



No.7 (제7호)

Polar Brief

제7호 2015년 11월 30일 | 발행 : 극지연구소 미래전략실

(21990) 인천광역시 연수구 송도미래로 26 | Tel. 032-770-8400 | www.kopri.re.kr

Snapshot



○ 북극의 환경변화와 전지구 안전 : 군사안보적 측면

(양희철/한국해양과학기술원 해양정책연구소) 3면

기후변화는 북극의 정치·사회적 환경에 중요한 변화를 초래하였는데, 그 중에서도 북극해의 안보 이슈는 북극해의 접근과 이용, 개발 등에 영향을 미치는 것이기에, 우리나라의 북극정책에도 매우 중요한 사안이다. 이 글에서는 북극해를 둘러싼 군사전략적 가치, 각국의 방위력 증강과 향후 북극해에서의 군사적 대립 가능성, 그리고 우리나라 북극 활동의 안전에 미칠 영향 등에 관하여 고찰해 본다.

○ 북극에너지회의의 시사점 (김효선/극지연구소 미래전략실) 8면

이 글은 지난 10월에 북극이사회 공식행사로 개최된 북극에너지회의(AES: Arctic Energy Summit)의 주요 내용을 소개하고 북극연구에 대한 시사점을 정리해보고자 마련되었다. 이번 북극에너지회의의 주요 아젠다는 분별 있는 유가스전 개발 및 생산, 신재생에너지 개발 및 에너지효율 개선, 극지의 안정적 전력 및 열 공급, 북극 에너지 사업의 투자 리스크관리로, 북극의 지속가능개발을 위한 에너지정책을 다루었다. 특히 이번회의에서 논의된 신재생에너지 사업은 북극이사회 지속가능개발분과(SDWG: Sustainable Development Working Group)에서 제안한 시범사업과 일맥상통하는 바, 본 지면을 활용하여 기후안보와 에너지안보 차원의 북극권 국가의 기후정책을 비교해보고자 한다.

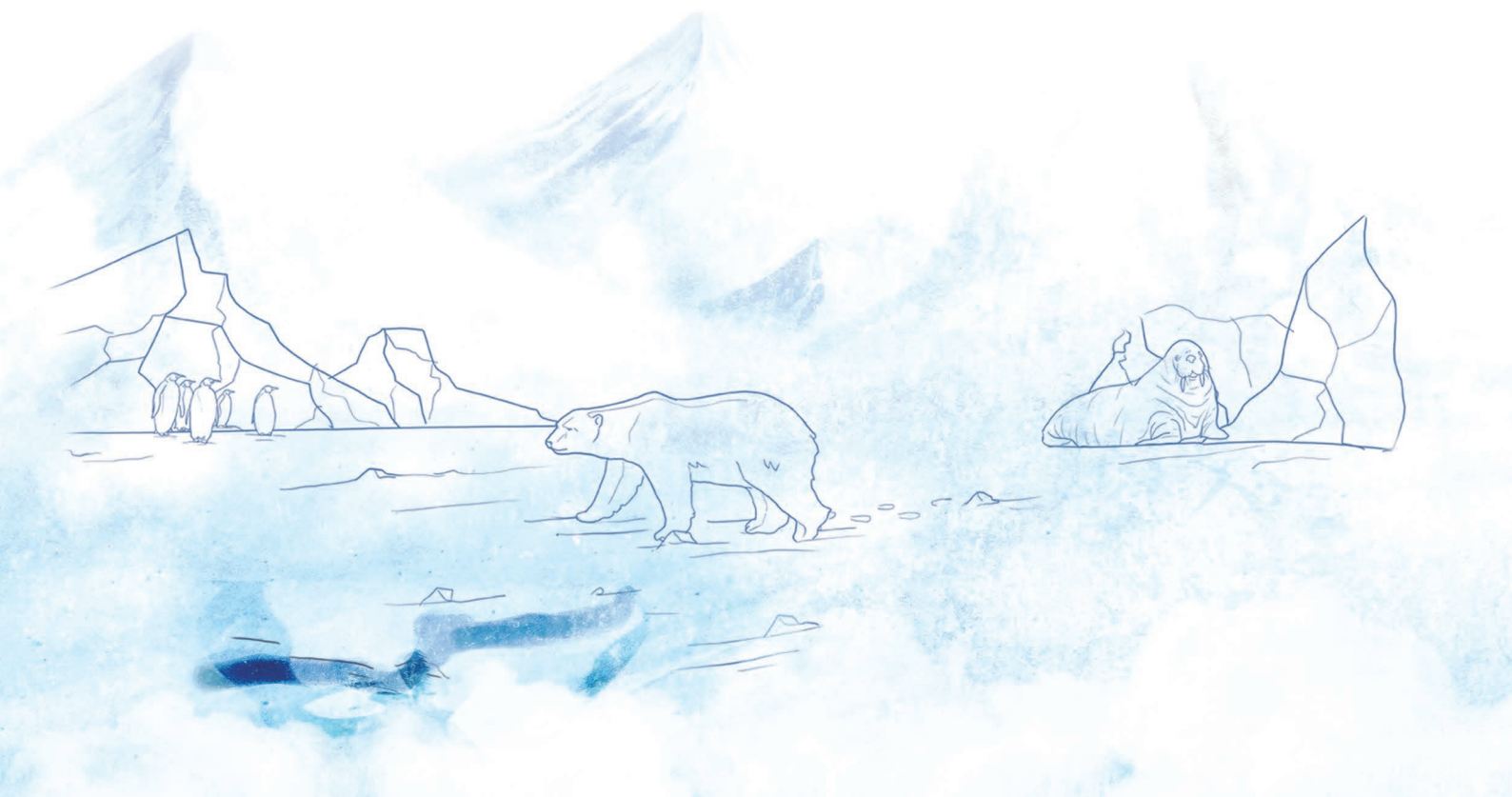
○ 빙하가 사라지면 북극 툰드라는 어떻게 변할까? - 북극다산기지 기반 육상 생태계 연구 -

