

빙하노출지역 해변 모래 퇴적물 조성과
환경 변화 관계 연구

Composition of beach sands of the King George Island
and their relationship with environmental
conditions in the Antarctic area



서울대학교

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “서남극 빙붕 변화 관측시스템 구축 및 제4기 해빙사(deglaciation history) 복원 기술 개발”과제의 위탁연구“빙하노출지역 해빙 모래 퇴적물 조성
환경 변화 관계 연구”과제의 최종보고서로 제출합니다.



2017. 1.

(본과제) 총괄연구책임자	:	이 재 일
위탁연구기관명	:	서울대학교
위탁연구책임자	:	이 용 일

보고서 초록

위탁연구과제명	빙하노출지역 해빈 모래 퇴적물 조성과 환경 변화 관계 연구				
위탁연구책임자	이 용 일	해당단계 참여연구원수	4	해당단계 연구비	25,000,000원
연구기관명 및 소속부서명	서울대학교 지구환경과학부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)				보고서 면수	
<p>서남극 남셰틀랜드군도 킹조지섬의 바톤반도와 위버반도의 해빈 퇴적물에 대한 기원지를 연구하였다. 해빈 퇴적물의 모드와 지화학 조성 분석의 결과로 해석되는 기원지 암석과 조구조 환경은 화산호 환경에서 생성된 화산암과 심성암체로 해석된다. 이와 같은 해석은 현재 킹조지섬에 분포하는 기반암과 조구조 환경과 일치한다. 하지만 바톤반도와 위버반도의 해빈 퇴적물 조성은 현재 두 반도에 노출된 기반암의 분포와는 차이를 보인다. 킹조지섬은 홀로세 중반에 해빙(deglaciation)이 본격적으로 일어났는데, 현재 해빈의 퇴적물은 해빙이 일어나기 전에는 해수에 덮여있었던 환경으로 전진하는 빙하에 의해 침식 및 운반되어 빙하 접지선(grounding line) 앞에 쌓였던 빙해양 퇴적물이었던 것으로 해석된다. 즉 두 반도의 해빈에 있는 모래 퇴적물들은 현재 노출된 기반암으로부터 퇴적물이 공급되었다기 보다 해빙 후 킹조지섬이 지각평형에 의해 융기하는 과정에서 해빙이 일어나기 전 해저에 쌓였던 퇴적물과 파도의 침식에 의해 고해빈의 기반암에서 기원한 퇴적물들이 더해진 후 현재의 해빈 환경에서 재동된 것으로 해석된다.</p>					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	바톤반도, 위버반도, 해빈 모래, 기원지, 조구조 환경, 해빙사			
	영 어	Barton Peninsula, Weaver Peninsula, beach sand, provenance, tectonic setting, deglaciation history			

요 약 문

I. 제 목

빙하노출지역 해빈 모래 퇴적물 조성과 환경 변화 관계 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

서남극 지역의 해안선 퇴적물의 모래 광물 및 화학 조성을 파악하여 이를 지역별로 분류하여 보고, 이 자료를 통하여 해당되는 기원지 기반암의 특성을 살펴보고자 한다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

해빈 퇴적물 광물 조성 분석

-해빈 퇴적물의 광물 조성 분포 파악

-광물 조성에 따른 기원암 평가

해빈 퇴적물 화학 조성 분석

-해빈 퇴적물의 화학 조성 특성

-화학 조성에 따른 풍화도와 해빈 작용의 역할 비교

IV. 연구개발결과

해빈 퇴적물은 화산호 환경에서 생성된 화산암과 심성암체로 해석된다. 이 해석은 현재 킹조지섬에 분포하는 기반암과 조구조 환경과 일치한다. 하지만 바톤반도와 위버반도의 해빈 퇴적물 조성은 현재 두 반도에 노출된 기반암의 분포와는 차이를 보는데 이는 킹조지섬은 홀로세 중반에 해빙(deglaciation)이 본격적으로 일어났는데, 현재 해빈의 퇴적물은 해빙이 일어나기 전에는 해수에 덮여있었던 환경으로 전진하는 빙하에 의해 침식 및 운반되어 빙하 접지선(grounding line) 앞에 쌓였던 빙해양 퇴적물이었던 것으로 해석된다.

즉 두 반도의 해빈에 있는 모래 퇴적물들은 현재 노출된 기반암으로부터 퇴적물이 공급되었다기 보다 해빙 후 킹조지섬이 지각평형에 의해 융기하는 과정에서 해빙이 일어나기 전 해저에 쌓였던 퇴적물과 과도의 침식에 의해 고해빈의 기반암에서 기원한 퇴적물들이 더해진 후 현재의 해빈 환경에서 재동된 것으로 해석된다.

V. 연구개발결과의 활용계획

현생의 해빈 퇴적물이 해빙이 일어날 당시의 기반암에서 유래된 퇴적물과 현재의 기원지 퇴적물과 혼합이 되어 재동이 된 것의 해석으로 지난 해빙기의 지질역사와 기반암의 특성을 유추할 수 있으며, 이를 통하여 킹조지섬의 해빙 역사를 더 자세히 규명할 수 있을 것으로 여겨져 향후 연구에서는 이를 좀더 밝혀보고자 한다.



S U M M A R Y

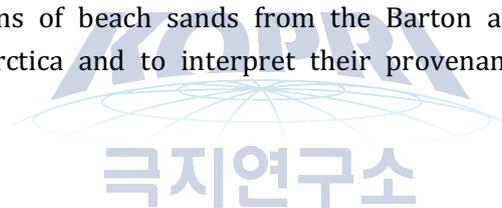
(영 문 요 약 문)

I. Title

Study on the relationship between beach sands composition and environmental changes in deglaciaded areas

II. Purpose and Necessity of R&D

This study intends to identify mineralogical and geochemical compositions of beach sands from the Barton and Weaver peninsulas, West Antarctica and to interpret their provenance



III. Contents and Extent of R&D

Mineralogical analysis of beach sediments

- mineral composition of beach sands and their distribution
- evaluation of source rocks

Chemical analysis of beach sediments

- chemical composition of beach sands
- weathering intensity and role of beach processes

IV. R&D Results

The beach sediments are interpreted to have been derived from volcanic rocks and conglomerates formed in the volcanic arc environment. This interpretation is consistent with the bedrock distribution and tectonic setting of King George Island. However, the sediment composition of the Baton Peninsula and the Weaver Peninsula

is different from the distribution of bedrocks exposed on these peninsulas. King George Island has experienced a mid-Holocene deglaciation. The beach sands are interpreted to have been a glaciomarine sediment that had been eroded and transported by previous glaciers advancing to the environment covered by seawater and deposited in front of the glacier grounding line. In other words, the sediments in the sandy beaches of the peninsulas are not supplied from the presently exposed bedrock, but rather they were sediment accumulated on the seabed before the King George Island uplift by isostasy. It is interpreted that these sediments were resurfaced to the current beach environment and were reworked and mixed with sandy sediments derived from currently exposed bedrocks of the peninsulas.

V. Application Plans of R&D Results

The interpretation that the current beach sands of the two peninsulas are a mixture of pre-deglaciation sediment and recent sediment leads to expect elucidation of the deglaciation history of King George Island in more detail.

극지연구소

목 차

제 1 장 서론	8
제 2 장 국내외 기술개발 현황	9
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	10
1. 서언	10
2. 지질 배경	13
3. 실험 방법	14
4. 결과	15
5. 토의	28
6. 결론	39
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	40
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	41
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외 과학기술정보	42
제 7 장 참고문헌	43

제 1 장 서론

서남극 일대의 온난화로 인한 빙봉의 감소와 이에 따른 빙하노출지역의 확대에 인하여 육지 기반암의 노출이 일어난다. 이렇게 빙하의 후퇴로 인하여 노출된 기반암으로부터 유래되는 퇴적물의 특성을 조사하여 다양한 기반암의 노출을 살펴보고, 이를 이용하여 기반암의 지질을 유추하고자 한다.

극지역의 낮은 기온의 특성상 화학적 풍화작용은 거의 일어나지 않는 반면, 물리적인 풍화작용은 활발히 일어난다 (Lee et al., 2004). 특히 서남극 일대는 연간 기온의 변화가 물의 얼고녹는 온도인 0°C를 오르내리는 만큼 물의 얼고녹음으로 인한 물리적 풍화작용이 잘 작용하여 기반암은 작은 알갱이로 잘게 부스러진다. 이렇게 하여 생성된 물리적 풍화산물은 빙하나 융빙수, 융설수를 통하여 해안가로 운반되어 쌓인다. 이렇게 쌓인 퇴적물은 물리적인 풍화작용의 산물이기 때문에 기반암의 특성을 잘 보존하고 있다. 빙하 노출 지역의 해안선에 퇴적된 모래질 퇴적물의 조성을 살펴보면 이들 모래질 퇴적물을 공급한 기원지의 지질을 알아볼 수 있다. 극지역의 하천 퇴적물을 조사한 Nesbitt and Young (1996)은 빙하에 의하여 운반되는 퇴적물이 융빙수에 의하여 운반되는 도중에는 퇴적물의 화학 조성이나 광물 조성이 크게 변하지 않는다고 하였다. 따라서 빙하노출 시간이 짧은 서남극 지대에서는 퇴적물은 기반암의 지질을 확인하는 좋은 지시자가 될 수 있다.

이 연구에서는 이러한 점에 착안하여 서남극 지역의 해안선 퇴적물의 모래 광물 및 화학 조성을 파악하여 이를 지역별로 분류하여 보고, 이 자료를 통하여 해당되는 기원지 기반암의 특성을 살펴보고자 한다. 특히 극지역은 빙하 노출지역 뿐만 아니라 빙하에 의하여 빙하에 덮힌 부분의 기반암의 부스러기도 함께 이동이 되기 때문에 해안선의 모래질 퇴적물 조성과 빙하 노출 지역의 지질 정보와 함께 비교 검토를 하면 빙하에 의하여 덮힌 지역의 기반암 지질에 대한 정도도 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 또한 해안선에서는 과도의 작용이 있으므로 해안선 과도 작용으로 인한 퇴적물 조성의 변화 과정도 살펴 보고자 한다. 해안선의 모래 퇴적물 뿐만 아니라 주변의 아직 해안선으로 운반되지 않은 토양 시료의 광물과 화학 조성을 분석하여 이 자료와 비교 검토를 하면 모래질 퇴적물에 나타나지 않는 기원지의 지질 정보를 더 보완할 수 있을 것이다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

지금까지 쇄설성 해빈 모래 퇴적물들의 조직 및 조성 특성에 대해 많은 연구가 이루어져 왔다(예: Clemens and Komar, 1988; Carranza-Edwards and Rosales-Hoz, 1995). 이러한 특성은 해안 지형의 기울기, 파도와 해류를 따른 에너지와 퇴적물 이동과의 상관관계, 그리고 중광물 조성은 기원지에 대한 정보를 제공한다. 최근에는 해빈 퇴적물의 지화학 조성을 이용하여 기원지와 조구조 환경 및 기원지의 풍화작용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(Hegde et al., 2006; Carranza-Edwards et al., 2009; Armstrong-Altrin et al., 2012, 2014; 2015a, b; Barnard et al., 2013).

하지만 극 지역에서의 해빈 모래 퇴적물의 연구는 거의 이루어지지 않았다. 극 지역의 특성상 낮은 풍화도에 따른 쇄설성 퇴적물의 생성에 관한 연구는 빙하 계곡을 따라 빙하의 말단에서 하천을 통하여 만에 이르는 과정의 퇴적물 조성을 연구한 Nesbitt and Young (1996)이 유일하다고 할 수 있다. 그러나 이 연구는 육상의 계곡 빙하와 이에 연관된 glaciofluvial 퇴적물에 대한 연구지만 이 연구와 같은 glaciomarine 퇴적물의 연구는 이루어지지 않았다. 이러한 점에서 이 연구의 독특한 점은 해빈의 모래 시료를 이용하여 deglaciation history를 복원할 수 있다는 점이다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

1. 서 언

쇄설성 퇴적물의 암석학적 특성은 조구조 환경, 기원암 암상, 풍화작용의 정도, 퇴적물 운반작용, 퇴적 환경 그리고 속성작용 같은 요인에 영향을 받는다(Johnsson and Basu, 1993의 논문들 참조). 이들 요인 중 첫 두 요인인 조구조 환경과 기원암 암상은 서로 연관되어 있으며, 이 두 요인이 모래 퇴적물(사암)의 조성에 가장 중요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 쇄설성 퇴적물의 지화학 조성은 기원암의 특성(Madhavaraju and Ramasamy, 2001, 2002; Lee et al., 2005; Etemad-Saeed et al., 2015), 풍화 조건(Qiu et al., 2014; Tawfik et al., 2015), 그리고 퇴적 분지의 조구조 환경(Verma and Armstrong-Altrin, 2013; Armstrong-Altrin, 2015; Verma et al., 2015)을 재구성하는데 많이 이용되고 있다. 쇄설성 퇴적물의 기원지를 유추하기 위해서는 퇴적물의 암석학적 특성과 지화학 조성을 함께 고려하여 해석을 하는 것이 가장 좋은 방법으로 여겨지고 있다(Madhavaraju et al., 2010; El-Anwar and El-Wekeil, 2013; Armstrong-Altrin et al., 2015 참조).

지금까지 쇄설성 해빈 모래 퇴적물들의 조직 및 조성 특성에 대해 많은 연구가 이루어져 왔다(예: Clemens and Komar, 1988; Carranza-Edwards and Rosales-Hoz, 1995). 이러한 특성은 해안 지형의 기울기, 파도와 해류를 따른 에너지와 퇴적물 이동과의 상관관계, 그리고 증광물 조성은 기원지에 대한 정보를 제공한다. 최근에는 해빈 퇴적물의 지화학 조성을 이용하여 기원지와 조구조 환경 및 기원지의 풍화작용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(Hegde et al., 2006; Carranza-Edwards et al., 2009; Armstrong-Altrin et al., 2012, 2014; 2015a, b; Barnard et al., 2013).

