

남극대륙의 메탈로제니와 금속광화작용에 대한 고찰

황 정 · 이종익 · 김예동

한국해양연구소 극지연구센터

A Review on Metallogeny and Metallic Mineralization in Antarctica

Jeong Hwang, Jong Ik Lee, Yeadong Kim

Polar Research Center, Korea Ocean Research and Development Institute,
Ansan P.O. Box 29, 425-600, Korea

요약: 지금까지 보고된 남극대륙의 지질과 금속광상 자료를 종합하면, 남극대륙의 광상구는 동쪽에서 서쪽으로 가면서 대체로 East Antarctic 광상구(시생대-원생대), Transantarctic 광상구(원생대-고생대), Andean 광상구(중생대-신생대)로 분류된다. 광상생성기는 남극대륙의 동부에서 서부로 가며 젊어진다. East Antarctic 광상구는 시생대와 원생대의 광상생성기를 갖는 호상 Fe-광층 광상구로서 Queen Maud Land에서 Wilkes Land에 걸쳐 분포한다. 이외에도 East Antarctic 광상구에서는 Fe-광맥 광상, 일반금속 및 귀금속 광상이 분포한다. Transantarctic 산맥을 따라 발달하는 Transantarctic 광상구의 생성기는 원생대말에서 고생대로서, 주로 Beacon 누층군에 배태된 Cu, Sn, REE 광상이 분포하는 Ross 광상구와 슈라기 중기의 충상 염기성 관입암체내 Fe, Cu, Co, Cr, Ni, Pt 광상이 배태된 Ferrar 광상구로 구성된다. 곤드와나 대륙을 복원하여 보면 Transantarctic 광상구는 호주의 Tasman Belt에 대비되므로 Tasman Belt에 밀집부존된 일반금속과 귀금속 광상이 Transantarctic 광상구에서도 추가적으로 발견될 가능성이 높다. 남극반도의 Marie Byrd Land에 걸쳐서 중생대와 신생대의 광상생성기를 갖는 Andean 광상구는 다수의 Cu-광상구와 소수의 Fe-광상구로 구성된다. Cu-광상구에는 백악기 및 제3기의 안데스형 관입암체와 관련된 Cu-Mo 반암광상과 열수광맥광상이 발달한다. Fe-광상구에서는 염기성 관입암체와 용암층에 마그마 기원의 Fe-광상이 발달한다. 곤드와나 대륙의 복원에서 남미 안데스 지역과 남극반도의 지질학적 유사성은 Andean 광상구내 대규모의 다양한 금속광상의 부존을 기대하게 한다. 제3기의 화산암에 안데스형 관입암체가 발달하는 남극반도의 서측해안과 남셰틀랜드 군도에는 경계성이 있는 반암광상의 발달 가능성이 매우 높은 것으로 추정된다.

주요어: 광상구, 금속광화작용, 안데스형 관입암체, 반암광상

Abstract: Compilation of informations on occurrence of metallic minerals known in Antarctica permits crude definition of metallogenic provinces, which are the East Antarctic, the Transantarctic, and the Andean metallogenic provinces from east to west. The East Antarctica is the oldest banded iron-formation province of Archean and Proterozoic age extending from Queen Mand Land to Wilkes Land. In this province, Fe-oxide veins, basemetal, and precious metal deposits have been reported. The Transantarctic metallogenic province consists of two subprovinces: a Ross subprovince of late Proterozoic to Paleozoic age containing Cu, Sn, REE deposits in the Beacon Supergroup and a Ferrar subprovince of middle Jurassic age containing Fe, Cu, Co, Cr, Ni, Pt in stratiform mafic intrusions such as the Dufek intrusion. Geologic similarities between the Transantarctic province and Tasman Belt of Australia coupled with Gondwana reconstruction indicate that the future discoveries of additional basemetal and precious metal deposits are possible. The Andean metallogenic province of Mesozoic and Cenozoic age extending from the Antarctic Peninsula to Marie Byrd Land consists of a broad copper subprovince and a minor iron subprovince. Copper subprovince contains Cu-Mo porphyry deposits

and hydrothermal veins which are closely associated with Cretaceous and Tertiary Andean plutons. Iron subprovince contains magmatic iron ores in mafic intrusions and lava flows. Geologic similarities between the Andes of South America and the Antarctic Peninsula, coupled with Gondwana reconstruction, indicate that large and numerous metallic mineral concentrations are predicted. The western parts of the Antarctic Peninsula and South Shetland Islands are expected to be the most promising metallogenic provinces.

Key words: metallogenic province, metal mineralization, Andean-type intrusion, porphyry type deposits.

서 론

현대는 폭발적인 인구증가와 급속한 산업발전으로 인한 광물자원의 수요가 급증하고 있어 장래에는 광물자원의 고갈이 우려되고 있다. 광물자원 고갈에 대한 대안으로서 남극대륙의 자원개발 가능성이 대두되어, 1970년대 후반부터는 남극대륙의 부존자원에 대한 학문적, 경제적 관심이 증대되고 있다. 남미, 인도, 호주, 아프리카는 Fe, Co-Ni-Cr-Pt, Cu-Mo-Sn-W, Pb-Zn, Au-Ag 등의 금속자원과 석탄이 풍부하게 매장되어 있는 세계적인 광물자원 산출지이다. 남극대륙은 이들 지역과 함께 곤드와나 대륙을 형성하고 있었던 바, 이들 대륙과 인접했던 남극대륙의 각 지역에서도 이와 유사한 광물자원의 부존이 예상되고 있다(Fig. 1).

남극대륙의 자원개발에는 많은 환경적, 기술적 그리고 정책적 제한요인이 있다. 남극대륙은 기후조건이 매우 혹독하고 전 지역의 98%가 빙하로 덮혀있어 조사활동, 개발시설의 건설 및 운영에 많은 제약이 수반된다. 또한 광물자원의 본격적인 개발에는 대규모의 에너지가 필요한데 아직은 남극대륙에서의 적절한 에너지 공급원에 대한 연구는 없다. 이러한 제한요인 때문에 남극대륙에 부존된 Dufek 관입암체의 Pt를 회수하는데 필요한 생산단가는 미국내 동일한 광상에서의 Pt 생산단가의 3배 이상이 소요될 것으로 보고되었다(Elliot, 1977). 따라서 현재로서는 남극대륙에서 개발가능한 광상은 대규모 광상이거나 고품위 광상이어야만 하고, 다른 대륙에서와 유사한 조건의 광상인 경우에

는 세계 자원시장의 붕괴나 전략자원의 고갈에 따른 자원가격의 급속한 상승이 있을 때만 경제적인 개발이 가능하다.

