 광상 형성과 지질학적인 환경에 대한 해석이 이루어졌다(Maruyama *et al.*, 1997; Choi *et al.*, 2006; Choi and Pak, 2007). 특히 태백산 분지 지역은 이러한 중생대/제삼기 화성활동시기에 대한 해석으로 광화대가 밀집되어있는 함백산 지향사에 대한 지질·광상학적인 이해를 하는 데에 큰 도움이 될 수 있는데, 이전부터 연화광상 Pb-Zn (73.6 Ma), 거도광상 Fe-Cu (98.4 Ma), 동남광상 Fe-Cu (85.9 Ma), 신예미광상 Pb-Zn (77.7 Ma), 상동 W-Mo-Bi 광상(81~84 Ma)(Farrar *et al.*, 1978; Yun and Silberman, 1979; Sato *et al.*, 1981; Park *et al.*, 1988) 등 태백지역에서의 화성활동과 연관된 광화작용 시기에 대한 연구가 진행되어 왔다.

연구지역인 태백산 광화대 내 함백산 지향사 북익부에 위치하는 원동광상은 스키르형 다중금속 광상으로서 철-연-아연 광종을 대상으로 탐사가 진행되어오다가 최근에는 이곳에서 산출되는 중석(Scheelite)을 대상으로 재 탐사 및 연구가 진행되어 왔다. 하지만 원동지역 중석 스키르화작용 또는 열수유체의 이동과 관련된 광화작용을 논의 하기에 앞서 필수적으로 연구가 진행되어야 하는

화성활동 시기에 대해서는 충분히 논의가 되지 않았다. 따라서 본 연구의 목적은 원동광상에서의 화성암류를 이루는 석영반암과 암맥, 그리고 스키르 광물과 열수변질 광물에 대한 연대를 SHRIMP (Sensitive High Resolution Ion Microprobe) U-Pb 연대측정법과 K-Ar 연대측정법을 이용해 밝혀내고, 향후 원동광상지역 정밀탐사 및 심부 잠두광체 탐사 시 가장 기본이 되는 정보를 제공하고자 한다.

지질 개요

연구지역의 남서방향에서 북동방향으로 발달하고 있는 원동층상단층을 기준으로 원동광상 북부 지역은 풍촌층과 화절층이 발달하고 있고 남부 지역은 캄브로-오르도비스기 조선 누층군을 이루는 풍촌층과 화절층, 동점층, 두무동층, 막골석회암층이 정합적인 층서를 나타내고 있다(그림 1)(Chi *et al.*, 2011). 북동방향, 암주상의 형태로 상기 퇴적암류를 관입하고 있는 석영반암과 부분적으로 노출되어있는 암맥들은 주로 막골석회암층 내에서 발견되어진다. 관입암류는 석회암과 반응하여 백악기 후기 혹은 제3기 초기에 스키르화작용과 열수변질 작용과 관계가 있을 것으로 보고된 바 있다(Hwang and Lee, 1998). 연구지역에서 북동-남서 혹은 동북동-서남서 방향으로 발달해있는 원동

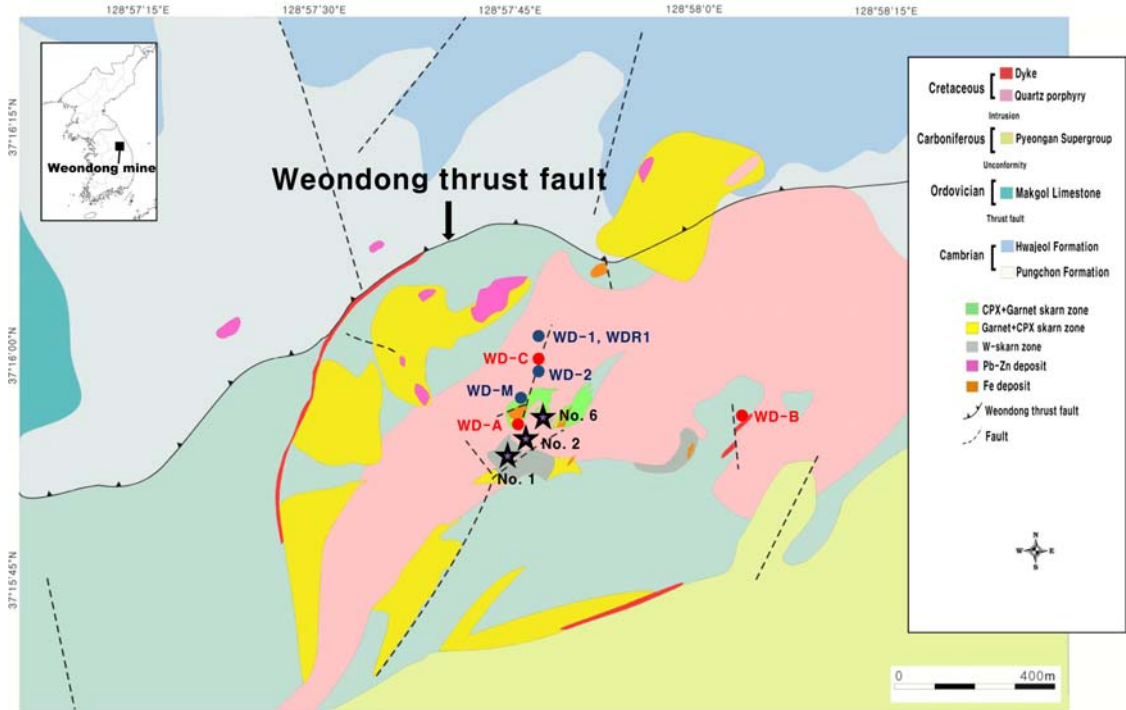


Fig. 1. The geological map around weondong deposit area, mainly consisting of Carboniferous-Triassic formations and Cambro-Ordovician formations intruded by quartz porphyry and dyke (modified from Chi *et al.* (2011)). Black star spots indicate the drilling core sites, and blue and red spots indicate the sampling sites for age dating experiments.

층상단층은 이 일대에서 가장 큰 지질구조이며, 이로 인해 북동-남서 혹은 남-북 방향의 소규모 단층 및 습곡구조들이 발달하고 있다(Chi *et al.*, 2011). 원동지역에서의 심부 시추 결과 풍촌석회암층은 150~200 m의 층후를 보인다(Chi *et al.*, 2011). 약 200 m의 층후를 가지며 북동방향으로 분포하는 막골석회암층은 석회암상과 세일상으로 구성되며 후기에 석영반암에 의해 관입을 받았음이 확인되었다(Lee, 2011).

연구지역에서의 관입암류로는 석영반암과 암맥류로 구분할 수 있다(그림 1). 석영 반암은 600 m 내외의 폭과 N40°~60°E 방향을 가지고 암주상의 형태로 막골석회암 및 풍촌석회암층을 관입하였으며, 이 암체내의 단열대를 따라 열수변질을 받았다(Chi *et al.*, 2011). 원동교 일대의 석영 반암은 암회색의 1~4 mm의 결정크기를 가진 석영반정을 포함하고 있으며 주변 기질은 주로 장석류로 구성되어 있다. 울산분봉에서 도석광산에 이르기까지 석영반암의 열수변질로 인하여 장석류가 일

부 알바이트화되어진 양상과, 규화작용을 거친 후 일라이트 코팅된 양상이 함께 나타난다. 연구지역 내에 분포하는 암맥류의 경우 산성 암맥의 경우에는 N10°~40°E로 원동층상단층과 석영반암의 방향과 유사하며, 염기성 암맥의 경우는 N50°~80°W로 이들과 수직을 이루며 분포한다(Chi *et al.*, 2011). 연구지역에서 채취한 암맥류는 암회색의 석영질로 이루어진 기질부분과 수 mm~수 cm 정도의 원형 혹은 주상으로 산출되는 장석으로 구성되어있으며, 소량의 휘석과 점토광물을 수반한다.