남극 반도 서쪽 외해에 있는 킹조지섬은 남쉐틀랜드군도에 위치하는 섬(Fig. 1)으로, 중생대 후기에서 신생대 초기에 걸친 해양판의 섭입에 관련되어 형성된 화산 열도 중 하나인 화산섬이다(Smellie et al, 1984). 킹조지섬의 남서쪽에는 바톤반도와 위버반도가 위치하고 있다. 바톤반도와 위버반도에 대한 지질학적 연구로는 암석의 연대(Park, 1989; Jin et al., 1991; Jwa et al., 1992), 열수광화작용(Park, 1991; So et al., 1995), 지질도 작성(Lee et al., 2002) 등이 있다. 이상과 같이 바톤반도와 위버반도의 육상 지질에 대하여는 그동안 상당한 연구가 이루어졌으나, 두 반도의 해

빈 모래에 대한 연구는 드문 편이다. 바톤-위버반도의 해빈은 현생 해빈과 고해빈 (paleobeach) 모두 해안 근처를 따라 분포하고 있다. 많은 경우 이들 해빈은 융기되어 분포하며, 해빈의 퇴적물은 대다수가 둥근 자갈로 이루어져 있다(Lee, 1992; Koh et al., 1993). 반면 모래 크기 입자는 제한된 지역에서 작은 포켓 해빈의 형태로 분포한다. 선행 연구로 Choi et al.(2003)은 바톤반도의 일부에 해당하는 해빈 모래 시료를 이용한 조직, 구성 물질과 지화학 연구를 통해 해빈 시료의 퇴적 환경과 퇴적 기작에 대해 소개하였다. 하지만 바톤반도와 위버반도의 전 해안의 해빈 모래에 대한 연구는 이루어지지 않았다. 이 연구에서는 바톤반도와 위버반도 해빈 모래 퇴적물의 암석학 및 지화학 조성을 이용하여 이들의 기원지 암석과 조구조 환경을 재구성해보고, 이를 통하여 현재 세종기지가 위치한 바톤반도와 위버반도 빙하노출 지역의 기반암 암석 분포 및 조구조 환경과 비교를 하여 해빙이 일어난 이후의 해수면 변동과 현재 노출된 기반암과의 관계를 살펴보고자 한다.



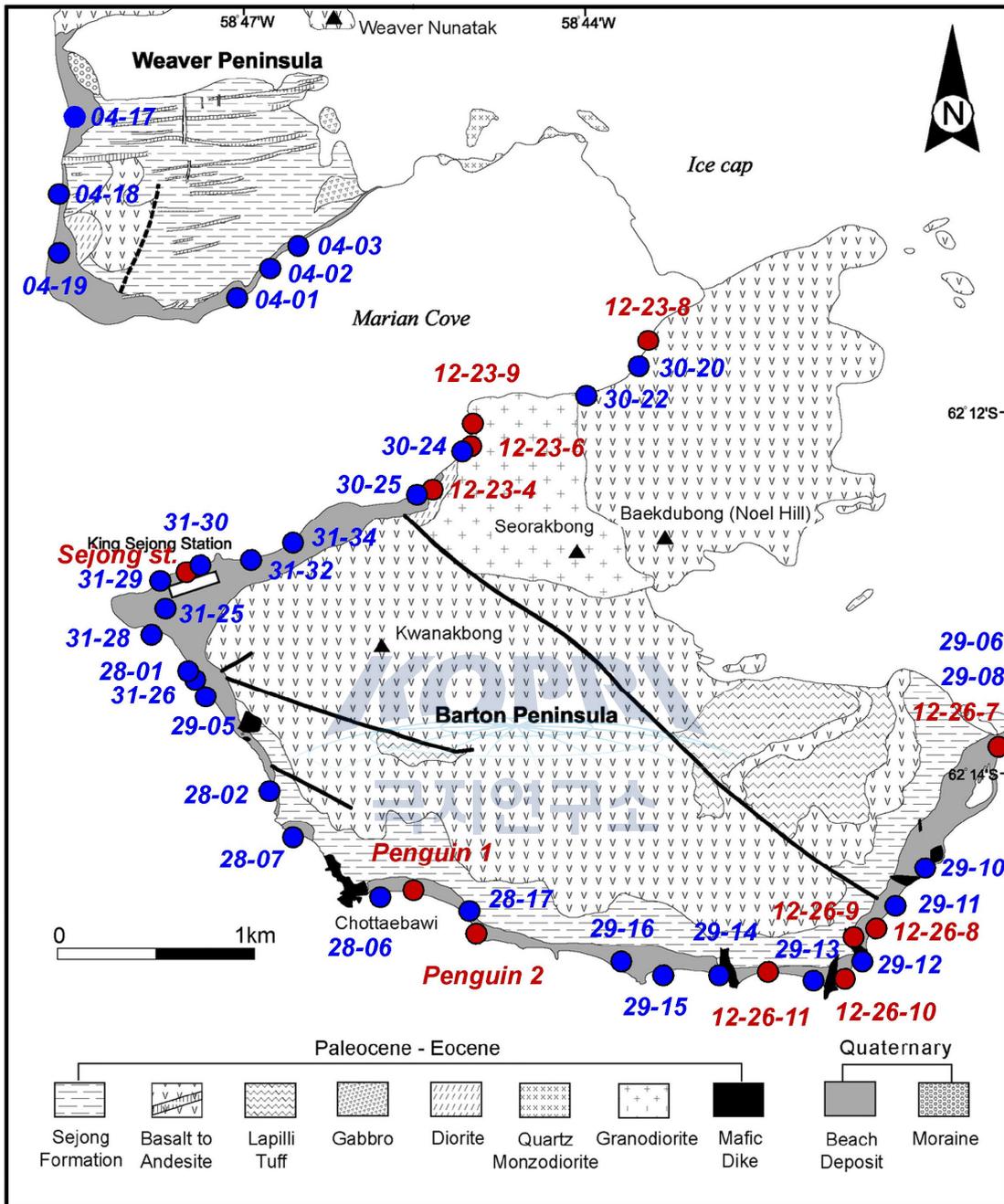


Fig. 1. Geological map of the Barton and Weaver peninsulas, King George Island, West Antarctica. The inset shows the location of King George Island (simplified from Lee et al., 2002). The numbered open circles in the geological map represent the soil sampling sites.

2. 지질 배경

바톤반도와 위버반도는 남극 반도 서쪽 외해에 분포하는 남쉐틀랜드군도의 킹조지섬에 있으며, 마리안 소만(Marina Cove: 최대 수심 120 m)을 마주보고 위치한다. 마지막 최대빙하기(Last Glacial Maximum)가 끝나면서 킹조지섬은 빙하로부터 노출되었다(Chang et al., 2003). Seong et al.(2009)은 바톤반도에서 빙하후퇴에 의해 노출된 암석에 대한 우주기원 핵종(^{36}Cl) 연대측정을 통해 최대 해빙기의 연대, 즉 해빙이 시작하는 시기를 15.5 ± 5.5 ka로 보고하였다. 이후 브랜스필드해협과 맥스웰만은 10 cal. ka BP 이후에 만년 해빙이 있다가 열린 해양 조건으로 변화하였다(Simms et al., 2011). 이와 비슷한 견해로 Sugden and Clapperton(1986)은 남쉐틀랜드군도의 광역적인 해빙은 약 9500 yr BP부터 일어난 것으로 주장하였으며, Barsh and Mäusbacher(1986)은 킹조지섬 필데스반도에 분포하는 용기된 해빈 퇴적물의 U-Th 연대 측정을 통해 약 6000 yr BP 이후에 해빙이 일어났다고 하였다.

킹조지섬의 빙하 후퇴 이후 노출된 지표면에는 빙하에 의해 기반암이 침식된 빙식 흔적들이 남아있고, 지표 대부분은 주로 빙퇴석과 활성층(active layer)으로 덮여있다. 지표는 크게 기반암, 빙퇴석, 기계적 풍화 산물, 구조토, 고해빈의 5가지로 덮여있다(Araya and Herve, 1974). 기반암은 높은 암봉이나 절벽처럼 쇄설물이 쌓이기 힘든 곳에 노출되어 있다. 빙퇴석은 얼음이 흘러 내려오는 곳의 말단 부분이나 과거에 얼음이 밀려왔던 곳에 생기거나 남아 있으며 가장 넓게 분포한다. 기계적 풍화산물은 급경사지의 기슭에 분포한다. 구조토는 상당히 넓게 분포하며 지면의 경사에 따라 다각형 구조토와 선형 구조토가 발달한다. 고해빈은 해안을 따라 지형적으로 낮은 곳에 발달해 있다(Chang et al., 2003).

빙하 후퇴 이후 노출된 면적은 바톤반도가 위버반도에 비하여 5배 이상 넓다. 위버반도와 바톤반도에서 노출된 지역의 지질은 다소 차이를 보인다(그림 1). 바톤반도와 위버반도는 하부의 화산 쇄설암인 세종층과 상부의 칼크-알칼리 화산암/심성암, 후기에 관입한 관입암류 3가지로 구성되어 있다(Lee et al., 2001). 바톤반도와 위버반도의 지질 층서에서 최하부에 존재하는 것은 두께 최대 약 100 m의 에오세 세종층이다(Yoo et al., 2001; Kim et al., 2005). 세종층은 바톤반도에서는 남부와 남동부의 절벽지대, 위버반도에서는 빙하의 후퇴로 노출된 대부분의 지역에 분포한다. 세종층은 화산쇄설성 퇴적층으로 주로 라필리암과 라필리 응회암으로 구성되어 있으며, 원마도가 다양한 실트암과 화산암편을 포함하며 회색 또는 자색 이암층이 협재한다(Yoo et al., 2001).

세종층을 부정함으로 덮는 염기성 또는 중성의 용암류는 바톤반도 전역에 광범위하게 분포하지만 위버반도에서는 남서쪽 및 북쪽에만 협소하게 존재한다. 분출 시기를 정확히 특정하지는 못하고 있지만 대부분의 용암은 팔레오세에서 에오세에 분출된 것으로 여겨지고 있다(Lee et al., 2002). 이 용암류는 대부분 사장석 반정 또는 사장석-휘석 반정을 갖는 현무암질 안산암-안산암이고 약간의 괴상 안산암을 동반하며, 상당히 두꺼운 2매의 라필리 응회암이 용암류 내에 협재한다. 바톤반도의 북쪽 중앙 부분인 설악봉의 주변에는 매우 작은 규모의 세립질 섬록암과 비교적 큰 암체인 중립질 화강섬록암이 분포한다. 이 화강섬록암에서 분리한 두 개의 흑운모에서 얻어진 K-Ar 연령은 각각 41.9 ± 0.9 Ma와 41.2 ± 0.9 Ma이고(Lee et al., 1996), 세립질 섬록암의 전암 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연령은 48.4 ± 0.5 Ma로 에오세에 관입한 것으로 해석된다(Kim et al., 2000).

바톤반도 일대의 화강섬록암 관입암 주변의 화산암들은 대부분 광범위한 열수 작용에 의해 변질되어 있고 부분적으로는 여러 변질작용이 중첩되어 있다. 이러한 열수변질은 화강섬록암체의 관입과 관련된 천열수 변질작용으로 해석(Hwang and Lee, 1998)되고 있으며, 화강암체와 직접 접하는 부분에서는 각섬석의 녹니석화작용과 알바이트화작용이 우세하지만, 거리가 멀어짐에 따라 장석류의 견운모화작용이, 보다 먼 곳에는 견운모의 고령도화작용이 점차 우세하게 관찰된다(Hur et al., 2001). 바톤반도에는 거의 평행한 세 개의 주향이동 단층이 북서-남동 방향으로 발달한다.

바톤반도와 위버반도의 해빈을 이루는 퇴적물은 대부분 자갈 이상의 크기로 되어 있으며 군데군데 자갈로 이루어진 해빈 사이에, 그리고 해빈 자갈로 보호가 되는 지역에 모래로 이루어진 해빈이 존재한다. 바톤반도와 위버반도에 이와 같이 자갈 크기 이상의 입자들이 해빈 퇴적물로 존재하는 것은 연구 지역인 킹조지섬의 파도 에너지가 빠른 풍속에 의하여 영향을 받는 것으로 해석되었다(Choi et al., 2003).

맥스웰만에서 바람은 동쪽으로부터 자주 불어오거나 이에 직각 방향에서 빙하를 따라 만으로 부는 활강풍(catabatic winds)이 있다(Klöser et al., 1994). 이에 따라 바톤반도와 위버반도에는 그 해안선의 규모로 볼 때 잘 발달된 연안류는 관찰되지 않는다. 마리안 소만의 조차는 2 m 미만(Yoo et al., 2015)으로 맥스웰만에 노출된 해안에서는 퇴적물 운반의 영향은 적을 것으로 여겨지지만 마리안 소만에 연한 해안에서는 마리안 소만 두부의 용빙수에 의해 운반된 퇴적물의 운반에는 약간의 영향을 미칠 수 있을 것으로 여겨진다.

3. 실험 방법

바톤반도와 위버반도의 해변에서 채취한 총 32개의 모래 시료(바톤반도 26개; 위버반도 6개)는 박편을 제작한 후 편광 현미경을 이용하여 관찰하였으며, 각 시료마다 석영, 장석, 암편 등의 구성 성분에 대하여 500개의 점셈(point counting)을 실시하였다.

모래 시료의 화학 조성을 확인하기 위해서 한국기초과학지원연구원의 X선 형광 분광분석기(XRF: Philips PW244 모델)를 이용하여 주원소(major elements)에 대한 분석을 실시하였다. 분석 원소는 Si, Al, Fe, Ca, Na, Mg, K, P, Ti, Mn의 10가지이다. 주원소의 분석 오차는 $\pm 10\%$ 이다. 희토류원소(rare earth elements: REE)는 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS: VG Elemental PQII Plus 모델)를 이용하여 분석하였다. 희토류 원소의 분석 정밀도는 5% 이상이다.

4. 결과



4.1. 입자 조성

바톤반도와 위버반도의 해변 모래 시료의 입자 크기는 Choi et al.(2003)에서 언급된 것처럼 대부분이 조립질 모래에 속하며, 분급은 양호-적당히 양호한 상태를 보인다. 해변 모래 시료를 점셈한 결과는 Choi et al.(2003)의 결과와 함께 정리하여 표 1에 나타내었다. 모래의 구성 성분은 화산암편, 심성암편, 퇴적암편, 단결정 석영, 다결정 석영, 사장석, 중광물, 변질 입자, 기타 불분명한 광물의 9가지로 구분하였다. 정장석은 암편에 포함되는 경우 외에는 모래 입자로 발견되지 않아 따로 분류하지 않았다. 대부분의 모래 입자는 화산암편과 변질된 입자, 심성암편임을 알 수 있다(그림 2). 화산암편은 microlitic형과 lathwork형의 화산암편으로 후자가 조금 더 많이 산출된다(Choi et al., 2003; this study). 화성암편과 변질된 입자, 심성암편 이외의 입자들은 10% 이하의 낮은 함량을 보인다. 변질된 입자는 심하게 변질되어 원래 구성 암석을 구별해 내기가 어려우나 드물게 변질된 화성쇄설암 암편(그림 2d)이 관찰되기도 한다.

