

## 아프리카 말리 세폴라 지역의 금광화작용: 금의 산출특성 및 유체포유물연구

허철호\*

한국지질자원연구원 광물자원연구본부 해외광물자원연구실

### Gold Mineralization of the Sepola District in Mali, Africa: Occurrence Characteristics of Gold and Fluid Inclusion Study

Chul-Ho Heo\*

Overseas Mineral Resources Group, Mineral Resources Research Division, Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources(KIGAM), Daejeon 305-350, Korea

The geology of Sepola district in Mali is consisted of Birrimian group with metasedimentary rocks of lower Proterozoic and volcanoclastics, and later intrusive igneous rocks. Ore deposit in this district has the characteristics of vein- and disseminated-type gold deposit which was formed by infilling the secondary fracture zones related to the large-scale fault zone of NW direction within Birrimian group. It is confirmed as promising that Barani district has the gold grade of 0.53~9.21 g/t with the extension of 1.3 km and width of 1 to 20.1 m. The ore mineralogy is simple with electrum, pyrite and galena. Fineness of gold grain ranges from 848 to 915(average 891) indicating mesothermal to hypothermal environment. Fluid inclusions are classified as liquid-rich type I, gas-rich type II and liquid-CO<sub>2</sub> bearing type III. Primary and pseudosecondary inclusions homogenize from 236 to 393°C with salinity of 0.0 to 8.6 wt.% NaCl. Secondary inclusions homogenize from 103 to 184°C with salinity of 0.7 to 8.6 wt.%. From the relationship between homogenization temperature and salinity, it may be thought that auriferous fluid experienced dilution and cooling through inflow of meteoric water after fluid unmixing derived from pressure decrease in the temperature range of 400 to 250°C. From the massive occurrence of quartz vein, simple mineralogy with paucity of sulfide, and presence of liquid-CO<sub>2</sub> bearing with high homogenization temperature, it is thought that gold mineralization in Sepola district corresponds to the mesothermal to hypothermal ore deposit.

**Key words :** Africa, Mali, Sepola, mineralogy, fluid inclusion

아프리카 말리 세폴라 지역의 지질은 하부로부터 하부원생대의 변성퇴적암류 및 화산쇄설성암류로 구성된 비리미안층군과 후기에 이를 관입한 화성암류로 구성된다. 본역의 광상은 비리미안층군내 북서주향의 대규모 단층대 생성과 관련하여 2차적으로 형성된 열극대를 따라 열수유체가 충전되어 형성된 맥상 및 광염상 금광상이다. 부존잠재성이 가장 기대되는 바라니 구역은 연장 1.3 km, 폭 1~20.1 m, 품위 Au 0.53~9.21 g/t가 확인되었다. 광석광물은 단순하며, 에렉트럼, 황철석 및 방연석 등이 확인되었다. 금립의 순도는 848~915(평균 891)이며 본역 내 금광상은 중~심열수 환경에서 생성되었음을 추정할 수 있다. 유체포유물은 액상우세(형), 기상우세(형) 및 액상함CO<sub>2</sub>포유물(형)로 분류된다. 초생 및 가이차 포유물의 균일화온도는 236~393°C, NaCl당량 염농도는 0.0~8.6 wt.%이며, 이차포유물의 균일화온도는 103~184°C, 염농도는 0.7~8.6 wt.%이다. 균일화온도 및 염농도관계로부터 유체는 400~250°C범위에서의 압력감소에 의한 유체불혼화 과정을 거친후 친수의 유입으로 희석 및 냉각과정이 이루어졌음을 알 수 있다. 석영맥이 피상을 보이고 광물수반양상이 단순한 점, 유화광물이 소량 함유되고, 함CO<sub>2</sub> 포유물이 산출되고 균일화온도가 높은 것등으로부터 본역내 금광화작용은 중-심열수형 광상으로 사료된다.

**주요어 :** 아프리카, 말리, 세폴라, 광물학, 유체포유물

1. 서 론

아프리카는 면적 30.3백만 km<sup>2</sup>에 달하는 광활한 대륙으로서 광물 및 에너지자원이 풍부한 대륙이다. 특히, 보크사이트, 크롬, 코발트, 다이아몬드, 금, 망간, 인광석, 백금족 금속, 티탄, 바나듐, 지르코늄 자원 등에서 세계 1, 2위에 해당되는 매장량을 보유하고 있다. 그러나, 우리나라는 지리적인 제약으로 인하여 대 아프리카 자원개발 진출이 미미한 실정이다.

말리는 알제리, 부르키나 파소, 코르티브와르, 기니, 모리타니아, 니제르 및 세네갈과 국경을 접하고 있는 서아프리카의 내륙국이다(Fig. 1). 2006년, 인구는 약 1천2백만명이며 인구증가율은 년간 약 2.6%이다. 말리의 국토면적은 1백24만 km<sup>2</sup>이다(U.S. Central Intelligence Agency, 2006). 말리의 광업분야는 몇 개의 신규 금광산들이 최근에 생산을 하고 있지만 아직도 미개발상태

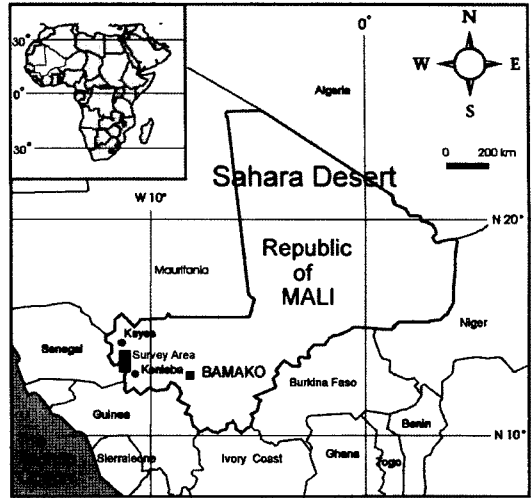


Fig. 1. The location map of survey area (Sepola district) and Republic of Mali.