원동지역에서의 스카른화작용은 단사휘석-석류석 대, 석류석-단사휘석 대, 중석 스카른 대, 자철석 스카른대, 그리고 연-아연 스카른대로 구분된다. 북동쪽의 서낭골과 남서쪽의 삼수동 사이에 해당하는 지역은 주로 석영반암 내에 스카른화 작용이 일어난 것을 확인할 수 있다(그림 1). 주로 자철석-석류석-투휘석 스카른 대가 분포하고 있으며, 특히 중석은 이 지역에서 주로 산출된다. 석영반암 혹은 암맥 접촉부에서는 석류석과 투휘석 스

Table 1. SHRIMP U-Pb Age Dating of the Quartz Porphyry in the Weondong Deposit (WD-A)

Spot	²⁰⁶ Pb _c (%)	U (ppm)	Th (ppm)	²³² Th/ ²³⁸ U	±%	Total ²³⁸ U/ ²⁰⁶ Pb	±%	Total ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±%	* ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U (Ma)	±%
A-1.1	6.30	141	93	0.68	0.51	76	2.5	0.098	4.9	78.7	2.0
A-2.1	3.75	278	218	0.81	0.88	76	1.0	0.077	12.2	81.1	1.0
A-3.1	4.42	232	140	0.62	0.36	79	1.0	0.083	3.2	77.2	0.8
A-4.1	4.25	172	111	0.66	0.45	77	4.3	0.081	4.3	79.5	3.0
A-9.1	3.17	233	146	0.65	0.34	76	1.9	0.073	3.7	81.6	2.0
A-6.1	10.60	153	100	0.67	0.48	72	2.6	0.132	11.9	79.4	3.0
A-5.1	3.34	345	229	0.69	0.31	95	2.1	0.074	11.0	65.0	2.0
A-7.1	3.14	214	133	0.64	0.92	82	2.9	0.072	5.6	75.4	2.0
A-8.1	2.08	594	316	0.55	0.27	76	0.7	0.064	2.3	82.1	0.6
A-10.1	2.48	462	257	0.58	0.27	77	0.7	0.067	2.5	81.4	0.6
A-11.1	4.76	254	163	0.66	0.35	77	1.4	0.085	3.2	79.7	1.0
A-12.1	7.30	131	86	0.68	0.47	75	1.1	0.106	3.9	79.4	1.0
AC-1.1	2.96	211	228	1.12	1.33	80	3.3	0.071	3.6	77.5	3.0
AC-2.1	6.77	130	100	0.80	2.03	76	1.0	0.101	3.7	78.6	0.9
AC-3.1	6.45	128	138	1.11	0.40	75	2.3	0.099	4.0	79.9	2.0
AC-4.1	5.40	243	248	1.05	0.33	77	0.9	0.090	3.4	78.3	0.8
AC-5.1	9.60	191	183	0.99	0.37	78	4.6	0.124	7.5	74.8	4.0
AC-6.1	7.09	159	162	1.05	0.40	96	9.7	0.103	4.5	62.1	6.0

Errors are 1-sigma; Pbc and Pb* indicate the common and radiogenic portions, respectively.
 Error in Standard calibration was 0.19% (not included in above errors but required when comparing data from different mounts).
 *Common Pb corrected by assuming ²⁰⁶Pb/²³⁸U-²⁰⁷Pb/²³⁵U age-concordance.

카른대 혹은 연-아연 광체가 발달해 있는 것을 확인할 수 있다(그림 1). 막골석회암에서 활발하게 진행된 스카른 광화작용은 주로 석영반암, 암맥과 접하고 있는 지역에서, 그리고 단층 파쇄대에서 각각 광화작용이 발생하였다고 확인되었다(Hwang and Lee, 1998). 특히, 단층파쇄대는 석영반암 내에서도 발견되며, 이 균열대를 따라 스카른 광물들이 정출되어 있는 산상을 확인할 수 있다. 주요 스카른 광물로는 석류석, 녹니석, 녹염석, 투회석, 휘석, 방해석, 각섬석, 형석, 중석, 방해석, 금운모, 베수비아나이트(vesuvianite) 등이 있으며, 특히 석류석은 Fe³⁺를 포함하고 있는 안드라다이트 영역에 해당한다(Hwang and Lee, 1998).

연대 측정 시료

연구지역에서 관찰되는 관입암류는 스카른 광화시기 및 후기의 변질시기에 대한 정보로 지질학적인 진화과정을 설명하는 데에 중요한 역할을 할 수 있다. 연구지역에서 정치·고결된 화성암류 및 스카른 광물, 열수변질 광물에 대한 연대측정을 위해 총 7개의 시료를 채택하여 연대측정을 실시하였다. 석영반암(WD-A)과 원동광상 최상부의 열수변질작용을 받은 석영반암(WD-C), 그리고 서남골 동쪽 방향 암맥에서 채취한 장식반암(WD-B)에 대하여 U-Pb 저어콘 연대측정을 실시하였다. 연구지역 내 재결정작용을 받은 거정질의 방해석과 함께 공생하며 수 cm 크기의 결정질의 금운모(WD-1), 괴상 조직의 자철석, 재결정작용을 받아 치밀한 구조를 보이는 산점상의 방해석과 공존하

(A)



(B)