위버반도 해변의 석영-장석-암편(Q-F-R) 비율은 Q4.9-F5.4-R89.7, 바톤반도의

북서쪽 해빈은 Q4.3-F7.3-R88.4, 서쪽 해빈은 Q3.6-F8.5-R88.0, 남서쪽 해빈은 Q2.9-F2.9-R94.2, 남쪽 해빈은 Q0.3-F1.0-R98.6, 그리고 남동쪽 해빈은 Q0.0-F1.7-R98.3이다. 바톤반도와 위버반도의 해빈 모래 퇴적물은 암편질 사암의 영역에 도시된다(그림 3a). 또한 해빈 모래의 조성을 Dickinson(1985)의 기원지 구분 삼각도표에 표시하면 삭박되지 않은 화산호 환경(undissected arc setting)에 도시가 된다(그림 3b).

해빈 모래의 조성으로 볼 때 해빈 모래의 조성은 크게 두 개의 그룹으로 구분된다. 한 그룹은 위버반도와 바톤반도의 북서쪽 및 서쪽 해빈의 모래로 구성되며, 다른 또 하나의 그룹은 바톤반도의 남서쪽, 남쪽 및 남동쪽 해빈의 모래로 구성된다. 첫 번째 그룹인 위버반도의 해빈 모래와 바톤반도의 북서쪽 및 서쪽 해빈 모래의 조성은 거의 비슷하게 나타난다. 이곳의 해빈 모래의 화산암편 함량의 중앙값은 각각 31.9%, 30.4%, 32.5% 이며, 심성암편 함량의 중앙값은 17.4%, 16.1%, 17.3%, 그리고 사장석 함량의 중앙값은 5.3%, 5.4%, 7.5%로 계산되었다. 석영 함량의 중앙값은 낮지만 각각 3.0%, 2.4%, 2.6%를 차지한다. 그런데, 이 그룹의 해빈 모래는 바톤반도의 남서쪽 해빈, 남쪽 해빈과 남동부 해빈의 모래에 비하여 화산암편과 변질된 입자의 함량은 낮은 반면 심성암편과 사장석의 함량이 높게 나타난다. 또 다른 그룹인 바톤반도 남서쪽과 남쪽, 남동쪽 해빈 모래는 화산암편 함량의 중앙값이 각각 41.9%, 46.9%, 51.7%, 화성암편 함량의 중앙값은 각각 6.0%, 3.8%, 1.7%, 사장석 함량의 중앙값은 각각 2.3%, 1.3%, 1.6%이지만, 석영은 남서쪽 해빈 모래를 빼고는 거의 산출되지 않는다. 변질된 입자의 중앙값은 첫 번째 그룹에서 28.0-29.8%인 반면, 두 번째 그룹의 경우 33.6-38.1%로 두 번째 그룹의 해빈 모래에서 더 많이 산출된다.

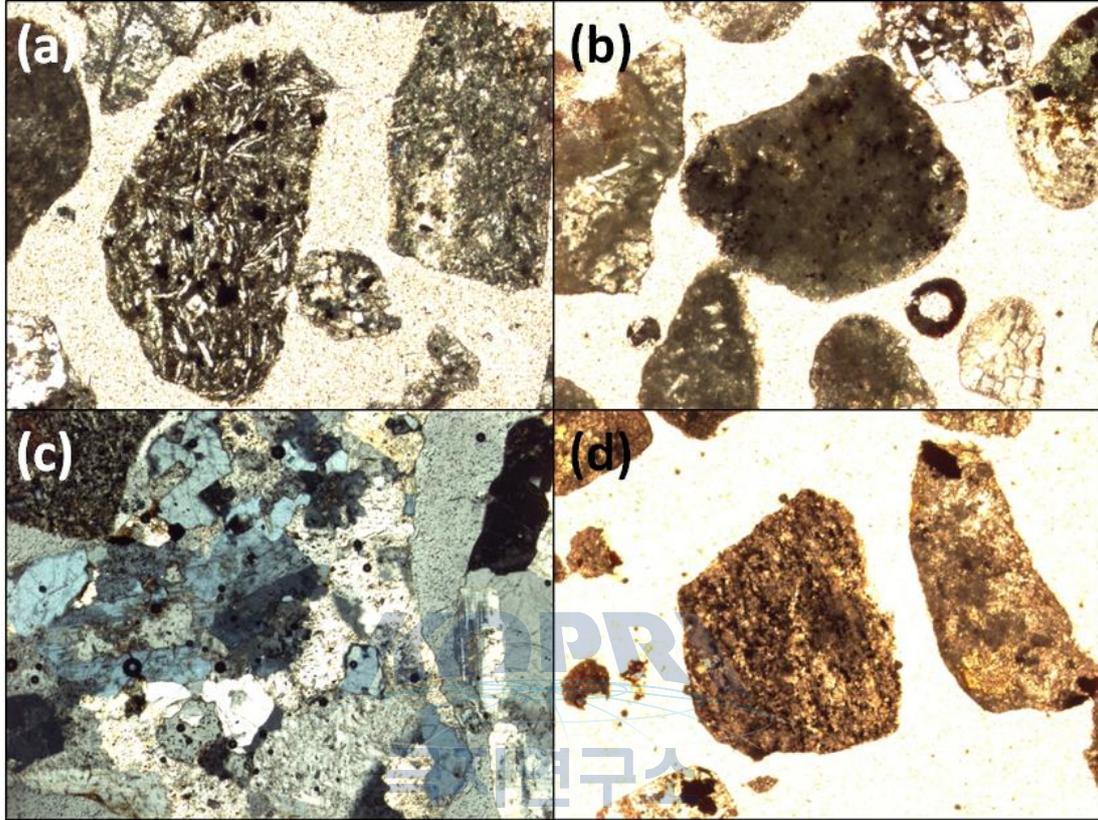


Fig. 2. Representative of (a) volcanic rock fragment, (b) altered grains, (c) igneous rock fragment, and (d) possible altered ignimbrite fragment.

4.2. 지화학 조성

해빈 모래의 주원소 조성은 표 2에 정리되어 있다. 주원소 조성 자료는 이번 연구에서 분석한 결과와 Choi et al. (2003)의 분석 결과를 함께 사용하였다. 해빈 모래의 광물 조성(표 1)과는 달리 위버반도의 해빈과 바톤반도의 해빈 모래의 주원소 조성은 큰 차이가 없지만, SiO_2 의 함량과 Al_2O_3 와 MgO 의 함량에서 다소 차이를 보인다. 위버반도 해빈 모래의 SiO_2 중량값은 56.5%이며 Al_2O_3 와 MgO 의 중량값은 각각 18.1%와 3.3%이지만, 바톤반도 해빈 모래의 SiO_2 중량값은 58.5-63.3%이며 Al_2O_3 와 MgO 의 중량값은 각각 15.2-16.8%와 2.3-2.8%이다. 즉, SiO_2 함량은 바톤반도 지역에서 높고, Al_2O_3 와 MgO 의 함량은 위버반도 지역이 높게 나타난다.



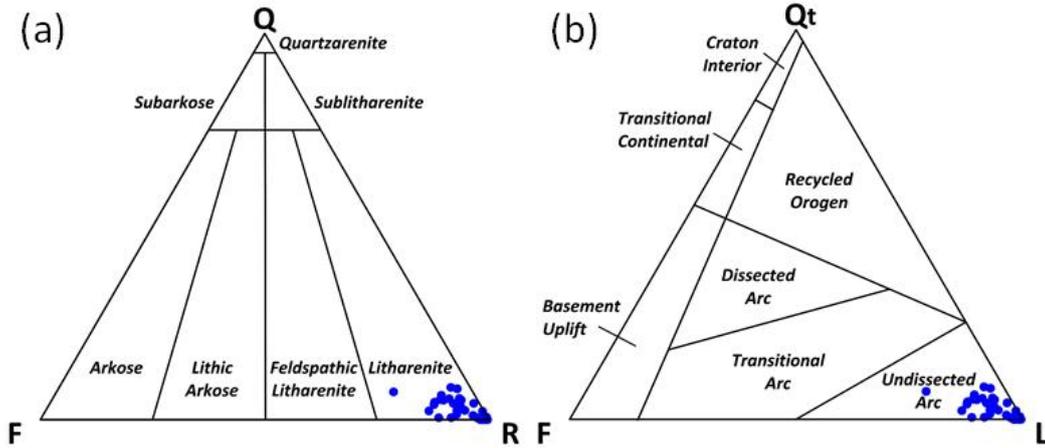


Fig. 3. (a) Sandstone classification(after Folk, 1974) and (b) clast source terrane(after Dickinson, 1985) of the Barton and Weaver peninsulas' beaches. Beach sands of both peninsulas are classified as lithic arenite and plot in the undissected arc field. Q: total quartz; F: total feldspar[K(potash feldspar) + P(plagioclase)]; R and L: total lithic fragments.

극지연구소

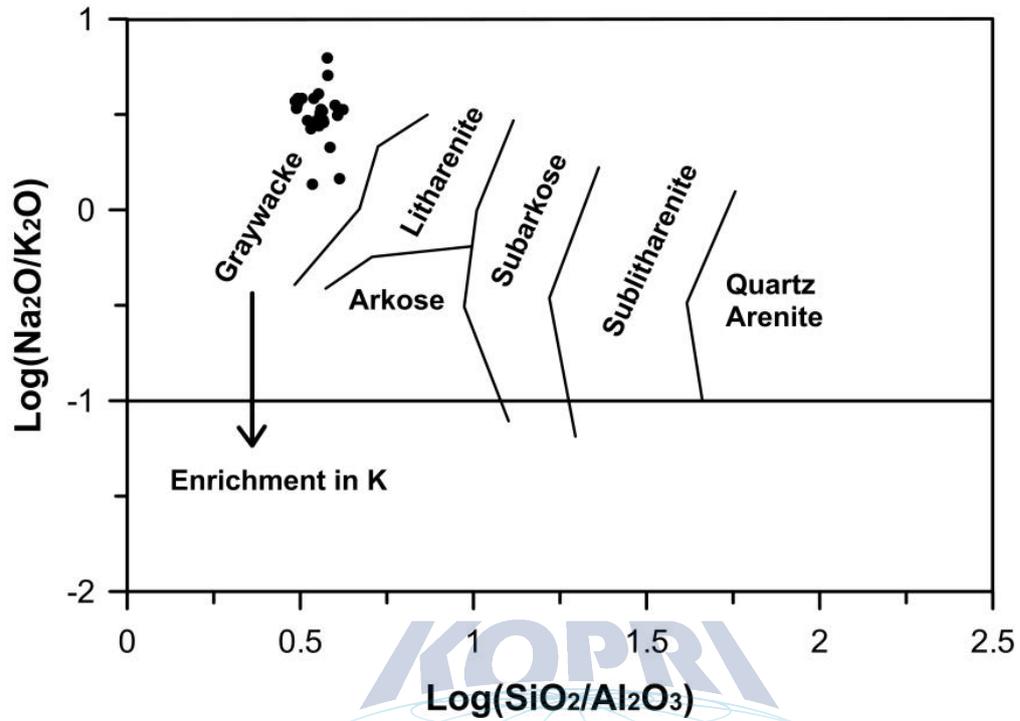


Fig. 4. Geochemical classification using $\log(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$ versus $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ of beach sands of the Barton and Weaver peninsulas, King George Island, West Antarctica (diagram after Pettijohn et al., 1972).

Table 1. Modal compositions of beach sands from the Barton and Weaver peninsulas, King George Island, W. Antarctica.

Sample	VRF (%)	PRF (%)	SRF (%)	Qm (%)	Qp (%)	Pl (%)	Heavy (%)	Alt (%)	Etc (%)
Weaver Peninsula									
04-01	28.2	24.0	7.2	3.8	0.0	5.8	3.2	24.4	3.4
04-02	28.8	19.6	9.2	2.6	0.2	5.6	2.8	28.6	2.6
04-03	25.2	23.8	7.8	3.8	0.6	7.2	2.0	26.6	3.0
04-17	37.6	11.4	3.2	2.2	0.6	3.8	3.4	34.4	3.4
04-18	38.2	15.2	1.8	2.0	0.2	5.0	2.2	28.8	6.6
04-19	35.0	12.2	4.6	3.0	0.0	3.4	4.0	33.2	4.6
Median	31.9	17.4	5.9	2.8	0.2	5.3	3.0	28.7	3.4
Barton Peninsula									
<i>Northwestern beach</i>									
30-20	24.6	14.4	12.2	4.6	0.6	4.2	3.2	33.6	2.6
30-22	23.6	21.8	7.6	1.4	0.0	4.0	2.0	36.6	3.0
30-24	36.2	17.6	0.2	2.2	0.4	9.4	6.4	24.4	3.2
30-25	53.0	14.6	1.8	1.8	0.2	4.4	1.6	21.4	1.2
12-23-4*	52.0	11.0	3.3	1.0	0.0	6.3	3.0	23.0	0.3
12-23-6*	37.0	14.0	3.3	0.0	0.3	7.7	6.0	31.7	0.0
12-23-8*	16.7	29.7	1.0	4.3	0.7	16.0	9.3	20.7	1.7
12-23-9*	21.7	18.0	9.3	3.3	1.3	3.0	4.7	37.7	1.0
Median	30.4	16.1	3.3	2.0	0.4	5.4	3.9	28.0	1.4
<i>Western beach</i>									
31-25	34.6	15.2	5.6	3.6	0.0	7.2	2.0	27.4	4.4
31-26	39.8	12.6	3.2	2.2	0.0	5.0	2.2	31.4	3.6
31-28	41.0	7.6	3.8	1.2	0.2	5.6	3.8	33.2	3.6
31-29	33.0	17.6	7.0	3.6	0.0	7.8	2.6	23.8	4.6
31-30	27.4	20.6	5.0	3.0	0.0	9.4	3.2	28.8	2.6
31-32	24.6	19.8	4.4	1.2	0.2	11.6	4.2	32.2	1.8
31-34	29.8	19.0	3.4	3.2	0.0	7.2	3.4	30.8	3.2
Sejong st.*	32.0	17.0	6.0	0.3	0.0	10.3	5.7	28.7	0.0
Median	32.5	17.3	4.7	2.6	0.0	7.5	3.3	29.8	3.4
<i>Southwestern beach</i>									
28-01	38.6	11.6	3.8	3.2	0.2	3.6	4.0	30.2	4.8
28-02	40.6	7.2	4.6	2.4	0.0	1.2	3.2	37.2	3.6
28-06	42.2	6.8	2.0	0.4	0.2	2.8	4.8	38.8	2.0
28-07	45.4	5.0	3.4	0.0	0.0	1.8	0.2	40.6	3.6
29-05	41.6	5.2	2.6	1.8	0.2	4.4	3.0	38.6	2.6
Median	41.6	6.8	3.4	1.8	0.2	2.8	3.2	38.6	3.6

