

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

• 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건 을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer 🖃





이 학 석 사 학 위 논 문

경상분지 서남단 가사도 지역 천열수 금·은 광화대의 구조지질학적 규제



부 경 대 학 교 대 학 원

지구환경과학과

정 녀 진

이 학 석 사 학 위 논 문

경상분지 서남단 가사도 지역 천열수 금·은 광화대의 구조지질학적 규제

특징

지도교수 김 영 석

이 논문을 이학석사 학위논문으로 제출함.

2022년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

지구환경과학과

정 녀 진

정녀진의 이학석사 학위논문을 인준함.

2022년 2월 25일



목 차

표목차	ii
그림목차	iii
논문요약	iv
Ⅰ. 서 론	1
Ⅱ. 연구지역 ····································	2
1. 일반 지질	_
2. 광화작용	
Ⅲ. 연구 방법	9
IV. 연구 결과 ······	10
1. 열수맥의 조직과 광물 공생 단계	
2. 열수변질대 분포 특성에 따른 광물 분포도	14
3. 석영맥과 단열 누적밀도	16
4. 주향이동단층과 2차 단층인 정단층 작용	18
Ⅴ. 토의(고찰)	20
VI. 결론 ···································	25
참고문헌	26
영문초록	34

(감사의 말씀)

List of Tables

Table 1. Characteristics of host rock and Lighthouse vein in Gasado
epithermal deposit ······8
Table 2. Representative stratigraphic units of a vein and its inferred
genesis and history



List of Figures

Figure 1. Tectonic map of northeast Asia and simplified geologic map $\cdots 5$
Figure 2. Geologic map of the southern Gasado6
Figure 3. Paragenetic sequence of stratigraphy and mineralogy11
Figure 4. Representative vein system by stage at the Gasado epitheramal
gold deposit
Figure 5. The hydrothermal alterationmap of Gasado epithermal gold de-
posit and representative specimens sampled from each alteration zone 15
Figure 6. Cumulative desity for quartz veins and fractures of hanging wall
of normal fault toward west from Lighthouse vein17
Figure 7. NE trending normal faults system which has systematic and
secondary fractures filled with quartz vein as well as slickenline19
Figure 8. Metallogenesis model for Gasado low sulfidation epithermal gold
deposit 24

경상분지 서남단 가사도 지역 처열수 금·은 광화대의 구조지질학적 규제 특징

정 녀 진

부경대학교 대학원 지구환경과학과

요 약

전라남도 남서부에 위치한 가사도에 발달하는 금·은 광상은 맥상의 저유황형 천열수 금·은 광상이다. 이 광상의 형성은 백악기 후기 칼크-알카리 화성활동으로 인한 화산 복합체 및 환상 화산함몰체와 관련된 것으로 보고되어 있다. 모암은 경상누층군 유천층군에 대비되는 안산암, 유문암질 응회암및 용결응회암으로 주로 구성되며, 응회질 사암과 역암이 협재되어 있다. 함 금·은 석영맥인 등대맥은 가사도 남부 등대 아래에 위치하며 광주-영동 주향이동단층계의 말단부에 해당하며 전달 인장성정단층 작용 이후 인장 환경하에서 열수 유동으로 인해 석영맥이 형성되었으며, 저유황형 천열수 금·은 광상의 일반적 환경인 화산 복합체 및 환상 화산함몰체를 지시하는 환상형 단층작용의 증거는 확인하지 못하였다. 함 금·은 석영맥의 주향은 대부분 N50~70°E의 주향을 갖고, 수직에 가까운 경사를띠고 있다. 등대맥과 등대동맥 사이의 노두에서 좌수향 주향이동 감각을 지시하는 단층조선이 관찰된다. 등대맥의 서쪽에 해당하는 정단층의 상반에서 단층손상대가 폭 20 m 범위로 발달하고, 단층손상대의 폭과 변위의 상관관계를 통해 주향이동단층의 변위는 100m, 단층의 길이는 1~2 km인 것으로 볼때, 등대맥에서 스톡맥에 이르는 것을 알 수 있다.

열수광맥은 등대맥 및 등대동맥과 소규모 열수맥이 가사도 동남부 해안과 연안에 걸쳐 광범위하게 발달하고 있다. 샘플 관찰 결과 열수는 최소 3회 이상 주입되었으며, 열수를 흐르게 하는 동역학적 원인은 스틱 슬립으로 판단된다. 열수변질 분포도를 통해 열수 유체는 인장 단열을 통로로 유동하였으며, 노인봉을 중심으로 동심원상으로 멀어질수록, 즉 유체 유동 경로가 길어질수록 때는 상승하는 것으로 확인된다. 등대맥에서 스톡맥까지의 주향이동단층의 분포와 열수변질분포도의 상관 관계를 비교할 때 좌수향 주향이동단층은 기존에 존재하던 약대를 따라 금 침전 이후 시기에 재활성된 것으로 판단된다.

I.서론

천열수 광상은 환태평양의 백악기 화산활동과 연계되어 분포하며, 섭입 대 화산활동으로 비롯된 화산호 지역에서 (Havba et al., 1985; Hedenquist, 1987; Corbett and Leach, 1998) 주향이동단층을 동반한 신장 성 구조운동의 지질 환경에서 발달하는 특징을 보인다 (Corbett and Leach, 1998; Choi et al., 2001b; Zhang et al., 2003). 한반도의 천열수 금 광상은 공주-음성. 영동-광주 단층계를 따라 주로 분포하며. 백악기 전달 인장(transtension)과 화산활동으로 함몰된 칼데라 지역에 시공간적으로 분 포한다(Choi et al., 2003). 한반도 서남부 지역 역시 백악기 불국사 화산활 동에 의한 화산성 열수변질대가 광범위하게 분포하고 있으며(Koh et al., 2000), 다수의 납석 광상 및 금광상이 보고된 바 있다(Cho and Moon, 1978). 연구지역인 가사도는 한반도 서남부 진도의 서쪽에 위치한 섬으로, 금 광상과 납석 광상이 발달하고 있으며, 고유황형 천열수 금광상 (high-sulfide epithermal type gold mine)으로 분류된 바 있다(Koh et al., 1992; Kirwin et al., 1995). 하지만 대한광업진흥공사에 의해 시추 탐광이 수행된 바 있으며(Kang, 2000; Lee et al., 2000), 시추자료와 열수변질대의 분포특성, 맥의 산상, 유체포유물, 안정동위원소 연구를 종합하여 최천부 열수분출형 저유황성 천열수 광상으로 해석된 바 있다(김창성 외, 2005).

본 연구의 목적은 가사도 천열수 금광상에서 발달하는 단열과 석영맥의 분포 특성 및 열수변질대의 분포 특성을 비교 분석하여 가사도 금광상의 배대를 규제한 지질학적 구조요소를 규명하고, 광화작용의 정도와 지질구 조의 특성을 종합해 광상의 성인 모델을 구축하는데 있다.

Ⅱ. 연구지역

1. 일반 지질

한반도는 4개의 조구조 층서 단위로 나뉘어 있는데 북서에서 남동으로, 선캠브리아 경기육괴(Cho and Kim, 2005; Lee, 1987a; Li et al., 2011; Lyang et al., 2009; Lee and Cho, 2012), 고생대 옥천-태백대(Park et al., 2011; Chough et al., 2000; Reedman et al., 1973), 선캠브리아 영남육괴(Lee and Cho, 2012; Kim and Lee, 1998), 백악기 경상분지(Kim et al., 1997; Klimetz, 1983; Watson et al., 1987; Chough and Sohn, 2010)로 나뉜다(Fig. 1). 선캠브리아 경기육괴와 영남육괴는 시생대 후기에서 원생대초기의 고변성 편마암과 편암으로 구성되어 있다(Lee and Cho, 2012). 원생대 후기에 북동-남서 방향의 습곡-역단층 벨트 침강대인 옥천대가 경기육괴와 영남육괴 사이에 존재한다. 페름기 후기-트라이아스기 초기에 경기육괴와 영남육괴의 충돌로 옥천대가 형성되고 고생대 층서를 변형시켰다. 경기육괴와 영남육괴의 계속적인 충돌로 옥천대와 영남육괴 사이에 주향이동단층대인 호남연성전단대가 형성되었다(Chough et al., 2000; Chough et al., 2010; Kim et al., 2016).

