주 에티오피아 열곡대 내 온천수의 산출특성 및 천열수형 광상의 부존 잠재성

문동혁 · 김의준* · 고상모

한국지질자원연구원 광물자원연구본부

Occurrences of Hot Spring and Potential for Epithermal Type Mineralization in Main Ethiopian Rift Valley

Dong-Hyeok Moon, Eui-Jun Kim* and Sang-Mo Koh

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

The East African Rift System(EARS) is known to be hosted epithermal Au-Ag deposits, and the best-known example is Main Ethiopian Rift Valley(MER) related to Quaternary bimodal volcanism. Large horst-graben system during rifting provides open space for emplacement of bimodal magmas and flow channel of geothermal fluids. In recent, large hydrothermally altered zones(Shala, Langano, and Allalobeda) and hot spring related to deeply circulating geothermal water have been increasing their importance due to new discoveries in MER and Danakil depression. The hot springs in Shala and Allalobeda occur as boiling pool and geyser on the surface, whereas some areas didn't observe them due to decreasing ground water table. The host rocks are altered to quartz, kaolinite, illite, smectite, and chlorite due to interaction with rising geothermal water. The hot springs in MER are neutral to slightly alkaline pH(7.88~8.83) and mostly classified into HCO_3^- type geothermal water. They are strongly depleted in Au, and Ag, but show a higher Se concentration of up to 26.7 ppm. In contrast, siliceous altered rocks around hot springs are strongly enriched in Pb(up to 33 ppm, Shala), Zn(up to 313 ppm, Shala), Cu(up to 53.1 ppm, Demaegona), and Mn(up to 0.18 wt%, Shala). In conclusion, anomalous Se in hot spring water, Pb, Zn, Cu, and Mn in siliceous altered rocks, and new discoveries in MER have been increasing potential for epithermal gold mineralization.

Key words : epithermal Au-Ag deposits, Main Ethiopian Rift Valley, geothermal fluids, hydrothermally altered zone, hot spring

동아프리카 열곡계는 천열수 금-은 광상을 배태하고 있는 것으로 알려져 있으며, 그 대표적인 예로서 에티오피아에 발달된 열곡대는 제 4기 북마그마 화산활동과 관련하여 광화작용이 수반된다. 주 에티오피아 열곡대의 형성과정 동안 발달된 대규모의 지루-지구 구조는 마그마의 관입과 열수유체의 순환을 위한 열린 공간을 제공하였다. 최근 들어, 에티오피아 열곡대 및 다나킬 함몰지 내 천열수형 광화작용이 보고되고 있어, 주 에티오피아 열곡대 내 대규모 열수변질대의 발달(살라, 랑가노, 알라로베다)과 온천수에 대한 관심이 높아지고 있다. 온천수의 지표산출은 주로 비등천(살라) 또는 간헐천(알라로베다)의 형태로 이루어지고 있으나, 일부 지역은 지하수면의 하강으로 폭발적인 비등과 분출이 관찰되지 않는다. 온천수의 지표 분출과 관련하여 주변 암석들은 주로 석영, 카올리나이트, 일라이트, 스멕타이트, 녹니석의 광물조합을 갖는 암석으로 변질되어 있다. 온천수는 중성 내지 약한 알카리(pH 7.88~8.83)의 특성을 보이고, 대체적으로 중탄산염 유체로 분류된다. 온천수 내 금과 은 및 기타 수반원소들의 함량은 상당히 낮으나, Se의 함량이 최대 26.7 ppm으로 나타났다. 반면에 온천수 주변 규질 퇴적물들은 Pb(최대 33 ppm, 살라), Zn(최대 313 ppm, 살라), Cu(53.1 ppm, 데마에고나), Mn(최대 0.18 wt%, 살라) 등으로 다소 부화되어 있다. 결론적으로 온천수내 높은 Se 함량과 규질 암석내 Pb, Zn, Cu, Mn 이상 및 최근 천열수형 광화작용의 발견은 주 에티오피아 열곡대내 천열수형 광상의 부존 가능성에 관한 기대를 높인다.

주요어 : 천열수 금-은광상, 에티오피아 열곡대, 지열수, 열수변질대, 온천수

*Corresponding author: euijun.kim@kigam.re.kr

1. 서 론

주 에티오피아 열곡대(Main Ethiopian Rift Valley)는 소말리아 판과 누비아 판이 분리되는 과정에서 형성되었으며, 열곡작용 동안 심부까지 연장되는 지구-지루구조의 발달은 천부지각 내 대규모의 약선대를 형성시켰다. 이러한 지구조적 약선대는 천부지각내로 마그마의 상승과 정체를 위한 공간을 제공할 뿐 아니라, 천수의 심부순환을 위한 통로 역할을 한다. 열곡작용은 북마그마성(bimodal) 화산활동을 수반하며, 상부 맨틀의 부분용융으로 형성된 현무암질 마그마와 지각의 아나텍시스(anatexis)에 의한 산성 마그마로 구성된 북마그마성 화산활동을 야기한다(Sillitoe, 2002).