Sample	VRF (%)	PRF (%)	SRF (%)	Qm (%)	Qp (%)	Pl (%)	Heavy (%)	Alt (%)	Etc (%)
<i>Southern beach</i>									
29-10	46.2	4.2	3.6	0.0	0.0	0.8	1.2	42.6	1.4
29-11	48.8	3.2	4.6	0.2	0.0	1.4	2.4	34.8	4.6
29-12	45.2	4.4	1.6	0.0	0.2	2.2	1.8	41.4	3.2
29-13	49.8	0.8	1.2	0.0	0.0	0.4	6.6	38.8	2.4
29-14	44.2	5.2	3.4	0.0	0.0	1.8	2.2	39.6	3.6
29-15	49.2	3.0	1.6	0.0	0.0	1.0	3.6	39.0	2.6
29-16	47.6	2.4	2.6	0.2	0.0	1.2	3.8	40.8	1.4
29-17	44.8	6.2	4.6	0.4	0.0	0.2	5.8	35.2	2.8
12-26-8*	48.3	2.0	4.7	0.0	0.0	1.3	0.7	43.0	0.0
12-26-9*	45.7	1.0	0.7	0.0	0.0	1.3	1.7	49.7	0.0
12-26-10*	51.3	3.3	3.3	0.3	0.0	0.7	4.7	36.3	0.0
12-26-11*	54.0	1.7	0.7	0.0	0.0	1.0	5.7	36.7	0.3
Penguin 1*	57.0	2.3	1.7	0.0	0.0	0.3	1.0	37.7	0.0
Penguin 2*	50.3	5.7	3.0	1.3	0.0	0.3	4.7	33.7	1.0
Median	46.9	3.8	2.8	0.0	0.0	1.3	3.1	38.8	2.2
<i>Southeasten beach</i>									
29-06	54.2	0.8	5.6	0.0	0.0	1.6	3.4	32.6	1.8
29-08	51.4	1.8	5.2	0.0	0.0	1.4	3.0	33.6	3.6
12-26-7*	51.7	1.7	4.7	0.3	0.0	2.3	4.0	35.0	0.3
Median	51.7	1.7	5.2	0.0	0.0	1.6	3.4	33.6	1.8

VRF: volcanic rock fragment; PRF: plutonic rock fragment; SRF: sedimentary rock fragment; Qm: monocrystalline quartz; Qp: polycrystalline quartz; Pl: plagioclase; Heavy: heavy mineral; Alt: altered grain; Etc: other component

*Choi et al. (2003) based on 300 pointing counts.

Table 2. The major element compositions of beach sand samples from the Barton and Weaver peninsulas, King George Island, W. Antarctica.

Sample	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ *	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	MnO	L.O.I	Total	CIA	PIA
Weaver Peninsula														
04-01	57.5	18.0	7.87	5.10	3.66	3.19	0.95	0.20	0.75	0.17	2.42	99.7	52.4	50.9
04-02	57.1	18.4	7.42	4.63	3.70	3.31	1.03	0.18	0.72	0.15	2.81	99.5	54.1	52.5
04-03	55.9	18.1	8.93	5.60	3.35	3.56	0.98	0.17	0.83	0.18	2.43	100. ₁	52.0	50.5
04-17	58.0	17.1	8.16	5.01	3.31	2.86	1.24	0.21	0.80	0.16	2.46	99.3	51.8	49.8
04-18	55.9	18.0	8.62	5.84	3.48	3.15	0.91	0.20	0.81	0.17	2.38	99.4	50.9	49.5
04-19	55.6	18.2	8.53	5.69	3.47	3.33	0.93	0.20	0.78	0.17	2.39	99.3	51.6	50.1
Median	56.5	18.1	8.3	5.3	3.5	3.3	1.0	0.2	0.8	0.2	2.4	99.4	51.9	50.8
Barton Peninsula														
Northwestern beach														
30-23	64.9	15.8	5.49	3.49	3.23	1.94	2.22	0.12	0.62	0.13	2.36	100. ₃	52.9	48.8
12-23-4*	62.0	16.8	5.53	4.76	3.88	2.41	1.35	0.10	0.69	0.12	2.26	99.9	50.4	66.1
12-23-6*	63.4	17.7	5.02	4.09	3.92	2.35	1.42	0.09	0.65	0.11	2.17	99.9	53.4	51.2
12-23-8*	60.7	17.7	7.13	2.31	2.51	2.29	1.84	0.11	0.71	0.09	4.48	99.8	63.2	60.3
12-23-9*	63.3	16.4	5.68	4.70	3.66	1.97	1.72	0.12	0.70	0.11	1.75	100. ₂	50.0	47.0
Median	63.3	16.8	5.5	4.1	3.7	2.3	1.7	0.1	0.7	0.1	2.3	99.9	53.6	49.4
Western beach														
28-02	58.9	16.3	8.18	4.60	3.62	2.78	1.12	0.28	0.90	0.17	2.60	99.5	51.2	49.3
29-05	57.3	17.3	8.25	4.67	3.45	3.18	1.17	0.25	0.84	0.17	3.04	99.7	52.8	50.9
31-28	60.3	16.6	6.54	4.00	3.90	2.79	1.16	0.20	0.75	0.15	2.80	99.2	52.6	50.7
31-34	61.3	16.7	6.67	4.29	3.68	2.59	1.25	0.19	0.78	0.15	2.66	100. ₂	52.3	50.2
Sejong st.*	60.4	17.3	6.17	5.02	3.80	2.80	1.31	0.17	0.70	0.12	2.31	100. ₁	50.8	48.6
Median	60.3	16.7	6.7	4.6	3.7	2.8	1.2	0.2	0.8	0.1	2.7	99.7	51.5	49.5
Southwestern beach														
28-03	57.9	16.1	9.65	5.01	3.50	2.89	1.14	0.30	1.06	0.19	2.72	100. ₅	50.0	48.0
Penguin I*	59.1	16.1	7.88	5.75	3.53	2.76	1.07	0.30	1.00	0.15	2.62	100. ₃	48.1	46.2
Median	58.5	16.1	8.8	5.4	3.5	2.8	1.1	0.3	1.0	0.2	2.7	100. ₄	49.0	47.1
Southern beach														
29-15	59.8	15.8	8.12	3.72	4.32	2.37	0.69	0.30	0.96	0.16	3.00	99.3	52.0	50.8
12-26-8*	60.8	15.3	7.87	3.33	4.28	2.49	1.21	0.22	0.86	0.13	3.44	99.9	51.5	49.2
12-26-9*	56.3	15.8	8.53	5.03	3.93	3.05	0.97	0.32	1.33	0.13	4.69	100. ₁	48.6	46.9

Sample	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ *	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	MnO	L.O.I	Total	CIA	PIA
12-26-10*	62.0	15.2	7.68	3.47	3.84	2.35	1.14	0.25	0.85	0.12	2.95	99.8	52.3	50.2
12-26-11*	60.4	15.9	7.92	5.17	3.90	2.26	0.77	0.17	0.97	0.15	2.43	100. ₁	48.9	47.5
Penguin 2*	55.8	16.1	9.26	6.05	3.68	2.99	0.96	0.28	1.04	0.17	3.46	99.8	47.1	45.5
Median	60.1	15.8	8.0	4.4	3.9	2.4	1.0	0.3	1.0	0.1	3.2	99.9	50.6	48.9
Southeastern beach														
29-09	61.9	15.3	8.01	3.20	3.89	2.29	1.24	0.30	0.84	0.14	2.98	100. ₁	53.0	50.7
12-26-7*	63.2	15.1	6.86	3.11	4.09	2.23	1.22	0.20	0.81	0.11	2.91	99.8	52.3	50.0
Median	62.6	15.2	7.4	3.2	4.0	2.3	1.2	0.3	0.8	0.1	2.9	100. ₀	52.7	50.4

*Choi et al. (2003).



전체 해빈 모래 시료에서 CaO와 Na₂O의 함량은 K₂O의 함량보다 훨씬 높게 나타난다. 특히 Na₂O/K₂O의 비는 1.4~6.3으로 평균 3.3을 나타내는데, 이 비율은 현미경 관찰에서 사장석은 관찰이 되나 정장석은 관찰되지 않는 결과와 일치한다. 화학 조성을 이용하여 Pettijohn et al.(1972)의 사암 분류 도표에 도시하면 위버반도와 바톤반도의 해빈 모래는 모두 잡사암(graywacke)의 영역에 해당된다(그림 4). Fe₂O₃와 TiO₂의 함량간에는 통계적으로 유의미한 상관관계(Pearson product moment correlation coefficient = 0.696, p = <0.001)를 보이는 것으로 보아 Fe와 Ti를 풍부하게 가지는 광물이 존재하는 것으로 해석된다. 현미경 관찰 결과에 의하면 이 광물은 화산암편에 들어있는 자철석인 것으로 추정된다.

표 3은 해빈 모래의 희토류 원소 조성을 나타낸 것이다. 위버반도의 해빈 모래는 희토류 원소 총량이 73.9~101.2 ppm(중앙값: 93.7 ppm), Eu 이상값(Eu/Eu*)은 0.88~0.95(중앙값: 0.92), 그리고 (La/Yb)_N은 4.81~5.83(중앙값: 5.66)의 범위를 가진다. 반면, 바톤반도의 희토류 원소 총량은 95.7~132.8 ppm(중앙값: 108 ppm), Eu/Eu*은 0.77~0.88(중앙값: 0.86), 그리고 (La/Yb)_N은 4.24~7.48(중앙값: 5.55)의 범위를 나타낸다. 이로 보아 바톤반도 해빈 모래의 희토류 원소 총량은 위버반도 해빈 모래의 희토류 원소 총량에 비해 약간 높은 값을 가지는 반면, Eu/Eu*는 약간 더 큰 음의 이상값을 가지는데, Eu/Eu*(p = <0.001)와 희토류 원소 총량(p = 0.007)은 통계적으로 유의미한 차이가 있는 것으로 나타난다. 콘드라이트로 표준화한(chondrite-normalized) 희토류 원소의 분포 양상은 그림 5에 도시하였다. 전체적으로 볼 때 위버반도와 바톤반도의 희토류 원소 분포에서 La_N/Yb_N는 통계적으로 유의미한 차이를 보이지 않으며(p = 0.695), La_N/Yb_N 비가 6 보다 낮게 나타나 경희토류 원소가 중희토류 원소보다 약간 더 부화되어 있지만 비교적 낮은 분화 정도를 나타낸다. Eu/Eu*는 0.76-0.93의 범위를 보이고, Nd에서 약간의 양의 이상값을 보인다.

Table 3. Rare earth element concentrations in ppm for beach sands from the Barton and Weaver peninsulas, King George Island, West Antarctica.

Sample	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Total	Eu/Eu*	(La/Yb) _N
Weaver Peninsula																	
04-01	13.8	31.3	4.2	22.5	4.3	1.4	4.7	0.6	3.2	0.6	1.9	0.2	1.7	0.2	90.7	0.92	5.62
04-02	10.9	24.8	3.4	18.1	3.7	1.2	4.0	0.5	2.9	0.6	1.8	0.2	1.5	0.2	73.9	0.95	4.81
04-03	13.0	29.7	4.0	21.4	4.2	1.3	4.6	0.6	3.2	0.6	1.9	0.2	1.7	0.2	86.7	0.93	5.33
04-17	15.5	34.9	4.7	25.2	4.8	1.5	5.3	0.6	3.6	0.7	2.1	0.3	1.8	0.3	101.2	0.88	5.74
04-18	15.4	34.2	4.6	24.5	4.7	1.5	5.1	0.6	3.5	0.7	2.0	0.3	1.8	0.3	99.2	0.91	5.83
04-19	14.8	33.3	4.5	23.9	4.7	1.5	5.1	0.6	3.4	0.7	2.0	0.3	1.8	0.3	96.7	0.94	5.70
Median	14.3	32.3	4.4	23.2	4.5	1.4	4.9	0.6	3.3	0.6	2.0	0.2	1.7	0.2	93.7	0.92	5.66
Barton Peninsula																	
30-23	18.0	39.7	5.1	26.3	4.5	1.2	4.7	0.5	3.0	0.6	1.8	0.2	1.6	0.2	107.5	0.79	7.48
28-02	19.3	43.4	5.9	31.3	6.1	1.8	6.7	0.9	4.6	0.9	2.7	0.4	2.4	0.4	126.6	0.86	5.43
29-05	15.7	35.1	4.8	25.4	4.9	1.4	5.3	0.7	3.6	0.7	2.1	0.3	1.9	0.3	102.1	0.86	5.65
31-28	14.7	33.1	4.5	23.6	4.5	1.3	4.9	0.6	3.5	0.7	2.1	0.3	1.9	0.3	95.9	0.86	5.31
31-34	16.8	37.1	4.9	25.8	4.8	1.4	5.3	0.6	3.5	0.7	2.1	0.3	1.9	0.3	105.5	0.88	5.97
28-03	17.2	38.5	5.3	28.0	5.5	1.6	6.1	0.8	4.4	0.9	2.6	0.3	2.3	0.3	113.9	0.85	5.05
29-15	14.0	31.3	4.4	23.3	4.8	1.5	5.5	0.7	4.1	0.8	2.5	0.3	2.2	0.3	95.7	0.86	4.24
29-09	20.9	46.4	6.3	32.9	6.2	1.6	6.7	0.8	4.5	0.9	2.6	0.3	2.3	0.3	132.8	0.77	6.24
Median	17.0	37.8	5.0	26.0	4.9	1.4	5.4	0.7	3.8	0.7	2.3	0.3	2.1	0.3	108	0.86	5.55