(이유경/극지연구소 북극환경·자원연구센터) 12면

북극을 둘러싸고 있는 툰드라지역은 인류의 발이 닿지 않은 미지의 땅임에도 불구하고, 지구 온난화로 인하여 그 지역의 규모가 점차 줄어들고 있으며, 해빙으로 인한 생태계의 교란이 감지되고 있다. 이에 빙하가 사라지면서 새롭게 드러나는 지면의 토양미생물과 식물이 정착하는 과정, 그리고 이러한 변화가 토양 유기물과 대기 중의 기체 방출과 어떤 상관관계가 있는지 등의 북극다산과학기지 기반연구의 내용을 소개한다.

KOPRI

극지연구소





북극의 환경변화와 전지구 안전 : 군사안보적 측면

양 희 철 (한국해양과학기술원 해양정책연구소)

I. 머리말

“현대문명의 잠재력은 국가경제의 이익과 유럽 등 북극 주변 국가들의 이익, 그리고 인류공동체 전체의 이익을 위해 북극을 거주 가능한 지역으로 만드는 것을 가능케 할 것이다. 이것을 실현하기 위해서는 특히 이 지역에 축적되어 온 안보 문제가 해결되어야 한다”(1987, 무르만스크 선언, 고르바초프)

고르바초프는 상기 선언과 함께 “시급한 안보 이슈에 대한 토론을 할 지역국가(the countries of the region to a discussion on the burning security issues)”를 초대하여 북극이 “날씨가 만들어지는 부엌(whether kitchen)”일 뿐 아니라, 지역간 기후에 영향을 주는 근원(根源)임을 역설함으로써, 북극의 정치적 안정화를 유도하는 중요한 계기로 작용하였다. 1991년 전략무기감축협정(the Treaty on the Reduction and Limitation of Strategic Offensive Arms, START I)과 같은 가시적 성과를 도출한 것이 대표적이다.

그러나 북극해를 대상으로 제기되는 “평화”와 “안보”가 일관적 “비무장화”로 연계되기에는 상당한 한계가 있다는 것 역시 확인되었다. 북극항로를 둘러싼 캐나다와 미국의 해양통항권(북서항로)에 대한 해석 대립, 러시아가 북극해에서 운용중인 북해함대(Northern Fleet)와 해양독트린(2001), 캐나다의 제1전략(Canada First Defence Strategy), 덴마크의 Danish Defence Global Engagement 등은 북극해에서의 지속적 방위력 증가를 예정하고 있다는 점에서 상술한 “평화”의 개념에 ‘군사적 활동’ 자체를 포함하는 것은 아니라는 것이 분명해지기 때문이다.

이에 본문에서는 북극해를 둘러싼 군사전략적 가치와 함께 각국의 방위력 증강과 향후 북극해에서의 군사적 대립 가능

성 등에 대하여 개괄하고자 한다. 북극해의 군사적 대립은 전지구 패권전략을 이해하는 것 뿐 아니라, 향후 북극해의 이용, 그리고 관리 거버넌스에 영향을 미치는 중요한 요소가 되기 때문이다. (* 일반적 전지구 안전과 국가안전 포함여부, 제2장 논제임)

II. 북극해, 四通八達의 지중해(地中海)

지구의 최북단에 위치하는 북극지역은 아시아와 유럽, 북미라는 3개의 대륙, 그리고 태평양과 대서양이라는 2개의 대양(大洋)으로 둘러싸인 매우 특수한 지역이다. 따라서 북극해를 지배하는 것은 3개 대륙, 2개의 대양을 관통할 수 있는 북반구를 지배한다는 것을 의미한다. 더욱이 현대적 기술 발달에 따라 북극해는 “공역(空域)”의 중심이면서, 이 지역에서의 군사적 역량이 그대로 북반구 각국에 투영될 수 있는 지정학적 심장부에 해당된다. 북극해의 이러한 지리적 위치의 특유성은 엄밀한 의미에서 “지구의 지중해”라는 사전적 정의에도 부합한다.