이러한 제한요인으로 인해 남극에 대한 지금까지의 연구는 순수한 학문적 입장에서의 지질학적 및 지구물리학적 연구가 주종을 이루어 왔다. 남극에 대한 지질학적 연구는 주로 암석과 퇴적물을 대상으로 한 것이며, 이러한 과정에서 광물자원의 산출에 관한 많은 보고가 있었다(Smith, 1972; Wright and Williams, 1974; Rowley and Williams, 1979; Rowley and Pride, 1982; Spletstoesser, 1983). 그러나 광화대나 변질대의 특성과 유형, 그리고 이들의 성인에 관한 자세한 연구는 아직 많지 않으며, 시추에 의한 광화대의 심부발달 연구는 아직 전혀 없다.

우리나라는 1988년 킹조지섬에 세종기지를 설치한 이후 남쉐틀랜드 군도의 지체구조 발달사를 규명하기 위한 지질학적, 지구물리학적 연구를 시작하여 현재까지 많은 성과를 얻고 있다. 남극대륙 곳곳에는 수많은 금속광상이 분포하고 있는 것으로 보고되고 있지만, 대부분의 지역에서 아직 그 경제성은 불투명하다. 그러나 남쉐틀랜드 군도의 일부 광화대에서의 금속 함유률은 주목할만 하여 그 잠재적 경제성이 높ی 평가되고 있어(Rowley and Pride, 1982), 이 일대 광화대에 대한 정밀한 탐사가 요구되고 있다. 이에 극지연구센터에서는 King George섬 Barton반도의 열수변질대에 대한 연구(Park, 1991)를 시작으로 남쉐틀랜드 군도의 광화대에 대한 지구화학적, 광상학적 연구를 시도하고 있다. 본 연구는 지금까지 보고된 남

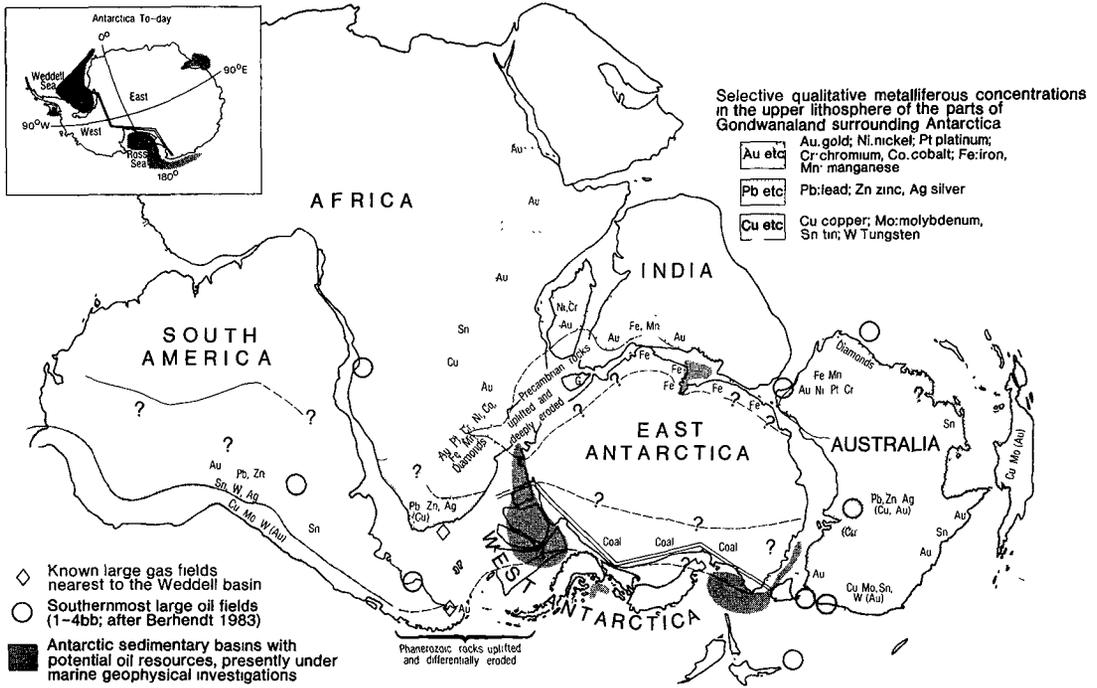


Fig. 1. Gondwanaland reconstruction of the southern continents before initial breakup in Jurassic and Cretaceous. Numerous metalliferous resources occurred in crustal areas around Antarctica (After De Wit, 1985).

극에서의 금속광물자원 산출과 분포를 남극반도 지역을 중심으로 요약·정리하여 이지역 광화작용 연구의 지침수립에 기초자료로 활용하고자 한다.

지질개요

Craddock(1982), Rowley(1983) 등에 의해 정리된 남극의 광역지질은 지질과 지형의 차이에 있어 Transantarctic 산맥을 중심으로 동남극과 서남극으로 나누어진다.

동남극은 선캄브리아 순상지로서 주로 원생대와 시생대초의 기반암으로 구성되며, Transantarctic 산맥일대는 원생대와 고생대초의 퇴적암, 변성암, 화성암으로 구성되어 있다. 이들 암층은 원생대말과 고생대초의 변형작용과 화성활동에 의해 변형되거나 관입되어 있다. 동남극의 화성암과 변성암들은 고생대말에서 중생대초의 Beacon 누층군과 Ferrar 층군의

퇴적암과 화산암에 의해 부분적으로 부정합으로 피복된다.

서남극은 동남극에 비해 상대적으로 젊은 연령의 암층들로 구성되어 있다. 이 지역은 Ellsworth Mountain, Ellsworth Land, Marie Byrd Land를 포함하는 Ellsworth 지역과 남극반도로 나누어진다. Ellsworth 지역은 주로 고생대의 쇠설성 암층들로 구성되어 있으며, 남극반도는 고생대초(?)의 기반암, 석탄기와 삼첩기의 퇴적암층, 중생대와 신생대의 퇴적암층 및 화산암층으로 구성되어 있다. 남극반도에는 대륙지각 아래로 Phoenix plate(Barker, 1982)가 섭입하는 동안 생성된 칼크 알칼리 계열의 화성암체가 쥐라기초에서 제3기에 걸쳐서 암주 혹은 저반상으로 관입하였다. 남극반도와 남미 안데스 지역은 모두 환태평양 조산대 지역에 해당되며, 많은 연구자들에 의해 두 지역간의 지질학적 및 판구조적 환경의 유사성이 지적되어 왔다(Dalziel and Elliot, 1973; Wright and Williams,

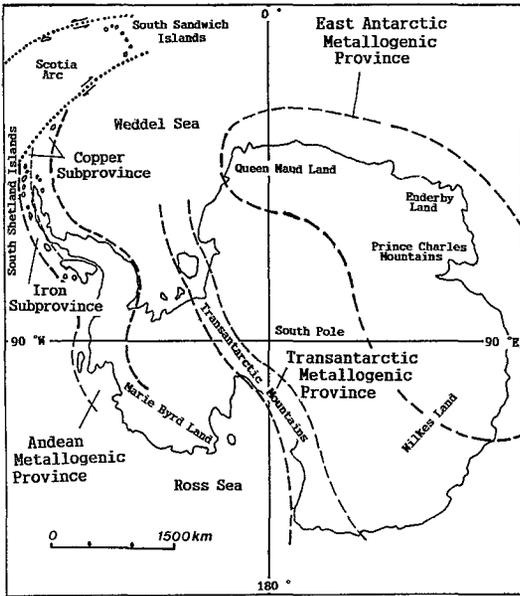


Fig. 2. Map of Antarctica showing metallogenic provinces (dashed line boundaries). Submarine fracture zones in the Scotia Arc marked by dotted line (after Rowley *et al.*, 1983).