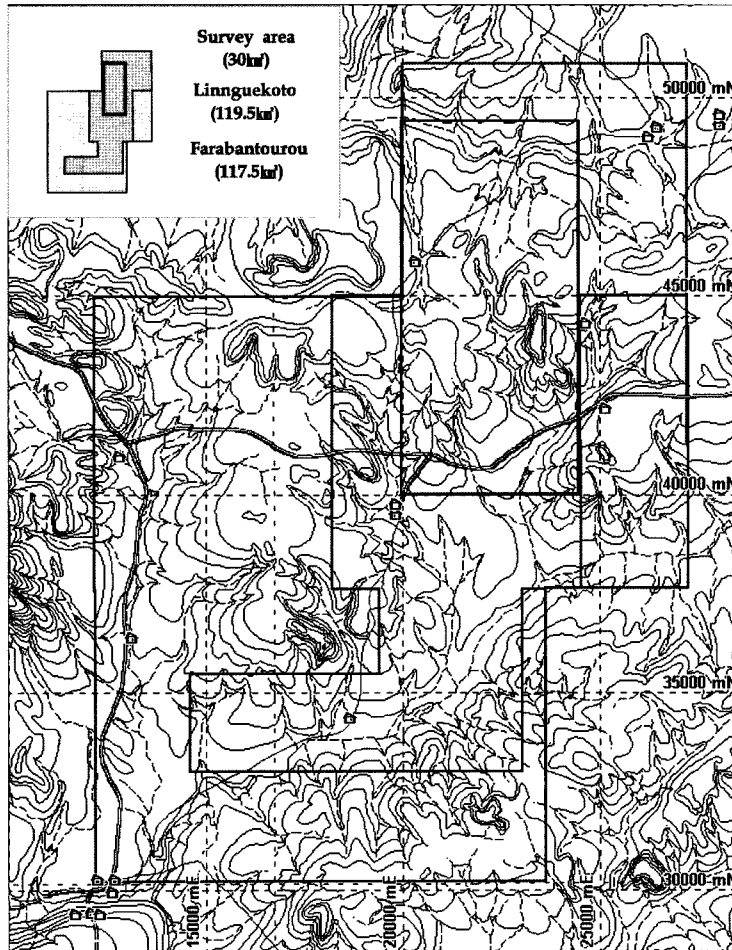


Fig. 2. Mine concession map of Sepola project area.

에 있다. 말리의 가장 개발이 안된 광물자원에는 보크사이트, 크롬, 동, 다이아몬드, 화강암, 석고, 철광석, 고령토, 연, 리튬, 망간, 대리석, 니켈, 니오븀, 팔라듐, 인산염암, 금홍석, 은, 활석, 토륨, 주석, 티타늄, 텅스텐, 우라늄 및 지르코늄 등이 있다(Direction Nationale de la Geologie et des Mines, 2006).

말리 광상의 대부분은 말리의 동부와 서부에서 산출된다. 다이아몬드는 케니에바 지역에서 주로 산출한다. 철은 다양한 지질환경과 광상유형으로 산출하며, 말리의 수도 바마코(Bamako)의 서쪽 바코에(Bakoye)와 바핑(Bafing)강 사이의 원생대 후기 퇴적물에 부존하는 어란상 철광석이 가장 중요한 것으로 보고되고 있다. 풍화반은 곤다이트(gondite)상에 피복된 산화물로 구성된 망간광상은 말리의 동부에서 산출된다. 보크사이트 광상은 원생대 후기내지 페름기 휘록암 상부에 산출되고 있으며 기니 국경을 따라 말리의 서부에서 산출한다. 보크사이트 광상의 층후는 약 10 m이며 이들 광상의  $Al_2O_3$  함량은 39-48%이다. 리티아 휘석을 함유하고 있는 페그마타이트로 구성된 리튬광상은 보우고우니(Bougouni) 지역의 남서쪽에서 산출한다. 인회석, 운모, 니오븀 및 희토류 광물은 서아프리카 강과의 동부 연변부를 따라 부존하고 있는 카보너타이트에서 산출된다. 산업광물로는 중정석, 규조토, 형석, 고령토, 석회암, 장식석재, 소금 등이 있다. 인산염은 아드르 데스 이포라스(Adrar des Iforas) 지역의 남쪽과 서쪽에 위치하고 있다. 석회암 광상은 카에스(Kayes)의 남동쪽에 위치한 바마코-다카르(Bamako-Dakar) 철도 근처에 부존하고 있다. 인 케레이트(In Kereit) 석고광상은 아드르 데스 이포라스(Adrar des Iforas)의 북쪽에 위치하고 있다. 석고는 역시 제4기 삽카(sabkhas)내 타오우데니(Taoudeni) 지역의 소금과 함께 산출한다. 갈탄 및 오일셰일은 아드르 데스 이포라스(Adrar des Iforas) 산맥의 남동쪽과 서쪽에서 산출한다. 말리의 알려진 금광상의 대부분은 약 23,000  $km^2$ 의 지역을 덮고 있는 비리미안(Birimian) 녹색암에 배태되어 있다. 1차 금광화작용은 거의 두개 유형으로 알려져 있다. 첫 번째는 광맥 광화작용으로 석영맥의 자연금 또는 모암내 산점상의 황화물이 특징적이며, 둘째로는 전기석화작용을 받은 규암내 층상형 광화작용의 형태이다. 금은 역시 층적성 사광상에서도 산출된다(Kusnir, 1999).

