

기술정보

동아프리카 열곡대의 지질 및 광화작용

Geology and Mineralization of East Africa Rift System

고 상 모(Sang-Mo Koh) · 이 길 재(Gilljae Lee)* · 김 의 준(Eui-Jun Kim) ·
류 충 렬(Chung-Ryul Ryoo)

한국지질자원연구원 광물자원연구본부
(Mineral Resources Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)

서 론

동아프리카 열곡대(East Africa Rift System: EARS)는 아라비아반도와 아프리카 북동부의 경계에서 부채꼴 형태로 남쪽으로 뻗은 대단층 함몰지구대이다(그림 1A, 1B). 이 열곡대는 제3기초 올리고세(30~35 Ma)부터 북쪽에서부터 형성되기 시작하여 현재까지 남쪽으로 진행하고 있는 대륙 내부에서 현생 지구조 확장운동이 일어나고 있는 지질학적으로 매우 흥미로운 지역이다. 뿐만 아니라 열곡대 내에는 지열 자원이 풍부하고 광물자원 탐사가 활발하게 진행되고 있어 광물자원부존잠재성이 높은 새로운 지역으로서 관심이 집중되고 있다.

EARS 지역은 지열자원의 잠재성이 높아 지열 자원에 대해서는 1955년 이래로 지속적으로 조사되어 왔으며(Saint, 1975), 지구물리조사에 의해 지부티, 에티오피아, 케냐, 탄자니아 등에서 심부지열들이 발견되기 시작하였다(Wairegi, 1984). 최근 조사 결과 잠재력은 15,000 MW를 초과하는 것으로 알려져 있으나, 케냐와 에티오피아에서만 210 MW의 발전용량을 가지고 있다(Mwangi, 2005). 1980년대 지열자원의 탐사 중 지열활동에 수반된 Pb, Cu, Zn 유화광상들도 보고되기 시작하였다(Robbins, 1983; Fouillac, 1984). 열곡대는 제3기 30 Ma 경 올리고세부터 에티오피아 북부 아파르

(Afar) 침강대를 중심으로 형성되기 시작하여 15~10 Ma 마이오세 중기에 활발한 화산활동이 초래되어 천열수 금광상들이 형성되었으며, 대표적인 지역이 북부 에티오피아 아파르 지역 텐다호(Tendaho) 탐사 지역이다. 그 외 열곡대 내에는 포타쉬(K), 소다회, 규조토, 벤토나이트, 암염, 유황, 부석 광상 등이 분포하여 개발되고 있다.

따라서 지질학적 중요성과 관심이 높고 최근 광물자원탐사가 활발하게 진행되고 있어 많은 논문과 보고서가 발간되고 있다. 본 논고에서는 최근까지 발간된 자료를 중심으로 동아프리카 열곡대의 지질학적 형성과정과 열곡대 내 배태된 대표적 광상들을 요약하여 소개하고자 한다.

동아프리카 열곡대 개요

이 열곡대는 북쪽에서는 아라비아판 경계부의 홍해와 아덴만과 접하고, 남쪽으로는 케냐, 탄자니아, 우간다, 콩고민주공화국, 르완다, 말라위, 모잠비크로 확장된다. 아프리카 판 내부에 발달한 이 열곡대의 폭은 35~60 km이며, 연장은 약 4,000 km로 알려져 있다. 열곡대는 에티오피아에서 남서쪽으로 발달하다 에티오피아 남부에서 동, 서 및 남서 열곡 분기대로 나누어진다(그림 1A). 동 열곡대는 Afar, Ethiopia, Turkana, Kenya 열곡으로 구성되

*Corresponding author: +82-42-868-3511, E-mail: gill@kigam.re.kr

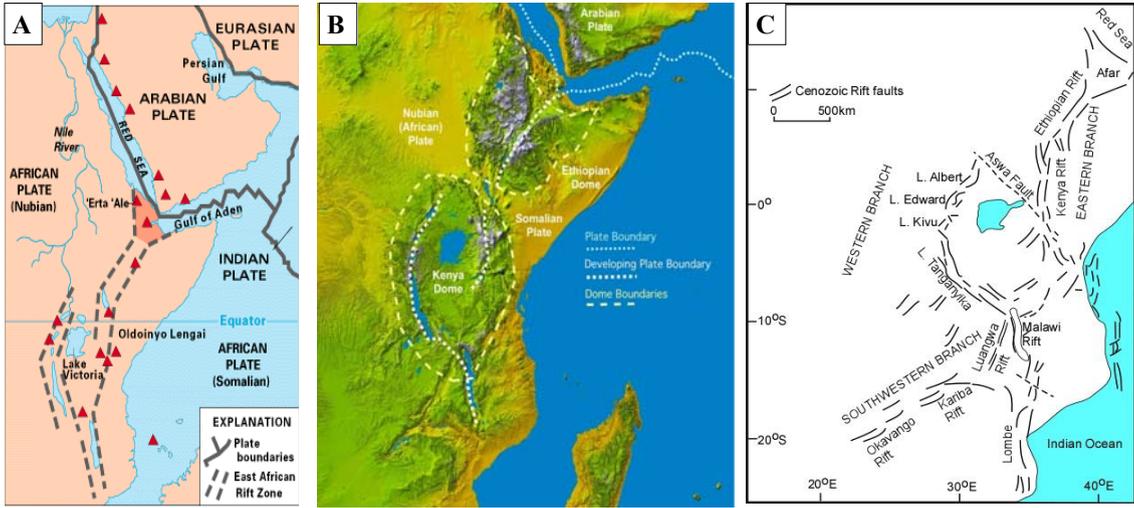


Fig. 1. Plate tectonics of the East Africa Rift System. A: Simplified tectonic map (USGS, 2001), B: Tectonic plate boundaries and rift segment names (Wood and Guth, 2009), C: Structural map showing EARS (Atekwana *et al.*, 2004).

고, 서 열곡대는 Albert, Kivu, Tanganyika, Rukwa, Malawi 열곡으로 구성되며, 남서 열곡대는 Luangwa-Kariba-Okavango 열곡을 포함한다(Omenda, 2007) (그림 1C).

북편 열곡대 지역에서는 화산활동에 의해 에티오피아 돔이 형성되고, 남쪽 열곡대에서는 케냐 돔이 형성되고 있다(그림 1B). 북쪽 홍해와 아덴만에서는 현재까지 확장 운동에 의해 새로운 해양지각이 생성되고 있다.