1974; Ericksen, 1976). 이들 두지역은 중생대와 신생대 초기에는 같은 화성활동대에 속해 있었으며, 이후 신생대의 Scotia Arc 발달로 분리되었다(Fig. 2). 이때문에 남극반도에 분포하는 중생대와 제3기의 관입 화성암체를 Andean pluton이라 부른다.

남극의 메탈로제니

남극대륙과 인접했던 곤드와나 대륙들에서의 다양한 광상분포와 이들 중 경제성이 높은 광상이 일부 부존한다는 사실은 남극대륙에서도 이와 유사한 광상이 부존할 수 있다는 가능성을 시사한다. 이 지역에 대해 이미 연구한 연구자들의 연구결과를 종합하면 남극대륙의 광상생성구는 East Antarctic 광상구, Transantarctic 광상구, Andean 광상구로 분류된다(Fig. 2).

East Antarctic 광상구

동남극은 대부분이 빙하로 덮혀있어 이 지역에 관한 자료가 부족하나 기반암의 노출이

양호한 해안지역에서는 호상 Fe-광층의 분포가 우세하여 호상 Fe-광층 광상구로 분류된다. 광상생성기는 시생대와 원생대이며 일부 현생대인 경우도 있을 것으로 추정된다(Rowley *et al.*, 1983). 호상 Fe-광층 광상구는 Wilkes Land에서 Queen Maud Land에 이르는 지역으로서 세계 각 지역의 순상지에서 일반적으로 발달하는 슈페리오형과 알고마형의 호상 Fe-광층이 발달한다. 이 지역의 호상 Fe-광층은 생성연령과 암상이 불균질하기 때문에 다른 대륙의 호상 Fe-광층과 직접 대비하기는 어렵지만, 대체로 동남극 Enderby Land의 것은 인도의 호상 Fe-광층에, 그리고 Wilkes Land의 것은 호주 서부의 호상 Fe-광층과 대비된다. 특히 호주 서부에는 호상 Fe-광층 이외에도 Pt, Cr, Ni-광상과 퇴적기원의 Au-광상이 발달하고 있어 Wilkes Land에서도 이와 유사한 광상의 존재가 기대되고 있다. 동남극 Prince Charles Mountains 지역의 호상 Fe-광층은 두께가 400m에 달하며, 항공자력탐사 결과 폭이 각각 약 5km, 10km인 두 평행광체가 120km, 180km의 연장성을 가지고 병하아래로 발달하고 있음이 보고되었다(Ravich *et al.*, 1982). 이외에도 호상 Fe-광층의 존재가 많은 지역에서 보고되고 있으며, 특히 Wilkes Land 지역에서는 이차 Cu-광물, Mn-산화물, Ba-광물의 산출도 보고되고 있어 Fe-광상 이외에 금속광상의 존재가 기대되고 있다(Lovering and Plimer, 1983).

동남극의 Queen Maud Land에는 Fe-광맥 광상이 발달한다. 이 지역에는 시생대의 석영-자철석 광맥과 원생대말의 charnockitic intrusion과의 접촉부에서 석류석-휘석-자철석의 광맥과 망상의 Fe-세맥이 발달하는데, 이들 광맥은 호상 Fe-광층의 Fe가 신기의 심성암체에 의해 재이동되어 생성된 것으로 추정된다. 이 지역은 Fe-광맥 광상 이외에도 Fe-, Cu-, Pb-황화광물의 존재도 보고되고 있어(Neethling, 1969), 또다른 금속 광상구의 존재가 예상되고 있다. 이는 동남극의 Queen Maud Land와 접촉해 있던 남아프리카의 동부 순상지에서 시생대와 원생대의 호상 Fe-광층, 일반금속광상, 귀금속광상이 밀집

분포 한다는 사실(Kroner, 1977)과 잘 부합된다.

Transantarctic 광상구

Transantarctic 산맥으로부터 명명된 Transantarctic 광상구는 고생대 초기와 중생대 중기에 속하는 광상들로 구성된 광상구로서 동남부의 Ross 광상구와 서북부의 Ferrar 광상구로 세분된다(Rowley *et al.*, 1983).

Ross 광상구는 고생대의 변형작용 및 화성활동과 관련된 광화대로서 이 시기 화강암체의 연변부나 페그마타이트, 그리고 이들 암체와 접촉하는 고생대의 Beacon 누층군에서 Cu-황화광물, 이차 Cu-광물, Bi-, Li-광물 등이 산출된다. 또한 Beacon 누층군의 사암에서 Sn과 REE를 포함하는 중광물이 산출된다. 호주의 Tasman Belt에는 고생대초의 화산암류와 고생대초-중기의 화강암체와 관련된 Au, Cu, Ag, As, Pb, Zn, Mo, Bi, Sn, W, Sb 광상이 분포하고 있어, 이와 대비되는 Ross 광상구의 Victoria Land에서도 이들 광상의 부존이 예상되고 있다(Wright and Williams, 1974; Rowley *et al.*, 1983).

Ferrar 광상구는 중생대 중기의 Ferrar 층군으로 명명된 층상의 염기성 복합암체와 관련된 광화대이다. 특히 Pensacola 산맥의 Dufek intrusion은 남아프리카의 Bushveld Complex 다음의 세계적인 대규모 염기성 복합암체이다. Bushveld Complex에서는 경제성이 가장 높은 Pt, Ti, V, Cr 원소들이 산출된다. Dufek intrusion에서도 Fe-Ti 산화광물, Fe-Cu 황화광물의 산출과 Co, Cr, V, Pt 등이 미량산출 되고 있음이 보고되어 있다. Dufek intrusion은 암체의 두께가 7km에 달하는 것으로 추정되고 있으나, 현재는 이 암체의 최상부 일부분만 노출되어 있다. 따라서, 이 암체의 하부에는 경제성이 있는 Cr, Ni, Pt, Co, V, Fe가 농집되어 있을 것으로 추정되고 있다(Ford *et al.*, 1983).