주라기 후기-백악기 초기, 고태평양판 (이자나기판)이 북쪽으로 유라시아판 아래로 섭입하기 시작하였고, 그 결과 한반도 남동부 가운데에 북동-남서 방향의 공주-음성단층계와 영동-광주단층계(Aptian, 120Ma)가 형성되었다. 이 단층계의 좌수향 주향이동성 인열분지(경상분지, 공주-음성분지, 영동분지) 발달 후 분지내 퇴적활동(Hauterivian~Albian, 100Ma, 유천층군)이 시작된다. 백악기 후기 초, 이자나기 판의 축이 시계방향으로 회전하면서 섭입방향이 북쪽에서 북서쪽으로 바뀜에 따라 한반도 남동부에 활발한 화산활동(Turonian~Campanian, 90~70 Ma)이 시작되었다(Chough

and Sohn, 2010).

연구지역의 광상은 백악기 후기 불국사 화성활동(Albian~Ypresian, 110~50 Ma)과 밀접한 관계가 있으며 이 화산암이 천열수 광상의 모암이되었는데 경상누층군의 유천층군의 산성에서 중성 화산암으로 구성되어 있다(Fig. 2). 가사도 지역의 지질은 주로 백악기 후기 불국사 화성활동과 관련된 응회암류, 퇴적암류 및 제4기 퇴적층으로 이루어져 있으며, 하부로부터 가사응회암류 (래필리 응회암, 퇴적암류, 석영안산암질 응회암, 결정질 응회암, 유리질 응회암)와 후기에 이를 관입한 석영안산암 및 석영맥 등의 암맥류로 구성된다(Kim and Yun, 1971; Kang, 2000; Lee et al., 2000). 본 지역과 동일시기로 대비되는 진도지역 화산암 중 응회암과 유문암의 K-Ar 연대는 각각 73.9~76.3 Ma 및 72.5~75.4 Ma로 보고된 바 있다(Kim and Nagao, 1992).

래필리 응회암(lapilli tuff)은 연구지역 남부에 위치한 노인봉 서쪽 해안에 국부적으로 분포하며, 유문암 내지 석영안산암에 해당된다. 1~6cm 정도의 석영안산암질 부석암편, 퇴적암편 및 화산회의 기질로 구성되어 있다. 석영맥 부근에서는 열수변질작용에 의한 규화작용 및 견운모화작용이 관찰되며, 육성환경을 지시하는 탄화목편 발견이 보고되었다(Lee et al., 2000). 퇴적암류는 응회암질 사암, 실트암 및 이암의 호층으로 구성되며, 석영안산암질 응회암 내에 협재하고 있어 응회암의 퇴적 휴지기에 이차적으로 형성된 것임을 지시한다. 가사도 남부지역에 광범위하게 분포하는 석영안산암질 응회암은 분급이 불량하며 석영, 장석 및 흑운모 반정이 관찰된다. 노인봉을 중심으로 고도 40 m 이상 지역에 주로 분포하는 결정질 응회암은 하부의 석영안산암질 응회암과 정합 관계를 보인다. 노인봉 정상부에 소규모로 발달하는 유문암 성분의 유리질 응회암은 세립, 조립 및 래필리 응회암이 교호되어 층리가 잘 발달된다. 본 암은 열수변질작용에 기인한 고점토

변질작용의 광물조합(명반석, 석영, 딕카이트 및 적철석)을 보인다(Kim et al., 2002).

가사도 북동지역에서 80 cm 크기의 화산탄(volcanic bomb)이 관찰되는 데, 이것은 분화구 근처에서 발달한 것으로 해석된다.

석영안산암은 가사응회암류를 관입하고 있으며, 암녹색을 띠는 중성 내지 염기성의 암맥류는 0.7~2.0 m 정도의 폭의 암맥은 등대동맥을 절단하고 있어 금은 광화작용 이후에 관입하였음을 시사하고 있다(Kang, 2000; Lee et al., 2000; Kim et al., 2002).

가사도 남쪽 끝에 위치한 등대 아래에 각력화작용과 열수변질작용이 발생한 것이 관찰되고 단층에 따른 단열이 뚜렷한 방향성을 가지고 있으며 석영맥이 함께 발달한다.

금광상 주변부에서는 견운모(sericite-phyllic zone)가 광범위하게 산출되고, 석영맥 부근에서는 강한 규화작용(silicification)을 받아 고지대 형성하고 있으며, 특히, 등대맥의 상부에는 부분적으로 명반석, 딕카이트, 석영 등이 분포한다.

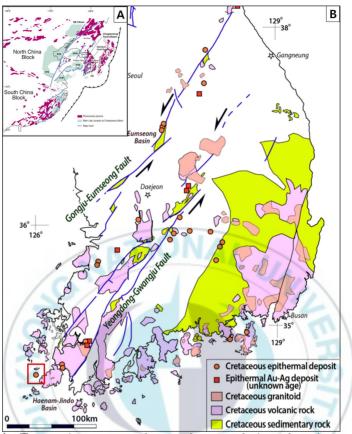


Fig. 1. (A) Tectonic map of northeast Asia showing the overall distributions of the Mesozoic plutonic rocks and sedimentary basins with major N- to NE-trending faults. BHB, Bohai Bay Basin; GB, Gyeongsang Basin; HFB, Hefei Basin; NYB, North Yellow Sea Basin; SLB, Songliao Basin; SYB, South Yellow Sea Basin; WKB, West Korean Bay Basin (after Kim et al., 2016). (B) Simplified geologic map of south Korea, showing the distribution of the Cretaceous post-orogenic granitoids, volcanic rocks, sedimentary rock and epithemal Au-Ag deposits. The Cretaceous Au-Ag deposits tend to occur within or adjacent to the Cretaceous pull-apart basins developed by left-lateral strike-slip NE-NNE-trending fault systems such as the Gongju-Eumseong and Yeongdong-Gwangju ones (after Choi et al., 2019).

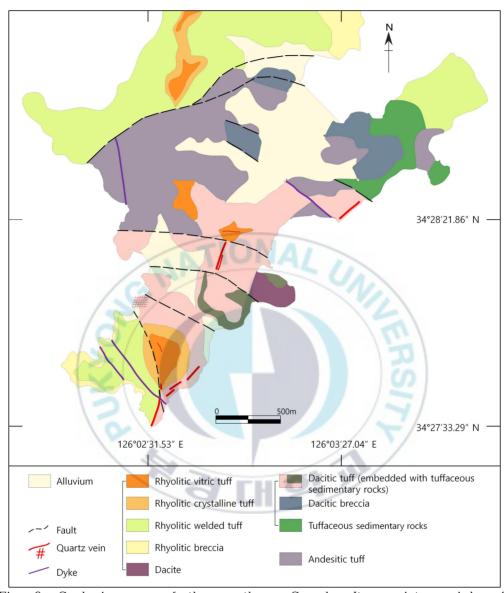


Fig. 2. Geologic map of the southern Gasado. It consists mainly of tuffaceous and sedimentary rocks caused by Cretaceous volcanism: andesitic tuff, tuffaceous sedimentary rocks, dacitic tuff, dacite, rhyolitic tuff and Quaternary alluvium in ascending stratigraphic order with later intrusions such as dacitic dykes and quartz veins (after Ivanho, 1986).