EARS는 3,000 km의 대륙내부에서 발생한 열곡운동(rifting)의 가장 좋은 사례로서(그림 2A), 열곡활동의 시작부터 대륙붕괴가 일어날 때까지 약 30 Ma전부터 현재까지 진화되고 있다. 이 열곡대는 주 에티오피아 열곡대(Main Ethiopian Rift: MER), 케냐 열곡대(Kenya Rift) 및 서편 분기 열곡대(Western Branch)로 구분된다(그림 2A). MER은 북편 아파르(Afar) 삼중점과 남쪽의 케냐 열곡대 사이를 말하며, 뉴비아(Nubia) 판과 소말리아(Somalia) 판을 분리시키는 초기 판의 경계부이다(Ebinger, 2005). MER은 북동 및 남북 방향으로 약 500 km 확장된다. 이 축을 따라서 MER은 단층운동, 화산활동, 변형작용, 지각 및 암권의 구조 등이 다양하게 변화를 보여준다. 이러한 변화로 북에서 남으로 갈수록 MER을 3개의 열곡대 분절인, 북부 MER(NMER), 중부 MER(CMER), 남부 MER(SMER)로 나누어졌다(Mohr, 1983; Wolde Gabriel *et al.*,

1990; Hayward and Ebinger, 1996; Bonini *et al.*, 2005; Corti, 2009)(그림 2B).

동아프리카 열곡대 지질

주 에티오피아 열곡대(Main Ethiopian Rift: MER)

MER과 Afar 열곡대는 EARS의 최북단에 위치한다(그림 1A). 화산활동이 30 Ma 전에 시작하였으며, 많은 양의 현무암 분출에 의해 용기되었다(Mohr and Zanettin, 1988). 마이오세 이후에는 현무암과 알칼리 산성암질 용암류를 형성시킨 쌍모식(bimodal) 화산활동이 약화되기 시작하였다. 최후기에는 열곡 중심축에서 유문암 화산활동이 초래되어 돔이 형성되고, 응결응회암(ignimbrite)과 비교화된 화산쇄설물들이 퇴적되었으며, 이 분출암 중 90%가 산성암질 조성을 가진다고 보고되었다(Mohr, 1992). 열곡 중심축에서는 제4기 지각의 확장이 일어나는 원지(Wonji) 단층대가 발달하며, 단층대를 따라 커다란 화산체가 분포한다(그림 3A).

Afar 열곡대는 전 EARS 중에서 가장 활동적인 열곡대이며, 현재도 활동 중인 Erta Ale 화산체가 분포한다. 이 열곡대지는 남쪽에는 많은 유문암질 화산체가 분포하며, 북쪽에는 현무암질 화산체가 분포하고, 고기의 퇴적암류가 화산암류를 피복한다(Omenda, 2007). 이 열곡대의 중심축에 위치하는

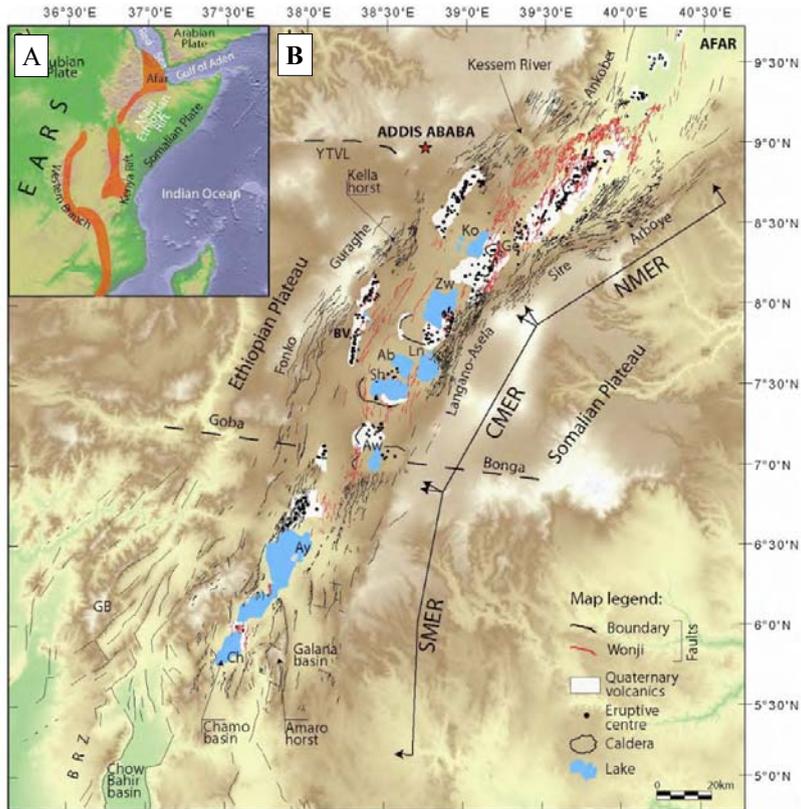


Fig. 2. A: Location of the MER inside the East African Rift System (after Corti, 2009). B: Tectonic sketch map of the Main Ethiopian Rift superimposed onto a digital elevation model from SRTM data. Ko: Lake Koka; Ge: Gedemsa Caldera; Zw: Lake Ziway; Ln: Lake Langano; Ab: Lake Abyata; Sh: Lake Shala; Aw: Lake Awasa; Ay: Lake Abaya; Ch: Lake Chamo; BV: Butajira volcanic chain; GB: Gofa Basin and Range; BRZ: Broadly rifted zone; YTVL: Yerer-Tullu Wellel volcano-tectonic lineament.

원지 단층대를 따라 현생 지열대가 분포한다(그림 3B).

MER의 진화복원모델이 Bonini *et al.*(2005)에 의해 제시되었으며, 크게 4단계로 구분하여 설명되고 있다(그림 4). 제1단계 확장구조는 20~21 Ma 경 남부 에티오피아 열곡대에서 남북 방향의 Kenya 열곡이 발달하기 시작하여 11 Ma까지 지속되었으며, 남부 Afar 열곡대에서는 변형구조가 남쪽으로 이동되어 Afar 삼중점이 형성되었다(그림 4A) (Wolfenden *et al.*, 2004). 제2단계인 10~5 Ma 동안 남부 Afar 지역에서는 변형작용이 더욱 더 남쪽으로 진행되었으며, 이는 소말리아판의 시계방향으로의 회전에 관련된 것으로 해석되고 있다(그림 4B)(Collet *et al.*, 2000). 이 단계는 남부 MER에서 구조운동의 정지기가 있었으며, 실제적인 MER

의 발달초기가 이 시기로 추측된다. MER에서의 확장 변형작용은 마이오세와 플라이오세 사이에 시작한 것으로 생각되나 가장 강렬한 구조운동은 약 5 Ma로 해석한다(그림 4C). 남부 Afar에서의 변형작용의 전이는 구조적으로 고지대인 Boru-Toru 지역으로 일어났으며, 이 운동기 동안 남부 MER은 여전히 지구조적 정지기였다(그림 4C). 마지막 단계로 3 Ma부터 현재까지 MER은 계속 남쪽으로 진행하여 보다 고지의 Kenya 열곡에 중첩되고 재활성화되었다(그림 4D). 제4기 동안 남부 MER을 재활성화시킨 이후 MER과 관련된 변형작용은 에티오피아 돔과 케냐 돔 사이 Ririba와 Marsabit 화산들이 선상배열되어있는 남쪽으로 진행한다(그림 4D)(Ebinger *et al.*, 2000). 결론적으로 현재 알려진 MER은 열곡대의 세 분절(남부 Afar, MER, 남