Andean 광상구

남극반도와 Ellsworth Land 동부지역에는 중생대와 신생대의 칼크 알칼리 화성활동과 성인적 관련을 갖는 광화대가 분포하는데, 이 광화

대는 남미 안데스 광상구의 남측 연장부라는 의미에서 Andean 광상구로 명명되었다(Ericksen, 1976). Andean 광상구는 우세하게 산출되는 광물종에 따라 Cu-광상구와 Fe-광상구로 분류될 수 있다.

Cu-광상구내 대부분의 광상에서는 Cu와 Fe의 산화광물과 황화광물이 우세하게 산출되며, Mo-, Pb-, Zn-, Ag- 광물도 수반된다(Rowley *et al.*, 1983). Cu-광상구는 남극반도와 남셰틀랜드 군도의 화성활동대를 따라 발달하므로, 남극반도와 Ellsworth Land 동부지역 전체를 따라 분포한다. 남극반도의 Cu-광상구에서 경제성이 기대되는 Cu-광상은 남극반도와는 단층작용으로 분리된 남셰틀랜드 군도의 북부지역에 발달하는데, 대표적인 Cu-광물 산출지는 남셰틀랜드 군도의 King George섬과 Livingston섬, 그리고 Anvers섬 일대이다.

Fe-광상구의 광상에서는 자철석과 황철석이 우세하게 산출되며 적철석과 갈철석이 수반된다(Vieira *et al.*, 1982). Fe-광물의 대표적인 산출지는 플라이스토세의 염기성 용암층내에 Fe-광체가 배태된 Brabant섬과 중생대 혹은 신생대의 층상 반려암내 Fe-광물이 배태된 Argentine 섬이다. 이외에 남셰틀랜드 군도의 Gibbs섬에서는 초염기성 심성암체내에 층상과 광염상의 크롬철석이 산출된다. 남미 안데스 광상구의 Cu-광화대는 Fe, Sn, Mo, W, Au, Ag, Pb, Zn 등의 다금속 광상을 수반하며, 이들 광물의 상대적 산출량에 따른 광상의 광역대상분포가 발달한다(Sillitoe, 1972). 남극의 Andean 광상구에서는 Cu-광상구와 Fe-광상구가 중첩되어 발달하기 때문에, 현재까지의 자료로서는 두 광상구 간의 경계는 아직 불명하다. Andean 광상구의 일부지역에서는 미량의 Au와 Sn-광물의 산출이 보고되어 있지만(Knowles, 1945; Bell, 1973), Au-광상이나 Sn-광상의 존재는 아직 보고되지 않았다.

Marie Byrd Land와 Ellsworth Land 서부지역에서는 아직 광상의 존재가 많이 보고되지 않았다. 칠레 남부에서는 남동방향의 칠레해령이 남미대륙 아래로 섭입하고 있다(Fig. 3). 그 결과 페루북부에서 칠레북부에 이르는 중북부 안

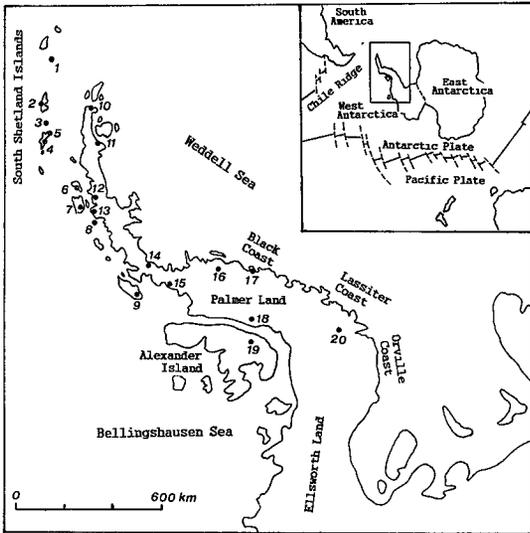


Fig. 3. Map showing numbered localities of mineral occurrences in Antarctic Peninsula region (Rowley and Pride, 1982).

데스 지역은 아직도 해양지각의 섭입이 진행 중인 반면, Scotia Arc를 제외한 남부 안데스 지역과 남극반도에서는 제3기말에 섭입활동이 중지된 것으로 추정된다(Herron and Tucholke, 1976). 따라서 이 지역에서의 금속광상 분포가 남극반도에 비해 훨씬 적은 원인이 남극반도에서 보다 더 조기의 섭입활동 중지 때문인 것으로 추정된다(Wade, 1976).

남극반도의 금속광화작용

남극반도는 남극대륙에서 주로 중생대와 신생대에 걸쳐 가장 왕성한 화성활동이 있었던 지역으로서, 이들 화성활동과 관련된 수많은 광상이 남극반도에 발달한다. 지금까지 보고된 금속광상중 대표적인 광상의 분포와 특성은 Fig. 3 및 Table 1과 같다. 이들 광상은 중생대와 신생대의 심성암체 내부나 그 연변에서 맥상, 광염상으로 발달하며, 특히 남쉐틀랜드 군도에서는 광범위한 열수변질대와 단층에 규제된 광화대가 발달한다. 산출되는 맥석광물은 주로 석영과 탄산염 광물이며, Bowman해안(14) 지역에서는 형석이 산출된다. 이들 광상에서 공통적으로 산출되는 광석광물은 황철석,

황동석, 자철석, 적철석 등이며, 섭아연석과 방연석은 King George섬(2), Livingston섬 남부(4), Anvers섬(7), Danco해안(12) 지역에서, 휘수연석은 Livingston섬 북부(5), Anvers섬(7), Argentine섬(8), Adelaide섬(9), Marguerite섬(15), Lassiter해안(20) 지역에서 특징적으로 산출된다. 석석은 Adelaide섬(9), Alexander섬(19)에서 산출되며, King George섬(2), Danco해안(12) 지역에서는 은광물의 산출이 보고되어 있다. 일부지역에서는 황철석, 황동석, 석영맥을 화학분석한 결과 미량의 Au, Ag 검출이 보고된 바가 있다. Gibbs섬(1)에서는 염기성 관입암체내 크롬철석과 Ni, Co가 산출된다(De Wit et al., 1977). 이상의 산출광물 구성으로 볼때 Gibbs 섬의 광상은 Cr-광상, Brabant섬과 Argentine섬의 일부광상은 Fe-광상으로서, 이들은 마그마 분화광상에 해당된다. 나머지 지역 대부분의 광상은 열수기원의 Cu-Mo 광상이며 부분적으로 Fe, Sn, Pb-Zn이 수반된다.