이러한 측면에서, “전지구 기후변화는 북극해가 다른 지역해와 연동될 수 있다는 측면에서의 군사지정학적 가치를 뚜렷하게 제고시켰다”고 접근하는 것이 북극해 군사안보적 논제를 풀어나가는 솔직한 태도일 것으로 사료된다. 물론 이러한 접근은 또한 두 가지 중요한 의미를 내포하고 있다. 먼저, 다른 지역해와 연동될 수 있다는 측면은 북극해 항로를 포함한 산업적 접근과 활로 개척이라는 기회적 측면을 의미한다. 반면, 이는 동시에 이 지역의 군사적 역량이 특정 국가에게 집중될 경우, 북반구 뿐 아니라 국제적 선박 통항과 항공로를 통제할 수 있는 중대한 위협으로 작용 가능하다. 예를 들어, 북서항로와 북동항로는 해상교통로일 뿐 아니라 군사 전략적 가치 측면에서 그 중요성을 인정받고 있다. 이들 항로는 파나마

운하의 운용에 상황에 변화가 생길 경우, 미국이 북극해를 통해 핵잠수함을 태평양까지 가장 은밀하고 빠르게 지원할 수 있는 항로대로 활용할 수 있다.



〈그림 1〉 북극해의 군사전략과 잠수함 운용

* 출처: As the World Warms, Navy Strategists Plan for an Arctic Rush (MAX STRASSER, 2014.4.30)

군사적 측면에서, 북극해의 또 다른 장점은 1m가 넘는 빙층(氷層)이 핵잠수함의 안전을 보호하는 천연장벽으로 작용한다는 점이다. 즉, 북극해의 얼음은 전자파를 효과적으로 차단하기에 충분한 역할을 하며, 또한 북극해의 열악한 기후와 폭풍(설)은 최신의 해양감시위성으로도 수중 행동을 추적하거나 감시하는 것을 불가능하게 한다. 북극해 해빙층은 상시적 변화를 지속하기도 하는데, 이 과정에서 발생하는 부단한 파열음과 거대한 소음 역시 잠수정 활동을 감시하는 것을 방해하며, 이 지역의 전리층이 상시 요동치는 것 역시 잠수정 감시를 방해하는 중요한 요인으로 작용한다. 북극해의 환경적 극한성은 향후 일정 시기 동안 여전히 강대국들에 의해 은폐된 군사 활동이 지속될 수 있는 천혜의 장소로 활용될 것으로 보인다.

III. 군사적 역량강화 : 북극해 정보와 기술, 연구

북극지역이 전지구에서 가장 혹한의 지방 중 하나라는 점과 기후변화의 주요 근원(根源)이라는 점, 그리고 북반구 각 지역의 이익이 교차하고 군대가 밀집된 전략적 요지라는 점은 북극지역이 기타 지역에서는 대체할 수 없는 독특한 특징을 가진데 기인한다. 이중 가장 중요한 것으로는 전략과 전술적 활용을 위한 군사기상, 군사기술의 연구와 실험, 군사정보 등의 측면에서 그 중요성을 확인할 수 있다.

주지하는 바와 같이, 북극해는 특히 북반구 중고위도 지역 기상변화에 직접적인 영향을 미친다. 극지와 중위도 지역에서서는 열량 교환이 발생하는데, 이 과정에서 전지구에는 각종 기

상 현상이 야기된다. 북극 지자기장과 전지구 대기환류 및 기후변화가 직접적으로 관련이 있다는 점 역시 주의할 만 하다. 북극광(Northern Lights)라고 불리는 오로라는 지구공간의 환경 변화를 야기하고, 순간적으로 공간과 지면에 있는 군사, 민용 기술체계의 운영과 신뢰성에 치명적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서 북극지역의 기상변화를 연구하는 것은 전술 및 전략, 병력을 운용하는 데 있어서 가장 기본적이면서도 효율성을 극대화할 수 있는 접근방법이다. 물론, 북극 기상관측은 제2차대전 이후 이미 시작되었고, 현재는 미국을 중심으로 한 각국이 위성, 비행기, 기구 등의 장비를 활용한 북극 기상관측 체계를 갖추고 있다.



〈그림 2〉 북극해 군사정보 획득을 위한 러시아의 기지 운용

* 출처: Russia Deploys New Radar Stations in Arctic : Russian Army Begins UAV Monitoring in Arctic Region (MILITARY & INTELLIGENCE, 2015)

북극은 극한 환경을 갖추고 있다는 점에서 일부 국가 중심의 무기 연구와 개발을 위한 실험장으로 활용되기도 한다. 현대의 무기 연구개발에서는 모의환경 실험과 실제환경 실험을 결합하는 방식이 많이 활용되나, 종합적 연구성능을 확인하는 측면에서는 실제 환경실험을 대체할 만한 실험은 없다. 미국이 열악한 환경에서 기술적 성능의 신뢰성 확보를 위해, 모든 무기장비와 부품, 재료와 탄약을 환경실험실에서 먼저 모의실험한 후에, 실제환경 실험을 진행하는 것 역시 이러한 이유 때문이다.