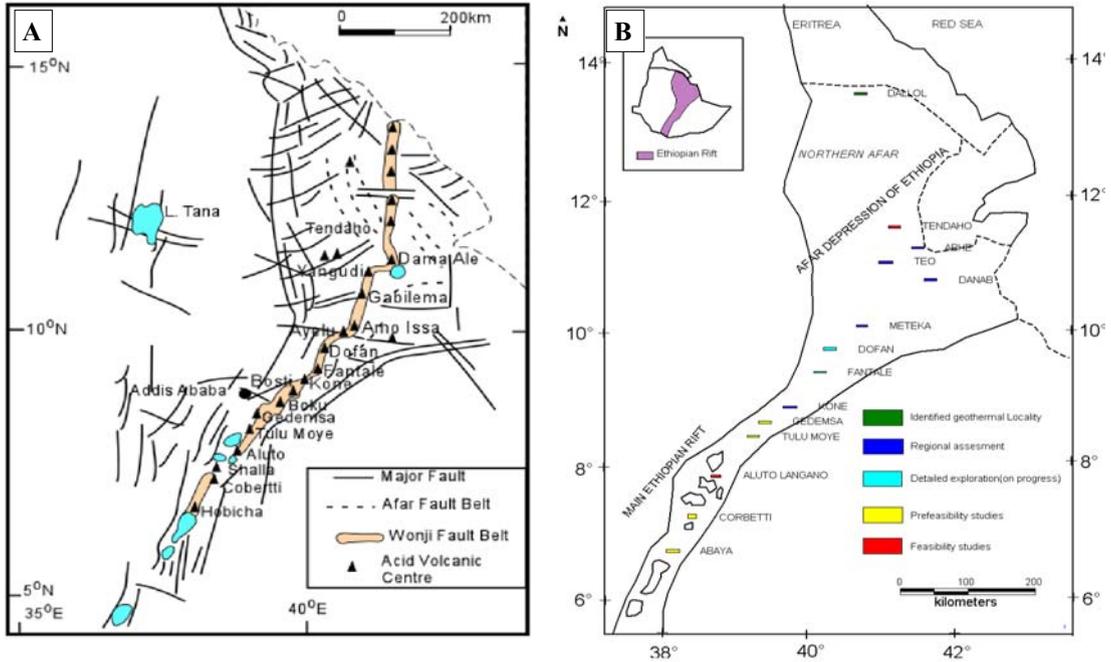


Fig. 3. A: Structural map of the Ethiopian Rift showing locations of Quaternary volcanoes (Abebe, 2000), B: Location map of the geothermal areas (Omenda, 2007).

부 MER)들이 시기적 차이를 보이면서 활성화되는 단단계 지구조활동의 결과이다.

MER에서의 Ebinger (2005)의 화성활동과 진화 모델은 그림 5와 같다. 1단계는 주요 확장운동이 진행되기 이전 심부 단열대를 따라 현무암 용암류가 분출하여 현무암 대지가 형성되는 단계로서 열곡 활동의 초기이다(그림 5A). 2단계는 11~2 Ma 동안 단층들의 활성화 시기로서, 열곡을 형성시킨 정단층과 열곡대지의 침강이 일어났다. 이 단계에서는 화산활동이 확산되고 열곡대를 발달시킨다(그림 5B). 3단계는 약 2 Ma경 열곡 내 대규모 단층활동이 정지되고 변형작용이 이동하는 단계로서, Wonji 단층이 안행상으로 분절(segment)되며 발달하게 되었다(그림 5C). 4단계는 화산-지구조 활동이 Wonji 단층대에 집중되어, 변형작용과 마그마 활동이 활발한 시기이다. 얇아진 암권은 마그마 관입활동, 암맥류의 관입, 단층운동 등과 같은 격렬한 활동이 일어났다(그림 5D). 마그마 관입활동에 의해 열을 공급받아 데워진 암권은 점점 더 얇아지게 되고, 관입이 심하게 일어난 지역에서는 단열로 인해 새로운 해양 암권이 생성하게 되어, 현재의 열곡대 구조를 보이게 되었다(그림 5E).

케냐 열곡대(Kenya Rift)

케냐 열곡대는 Turkana 호수에서부터 탄자니아 북부까지 연장되는 열곡대이며, 마이오세 초기에 북쪽에서는 Turkana 호수에서부터 형성되기 시작하여 중기 및 말기 마이오세에 활성화되면서 남쪽으로 확장되었다(그림 6). 열곡대는 모잠비크 벨트의 원생대 후기 기반암 내에서 발달되었다.

화산활동과 돔의 상승에 의한 융기가 초래되고 단층운동에 의해 지구대가 형성되었다. 초기 플라이스토세에 전체적인 지구대가 형성되었으며, 현무암질, 조면암질 조성의 용암류와 응회암류들이 분출되었다. 제4기 동안 열곡의 중심축에서는 산성암질 조성의 순상화산체가 발달하였다.

케냐 열곡의 남부 끝단과 탄자니아 북부까지 이어지는 열곡대는 알칼리 및 카보너타이트 화산활동이 우세하게 일어났으며, Ol'Doinyo Lengai가 대표적 화산체이다. 이 지역에서 카보너타이트가 우세하게 산출하는 것은 심부기원의 용암류 분출에 의한 것이다.