광상과 성인적 관련이 깊을 것으로 추정되는 관입암체들은 중생대에서 신생대에 걸친 여러 번의 관입시기를 가지며, 주로 섬록암에서 화강암의 조성을 갖는 복합암체들이다. 남극반도에 분포하는 이들 관입암체의 생성연령은 주로 중생대의 백악기인데 반해서, 남쉐틀랜드 군도에서는 주로 제3기의 에오세이다(Table 1). 남쉐틀랜드 군도에서는 광화작용과 관련된 열수변질대가 특히 잘 발달하는데, 이는 이 지역의 광화작용이 대부분 신기의 관입암체와 관련이 있기 때문인 것으로 보인다. 그러나 직접적인 광상생성 연령에 관한 보고는 아직 없다.

남극반도는 세계적인 광물자원 산지인 남미의 안데스 광상구와 지질학적, 판구조적 환경이 유사하여 Cu, Mo, Sn, W, Pb, Zn 광물자원이 부존되어 있을 것으로 추정된다. 남미 안데스 광상구에는 중생대와 신생대의 Andean pluton의 내부나 연변에서 대규모 Cu-Mo 반암광상이 발달하고 있다. 남미 안데스 광상구의 Andean pluton은 여러 번의 관입시기를 갖는 칼크-알카리 계열의 섬록암질 내지는 화강암질 암석으로서 반상조직이나 반자형의 입상조직을 갖는다. 이들 관입암체와 주변 모암은 열수변질되어 관

Table 1. Summary of the published informations on the mineralized and hydrothermally altered zones in the Antarctic Peninsula.

site no.	location	minerals & elements	type	associated pluton	age of pluton	reference
1	Gibbs Is.	chromite, Ni, Co, asbestos	diss, layer	dunite	Paleozoic to Mesozoic	Dalziel and Elliot(1973), De Wit et al.(1977)
2	King George Is.	py, cp, sl, gn, Ag, mt, hm, qz, cal	alt, vein, diss, brca	granodiorite	53-46 Ma	Littlefair (1978), B.A.S. (1979), Park(1991)
3	Greenwich Is.	cp, mt, qz, cal, ank, bar	vein	dike	Mesozoic	Caminos et al(1973)
4	South Livingston Is.	py, cp, cv, bn, tt, sl, gn, hm, qz, cal	alt, vein	tonalite	53 Ma	Cox et al.(1973), B.A.S. (1979)
5	North Livingston Is.	py, cp, sl, mo, qz	alt, vein	granodiorite	39 Ma	Pride et al.(1981), Dalziel and Elliot(1973)
6	Brabant Is.	mt, hm, mat	layer	lava flow	Pleistocene	Vieira et al.(1982)
7	Anvers Is.	py, cp, bn, sl, gn, asp, mo, mt, qz	alt, vein, diss	gabbro-granodiorite	54-45 Ma 34-20 Ma	Pride et al.(1981), B.A.S.(1982)
8	Argentine Is.	py, po, cp, mt, hm, mo, qz	alt, vein, diss, layer	gabbro-granodiorite	58-54 Ma	Hawkes and Littlefair (1981), Rex(1976)
9	Adelaide Is.	py, hm, mt, cass, mo	alt, vein, diss	gabbro-granodiorite	137-128 Ma 62-60 Ma	Rex(1976), B.A.S.(1982), Pankhurst(1982)
10	Trinity Peninsula	py, cp, tom, qz	vein	diorite	392-358 Ma	Rex(1976), B.A.S.(1979),
11	Trinity Peninsula	py, qz	vein	granite	174-139 Ma	Rex(1976), B.A.S.(1979),
12	Danco Coast	py, cp, sl, gn, Ag, qz, cal	alt, vein, diss	granite	96 Ma	West(1974), B.A.S.(1979)
13	Graham Coast	py, cp, po,	alt, vein, diss	granodiorite	93 Ma	B.A.S.(1981), Pankhurst(1982)
14	Bowman Coast	py, cp, bn, fl, qz	vein	granite	209-174 Ma	Rex(1976), Pankhurst(1982)
15	Marguerite Bay	py, cp, mt, mo, qz, Au, Ag	vein, brca	Andean pluton	119-67 Ma	Rex(1976), B.A.S.(1981), Pankhurst(1982)
16	Wilkins Coast	cp, Au, Ag,	vein	pegmatite	-	Knowles(1945)
17	Cape Boggs	py, cp, Au, Ag	diss	hornblendite	-	Knowles(1945)
18	Batterbee Mt.	Cu, Fe	diss	Andean pluton	137-128 Ma	Rex(1976), B.A.S.(1982)
19	Alexander Is.	py, hm, mt, cass	alt	diorite	-	Bell(1973)
20	Lassiter Coast	py, cp, mt, hm, mo	alt, diss, vein, stow	granodiorite qz-monzonite	105 Ma 95 Ma	Rowley et al(1975)

Abbreviations; alt=hydrothermally altered rock, diss=disseminated, brca=breccia, stow=stockworks, py=pyrite, po=pyrrhotite, asp=arsenopyrite, cp=chalcopyrite, cv=covellite, bn=bornite, mo=molybdenite, gn=galena, sl=sphalerite, hm=hematite, mt=magnetite, mat=martite, cass=cassiterite, qz=quartz, cal=calcite, ank=ankerite, fl=fluorite, tom=tourmaline, bar=barite, Is.=island, B.A.S.=British Antarctic Survey. Sites numbered from the Antarctic peninsula on Figure 3.

입암체에서 외곽으로 가면서 칼륨 변질대, 필릭 변질대, 점토질 변질대, 강점토질 변질대 등의 열수변질 대상분포가 발달한다. 광화대에서는 황철석, 황동석, 반동석, 휘수연석 등이 광염상 혹은 망상세맥상으로 산출되며, 주변 변질대에서는 Au 및 Ag 원소를 미량 포함하는 섬아연석, 방연석이 맥상이나 세맥상으로 산출된다(Lowell and Guilbert, 1970). 남셰틀랜드 군도의 Livingston섬 북부(5), Argentine섬(8), Adelaide섬(9) 지역과 남극반도의 Lassiter 해안 지역(20)에서는 관입암체, 변질대, 광상유형, 광물 공생군과 산출상태 등의 특성이 전술한 일반적인 Cu-Mo 반암광상의 특성을 보인다. 그러나 이 지역은 남미 안데스 지역에 비하여 관입암체가 저반상으로 산출되며, 황동석보다 휘수연석이 그리고 황철석 보다는 자철석이 더 우세하게 산출되는 특성을 보인다. 이는 이 지역의 Cu-Mo 반암광상의 대부분이 침식되어 현재는 이들 광상의 하부 부분만 일부 남아 있음을 의미하는 것으로 추정된다(Rowley et al., 1975; Hawkes and Littlefair, 1981). 따라서, 경제성 있는 반암광상은 제3기 화산암에 신기의 화성암체가 관입되어 있어 침식수준이 상대적으로 낮을 것으로 추정되는 남셰틀랜드 군도의 King George섬(2), Greenwich섬(3), Livingston섬 남부(4) 지역 광화대에 존재할 가능성이 높다. 남셰틀랜드 군도의 여러 광화대에 대한 자료 부족으로 이 일대의 광상이 반암광상, 혹은 반암동 광화작용과 관련된 다금속 맥상광상인지의 여부는 아직 불명하다. 그러나 남셰틀랜드 군도의 광상들은 Cu-Mo 반암광상의 상부일 것으로 추정되고 있으며, 이 지역이 반암광상의 부존에 가장 적합한 지질환경 지역으로 추정되고 있다.