2. 광화작용

가사도 지역 천열수형 금·은 광상의 모암은 경상누층군의 유천층군에 대비되는 안산암, 유문암질 응회암 및 용결응회암으로 주로 구성되며, 응회질사암과 역암이 협재되어 있다. 광화시기는 백악기 후기의 칼크-알카리 화성활동으로 인한 화산 복합체 및 환상 화산함몰체와 관련된 것으로 추정하고 있다(Choi et al., 2003; Choi et al., 2005). 금·은 광맥은 등대맥 및 등대동맥과 소규모 열수맥이 가사도 동남부 해안과 연안에 걸쳐 광범위하게 발달하고 있다. 광맥의 주향은 대부분 N50~70°E의 주향을 갖고, 수직에 가까운 경사를 띠고 있다. 이 지역의 주요 맥인 등대맥과 등대동맥은 우수향전단 작용에 의해 취성변형되었으며, 이에 수반된 2차 단열들을 따라 열수광화유체가 유입된 것으로 보고된 바 있다(Kim and Yun, 1971; Kang, 2000; Lee et al., 2000).

석영맥은 주로 가사도 남부지역에 분포하고 있으며(Kang, 2000), 등대맥, 등대동맥, 스파드맥, 스파드북맥, 스톡맥, 비치1,2,3호맥 등으로 구분된다. 특히, 노인봉을 중심으로 표층부에 납석 변질대가 분포하며, 등대맥 및 등대동맥 등 다수의 함금 석영맥이 분포하고, 석영맥 주변부를 따라 규화작용이 확인된다. 등대맥 및 등대동맥의 주향과 경사는 N10°E/70°NW(등대맥), N60°E/65°NW(등대동맥)이며, 주로 판상 및 망상맥의 특성을 보이고 옥수질석영과 함께 빗살, 각력, 정동 및 호상 조직 등이 우세하게 발달된다. 이러한 조직은 천열수 광상에서 CO₂ 비등현상을 암시하는 특징적인 조직이다. 금 품위는 등대맥에서 2.3 g/t Au, 등대동맥에서 0.9 g/t Au로 매장량은 등대맥에서 468,700t과, 등대동맥에서 397,500t으로 보고된 바 있으며(이인우 외, 2000), 변질대의 견운모에 대한 K-Ar 연대는 70.1±2.1과 70.5±2.1 Ma이다(Koh et al., 2000).

Table 1. Characteristics of Host Rock and Lighthouse vein in Gasado epithermal deposit.

	Host rock	Lighthouse vein, Lighthouse east vein	Reference
Host rock alteration	Advanced argillic, argillic, phyllic and prophylitic zone in intermediate to silicic extrusive rocks in the Cretaceous volcano-tectonic terrane		Koh et al., 2000; Kim et al., 2002; Choi et al., 2005
Veins within fault			
Fault type	NW-trending normal dextral faults with dykes	NE-trending normal sinistral faults with gold-bearing veins at the tip of strike-slip fault	Yang, S.J., 2018
Trend or attitude Slickenline	NW, NS, NW	N10°E/70NE, N26°E/53°NW pitch 83°W	
Length Width Displacement width Fault core thickness Fault scaling	GNATIO	NAL UNI	
movement age Vertical extent Ore and sulfide minerals	5	一直	
Textures		Colloform, chalcedony, bladed lattice, brecciated, feathery, cockade, fibre and crustiform in hanging-wall Mulitiple stage (gold mineralized in stage II & III)	
Hydrothermal breccias Fluid inclusions	3	managar otago (gota minoramba in otago ir a iii)	
T _h in quartz		158~253 °C in H ₂ O/-CO ₂ -NaCl system	Kim et al., 2002
Salinity	10/	0.9~3.4 wt.% equiv. NaCl)	Kim et al., 2002
Stable isotopes		/ /	
δ ¹⁸ O	101	-10.1~-8.0 ‰	Kim et al., 2002
δD		-68~-64 ‰	Kim et al., 2002
Age	6	H 91	
K-Ar	73.9~76.3 Ma in Jindo tuff 72.5~75.4 Ma in Jindo rhyolite 70.1±2.1, 70.5±2.1 Ma in altered sericite of Gasado		Kim and Nagao, 1992; Koh et al., 2000; Kim et al., 2002
Temperature		245~285 °C in which gold mineralized	Kim et al., 2002
Sulfur fugacity		10 ^{-12.64} ~10 ^{-10.42} atm in which gold mineralized	Kim et al., 2002
Eh		-	
fO_2			

^a Data for the Gasado mine are from Kim et al. (2002).

가사도 금광상의 생성온도 및 유황분압은 245~285℃, 10^{-12.64}~10^{-10.42}atm 으로 연구되었으며(Kim et al., 2002), 유체포유물의 균질화 온도 및 염농도는 158~253℃, 0.9~3.4 equiv. wt.% NaCl로 연구되었다(Kim et al., 2002), 광화유체에 대한 안정동위원소 δ¹⁸O 및 δD 값은 -10.1~-8.0‰ 및 -68~-64‰을 보이며(Kim et al., 2002), pH는 2에서 6 범위 사이에 분포한다.

Ⅲ. 연구 방법

기존 연구를 바탕으로 항공사진을 이용하여 지질도상의 선형구조를 통계적, 공간적으로 분석한 후 야외 조사 시 각 선형구조에 대한 태위를 조사하였고, 열수변질대에 따른 공생 광물들을 샘플링하여 실내 관찰과 광물학적 분석을 실시하였다. 특히 부광대가 존재하는 것으로 보고된 가사도 남부 등대맥이 존재하는 단층대를 집중적으로 조사하였고, 단층면을 중심으로 석영맥과 단열의 m 당 누적밀도수를 조사하였으며, 단층손상대의 폭을 측정하여 단층 스케일링에 대한 기존 연구를 바탕으로 단층핵의 두께, 단층의 변위 및 단층의 길이를 정의하였다. 등대 관사에서 노인봉 정상까지와 노인봉 남서쪽에 위치하는 고령토 채굴적, 궁항해변 인근, 옥출광상 등에서 열수변질 분포에 따른 광물의 샘플을 수 개씩 채취하여 단층의 기하, 단층손상대, 단층의 길이와 열수변질대를 비교하여 열수의 이동 경로 및화학적 변화를 추적하여 지질구조에 대해 제어된 광상의 성인 모델을 도출하였다.

Ⅳ. 연구 결과

1.열수맥의 조직과 광물 공생 단계

가사도 남부에서 열수 기원의 석영맥은 판상 및 망상 석영맥으로 주로 산출되며, 빗살, 호상, 깃털, 각력 및 치환 조직을 보여준다. 교질상의 은미 정질 또는 옥수질 석영맥과 빗살 무늬의 탄산염 가상 결정들이 간혹 발견 되며, 이들은 미립의 석영에 의해 치환된 것으로 비등의 증거로 제시된다. 구조와 광물 공생관계를 토대로 열수 유입(1.8-2.4cm)이 네 단계로 발생한 것으로 구분된다. 첫 번째 단계(Stage I)는 금 침전이 일어나지 않은 시 기로(barren) 초기에 각력화 작용이 발생하면서 석영, 빙정석, 녹니석, 적철 석, 섬아연석, 방연석, 황동석, 방해석 등이 산출되었다. 두 번째 단계 (Stage Ⅱ)에서는 초기와 후기에 각력화 작용이 발생했고, 석영과 섬아연 석이 두드러지게 발달하며, 경계를 따른 검붉은 색의 황철석 침전과 함께 금이 최초로 침전되었으며, 부광대를 이루는 침전 단계이기도 하다. 세 번 째 단계(Stage Ⅲ)에서는 열수로 인한 각력화 작용이 활발하게 발생하면서 석영, 적철석, 섬아연석, 황동석 등이 다량 산출되었고 일부 금침전이 발생 하였다. 네 번째 단계(Stage Ⅳ)에서는 열수 각력 작용이 좀 더 유지되면 서 방해석과 황철석 등이 침전되었다. 방해석의 등장은 더 이상의 금 침전 은 발생되지 않음을 의미한다. 1단계와 2단계의 경계는 불분명하고 1단계 와 3단계의 경계는 명확한 것으로 관찰된다(Fig. 3)(Table 1).