주 에티오피아 열곡대에서 발생하는 화성 및 화산활동은 지열수를 태우는 직접적인 열원이 되거나, 그로부터 분리된 상대적으로 고온의 열수유체와의 혼합에 의한 데워짐을 야기하였다. 이렇게 형성된 온도구배는 열곡대내 지열수의 순환을 보다 더 용이하게 하였다. 심부에서 데워진 지열수가 심부단층을 따라 지표환경으로의 빠른 상승은 유체의 비등(boiling)을 야기시킨다. 유체의 비등은 천열수 환경에서 가장 중요한 금의 침전 기작으로서 받아들여지고 있다. 또한 유체의 비등은 유체 내 규소 성분의 과포화를 야기하며, 지표면에서 대규모의 규질 온천침전물(silica sinter)을 퇴적시킨다.

동아프리카 열곡대내 열수형 광화작용은 이미 잘 알려져 있으며, 특히 주 에티오피아 열곡대 제 4기 화산활동과 관련하여 지열수의 순환과 지표의 열수변질대를 형성하고 있다. 과거 주 에티오피아 열곡대 내 지열수들은 지열발전의 공급원으로서만 고려되어져 왔다. 그러나 1990년 후반 열곡대 북부 아파르 삼각주내 텐다호(Tendaho)지역에서 온천수와 연계된 천열수 금 광화작용이 처음으로 보고된 바 있으며(Aquater, 1996), 지보티(Djibouti) 영토에 해당되는 아파르 삼각주의 남동부지역에서도 최근 천열수 광화작용에 관한 사례가 보고된 바 있어(Moussa *et al.*, 2012), 이 지역으로의 관심이 집중되고 있는 상황이다.

이번 조사는 주 에티오피아 열곡대내 대규모 지구조적 약선대를 따라 지열수의 순환과정에서 지표로 분출되는 온천수 및 주변 규질 암석들의 산출특성을 제시하고자 한다. 또한 온천수의 조성을 바탕으로 천열수형 광화작용을 야기하는 광화유체로서의 가능성을 검토하는데 그 목적이 있다.

2. 지질과 광상

2.1. 에티오피아의 지질

에티오피아 지질의 기저부는 다양한 강도의 변성작용 및 변형작용을 받은 선캠브리아기 암석들로 구성되어 있고, 후기의 화산 및 화성관입체가 이를 관입하고 있다. 선캠브리아기 암석들은 주로 편마암과 운모질, 녹니석질, 장석질 또는 각섬석질 편암으로 구성된다. 이들 암석들은 에티오피아 남부(Sidamo)와 서부(Wollega)에 널리 분포하고 있으며, 북부(Tigray)와 동부(Harar)에서 일부 노출되어 있다(Fig. 1).

선캠브리아기 암석들의 상부에 정합적으로 놓인 후기 고생대~전기 중생대의 해양성 및 대륙성 퇴적층들은 오가든(Ogaden) 동부에서 북서부로 바다의 이동 및 지각이 침강되는 동안 퇴적되었으며, 에티오피아의 동부와 북부에 주로 분포하고 있다(Tadesse *et al.*, 2003). 이들 상부는 트라이아이스기 Adigrat 사암, Antalo 층군의 쥐라기 석회암, 백악기 상부 사암층의 순으로 놓여 있다. 신생대 암석들은 퇴적암과 화산성 퇴적암들로 구성되며, 다나킬(Danakil) 함몰지의 동부 오가든에서 주로 노출되어 있다. 신생대 화산암들은 초기 제 3기 동안 열곡을 따라 광범위하게 분출하였으며(Mohr, 1963; Zanettin, 1993; Hofmann *et al.*, 1997), 주로 층상 현무암층과 일부 소량의 용결응회암으로 구성되어 있다.

주 에티오피아 열곡대는 에티오피아 북부에서 남부 아프리카의 모잠비크까지 연장되는 약 4,000 km 이상의 대 동아프리카 열곡대의 최북부 확장대에 해당한다. 또한 에티오피아-케냐 간 국경지대에서 아파르 함몰지(Afar Depression)까지 대략 폭 70-80 km, 길이 700 km의 연장을 가지며, 약 1 km 정도의 심부 지구(Graben)구조가 발달되어 있다. 이 열곡대는 동부 하라르(Harar)와 서부 고원지대를 절단하고 있으며, 동부 벵랑은 고원과 열곡 기저부 간의 상당한 변위를 갖는 지구-지루구조의 특성을 보인다. 열곡대와 경계되는 에티오피아 고원지대는 에오세~중부 마이오세 동안 분출된 두꺼운 층상 현무암과 소량의 유문암질 화산암층으로 구성되어 있다(Woldergabriel *et al.*, 1990). 반면에 열곡대의 기저부는 플라이오세-제 4기 화산성 분출암 및 화산 쇄설성 퇴적암으로 덮여져 있다. 현무암질 화산암은 남부에서 북부 아파르 지역으로 가면서 점차적으로 더 젊은 연대를 갖는 것으로 보고되어 있다(Tadesse *et al.*, 2003).

Fig. 1. General geology and location of survey areas within Main Ethiopian Rift Valley.

2.2. 주 에티오피아 열곡대의 형성

주 에티오피아 열곡대의 형성과정은 Fig. 2에 묘사되어 있으며, 형성과정을 요약하면 다음과 같다. 제 3기 열곡의 형성은 대략 30 Ma의 짧은 기간 동안 지구조적 화성작용과 방대한 범람 현무암의 분출로 시작되었으며, 에티오피아 열곡대 주변과 소말리아 고원지대를 발달시켰다. 방대한 화산활동과 지각의 융기는 주 에티오피아 열곡대의 형성 이전에 시작되었으며, 불연속적인 열곡 확장시기인 마이오세~플라이오세에서 주 에티오피아 열곡대를 따라 순차적으로 발생하였다. 열곡대의 발달지역은 암석권 규모의 기존 약선대의 재활성과 밀접하게 관련된다(Corti *et al.*, 2009).