연구지역은 행정구역상 말리국 서부의 카에스 지구(Kayes Province)에 속하며 수도인 바마코(Bamako)로부터 북서쪽으로 약 350 km지점에 위치한다. 조사지역은 말리를 포함한 서부 아프리카지역에서 주요 금광화

대가 부존하는 비리미안(Birimian)층 분포지에 포함되며 본 역의 주요 대규모 구조대인 세네갈-말리 단층대(Senegal-Mali Fault Zone)에 인접한다. 조사대상 면적은 기암사결과 광황이 양호한 것으로 확인된 광구북부의 바라니(Barani) 및 케니에고우로우(Keniegoulou)구역에 해당하는 30  $km^2$ 이다(Fig. 2). 본 연구의 목적은 금변 조사시 채취한 석영맥 및 시추시료의 금립시료에 대한 광물학 및 유체포유물 실험연구를 통해 부존 금광상의 성인과 부존특성을 규명하고자 하였다.

## 2. 지질 및 광상

### 2.1. 광역지질

조사구역을 포함한 말리 서부지역에는 서아프리카 강과의 결정질 기반암이 분포하며, 이 기반암은 원생대 화산쇄설성 비리미안(Birimian) 층군과 후기에 이를 관입한 화성암류로 구성된다. 서부 아프리카지역에서 원생대 지층은 크게 비리미안(Birimian)층군과 타르콰이안(Tarkwaian)층군으로 나뉘며 후자가 전자의 상위에 놓이고 구성암석들은 대체로 하위의 비리미안(Birimian)층군으로부터 기원된 풍화산물로 추정된다(Kesse, 1985). 비리미안(Birimian)층군은 23억-19억년 전에 형성되어 19.5억년전에 최고조에 달한 에부르네안(Eburnean) 조산운동의 영향으로 변형 및 변성되어 일대에 대규모 화강편마암지대가 생성되었다. 변형, 변성작용으로 층내 주된 주름 구조가 북-북동방향으로 형성되었으며 그 대표적인 예가 서부 말리지역에서의 케니에바-케도우고우 내좌층(Kenieba-Kedougou Inlier)과 세네갈-말리 단층대(Senegal-Mali Fault Zone)이다. 암상에 있어 비리미안(Birimian)층군은 하부로부터 화산암 및 화산쇄설성암, 셰일과 찰사암으로 구성되는 변성퇴적암 순으로 구성된다. 저변성작용 및 습곡작용을 받은 비리미안(Birimian)층군은 후기 원생대-고생대 페름기에 조립현무암, 섬록암, 화강암, 화강섬록암 등 다양한 종류의 심성암류에 의해 관입되면서 비리미안(Birimian)층들을 분리, 도움상으로 발달한다. 이외에도 조립현무암이 소규모 암주상으로 그리고 암맥상 킴벌라이트(kimberlite)가 북동주향의 단층과 열극대를 따라 주입되어 있다. 말리의 비리미안(Birimian)층은 광역 지질상 지역별로 크게 2개로 나뉘는 데 수도인 바마코(Bamako)를 중심으로 북서측 및 남측에 각각 분포된다. 북서측의 비리미안(Birimian)층은 세네갈(Senegal)과 기니(Guinea)의 국경을 따라 발달하고 있으며 분포 면적이 동서방향으로 150 km, 남북방향으로 200 km의

삼각형의 형태로 부존한다. 남측의 비리미안(Birimian) 층은 바마코(Bamako)남측에서 동서방향으로 1,750 km, 남북방향으로 800 km의 폭 넓은 분포를 보인다. 말리 지역에서 비리미안(Birimian)층은 암상에 따라 화산암 및 화산쇄설성 퇴적암류인 마코(Mako)층, 쇠설암 및 탄산염암으로 구성되는 디알레(Diale)층과 상부 비리미안(Birimian) 퇴적암류인 달레마(Dalema)층 등으로 구성된다(Liegeois *et al.*, 1991a; Direction Nationale de la Geologie et des Mines, 2006).

2.2. 조사구역의 지질

조사구역의 지질은 하부로부터 하부원생대의 변성 퇴적암류 및 화산쇄설성암류로 구성된 비리미안(Birimian)층군과 후기에 이를 관입한 화성암류로 구성된다(Figs. 3 and 4). 조사구역내 분포하는 비리미안(Birimian)지층은 하부로부터 정합관계인 사보우씨레(Saboussire)층과 코피(Kofi)층 및 이들과 비정합관계인 케니에반디(Keniebandi)층으로 구분된다. 사보우씨레(Saboussire)층(Sa)은 조사구역 남서부에 분포하며 암상에 의해 3개로 나뉘어 하부로부터 조립현무암 및 반려암(Sa<sub>1</sub>), 준안산암 및 석영안산암, 현무암과 응회암류(Sa<sub>2</sub>), 그리고 본 층의 최상위로서 준잡사암, 편암 및 여기에 협재된 역암 등의 변성퇴적암류가 주를 이루는 Sa<sub>3</sub>등으로 구성된다. 코피(Kofi)층(Kf)은 전술한 사보우씨레(Saboussire)층 상위에 놓이며 조사구역을 북서방향으로 가로지르는 세네갈-말리(Senegal-Mali) 단층대(이하 ‘SMFZ’)를 경계로 케니에반디(Keniebandi)층과 접한다. SMFZ 동측에 분포하는 본 층은 잡사암과 편암, 탄산염암, 그리고 여기에 협재된 전기석 사암과 화산퇴적암류등으로 구성되며 층들의 경사가 매우 급하