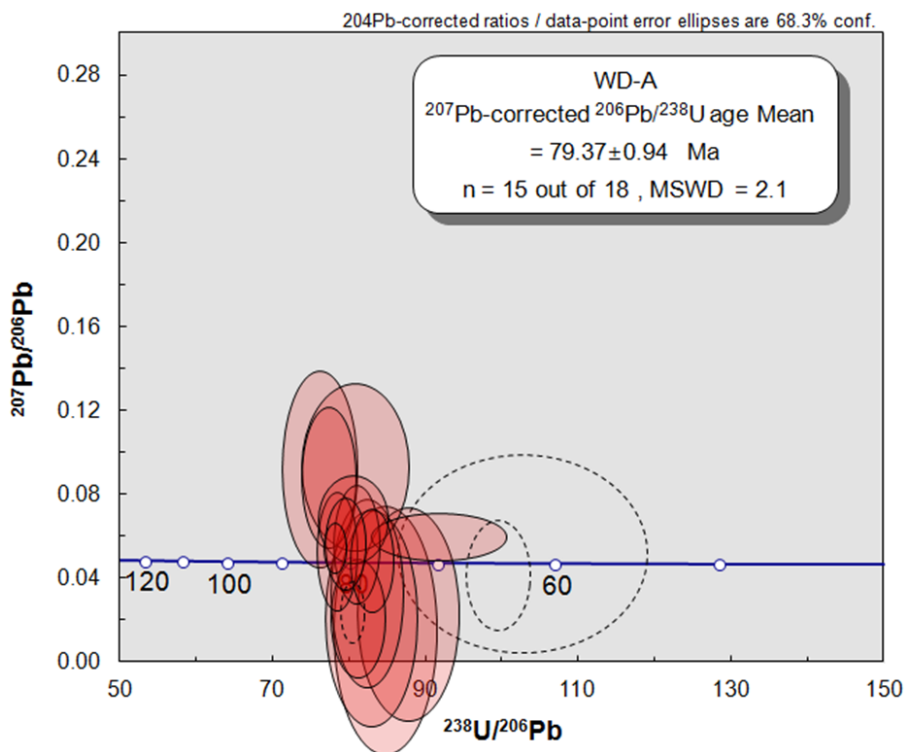


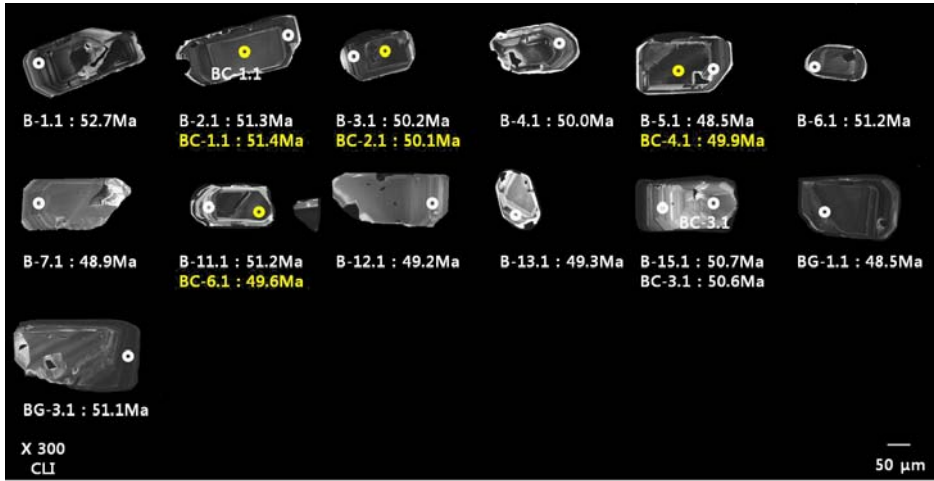
Fig. 2. (A) Cathodoluminescence (CL) images of zircons for the quartz porphyry with analysis points and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages. Yellow circle (WD-A) : analysis points at the center of zircon. (B) Concordia diagram for the SHRIMP zircon U-Pb age dating analyses for quartz porphyry.

는 세립질 금운모(WDR-1), 자철석, 투회석 및 회중석과 공생하고 있는 금운모(WD-M), 그리고 열수변질작용을 받은 석영 반암 내 균열대를 따라 열수로부터 침전된 세맥의 일라이트(WD-2)에 대해서는 K-Ar 동위원소 연대측정을 실시하였다.

분석 방법

저어콘의 연대측정을 위해 준비된 각 시료 (WD-A, WD-B, WD-C) 2 kg를 유압파쇄기로 분쇄한 후 링밀(Ring mill)을 이용해 세립질의 입자로 파쇄하였다. 파쇄된 각 시료들은 245 μm 체에 통과시켜 245 μm 이하의 입자만을 선별적으로

(A)



(B)

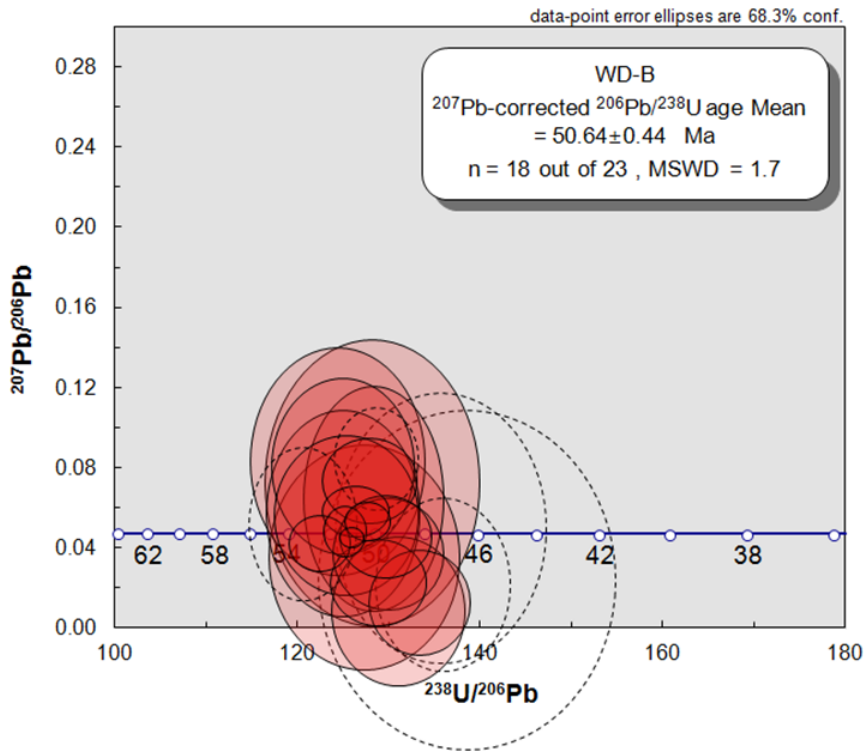


Fig. 3. (A) Cathodoluminescence (CL) images of zircons for feldspar porphyry dyke with analysis points and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages. (B) Concordia diagram for the SHRIMP zircon U-Pb age dating analyses for feldspar porphyry dyke.

수집하여 패닝(Panning)과 자성분리법을 적용하고 메틸아이오다이드를 이용한 중액분리를 실시하였

다. 각 과정을 거쳐 회수된 중광물들 중 시료당 약 100여 개의 저어콘 결정들이 실제현미경을 사

Table 2. SHRIMP U-Pb Age Dating of the Feldspar Porphyry Dyke in the Weondong Deposit (WD-B)

Spot	²⁰⁶ Pbc (%)	U (ppm)	Th (ppm)	²³² Th/ ²³⁸ U	±%	Total ²³⁸ U/ ²⁰⁶ Pb	±%	Total ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±%	* ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U (Ma)	±%
B-1.1	1.83	1022	938	0.95	1.04	120	1.5	0.062	5.8	52.7	0.8
B-2.1	2.93	791	353	0.46	0.27	121	2.0	0.070	2.9	51.3	1.0
B-3.1	3.11	595	427	0.74	0.26	124	1.8	0.072	3.2	50.2	0.9
B-4.1	4.64	583	381	0.67	0.28	122	2.0	0.084	3.2	50.0	1.0
B-12.1	10.29	269	103	0.40	0.49	117	1.8	0.128	3.8	49.2	0.9
B-5.1	18.38	247	117	0.49	0.46	108	3.7	0.192	13.0	48.5	3.0
B-6.1	2.29	866	673	0.80	0.36	123	0.7	0.065	2.6	51.2	0.4
B-8.1	5.01	328	180	0.57	0.35	125	0.9	0.087	3.8	48.7	0.5
B-9.1	5.72	360	209	0.60	0.34	114	0.9	0.092	6.8	52.9	0.7
B-11.1	8.06	216	141	0.68	0.43	115	2.9	0.111	4.7	51.2	2.0
B-7.1	13.08	315	127	0.42	0.44	114	0.9	0.151	13.4	48.9	1.0
B-14.1	10.06	189	109	0.59	0.47	121	3.6	0.127	4.9	47.7	2.0
B-15.1	7.31	205	71	0.36	0.54	117	1.0	0.105	4.4	50.7	0.6
B-13.1	10.10	173	68	0.40	0.56	117	1.2	0.127	4.3	49.3	0.7
BC-1.1	4.13	401	195	0.50	0.34	120	2.2	0.080	3.6	51.4	1.0
BC-2.1	2.55	819	510	0.64	1.77	125	1.6	0.067	2.8	50.1	0.8
BC-3.1	7.47	274	143	0.54	0.41	117	2.6	0.106	3.9	50.6	1.0
BC-4.1	2.59	805	560	0.72	0.19	125	1.0	0.067	2.2	49.9	0.5
BC-5.1	4.18	314	226	0.74	0.35	129	0.9	0.080	3.9	47.5	0.5
BC-6.1	2.51	435	349	0.83	1.18	126	2.0	0.067	3.6	49.6	1.0
BG-1.1	2.93	478	169	0.36	2.20	128	2.0	0.070	3.7	48.5	1.0
BG-3.1	0.73	2247	983	0.45	0.15	125	0.6	0.053	1.7	51.1	0.3
BG-4.1	10.71	184	81	0.46	0.50	122	1.0	0.132	7.2	47.2	0.8

Errors are 1-sigma; Pbc and Pb* indicate the common and radiogenic portions, respectively.