케냐 열곡대 전체에서는 산성암질(규산암질) 조성의 젊은 화산체가 우세하며, 열곡 내 활동적인

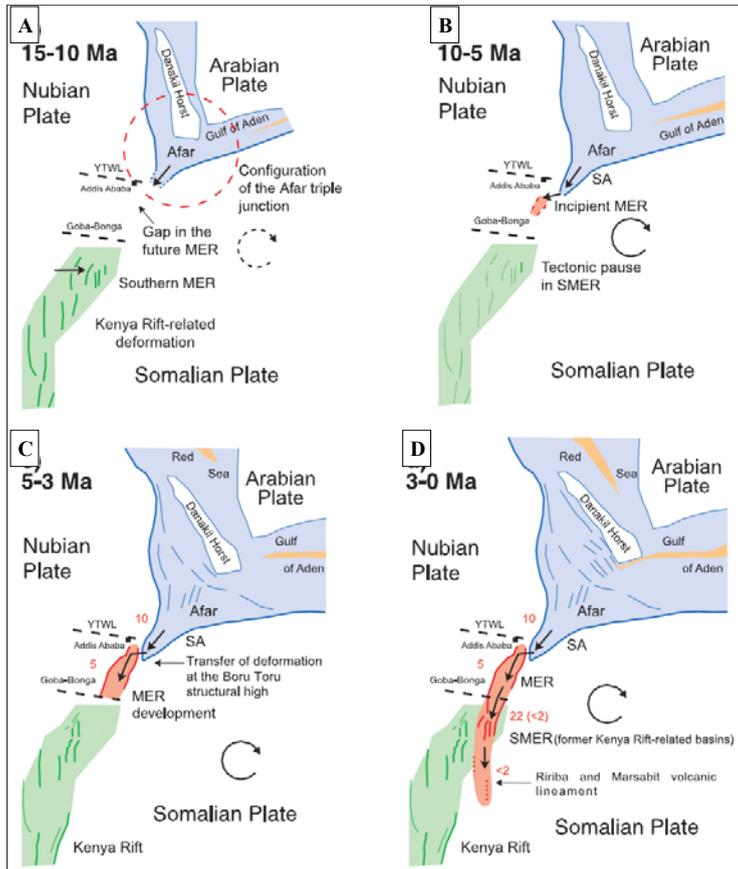


Fig. 4. Schematic Miocene to Present evolution of the main rift segment structures at the northern termination of the East African Rift System. Black arrows indicate the direction of propagation of the extensional deformation (Bonini *et al.*, 2005). In Figures 4C and 4D the red numbers indicate the timing of onset of extensional activation, or reactivation, of structures. MER: Main Ethiopian Rift; SA: Southern Afar; SMER: Southern Main Ethiopian Rift; YTWL: Yerer Tullu-Wellel volcanotectonic lineament.

화성활동의 결과로서, 제4기 동안 화산체와 함께 지열대가 형성되었다. Olkaria 지열대에서는 130 MW 전기를 생산하고 있으며, 화산암 복합체 하부 뜨거운 관입암체의 수반된 열원이다(Omenda, 2007).

서부 열곡대 (Western Branch)

서부 열곡대는 동아프리카 대지의 가장자리와 빅토리아 호의 서편을 따라 발달하며(그림 6), 고각의 정단층에 의해 특징되는 전형적인 반지구대 (half graben)이다. 케냐 및 에티오피아 열곡대와 비교하면 화산활동이 결핍된 특성이 있다. 동부 열곡대(주 에티오피아 열곡 및 케냐 열곡)는 30 Ma

전 화산활동과 지구조활동이 시작되었으나, 서부 열곡대에서는 Albert 호 북부에서 12 Ma 전에, 그리고 Tanganyika 열곡대에서는 7 Ma 전부터 시작되었다(Ebinger, 1989).

이 열곡대의 북부에서는 Albert 호 부근에서 Albertine 지구대로 정의되는 다수의 분지가 발달한다. Albert 호 열곡대는 초기 마이오세에, 남부에서는 화산암류가 북부에서는 퇴적층들이 형성되었다. Albertine 퇴적분지는 석유 잠재성이 있는 지역으로 알려져 있다. 이 열곡대는 카보너타이트, K-우세한 초염기성암-염기성암-산성암 용암류와 같은 K-알칼리암으로 구성됨이 특징이다.

이 열곡대에 속하는 Tanganyika-Rukwa-Malawi

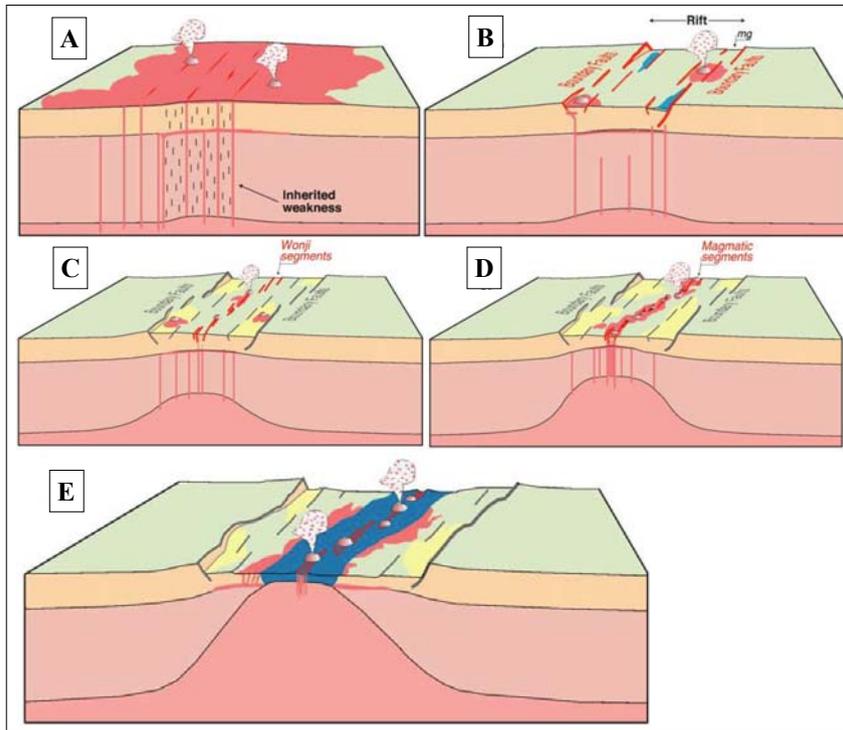


Fig. 5. Schematic model of rift evolution in the Main Ethiopian Rift (modified after Ebinger, 2005).

(TRM) 열곡들은 원생대의 기반암 구조에 크게 지배되며, 정단층의 반지구대이다. 말라위 열곡대는 남쪽으로 확장되어 남부 모잠비크의 Urema 및 Lebombo 지구대로 연결되며, 제4기 동안 마그마활동이 없었다. Tanganyika와 Rukwa 호수 사이에 있는 Rungwe 열곡대는 케냐 열곡대와 동일한 선상인 북동-남서 방향으로 발달하며, 신생대 말 9~7 Ma경 화산활동이 초래되었다. 제4기 동안 일부 열곡에서 화산활동의 휴지기가 있었으나, 여전히 마그마활동이 지속되는 현생 지열대이다(Omenda, 2007).

남서 열곡대 (South-western Branch)

서부 열곡대에서 남서 방향으로 분기된 남서 열곡대는 DR-콩고 남부와 잠비아의 Tanganyika 호에서부터 남서 방향으로 확장되어 보츠와나 Okavango 열곡대와 연결된다. 열곡대의 전 지역에서 마그마활동이 없었으나, 단층은 뚜렷이 발달하고 있다. 이 열곡대의 잠비아와 DR-콩고 남부에서는 지열대가 발달한다(Omenda, 2007).

열곡대의 광화작용

주 에티오피아 열곡대(MER)의 화산암류와 관련 퇴적암류는 지열, 소다회, 포타쉬(K), 천연수 금, 벤토나이트, 유황 및 부석자원으로 중요한 관련암으로 역할을 한다(Tadesse and Allen, 2003). 열곡 관련 대표적인 광상으로는 Afar 열곡대에 분포하는 Danakhil K-광상과 Megenta 및 Blackrock 천연수 금광상을 들 수 있다.