열곡작용은 두 번의 시기로 구분될 수 있다. 열곡작용의 초기는 열곡 함몰지의 침하 및 화성활동의 확장과 관련된 대규모의 경계 단층들의 변위, 심부 비대칭 분지들의 국부적인 발달로 특징지어진다. 두 번째 열곡작용 단계는 화산-지구조 활동에 의한 열곡 방향으

Fig. 2. Schematic model for evolution of Main Ethiopian Rift Valley(modified after Corti, 2009).

로의 좁아짐 현상으로 특징지어진다. 두 번째 시기는 주 에티오피아 열곡대의 북부지역에서 잘 나타난다. 주요 경계 단층들은 비활성화 되고, 확장형 변성작용은

얇은 열곡대 함몰지 내에 단층들의 군집을 야기하였다. 일정한 경사 열곡작용 동안 대륙성 암석권의 점진적인 얇아짐 현상은 변성작용의 진화와 수반된 제 4기 화산호-지구조적 분절을 규제하였을 것으로 생각된다. 단층 지구들은 열곡대 기저를 절단하고 있으며, 전형적인 우수향 배열을 보인다. 맨틀 물질들은 암석권이 상당히 얇아진 안정상 분절부 하부로 상승하게 되고, 상승하는 마그마들은 경사 단층을 따라 마그마의 분출이 원지 분절(Wonji Segment)에 집중되었다. 화산호-지구조 활동이 원지 분절에 집중되어지면서, 변성작용과 화성활동간의 강한 상호작용이 발생하였다. 광범위한 마그마의 관입과 지속적인 확장에 의해 상당히 얇아진 암석권은 화성 관입, 암맥의 관입, 단층작용이 점진적으로 집중되었다. 추가적인 얇아짐 현상, 대위침 및 마그마의 관입으로 인하여 최종적으로 새로운 해양성 암석권이 화성 분절을 따라 형성되어진 것으로 생각된다 (Corti *et al.*, 2009; Fig. 2).

2.3. 에티오피아 광화작용

에티오피아의 주요 금속광상들은 귀금속(Au, Pt), 희유금속(Nb-Ta), 소량의 Ni와 Fe광상으로 대표되어진다. 일부 광상들은 현재 금(Lega Dembi)과 탄탈륨(Kenticha)을 대상으로 가행되고 있다. 금속광상들의 형성은 주로 상부 원생대의 아라비아-누비아(Arabian-Nubian) 지층에 속하는 저변성 화산성 퇴적암층의 지구조-열적 진화와 밀접하게 관련된다. 에티오피아 금속광화작용은 광상 유형 및 분포특성에 따라 세 개의 광화대로 구분된다.

남부 광화대는 켄티차 Nb-Ta 페그마타이트로 대표되는 아돌라 벨트가 대표적이며, 조산성 초생 금광상(Lega Dembi, Megado, Sakaro), 사금광상, 래터라이트 모암 니켈 광상 등을 포함한다. 서부 광화대는 수단 국경과 접하는 곳으로, 주로 초생 금광상(Dul, Oda-Godere), 백금광상(Yubdo), 철광상(Bilikal, Chago, Gordana), 천금속 광상(Abetselo, Kata) 등을 포함한다. 북부 광화대는 에리트리아(Eritria)와의 국경지대로 염기성-초염기성 암석들에 의해 구획되는 몇몇의 화산성 변성 퇴적층 벨트와 아대(subzone)로 구성되어 있으며, 주로 금과 천금속 광상을 배태하고 있다(Adi Zeresenay Au; Tadesse *et al.*, 2003).

3. 분석방법

주 에티오피아 열곡대내 지열수계의 특성을 파악하

기 위해, 현재 지표로 분출되고 있는 온천수(Shala, Langano, Demaegona, Fantale, Allalobeda, Afdera) 및 지열수와 반응에 의해 규화작용을 받은 규질 암석들(Shala, Langano, Demaegona)들을 채취하였다. 온천수는 채취한 후 현장에서 pH, 온도, 전기전도도의 측정이 이루어졌으며, 그 결과는 Table 1에 제시되어 있다.

채취된 온천수 시료들은 지구화학 분석을 위해서 0.45 μm Syringe 필터를 이용하여 필터링을 하였으며, 양이온들(Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , Na^{+} , Sr^{2+} , Li^{+})은 pH 2 이하의 HNO_3 를 이용하여 산처리한 후 ICP-MS를 이용하여 분석하였다. HCO_3^{-} 의 측정은 페놀프탈레인 지시약 및 브로모 크레졸과 메틸레드를 혼합한 지시약 1~2 방울을 시료에 첨가한 후 0.02N 염산으로 적정하였다. SO_4^{2-} , Cl^{-} , Br^{-} 과 같은 음이온의 경우는 Ion Chromatography(IC)를 통해서 분석이 이루어졌다.