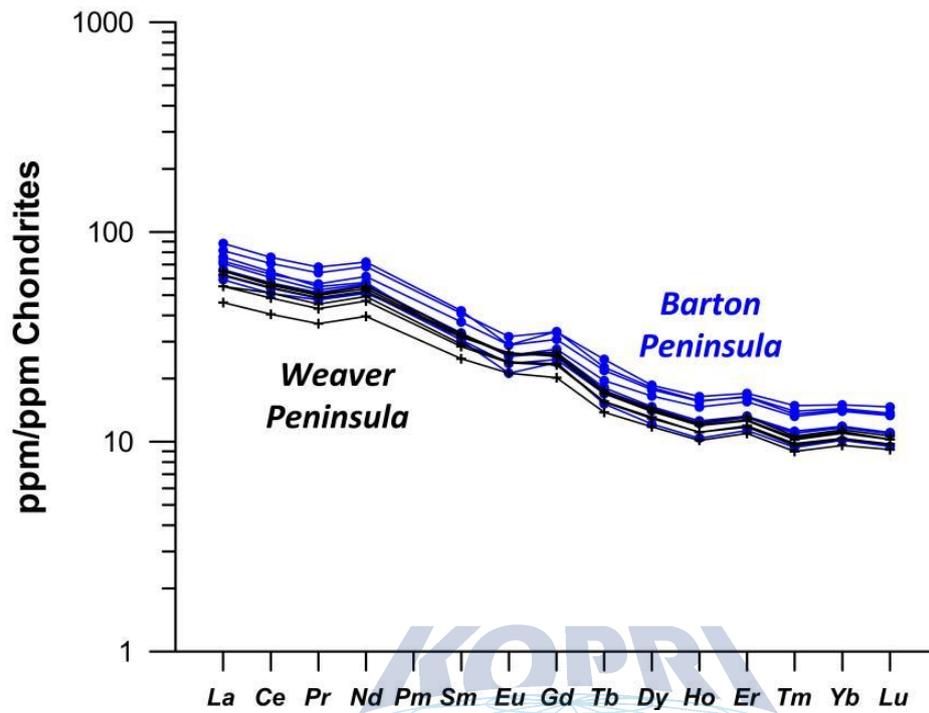


Fig. 5. Chondrite-normalized rare earth element patterns. Chondrite normalization values are from McDonough and Sun(1995).

5. 토 의

5.1. 기원암의 풍화 정도

기원암의 화학적 풍화가 활발히 일어나는 경우에는 특정 크기의 모래 퇴적물이 기원암을 대표한다고 보기 어렵다. 화학적 풍화작용이 어느 정도 활발히 일어난다면 기원암을 구성하고 있는 광물 성분 중에서 장석류, 특히 사장석이 선별적으로 영향을 받고, 다음으로는 K-장석과 석영이 차례로 영향을 받게 된다. 장석이 풍화를 받으면 점토 광물로 바뀌게 되고, 이렇게 생성되는 점토 광물들은 세립질이기 때문에 머드 퇴적물에 축적된다. 쇄설성 퇴적물의 화학 조성은 기원지에서의 풍화 조건에 대한 유익한 정보를 제공하는 것으로 알려지고 있다(Jafarzadeh et al., 2014; Liu et al., 2015). 이에 따라 모래 퇴적물의 기원암을 추적해 보기 전에 퇴적물의 풍화 정도를 먼저 확인하고 검토해 보고자 한다.

Nesbitt and Young(1982)이 제안한 화학변질 지수(chemical index of alteration: CIA)는 기원지에서 풍화작용의 정도를 정량적으로 유추할 수 있는 지수로 널리 이용되고 있으며, CIA 지수를 이용하여 장석류가 점토광물로 어느 정도까지 변질되었는지 측정할 수 있다(Selvaraj and Chen, 2006; Selvaraj et al., 2010, 2016). CIA 값은 몰 비를 이용하여 $CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)] \times 100$ 의 식으로 표현된다. 여기서 CaO^* 는 규산염에만 들어있는 CaO 함량을 가리킨다. 이 연구의 모래 퇴적물은 Ca -함유 교결물이 없고, 모래 입자들이 방해석으로 교대작용을 받은 조직이 나타나지 않으며, 중성-염기성의 화산암편이 다량 산출한 것을 감안하여 분석된 CaO 는 모래 입자 내의 규산염 광물에 함유된 것으로 간주하였다. Nesbitt and Young (1982)에 의하면 변질을 받지 않은 사장석과 정장석의 CIA 값은 대략 50을 나타낸다. 이보다 더 높은 CIA 값은 화학적 풍화작용이 일어났음을 지시한다. 그렇지만 몇몇 연구에서 CIA는 기온, 위도, 그리고 유수량과 같은 광역적인 조건의 변화를 반영하기 때문에 대륙에서 화학적 풍화작용의 정도를 알아보는 정량적인 지시자로 사용할 때는 주의를 필요로 한다고 하였다(Li and Yang, 2010; Meunier et al., 2013; Zhou et al., 2015).

위버반도와 바톤반도 해빈의 모래 시료에서 CIA 값은 각각 51.6~54.1 (중앙값: 51.9)과 47.1~63.2 (중앙값: 51.7)의 범위를 보이는데, 계산된 CIA 중앙값이 50에 가깝기 때문에(표 2) 전반적으로 기원지에서의 풍화작용은 거의 일어나지 않은 것으로 해석된다. 위버반도와 바톤반도 해빈 모래의 CIA 값은 통계적으로 유의미한 차이를 보이지 않는다($p=0.484$).

기원암의 화학적 풍화 정도는 사장석의 변질 지수(plagioclase index of alteration: PIA; Fedo et al., 1995)로도 확인할 수 있다. PIA 값은 $PIA = [(Al_2O_3 - K_2O)/(Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O)] \times 100$ 로 계산되는데, CaO^* 는 위의 CIA에서와 마찬가지로 규산염에 들어있는 CaO 의 함량을 가리킨다. 풍화를 받지 않은 사장석은 ~50의 값을 가지는데, 풍화가 진행이 된다면 PIA의 값은 점차 증가한다. 위버반도 해빈 모래의 PIA 값(표 2)은 49.5~52.5 (중앙값: 50.8), 바톤반도 해빈 모래의 PIA 값은 46.2~60.3 (중앙값: 49.7)로 위버반도와 바톤반도 두 해빈 모래의 PIA 값은 통계적으로 유의미한 차이를 보이지 않는다($p=0.287$). 모래 시료의 구성 시료에서 유리질 화산암편(Choi et al., 2003)과 퇴적암편이 매우 낮게 산출되므로 연구된 해빈 모래 시료들의 CIA나 PIA의 값이 매우 낮게 나타나는데 기여한 것으로 추정된다. 이렇게 낮은 CIA와 PIA 값으로 미루어 볼 때 기원지에서의 화학적 풍화는 거의 일어나지 않은 것으로 해석되어 지표의 조건은 비교적 추운 그리고 건조한 기후였을 것이며, 사면의 기복은 높았을 것(McLennan et al., 1993)으로 해석된다.

참고로 Lee et al.(2004)이 보고한 바톤반도 기반암의 화학 조성으로 계산한 강섬록암은 CIA값이 46.9, 현무암질 안산암-안산암은 45.8-46.1, 라필리 응회암은 58.3, 그리고 세종층은 60.7의 CIA값을 보인다. 바톤반도와 위버반도 해빈 모래 시료의 CIA값이 위의 라필리 응회암과 세종층을 제외한 기반암의 CIA 값보다 다소 높게 나타나는 것으로 판단할 때 현생 해빈 모래 퇴적물은 아주 낮은 화학적 풍화를 받은 기원암으로부터 유래된 것으로 유추할 수 있다. 이상의 해빈 모래 연구 결과는 바톤반도의 지면 표토 물질의 지화학 조성을 이용한 세립질 토양의 CIA 값이 평균 59.2(Lee et al., 2004)이라는 점과 비교할 때 빙하로 노출된 바톤반도에서의 풍화작용보다 더 미약한 화학적 풍화가 일어났었다는 것을 가리킨다. 이로서 해빈 모래 퇴적물의 암석학적 특징과 지화학 특징은 기원암의 특성을 그대로 반영한다고 할 수 있다.

5.2. 기원암

해빈 모래 시료에서 가장 많은 구성 성분은 화산암편이므로 해빈 모래의 주된 기원암은 화산암이었을 것으로 판단된다. 화산암편 중 가장 많은 종류는 lathwork 형으로 이러한 조직을 보이는 화산암은 중성-염기성 화산암에서 자주 관찰된다(Dickinson, 1970). 이러한 해석은 장석이 비록 10% 미만으로 산출되지만 거의 사장석이라는 점으로도 뒷받침된다. Dickinson(1970)은 화산암 지대에서 유래하는 장석

의 사장석/총 장석 비가 0.75에서 1.00으로 나타난다고 하였다.

주요 원소 함량과 이들의 원소 비는 기원지의 특성을 해석하는데 자주 이용된다(Purevjav and Roser, 2013; Armstrong-Altrin et al., 2015a, b). 쇄설성 퇴적물에서 Al_2O_3/TiO_2 의 비는 기원암을 나타내는 좋은 지시자로 여겨지고 있는데, 이 비율은 염기성 암석에서 중성 암석으로 그리고 산성의 암석으로 가면서 점차 증가한다(Girty et al., 1996; Hayashi et al., 1997). Hayashi et al.(1997)에 의하면 화성암에서 Al_2O_3 는 대부분 장석에 포함되어 있으며, TiO_2 는 감람석과 휘석, 일메나이트와 같은 염기성 광물에 들어있다. Al_2O_3/TiO_2 비는 염기성 암석에서는 ~3-8, 중성의 암석에서는 ~8-20, 그리고 산성의 암석에서는 ~21-70의 범위를 보인다. 이 연구에서 위버반도 해빈 시료의 Al_2O_3/TiO_2 비는 21.4-23.9이며, 바톤반도 해빈 시료는 지역에 따라 북서쪽과 서쪽 해빈 시료는 18.0-25.7의 범위를 가지나, 남서쪽, 남쪽과 남동쪽 해빈의 모래 시료는 11.9-18.6의 상대적으로 낮은 범위를 보인다. Al_2O_3/TiO_2 의 비율로 미루어 볼 때, 위버반도, 바톤반도의 북서쪽과 서쪽 해빈 시료는 중성에 가까운 산성의 기원암에서 유래되었으며, 바톤반도의 남서쪽, 남쪽과 남동쪽 해빈 모래 시료는 중성의 기원암에서 유래된 것으로 해석된다. 이와 같이 기원암의 차이가 나는 것은 해빈 모래의 구성 입자의 차이로 설명할 수 있다. 위버반도와 바톤반도의 북서쪽과 서쪽 해빈 시료는 바톤반도 다른 해빈의 시료에 비하여 심성암편과 사장석의 함량이 높다. 반면 바톤반도의 남서쪽과 남쪽, 남동쪽 해빈의 모래 시료는 현무암질 안산암-안산암으로부터 유래된 화산암편이 위버반도와 바톤반도의 북서쪽 및 서쪽 해빈 시료에 비하여 상대적으로 높게 산출된다.

희토류 원소의 분포 양상과 Eu 이상값도 염기성과 산성 암석을 구분하는 좋은 지시자이므로 쇄설성 퇴적물의 기원지 연구에 자주 이용된다(Cullers, 1994; Kasper-Zubillaga et al., 2008; Etemad-Saeed et al., 2015; Lee et al., 2014; Zhang and Gao, 201). 바톤반도와 위버반도 해빈 시료는 $(La/Yb)_N$ 의 값으로 판단할 때 중성의 기원암(Condie, 1993)에서 유래된 것으로 해석되며, Eu/Eu^* 는 염기성 기원암에서 기원한 퇴적물($Eu/Eu^* = 0.71 - 0.95$; Cullers, 1994, 2000; Cullers and Podkovyrov, 2000)의 범주에 해당되므로 두 반도 해빈 모래 퇴적물은 중성-염기성 암석으로부터 유래된 것으로 해석된다.

장석의 변질을 중심으로 전암 조성의 변화를 보는데 쓰이는 $A-CN-K[Al_2O_3-(CaO+Na_2O)-K_2O]$ 도표와 무색(leucocratic) 물질과 유색(melanocratic) 물질의 변화량을 중심으로 전암 조성의 변화를 보는 $A-CN-K-FM[Al_2O_3-(CaO^*+Na_2O+K_2O)-(Fe_2O_3 +MgO)]$ 삼각도표를 이용하여 기원암의 조성을 유추해 보았다(그림 6). 그림 6에서 모래 시료 대부분은 안산암과 현무암에 가장 가까운 조

성임을 알 수 있다. A-CN-K 도표는 Al_2O_3 와 CaO^*+Na_2O, K_2O 의 몰 비를 이용한 것으로 사장석(Pl)은 이 삼각형 왼쪽 변의 Al_2O_3 가 50%에 해당하는 지점에, 그리고 정장석(Ks)은 오른쪽 변의 50%에 해당하는 위치에 찍히며 이 두 점을 연결한 선을 ‘장석 연결선(feldspar join)’이라고 한다. 바톤반도 해빈 모래 시료의 평균과 위버반도 해빈 모래 시료의 평균 및 개개의 모래 시료들은 장석 연결선 가까이에 찍힌다. 그리고 이들은 정장석 보다는 사장석에 가깝게 도시된다. 질량 평형을 감안한 사다리 법칙을 적용한다면 해빈 퇴적물의 조성은 90%의 사장석을 함유하는 것으로 여겨진다. 이를 통해 현생 해빈의 모래 조성은 주로 현무암질 안산암-안산암의 조성을 가지고 있으며 화강섬록암이 약간 섞여있음을 알 수 있다.

위버반도와 바톤반도 해빈 모래는 화산암편이 거의 대부분을 차지하기 때문에 해빈 모래의 화학조성을 이용하여 화산암편의 기원암에 대한 정보를 습득할 수 있다. SiO_2 와 Na_2O+K_2O 의 함량 비를 이용한 도표를 이용한 결과 위버반도 해빈의 기원암은 현무암질 안산암과 안산암으로, 바톤반도의 북서쪽과 남서쪽 해빈 모래의 기원암은 안산암, 남쪽 해빈의 기원암은 안산암이 주를 이루고 현무암질 안산암이, 그리고 남동쪽 해빈 모래의 기원암은 안산암과 테사이트일 것으로 해석된다(그림 7).