북극은 또한 상대방의 군사행동과 관련 정보를 수집하기 위한 가장 좋은 장소이기도 하다. 미국이 1951년부터 1965년 동안 북해의 유빙 빙산에 약 9개의 감청기지를 운영하였다는 점과 구소련이 냉전시기에 약 13개의 빙산에 감청기지를 운용하였다는 점은 북극의 군사정보 측면에서의 중요성을 말해준다. 양국이 극한해역인 북극을 대상으로 군사정보 수집을 지속하는 이유는 양국의 군사적 역량의 전개와 활동이 북극과

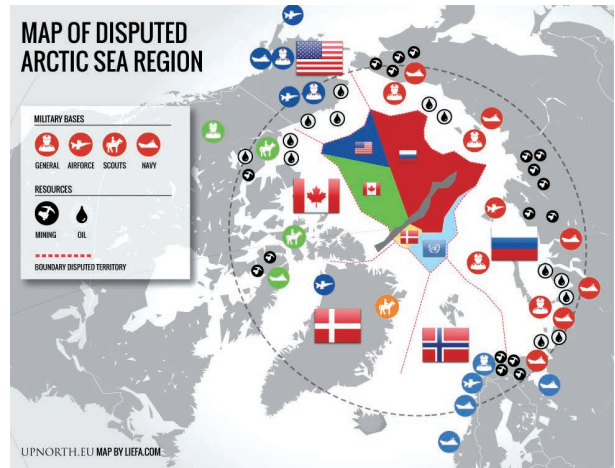
밀접하게 연계되어 있다는 것을 의미하며, 향후 북극 해빙은 북극지역의 공역(空域), 지상, 수중을 대상으로 하는 정찰 플랫폼이 지속적으로 이루어질 것이라는 것을 의미한다.

IV. 각국의 북극해 군사전략

2000년대 후반에 들어 북극의 결빙 면적이 현저하게 축소되어 항로와 자원개발을 통한 상업적 이용에 대한 전망이 높아지자, 북극해 연안국은 북극에서의 경제적 이익 확보를 위해 군사력에 투자를 본격화한다. 특히 2007년 8월의 러시아의 북극원정대가 소형잠수정을 활용하여 4천미터 아래 해저에 러시아 국기를 꽂는데 성공한 이후, 군사적 증강 움직임은 본격화되었다. 이와 같은 변화는 1987년 고르바초프의 선언 이후 북극지역을 대상으로 형성되던 협력적 국제 관계가 점진적으로 정치적 혹은 군사적 역량을 확대하는 기조로 변용될 가능성을 내포하는 것이었다.

미국은 제2차 대전을 계기로 북극의 전략적 중요성에 대하여 인식하기 시작하였고, 북태평양의 제해권을 확보하기 위해 그린란드 및 아이슬란드에 군사기지를 설치한 바 있다. 현재와 마찬가지로 당시의 북태평양 및 북극해 주변 해역은 영국 및 소련에 대한 군사 지원 물자의 공급 경로로서도 중요한 요충지였다. 북극권은 1940년대 말 냉전의 진전과 함께 서방동맹과 소련과의 잠재적 전투지역으로 간주되었으며, 1949년 NATO 창설 이후에는 유럽의 동맹국을 방위하기 위한 전략적 거점으로서도 그 중요성이 부각되었다. 러시아가 2007년에 북극점에 국기를 꽂은 이후, 미국의 북극에 대한 전략적 중요성은 다시 검토되기 시작하였다. 이 시기에 미국 해군은 처음으로 해병대, 연안 경비대와 함께 “2A Cooperative strategy for 21st Century Seapower(2007)”을 발표하였다. 이후, 보다 광범위한 정책방향으로 “National Security Presidential Directive – 66 and Homeland Security Presidential Directive – 25(2009.1)”가 발표되었고, 해군의 구체적인 북극행동계획인 “U.S. Navy Arctic Roadmap(2009.10)” 역시 이 시기에 발표되었다. 물론 민주당으로의 정권교체 이후, 미국의 북극에 대한 전략적 중요성은 상대적으로 저하되었으나, 군사안전보장 면에서의 북극정책은 여전히 지속될 것으로 판단된다.