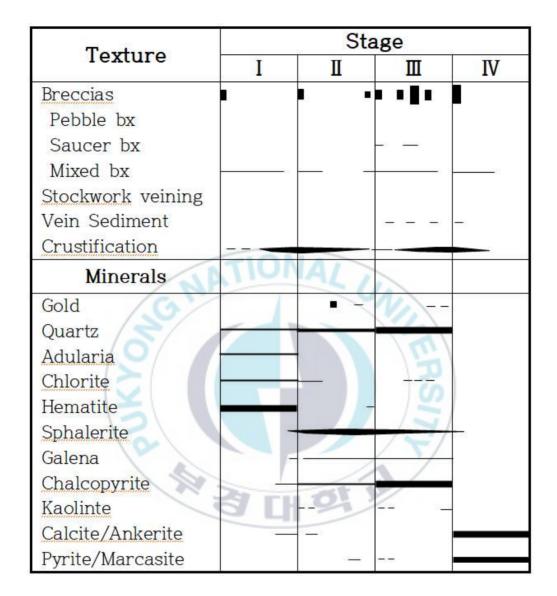


Fig. 3. Paragenetic sequence of stratigraphy and mineralogy. Distinguishable four main stages: every stage has breccia filling, stage II and III contains gold ores, while stage I and IV are barren.

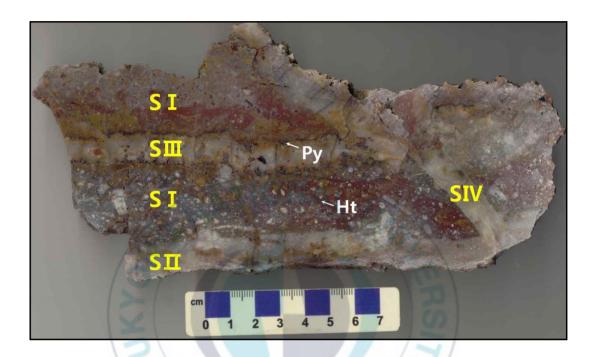


Fig. 4. Representative vein system by stage at the Gasado epithermal gold deposit. Brecciation for boiling in stage I containing much hematite(Ht), hydrothermal intrusion with unclear boundaries and gold deposition in stage II, hydrothermal intrusion again with sharp boundary and gold and pyrite(Py) deposition in stage III, and barren quartz vein in stage IV.

Table 2. Representative stratigraphic units of a vein, and its inferred genesis and history.

Stage	Unit	Inferences and history	Inferred cause
Alteration	illite/smectite and pyrite	relatively acid	water-rock interaction
Stage I (breccia)	breccia and gray quartz hematite and quartz	physical break-up opened up excess heat boiling intrusion of O ₂ -bearing water	break boil and quench
Stage II (cyclic band)	quartz, sphalerite, galena, chalcopyrite fine-grained sulfides and native gold course-grained sulfides and native gold crustification	boiling and pH increase rapid deposition excess heat boiling quartz saturated by temperature effect	boil quench and dilute boil quiescent time
StageIII (cross cutting vein)	milky quartz, clear quartz sphalerite, galena, chalcopyrite fine-grained sulfides and native gold	excess heat boiling quartz saturated by temperature effect	boil quiescent time
StageIV	calcite, pyrite cut the early vein	ground water heating	heating without boil

2. 열수변질대 분포 특성에 따른 광물 분포도

가사도 남부 등대맥에서 가사도 중부 스톡맥까지 북동 방향의 수평적 선상(map view)에서 야외 조사를 통해 열수변질대를 육안으로 관찰했을 때노인봉 상부 지역에는 딕카이트, 석영으로 이루어진 변질대가 분포하고, 노인봉 주변부의 동심원 상으로 딕카이트, 견운모, 황철석 등이 관찰되며, 노출된 등대맥과 등대동맥에서 카올리나이트, 견운모 등이 발달하며 스톡맥일대에서는 방해석, 아듈래리아, 녹니석, 녹렴석 등의 광물이 관찰된다.

광물자원공사의 시추자료를 바탕으로 열수변질대를 수직적으로 조사하였을 때, 석영맥 상부 단열면을 따라 딕카이트가 수반되며, 하부로 갈수록 카올리나이트, 견운모, 녹니석 및 녹렴석, 방해석으로 산출되는 것으로 확인된다. Fig. 4와 같이 명반석, 적철석, 딕카이트, 카올리나이트, 견운모, 납석, 빙정석, 방해석 순으로 분포한다. pH가 상승하며 열수가 단열 등의 압력과온도의 급격한 환경 변화를 만날 때 물이 끓는 비등이 발생하며 비등에 의해 각력화 작용이 동반되며, CO₂나 SO₄ 등의 휘발성 물질이 농집되면서노인봉 상부로 이동 후 집적된 것으로 추정된다.

가사도 남쪽 끝에 위치한 등대를 중심으로 각력화작용과 더불어 열수변 질작용이 수반되며, 단층에 따른 단열이 뚜렷한 방향성을 가지고 있으며 열수맥은 주로 석영으로 구성된다.

금광상 주변부에서는 견운모(sericite-phyllic zone)가 광범위하게 산출되는 점토 변질대, 석영맥 부근에서는 강한 규화작용(silicification)을 받아 고지대 형성하고 있으며, 특히, 등대맥의 상부에는 부분적으로 명반석, 덕카이트, 석영으로 이루어진 고점토 변질대가 분포한다. 북동쪽으로 갈수록 견운모 변질대, 프로필릭 변질대가 발달하면서 스톡맥에서 열수변질대의 분포가 종료되는 것으로 확인된다(Fig. 4). 다만 이것은 북동방향의 지질도상의 관찰이며, 남북 방향의 변질대 분포는 이 연구에서 실시되지 않았다.

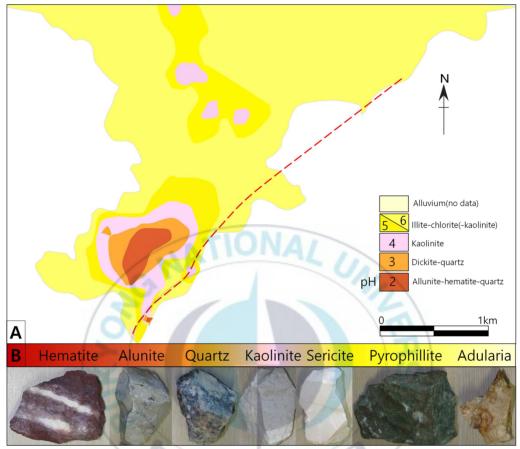


Fig. 5. (A) The hydrothermal alteration map of Gasado epithermal gold deposit. There are four altered zones; advanced argillic, argillic, phyllic and propylitic zone arranged concentrically from the center(modified from Kim et al., 2005). Silicified zone caused by acidic fluid formed a high terrain that is resistant to weathering.

- *advanced argillic(alunite-dickite-quartz)
- *argillic(quartz-dickite-kaolinite)
- *phyllic(quartz-sericite-pyrite)
- *propylitic(chlorite-carbonate-quartz-feldspar-pyroxene)
- (B) Representative specimens sampled from each alteration zone in order from pH 2 to pH 6: hematite, alunite, quartz, kaolinite, sericeit, pyrophillite and adularia.