Danakhil K-광상

에티오피아 북부 에리트리아 국경 지역의 Afar 열곡대에서 북부로 연장되는 Danakhil 침강대에 위치하는 Danakhil K-광상은 영국 Allna Potash 사에 의해 2010년부터 2012년까지 탐사가 수행되었으며, 총 자원량은 약 12.6억톤으로 평가되었다(표 1)(ERCOSPLAN, 2012).

이 광상 지역은 증발암이 우세하게 산출하며 이 증발암의 층서는 하위서부터 하부암염층(Lower Rock Salt), 허드슨층(Hudson Formation), 상부암염층

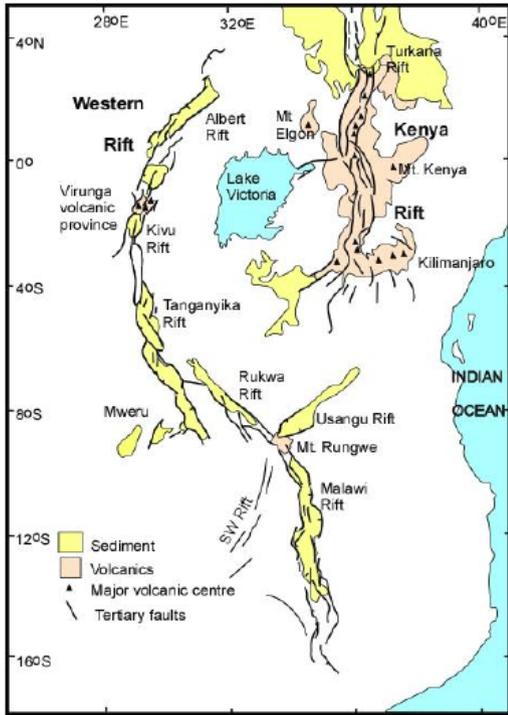


Fig. 6. Map showing the structural relationship between the Eastern (Kenya) and Western branches of the EARS.

(Upper Rock Salt)으로 구분되며, 허드슨층은 하위로부터 카이나이트 층원(Kainite Member), 하부 카날라이트 층원(Lower Carnallite Memembr), 비스초파이트 층원(Bischofite Member), 상부 카날라이트 층원(Upper Carnallite Member), 실비나이트 층원(Sylvinite Member)으로 구분된다(그림 7)(Holwerda & Hutchinson, 1968). 허드슨층 하위에 놓이는 하부암염층은 40 m 두께를 가지며 암염, 경석고, 점토광물로 구성되며, 상위에 놓이는 상부암염층은 20 m의 두께를 가지며 주로 암염, 경석고로 구성되며 점토광물이 협재된다. 이 광상에서는 4종의 K-광물[실바이트, 카날라이트, 폴리할라이트(polyhalite), 카이나이트]이 산출하며, 위에서 분류된 층서는 이들 광물의 함량비에 따라 층서적으로 분류한 것이다. 실비나이트 층원은 소위 건층(market bed) 아래 놓이며, 층후가 최대 11 m까지 달하며, KCl 평균품위가 15% 이상이다. 실비나이트가 우세하게 산출하고 소량의 카날라이트, 경석고, 점토광물 및 백운석이 수반된다. 실비나이트 층원 아래

Table 1. Estimated amounts of mineralized material and average grade divided in measured, indicated and inferred resources for the 4 different Members with potash mineralization in the investigated part of the ALLANA property (ERCOSPLAN, 2012)

	Sylvinite member	Upper carnallite member	Lower carnallite member	Kainite member
Measured resources				
Millions of tonnes of mineralized material	16.0	14.9	78.0	98.7
Average KCl grade (%)	29.1	19.9	12.0	19.8
Indicated resources				
Millions of tonnes of mineralized material	81.8	63.5	134.7	185.5
Average KCl grade (%)	30.2	18.0	12.1	19.8
Inferred resources				
Millions of tonnes of mineralized material	108.2	85.6	130.7	271.2
Average KCl grade (%)	31.3	17.1	11.7	20.3

놓이는 상부 카날라이트 층원은 KCl 10% 이상의 품위를 나타내며, 카날라이트가 가장 우세하게 산출하고 소량의 키세라이트(kieserite), 실바이트(sylvite), 경석고, 점토광물 및 백운석이 수반된다. 하부 카날라이트 층원은 비스초파이트 층원(비스초파이트 함량 20% 이상) 아래 놓이며, 카날라이트가 가장 우세하게 산출하고(카날라이트 함량 약 60% 이상), 암염 및 불용성 물질이 수반되고, 소량의 경석고, 실바이트, 카이나이트가 산출한다. 카이나이트 층원은 카이나이트 함량이 50% 이상이며 평균 약 9 m의 층후를 가지고, 많은 양의 카이나이트와 소량의 키세라이트, 카날라이트 및 불용성 물질로 구성된다.

이 광상은 제4기 화산활동과 높은 지열류에 의해 열곡대 내 분포하던 소금 선상지(salt fan)에서 증발작용에 의해 형성된 증발형 K-광상이다(Holwerda and Hutchinson, 1968).

Megenta 천열수 Au-Ag 광상

아파르(Afar) 열곡대에 위치하는 대표적인 천열수 금광상은 텐다호(Tendaho) 지구대의 Megenta 광상과 Blackrock 광상이다(그림 8). 아파르 열곡의 남동부에 위치하는 지부티(Djibouti) 지역 내에도 천열수형 광화작용이 보고된 바 있다(Moussa *et al.*, 2012).

화산성 천열수 금-은 광상은 신생대 제3기-제4기 동안 섭입대에서 칼크-알칼리 화성활동이 초래되는 대륙연변부의 마그마호(대륙호) 또는 해양 내의 해양호에서 주로 형성되거나, 일부 확장이 일어나는 중앙해령에서 형성됨이 일반적이다(Hedenquist and Lowenstern, 1994; Corbett, 2002). 드물게 경제적인 광상들이 남서 아프리카 및 동아프리카의 대륙 내부 열곡대에 분포하기도 한다(Fiori *et al.*, 2008).

제4기에 MER에서 산성의 과알칼리 화산활동에 의해 열수활동이 초래되어 현재까지도 활동하여 지열대가 형성되고, 저유황형 금 광상들이 발견되었다(Fiori *et al.*, 2008). 여러 산출지(Gedemsa, Aluto and Corbetti calderas, and the Tendaho graben)가 보고되고 있으며, 텐다호 지구의 Megenta 광상도 이 중 하나이다.

Megenta 저유황형 금 광상은 2009년 발견되었으며, 현재 영국의 Startex International사에 의해 탐사가 진행 중이다. 지금까지의 탐사 결과 옥수질 규화 변질된 퇴적암 분포지에서 5개의 광체(Warthog, Baboon, Canal, Kingfisher, Gazelle)가 분포하며, 그중 Hyena 광체에서는 규화 변질된 열수각력암에서 16.75 g/t의 금을 함유됨이 보고된 바 있다(Stratex, 2012)(그림 9).