러시아는 푸친의 제1차 해양정책 방향이라고 할 수 있는 “2020년 러시아연방 해양 독트린”을 2001년 발표하였으며, 이는 2015년 개정되었다. 해양독트린에서, 러시아는 “북극 지역에서 러시아 연방의 국가안전위협 수준의 감소 전략적



〈그림 3〉 북극해에서의 관할권 확대와 군사적 역량 배치도

* 출처: PAUL GOBLE, MOSCOW AGAIN MAKES EXPANSIVE CLAIMS TO LARGE PARTS OF ARCTIC OCEAN(Up North, 2015)

안전성 보장”, “러시아 연방의 군사-해양 잠재력 강화, 북극 함대 군사력(군대)개발”, “북극해, 북극해항로 수역, 그리고 대서양의 북부에서 러시아 석유 가스 채굴 및 가스수송 기업들, 러시아 함대 활동을 위한 조건 조성”, “북극 해양 공간 연구 및 개발에서 러시아 연방의 선두 지위를 공고히 함” 등을 언급하고 있는 바, 여전히 러시아의 5해양 중 하나로 북극해의 중요성이 강조되고 있다. 특히, 러시아의 해양 독트린에서는 일반 선박도 궁극적으로는 안전보장상의 목적을 위해 동원될 것으로 예상되고 있는 점에서 특징적이다. 메도베데프 전 대통령은 2009년 “2020년까지의 러시아 북극 전략”을 발표하였는데, 동 전략은 북극해가 2020년까지의 석유·천연가스의 가장 기본적인 자원 공급지로서 중요하며, 러시아의 육군에 북극부대를 창설하여 북극에 있는 국경 경비 강화를 목적으로 하고 있다. 2009년 “2020년까지의 러시아연방의 국가 안전보장 전략”에서는 미국은 러시아의 주요 적국이며, 러시아 북극군 계획을 명확하게 하는 동시에 북극을 러시아의 에너지 자원 확보상의 최우선 지역으로 하고 있는 바, 이는 북극에서의 군사적 역량의 배치가 향후 전략적 상대가 있는 틀 속에서 지속될 것임을 의미한다.

캐나다는 2008년 “Canada First Defence Strategy”을 발표하였는데, 이 전략에는 캐나다의 북극 주권 방위와 강화를 강조하는 동시에 2028년까지의 방위력 증강 계획을 언급하고 있다. 이후 2009년 발표된 “Northern Strategy”에서는 캐나다 북극정책이 과거 대서양과 태평양으로 제한되어 투자되었던 것이 북극해를 통한 방위력 증강으로 전환되고 있음을 보여주고 있다. 전략적 측면에서, 캐나다는 18기의 CP-140(P-3C) 대잠 초계기가 동해안에 배치되어 북극 지역의 감시

활동을 수행하고 있다. 캐나다 남동 및 중앙의 각 기지에는 80기의 FA 18 전투공격기가 배치되어 있으며, 북서 주(州)의 인비크, 엘로나이프와 누나부토의 이카로이트와 랭킹 등의 북극지역에도 배치되어 있다. FA 18 전투공격기의 주요 임무는 러시아의 폭격기 및 정찰대의 캐나다 영공으로의 침입을 저지하는 것을 목적으로 한다. 이 외에 캐나다 Canada First Defence Strategy에 의하면 2020년까지 CP-140을 신형 10~12기로 교체할 예정이며, 러시아의 장거리 폭격기에 의한 캐나다 영공 부근 비행에 대한 대처를 강화하기 위해 2020년에는 FA 18을 F-35통합타격전투기(스텔스 전투기) 65기로 교체할 예정이다.



〈그림 4〉 러시아의 북극해 군사 기지

* 출처: Russia's Military Buildup in the Arctic: Political Rhetoric vs. Reality (World Policy Blog, 2015.10.14)

북극해와 관련하여, 국제적 관심을 받고 있는 국가는 중국의 활동이다. 중국은 2008년에 스발바르 제도(Svalbard)에 조사 기지를 개설하고, 일찍부터 남극에서 활동해온 쇄빙선 "XueLong(雪龍)호"를 정기적으로 북극조사에 투입하고 있다. 물론, 현재까지 중국의 북극해에서의 전략적 방향과 백서가 발표된 것은 없다. 다만, 북극해에서의 자원(석유가스), 수산, 연안국에 의한 군사활동과 군사적 통제권 강화 등은 중국의 모든 경제 및 군사활동과 무관하지 않다는 점에서 주목할 필요가 있다. 지리적으로 중국이 북극의 EEZ와 대륙붕에 대한 관할권을 향유할 수 없다는 한계에도 불구하고, 현재 중국의 지역해 패권정책과 해군의 대양진출, 경제적 성장속도는 현 단계가 아닌 다음 단계에서의 '북극해' 전략이 뚜렷한 국익을 중심으로 형성되고, 대응적 측면에서 가시화 될 것임은 분명하다. 북극 전략의 방향성 설정을 둘러싼 중국의 고민은 많은 학자들의 정책 건의를 통해서도 충분히 나타나는데, 예컨대 중국의 ZhaoYing 박사는 북극지역이 주변국가에 의해 분할되는 형국을 막기 위해 국제사회가 적극적인 조치를