게 발달된다. 본 층내 일차퇴적구조가 트렌치적에서 북동주향, 50°내외의 남서경사를 보이는 것으로 관찰된다. 케니에반디(Keniebandi)층(Ke)은 SMFZ를 경계로 서측에 분포하며 하위의 잡사암, 탄산염암 및 역암 우세부와 상위의 화산쇄설성 퇴적암류 및 안산암 우세부 등으로 구분된다. 본 층은 전술한 코피(Kofi)층과 부정합의 관계로 추정된다. SMFZ 서측 코우셀리(Koussili)마을부근에서 본층의 층리는 동서주향, 남경사하는 것으로 확인되며 사층리와 점이층리 관찰결과 층리가 역전되었음을 알 수 있다. 전술한 비리미안(Birimian)층들을 후기에 관입한 화성관입암류는 원생대 화강암류와 염기성 화성암류로 구성되며 조사구역 북동부의 드조달로마(Djodaloma) 부근에서 소규모 암주상으로 분포한다. 이보다 후기에 관입한 염기성 화성암류는 반려암, 조립현무암, 휘록암등이 조사지역 동부에 일부 노출된다(Liegeois *et al.*, 1991b).

2.3. 광상

말리를 포함한 서부 아프리카 일대에서 금광상들은 대부분 녹색편암대 내에 발달되며 소규모 전단대의 발달방향과 밀접한 관련성을 보이는 구조규제형 광상이다. 녹색편암대 내에 배태되는 금광상의 대표적인 광석광물로는 유비철석, 자류철석, 황철석, 황동석, 섬아

Geologic Age	Formation/ Name of Rock	Lithofacies	
Quaternary	Alluvium		
	Laterite fm		
Proteromeric	Mafic igneous rocks	Gabbro	
		Dolerite	
		Diabase	
		Granite	
		Granodiorite	
	Granitoid	Tonalite	
		Granodiorite	
	- intrusion - Keniebandi fm	Metavolcanics	
		- disconformity - Kofi fm	Metagraywacke
			Schist
Saboussire fm	Metagraywacke		
	Meta-andesite, etc		
	Metadolerite		

Fig. 3. Geologic system of the Sepola project area.

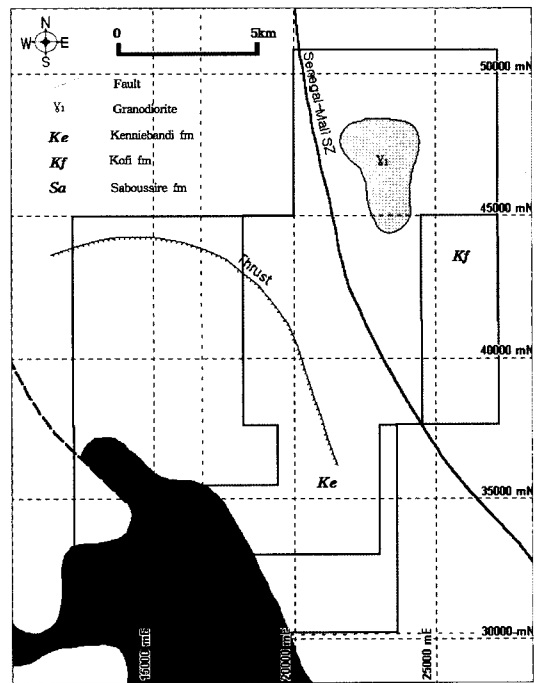


Fig. 4. Geologic map of Sepola project area

연석, 방연석 및 기타 황화물 등이며 일부지역에서 Au-Te광물군을 수반하기도 한다. 이와 함께 구조선을 따라 발달한 금광화작용은 단열대를 충진한 석영맥 주변부에서 탄산염화작용, 녹니석화작용, 견운모화작용 등의 모암변질대도 광화되어 일괄채광이 이루어지고 있다(Boyle, 1984). 최근까지의 조사에 의하면 비리미안(Birimian)층군내의 금광화작용은 지역적인 지질 및 구조환경에 따라 다양한 형태를 보이며 크게 5가지로 다음과 같이 분류된다. 조사구역을 포함한 케니에바(Kenieba)지역에서 금광상은 북서방향의 세네갈-말리 단층대(Senegal-Mali Fault Zone) 및 이와 관련되어 2차적으로 형성된 구조대주변부에 배태된다. SMFZ와 같은 단층구조는 광화작용을 야기한 화성기원 또는 변성기원 광화유체의 통로역할을 하였으며, 비리미안(Birimian)층군에 있어서는 원생대 에베르니안(Ebernian) 조산운동을 거치면서 작용한 압축장에 의해 전단대가 일차적으로 형성되고 연속적으로 전단대와 교차하는 2차열극대 형성을 초래하였다. SMFZ를 포함하여 서부 아프리카지역 및 조사구역에서 발달하는 대부분의 광역지질구조는 이러한 기원을 갖는 것으로 알려져 있다. 조사구역은 광역적으로 말리 서부의 케니에바(Kenieba) 광화대에 속하며 전술한 SMFZ 주변부를 따라 발달하는 맥상 및 광염상 금광상등의 1차광상과 이를 기반으로 사광상이 형성되어 있다. 케니에바(Kenieba)광화대에는 연간 18톤의 금을 생산중인 사디올라(Sadiola)광산을 포함하여 로울로(Loulo), 모릴라(Morilla)등 맥상 및 광염상 금광상이 부존하고 있다. 부존 광상은 원생대 비리미안(Birimian)층군내 북서주향으로 발달하는 광역구조대인 SMFZ의 생성과 관련하여 2차적으로 형성된 북서, 북동방향의 열극대를 따라 화성기원의 열수유체가 주입, 충진되어 형성된 맥상 및 광염상 금광상구역과 이를 기원으로 2차적으로 형성된 원지성 및 충적사광상 구역등으로 구분된다. 이중 금번 조사대상은 시추탐사를 통해 광화대 부존양상 및 광황이 비교적 양호한 것으로 파악된 바라니(Barani) 및 케니에고우로우(Kenicougou)구역에 국한하였다. 바라니 구역과 케니에고우로우 구역에는 유백·회백색의 치밀질 괴상 석영맥 및 세맥군이 모암인 코피(Kofi)층내 발달하는 열극을 따라 주입, 충진되어 형성된 맥상 및 광염상 금광상이 부존되며 그 방향성은 북동-북북서방향이다. 수반광물은 육안상 거의 관찰되지 않으며 석영맥 주변부는 견운모화, 녹니석화, 탄산염화, 규화작용등 일반적인 열수변질작용이 관찰된다. 금번 연구대상인 바라니 구역의 광황은 다음과 같다. 바라니 구역은 광구 중앙