Sillitoe(1972)를 비롯한 많은 연구자들에 의하면 남미 안데스 광상구에서는 서측 해안에서 동측으로 Fe, Cu-Mo-(Au), Pb-Zn-Ag 순서의 광역 대상분포가 발달한다. 남극의 안데스 광상구에서는 대부분 Cu-광상이 발달하지만 그 서측의 남셰틀랜드 군도에서는 Fe-광상도 분포한다. 콘드와나 형성시 남극반도가 남미대륙 남단의 동측에 위치 했었는지 혹은 서측에 위치

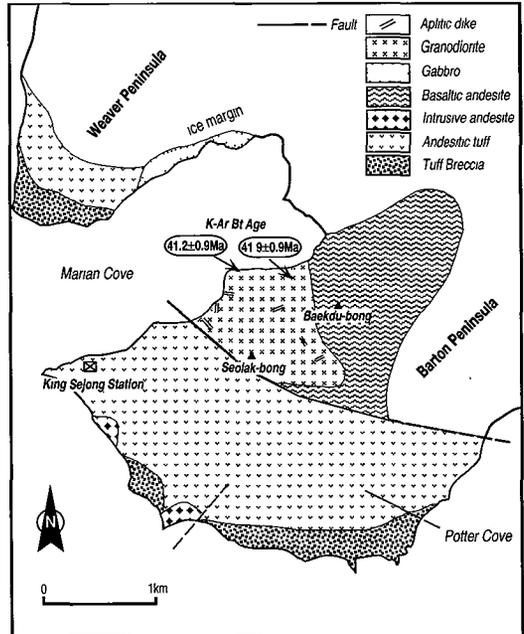


Fig. 4. Geologic map of the Barton Peninsula, King George Island, Antarctica (Lee et al., 1994).

했었는지에 관한 논란이 일부 있지만, 남극반도에서도 남미에서와 같은 광상의 광역 대상분포가 발달해 있을 가능성이 있다. 따라서, 남극반도에서는 Cu-Mo 반암광상 이외에도 Pb-Zn-Ag를 포함하는 다금속 광상의 부존가능성이 예상되며, Andean pluton과 관련된 접촉 교대광상이나 호상열도 화성활동과 관련된 피상 유화 광상의 부존 가능성도 예상된다.

King George섬 Barton반도의 금속광화작용

King George섬 Barton반도에는 신생대 초기에 분출한 다양한 화산암류와 이에 수반된 화산성 쇄설암류 그리고 이들을 관입한 화강암류가 분포한다(Fig. 4). 화강암류는 화산암류와 관입접촉 내지 단층접촉하는 세립질 - 중립질의 화강섬록암으로 대표되며, 암체의 곳곳에서는 반화강암맥이 관입하였다. 화강섬록암과 반화강암맥내에는 마이아를리틱 정동이 발달한다 (이 등, 1994). 화강섬록암과 이 암체를 중심으로 한 주변 화산암류에서는 광범위한 프로필리틱

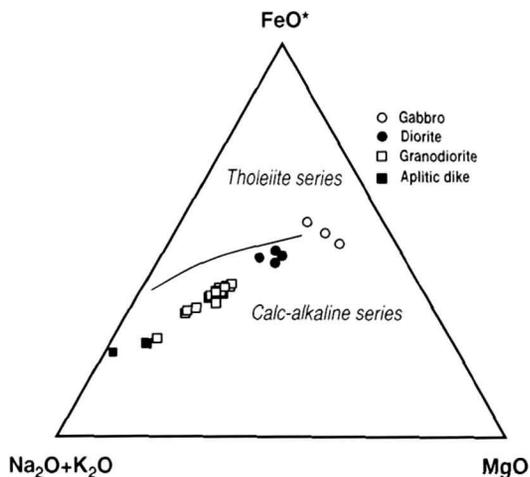


Fig. 5. AFM diagram of granitic rocks in the Barton Peninsula. The granitic rocks show good differentiation trend of calc-alkaline series.

변질대가 발달하며, 화산암류내 발달된 균열대 주변에서는 소규모의 필릭 및 점토질 변질대, 강점토질 변질대가 발달한다. 화산암류내 프로 필리틱 변질대에서는 황철석-황동석-자철석 세 맥과 산점상의 황철석이 산출된다. 균열대에 규제된 견운모 및 점토질 변질대에는 Pb-Zn 석영맥이 발달하며, 강점토질 변질대에서는 황철석-자연황 석영맥이 발달한다.

Barton반도의 열수변질작용 및 광화작용의 성인에 대하여는 King George섬 지하에 발달되어 있을 것으로 추정되는 반암광상과의 성인적 관련성(Littlefair, 1978; Hawkes, 1982), 반암광상은 아니지만 Barton반도에 관한 화강암류와 관련된 마그마와의 성인적 관련성(Cox, 1981), Barton반도에 관한 화강암류와 관련된 화산성 또는 천열수성 광상과의 성인적 관련성(Willan, 1987) 등이 있다. 현재까지 화산암류내 발달된 열수변질대중 균열대 주변에서 소규모로 발달하는 견운모 및 강점토질 변질대의 석영맥을 중심으로 한 광화대연구는 일부 있으나(Park, 1991; So et al., 1995), Barton반도의 화강암류와 열수변질대내 광화대간의 성인적 관련성에 관한 연구는 아직 없다. Barton반도 화강암류와 광화작용간의 관련성에 대한 현재까지의 예비적 연구결과, 이들 화강암류는 칼크-알

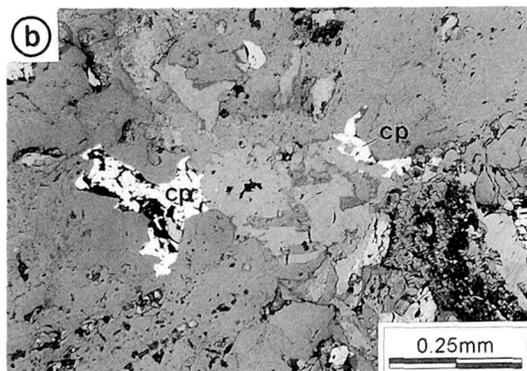
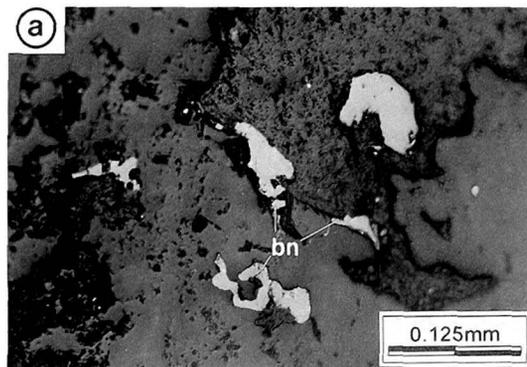


Fig. 6. Photomicrographs in reflected light show the occurrence of disseminated bornites(bn) and chalcopyrites(cp) in granitic rocks of the Barton Peninsula. Disseminated chalcopyrites are ubiquitous in hydrothermally altered granitic rock.