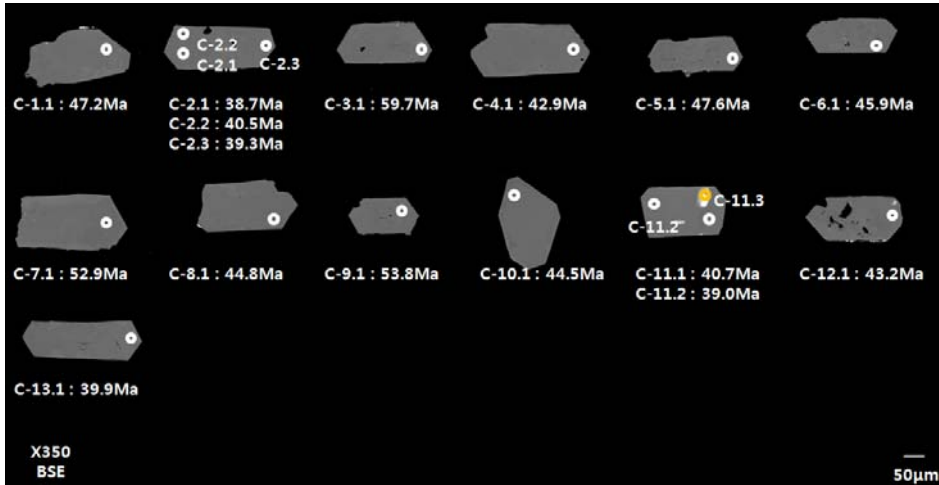
Error in Standard calibration was 0.19% (not included in above errors but required when comparing data from different mounts).

*Common Pb corrected by assuming ²⁰⁶Pb/²³⁸U-²⁰⁷Pb/²³⁵U age-concordance.

용해 수작업으로 선별되어졌다. 선별된 저어콘 결정들은 표준시료와 함께 에폭시 마운팅 후 저어콘 입자의 절반 정도만 남아있도록 갈아내고 다이아몬드 연마제로 연마한 후 금으로 코팅하였다. 한국기초과학지원연구원 오창 센터에서 보유하고 있는 SEM JEOL6610LV를 이용하여 저어콘 결정내부의 CL (Cathodoluminescence) 영상, BSE (Back-Scattered Electron)영상을 촬영하고 이를 이용하여 유체 포유물, 결정 균열부와 같이 오차를 낼 수 있는 요소들을 배제하여 분석 지점을 지정하였다. 저어콘 연대측정을 위하여 한국기초과학지원

연구원 오창 센터에서 보유하고 있는 SHRIMP기기를 이용하였고 측정 시 연대보정을 위하여 미국 미네소타주 둘루스 복합체(Duluth Complex)에서의 표준 저어콘시료(FCI)분석을 실시하였다(Paces and Miller, 1993). 일차이온(O²⁻) 빔의 전류는 2~3 nA, 크기는 20~25 μm의 직경으로 조절하였다. Williams (1998)에 기술되어있는 과정을 통해 U-Th-Pb 동위원소 성분분석과 ²⁰⁷Pb보정을 실시하였다. PRAWN/LEAD 6.5.5 프로그램을 통하여 계산이 완료된 U-Pb-Th 동위원소비는 Isoplot/EX (Ludwig, 2003) 프로그램을 이용하여 도표와 그

(A)



(B)

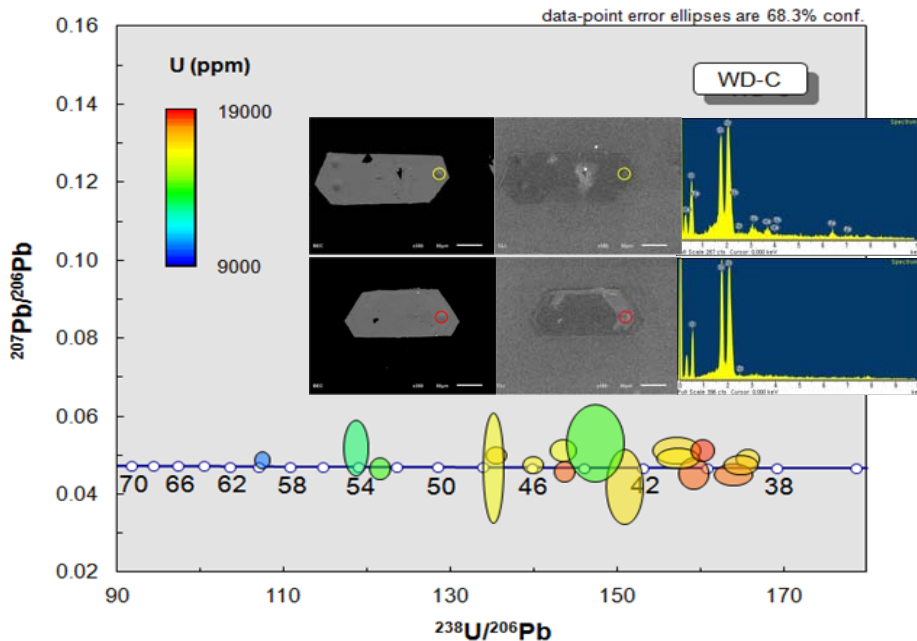


Fig. 4. (A) Back scattered electron(BSE) images of zircons for hydrothermal alteration type of quartz porphyry, with analysis points and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages. (B) Concordia diagram for the SHRIMP zircon U-Pb age dating analyses for hydrothermal alteration type of quartz porphyry. The $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages are represented as age distribution from 38.7 Ma to 59.7 Ma. The difference of chemical composition between dissolution-precipitation (Red circle) texture and metamict texture (Yellow circle) in hydrothermally altered zircon (WD-C) is distinctly shown in EDS spectra.

래프를 도시하였다. WD-C시료에 대한 저어콘 화학조성분석을 위하여 연세대학교 지구시스템과학과에서 보유하고 있는 SEM-EDS (JSM-5610LV)

기기를 이용하였다. K-Ar연대분석은 일본 오카야마 대학교에서 수행 되었다. ^{40}K 의 함량은 습식분석을 통해 원자흡광분석기(AAS)를 사용하여 측정

Table 3. SHRIMP U-Pb age dating of the hydrothermally altered quartz porphyry in the Weondong deposit (WD-C).