북부 구역에 해당하며 북서주향의 세네갈-말리 단층대(Senegal-Mali Fault Zone)상에 위치한다. 바라니(Barani) 구역은 트렌치(2개소) 및 시추탐사(130공 9,823 m)를 통해 개략적인 광황이 파악되었으며 광화대 연장은 46,200 mN부근에서 48,200 mN까지 약 1,300 m이며 시추에서 확인되는 두께는 1-20.1 m에 이르고 품위는 Au 0.53-9.21 g/t이다. 시추탐사에 의해서는 3개소에 광화대가 착맥되었다. 착맥된 광화대는 코피(Kofi)층내에 부존한다. 주광화대는 47400 mN-48200 mN 구간에서 발달하며 모암인 코피(Kofi)층이 심하게 풍화되었으며 경사는 50°내외로 동경사된다. 주광화대가 배태된 모암에는 탄산염암이 협재되며 층리가 금경사를 이루는 탄산염암실트암부분에서 부광대가 형성되는 양상을 보인다. 부광대에는 방해석 및 석영세맥이 다수 발달하며 모암도 심하게 변질되어 있다. 이러한 양상은 인근의 대규모 금광상인 사디올라(Sadiola), 아텔라(Yatela)에서도 확인된다. 2번째 광화대는 주광화대 서측부에 발달하며 좌표상으로는 20750 mE부근이다. 본 광화대는 저품위이고 경사방향은 동쪽이며 모암은 심하게 풍화된 중립질 사암이다. 마지막 광화대는 좌표상으로는 46200 mN-47000 mN 사이에 위치한다. 광화대는 서경하며 주광화대와 동일한 모암내에 배태한다. 광황이 가장 양호한 부분은 46800 mN 부근이며, 광화정도는 미약한 것으로 확인되었다.

### 3. 금의 산출특성 및 유체포유물 연구

#### 3.1. 금의 산출특성

본 조사시 채취한 시추암편내 함금석영맥 시료를 대상으로 전자현미분석을 실시하였다. 분석은 고려대 지구환경과학과의 JEOL Superprobe JXA-8600 SX를 이용하였다. 금번 조사시 시추탐사결과 광황이 양호한 것으로 확인된 Linnguekoto구역에 시공된 시추공의 시추암편을 팬닝하여 채취한 금립의 화학조성을 파악하기 위하여 연마편시료를 제작, 현미경 감정과 전자현미분석을 실시하였다. Linnguekoto구역은 세폴라 프로젝트 지역내에서의 광황과 및 광상 성인해석을 위한 자료로 인용하기 위해 시료채취가 시행되었다. 금립시료에 대한 연마편감정결과 광물조성은 매우 단순한 것으로 파악되어, 석영맥에 수반되는 에렉트립과 자형의 황철석, 그리고 소량의 방연석 등이 확인되었다(Fig. 5). 채취시료가 무압추시추에 의한 압편인 관계로 석영맥의 조직등은 파악할 수 없었으나 회백색 치밀질 석영맥내에 에렉트립이 황철석, 방연석등과 공생한다. 일반적으로 자연상태의 금입자는 조성이 매우 다양하여 은

함량이 차이가 많다. 은외에 금입자에는 동, 철, 수은 등이 불순물로 함유되는 것이 일반적이며 성인에 따라 그 양이 달라지기도 한다. 금의 순도를 표현하는 용어 중 일반적으로 사용되는 것이 'fineness'이며 다음과 같이 정의된다.

$$fineness = \frac{1000 \times Au}{(Au + Ag)}$$

화학분석에 얻은 결과를 기초로 fineness가 800이상 인 경우를 금이라고 하며 200-800사이를 금과 은의 합금인 에렉트럼이라 한다. 200이하인 경우는 은으로 간주한다. 과거에는 금의 순도가 아말감법 및 시안법에 의해 회수된 양을 기준으로 결정되었다. 아말감법에 의한 금순도는 순금상태에서 실시되지만 시안화법에 의해서는 은을 포함하여 실시되므로 시안화법에 의해 얻은 값이 일반적으로 작다. 최근에는 각각의 금입자를 대상으로 정확한 금-은함량비 및 희유원소의 함량을 파악할 수 있는 전자현미분석이 널리 쓰이고 있으며 진정한 의미의 금순도를 알 수 있다. 이와 함께 Fisher(1945)의 연구에 의하면, 금입자의 fineness와 희유원소의 함량을 이용하여 일차적인 금광상을 분류할 수 있으며, 현재까지 연구결과(Graton, 1933)에 기초하여 fineness에 따른 열수광상의 성인을 추정하는 데 일반적으로 천열수성 500-800, 중열수성 750-900, 심열수성 800-1000