3. 석영맥과 단열 누적밀도

연구지역의 선형구조는 북동 방향과 북서 방향이 우세하고 동서 내지 서 남서 방향의 선형구조도 관찰된다. 노인봉과 같이 상대적으로 높은 고도를 이루는 지역은 규화작용이 발달한 곳으로써 풍화에 강한 석영맥이 고지대 를 형성하고 있다. 가사도 남부 등대 남쪽에 위치한 석영맥인 등대맥의 주 향과 경사는 N44°E/78°NW이고, 맥의 폭은 14m 정도이며, 단층조선 등의 운동감각으로 볼 때 좌수향 주향이동단층에서 정단층 작용이 2차적으로 발 생하였으며, 단층의 단열을 따라 열수가 유입되어 등대맥이 형성되었고, 등 대맥을 기준으로 서쪽 상반에서 주 단층대와 비슷한 방향의 북북동 내지 북동 방향의 석영맥과 단열들이 하반보다 우세하게 발달하며 높은 누적 밀 도수를 보였다(Fig. 5). 이러한 석영세맥과 단열들의 분포 범위를 파악하여 단층손상대의 너비가 계산 가능하였고, 단층의 중심부인 단층핵으로 갈수 록 석영세맥과 단열에 대한 누적 밀도수는 증가하며 서쪽으로 갈수록 점점 단열수가 감소하며 단층면에서 20m 지점에서 종료됨을 관찰할 수 있다. 대부분의 단열과 세맥은 N30~40°E / 60~70° NW 혹은 SE의 태위를 가지 고, 폭은 수 cm로 다양하게 발달하며 서로간의 관입 관계(cross-cutting relationship)가 불분명하다. 북동 방향의 주 단층에 평행하며 인장을 지시 하고, 국부적인 단열 밀도 증가는 2차 단층의 존재를 간접적으로 지시한다. 등대맥의 단층 손상대의 규모는 상반에서 약 14~20m로 파악되었다. 상반 에 집중적으로 발달한 석영맥과 단열들로 인해 하반보다 열수로 인한 변질 이 집중적으로 발달한 이방성 변형이 관찰된다. 단층작용으로 인한 변형과 변질은 단층핵으로 갈수록 증가하고 단층에서 멀어질수록 감소하다가 종료 되고. 손상대가 종료되는 지점 부근에서 방해석맥이 관찰되었다.

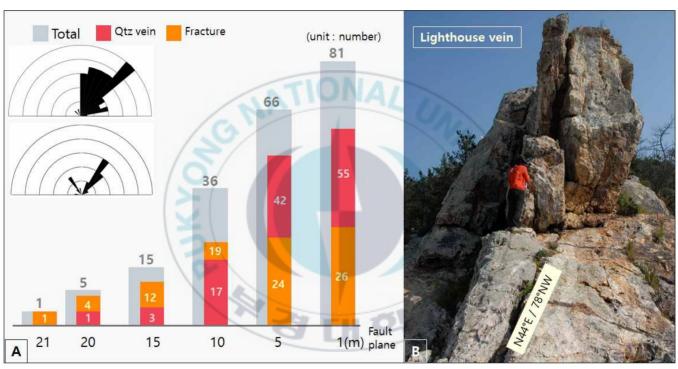


Fig. 6. Cumulative density for quartz veins and fractures of hanging wall of normal fault toward west from Lighthouse vein.

4. 주향이동단층과 2차 단층인 정단층 작용

본 연구에서는 단층의 정의는 다음과 같이 한다. 기재적으로는 취성변형 메커니즘이 우세한 미끌림면(단층핵) 또는 벽에 평행한(전단) 불연속면과 그것을 둘러싼 암체로 구성된 판상의 암체로 정의하고, 역학적으로는 변형과 관련된 속도 혹은 변위장의 불연속면으로 정의한다. 또한 단층대는 충분히 서로 가까이 있는 연속적인 준평행한 단층들 또는 미끌림면으로 단층 핵과 동일한 용어로 정의한다(Fossen, 2010).

가사도 남부의 등대 아래에는 북동 주향의 좌수향성 정단층에 금을 배태한 석영맥으로 채워져 있는 등대맥이 발달하고 있다. 등대맥은 북서 주향의 다른 단층과 관입암에 의해 변위 혹은 변형되었기 때문에 가사도의 변형사를 추론하는 열쇠가 된다. 등대맥의 서쪽 단층의 상반에는 주향이 북북동이며 선주각이 83°W로 정단층을 지시하는 모드 Ⅲ의 찢김(tearing) 전단 단열의 단층조선이 발달하고, 등대맥의 동쪽인 등대 바로 하부에는 주향이동단층을 지시하는 모드 Ⅱ의 미끌림(sliding) 전단 단열인 북동 방향의 단층조선이 발달하고 있다(Fig. 6).

가사도 남동부인 등대동맥이 분포한 지역에는 정단층 2개가 서로를 향해 경사하는 지구(graben)와 서로 멀어지면서 경사하는 지루(horst) 구조의 공액 관계가 다수 발달한다. 북동 주향의 좌수향 전달 인장성의 공액 정단층계와 북서 주향의 우수향 전달 인장성 공액 정단층계가 함께 분포하고 있다. 단열의 변위는 수 cm에서 수 m 규모이며, 북동 주향의 지루 및 지구구조에는 석영맥이 충진되어 있고, 북서 주향의 지구 구조에는 석영맥이미미하게 충진되어 있거나 석영맥이 전혀 없는 것도 있다. 북동 방향의 정단층계와 북서 방향의 정단층계의 직접적인 절단 관계는 확인되지 않으나석영맥의 수, 암맥과 주향이동단층과 같은 다른 구조들로 볼 때 북서 방향의 정단층계의 연대가 좀 더 젊은 것으로 확인된다.

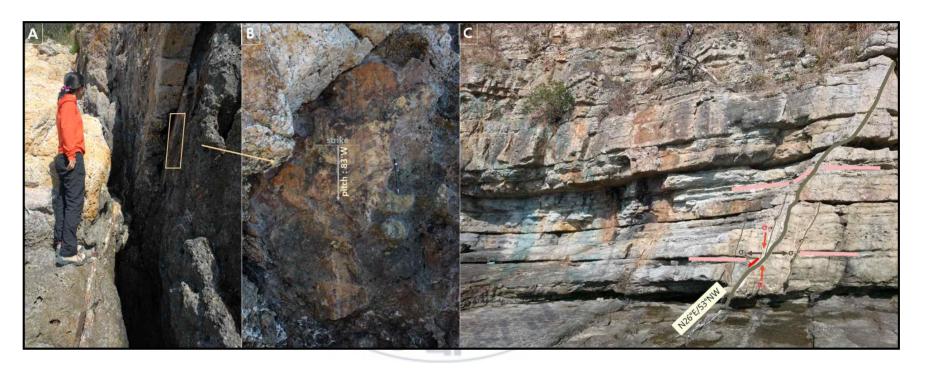


Fig. 7. NE trending normal faults system which has systematic and secondary fractures filled with quartz vein as well as slickenline.

V. 토의

가사도 금광상은 불국사 화산활동과 관련된 응회암, 석영안산암 및 유문암 등의 화산암류 및 퇴적암을 모암으로 하여 배태된 광상으로 백악기 말화산활동에(70Ma)에 수반된 광상이며 지표 상부에서는 고점토 변질대가분포하지만 광상 주변은 견운모대로 저유황형 천열수 광상으로 해석하는 것에 대체적인 합의가 이루어져 있다.

열수 변질대는 광상 주변에 광범위하게 발달하고 있어 자원 탐사에 있어 중요한 지시자로 사용되는데, 열수는 고온 상태에서 이동하므로 열수는 주변의 모암과 반응을 하면서 이차적 광물조합을 이루게 되고 변질광물들을 통하여 광상 형성 당시의 물리·화학적 조건의 변화를 예측할 수 있다. 대부분의 열수 광상은 모암에 발달한 단열을 따라 열수가 주로 이동하므로 단층 및 단열을 중심으로 변질광물들이 잘 발달하는 경향이 있다. 열수변 질작용에서 수소이온 교대작용(가수분해)와 알칼리 교대작용이 기본적으로 중요한데 수소이온과 광물의 금속이온이 교대됨으로 인해 변질광물 조합이수평적, 수직적으로 점이적인 배열을 보이게 되고 광화유체의 화학적 성질도 연속적으로 변하게 된다.