기타 광상 및 관입암체

Gakara REE 광상

동아프리카 열곡대의 서편인 부분디에 분포하는 이 광상은 카보너타이트 유형의 REE 광상이다(Lehmann *et al.*, 1994). 이 광상은 400 km² 면적 내 수 cm부터 수 m까지의 폭을 가지는 맥상 또는 망상세맥상의 광체를 형성한다. 주로 조립의 바스트너사이트(bastnaesite)와 모나자이트(monazite)로 구성되고, 기타 수반광물은 중정석, 석영, 미사장석, 흑운모, 황철석, 휘수연석 및 방연석이다(Aderca and Van Tasser, 1971). 바스트너사이트의 형성시기는

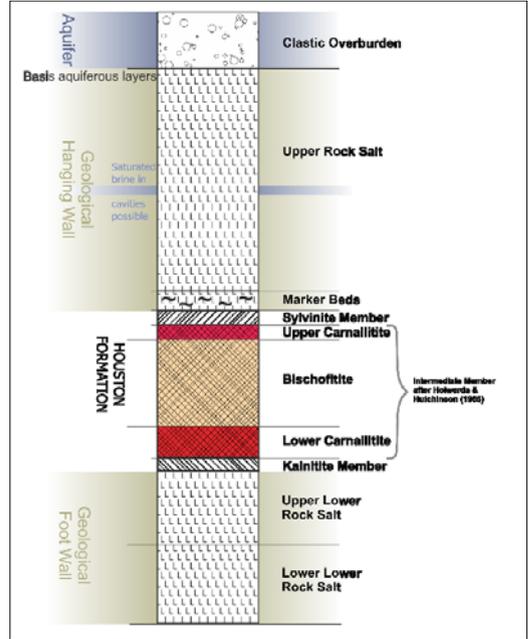


Fig. 7. Stratigraphy for the evaporite sequence of the Danakil potash deposit based on recent ALLANA drilling results (ERCOSPLAN, 2012).

587±4 Ma인 신원생대로 알려져 있다(Nakai *et al.*, 1988). 이 지역에 분포하는 카보너타이트와 알칼리암들이 신원생대에서 신생대까지의 광범위한 연대를 보이는 것은 동일한 구조선을 따라서 일어나는 반복된 열곡활동의 결과로 해석되고 있다(Tack *et al.*, 1984; Van Straaten, 1989).

알칼리관입암체

말라위와 모잠비크는 동아프리카 열곡대의 남동부 끝자락이다. 이 지역은 네펠린-섬장암(nepheline-syenite)과 카보너타이트와 같은 알칼리 관입암체가 매우 풍부하게 분포한다(그림 10). 말라위의 알칼리 관입암체는 North Nyasa Alkaline Province와 남부의 Chilwa Alkaline Province로 구분된다. 전자는 신원생대(-520 Ma)의 Pan African Orogeny와 관련되어 형성된 네펠린-섬장암이 우세한 알칼리관입암체로, 후자는 네펠린-섬장암, 네펠리나이트(nephelinite), 아이졸라이트(ijolite), 카보너타이트(carbonatite), 섬장암(syenite), 석영 섬장암(quartz syenite) 복합체로 산출하는 백악기초 137~93 Ma 시기의 관입암체이다(Woolley, 2001). 모잠비크의

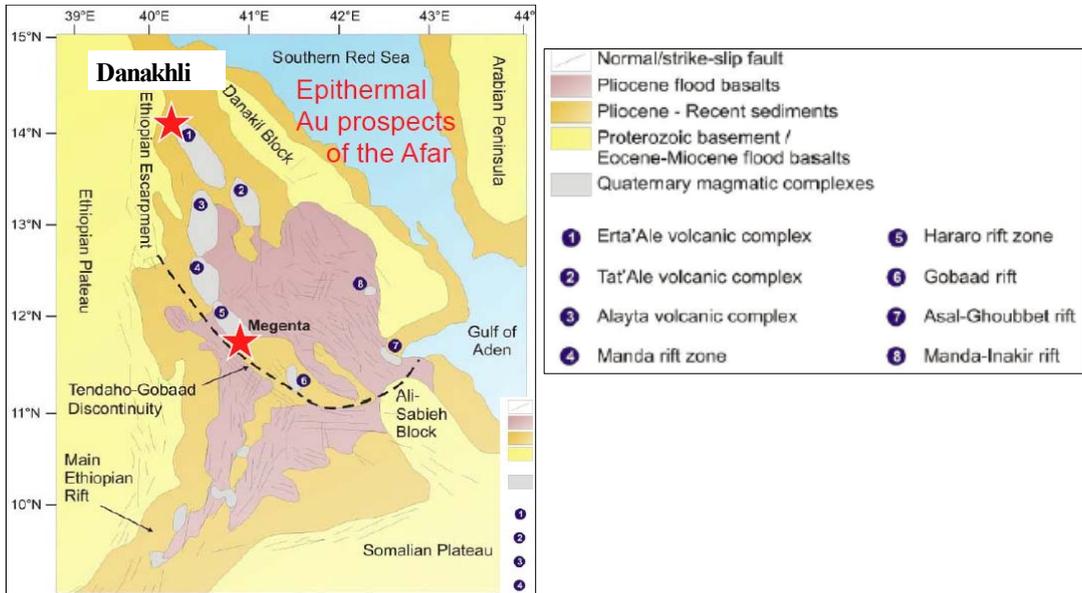


Fig. 8. Simplified geology of MER and location map of Magenta and Blackrock Au deposits (Hedenquist, unpublished).

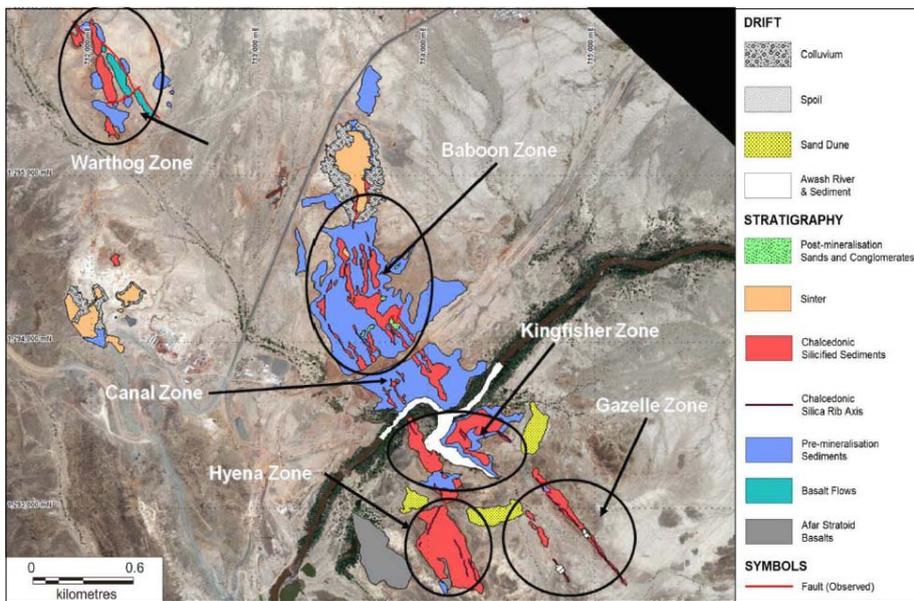


Fig. 9. Geology of Magenta Au deposit (Stratex, 2012).