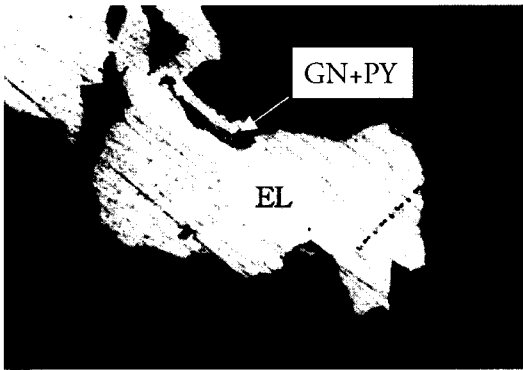


Fig. 5. Photomicrograph of polished section showing the paragenesis of electrum(EL)+pyrite(PY)+galena(GN). Across of photo is 300 μm long.

Table 1. Fineness of gold grain occurred from the Sepola project area

Grain no.	weight. %			atomic. %		fineness
	Ag	Au	Total	Ag	Au	
1	8.9	91.1	100.1	15.1	84.8	848
2	8.1	91.9	100.0	13.8	86.2	848
3	5.7	94.8	100.5	10.0	90.0	849
4	5.7	93.7	99.4	10.1	89.9	858
5	5.8	95.0	100.8	10.0	90.0	862
6	5.7	94.8	100.5	9.8	90.2	876
7	5.4	96.8	102.2	9.3	90.7	897
8	5.5	97.1	102.6	9.4	90.6	899
9	8.4	92.2	100.5	14.2	85.8	899
10	7.2	92.9	100.1	12.4	87.6	900
11	9.0	91.5	100.5	15.2	84.8	900
12	9.0	91.7	100.7	15.2	84.8	900
13	5.7	95.9	101.6	9.7	90.3	901
14	5.3	95.5	100.9	9.3	90.7	901
15	5.6	92.7	98.3	9.9	90.1	901
16	4.6	90.8	95.4	8.5	91.5	901
17	5.2	94.1	99.4	9.2	90.8	902
18	5.8	95.8	101.7	10.0	90.0	903
19	5.8	95.8	101.6	9.9	90.1	903
20	6.0	95.9	102.0	10.3	89.7	906
21	5.6	96.2	101.8	9.7	90.3	907
22	5.8	96.1	101.9	9.9	90.1	907
23	5.8	96.5	102.3	9.9	90.1	908
24	5.9	96.4	102.4	10.1	89.9	915

의 범위를 갖는 것으로 알려져 있다. 이들의 분류기준은 열수유체 및 광화원소의 주공급원이 관입암이어야 한다는 것이다. Morrison 등(1991)이 제시한 금은광상의 생성환경 분류에 따르면 조사구역내 금광상은 심부 환경에 해당되며 이는 심성암(화강암 또는 섬록암) 및 변성암을 모암으로 하는 전단대 및 열극부를 충진한 단순맥이라는 특징이 있다. 이와 같은 배경에서 금번 조사시 시추암편에서 채취한 금립에 대한 전자현미분석결과(Table 1 and Fig. 6), fineness가 848~915(평균 891)의 값을 보여 Fisher(1945)이 제시한 기준에 따르면 조사구역내 금광상은 중-심열수환경에서 생성되었음을 추정할 수 있다.

3.2. 유체포유물

유체포유물 실험연구는 광화작용과 관련된 광화유체

의 화학성분과 밀도, 광화작용시의 온도, 압력 등 광상 형성시의 직접적인 물리화학적 환경자료와 이를 이용한 간접적인 정보를 제공한다. 금번 조사시에는 광화작용과 관련된 열수용액의 온도, 조성 및 압력조건을 파악하기 위하여 조사구역내에서 채취한 5개의 석영맥 시료를 대상으로 실험을 실시하였다. 가열 및 냉각실험은 U.S.G.S/FLUID Inc사의 Gas-flow heating/freezing stage를 이용하였다. 측정오차범위는 가열실험과 CO<sub>2</sub> Clathrate(CO<sub>2</sub>:5.75H<sub>2</sub>O) 냉각실험시 각각 ±1.0°와 ±0.2°C이며 염농도는 Potter 등(1978)이 제시한 H<sub>2</sub>O-NaCl계의 연구결과와 Collins(1979)가 제시한 함CO<sub>2</sub>유체포유물에 대한 clathrate 용해온도에 기초하여 계산하였다.

조사구역내 맥상석영에서 산출되는 유체포유물은 상온에서 관찰되는 상의 종류와 충진도 및 냉각, 가열실험시 각상의 거동 등에 의거하여 액상우세 포유물(I형),

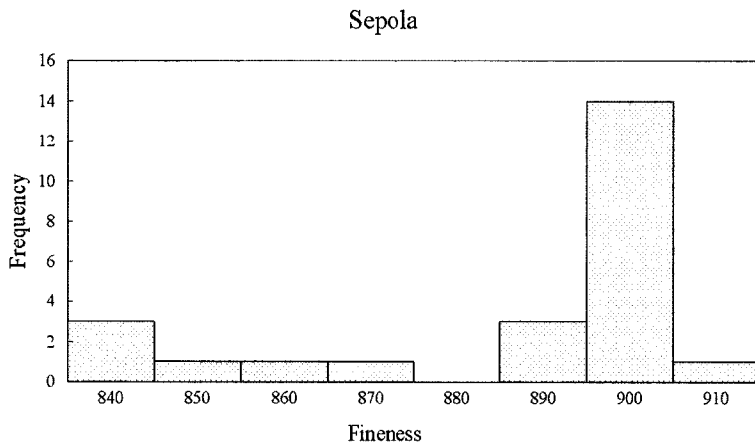


Fig. 6. Frequency diagram showing the fineness of gold grains occurred from the Sepola project area.