칼리 계열의 천소관입 암상이며(Fig. 5), 높은 Cu 이상치를 보이며(Table. 2), 암체내에서 황동석, 반동석 등의 Cu-광물이 산점상으로 산출되는(Fig. 6) 특성을 보인다. 따라서 Barton반도에는 이들 화강암류에 의한 반암광상의 발달 가능성과 주변 열수변질 광화대의 관계 화성암일 가능성이 매우 높은 것으로 추정된다. 따라서 Barton반도 광화대의 성인규명을 위해서는 화강암류와 열수변질대에 대한 자세한 지구화학적 - 광상학적 연구가 필요하다.

결론

남극대륙의 금속광상구는 East Antarctic 광상구, Transantarctic 광상구, Andean 광상구로 분류된다. 이들 광상구내 금속광상의 분포는 이

Table 2. Metal element abundances in granitic rocks from the Barton Peninsula and average abundances previously reported for the common rock types (Jin, 1988). Copper is anomalous element in granitic rock of the Barton Peninsula. All the elements are represented in ppm.

Rock type	Sample No.	Cu	Pb	Zn	Mo
Diorite	Di-1	102	11	143	1
	Di-2	135	11	114	3
	Di-3	343	13	148	3
	Di-4	524	10	212	2
Grano-diorite	Gd-1	124	11	99	2
	Gd-2	429	8	77	3
	Gd-3	222	25	116	4
	Gd-4	269	10	124	3
	Gd-5	182	12	70	4
	Gd-6	273	9	67	2
	Gd-7	135	15	87	2
	Gd-8	176	12	107	3
	Gd-9	146	23	98	2
	Gd-10	113	10	75	3
	Gd-11	102	6	61	1
	Gd-12	119	10	79	4
	Gd-13	161	24	138	4
	Gd-14	123	6	42	2
	Gd-15	116	10	101	2
	Gd-16	135	10	111	2
	Gd-17	137	10	96	1
Aplite	Ap-1	167	50	83	4
	Ap-2	137	12	116	3
Average of Barton	Diorite	276	11	154	2
	Grano-diorite	174	12	91	3
	Aplite	152	31	100	4
Average of World	Normal Diorite	40	12	75	1
	Normal Granite	10	20	40	1-2

지역과 인접했던 곤드와나 대륙에서의 광상분포와 유사하다. 현재까지 확인된 금속광상의 대부분은 다른 곤드와나 대륙에서의 광상들에 비해 상대적으로 규모가 작고, 분포 빈도도 적다. 그러나 일부의 광상은, 만약 이 광상이 남

극이 아닌 다른 대륙에 부존되었다면, 경제성이 매우 높은 광상들도 있다. 특히 East Antarctic 광상구의 Prince Charles Mountains 지역의 호상 Fe-광층과 남셰틀랜드 군도의 Cu-광상은 국제경제나 정치환경의 급속한 변화시에는 개발 가능성이 높은 잠재적 자원으로 평가될 수 있다. 남극에 대한 좀 더 자세하고 지속적인 광상학적 그리고 지구화학적 연구가 계속 수행되면 남극에서 대규모 광상이나 새로운 광상의 발견 가능성이 매우 높다. 이를 위해서는 곤드와나 대륙에 분포하는 광상의 분포와 산출 상태, 대상분포, 성인 등을 고찰하고 이를 남극의 광상구에 적용하는 광상연구 지침이 수립되어야 한다.

참고문헌

- 이종익, 전희영, 김현철, 1994. 킹조지섬 바톤반도 및 위버반도에 분포하는 화강암류에 대한 기재 암석학적 연구. 남극과학기지주변 환경조사, 과학기술처, BSPN 00221-702-7:67-97.
- Barker, P.F., 1982. The Cenozoic subduction history of the Pacific margin of the Antarctic Peninsula: ridge crest-trench interactions. *Journal of the Geological Society of London*, **139**: 787-801.
- Bell, C.M., 1973. The geology of southern Alexander Island. *British Antarctic Survey Bulletin*, **33-34**: 1-16.
- British Antarctic Survey, 1979. British Antarctic Territory geological map, northern Graham Land and South Shetland Islands. British Antarctic Survey Series 500G, Sheet 2, scale 1:500000
- British Antarctic Survey, 1981. British Antarctic Territory geological map, southern Graham Land. British Antarctic Survey Series 500G, Sheet 3, scale 1:500000
- British Antarctic Survey, 1982. British Antarctic Territory geological map, northern Palmer Land. British Antarctic Survey Series 500G, Sheet 5, scale 1:500000
- Caminos, R., Marchese, H.G., and Massabie, R.J., 1973. Geologia del sector noroccidental de la Peninsula Hurd, Isla Livingston, Shetland del Sur, Antartida Argentina. Instituto Antartico Argentino Contribucion, 162: 32.
- Cox, C. A., 1981. Genesis of mineralization associated