금-은 및 미량원소들(Pb, Zn, Cu, Mn 등)의 분석은 양이온 분석과 마찬가지로 채취된 온천수를 0.45 μm Syringe 필터를 이용하여 필터링한 후 한국지질자원연구원 지질자원분석실에서 운영하고 있는 PerkinElmer DRC II ICP-MS를 통하여 금-은 및 미량원소들의 분석이 이루어졌다. 지열수와 반응에 의해 형성된 규질 암석들내 금-은 및 미량원소들의 분석은 한국지질자원연구원 지질자원분석실의 Fire Assay 및 ICP-MS를 통해서 이루어졌으며, 분석결과는 Table 1에 제시되어 있다.

4. 온천수의 산출특성

4.1. 텐다호 천열수 금-은 광화작용

텐다호 지역은 주 에티오피아 열곡대와 아파르 삼각주가 접하는 곳에 위치한다. 지질은 주로 화산 분출암 복합체로 이루어져 있으며, 약술하면 다음과 같다. 하부 분출암 복합체(lower extrusive complex)는 주로 삼각주의 연변부에 노출되어 있으며(Abbate *et al.*, 1995), 상부에 놓여 있는 중부 분출암 복합체(middle extrusive complex)는 주로 현무암질 용암 쇄설류로 구성된 지층들이 열곡 베타의 정상부에 노출되어 있다. 중부 분출암 복합체를 구성하는 암석들은 플라이오세~초기 플라이스토세(4-1 Ma)의 열곡 충진 기원의 천이 현무암(transitional basalts)으로 구성된다. 층상 현무암의 상부는 호성 내지 하성의 퇴적층들과 소량 협재된 현무암질 용암 쇄설류들로 구성되어 있다. 이들 퇴적층들의 상부는 현생 화산암들로 구성되어 있으며,

Table 1. Results of the geochemical data of geothermal water from hot springs in Main Ethiopian Rift Valley and Ladolam geothermal field(GW14; Simmons and Brown, 2006). The units are mg/kg

	Shala		Langano		Demaegona		Allalobeda	GW14
	Hot spring	Siliceous rock	Hot spring	Siliceous rock	Hot spring	Siliceous rock	Hot spring	Geothermal water
pH	8.83		7.88		8.47		7.99	8.69
T(°C)	>100		47.2		42.9		60.0	
EC(μs/cm)	>4,000		2,753		589		2,978	
Cl ⁻	1,796		366		155		806	19,336
SO ₄ ²⁻	41		24		170		240	29,605
HCO ₃ ⁻	3,553		4,903		469		89	989
Br ⁻	8.1		1.3		0.9		5.8	39
K ⁺	27.0		44.2		15.5		38.1	4,900
Na ⁺	1,498		854		319		578	24,400
Ca ²⁺	0.98		2.95		5.35		25.20	
Mg ²⁺	0.20		0.34		2.54		0.02	
Pb	<0.03	33.0	<0.03	30.1	<0.03	<4.0	<0.05	0.04
Zn	0.02	313.0	0.03	236.0	0.01	87.7	0.08	0.3
Cu	<0.02	<4.0	<0.02	<4.0	<0.02	53.1	<0.03	1.59
Mo	0.13	<4.0	0.11	<4.0	0.02	<4.0	0.17	0.35
As	0.1	7.8	0.08	11.2	<0.02	<4.0	0.08	18
Mn	<0.01	1,810.0	<0.01	838.0	<0.01	1,380.0	<0.01	0.12
Au	<0.2	<0.1	<0.2	<0.1	<0.2	<0.1		0.013
Ag	<0.3	10.0	<0.3	<0.1	<0.3	<0.1		0.005
Se	26.7		6.65		4.4			
Te	<0.3		<0.3		<0.3			0.004

주로 유문암질 조성을 갖는다. 생성연대가 1 Ma 이하인 화성기원의 모든 암석들은 상부 분출암 복합체(upper extrusive complex)로 분류하고 있다(Fig. 3; Aquater, 1996).

텐다호 지역에서 수개조의 옥수질 각력 규화대는 북서 내지 북북서 방향의 수직에 가까운 파쇄대를 따라 산출한다. 이 규화대는 지열수의 심부순환과 지표환경으로의 빠른 상승을 반영하고 있으며, 늑골형태로 풍성퇴적층 내에 노출되어 있다. 텐다호 지역의 북서-남동방향의 지구-지루 구조는 천부에서 지하수의 배수 및 유동과 지열수의 심부저장고 형성에 중요한 역할을 한다(Megersa and Getaneh, 2006). 텐다호 지역에서 지열수의 순환과 관련된 열수유체의 활동은 열곡 퇴적층들을 절단하는 북서 내지 북북서 방향의 거의 수직에 가까운 파쇄대를 따라 수개조의 옥수질 석영맥의 산출을 야기하였다. 이들 석영맥들은 상당한 각력화작용을 수반하고 있으며, 대체적로 N40°W 방향으로 풍성퇴적층을 절단하고 있다(Fig. 4A and B). 이들을 대상으로 한 U/Th 절대연령을 측정된 결과, 약 12 ± 5 Ka의 연대를 갖는 것으로 나타났다(Aquater, 1996). 천열

Fig. 3. Geology and structural characteristics of the Tendaho area(modified from Abbate *et al.*, 1995).

Fig. 4. Tendaho epithermal Au prospect related to geothermal system. N40°W-trending chalcedonic siliceous rocks occur in the Tendaho area(A) and are strongly brecciated(B). Some quartz veins with colloform texture are parallel to bedding of lacustrine sediment(C). Occurrence of carbonate-silica sinter around Alalobeda geyser(D).