Spot	²⁰⁶ Pb _c (%)	U (ppm)	Th (ppm)	²³² Th/ ²³⁸ U	±%	Total ²³⁸ U/ ²⁰⁶ Pb	±%	Total ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±%	* ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U (Ma)	±%
C-1.1	3.90	17267	18010	1.08	0.66	131	0.6	0.078	0.5	47.2	0.3
C-2.1	4.90	16723	32289	1.99	0.08	158	0.5	0.086	0.4	38.7	0.2
C-3.1	0.61	9963	4612	0.48	0.39	107	0.5	0.052	1.0	59.7	0.3
C-5.1	13.24	16194	17813	1.14	0.89	117	0.5	0.152	5.1	47.6	0.6
C-6.1	3.76	16385	16910	1.07	0.98	135	0.5	0.077	0.5	45.9	0.2
C-8.1	5.15	18319	20925	1.18	0.62	136	0.5	0.088	0.4	44.8	0.2
C-9.1	12.71	12892	11366	0.91	0.38	104	0.7	0.148	2.0	53.8	0.5
C-10.1	6.08	16140	20869	1.34	0.79	135	0.7	0.095	0.4	44.5	0.3
C-11.1	7.12	16817	27805	1.71	0.76	147	1.2	0.103	1.1	40.7	0.5
C-4.1	22.63	16681	15226	0.94	1.25	116	0.8	0.226	1.6	42.9	0.4
C-12.1	39.17	13874	16945	1.26	0.63	90	1.4	0.357	0.4	43.2	0.6
C-7.1	5.61	13916	12395	0.92	0.56	115	0.6	0.092	0.4	52.9	0.3
C-2.2	6.77	18343	25145	1.42	0.83	148	0.7	0.100	1.3	40.5	0.3
C-2.3	4.64	18230	30061	1.70	0.56	156	0.9	0.084	0.5	39.3	0.4
C-11.2	5.11	17299	25418	1.52	0.30	157	0.8	0.087	0.4	39.0	0.3
C-11.3	5.79	16584	26626	1.66	0.07	149	1.0	0.093	0.4	40.7	0.4
C-13.1	5.85	18722	28700	1.58	0.74	152	0.5	0.093	0.7	39.9	0.2

Errors are 1-sigma; Pbc and Pb* indicate the common and radiogenic portions, respectively.

Error in Standard calibration was 0.19% (not included in above errors but required when comparing data from different mounts).

*Common Pb corrected by assuming ²⁰⁶Pb/²³⁸U-²⁰⁷Pb/²³⁵U age-concordance.

하였다. 그리고 3개의 콜렉터(Three collectors)로 ³⁶Ar, ³⁸Ar, ⁴⁰Ar를 측정하고 1% 정도의 Ar 함량의 에러를 가지는 질량분석기(HIRU)를 사용하여 ⁴⁰Ar의 함량을 측정하였다(Itaya, 1991).

결 과

연구지역 석영반암에서 채취한 저어콘 결정들은 ²³²Th/²³⁸U가 0.55~1.12로 나타났고 약 100 μm의 크기를 가지며 육각형모양으로 성장하였다. 또한 저어콘 결정들은 진동누대구조(Oscillatory zoning)를 가진다. 분석지점은 균열부, 결정유실부분 등 분석에 오차를 줄 수 있는 부분을 제외하고 지정하였다. 18개의 분석 지점 중 28 오차 막대에서 기계적 오류 혹은 분석지점 오류로 인해 분석치 정

확도에 영향을 줄 수 있는 3개 분석지점을 제외하고 분석결과를 가중 평균하여 79.37±0.94 Ma의 연대를 얻었다(그림 2, 표 1). 15개 분석지점은 일치선령(Concordia Age)에 위치하고 분석에서 제외된 결과 값은 점선으로 표시하였다. MSWD는 2.1로서 신뢰 가능한 밀집도를 가진 결과 값이라고 볼 수 있다. 암맥류에서 채취한 화성기원의 저어콘 결정은 150~300 μm 정도의 크기를 가진다. 육각형, 사각형, 타원형의 형태로 진동누대구조를 보이며 성장하였다. 석영반암의 저어콘과 비교하여 유체포유물과 결정 유실 부분을 빈번하게 관찰할 수 있고, 저어콘 결정 외곽부에 부분적으로 변질대가 확인된다. 23개의 분석지점 중 암맥류에서의 저어콘 결정(WD-B)의 연대는 50.64±0.44 Ma로 나타났다(그림 3, 표 2). 27개의 분석지점 중

Table 4. K-Ar Age Dating of Some Phlogopites and Illite in the Weondong Deposit

Sample name	Potassium content (wt.%)	Rad ⁴⁰ Ar (10-8ccSTP/g)	K-Ar age (Ma)	Non-rad ⁴⁰ Ar (%)
WD-1 (Coarse Phlogopite)	7.307 ± 0.146	1412.4 ± 15.0	49.1 ± 1.1	10.4
WDR-1 (Massive Phlogopite)	6.115 ± 0.122	1182.9 ± 18.3	49.2 ± 1.2	25.7
WD-M (Phlogopite)	0.513 ± 0.010	100.8 ± 7.1	49.9 ± 3.6	80.2
WD-2 (Illite)	7.927 ± 0.159	1504.2 ± 16.3	48.3 ± 1.1	4.6

18개를 가중 평균하였고, MSWD는 1.7로 나타났다. 변질된 석영반암에서의 저어콘 결정(WD-C)은 앞서 분석한 화성기원의 저어콘 시료들과는 다른 양상을 보인다. U함량은 9,963~18,722 ppm, Th 함량은 4,612~32,289 ppm으로 일반적인 저어콘이 포함하고 있는 U, Th의 양보다 훨씬 많은 양을 포함하고 있고, ²³²Th/²³⁸U 값은 0.48~1.99이다. CL영상에서는 뚜렷한 저어콘 결정 영상을 확보할 수 없어 BSE영상으로 저어콘 결정 영상 분석을 실시하였다. WD-C 시료의 저어콘 결정에서는 진동누대구조가 BSE 영상에서 보이지 않거나, 일부 결정에서 외곽부에 밝은 회색을 띤 불규칙적 누대구조를 보인다(그림 4). 저어콘 결정의 외곽부, 결정 균열부 주변(밝은 회색지역)에서 불규칙적으로 변질부분이 나타나 있고, 저어콘 결정 내부에는 수 μm의 공극들과 균열이 빈번하게 발생된 것을 관찰할 수 있다. 밝은 회색 지역 제외하면 다른 지역은 상대적으로 균질한 조직을 보이며 어두운 회색을 띠고 있다. 17개의 분석 지점을 선정하여 분석을 실시하였고, 일치곡선(Concordia curve)에 분석결과들을 도시해보면, 일치연령선 상에 결과 값이 위치함을 알 수 있다(38.7 ± 0.2~59.7 ± 0.3 Ma)(그림 4, 표 3). 하지만, MSWD값이 343을 나타내는 것으로 보아 각 결과 값의 밀집도로 변질된 석영반암의 연대를 판단하기는 어렵다. SEM-EDS (JSM-5610LV)을 이용하여 WD-C시료에 대한 저어콘 화학조성분석을 실시하였다. 어두운 회색지역에서는 저어콘 조성(Zr, Si, O)외에도 Ca, Fe, Al이 검출됨을 확인하였다(그림 4). 이에 비해서 밝은 회색지역은 상대적으로 저어콘 조성으로 일정했으며 이 조직 내에서 많은 공극들과 U 혹은 Th을 포함하는 포획물(inclusion)이 발견된다(그림 4). WD-C 저어콘에서 구분되는 이 두 가지 조직은 연대측정결과에서도 다른 값을 나타

내었다. 어두운 회색 부분의 연대 값은 38.7~53.8 Ma, 밝은 회색부분은 59.7 Ma로 나타났으며, 대체로 SHRIMP 빔 사이즈(20~25 μm) 내에 어두운 회색부분과 회색부분의 조직이 혼합되어 측정된 연대는 밝은 회색을 포함한 부분이 많을수록 59.7 Ma에 가까워지는 경향을 보인다.