알카리 관입암체는 카보너타이트가 우세하고 네펠린-섬장암이 일부 분포하며, 일부 카보너타이트의 암체들은 희토류, 우라늄, 인회석 자원의 근원암으로 추측된다(Woolley, 2001).

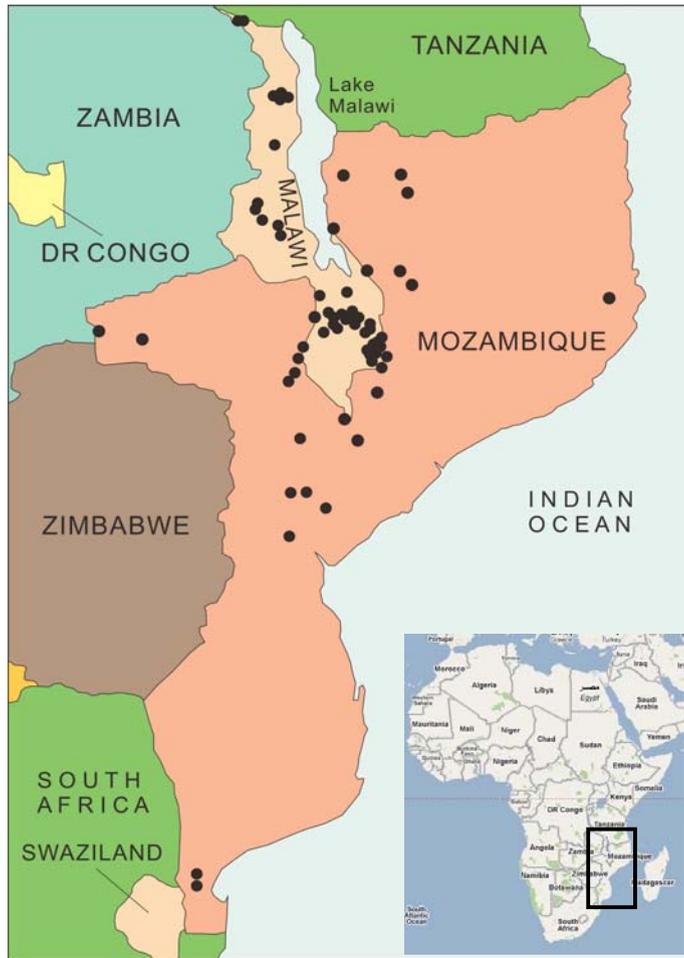


Fig. 10. Distribution of alkaline and carbonatitic intrusives.

요 약

동아프리카 열곡대는 아라비아반도와 아프리카 북동부의 경계에서 부채꼴 형태로 남쪽으로 뻗은 대단층 함몰지구대이다. 아프리카 판 내부에 발달한 열곡대의 폭은 35~60 km이며 연장은 약 4,000 km로 알려져 있다. 열곡대는 에티오피아에서 남서 방향으로 발달하다 에티오피아 남부에서 동, 서 및 남서 열곡대로 나누어진다.

이 열곡대는 제3기초 올리고세(30~35 Ma)부터 에티오피아 북부 아파르 침강대를 중심으로 주 에티오피아 열곡대가 형성되고, 남쪽으로 확장되면서 마이오세에 활성화된다. 서부 열곡대는 동아프리카 대지의 가장자리와 빅토리아 호의 서편을 따라 발

달하며, 고각의 정단층에 의해 특징되는 전형적인 반지구대이다. 동부 열곡대(주 에티오피아 열곡대와 케냐 열곡대)는 30 Ma 전 화산활동과 지구조활동이 시작되었으나, 서부 열곡대는 Albert 호 북부에서 12 Ma 전에, Tanganyika 열곡에서는 7 Ma 전부터 시작되었다. 서부 열곡대의 남서 방향으로 분기된 남서 열곡대는 DR-콩고 남부와 잠비아의 Tanganyika 호에서부터 남서 방향으로 확장되어 보츠와나 Okavango 열곡대와 연결된다.

주 에티오피아 열곡대(MER)의 화산암류와 관련 퇴적암류는 지열, 소다회, 포타쉬(K), 천열수 금, 벤토나이트, 유황 및 부석자원으로 중요한 관련암으로 역할을 한다. 열곡관 관련 대표적인 광상으로는 Afar 열곡대에 분포하는 Danakil K-광상과 Me-

genta 및 Blackrock 천열수 금광상이다.

Danakhil K-광상은 제4기 화산활동과 높은 지열류에 의해 열곡대 내 분포하던 소금 선상지(salt fan)에서 증발작용에 의해 형성된 증발형 K-광상으로서 총 자원량은 약 12.6억톤으로 평가되었다. 이 광상에서는 4종의 K-광물인 실바이트, 카날라이트, 포리하라이트, 카이나이트가 산출한다.

아파르 침강대 내 분포하는 대표적인 천열수 금광상은 텐다호 지구대에 위치하는 Megenta 및 Blackrock 광상이다. 제4기에 EMR에서 산성의 과알칼리 화산활동에 의해 열수활동이 초래되어 현재까지도 활동하여 지열대가 형성되고, 저유황형 금 광상들이 형성되었다. Megenta 저유황형 금 광상은 2009년 발견되었으며, 현재 영국의 Startex International사에 의해 탐사가 진행 중이다. 지금까지의 탐사 결과 옥수질 규화 변질암 분포지에서 5개의 광체가 분포하며, 그중 Hyena 광체에서는 규화 변질된 열수카력암에서 최고 16.75 g/t의 금 품위가 보고되었다.

동아프리카 열곡대의 서편인 부룬디에 분포하는 Gakara REE 광상은 카보너타이트 유형의 REE 광상이다. 이 광상은 400 km² 면적 내 수 cm부터 수 m까지의 폭을 가지는 맥상 또는 망상맥상의 광체를 형성한다. 주로 조립의 바스트너사이트와 모나사이트로 구성된다. 바스트너사이트의 형성시기는 587±4 Ma인 신원생대로 알려져 있으며, 이 지역에 분포하는 카보너타이트와 알칼리암들이 신원생대에서 신생대까지의 광범위한 연대를 보이는 것은 동일한 구조선을 따라서 일어나는 반복되는 열곡활동으로 해석된다. 또한 REE, U, 인회석 자원의 관련암체로 생각되는 알카리 조면암(네펠린-조면암 포함)과 카보너타이트는 동아프리카 열곡대의 남동부 끝자락인 말라위와 모잠비크에 우세하게 분포한다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원에서 2013년 수행중인 “해의 희유금속자원 탐사 및 부존잠재성평가” 과제(GP 2012-002)의 지원으로 수행되었다. 이 논문을 상세히 검토해 주신 두 분의 심사위원에게 감사드린다.