수 광화대에서 함유 열수유체들은 구조적 약선대와 같은 통로를 따라 지표환경에서 지속적인 유동이 진행된다. 열수유체의 지표 분출과정에서 중심부는 각력의 특성을 가지며, 보다 외곽부로 가면서 망상세맥의 형태로 석영맥이 발달하는 것이 일반적이다. 따라서 이 지역은 열수유체의 유동을 용이하게 하는 통로의 중심부로 간주된다. 일부 석영맥들은 풍성 퇴적층 내 층리면과 평행하게 발달하고 있으며, 콜로폼의 형태를 띄어 유체가 빠르게 상승하였음을 시사한다(Fig. 4C). 영국계 자원탐사회사인 Stratex는 이 지역을 대상으로 수행한 2011년도 탐사시추를 수행하였으며, 일부 구간에서 평균 4.49 g/t Au, 최대 19.5 g/t Au를 함유한 천열수형 함 금 석영맥을 착맥한 바 있다(Stratex International, 2011). 늑골형 옥수질 규화대로부터 남동쪽으로 약 7 km 떨어진 지점에서 알라로베다(Alalobeda) 간헐천(UTM: N719519, E1287489, 해발 408 m)의 산출이 보고되어 있으며, 간헐천의 주변부는 단백석 또는 탄산염 온천 규질물들이 잘 발달하고 있다(Fig. 4D).

4.2. 랑가노(Langano) 지열수계

랑가노 지열수계는 중부 주 에티오피아 열곡대의 알루토(Aluto) 화산분화구 남쪽에 위치하고 있으며(Fig. 5A), 랑가노 분지의 북쪽 연변부에 해당한다. 알루토 화산분화구의 형성과정에서 분출된 화산성 퇴적층들이 랑가노 지열수계 지역 전반에 걸쳐 분포하고 있다. 알루토 화산분화구를 중심으로 한 화산활동은 주로 제 4기에 발생하였으며, 유문암질 돔의 형성과정에서 함께 폭발적인 화산쇄설성 부석질 용암과 주 칼데라를 형성하는 화산쇄설암의 분출이 초기 단계에 발생하였다. 용결응회암은 랑가노 호수의 북쪽과 남쪽에 노출되어 있으며, 호성 퇴적층이 소량 협재되어 있다. 후기 유문암질 마그마의 분출은 부석질 응회암을 기저로 하여 알루토 칼데라 주변부의 북동쪽과 남서쪽 및 랑가노 호수 동쪽에 널리 분포하고 있다(Fig. 5A). 유문암질 분출암들은 주로 북북동 방향의 단층대 혹은 칼데라의 환형파쇄대에 의해 완전히 규제되어 있다. 초기 칼데라의 형성 이후 유문암질 용암과 화산쇄설암들

Fig. 5. Geologic map of the Lake Langano area, showing the location of hot springs(A). Image of the Langano hot spring(B) and siliceous rocks associated with upflowing hot spring(C).

은 개별 분화구를 통해서 지표환경으로 분출되었으며, 이들 분화구들은 초기 칼데라의 환형 파쇄대 또는 원지 단층대의 북북동방향 단층들을 따라 분포하고 있다(Fig. 5A). 이러한 단층대 또는 파쇄대를 따라 심부로 순환하는 지열수들은 랑가노 호수 주변부를 따라 지표 환경으로 분출하고 있다(Fig. 5A). 현재의 지하수위가 과거에 비해 상당히 하강하였기 때문에, 간헐천과 같은 폭발적 분출은 관찰되지 않는다(Fig. 5B). 온천수 주변 지역은 호성퇴적층으로 덮여 있어 노두의 관찰이 어려우나, 상당한 규화작용을 받은 암석들이 흔히 관찰된다(Fig. 5C).

4.3. 샬라(Shala) 지열수계

샬라 지열수계는 즈웨이(Ziway)-샬라 원지 단층대의 최남부에 위치하며, 지질은 샬라 용결응회암과 상부의 호성 퇴적암 및 호성 퇴적물들로 완전히 덮여 있다. 일부 무디 케도(Mudi Kedo) 조면암과 웬시 단타(Wenshe Danta) 현무암이 환형으로 분포하고 있다(Fig. 6A). 미고결 샬라 용결응회암은 녹색 내지 분홍색을 띠고 있으며, 완전히 용결되고 기질부에서 사드의 관찰이 어려워 상당한 고온 환경에서 분출되었을 것으로 생각된다. 또한 일부 지역에서는 결정질의 부석질 응회암과 피아메(fiamme)가 우세하게 나타나기도 하며, 현무암

Fig. 6. Geologic map of the eastern Lake Shala area, showing the location of the hot springs(A). Surface feature of the Shala hot spring is characterized by boiling pool(B and C).

에서 유문암질의 암편들이 포획 되어 산출되기도 한다. 호성 퇴적층들은 대체적으로 미고결 상태의 이암, 사암, 용결응회암 등으로 구성되어져 있다.