$$3KAlSi_3O_8 + 2H^+ \rightarrow KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2 + 2K^+ + 6SiO_2$$
 (K-feldspar) (sericite) (1)

$$2KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2 + 2H^+ \rightarrow 2Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 2K^+$$
(sericite) (kaolinite) (2)

$$2Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 6H^+ \rightarrow Al_2Si_4O_{10}(OH)_2 + 2Al^{3+} + 6H_2O$$
(kaolinite) (pyrophyllite) (3)

$$Al_2Si_4O_{10}(OH)_2 + 6H^+ \rightarrow 4SiO_2 + 2Al^{3+} + 4H_2O$$
 (pyrophyllite) (quartz) (4)

$$3Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 2H^+ + 2K^+ + 4SO_4^- \rightarrow 2KAl_3(SiO_4)_2(OH)_6 + 6SiO_2$$
(kaolinite) (quartz) (5)

$$KAl_3(SiO_4)_2(OH)_6 + 8H^+ \rightarrow K^+ + 3Al^{3+} + 2HSO_4^- + 6H_2O$$
 (6)

또한 열수가 비등(boiling)에 의한 수소이온이 감소하면서 pH가 증가하고, 탈황화작용에 황화수소가 광석광물로 침전되면서 금 또한 침전된다.

$$8Au(HS)_2^- + 6H^+ + H_2O \rightarrow 8Au + SO_4^{2-} + 15H_2S$$
 (aq) (aq) (gold) (aq) (aq or gas) (1)

$$8Au(HS)_{2}^{-} + 4H_{2}O + 15Fe^{2+} \rightarrow 8Au + SO_{4}^{2-} + 15FeS + 24H^{+}$$
(aq) (aq) (gold) (aq) (po) (aq) (2)

등대맥과 노인봉을 중심으로 열수 시스템에서 암석-열수가 접촉하는 과정에서 물/암석 반응 범위에 따라 열수변질대의 확산범위를 나타내는 가사도 금광상의 열수변질도이고 pH에 따른 다양한 광물 조성을 나타낸다(Fig. 4). 이 그림에서 가사도 남부 노인봉은 열수변질대의 중심부로써 산성 변질작용을 받아 pH 2에 해당하는 명반석, 석영의 광물상으로 구성된 규화대가 형성되어 있고, 동심원 상으로 주변부로 갈수록 pH는 증가하며 녹니석·견운모와 같은 프로필릭 변질대가 광범위하게 분포한다.

열수맥의 기하 분석은 암석에서 응력조건을 해석하거나 광화맥 발달을 이해하는데 사용된다(Sibson, 1996). 이 경우 맥의 발달은 주단층면과 관련해서 주응력 방향에 영향을 받는다. 단층과 단열은 취성변형으로 인한 산물이며 손상대 내에서 열수 유체의 이동 방향을 제어해서 최종적인 기하및 열수광상의 범위가 결정된다(Hodgson, 1989; Morewood et al., 1999; Stowell et al., 1999; Gaboury et al., 2001; Austin and Blenkinsop, 2009; Yang et al., 2015; Micklethwaite et al., 2015; Taillefer et al., 2017). 단층핵의 두께는 단층의 낙차에 비례해 증가하고, 단층핵과 마찬가지로 손상대의 폭은 층마다 다를 수 있으나 손상대의 두께(DT)와 단층변위(D) 사이에

는 일정한 관계를 가지는데, 이들 변위가 100m까지인 단층들에 대해서는 D=DT와 D=10DT 범위 안에는 속하는 것을 보여준다. 단층의 길이는 두 가지로 방법으로 측정할 수 있는데(Kim and Sanderson, 2005) 첫째는 미 끌림 벡터에 평행한 방향으로 길이를 측정하는 것이고(Watterson, 1986; Walsh and Watterson, 1988), 두 번째는 지질도상에서 단층 자취의 길이 또는 수평적 차원에서 가장 긴 것이다(Dawers et al., 1993; Cartwright et al., 1995; Poulimenos, 2000; Schultz and Fossen, 2002).

등대맥이 위치한 단층의 상반 손상대의 길이는 최대 20m로 관찰되는데 단층변위와 단층손상대의 일정한 관계를 이용하여 단층의 변위를 100 m로 환산할 수 있으며 단층변위를 이용하여 단층핵의 두께는 1 m, 단층의 길이(L)는 1~2 km로 산출할 수 있으며(Savage et al., 2011; Torabi et al., 2011), 손상대의 폭을 이용하여 진행대의 성장 또한 파악할 수 있다.

등대맥에서 북동쪽 스톡맥까지의 직선거리는 2 km이며, 북북동-남남서 방향의 최대압축응력(σ1)에 의해 좌수향 주향이동단층이 발달했고(모드Ⅱ) 단층의 말단부인 등대맥에서 혼성균열의 윙크랙(모드 I+Ⅲ)이 발달하고 가사도 남동부인 주향이동단층의 중심부에서 모드 I의 인장성지루 지구 구조가 발달한 것으로 해석된다. 열수는 등대맥 하부에서 상승하여 물리화학적 변화를 거치면서 등대맥 하부 해발 80~120 m 심도에서 비등에 의해 금이 침전하고 잔존하는 휘발성 기체에 의해 노인봉상부가 피복되면서 고점토 변질대가 발달된 것으로 해석된다. 등대맥지표에서는 풍화에 강한 규화작용이 발달하였고, 스톡맥에서는 방해석맥이 발달하는 것으로 볼 때 등대맥 하부에서 유체가 상승하여 가사도 북동쪽으로 유체가 평행 이동했음을 판단할 수 있다.

가사도 지역 금·은 광상의 성인 모델은 광역적인 고응력장과 지역적 고응력장에는 다소 차이가 있을 수 있으나 120 Ma 내외에 발달한 것으로 합의가 된 광주-영동 주향이동단층계의 고응력장(Choi et al., 2005)의 남북방향과 가사도 남동부의 좌수향 주향이동단층의 북북동-남남서 고응력장과 거의 일치하는 것으로 볼 때 발달한 유체의 이동통로는 백악기 Aptian 시기에 발달한 것으로 추정된다(Fig. 7). 가사도의 모암인 경상분지의 유천층군은 100Ma 전후인 Albian에서 Cenomanian 시기에 퇴적된 것으로 연구가 되어 있으며, 열수의 열원 및 열수 혼합의 기원이되는 해남-진도분지 내 국부적인 마그마 정치는 74Ma의 Campanian(Kim et al., 2016)과 86Ma에서 70Ma인 Santonian에서 Campanian 시기에 일본과 경상분지 심부에서 slab rollback으로 인한 인장성 단열작용으로 경상분지 및 가사도의 지질구조가 재활성화되면서 열수가 유입된 것으로 판단된다. 광화 열수 유입 후 5Ma 이내에 광석 광물 및 맥석 광물들이 침전(Hedenquist et al., 2000)되면서 가사도 금광상이 발달한 것으로 추정된다.

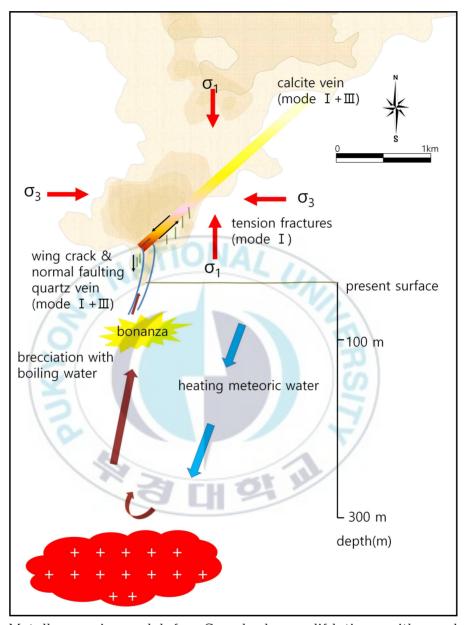


Fig. 8. Metallogenesis model for Gasado low sulifdation epithermal gold deposit.

Ⅵ. 결론

경상분지 서남단에 위치한 광화대의 구조지질학적 규제와 수반된 저유황 형 천열수 금·은 광상의 특징은 다음과 같다.