이상의 화산암편 조직 특성과 지화학 조성을 근거로 볼 때 바톤반도와 위버반도 해빈 모래의 기원암은 대부분 중성의 화산암이었으며 아마도 안산암과 현무암질 안산암이 주된 기원암이었을 것으로 해석된다.

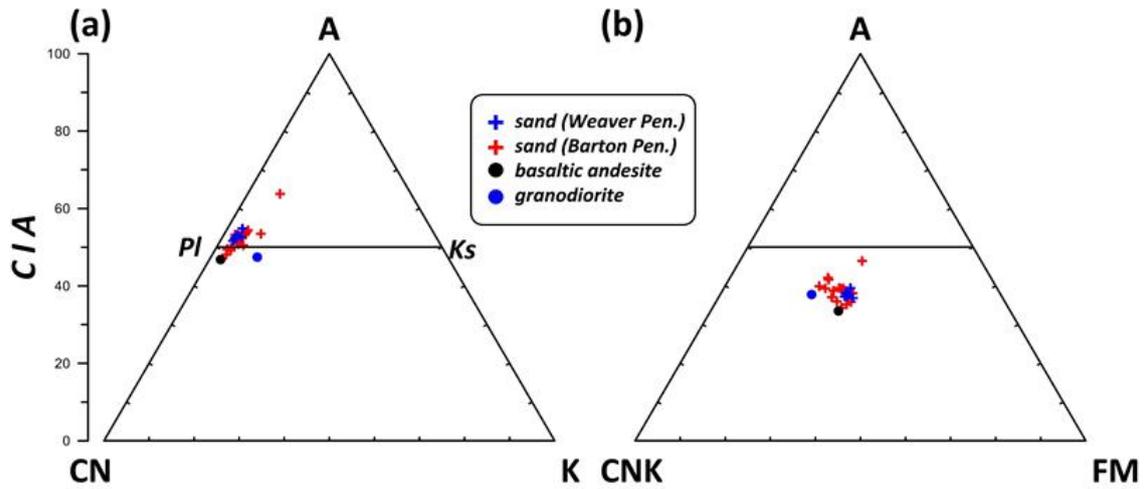


Fig. 6. (a) $\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O}) - \text{K}_2\text{O}$ and (b) $\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO})$ triangle (molar proportions). The relation between the CIA scale (Nesbitt and Young, 1982) and the triangles is shown on the left side of the diagram. The average compositions of representative granite, granodiorite, gabbro, basalt, andesite, and rhyolite are plotted on (a). Abbreviations: A= Al_2O_3 ; CN= $\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O}$; K= K_2O ; CNK= $\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$; FM= $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$; IL=illite; Mu=muscovite; Pl=plagioclase; Ks=alkali feldspar; Fs=feldspars; Ka=kaolinite; Gi=gibbsite; Bi=biotite; Gt=garnet.

5.3. 조구조 환경

해빈 모래 시료의 구성 입자를 바탕으로 Dickinson(1985)의 기원지 구분 삼각도 표에 표시하면 식박되지 않은 화산호 환경(undissected arc setting)에 도시되었다(그림 3). 이상과 같이 쇠설성 입자를 바탕으로 기원지의 조구조 환경을 해석할 수 있다는 것을 지화학 조성을 이용하여 검증할 수 있다. 퇴적물의 주요 원소 조성을 이용하여 Verma and Armstrong-Altrin(2013)은 쇠설성 퇴적물을 고이산화규소(high silica)와 저이산화규소(low silica) 그룹으로 나누어서 퇴적물의 기원지 조구조 환경을 구분하는 두 개의 다차원 도표를 제안하였다. 여기서 이산화규소 함량에 따른 쇠설성 퇴적물의 구분은 퇴적물의 측정된 이산화규소 함량을 휘발성 성분을 제외하고 10개의 주요 원소를 합하여 다시 백분율로 표시한 이산화규소 함량(이를 조정된 이산화규소 함량이라고 함)을 기준으로 하는데, 조정된 이산화규소 함량이 63%~95% 사이를 가질 때를 고이산화규소의 쇠설성 퇴적물로, 그리고 35%~63% 사이를 가질 때는 저이산화규소 쇠설성 퇴적물로 구분한다. 이 다차원 도표는 최근의 연구에서 퇴적물 기원지의 조구조 환경을 추정하는데 잘 적용되었다(Armstrong-Altrin, 2015; Armstrong-Altrin et al., 2014, 2015a; Zaid and Gahtani, 2015). 이 연구에서 분석된 세종기지 주변의 해빈 퇴적물은 총 14개의 분석된 시료에서 바톤반도 북서쪽 해빈의 1개 시료(30-23)만이 고이산화규소의 해빈 모래로 구분되고 나머지 13개의 시료는 모두 저이산화규소 해빈 모래에 해당된다. 이렇게 분석된 세종기지 주변 해빈 퇴적물의 고이산화규소나 저이산화규소 해빈 모래 모두를 Verma and Armstrong-Altrin(2013)의 다차원 도표(그림 8)에 도시하면 저이산화규소 해빈 모래 시료들은 모두 화산호의 조구조 환경 영역에 도시가 되며, 하나의 고이산화규소 시료는 화산호와 대륙열개의 조구조 환경 경계부에 도시된다.

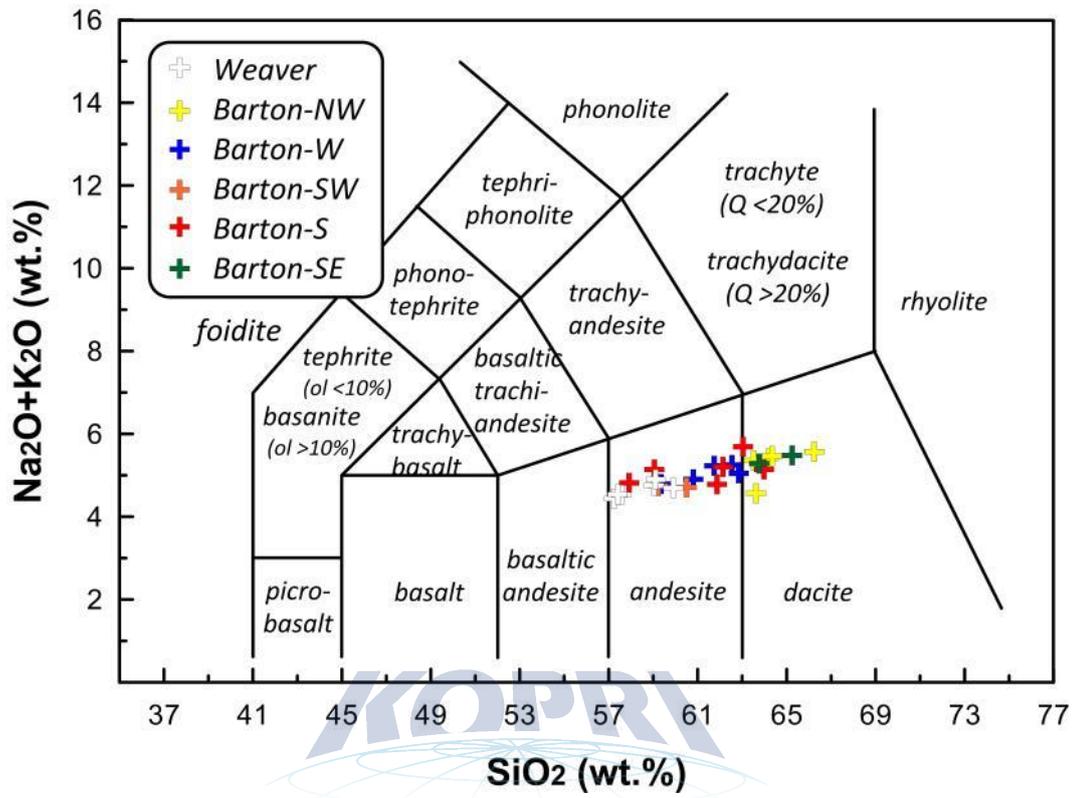


Fig. 7. Total alkali versus silica classification scheme of volcanic rocks (after Le Bas et al., 1986).

5.4. 기원지 해석과 바톤/위버반도의 지질 비교

현미경을 이용한 박편 관찰에서 해빈모래의 구성입자들은 화산암편과 변질된 입자, 심성암편 순으로 많이 관찰되었다. 바톤반도와 위버반도 해빈 모래의 구성 입자 조성으로 추정된 기원지에 의하면 킱조지섬의 기원암은 화산암, 심성암과 대부분 화산암이 변질된 암석, 그리고 소규모의 퇴적암 순으로 분포하였을 것으로 해석된다. 이러한 기원암 분포에서 해빈 모래의 지화학 조성으로 판단할 때 위버반도와 바톤반도 북서부 및 서부 해빈 모래 퇴적물의 기원암은 화산호 환경에 생성된 산성-중성의 암석이었으며, 바톤반도의 남서부에서 남동부 해빈 모래 퇴적물 기원암은 주로 중성의 암석이었을 것이다. 중성 화산암의 경우 안산암과 현무암질 안산암이었을 것으로 추정된다. 두 반도의 해빈 모래 시료로부터 추정된 기원지의 조구조 환경과 기원지 암석의 정보는 현재 바톤반도와 위버반도가 속한 킱조지섬이 화산호라는 현재의 조구조 환경 및 기반암의 지질과 거의 일치한다. 이 연구는 쇄설성 퇴적물의 암석학적 특성과 지화학적 특성을 이용하여 기원지의 지질을 해석할 수 있다는 기존의 많은 연구방법을 뒷받침한다.



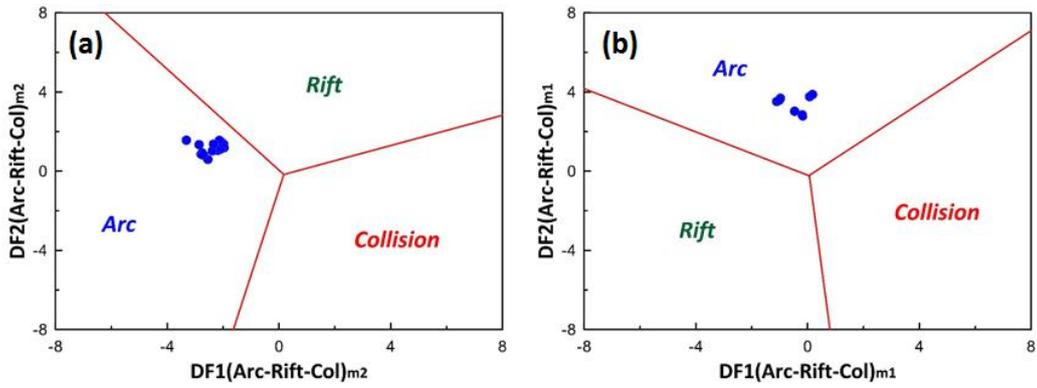


Fig. 8. Discriminant-function multidimensional diagram for high-silica clastic sediments (Verma and Armstrong-Altrin, 2013). The subscript m1 in DF1 and DF2 represents the high-silica and low-silica diagrams based on loge ratios of major elements.



바톤반도와 위버반도의 지질도를 바탕으로 해석해보면 두 반도의 해빈 모래 퇴적물에서 산출되는 대부분의 암편들은 현무암질 안산암-안산암과 관입암인 화강섬록암, 그로부터 변질된 암석에서 유래되었을 가능성이 높다. 그런데 좀더 자세히 들여다 보면 해빈 모래 시료의 조성은 위버반도와 바톤반도 북서부-서부 해빈과 바톤반도 남서-남동부 해빈에 해당하는 지역 간의 차이를 확인할 수 있다. 위버반도와 바톤반도 북서부-서부 해빈 모래는 심성암편, 사장석이 다량 존재하며 퇴적암편과 석영의 비율이 다소 높다. 반면 바톤반도 남서-남동부 해빈에는 화산암편과 변질 입자의 비율이 매우 높고, 석영과 사장석의 함량은 매우 낮다. 중광물이나 기타 성분의 경우엔 그 함유량이 적어 뚜렷한 경향성을 찾을 수 없다.

바톤반도의 해빈 모래 퇴적물의 화산암편의 경우 화산암이 바톤반도의 넓은 지역에 걸쳐 분포하므로 이들 화산암으로 유래되었을 것으로 해석할 수 있다. 하지만 위버반도의 경우는 현재 빙하로부터 노출된 지역 대부분이 세종층으로 구성되어 있으며 화산암은 노출된 면적의 약 1/7 이하로 분포한다. 위버반도 해빈 모래의 화산암편은 전체 모래 구성 성분 중 중앙값으로 약 32%를 차지하는데, 이로 보아 화산암편들이 현재 위버반도에 노출된 작은 규모의 화산암으로부터 유래되었다고 해석하기는 어렵다. 위버반도 해빈 모래의 화산암편들은 아마도 지금보다 훨씬 넓은 면적에 분포한 화산암으로부터 유래하였거나 주변의 다른 지역에서 운반되어 온 것으로 해석할 수 있다.

바톤반도에 분포하는 기반암들은 화성암이 관입하면서 광범위한 열수변질을 받았다. 변질 정도는 화강섬록암 지대를 중심으로 북쪽이 변질을 심하게 받았으며 ‘건운모화 작용’과 ‘규화 작용’이 우세하게 진행되었다(Hwang, 1998; Hur et al., 2001). 그런데 현재 열수 변질을 많이 받은 암석이 바톤반도의 북서부에 주로 분포를 하는 점을 감안한다면, 바톤반도 남서-남동부 해빈의 변질 입자 함량이 서부-북서부 해안 보다 더 높게 나타난 것은 바톤반도의 북서부로 갈수록 변질 작용의 정도가 심하다는 사실과 모순되는 것처럼 나타난다. 이러한 사실은 해빈에 분포하는 변질 입자의 산출은 현재 해빙에 의해 노출된 변질된 기반암으로부터 유래되지 않았다는 것을 시사한다. 또한 변질된 암석은 화강섬록암체의 관입과 관련된 열수 변질로 형성되었다는 것(Hur et al., 2001)을 감안한다면 위버반도에서는 아주 작은 섬록암체의 분포로 변질된 암석의 분포는 아주 소규모일 것으로 여겨져 위버반도에 분포하는 전체 모래 성분 중 중앙값 29%에 달하는 변질 입자의 함량을 설명하지 못한다.