살라 지열수계는 주로 북북동 방향의 단층대에 완전히 규제되어 있다. 지표면으로 분출하고 있는 온천수는 살라 호수의 동쪽 호수가를 따라 약 3 km 정도 연장되어 산출된다(Fig. 6A). 살라 호수 주변 온천수들은 호수내로 유입되고 있으며, 지표로 분출되는 온천수는 아주 활발한 지표분출특성을 보이는 비등천(boiling pool)을 형성하고 있다(Fig. 6B). 살라 온천수는 지표로 분출하는 과정에서 주변암과의 반응에 의해 상당히 규화되었으며, 황으로 피복되어 있다(Fig. 6C).

4.4. 데마에고나(Demaegona) 지열수계

데마에고나 지열수계는 주 에티오피아 열곡대의 북부 원지 단층대의 최북부에 해당하는 도판 화산암 북

합체(Dofan Volcanic Complex)의 북부와 동부지역에서 발달하고 있다. 도판 화산암 복합체의 중심부 화산활동은 플라이스토세에 시작되었으며, 주로 조면암질 용암 쇄설류들이 도판 화산 복합체의 동측과 서측에 분포하고 있다. 주 확장형 화산호-지구조 활동들은 화산지괴의 중부를 가로지르는 약 5 km 폭의 대규모 지구(graben)구조를 형성하였으며, 대체적으로 북북동-남남서 방향으로 발달하고 있다(Fig. 7A). 후기 화산활동의 재발은 화산암 복합체의 동부지역에서 두 개의 유문암질 돔을 형성시켰다(Mamo and Teclu, 2007).

도판 화산암 복합체의 북부 지역은 두 개의 주요 온천수 산출지가 분포하고 있으며, 아와시강(Awash river) 줄기를 따라 하천 내로 분출하고 있다(Fig. 7B). 온천수가 하천내로 분출되고 있어 주변지역에서 변질작용의 관찰이 어려우나, 온천수 분출구 주변부에서 규질 암석들이 흔히 관찰된다(Fig. 7B).

Fig. 7. Geology of the Dofan Volcanic Complex(A) and up-flow of hot spring within the Awash river(B).

5. 결과 및 토의

5.1. 주 에티오피아 지열수계의 지표 산출특성

열곡대내 지열수의 심부순환과 온천수들의 산출은 주 에티오피아 열곡대의 형성과정에서 발달한 북북동 방향의 단층대를 따라 완전히 규제된다. 특히 랑가노와 살라 지열수계에서 온천수들의 분포특성은 단층대의 발달이 지열수의 심부순환에 상당히 중요한 역할을 하고 있음을 잘 보여준다. 주 에티오피아 열곡대내 온천수들 중 살라 지열수계의 온천수는 지표면으로 분출하는 과정에서 비등천(boiling pool)을 형성하고 있으며 (Fig. 6B), 이러한 비등천들은 지열수가 지표면으로 빠르게 상승하기 때문이다. 지표환경으로 유체의 빠른 상승은 유체의 비등을 야기하며, 유체의 비등은 천열수 환경에서 금의 침전 기작으로서 가장 중요하게 받아들여지고 있다(Drummond and Ohmoto, 1985; Reed

and Spycher, 1985; Seward, 1989; Simmons and Browne, 2000; Cooke and McPhail, 2001).

유체의 비등은 금의 침전 기작으로서 가장 중요한 요소일 뿐 아니라, 유체 내 규소의 과포화로 지표면에 규질 온천 침전물들을 광범위하게 퇴적 시킨다. 따라서 광범위한 규질 온천물의 퇴적은 천열수 광화작용의 지시자 역할을 한다. 주 에티오피아 열곡대 북쪽 아파르 함몰지내 텐다호 지역에서 이러한 온천 침전물들의 광범위한 분포가 보고되어져 있으나, 열곡대 내 온천수의 주변지역에서는 관찰이 어렵다. 규질 온천 침전물들은 주 에티오피아 열곡대의 북부 아파르 삼각주에 위치하고 있는 텐다호 지역에서 잘 관찰되며, 주 에티오피아 열곡대 내에서는 관찰이 어렵다.

5.2. 온천수 및 수반되는 규질 침전물들의 조성

주 에티오피아 열곡대 내 온천수는 pH 6.94~8.83,

Fig. 8. Ternary plot of $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$ composition of geothermal water from hot spring within Main Ethiopian Rift Valley, Ethiopia.

온도 $39.3 \sim 100^\circ\text{C}$, 전기전도도 $589 \sim 4,000 \mu\text{S/cm}$ 의 특성을 갖는 것으로 나타났다(Table 1). 온천수의 조성에 근거할 때, 온천수는 대체적으로 HCO_3 형 유체로 분류가 된다. 그러나 살라와 아프테라(Afdera) 온천수의 경우는 Cl-SO_4 형과 Cl 형 유체로 분류된다(Fig. 8). 천연수환경에서 형성되는 지열수는 크게 세 가지 유형으로 구분이 되며, 중성질 함 염소 유체(Neutral-pH chloride fluid), 산성 중탄산염 유체(Acid bicarbonate fluid), 산성 황산염 유체(Acid sulfate fluid)를 포함한다(Fig. 9; Simmons *et al.*, 2005). 심부까지 순환하는 지열수중 중성질 함 염소 유체는 일반적으로 중성의 pH, 0.1~1.0 wt % Cl, 최대 3 wt % CO_2 , 수십 내지 수백 ppm H_2S 가 함유되어 있다. 특히 HS^- 복합체로서 금과 은의 운반자 역할을 하는 H_2S 의 다량 함유는 천연수형 금-은광상의 형성에 중요한 요소가 된다(Seward, 1973; Seward and Barnes, 1997).