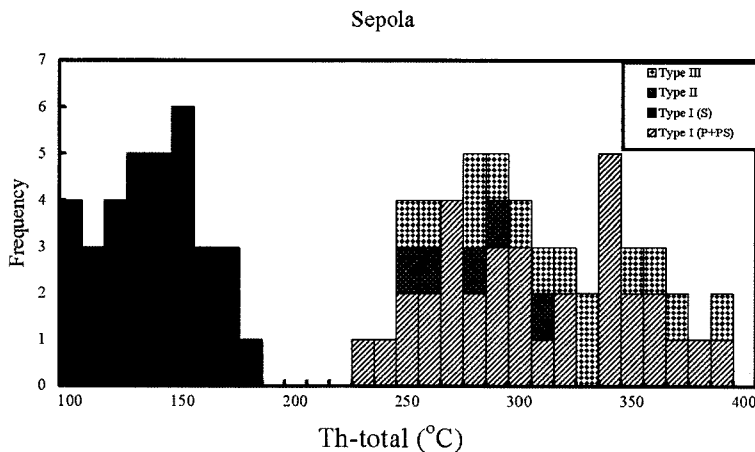


Fig. 7. Histogram of homogenization temperatures of fluid inclusions in quartz from the Sepola project area.

기상유체 포유물(II형) 및 액상함CO<sub>2</sub>포유물(III형)으로 분류된다. I형은 가장 흔한 형태이고 액상과 기상(10~35 vol.%)으로 구성되며 가열실험시 액상으로 균일화된다. 전체 부피의 70%이상을 차지하는 II형은 액상과 함께 기상이 유체포유물로 가열실험시 기상으로 균일화된다. 액상함CO<sub>2</sub>포유물인 III형은 석영맥내에 초생 및 가이차유체포유물로 산출되며 CO<sub>2</sub>-rich phase는 20~40 vol.%를 구성한다. CO<sub>2</sub>-rich phase는 냉각시 CO<sub>2</sub> clathrate를 이루며 가열시에서는 H<sub>2</sub>O-rich phase로 균일화된다. III형유체포유물의 최종융점온도는 -56.6~ -60.3°C(평균 -58.5°C)으로 나타나 CO<sub>2</sub>외에 CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>등도 함유되어 있을 것으로 추정된다. 이들을 대상으로 실시한 가열 및 냉각실험을 통해 초생 및 가이차 포유물(I형, II형 및 III형)의 균일화온도는 236~393°C범위를

보이며 NaCl상당 염농도는 0.0~8.6 wt.%이다. 석영맥 내 이차포유물의 균일화온도는 103~184°C, 염농도는 0.7~8.6 wt.%이다(Figs. 7 and 8). 유체포유물 실험을 통해 조사지역내 부존 금광상은 균일화온도와 염농도가 비교적 넓은 범위를 보여 여러시기에 걸쳐 열수활동이 진행되었음을 알 수 있다. 석영맥이 괴상을 보이고 광물수반양상이 단순한 점, 유화광물이 소량 함유되고 CO<sub>2</sub>함유 유체포유물이 산출되고 균일화온도가 높은 것등으로부터 조사구역내 함석석영맥의 광화작용은 중-심열수형 광상으로 구분된다. 열수유체의 균일화온도 및 염농도관계로부터 유체는 400~250°C범위에서의 압력감소에 의한 유체불혼합과정을 거친 것으로 추정된다. 이후 열수계에서는 지표 천수의 유입으로 희석 및 냉각과정이 이루어졌다(Fig. 9).

Sepola

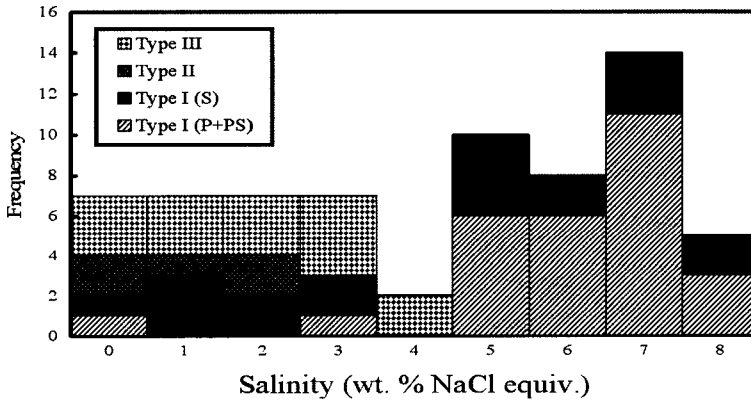


Fig. 8. Histogram of salinity of fluid inclusions in quartz from the Sepola project area.

Sepola

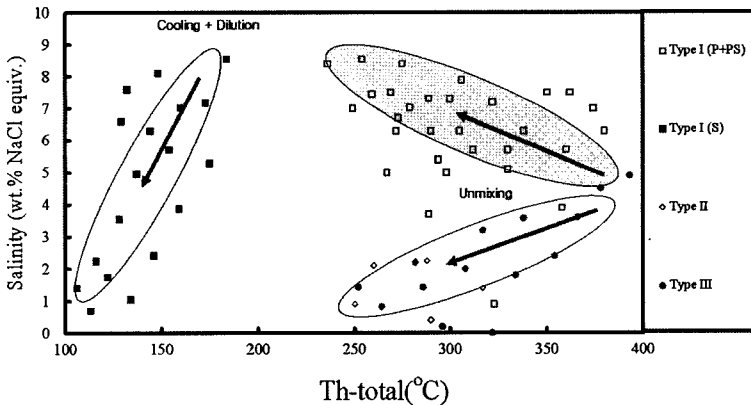


Fig. 9. Total homogenization temperature versus salinity diagram for the fluid inclusions in quartz from the Sepola project area.