취해야 한다고 주장한다.¹⁾ WangXiuYing 교수는 러시아의 해저 잇발 행위가 야기한 북극 연안국의 권리확장이 중국의 주는 영향을 피할 수는 없을 것임을 경고하고, 국제사회가 다자 협의를 통해 해결 방안을 모색할 필요가 있음을 건의하고 있다.²⁾ 이들의 논조는 Lida Jakobson의 평가와 같이³⁾, 중국정부의 북극전략 부재가 사실 이미 강대국으로 성장한 중국의 공식적 북극 진출 전략이 야기할 국제사회의 지나친 견제를 고려한 조치라는 이해를 전제로 한다. 다만, 그럼에도 불구하고, 향후 북극 추진 전략의 적극성과 방향설정이 북극해 자원과 항로, 군사적 측면에서의 중국 참여 기회와 직결된다는 점에서 현재의 "관망" 자세는 장기화될 수는 없으며, 중국정부는 북극의 레짐 형성에 적극 참여할 수 밖에 없다는 논리다.

V. 결론 : 북극의 군사적 활용과 한국의 안전

북극에서의 최근의 연안국의 군비 강화 움직임은 많은 논자가 지적하고 있는 바와 같이 북극해의 해빙 면적의 축소라는 기후변동에 의한 북극의 지정 환경의 변화가 크게 작용하고 있다. 의심할 여지 없이, 전지구 기후변화는 북극해의 자연환경과 사회환경에 중요한 변화를 야기하였다. 이들 두 가지 영역의 '환경' 적 변화는 그것이 "결과론적 영향"을 의미한다는 점에서 모두 '안전'에 대한 것으로 귀결된다. 이때 언급되는 '안전'은 "군사적 안전"이라는 전통적 개념과 함께 "자원, 생태, 경제, 환경, 에너지, 항로, 식량" 등의 비전통적 안전 개념을 포괄하나, 본문은 이중 전자의 '군사적 안전'을 중심으로 기술되었다. 물론, 북극해 해빙은 "생태계, 식량, 환경, 에너지, 항로이용 등"의 비전통적 안전 영역 뿐 아니라, 전통적 의미의 "군사적 이용과 충돌"이 야기할 수 있는 영역 모두에서 한국에 직간접적 미칠 수 있는 요소이다. 이중 전자는 그 결과가 한국에 위협요소와 함께 기회요소를 반영하는 반면, 후자 북극해 접근과 이용, 개발 등에 영향을 미치는 위협적 요소로 제한되어 나타난다는 차이가 있다.

자연과학적 측면에서는, 서론에서 언급한 바와 같이 북극은 '날씨가 만들어지는 부엌(whether kitchen)' 일 뿐 아니라, 유럽,

1) 趙穎, "淺析北極所面臨的法律挑戰及其我國的影響", 海洋開發與管理, Vol.26(3)(2009), p.21

2) 王秀英, "國際法視野中的北極爭端", 海洋開發與管理, Vol.7(2007),pp.14-19.

3) Linda Jakobson, "China Prepares for an Ice-free Arctic", SIPRI Insights on Peace and Security, No.2(2010), p.2.

미국, 캐나다는 물론, 남아시아와 남아프리카의 기후에 영향을 주는 열대성 폭풍(cyclone)과 고기압권(anticyclone)이 발생하는 지점이다. 즉, 갈등 보다는 협력적 틀이 뚜렷하게 형성되어야 하는 지역으로서의 가치가 보다 크다. 이는 우리나라에게 미치는 영향을 고려할 때도 바람직한 접근 방식이다. 또한 이러한 평가는 향후 북극해에 대한 국제적 규범의 틀이 북극해 연안국 들에 의한 '지역해'의 문제가 아닌, 국제사회 전체의 식생과 생활상에 영향을 미치는 '전지구적 문제' 혹은 '지역해와 지역해'의 문제라는 측면에서 접근되어야 한다는 것을 의미한다. 그러나 이러한 접근은 고르바초프가 제창하였던 "인류공동체 전체의 이익"이라는 목적이 "안보 문제의 해결"을 통해서만 성취될 수 있다는 점에서, 현재의 북극해 군사 증강구도를 주도하는 강대국을 설득할 마법으로 작용할 수는 없다. 물론 다른 측면에서는 과연 북극해가 군사적 배치 혹은 군사활동의 영역에서 완전히 자유로워야 하는가에 대한 의문도 있다. 소위 "군사력"이라는 것은 그 목적이 평화적 측면을 의도하는 것은 아니지만, 그 역량 자체는 다양한 형태로 투영될 수 있으며, 특히 북극해에서의 인간 활동 증가에 따라서는 그 활용적 측면이 훨씬 강조될 여지 또한 있기 때문이다. 그러나 동시에 주목할 것은, 현재 북극해를 둘러싼 국제적 레짐(연안국이든 비연안국이든)은 "북극해의 환경변화에 의한 불안정 요소를 해소"할 만한 합의나 협의체는 보이지 않는다는 점이다. 이는 북극해에서 "공동의 현안"이 아직 성숙되지 않았다는 것을 의미하며, 북극해를 관리하는 연안국들의 관심 역시 "평화"라는 목적 보다는 "배타적 이익"을 중심으로 형성되고 있기 때문이다. 결국, 북극의 환경변화에 따른 전지구적 안전 문제는 북극해 연안국 및 비연안국, 그리고 원주민들 간의 상호의존성을 강화하는 "안전의 총합" 측면에서 접근되어야 하며, 이는 동시에 "인류의 현재와 미래 생존"문제에서 접근되어야 한다는 것을 의미한다.