주 에티오피아 열곡대의 온천수 내 금과 은 및 미량 원소들은 검출한계 이하 또는 매우 낮은 값을 갖는다. 그러나 온천수 내 Se의 함량은 최대 26.7 mg/kg을 함유하고 있다. 온천수 주변 규질 암석들내 금과 은의 함량 또한 온천수와 유사하나, 살라 온천수 주변 규질 암석에서 10 g/t의 은을 함유하는 것으로 나타났다(Table 1). 규질 암석들내 수반원소들은 수 백 ppm의 아연(살라: 313 ppm Zn, 랑가노: 236 ppm Zn, 데마에고나: 87 ppm Zn)과 수십 ppm의 연(살라: 33 ppm Pb, 랑가노: 30.1 ppm Pb, 데마에고나: tr ppm Pb)을 함유하고 있는 것으로 나타났다. 데마에고나 온천수 주변 규질 암석들은 상대적으로 높은 동 함량(53.1 ppm Cu)을 갖는다.

Fig. 9. General genetic model illustrating three different geothermal water in rifting related geothermal system(modified from Cooke and Simmons, 2000).

5.3. 지열수의 특성 비교 및 천연수형 광상의 부존 잠재성

파푸아 뉴기니 라돌람(Ladalam) 지열수계는 세계에서 가장 젊고 큰 천연수 금광상을 형성시켰으며, 심부 마그마 유체의 유입과 지열수의 순환 및 유체내 금속 원소들의 농집에 관한 연구가 수차례 진행되어 왔다(Simmons and Brown, 2006; Simmons and Brown, 2008). 주 에티오피아 열곡대 내 지열수들의 조성적 특성을 비교해 볼 때, 온천수들 마다 조성적 차이를 가지지만, 대체적으로 Cl 와 SO_4^{2-} 의 함량은 상당히 낮으며, HCO_3 의 함량은 오히려 높게 나타난다(Table 1). 주 에티오피아 열곡대 내 온천수는 앞서 언급했듯이 대체적으로 HCO_3 형으로 분류된다(Fig. 8). 라돌람 지열수의 경우 심부 550 m에서 채취되었으나, 주 에티오피아 열곡대 내 온천수는 지표환경에서 채취되었으므로 보다 높게 나타나는 것으로 보인다. 주 에티오피아 열곡대 내 지열수들은 pH 6.94~8.83으로 지하수(pH 6~7.5), 중탄산염 유체(pH 4.5~7), 산성 황산염 유체(pH 1~3)에 비해 상대적으로 높게 나타나며, 함 염소 유체(pH 4~9) 또는 염소-중탄산염 유체(pH 7~8.5)의 특성과 유사하게 나타난다. 일반적으로 유체의 pH는 유체내 음이온들의 형태 및 수반되는 모암변질작용의 특성에 상당한 영향을 미치기 때문에 중요한

요소로 받아들여진다.

주 에티오피아 열곡대내 온천수들의 금-은 및 기타 수반원소들의 함량은 라들람 지열수 내 원소 함량에 비해 다소 낮은 수치이다. 그러나 살라, 랑가노, 데마 에고나 지역 온천수들에서 높은 Se 함량은 상당히 중요한 요소로 받아들여진다. 일반적으로 천열수 금광상에서 Te-과 Se-광물들이 흔히 산출되며(Lindgren, 1993), 특히 저유황계 천열수 광상에서 높은 Se의 지구화학적 이상을 갖는다(White and Hedenquist, 1995). 또한 저유황계 천열수 광상(Hishikari, 일본; Sleeper, Comstock, 미국; Balei, Kubaka, 러시아)에서 금과 함께 Se-광물들의 산출이 보고되어져 있다(Kovalenker and Plotinskaya, 2005). 따라서 살라, 랑가노, 데마에고나 지역 온천수들 내 Se의 지구화학적 이상은 저유황계 천열수 광상의 잠재 가능성 평가에 있어 긍정적인 요소로 판단되어진다. 또한 온천수 주변 규질 암석들 내에 Pb, Zn, Mn, As, Ag의 이상과 최근 아파르삼각주 내에서 천열수형 광화작용의 발견은 주 에티오피아 열곡대 내 천열수형 광화작용의 부존 가능성에 관한 기대를 높이고 있다.

사 사

이번 연구는 한국지질자원연구원이 수행하고 있는 “해외 희유금속자원 탐사 및 부존잠재성 평가(13-530292)”에서 지원되었습니다. 이 논문의 개선을 위해서 건설적인 비평과 유익한 조언을 주신 익명의 심사위원님들께 감사사를 드립니다.