- (1) 가사도 금광상 형성 당시 고응력장의 시기는 120Ma이고 방향은 북북동 -남남서이다.
- (2) 가사도 금광상의 모암은 100Ma 발달한 경상분지 유천층군의 화산암을 모암으로 하여 금광상이 배태되어 있다.
- (3) 열수의 기원은 지표수이며, 열원은 하부의 칼크-알칼리 마그마(74Ma) 이며, 모암과 상호반응하였다.
- (4) 유체의 유동 경로는 좌수향 주향이동단층이며 말단부의 윙크랙에 부광대가 존재한다.
- (5) 유체가 운동하게 된 운동학적 원인은 단층손상대가 주기적으로 발달하면서 단층의 진행대가 발달하면서 stick slip으로 열수 유체를 유동시켰다.
- (6) 유체의 이동 방향에 따라 열수의 pH가 점이적으로 변화하는 변질광물들이 분포되어 있다.
- (7) 금은 비등으로 침전되었으며, 전형적인 저유황형 천열수 금광상이다.

참고문헌

- Austin, J.R. and Blenkinsop T.G. (2009) Local to regional scale structural controls on mineralisation and the importance of a major lineament in the eastern Mount Isa Inlier, Australia: Review and analysis with autocorrelation and weights of evidence. Ore Geology Review, 35, 298–316.
- Cartwright, J.A., Trudgill, B.D., Mansfield, C.S. (1995) Fault growth by segment linkage: an explanation for scatter in maximum displacement and trace length data from the Canyonlands Grabens of SE Utah. Journal of Structural Geology, 17, 1319–1326.
- Cho, H.I. and Moon, H.S. (1978) Report on Korean Alumnite Investigation, Special Investigation Publication 02, Resources Development Institute.
- Choi, S.-G., (2002) The genetic implications of Mesozoic gold silver mineralization, Korea. In: Jin, M.J., Lee, S.R., Choi, H.I., Park, K.H., Koh, S.M., Cho, D.L. (Eds.), Proceedings of Mesozoic Sedimentation, Igneous Activity and Mineralization in South Korea, Korea Institute of Geology, Mining and Materials, Daejeon, Special Publication, vol. 1/2, pp. 216 226.
- Choi, S.-G., Choi, S.H., (1995) Contrasting style of gold and silver mineralization in the central and southeastern Korea. Economic and Environmental Geology 6, 587 597.
- Choi, S.-G., Wee, S.M., (1992) The genetic characteristics of gold and/or silver vein deposits related to chemical composition of

- electrum in central Korea. Journal of Geological Society of Korea 28, 196 217. (in Korean with English Abstract).
- Choi, S.-G., Park, N.Y., Park, S.W., (1986) Gold silver mineralization of Taechang Boryeon and Geumwang mines in northeastern Chungcheong provinces. Journal of Korean Institute Mining Geology Special Issue 19, 193 206. (in Korean with English Abstract).
- Choi, S.-G., Lee, D.E., Pak, S.J., Choi, S.H., Kang, H.S., (2001a) Genetic model of mineral exploration for the Korean Au Ag deposits:

 Mugeug mineralized area. Economic and Environmental Geology, 34, 423 435. (in Korean with English Abstract).
- Choi, S.G., Park, S.J., Choi, S.H., Shin, H.J. (2001b) Mesozoic Granitoids and Associated Gold-Silver Mineralization in Korea. Economic and Environmental geology, 34, 25–38. (in Korean with English Abstract).
- Choi, S.-G., Ryu, I.-C., Wee, S.M., Kim, C.S., Pak, S.J., (2003) Overview of epithermal gold-silver mineralization, Korea: tectonic and genetic implication. Program with Abstracts: The Origin of Granites and Related Rocks, The 5th Hutton Symposium, Toyohashi, Japan, Geological Survey of Japan Interim—Report, 29, 23.
- Choi, S.G., Ryu, I.C., Pak, S.J., Wee, S.M., Kim, C.S., Park, M.E. (2005) Cretaceous epithermal gold-silver mineralization and geodynamic environment, Korea, Ore Geology Reviews, 26, 115–135. doi:10.1016/j.oregeorev.2004.10.005
- Corbett, G.J., Leah, T.M. (1998) Southwest Pacific Rim gold-copper systems: structure, alteration, and mineralization. Society of Economic Geologists, 6, DOI:10.5382/SP.06

- Chough, S.K. (2013) Geology and sedimentology of the Korean peninsula. Elsevier, 363. ISBN: 978-0-12-405518-6.
- Dawers, N.H., Anders, M.H., Scholz, c.H. (1993) Growth of normal faults: Displacement-length scaling. Geology, 21, 1107–1110.
- Gaboury, D., Carrier, A., Crevier, M., Pelletier C. (2001) Predictive Distribution of Fault-Fill and Extensional Veins: Example from the Sigma Gold Mine, Abitibi Subprovince, Canada. Sketchley Economic Geology, 96, 1397–1405.
- Fossen, H. (2010) Structural Geology. Cambridge University Press, ISBN: 9781107057647
- Hayba, D.O., Bethke, P. M., Heald, P., Foley, N.K. (1985) Geologic,
 Mineralogic, and Geochemical Characteristics of Volcanic-Hosted
 Epithermal Precious-Metal Deposits. Society of Economic Geologists.
 DOI: https://doi.org/10.5382/Rev.02.07. ISBN electronic: 9781629490090
- Hedenquist, J.W. (1987) Volcanic-related hydrothermal systems in the Circum-Pacific Basin and their potential for mineralisation. Mining Geology, 37, 347-364. DOI: https://doi.org/10.11456/shigenchishitsu1951.37.347
- Hodgson, C.J. (1989) The structure of shear-related, vein-type gold deposits: A review. Ore Geology Reviews, 4, 231-279. https://doi.org/10.1016/0169-1368(89)90019-X
- Kang, H.S. (2000) Gasado District Research Report. Korea Mining Promotion Corporation, 17.
- Kirwin, D.J. (1995) Unpublished data.
- Kim, C.S., Choi, S.G., Choi, S.H., Lee, I.W., (2002) Hydrothermal

- alteration and its genetic implication in the Gasado volcanic-hosted epithermal gold-silver deposit: use in exploration. Korean Journal of Mineralogy and Petrology, 15, 205–220.
- Kim, I.J. and Nagao, K. (1992) K-Ar ages of the hydrothermal clay deposits and the surrounding igneous rocks in southwest Korea. The Journal of the Petrological Society of Korea, 1, 1226–2471.
- Kim, T.H. (2016) Interpretations of the Geological Structures and Characteristics of the Hydrothermal Quartz Vein in Gasa island, SW Korea. Unpublished master thesis, Pukyong National University, 78.
- Kim, Y.S., Andrews, J.R., Sanderson, D.J., (2000) Damage zones around strike-slip fault systems and strike-slip fault evolution, Crackington Haven, southwest England. Geoscience Journal, 4, 53 72.
- Kim, Y.S., Andrews, J.R., Sanderson, D.J., (2001a) Reactivated strike-slip faults: examples from north Cornwall, UK. Tectonophysics, 340, 173 194.
- Kim, Y.S., Andrews, J.R., Sanderson, D.J., (2001b) Secondary faults and segment linkage in strike-slip fault systems at Rame Head, southern Cornwall. Geoscience in South-West England, 10, 123 133.
- Kim, Y.S., Peacock, D.C.P., Sanderson, D.J., (2003) Mesoscale strike-slip faults and damage zones at Marsalforn, Gozo Island, Malta. Journal of Structural Geology, 25, 793 812.
- Kim, Y.S., Peacock, D.C.P., Sanderson, D.J. (2004) Fault damage zones. Journal of Structural Geology, 26, 503–517. doi:10.1016/j.jsg.2003.08.002
- Kim, Y.S. and Sanderson, D.J. (2005) The relationship between displacement and length of faults: a review. Earth-Science Reviews,