#### 4. 결 론

지질구조측면에서 조사구역을 포함한 말리 서부 지역을 북서-남동방향으로 가로지르는 세네갈-말리 단층대 및 그와 관련된 2차구조가 광상을 배태시킬 수 있는 공간을 제공하였다. 세네갈-말리 단층대는 서부 아프리카지역에서의 조산운동에 의해 형성된 전단대로서 비리미안층을 모암으로 하여 형성된 이 지역일대에서의 금광상을 일차적으로 구조규제 한다. 바라니 구역은 세네갈-말리 단층대상에 위치하며 단층대와 평행하게 서측에 발달하는 단층선까지 이상대가 발달한다. 광구내에는 비리미안층을 후기에 관입한 화강암류와 염기성 화성암류가 각각 바라니 및 케니에고우루 구역 우측에 분포한다. 하지만 이들 화성암류는 광화작용과는 직접적인 관계는 없는 것으로 나타났다. 단지 바라니 구역에서는 관입에 의한 모암의 열극대 형성을 야기시킴으로써 광화대 배태에 좋은 구조적인 조건이 제공된 것으로 추측되기도 한다. 따라서 본역의 근원화성암은 지표상보다는 지하잠두체인 것으로 판단되며, 바라니 구역의 일부 시추공에서 확인되는 맥상의 화성암 관입체와 광화작용과의 관련성 여부는 추후 정밀조사가 요망된다. 조사구역에서 금광화작용은 시추암편에서 단일 석영맥 또는 석영세맥군에 수반되는 것으로 확인된다. 구조선을 따라 주입된 단일 석영맥의 경우 주향연장이 양호한 반면, 모암이 변질되고 석영-방해석 세맥군이 주입되어 있는 경우 연장발달이 양호하지 않다. 석영세맥군 및 변질대내 광화양상에 있어서 치밀질 석영세맥 인접부에서만 광화가 인지되는 정도이며 변질대에서는 별다른 징후가 관찰되지 않는다. 조사구역내 발달하는 단일 석영맥 및 석영세맥에 대한 유체포유물 실험을 통해 열수유체의 기원과 진화경로를 파악한 결과, 광화유체는 중-심열수환경에서 형성되었으며, 이는 금립에 대한 전자현미분석에 의한 순도의 범위가 심성환경으로 유추되는 것과 일치한다.

#### 사 사

본 연구는 한국지질자원연구원이 수행하고 있는 지식경제부 출연사업인 “해외광물자원 협력 및 기술정보

구축과제(09-1121)”에서 지원되었다. 세폴라 프로젝트의 지질 및 광상에 대한 현지조사 자료를 제공하여 주신 한국광물자원공사 자원개발본부 투자운영실 투자운영팀 심권용 부장님께 깊은 감사를 드립니다. 또한, 본 논문의 내용에 대해서 자세하게 지적을 해주시고 건설적인 제안을 해주신 충북대학교 최상훈 교수님과 익명의 심사위원님께 깊은 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

- Boyle, R.W. (1984) Gold deposits: their geology, geochemistry and origin, in *Gold '82: The geology, geochemistry and genesis of gold deposits*, (Foster, R.P., ed.), p. 183-189, A.A. Balkema, Rotterdam
- Collins, P.L.F. (1979) Gas hydrates in CO<sub>2</sub>-bearing fluid inclusions and the use of freezing data for estimation of salinity. *Economic Geology*, v. 74, p. 1435-1444.
- Direction Nationale de la Geologie et des Mines (2006) Liste classée des richesses en substances minérales et matériaux du sous-sol de République du Mali: Bamako, Mali, Direction Nationale de la Geologie et des Mines, 21p.
- Fisher, N.H. (1945) The fineness of gold with special reference to the Morobe goldfield, New Guinea. *Economic Geology*, v. 40, p. 537-563.
- Graton, L. C. (1933) The depth zones in ore deposition. *Economic Geology*, v. 40, p. 449-466.
- Kesse, G.O. (1985) The mineral and rock resources of Ghana. AA Balkema Rotterdam. 610p.
- Kusnir, I. (1999) Gold in Mali: *Acta Montanistica Slovaca*, no. 4, p. 311-318.
- Liegeois, J.P., Claessens, W., Camara, D. and Klerkx, J. (1991a) Short-lived Eburnian orogeny in southern Mali: Geology, tectonics, U-Pb and Rb-Sr geochronology. *Precambrian Research*, v. 50, p. 111-136
- Liegeois, J.P., Sauvage, J.F. and Black, R. (1991b) The Permo-Jurassic alkaline province of Tadhak, Mali: Geology, geochronology and tectonic significance. *Lithos*, v. 27, p. 95-105.
- Morrison, G.W., Rose, W.J. and Jaireth, S. (1991) Geological and geochemical controls on the silver content(fineness) of gold in gold-silver deposits. *Ore Geology Reviews*, v. 6, p. 333-364.
- Potter, R.W., III., Clynne, M.A. and Brown, K.L. (1978) Freezing point depression of aqueous sodium chloride solutions. *Economic Geology*, v. 73, p. 284-285.
- U. S. Central Intelligence Agency (2006) Mali, in *World factbook 2006* [http://www.theodora.com/wfb2006/mali/mali\\_people.html](http://www.theodora.com/wfb2006/mali/mali_people.html).

2009년 4월 7일 원고접수, 2009년 6월 14일 게재승인