참고문헌

- Abbate, E., Passerini, P. and Zan, L. (1995) Strike-slip faults in a rift area: a transect in the Afar Triangle, East Africa. *Tectonophysics*, v.241, p.67-97.
- Aquater (1996) Tendaho geothermal project, final report. EIGS-Government of Italy, Ministry of Foreign Affairs, San Lorenzo in Campo.
- Cooke, D.R. and McPhail, D.C. (2001) Epithermal Au-Ag-Te mineralization, Acupan, Baguio district, Philippines: Numerical simulations of mineral deposition. *Economic Geology*, v.98, p.109-131.
- Cooke, D.R. and Simmons, S.F. (2000) Characteristics and genesis of epithermal deposits. *Economic Geology Review* 13, p.221-244.
- Corti, G. (2009) Continental rift evolution: From rift initiation to incipient break-up in the Main Ethiopian Rift, East Africa. *Earth Science Reviews*, v.96, p.1-53.
- Drummond, S.E. and Ohmoto, H. (1985) Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal system. *Economic Geology*, v.80, p.126-147.
- Gibson, I.L. (1967) Preliminary account of the volcanic geology of Fantale, Shoa, Haile. Selassie I University.
- Gibson, I.L. (1970) A pantelleritic welded ash-flow tuff form the Ethiopian Rift Valley. *Contr. Mineral and petrology*, v.28, p.89-111.
- Gichile, S. (1992) Granulites in the Precambrian basement of southern Ethiopia: geochemistry, P-T conditions of metamorphism and tectonic setting. *J. African Earth Sci.*, v.15, p.251-263.
- Hofmann, C., Courtillot, V., Feraud, G., Rochette, p., Yirgu, G., Ketefo, E. and Pik, R. (1997) Timing of the Ethiopian flood basalt event and implication for plume birth and global change. *Nature*, v.389, p.838-841.
- Kazmin, V. and Seifemichael, B. (1978) Geology and development of the Nazareth area, Northern Ethiopia Rift. *Geol. Surv. of Ethiopia*.
- Kovalenker, V.A. and Plotinskaya, O.Y. (2005) Te and Se mineralogy of Ozerovskoe and Prasolovskoe epithermal gold deposits, Kuril-Kamchatka volcanic belt. *Geochemistry, mineralogy and petrology*, v.43, p.118-123.
- Lindgren, W. (1993) Mineral deposits. 4th ed. McGraw-Hill, New York, 930p.
- Mamo, T. and Teclu, A. (2007) Compilation of the geoscientific study of the Dofan geothermal prospect, Ethiopia. Mineistry of Mines and Energy and Geological Survey of Ethiopia, 46p.
- Megersa, G. and Getaneh, E. (2006) Geological, surface hydrothermal alteration and geothermal mapping of Dubti-Semera area, Tendaho geothermal field. *Geological Survey of Ethiopia*, 62p.
- Mohr, P. A. (1962) Surface cauldron subsidence with associated faulting and fissure basalt eruptions at Garibaldi pass, shawa, Ethiopia. *Bull. Volcan*, v.24, p.421-428.
- Mohr, P.A. (1963) The geology of Ethiopia. Haile Selassie I Univ., Addis Ababa, 268p.
- Moussa, N., Fouquet, Y., Gall, B.L., Caminiti, A.M., Rolet, J., Bohn, M., Etoubleau, J., Delacourt, C. and Jalludin, M. (2012) First evidence of epithermal gold occurrences in the SE Afar rift, Republic of Djibouti. *Mineralium Deposita*, v.47, p.563-576.
- Reed, M.H. and Spycher, N.F. (1985) Boiling, cooling and oxidation in epithermal systems: A numerical approach. *Reviews in Economic Geology*, v.2, p.249-272.
- Seward, T.M. (1973) Thio complexes of gold and the transport of gold in hydrothermal ore solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v.37, p.379-399.
- Seward, T.M. (1989) The hydrothermal chemistry of gold and its implications for ore formation: Boiling and conductive cooling as examples. *Economic Geology Monograph* 6, p.398-404.
- Seward, T.M. and Barnes, H.L. (1997) Metal transport by hydrothermal ore fluids, in Barnes, H.L., et., *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*, 3rd ed., New York, John Wiley and Sons, p.435-486.
- Sillitoe, R.H. (2002) Rifting, bimodal volcanism, and bonanza gold veins. *SEG letter*, n.48, p.24-26.
- Simmons, S.F. and Brown, K.L. (2000) Hydrothermal minerals and precious metals in the Broadlands Ohaaki geothermal system: Implications for under-

- standing low-sulfidation epithermal environments. *Economic Geology*, v.95, p.971-999.
- Simmons, S.F. and Brown, K.L. (2006) Gold in magmatic hydrothermal solutions and the rapid formation of a giant ore deposit. *Science*, v.314, p.288-291.
- Simmons, S.F. and Brown, K.L. (2008) Precious metals in modern hydrothermal solutions and implications for the formation of epithermal ore deposits. *SEG Newsletter*, n.72, p.1, 9-12.
- Simmons, S.F., White, N.C. and John, D.A. (2005) Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, p.485-522.
- Stratex International (2011) *Discovering the future. Annual report*, 60p.
- Tadesse, S., Milesi, J.P. and Deschamps, Y. (2003) Geology and mineral potential of Ethiopia: a note on geology and mineral map of Ethiopia. *Jour. of African Earth Sciences*, v.36, p.273-313.
- White, N.C. and Hedenquist, J.W. (1995) Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration. *SEG Newsletter*, n.23, p.1, 9-13.
- Woldegabriel, G., Aronson, J.L. and Walter, R.C. (1990) Geology, geochemistry, and rift basin development in the central sector of the Main Ethiopian Rift. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v.102, p.439-458.
- Zanettin, B. (1993) On the evolution of the Ethiopian volcanic province. In: *Geology and mineral resources of Somalia and surrounding regions*. Ist. Agron. Oltremare, Firenze, Relaz. e Monogr., v.113, p.279-310.

2013년 2월 8일 원고접수, 2013년 3월 16일 게재승인