K-Ar 연대측정결과, WD-1 (거정질 금운모), WDR-1 (괴상 금운모), WD-M (회중석과 공생하는 금운모) 및 WD-2 (자생 일라이트)의 시료에 대해서 각각 49.1 ± 1.1, 49.2 ± 1.2, 49.9 ± 3.6 및 48.3 ± 1.1 Ma로 나타났다(표 4).

토 의

저어콘 연대의 의미

석영반암(WD-A)의 저어콘 결정과 암맥류(WD-B)의 저어콘 결정들을 살펴보면 ²³²Th/²³⁸U의 값이 0.5이상이라는 점, 퇴적암에서 발견되는 저어콘과는 다르게 마모된 부분이 없이 진동누대구조를 이룬다는 점, 결정의 모양이 깨진 저어콘 결정들을 제외하면 대부분 자형의 형태를 띤다는 점을 감안할 때 화성기원의 저어콘 결정임을 알 수 있다(Ahrens, 1965; Shore and Fowler, 1996; Hanchar and Hoskin, 2003). 또한 연대결과에 영향을 줄 수 있는 저어콘 결정에서의 메타미티제이션(Metamictization) 또는 용해-침전작용(Dissolution-Reprecipitation Process)의 조직이 관찰되지 않았다. 따라서 이 두 지역에서의 시료(WD-A, WD-B)의 SHRIMP 연대측정 결과가 후기 열수 용액으로 인한 변질이 없는 관입암의 정지·고결시기 그대로를 보여준다고 해석할 수 있다. 하지만 변질된 석영반암(WD-C)에서의 저어콘 결정은 상기 두 시료의 저어콘 결정과는 다른 양상을 나타낸다. WD-C

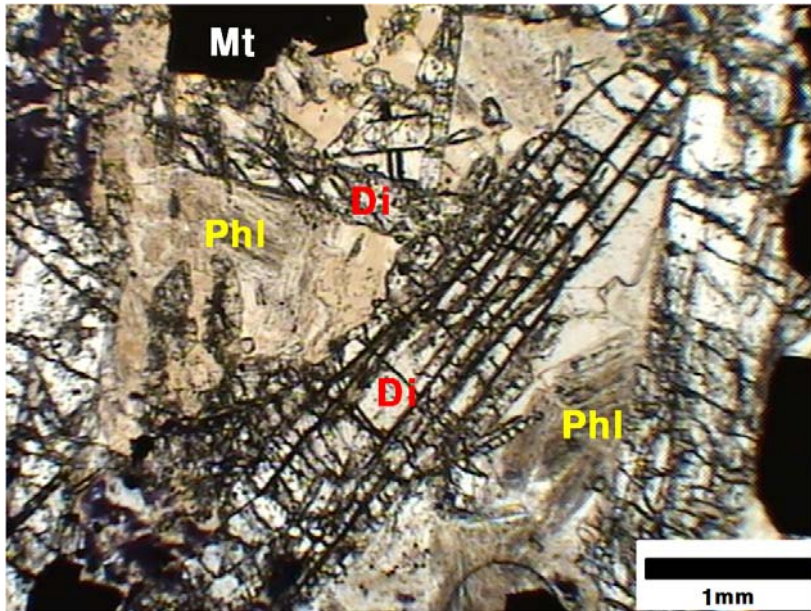
저어콘 결정의 어두운 회색 지역은 메타미티제이션 작용으로 인해 생성된 조직으로 생각된다(그림 4). 저어콘 결정 내에서의 U, Th의 방사성 붕괴는 저어콘 내부 구조 안정성에 영향을 주어 메타미티제이션을 야기하는데(Geisler *et al.*, 2003), 방사성 붕괴에 영향을 받은 저어콘은 내부구조의 파괴로 비정질상(Amorphous phase)를 형성하고, Zr, Si, 방사성 Pb의 손실을 이끌며, 결과적으로 구조적 회복(Structural recovery) 혹은 전하의 균형을 맞추기 위해 Ca, Al, Fe, Mg 등의 양이온들이 내부로 확산된다고 보고하였다(Geisler *et al.*, 2003; Geisler *et al.*, 2007; Utsunomiya *et al.*, 2007). 위와 같은 메타미티제이션 작용으로 인한 조직 특징을 보여주는 WD-C 저어콘의 어두운 회색부분은 연대값이 수렴하지 않고, 다양한 연대분포로 나타나는 특징을 보인다(그림 4). Xu *et al.* (2012)는 메타미티제이션 과정을 거친 저어콘과 연관된 방사성 Pb의 손실로 저어콘의 실제 연대값 결과보다 젊게 나오는 'Reverse Age Zonation'을 제안하였다. 본 시료(WD-C, 어두운 회색부분)의 우라늄 양을 살펴보면 우라늄 양이 많은 분석지점이 대체로 더 젊은 연대로 나타나는 것으로 확인되었다(그림 4, 표 3). 이는 많은 우라늄양을 함유한 저어콘이 메타미티제이션의 효과를 증대시켜 방사성 Pb의 손실을 추가적으로 발생시켰을 것이다. 결과적으로, 변질받은 석영반암에서의 높은 U (ppm) 함량을 가지고 있는 WD-C 저어콘은 메타미티제이션 작용으로 인한 방사성 Pb의 손실로 인하여 연대각각의 분석결과가 의미 있다기보다, 어떤 지질학적 이벤트가 일어날 때에 대한 본래 연대의 기억을 가지고 있는 것으로 해석이 가능하다. 반면에, Geisler *et al.* (2007)는 열수용액에 의해 용해-침전작용을 받은 저어콘 결정은 수 μm 크기의 공극이 많고 Thorite, Coffinite 등의 포획물이 빈번하며, 용해-침전작용을 받은 시기로부터 동위원소계가 재평형을 이룬다고 보고하였다. WD-C 저어콘 결정의 밝은 회색 부분은 상기 서술한 용해-침전작용을 받은 저어콘 결정의 특징들과 유사하다(그림 4). 변질된 석영반암에서 채취한 이 저어콘의 결정성장 과정과 변질조직에 대한 메카니즘에 대한 연구가 추가되어야 하겠지만, 저어콘의 조직 특징으로 볼 때, WD-C-3.1의 보정연대값 59.7 Ma는 저어콘 결정의 용해-침전 작용으로 인해 동위원소계가 재평형을 이룬 시기라고 생각되어지며, 이 연대는 열수용액을 동반한 또 다른 화성활동시

기를 지시할 가능성이 있다.