현재까지 밝혀진 지질도에 의하면 심성암편과 사장석, 석영 모래 퇴적물의 기원암이 될 수 있는 암석은 바톤반도의 북서부에 분포하는 화강섬록암체가 유력하다. 바톤반도 북서부와 서부 지역의 모래 시료에서 심성암편, 사장석과 석영 입자들이

높은 비율로 산출되는 것이 이와 같은 해석을 뒷받침한다. 그러나 화산암류가 주로 분포하고 세종층이 소규모로 노출된 바톤반도 남부나, 세종층이 주로 노출되고 화산암류와 섬록암체가 조금 분포하는 위버반도 해빈에서도 심성암편과 사장석, 석영과 같은 모래 입자들이 비교적 높게 산출되는 것은 다소 특이하다고 할 수 있다. 바톤반도의 화강섬록암체 외에 이들 모래 입자들의 공급원이 될 수 있는 곳으로는 결정질 암석이 분포하는 남극 반도 북쪽 해안을 생각할 수 있지만(Choi et al., 2003), 이곳으로부터 심성암편 퇴적물이 운반되어 오기 위해서는 킹조지섬과 남극 반도 사이의 수심이 깊은 브랜스필드 해협을 통과해야 하므로 그 가능성은 매우 낮을 것으로 판단된다(Choi et al., 2003).

이와 같이 바톤반도와 위버반도의 빙하에 노출된 기반암 종류 분포와 이 두 반도의 해빈의 모래 조성 사이에는 가능한 기원암과 해빈 입자 사이의 물질 균형이 맞지 않는다. 지형적으로 보았을 때 바톤반도 북서쪽 해빈의 경우에는 현재 노출된 기반암으로부터 직접 운반되었을 가능성이 있으나 위버반도의 해빈과 바톤반도 남쪽 해빈의 경우에는 현재의 기반암에서 직접 공급되지는 않았을 것이다. 연구지역의 주된 바람 방향과 약한 연안류의 발달을 고려할 때 두 반도 해빈의 모래 퇴적물이 외부에서 유입되었을 가능성은 낮으므로 바톤반도와 위버반도 지역을 포함한 킹조지섬으로부터 유래되었다고 해석하는 것이 합리적이다. 킹조지섬의 두 반도에 인접한 필데스 반도에 해빙이 일어난 시기가 6,000 yr BP 이후(Barsh and Mäusbacher, 1986)라는 점을 고려할 때 이 시기 이전에는 현재의 바톤반도와 위버반도 및 마리안소만 등은 빙하에 덮였을 것으로 여겨진다. 이 시기 전에 빙하가 전진 발달을 하면서 킹조지섬 지면을 깎으며 암석 부스러기들을 맥스웰만에 쌓았을 것이다. 즉, 킹조지섬에서 기원한 퇴적물들은 빙하가 지면에 닿아있고 빙붕(ice shelf)으로 연결되는 경계인 빙하 접지선(grounding line) 앞부분에 빙해양 퇴적물로 쌓인 후 6,000yr BP 이후 해빙이 일어나면서 킹조지섬은 지각평형에 의해 융기(isostatic rebound)하였을 것이다. 이러한 융기의 기록은 바톤반도의 여러 고도에 발달한 해안 단구 및 고해빈 역암층(Lee, 1992; Koh et al., 1993)의 존재로 확인할 수 있다. 이러한 해빙기의 지형적인 특성을 고려할 때 현재의 바톤반도와 위버반도의 해빈 퇴적물은 현재 노출된 두 반도의 기반암에서 공급된 것이 아니라 현재 빙하로 덮여있는 지역의 기반암에서 빙하의 전진이 있었던 시기에 빙하 침식물로 공급되었거나 고해빈에 해당하던 기반암의 파식에 의해 형성된 퇴적물이 해저로 공급되어 현재보다 조금 깊은 해양 환경에 쌓였다가 융기 이후 현재의 해빈에 재동되어 산출되는 것으로 해석된다. 종합하면 바톤반도 남서부-남동부의 해빈에 산출하는 변질 입자 및 심성암편, 사장석과 석영 입자들이 이 경우에 해당한다고 할 수 있다.

위버반도의 경우에도 거의 대부분의 모래 입자들이 마지막 해빙기를 전후한 시기에 현재 빙하에 덮여있는 노출되지 않은 기반암들이 빙하로부터 침식 운반되어 쌓인 퇴적물이었을 것이며 여기에 고해빈의 기반암이 파도에 의해 침식되어 운반된 퇴적물이 더해진 후 용기하면서 현재의 해빈에 재동된 퇴적물로 해석된다. 이 연구 결과는 빙하 지대로부터 유래되어 하천 운반을 거쳐 해안선에 도달하는 쇄설성 퇴적물은 전반적인 지화학 조성이나 광물 조성이 기반암과는 크게 변하지 않는다는 Nesbitt and Young(1996)의 연구 결과와 일치한다. 또한 이러한 해석은 바톤반도와 위버반도 해빈 퇴적물이 현재 빙하에 노출된 지대의 표토의 화학적 풍화(Lee et al., 2004) 보다는 풍화 정도가 낮은 즉 더 한랭한 시기에 거의 풍화를 받지 않은 상태로 기원하였다는 사실로 뒷받침된다.

6. 결 론

바톤반도와 위버반도에 분포하는 해빈 퇴적물은 해당 지역에 존재하는 암석들에서 주로 유래하였다. 위버반도와 바톤반도의 해빈 모래 퇴적물들의 입자 조성을 분석한 결과 화산암편이 가장 많이 산출되고 다음으로는 변질된 입자와 심성암편의 순으로 관찰되었다. 이는 현재 바톤반도와 위버반도에 노출되어 분포하는 기반암인 현무암질 안산암-안산암, 바톤반도의 화강섬록암에서 기원하였을 것으로 추정된다. 두 반도 해빈 모래의 지화학 분석 결과에 의하면 대부분의 모래 시료들은 화학적 풍화를 거의 받지 않은 중성의 기원암으로부터 유래된 것으로 해석되며, 해빈 모래 입자의 조성 and 지화학 조성으로 판단할 때 기원지의 조구조 환경은 화산호 환경으로 해석된다. 이러한 해석은 현재의 킹조지섬의 조구조 환경 및 지질과 일치한다. 그러나 바톤반도의 남부와 위버반도의 해빈 퇴적물은 현재 빙하에 노출된 두 반도의 기반암으로부터 공급된 것이 아니고 해빙이 일어나기 전 현재 빙하로 덮인 지역의 기반암이 빙하의 침식에 의해 빙하 접지선 앞에 쌓였던 빙해양 퇴적물이었으며 여기에 고해빈의 기반암이 파도에 의해 침식된 퇴적물이 더해졌을 것이다. 이후 6,000 yr BP 이후에 해빙이 일어나면서 킹조지섬이 용기하여 현재의 해안선이 만들어지며 이들 퇴적물들이 재동된 것으로 해석된다. 따라서 현재 바톤반도와 위버반도 해빈에 분포하는 모래 퇴적물은 최대 빙하기 때 얽은 바다에 쌓였던 잔존 퇴적물(relict sediment)로 해빙에 의해 용기되어 현재의 해빈에서 파도와 조수의 영향을 받은 재동 퇴적물(palimpsest)로 해석된다.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

연구 개발의 목표에 맞추어 잘 진행되었다고 할 수 있다. 이를 통하여 King George Island의 해빙사를 해석할 수 있는 근거를 마련하였다고 할 수 있다. 이 연구 결과는 논문화되어 국제학술지에 투고할 계획이다.



제 5 장 연구개발결과의 활용계획

이 연구를 바탕으로 극 지역의 해빙사를 좀더 체계적으로 접근하여 서남극 일대의 해빙사에 대한 연구를 진행하고자 한다.



제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술 정보

퇴적물의 지화학 조성을 이용하여 퇴적물이 쌓였던 조구조 환경을 분별하는 최근의 시도인 Verma and Armstrong-Altrin (2013)을 접하게 되었다. 이 연구는 이 정보를 이용하여 수행되었다.



제 7 장 참고문헌

- Armstrong-Altrin, J.S., Lee, Y.I., Kasper-Zubillaga, J.J., Eby, G.N., Garcia, D., Carranza-Edwards, A., Balam, V. and Cruz-Oriz, N.L., 2012, Geochemistry of beach sands along the western Gulf of Mexico, Mexico: Implications for provenance. *Chemie der Erde/Geochemistry*, 72, 345–362.
- Armstrong-Altrin, J.S., 2015, Evaluation of two multidimensional discrimination diagrams from beach and deep-sea sediments from the Gulf of Mexico and their application to Precambrian clastic sedimentary rocks. *International Geology Review*, 57, 1446–1461.
- Armstrong-Altrin, J.S., Machan-Castillo, M.L., Rosales-Hoz, L., Carranza-Edwards, A., Sanchez-Cabeza, J.A. and Ruiz-Fernández, A.C., 2015a, Provenance and depositional history of continental slope sediments in the Southwestern Gulf of Mexico unraveled by geochemical analysis. *Continental Shelf Research*, 95, 15–26.
- Armstrong-Altrin, J.S., Nagarajan, R., Balam, V., Nataly-Pineda, O., 2015b, Petrography and geochemistry of sands from the Chachalacas and Veracruz beach areas, western Gulf of Mexico, Mexico: constraints on provenance and tectonic setting. *Journal of South American Earth Sciences*, 64, 199–216.
- Armstrong-Altrin, J.S., Nagarajan, R., Lee, Y.I., Kasper-Zubillaga, J.J. and Córdoba-Salana, L.P., 2014, Geochemistry of sands along the San Nicolás and San Carlos beaches, Gulf of California, Mexico: implications for provenance and tectonic setting. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 23, 533–558.
- Barnard, P.L., Foxgrover, A.C., Elias, E.P.L., Erikson, L.H., Hein, J.R., McGann, M., Mizell, K., Rosenbauer, R.J., Swarzenski, P.W., Takesue, R.K., Wong, F.L. and Woodrow, D.L., 2013, Integration of bed characteristics, geochemical tracers, current measurements, and numerical modeling for assessing the provenance of beach sand in the San Francisco Bay Coastal System. *Marine Geology*, 336, 120–145.
- Barsh, D., Mäusbacher, R., 1986. New data on the relief development of the South Shetland Islands, Antarctica. *Interdisciplinary Science Review* 11, 211–219.
- Barton, C.M., 1965, The geology of the South Shetland Island: 3. the Stratigraphy of King George Island. *British Antarctic Survey Scientific Report* 44, 33p
- Birkenmajer, K., 1998, Geological structure of Barton Peninsula and Weaver Peninsula, Maxwell Bay, King George Island. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences*, 46, 191–209.
- Carranza-Edwards, A. and Rosales-Hoz, L., 1995, Grain-size trends and provenance of southwestern Gulf of Mexico beach sands. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 32, 2009–2014.
- Carranza-Edwards, A., Kasper-Zubillaga, J.J., Rosales-Hoz, L., Morales-de la Garza,

- E.A. and Lazano–Santa Cruz, R., 2009, Beach sand composition and provenance in a sector of the southwestern Mexican Pacific. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26, 433–447.
- Chang, S.–K., 1997, Characteristics of land surface in the vicinity of King Sejong Station, Korean Antarctic Research Station. *Journal of Korean Earth Science Society*, 18, 443–449(in Korean with English abstract).
- Chang, S.–K., Lee, J.I., Choe, M.Y. and Hur, S.D., 2003, Geology around the King Sejong Station, King George Island off the Antarctic Peninsula. *Journal of the Geological Society of Korea*, 39, 271–286(in Korean with English abstract).
- Choi, T.J., Lee, Y.I. and Yoon, H.I., 2003, Characteristics of beach sands, King George Island, West Antarctica. *Journal of the Geological Society of Korea*, 39, 391–402(in Korean).
- Clemens, K.E. and Komar, P.D., 1988, Oregon beach–sand compositions produced by the mixing of sediments under a transgressing sea. *Journal of Sedimentary Research*, 58, 519–529.
- Condie, K.C., 1993, Chemical composition and evolution of the upper continental crust: Contrasting results from surface samples and shales. *Chemical Geology*, 104, 1–37.
- Cullers, R.L. and Podkovyrov, V.N., 2000, Geochemistry of the Mesoproterozoic Lakhanda shales in southeastern Yakutia, Russia: implications for mineralogical and provenance control, and recycling. *Precambrian Research*, 104, 77–93.
- Cullers, R.L., 1994, The controls on the major and trace element variation of shales, siltstones, and sandstones of Pennsylvanian–Permian age from uplifted continental blocks in Colorado to platform sediment in Kansas, USA. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58, 4955–4972.
- Cullers, R.L., 2000, The geochemistry of shales, siltstones and sandstones of Pennsylvanian – Permian age, Colorado, U.S.A.: Implications for provenance and metamorphic studies. *Lithos*, 51, 181–203.
- Dickinson, W.R. and Suczek, C.A., 1979, Plate–tectonics and sandstone compositions. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 63, 2164–2182.
- Dickinson, W.R., 1970, Interpreting detrital modes of greywacke and arkose. *Journal of Sedimentary Petrology*, 40, 695–707.
- Dickinson, W.R., 1985, Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones. In: Zuffa, G.G. (Ed.), *Provenance of Arenites*. D. Reidel, Boston, 333–361.
- El–Anwar, A.E.A. and El–Wekeil, S.S., 2013, Contribution to the provenance and paleoclimate of the Lower Paleozoic sandstones of Naqua Formation, Wadi Qena, Northern eastern desert: integration of support petrography, mineralogy and geochemistry. *Journal of Applied Sciences Research*, 9, 6529–6546.
- Etemad–Saeed, N., Hosseini–Barzi, M., Adabi, M.H., Sadeghi, A. and Houshmandzadeh, A., 2015, Provenance of Neoproterozoic sedimentary basement of northern Iran,