REFERENCES

Aderca, B. M. and Van Tasser, R. (1971) Le gisement de terresrares de la Karonge (R6publique du Burun-

di). Bulletin Academic Royal Science. Outre-Mer (Bntrelles'), Classe Sci. Nat. et Mödicales, 18, 4-117.

Atekwana, E.A., Hogan, J.P., Kampunzu, A.B., and Modisi, M.P. (2004) Early structural evolution of the nascent Okavango rift zone, NW Botswana. Proceedings of the East African Rift system: Geodynamics, Resources, and Environment Conference, Addis Ababa, 12-16.

Bonini, M., Corti, G., Innocenti, F., Manetti, P., Mazzarini, F., Abebe, T., and Pecskey Z. (2005) The evolution of the Main Ethiopian Rift in the frame of Afar and Kenya rifts propagation. Tectonics 24, TC1007, doi:10.1029/2004TC001680.

Collet, B., Taud, H., Parrot, J.F., Bonavia, F., and Chorowicz J. (2000) A new kinematic approach for the Danakhil block using a Digital Elevation Model representation, Tectonophysics, 316, 343-357.

Corbett, G. J. (2002) Epithermal gold for explorationists. AIG Journal, 2001-01, 1-26.

Corti, G. (2009) Continental rift evolution: from rift initiation to incipient break-up in the Main Ethiopian Rift, East Africa. Earth Science Reviews, 96, 1-53.

Ebinger, C. J. (1989) Tectonic development of the western branch of the East African rift system. Geological Society of America Bulletin, 101, 885-903.

Ebinger, C. (2005) Continental breakup: The East African perspective. Astronomy & Geophysics, 46, 216-221.

Ebinger, C. J., Yemane, T., Harding, D.J., Tesfaye, S., Kelley, S., and Rex, D.C. (2000) Rift deflection, migration, and propagation: Linkage of the Ethiopian and Eastern rifts, Africa, Geological Society of America Bulletin, 112, 163-176.

ERCOSPLAN (2012) Technical report: updated resource report for the Danakhil K deposit, Afar State/Ethiopia.

Fiori M, Pretti S., Tadessa, S., and Valera, P. (2008) Epithermal gold occurrences in the lakes district of the main Ethiopian rift and Tendaho (Afar rift): Discovery of a metallogenic province. Proceeding's paper on “The 33rd International Geological Congress”.

Fouillac, C. (1984) Dépôts métalliques et solutions géothermales actuelles en zone de rift (exemple d'Asal, Djibouti): Géochronique, 12, p. 8.

Hayward, N.J. and Ebinger, C.J. (1996) Variations in the along-axis segmentation of the Afar Rift system. Tectonics 15, 244-257.

Hedenquist J.W. and Lowenstern, J.B. (1994) The role of magmas in the formation of hydrothermal ore

- deposits. *Nature*, 370, 519-526.
- Holwerda, J.G. and Hutchinson, R.W. (1968) Potash-bearing evaporites in the Danakil Area, Ethiopia. *Economic Geology*, 63, 124-150.
- Lehmann, B., Nakai, S., Höndorf, A., Brinckmann, J., Dulski, P., Hein, U., and Masuda, A. (1994) REE mineralization at Gakara, Brundi: Evidence for anomalous upper mantle in the western Rift Valley. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58, 985-992.
- Mohr, P. (1983) Volcanotectonic aspects of the Ethiopian Rift evolution. *Bulletin Centre Recherches Elf Aquitaine Exploration Production*, 7, 175-189.
- Mohr, P. (1992) Nature of the crust beneath magmatically active continental rifts. *Tectonophysics*, 213, 269-284.
- Mohr, P. and Zanettin, B. (1988) The Ethiopian flood basalt province. In: Macdougall, J.D. (ed), *Continental Flood Basalts*. Kluwer Acad. Dord., 63-110.
- 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*, 47, 563-576.
- Mwangi, M. (2005) Country update on geothermal energy in Kenya. *Proceedings in the World Geothermal Congress, WGC 2005, Antalya, Turkey*.
- Nakai S., Masuda A., and Lehmann B. (1988) La-Ba dating of bastnaesite. *American Mineralogist*, 73, 1111-1113.
- Omenda, P.A. (2007) The geothermal activity of the East African Rift. *Short course II on Surface Exploration for Geothermal Resources*. Organized by UNU-GTP and KenGen.
- Robbins, E.I. (1983) Accumulation of fossil fuels and metallic minerals in active and ancient rift lakes. In: Morgan, P. and Baker, B.H.(eds.), *Processes of continental rifting*. *Tectonophysics*, 94, 633-658.
- Saint, P.K. (1975) East African rift valleys. *Tectonic setting for new geothermal development*. *Geothermal Energy Magazine*, 3, 71-75.
- Stratex (2012) A new epithermal gold discovery: Magenta, Tendaho, Afar Depression (unpublished).
- Tack L., De Paepe P., Deutch S., and Liegepis J.P. (1984) The alkaline plutonic complex of the Upper Ruvubu (Burundi): Geology, age, isotopic geochemistry and implications for the regional geology of the Western Rift. In: Kunrex, J. and Micuor, J. (eds.), *African Geology*, 91-114.
- Tadesse, G. and Allen, A. (2003) Geology and mineral potential of Ethiopia: a note on geology and mineral map of Ethiopia. *Journal of African Earth Sciences*, 36, 273-313.
- USGS (2001) *The dynamic earth: the story of plate tectonics*. Online edition.
- Van Straaten P. (1989) Nature and structural relationships of carbonatites from Southwest and West Tanzania. In: Bell K.(ed), *Carbonatites, Genesis and Evolution*. 177-199, Unwin Hyman.
- Wairegi, W.J. (1984) Geothermal exploration in Kenya with special reference to Eburru Prospect: *Geological Survey of Japan Report*, 263, 79-92.
- WoldeGabriel, G., Aronson, J.L., and Walter, R.C. (1990) Geology, geochronology, and rift basin development in the central sector of the Main Ethiopia Rift. *Geological Society of America Bulletin*, 102, 439-458.
- Wolfenden, E., Ebinger, C., Yirgu, G., Deino, A., and Ayale, D. (2004) Evolution of the northern Main Ethiopian rift: Birth of a triple junction, *Earth and Planetary Science Letters*, 224, 213-228.
- Woolley A. R. (2001) Alkaline rocks and carbonatites of the world. *The Geological Society of London*. p. 373.
- Wood, J. and Guth, A. (2009) East Africa's Great Rift Valley: A Complex Rift System. *Geology.com*.

접수일(2013년 12월 4일), 수정일(1차 : 2013년 12월 20일),
 게재확정일(2013년 12월 23일), 책임편집위원 : 신동복