원동지역 중석광상에서의 화성활동 및 광화작용 시기

한반도의 중생대후기 화성활동을 살펴보면 쥐라기 후기의 조산대형(Continental Margin type) 화성활동과 연관이 있는 대보조산운동 화성활동(200~160 Ma)과 후기 백악기의 후 조산대형(Post-Orogeny type) 불국사 화성활동(110~50 Ma)으로 구분되어지는데, 각 화성암체는 쥐라기 초기부터 제삼기에 걸쳐서 광역적으로 배태되었으며 서로 다른 깊이에서 정치·고결된 것으로 알려져 있다(Choi *et al.*, 2005a). 이는 중생대의 환태평양 조구조적 변화와 밀접한 관계가 있다. 중생대 초기에서 제삼기에 이르기까지 팔라론판(Farallon Plate), 이자나기판(Izanagi Plate), 태평양판(Pacific Plate)의 섭입으로 이어졌으며, 이자나기판(Izanagi Plate)의 한반도에 대한 섭입방향이 직각(orthogonal) 방향과 사각(oblique) 방향을 반복하며 서로 다른 지질환경을 유도함에 따라 중생대의 화성활동의 특징이 결정되었다(Maruyama *et al.*, 1997). 초기 쥐라기부터 중기 쥐라기의 기간에는 이자나기판(Izanagi Plate)의 북쪽 섭입이, 후기 백악기에는 동아시아섭입경계를 향해 북서방향으로의 섭입이 각각 직각섭입(orthogonal subduction)을 이루었을 때 화성활동이 왕성하게 이루어졌다고 보고된 바 있다(Choi *et al.*, 2005a; Choi *et al.*, 2005b; Maruyama *et al.*, 1997). 또한 각섭석 지압계를 이용한 대보조산운동기의 화성활동과 불국사화성활동기의 정치심도 압력이 각각 3.4~7.8, 0.8~2.8 kb로 차이가 나타나며, 이는 전자가 심부화성암체, 후자가 천부 관입체의 유형으로 정치·고결되었음을 지시한다(Cho and Kwon, 1994). 위의 연구결과들로 미루어볼 때, 연구지역에서의 석영반암(79.37 ± 0.94 Ma)과 암맥류(50.64 ± 0.44 Ma)는 불국사 화성활동기와 연관되어 백악기 후기부터 제삼기에 이르기까지 지구조운동으로 인해 천부 관입으로 정치·고결된 관입암일 가능성이 크다. 이와 같은 백악기 후기/제삼기 화성활동은 구조운동과 중첩되어 광화작용의 진화와 함께 유용한 금속/비금속 광물을 침전하여 다양한 광상을 배태하는데(Choi *et al.*, 2006; Choi and Pak, 2007), 원동광상 지역은 이와 맞물려 연-아연 광화작용, 자철석 광화작용, 중석 광화작용이 일어났던 지역

(A)



(B)

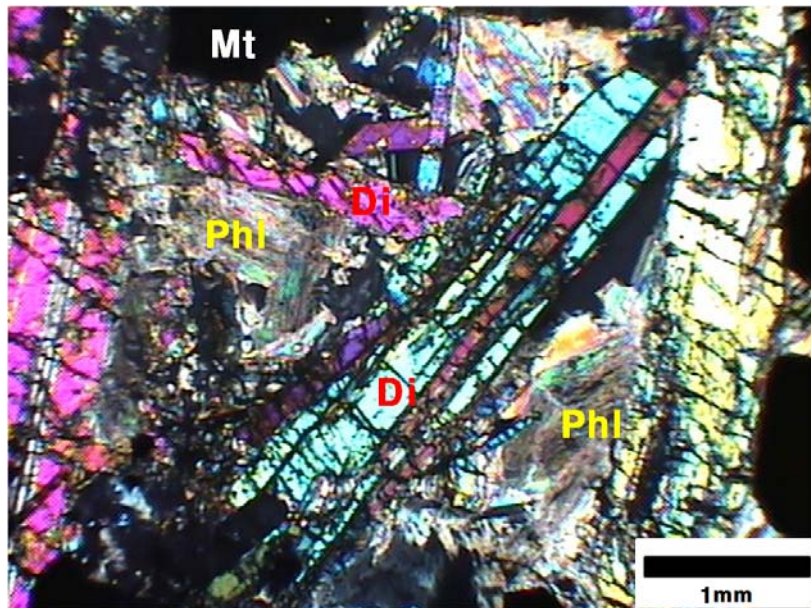


Fig. 5. Thin section images of phlogopite coexisted with diopside and magnetite at the WD-M sample. (A) Open nicols image of the WD-M sample. (B) Crossed nicols image.

으로 판단된다. 이러한 광화작용이 일어난 시기에 대한 해석은 추가적인 광체 탐사를 위한 중요한 자료로 활용될 수 있는데, 본 연구에서 분석된 두 가지의 관입암체의 연대측정 결과와 야외조사, 광

물화적인 특징을 통하여 원동광상에서의 광화시기에 대한 해석을 시도하였다. 그림 1에 나타나 있는 것처럼 원동지역에서의 전체적인 스카른화 작용은 광범위한 분포를 하고 있는 석영반암(79.37

± 0.94 Ma)과 석회암의 경계부 혹은 석영반암 내부에 발달되어 있는 양상을 띠고 있다. Lee (2011)는 원동지역에서의 스카른화 작용이 연-아연 및 철광체가 우세한 석회암 근원스카른과 중석-휘수 연석이 우세한 석영반암 근원 스카른대로 구분하였고, 막골석회암이 석영반암의 관입으로 인해 포획되어 스카른을 형성하였다고 보고하였다. Hwang and Lee (1998)는 비록 석영반암과 관련한 스카른화 작용은 미약하지만 석영반암과 암맥접촉부 그리고 단층대를 따라 광화작용이 일어났다고 해석하고 있다. 상기 내용과 본 연구 결과를 통해 결정된 석영반암, 암맥 및 금운모의 연대가 다른 점을 고려해 볼 때, 원동지역에서의 스카른 광화작용은 시기를 달리하며 중첩되어 일어났을 가능성이 매우 높다. 그런데 중석 광체를 형성시킨 스카른 광화작용에 초점을 맞추면, 이것이 형성된 시기를 지시해주는 몇 가지 특징들이 존재한다. 연구지역 내 지층에는 다양한 형태와 종류의 지질 구조들이 여러 번의 변형작용의 영향을 받아 습곡, 트러스트단층, 주향이동단층 및 이와 연관된 선구조, 면구조 등이 발달해 있으며, 석영 반암 내에서도 남-북 또는 북북동-남남서 방향의 압축력에 의해서 형성된 단층이 유체통로의 역할을 하여 열수변질 작용을 일으킨 것이 확인된다(Chi *et al.*, 2011). 석영반암 내에 형성된 단층 및 균열대를 통한 광화열수용액의 유용성분 농집 및 스카른화 작용이 나타나며, 중석의 산출 지역 또한 투회석, 혹은 석류석이 우세한 스카른대 이외에도, 석영반암 내에 존재하는 열극을 따라 방해석 및 형석과 함께 침전되어있는 양상을 보인다. 특히 연구지역에서 발견된 일부 노두에서는 석류석과 규회석대로 스카른화되어있는 암체 내에 석영반암이 부분적으로 잔류하여 남아있고, 이후 플루오린(F)이 풍부한 열수활동으로 인해서 석영반암과 스카른대 사이의 균열대를 통해 형석과 베수비아나이트 그리고 소량의 중석이 함께 침전되어있음을 확인할 수 있다. 연구지역에서 산출되는 금운모(WD-1, WDR-1)는 각력화되어있는 투회석-석류석 스카른대를 통하여 증진되어있는 형태를 띠고 있고, 각력대 내 결정성장 공간이 충분하여 자형으로 성장하였다(Chi *et al.*, 2011). 또한 본 연구에서 분석된 스카른대 내의 금운모(WD-M)는 스카른 광물인 투회석, 자철석 혹은 중석과 공존하는 산출 특징을 보이고 있다(그림 5). 이 같은 결과는 석영반암과 연구지역 내 중석 스카른화 작용과의 연관