- Kahar Formation. *Journal of African Earth Sciences*, 111, 54-75.
- Fedo, C.M., Nesbitt, H.W. and Young, G.M., 1995, Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 23, 921-924.
- Folk, R.L., 1974, *Petrology of Sedimentary Rocks*: Austin, Texas, Hemphill Publishing Company, 182 p.
- Garcia, D., Fonteilles, M. and Moutte, J., 1994, Sedimentary fractionations between Al, Ti, and Zr, and the genesis of strongly peraluminous granites. *Journal of Geology*, 102, 411-422.
- Girty, G.H., Ridge, D.L., Knaack, C., Johnson, D. and Al-Riyami, R.K., 1996, Provenance and depositional setting of Paleozoic chert and argillite, Sierra Nevada, California. *Journal of Sedimentary Research*, 66, 107-118.
- Hayashi, K.-I., Fujisawa, H., Holland, H.D. and Ohmoto, H., 1997, Geochemistry of ~1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61, 4115-4137.
- Hegde, V.S., Shalini, G. and Kanchanagouri, D.G., 2006, Provenance of heavy minerals with special reference to ilmenite of the Honnavar beach, central west coast of India. *Current Science*, 91, 644-648.
- Hur S.D., Lee, J.I., Hwang, J. and Choe, M.Y., 2001, K-Ar and Geochemistry of Hydrothermal Alteration in the Barton Peninsula, King George Island, Antarctica. *Ocean and Polar Research*, 23, 11-21.
- Hur, S.D., Lee, J.I., Hwang, J. and Choe, M.Y., 2001, K-Ar age and geochemistry of hydrothermal alteration in the Barton Peninsula, King George Island, Antarctica. *Ocean and Polar Research*, 23, 11-21.
- Hwang, J. and Lee, J.I., 1998, Hydrothermal alteration and mineralization in the granodioritic stock of the Barton Peninsula, King George Island, Antarctica. *Economic and Environmental Geology*, 31, 171-183.
- Jafarzadeh, M., Harami, R.M., Amini, A., Mahboubi, A. and Farzaneh, F., 2014, Geochemical constraints on the provenance of Oligocene-Miocene siliciclastic deposits (Zivah Formation) of NW Iran: implications for the tectonic evolution of the Caucasus. *Arabian Journal of Geosciences*, 7, 4245-4263.
- Jeon, H.Y., Chang, S.K. and Lee, J.I., 1994, Biostratigraphic study on the plate fossils from the Barton Peninsula and adjacent areas. *Journal of Paleontological Society of Korea*, 10, 69-82(in Korean with English abstract).
- Jeong, G.Y., 2003, Chemical Weathering of Glacial Debris of the Barton Peninsula of King George Island, South Shetland Islands, Antarctica: Microtextural Evidences. *Journal of Mineralogical Society of Korea*, 16, 181-189(in Korean with English abstract).
- Jin, M.-S., Lee, M.-S., Kang, P.-C. and Jwa, Y.-J., 1991, Petrology and geochemistry of the volcano-plutonic rocks in the Barton and Weaver Peninsula, King George Island, Antarctica. *Korean Journal of Polar Research*, 2, 107-134

- Jwa, Y.-J. and Lee, J.I., 1992, Geochemistry of the volcanic rocks from the Fildes Peninsula, King George Island, Antarctica. *Journal of Korean Earth Science*
- Jwa, Y.-J., Park, B.-K. and Kim, Y., 1992, Geochronology and geochemistry of the igneous rocks from Barton and Weaver peninsulas, King George Island: A review. In: Yoshida, Y., Kaminuma, K. and Shiraishi, K. (Eds.), *Recent Progress in Antarctic Earth Science*. Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 439-442.
- Kasper-Zubillaga, J.J., Acevedo-Vargas, B., Morton Bermea, O. and Ortiz-Zamora, G., 2008, Rare earth elements of the Altar desert dune and coastal sands, Northwestern Mexico. *Chemie der Erde Geochemistry*, 68, 45-59.
- Klöser, H., Ferreyra, G., Schloss, I., Mercuri, G., Laturnus, F. and Curtosi, A., 1994, Hydrography of Potter Cove, a small fjord-like inlet on King George Island (South Shetland). *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 38, 523-537.
- Koh, Y.-Y., Park, Y.-A. and Choe, M.Y., 1993, Analysis of beach gravels in Barton and Weaver Peninsulas, King George Island, Antarctica. *Korean Journal of Polar Research*, 4, 39-51(in Korean with English abstract).
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A. and Zanettin, B., 1986, A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27, 745-750.
- Lee, D.-Y., 1992, Topographic evidences of raised beach along the Barton Peninsula, Antarctica. *Korean Journal of Polar Research*, 3, 71-84(in Korean with English abstract).
- Lee, J.I., Hur, S.D., Yoo, C.M., Yeo, J.P., Kim, H., Hwang, J., Choe, M.Y., Nam, S.H., Kim, Y., Park, B.-K., Zheng, X. and López-Martínez, J., 2002, Explanatory text of the geological map of Barton and Weaver Peninsulas, King George Island, Antarctica(1:10,000). Polar Sciences Laboratory, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan, 30 p.
- Lee, J.I., Hwang, J., Kim, H., Kang, C.Y., Lee, M.J. and Nagao, K., 1996, Subvolcanic zoned granitic pluton in the Barton and Weaver peninsulas, King George Island, Antarctica. *Proceedings of the NIPR Symposium on Antarctic Geosciences*, 9, 76-90.
- Lee, J.I., Park, B.-K., Jwa, Y.-J., Yoon, H.I., Yoo, K.C., Kim, Y., 2005, Geochemical characteristics and the provenance of sediments in the Bransfield Strait, West Antarctica. *Marine Geology*, 219, 81-98.
- Lee, M.K., Lee, S.H., Lee, Y.I., Yoon, H.I. and Yoo, K.-C., 2014, Rare earth element composition of paleo-maar sediments (latest Pleistocene-Early Holocene), Jeju Island, Korea: Implications for Asian dust record and monsoon climate. *Quaternary International* 344, 32-42.
- Lee, S.-G., Kim, J.-K., Yang, D.-Y. and Kim, J.-Y., 2004, Provenance of the river sediments in Icheon area based on the grain sizes and their geochemical characteristics. *Journal of the Geological Society of Korea*, 40, 409-429.
- Lee, Y.I., 2002, Probenance derived from the geochemistry of late Paleozoic-early

- Mesozoic mudrock of the Pyeongan Supergroup, Korea. *Sedimentary Geology*, 149, 219–235.
- Lee, Y.I., Lim, H.S. and Yoon, H.I., 2004, Geochemistry of soils of King George Island, South Shetland Islands, West Antarctica: Implications for pedogenesis in cold polar regions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68, 4319–4333.
- Li, C. and Yang, S., 2010, Is chemical index of alteration (CIA) a reliable proxy for chemical weathering in global drainage basins? *American Journal of Science*, 310, 111–127.
- Liu, B., Jin, H.-L., Sun, L.-Y., Sun, Z., Niu, Q.-H. and Zhang, C.-X., 2015, Geochemical characteristics of Holocene aeolian deposits and their environmental significance in the Mu Us desert, northern China. *Geological Journal*, DOI:<http://dx.doi.org/10.1002/gj.2630>.
- Madhavaraju, J. and Ramasamy, S., 2001, Clay mineral assemblages and rare earth element distribution in the sediments of Ariyalur Group, Tiruchirapalli District, Tamil Nadu—implication for Paleoclimate. *Journal of the Geological Society of India*, 58, 69–77.
- Madhavaraju, J., González-León, C.M., Lee, Y.I., Armstrong-Altrin, J. S. and Reyes-Campero, L.M., 2010, Geochemistry of the Mural Formation (Aptian–Albian) of the Bisbee Group, Northern Sonora, Mexico. *Cretaceous Research*, 31, 400–414.
- McDonough, W.F. and Sun, S.-s., 1995, The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120, 223–253.
- McLennan, S.M., 1993, Weathering and global denudation. *Journal of Geology*, 101, 295–303.
- McLennan, S.M., Hemming, S., McDaniel, D.K. and Hanson, G.N., 1993, Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics. In: Johnsson, M.J. and Basu, A. (Eds.), *Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments*. Geological Society of America Special Paper, 21–40.
- Meunier, A., Caner, L., Hubert, F., Albani, A.E. and Prêt, D., 2013, The weathering intensity scale (WIS): an alternative approach of the chemical index of alteration (CIA). *American Journal of Science*, 313, 113–143.
- Nagarajan, R., Armstrong-Altrin, J.S., Kessler, F.L., Hidalgo-Moral, E. L., Dodge-Wan, D. and Taib, N.I., 2015, Provenance and tectonic setting of Miocene siliciclastic sediments, Sibuti Formation, northwestern Borneo. *Arabian Journal of Geosciences*, 8, 8549–8565.
- Nesbitt, H.S. and Young, G.M., 1982, Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299, 715–717
- Nesbitt, H.W. and Young, G.M., 1989, Formation and diagenesis of weathering profiles. *Journal of Geology*, 97, 129–147
- Nesbitt, H.W. and Young, G.M., 1996, Petrogenesis of sediments in the absence of chemical weathering: effects of abrasion and sorting on bulk composition and

- mineralogy. *Sedimentology*, 43, 341–358.
- Park, B.-K., 1989, Potassium–argon radiometric ages of volcanic and plutonic rocks from the Barton Peninsula, King George Island, Antarctica. *Journal of the Geological Society of Korea*, 25, 495–497.
- Park, M.-E., 1991, Epithermal alteration and mineralization zoning within the stratovolcano, Barton Peninsula, King George Island. *Korean Journal of Korean Polar Research*, 2, 141–154(in Korean with English abstract).
- Pettijohn, F.J., Potter, P.E. and Siever, R., 1972, *Sand and Sandstones*. Springer–Verlag, New York, 618p.
- Purevjav, N. and Roser, B., 2013, Geochemistry of Silurian–Carboniferous sedimentary rocks of the Ulaanbaatar terrane, Hangay–Hentey belt, central Mongolia: provenance, paleoweathering, tectonic setting, and relationship with the neighbouring Tsetserleg terrane. *Chemie der Erde Geochemistry*, 73, 481–493.
- Qiu, S., Zhu, Z., Yang, T., Wu, Y., Bai, Y. and Ouyang, T., 2014, Chemical weathering of monsoonal eastern China: implications from major elements of topsoil. *Journal of Asian Earth Sciences*, 81, 77–90.
- Selvaraj, K. and Chen, C.T.A., 2006, Moderate chemical weathering of subtropical Taiwan: constraints from solid–phase geochemistry of sediments and sedimentary rocks. *Journal of Geology*, 114, 101–116.
- Selvaraj, K., Lin, B.Z., Lou, J.-Y., Xia, W.L., Huang, X.T. and Chen, C.-T.A., 2016, Lacustrine sedimentological and geochemical records for the last 170 years of climate and environmental changes in southeastern China. *Borea*, 45, 165–179.
- Selvaraj, K., Parthiban, G., Chen, C.T.A. and Lou, J.Y., 2010, Anthropogenic effects on sediment quality off southwestern Taiwan: assessing the sediment core geochemical record. *Continental Shelf Research*, 30, 1200–1210.
- Seong, Y.B., Owen, L.A., Lim, H.S., Yoon, H.I., Kim, Y., Lee, Y.I., Caffee, M.W., 2009. Rate of late Quaternary ice–cap thinning on King George Island, South Shetland Islands, West Antarctica defined by cosmogenic ^{36}Cl surface exposure dating. *Boreas* 38, 207–213.
- Simms, A.R., Milliken, K.T., Anderson, J.B., Wellner, J.S., 2011. The marine record of deglaciation of the South Shetland Islands, Antarctica since the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews*, 30, 1583–1601.
- Smellie, J.L., Pankhurst, R.J., Thomson, M.R.A. and Davies, R.E.S., 1984, The geology of the South Shetland islands: VI. Stratigraphy, Geochemistry and Evolution. *British Antarctic Survey Scientific Reports* 87, 85p.
- Sugden, D.E. and Clapperton, C.M., 1986. Glacial history of the Antarctic Peninsula and South Georgia. *South African Journal of Science*, 82, 508–509.
- Tawfik, H.A., Ghandour, I.M., Maejima, W., Armstrong–Altrin, J.S. and Abdel–Hameed, A.–M.T., 2015, Petrography and geochemistry of the siliciclastic Araba Formation (Cambrian), east Sinai, Egypt: implications for provenance, tectonic setting and source weathering. *Geological Magazine*,

DOI:<http://dx.doi.org/10.1017/S0016756815000771>.

- Taylor, S.R. and McLennan, S.M., 1985, *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, UK, 312p.
- Verma, S.P. and Armstrong-Altrin, J.S., 2013, New multi-dimensional diagrams for tectonic discrimination of siliciclastic sediments and their application to Precambrian basins. *Chemical Geology*, 355, 117–133.
- Verma, S.P., Díaz-González, L. and Armstrong-Altrin, J.S. 2015, Application of a new computer program for tectonic discrimination of Cambrian to Holocene clastic sediments. *Earth Science Informatics*, DOI:<http://dx.doi.org/10.1007/s12145-015-0244-0>.
- Wright, N.A. and Williams, 1974, Mineral resources of Antarctica. U. S. Geological Survey Circular, 705, 29.
- Yeo J.P., Lee J.I., Hur S.D. and Choi B.-G., 2004, Geochemistry of igneous rocks in Barton and Weaver peninsulas, King George Island, Antarctica: Correlation with ancient volcanic centers. *Geosciences Journal*, 8, 11–25.
- Yoo, C.M., Choe, M.Y., Jo, H.R., Kim, Y. and Kim, K.H., 2001, Volcaniclastic sedimentation of the Sejong Formation (Late Paleocene–Eocene), Barton Peninsula, King George Island, Antarctica. *Ocean and Polar Research*, 23, 97–107.
- Yoo, K.-C., Lee, M.K., Yoon, H.I., Lee, Y.I. and Kang, C.Y., 2015, Hydrography of Marian Cove, King George Island, West Antarctica: implications for ice-proximal sedimentation during summer. *Antarctic Science*, 27, 185–196.
- Zaid, S.M. and Gahtani, F.A., 2015, Provenance, diagenesis, tectonic setting and geochemistry of Hawkesbury sandstone (Middle Triassic), southern Sydney Basin, Australia. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 24, 72–98.
- Zhang, Y. and Gao, X., 2015, Rare earth elements in surface sediments of a marine coast under heavy anthropogenic influence: the Bohai Bay, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 164, 86–93.
- Zhou, X., Li, A., Jiang, F. and Lu, J., 2015, Effects of grain size distribution on mineralogical and chemical compositions: a case study from sizefractional sediments of the Huanghe (Yellow River) and Changjiang (Yangtze River). *Geological Journal*, 50, 414–433.

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소 위탁과제 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 위탁연구과제로 수행한 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.