- 68, 317-334. doi: 10.1016/j.earscirev.2004.06.003
- Kim, S.W. and Yun, Y.Y., Korea geological map (1:50,000), Jindo-Jisan district instruction manual. National Geological Survey, 13-15.
- Kim, S.W., Kwon, S.H., Park, S.I., Lee, C.Y., Cho, D.L., Lee, H.J., Ko, G.T., Kim, S.J. (2016) SHRIMP U Pb dating and geochemistry of the Cretaceous plutonic rocks in the Korean Peninsula: A new tectonic model of the Cretaceous Korean Peninsula. Lithos, 262, 88–106. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.06.027.
- Koh, S.M., Takagi, T., Kim, M.Y., Naito, K., Hong, S.S., Sudo, S., (2000) Geological and geochemical characteristics of the hydrothermal clay alteration in South Korea. Resource Geology, 50, 229 242. https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2000.tb00072.x.
- Koh, S.M., Park, J.G., Lee, H.J. (1992) Study of Gasago alteration zone: volcanic epithermal deposit exploration and model(Ⅲ). National Geological Survey, 13–15.
- Lee, I.W., Kim, R.H., Kim, M.S., Kim, S.T. (2000) Scrutiny report(gold: Jindo district). Korea Mining Promotion Corporation, 8–11.
- Lee, I.W., Lee, H.S., Yu, Y.J., Jung, Y.H. (2001) Scrutiny report(gold: Haenam district). Scrutiny report(metal ore: Haenam, Eumsung, Pocheon district). Korea Mining Promotion Corporation, 39–49.
- Lim, S.T. (2009) Structural controls on the Gasado epithermal Au-Ag deposits in the southwestern part of Korea. Unpublished master thesis, Pukyong National University, 78.
- Micklethwaite, S., Ford, A., Witt, W., Sheldon, H.A. (2014) The where and how of faults, fluids and permeability insights from fault

- stepovers, scaling properties and gold mineralisation. Geofluids, 15, 240–251. https://doi.org/10.1111/gfl.12102.
- Morewood, N.C. and Roberts, G.P. (1999) Lateral propagation of the surface trace of the South Alkyonides normal fault segment, central Greece: its impact on models of fault growth and displacement length relationships. Journal of structural geology, 21, 635–652. https://doi.org/10.1016/S0191-8141(99)00049-8.
- Park, M.E., Sung, G.Y., James, L.P. (2001) Au-Ag-Te Mineralization by Boiling and Dilution of Meteoric Groundwater in the Tongyeong Epithermal Gold System, Korea: Implications from Reaction Path Modeling. Economic and Environmental Geology, 34, 507–522.
- Poulimenos, G. (2000) Scaling properties of normal fault populations in the western Corinth Graben, Greece: implications for fault growth in large strain settings. Journal of structural geology, 22, 307–322. https://doi.org/10.1016/S0191-8141(99)00152-2.
- Robb, L. (2005) Introduction to ore-forming processes. Blackwell Science Ltd. 373. ISBN: 978-0-632-06378-9.
- Savage, H.M. and Brodsky, E.E. (2011) Collateral damage: Evolution with displacement of fracture distribution and secondary fault strands in fault damage zones. Journal of geophysical research, 116. https://doi.org/10.1029/2010JB007665.
- Schultz, R.A. and Fossen, H. (2002) Displacement length scaling in three dimensions: the importance of aspect ratio and application to deformation bands. Journal of structural geology, 24, 1389–1411. https://doi.org/10.1016/S0191-8141(01)00146-8.

- Sennitt, C.N. (1995) Geological assessment, Gasado Island, Republic of Korea, Internal Co. Rept. (Indochina Goldfields Ltd.).
- Sibson, R.H. (1996) Structural permeability of fluid-driven fault-fracture meshes. Journal of structural geology, 18, 1031–1042. https://doi.org/10.1016/0191-8141(96)00032-6
- Stowell, J.F.W., Watson, A.P., Hudson, N.F.C. (1999) Geometry and population systematics of a quartz vein set, Holy Island, Anglesey, North Wales. Geological Society, London, Special Publications, 155, 17–33. https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1999.155.01.04.
- Taillefer, A., Soliva, R., Frottier, L.G., Goff, E.L., Martin, G., Seranne, M. (2017) Fault-Related Controls on Upward Hydrothermal Flow: An Integrated Geological Study of the Têt Fault System, Eastern Pyrénées (France). Geofluids, 2017. https://doi.org/10.1155/2017/8190109.
- Torabi, A. and Berg, S.S. (2011) Scaling of fault attributes: A review.

 Marine and Petroleum Geology, 28, 1444–1460.

 https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2011.04.003.
- Walsh, J.J. and Watterson, J. (1988) Analysis of the relationship between displacements and dimensions of faults. Journal of Structural Geology, 10, 239–247. https://doi.org/10.1016/0191-8141(88)90057-0.
- White, N.C., Hedenquist, J.W.(1990) Epithermal environments and styles of mineralization: variations and their causes, and guidelines for exploration. Journal of Geochemical Exploration, 36, 445–474. https://doi.org/10.1016/0375-6742(90)90063-G
- Yang, S.J., Koh, S.M., Lee, B.H., Lee, G.J., Jin, K.M. (2015) Study on

the characteristic of fluid flow in the shallow-level crust based on structural analysis on the veinlet. KIGAM projec report.

Yang, S.J. (2018) Characteristics of fluid-flow and structural controlling factors in geological media based on the analysis of dykes and veins. Unpublished Ph.D. thesis, Pukyong National University, 202.



영문초록

The gold and silver deposits that develop in Gasa-do located in the southwestern part of Jeollanam-do are pulsed, low-sulfur, thermal water gold and silver deposits. The formation of this deposit is reported to be related to volcanic complexes and annular volcanic depressions from late Cretaceous kalk-alkaline igneous activity. The parent rock is mainly composed of andesite, rhyolite tuff, and melted tuff compared to the Yucheon group in the Gyeongsang Supergroup, and tuff sandstone and conglomerate are interspersed. The lighthouse, which is an alloy silver quartz vein, is located under the southern lighthouse in Gasado and corresponds to the end of the Gwangju-Yeongdong strike fault system. Evidence of annular faulting indicative of volcanic complexes and annular volcanic depressions, which are common environments of hydrothermal gold and silver deposits, could not be confirmed.

Most of the strikes of alloy/silver quartz veins have strikes of N50~70°E and have a near-vertical inclination. At the outcrop between the dorsal aorta and the dorsal aorta, a tomographic line indicating the leftward strike movement is observed. In the upper half of the apical fault corresponding to the western side of the light aorta, the fault damage zone develops to a width of 20 m. It can be seen that from the dorsal vein to the stock vein.

Hydrothermal veins are extensively developed along the southeastern coast and coast of Gasado, with the dorsal and dorsal aortic and small hydrothermal veins. As a result of observation of the sample, hot water was injected at least three times, and the dynamic cause of the flow of hot water is considered to be stick slip. Through the hydrothermal alteration distribution map, it is confirmed that the hydrothermal fluid flowed through the tensile adiabatic passage, and the pH rises as it moves concentrically away from the old rod, that is, as the fluid flow path becomes longer. When comparing the correlation between the distribution of the strike movement fault from the Light veil to the Stock Mace and the hydrothermal alteration distribution, it is judged that the left-handed strike fault was revived after gold precipitation along the existing weak belt.

감사의 말씀

가사도 금광상에 대해 광상학적으로 조언해 주신 부경대학교 박맹언 교 수님께 사랑과 감사를 드립니다.

인내와 사랑으로 학생들을 지도하시는 김영석 지도교수님께 존경과 감사를 드립니다.

지질구조 해석에 관해 아낌없는 도움을 주신 한국지질자원연구원의 최진 혁 박사, 김태형 박사와 한국수력원자력의 권세현 연구원에게 감사의 말씀을 드립니다.

지질구조재해연구실 구성원과 활성단층 및 지진재해저감연구소 직원들께 도 감사를 드립니다.

석사 학위 논문을 준비하는 동안 저를 지지해 주고 시간과 에너지를 배려해 준 남편과 아들에게 감사를 드립니다.

무엇보다도 논문을 쓸 수 있는 환경과 마음과 지혜를 주신 하나님께 감사를 드립니다.