적음을 보여준다. 결과적으로 금운모의 연대측정 결과와 중석과 스카른 광물들의 공생관계, 그리고 중석이 석영반암 내 단열대에 증진 되어 산출된다는 점을 고려하여 볼 때 장석반암암맥(50.64 ± 0.44 Ma)의 광화 용액이 중석, 금운모(WD-1, WDR-1, WD-M) 및 변질산물인 일라이트 및 주요 스카른 광물을 침전시켰을 가능성이 높다는 것을 의미한다. 하지만 중석과 관련된 스카른 광화작용이 전적으로 장석반암암맥에 의한 스카른 광화작용이라고 단정 짓기에는 연구지역에서 광범위하게 분포하는 석영반암의 영향으로 스카른 대의 중첩이 일어났을 가능성이 있고, 스카른광물 자체에 대한 연대측정 자료가 필요하기 때문에 근원 추적에 어려움이 있다. 따라서 추가적인 스카른광물 연대측정 및 지질학적 연관관계와 함께, 저어콘 연구결과로 밝혀진 또 다른 열수활동시기에 대한 가능성을 포괄적으로 연구하여, 연구지역에서의 광화시기에 대한 정확성을 높일 필요가 있다.

사 사

본 연구는 2012년도 한국지질자원연구원 과제(2012-8-0150)의 지원으로 수행되었다. K-Ar 연대측정에 많은 도움을 주신 Itaya 교수님과 연구에 대한 조언을 아끼지 않으신 권성택 교수님께 감사의 뜻을 전한다.

참고문헌

- Ahrens, L.H. (1965). Some observations on the uranium and thorium distributions in accessory zircon from granitic rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 29, 711-716.
- Chi, S.J., Kang, I.-M., Kim, Y.U., Kim, E.-J., Kim, I.J., Park, S.-W., Lee, J.H., Lee, J.S., Lee, H.Y., Jin, K., Heo, C.-H., and Hong, Y.-K. (2011) Evaluation of development possibility for the security of industrial mineral resources (Cu, Pb, Zn, Au etc) on the domestic mines: Korea Institute Geoscience and Mineral Resources, GP2010-024-2011(2), 33-135.
- Cho, D.L. and Kwon, S.T. (1994) Hornblende geobarometry of the Mesozoic granitoids in South Korea and the evolution of crustal thickness. *Journal of the Geological Society of Korea*, 30, 41-61.
- Choi, S.-G., Ryu, I.-C., Pak, S.J., Wee, S.-M., Kim, C.S., and Park, M.-E. (2005a) Cretaceous epithermal gold-silver mineralization and geodynamic environment, Korea. *Ore Geology Reviews*, 26, 115-135.
- Choi, S.-G., Kwon, S.-T., Ree, J.-H., So, C.-S., and

- Pak S.J. (2005b) Origin of Mesozoic gold mineralization in South Korea. *The Island Arc*, 14, 102-114.
- Choi, S.-G., Pak, S.J., Kim, S.W., Kim, C.S., and Oh, C.-W. (2006) Mesozoic Gold-Silver Mineralization in South Korea: Metallogenic Provinces Reestimated to the Geodynamic Setting. *Economic and Environmental Geology*, 39, 567-581.
- Choi, S.-G. and Pak, S.J. (2007) The Origin and Evolution of the Mesozoic Ore-forming Fluids in South Korea: Their Genetic Implications. *Economic and Environmental Geology*, 40, 517-535.
- Farrar, E., Clark, A.H., and Kim, O.J. (1978) Age of the Sangdong tungsten deposits, Republic of Korea, and its bearing on metallogeny of the southern Korean Peninsula. *Economic Geology*, 76, 547-566.
- Geisler, T., Rashwan, A.A., Rahn, M., Poller, U., Zwingmann, H., Pidgeon, R.T., Schleicher, H., and Tomaschek, F. (2003) Low-temperature hydrothermal alteration of natural metamict zircons from the Eastern Desert, Egypt. *Mineralogical Magazine*, 67, 485-508.
- Geisler, T., Schaltegger, U., and Tomaschek, F. (2007) Re-equilibration of Zircon in Aqueous Fluids and Melts. *Elements*, 3, 43-50.
- Hanchar, J.M. and Hoskin, P.W.O. (2003). Zircon, 53, 500 p. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, Mineralogical Society of America and the Geochemical Society, Chantilly, Virginia.
- Hwang, D.H. and Lee, J.Y. (1998) Ore genesis of the Wondong polymetallic mineral deposits in the Taebaegsan Metallogenic Province. *Economic and Environmental Geology*, 31, 375-388.
- Itaya, T., Nagao, K., Inoue, K., Honjou, Y., Okada, T., and Ogata, A. (1991). Argon isotope analysis by a newly developed mass spectrometric system for K-Ar dating. *Mineralogical journal*, 15, 203-221.
- Lee, J.H. (2011) The results of drilling in weondong mine area, the Taebaegsan mineralized district, Republic of Korea. *Economic and Environmental Geology*, 44, 313-320.
- Ludwig, K.R. (2003) User's manual for Isoplot 3.00: a geochronological toolkit for Microsoft Excel. *Berkeley Geochronology*, Center Special Publication, p.47.
- Maruyama, S., Isozaki, Y., Kimura, G., and Terabayashi, M. (1997) Paleogeographic maps of the Japanese Islands: Plate tectonic synthesis from 750Ma to the present. *Island Arc*, 6, 121-142.
- Paces, J.B. and Miller, J.D. (1993) Precise U-Pb ages of Duluth Complex and related mafic intrusions, northeastern Minnesota: geochronological insights to physical, petrogenetic, paleomagnetic, and tectonomagmatic processes associated with the 1.1 Ga midcontinent rift system. *Journal of Geophysical Research* 98, 13997-14013.
- Park, H.-I., Chang, H.W., and Jin, M.S. (1988) K-Ar ages of mineral deposits in the Taebaeg Mountain district. *The Journal of Korean Institute of Mining Geology*, 21, 57-67.
- Sato, K., Shibata, K., Uchiumi, S., and Shimazaki, H. (1981) Mineralization age of the Shinyemi Zn-Pb-Mo deposit in the Taebaegsan area, Southern Korea. *Mining Geology*, 31, 333-336
- Shore, M. and Fowler, A.D. (1996). Oscillatory zoning in minerals; a common phenomenon. *The Canadian Mineralogist*, 34(6), 1111-1126.
- Utsunomiya, S., Valley, J.W., Cavoisie, A.J., Wilde, S. A., and Ewing, R.C. (2007) Radiation damage and alteration of zircon from a 3.3 Ga porphyritic granite from the Jack Hills, Western Australia. *Chemical Geology*, 236, 92-111.
- Williams, I.S. (1998) U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. In: Mickibben, M.A., Shanks III, W.C., Ridley, W.I. (eds.), *Applications of Micro Analytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes*. *Reviews of Economic Geology*, 7, 1-35.
- Xu, X.S., Zhang, M., Zhu, K.Y., Chen, X.M., and He, Z.Y. (2012) Reverse age zonation of zircon formed by metamictisation and hydrothermal fluid leaching. *Lithos*, 150, 256-267.
- Yun S. and Silberman M.L.(1979) K-Ar geochronology of igneous rocks in the Yeonhwa-Ulchin zinc-lead district and southern margin of the Taebaegsan basin, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 15, 89-99.

접수일(2013년 8월 26일), 수정일(1차 : 2013년 9월 26일),
 게재확정일(2013년 9월 27일), 책임편집위원 : 신동복