북극에너지회의의 시사점

김 호 선 (극지연구소 미래전략실)

I. 북극에너지회의의 성격 및 추진경과

2015년 10월 28-30일에 걸쳐 미국 페어뱅크스에서 개최된 북극에너지회의는 올해 들어 2011년 이후 세 번째로 추진된 북극이사회 지속가능개발분과(SDWG: Sustainable Development Working Group)의 공식행사이다.

북극에너지회의는 ICSU와 WMO의 공동운영위가 추진한 International Polar Year(2007-2008)의 공식 사업으로 2006년에 채택되었다. 회의성격은 민-관-학 다학제간 포럼으로, 북극이사회의 인가를 받았으며 미 국무부 후원으로 운영하고 있다.

이번 2015년 AES는 Institute of the North가 주관하였으며 미 국무부 외에 아이슬란드 외무부, 알래스카 주, 알래스카대학이 공동 후원하였다. 특히 이번 회의는 북극이사회의 의장국인 미국이 최근 에너지시장의 헤게모니를 잡으려는 의지를 반영하듯, 상류부문에서 하류부문에 이르기까지 다양한 주제를 다루었다. 그러나, 이번 회의는 공공롭게도 오일메이저인 셸(Shell)이 북극개발에 대한 투자를 중단한다는 언론보도가 공개된 직후에 개최되어 다수의 참가자들이 기대한 북극의 유가스전 개발은 논쟁의 대상에서 빗겨나가는 결과를 가져왔다. 특히 셸의 투자 중단에 대해 미국 에너지성의 반응이 미온적인 것에 대한 불만은 북극에 대한 민간투자의 한계를 실감하게 하는 단면을 보여주었다.

대신, 이번 회의는 컷치프레이즈, "Security and Affordability for a Resilient North"를 지속가능개발이라는 큰 틀에서 에너지정책을 다루었는데 '에너지안보'를 여는 때보다 강조하는 회의가 되었다. 특히, 에너지원의 다변화에 있어 신재생에너지의 역할이 대두되었다.

과거 AES는 2007년 10월 앵커리지에서 Arctic Energy Technology Conference를 시점으로 개최되기 시작하였다. 이후 2013년 아이슬란드 AES에 이어 금년 2015 AES로 이어졌다. 2007년 AES 회의는 에너지 개발 및 탐사(27%)¹⁾, 극지의 신재생에너지(25%), 북극 에너지 프로젝트의 환경, 사회-경제, 지속가능성 영향분석(28%)에 대하여 논의하였다. 2013년 AES는 Arctic Development Bank 설립 또는 Arctic Resilience Fund 조성 등을 논의함으로써, 북극 에너지개발에 대한 Public-Private 파트너십이 강조되었다. 특히, 에너지규제와 관련한 사회-경제적 편익에 대해 집중 논의할 정부간 협의체를 구축하는 등 당면한 정책과제를 이슈화하고 해결할 실질적인 채널 구축에 관심이 집중되었다.

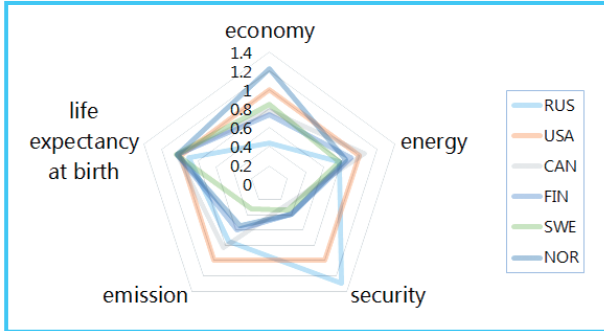
과거의 AES 회의와 비교하면, 이번 2015년 AES는 신재생에너지에 대한 관심이 고조되었다는 점을 특징이라 할 수 있다. 특히 이러한 배경은 미국이 이번회의를 통해 알래스카지역의 마이크로 전력망사업(다수의 소규모 분산전원으로 구성된 전력망사업)을 북극이사회 지속가능개발분과(SDWG: Sustainable Development Working Group)의 시범사업으로 제안하는 데 일익을 하게 된다.

II. 에너지안보와 기후안보 차원에서 바라본 북극권국가들의 지속가능개발 정책성과

북극권국가들의 에너지-기후정책을 지속가능개발 성과지표를 통하여 진단해보면 다음 <그림 1>과 같다. <그림 1>에 의하며,

1) ()안의 수치는 발표된 총 논문 수 대비 해당 주제의 논문 비중을 백분율로 표기하였음.