- with Andean intrusions on King George Islands, South Shetland Islands group, Antarctic Peninsula. M.S. Thesis, Ohio State Univ., Columbus, Ohio.
- Cox, C.A., Ciocanelea, R., and Pride D., 1980. Genesis of mineralization associated with Andean intrusions, northern Antarctic Peninsula region. *Antarctic Journal of the U.S.*, **15**: 22-23.
- Craddock, C., 1982. Antarctica and Gondwanaland (Review paper). in Craddock, C. ed., *Antarctic Geoscience: Madison, University of Wisconsin Press*: 3-13.
- Dalziel, I.W.D., and Elliot, D.H., 1973. The Scotia arc and the Antarctic margin. in Nairn, A.E.M. and Stehli, F.G. eds., *The ocean basins and margins, the South Atlantic*. New York, Plenum Press, **1**: 171-246.
- De Wit, M.J., 1985. *Mineral and Mining in Antarctica*. Clarendon Press, Oxford.
- De Wit, M.J., Dutch, S., Kligfield, R., Allen, R., and Stern, C., 1977. Deformation, serpentinization and emplacement of a dunite complex, Gibbs Island, South Shetland Islands-Possible fracture zone tectonics. *Journal of Geology*, **85**: 745-762.
- Elliot, P.H., 1977. A framework for assessing environmental impacts of possible Antarctic mineral development: Columbus, The Ohio State University, 620pp.
- Eriksen, G.E., 1976. Metallogenic provinces of south-eastern Pacific region, in Halbouty, M.T., Maher, J. C., and Lian, H.M. eds., *Circum-Pacific energy and mineral resources*. American Association of Petroleum Geologists Memoir, **25**: 527-538.
- Ford, A.B., Mays, R.E., Haffty, J., and Fabbri, B.P., 1983. Reconnaissance of minor metal abundances and possible resources of the Dufek intrusion, Pensacola Mountains. *Proceeding of the Fourth International Symposium on Antarctic Earth Sciences*, 433-436.
- Hawkes, D.D., 1982. Nature and distribution of metalliferous mineralization in the northern Antarctic Peninsula. *Jour. Geol. Soc. London*, **139**: 803-809.
- Hawkes, D.D., and Littlefair, M.J., 1981. An occurrence of molybdenum, copper, and iron mineralization in the Argentine Islands, West Antarctica. *Econ. Geol.*, **76**: 898-904.
- Herron, E.M., and Tucholke, B.E., 1976. Sea-floor magnetic patterns and basement structure in the south-eastern Pacific. in Craddock, C. ed., *Initial reports of the Deep Sea Drilling Project*: Washington, U.S. Government Printing Office, **35**: 263-278.
- Jin, M.S., 1988. Geochemistry of the Cretaceous to Early Tertiary Granitic Rocks in Southern Korea; Part II Trace Elements Geochemistry. *Jour. Geol. Soc. Korea*, **24**: 168-188.
- Knowles, P.H., 1945. Geology of southern Palmer Peninsula, Antarctica. *American Philosophical Society Proceedings*, **89**: 132-145.
- Kroner, A., 1977. The Precambrian geotectonic evolution of Africa-plate accretion versus plate destruction. *Precambrian Res.*, **4**: 163-213.
- Littlefair, M.J., 1978. The quartz-pyrite rocks of the South Shetland Islands, Western Antarctic Peninsula. *Econ. Geol.*, **73**: 1184-1189.
- Lovering, J.F., and Plimer, I.R., 1983. Manganese-rich chemical sediments from Wilkes Land, Antarctica. *Proceeding of the Fourth International Symposium on Antarctic Earth Sciences*, 414-418.
- Lowell, J.D., and Guilbert, J.M., 1970. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Econ. Geol.*, **65**: 425-441.
- Neethling, D.C., 1969. Geology of the Ahlmann Ridge, western Queen Maud Land. in Bushnell, V.C. and Craddock, C. eds., *Geologic maps of Antarctica, Antarctic Map Folio Series: New York, American Geographical Society, Folio 12, plate VII, scale 1:500000*.
- Pankhurst, R.J., 1982. Rb-Sr geochronology of Graham Land, Antarctica. *Jour. Geol. Soc. London*, **139**: 701-711.
- Park, B.K., 1989. Potassium-Argon radiometric ages of volcanic and plutonic rocks from the Barton Peninsula, King George Island, Antarctica. *J. Geol. Soc. Korea*, **25**: 495-497.
- Park, M. E., 1991. Epithermal Alteration and Mineralization zoning within the stratovolcano, Barton Peninsula, King George Island. *Korean Journal of Polar Research*, **2**: 141-154.
- Pride, D., Moody, S., and Rosen M., 1981. Metallic mineralization, South Shetland Islands, Gerlache Strait, and Palmer Land. *Antarctic Journal of the U. S.*, **16**: 13-14.
- Ravich, M.G., Fedorov, L.V., and Tarutin, O.A., 1982. Precambrian iron deposits of the Prince Charles Mountains (Review paper). in Craddock, C. ed., *Antarctic Geoscience: Madison, University of Wisconsin Press*, 853-858.
- Rex, D.C., 1976. Geochronology in relation to the stratigraphy of the Antarctic Peninsula. *British Antarctic Survey Bulletin*, **43**: 49-58.

- Rowley, P.D., 1983. Developments in Antarctic geology during the past half century. in Boardman, S.J. ed., *The revolution in the earth science: Dubuque, Iowa*, Kendall Hunt Publishing Company Press.
- Rowley, P.D., Ford, A.B., Williams, P.L., and Pride, D.E., 1983. Metallogenic Provinces of Antarctica. *Proceeding of the Fourth International Symposium on Antarctic Earth Sciences*, 414-418.
- Rowley, P.D., and Pride, D.E., 1982. Metallic mineral resources of the Antarctic Peninsula (Review paper). in Craddock, C. ed., *Antarctic Geoscience: Madison*, University of Wisconsin Press, 859-870.
- Rowley, P.D., and Williams, P.L., 1979. Metallic mineral resources of Antarctica—Development for in future(abs.): *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, **63**: 518.
- Rowley, P.D., Williams, P.L., Schmidt, D.L., and Reynolds, R.L., 1975. Copper mineralization along the Lassiter Coast of the Antarctic Peninsula. *Econ. Geol.*, **70**: 982-992.
- Sillitoe, R.H., 1972. A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits. *Econ. Geol.*, **67**: 184-197.
- Smith, P.J., 1972. The resource potential of Antarctica. *Comments on Earth Science-Geophysics*, **3**: 23-28.
- So, C.S., Yun, S.T., and Park, M.E., 1995. Geochemistry of a fossil hydrothermal system at Barton Peninsula, King George Island. *Antarctic Science* **7**: 63-72.
- Spletstoesser, J.F., 1983. Mineral resources potential in Antarctica—Review and predictions. *Proceeding of the Fourth International Symposium on Antarctic Earth Sciences*.
- Vieira, C., Alarcon, B., Ambrus, J., and Olcay, L., 1982. Metallic mineralization in the Gerlache Strait region, Antarctica. in Craddock, C. ed., *Antarctic Geoscience: Madison*, University of Wisconsin Press, 871-876.
- Wade, F.A., 1976. Antarctica—An unprospected, unexploited continent—Summary. in Halbouty, M. T., Maher, J.C., and Lian, H.M., ed., *Circum-Pacific energy and mineral resources: American Association of Petroleum Geologists Memoir*, **25**: 74-79.
- West, S.M., 1974. The geology of the Danco Coast, Graham Land. *British Antarctic Survey Scientific Reports*, **84**: 58.
- Willan, R.C.R., 1987. Metalliferous mineralization in the Antarctic Peninsula. in *Proceedings of Pacific Rim Congress 87*, Australian Institute of Mining and Metallurgy Victoria, Australia, 483-486.
- Wright, N.A., and Williams, P.L., 1974. Mineral resources of Antarctica. *U.S. Geological Survey Circular* **705**: 29.