북극이사회 회원국 중 상대적으로 가장 경제, 에너지, 보건, 군사 면에서 가장 균형 잡힌 성장을 국가는 미국으로 평가된다.

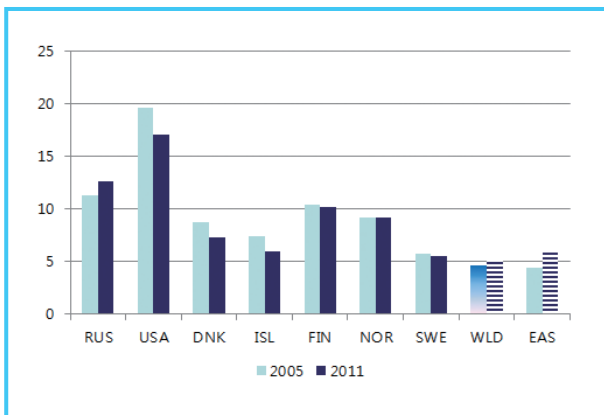


〈그림 1〉 북극권국가들의 지속가능개발 지표 비교

* 출처: 본 자료는 WDI(World Development Indicator) 자료를 지속가능개발 지표 중심으로 정리한 자료임

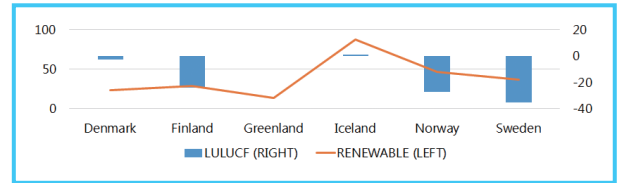
여기서 캐나다와 러시아는 방위산업 면에서 가장 대조적인 성과지표를 보여주는데, 캐나다는 북극이사회 회원국 중 방위산업에 대한 투자가 가장 적은 반면, 러시아는 군사목적의 투자가 가장 큰 국가로 꼽힌다. 스웨덴의 경우 배출량이 가장 인구대비 적은 국가로 핀란드와 함께 기후정책을 성공적으로 이끈 국가로 평가된다. 이는 이들 국가의 조세체계가 탄소세에 기반을 두고 있다는 점을 그 배경으로 들 수 있다.

이러한 온실가스 배출실적과 기후정책의 성과를 뒷받침할 자료가 바로 〈그림 2〉와 〈그림 3〉이다. 즉, 〈그림 2〉를 보면, 북극이사회 회원국 중에서 2005년 대비 온실가스 배출량이 줄어든 국가는 러시아와 노르웨이를 제외한 대부분의 북극이사회 회원국들이다. 이와는 대조적으로 전 세계 배출량(〈그림 2〉에서 WLD로 표기)과 동북아 국가(〈그림 2〉에서 EAS로 표기)들은 2005년 대비 2011년 온실가스 배출량은 증가하였다.



〈그림 2〉 북극이사회 회원국의 1인당 온실가스 배출추이 (자료: WDI, 단위: tCO2)

물론 미국의 경우는 셰일가스가 온실가스 감축에 가장 큰 기여를 하였지만, 그 외의 북극권 국가들은 〈그림 3〉과 같이, 탄소세를 도입하고 LULUCF(land use, land-use change and forestry)와 같은 조림사업과 신재생에너지 보급에 적극적이었기 때문이다. 특히, 아이슬란드는 지열, 노르웨이와 스웨덴 등은 수력과 태양열 등 신재생에너지 비중이 총 전력생산의 20%가 넘는다.



〈그림 1〉 북극권국가들의 지속가능개발 지표 비교

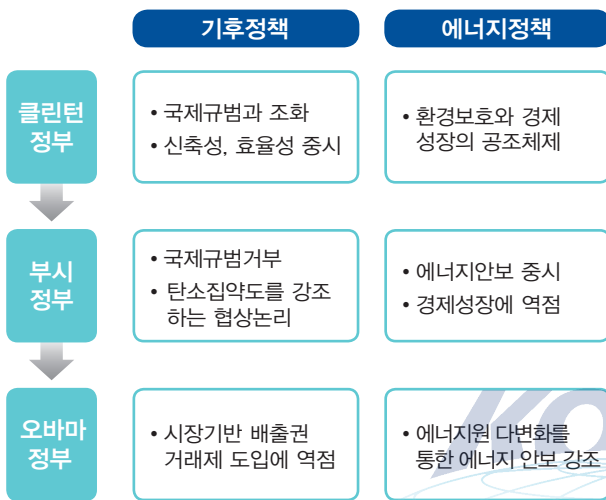
III. 북극이사회 의장국인 미국의 에너지 - 기후 안보정책

미국은 에너지안보를 가장 중요한 정책이슈 중 하나로 다루고 있는데 그 이유는 에너지가격의 변동성이 자국 내 경제는 물론 군사, 외교, 정치, 사회에 미치는 파급효과가 광범위하기 때문이다. 뿐만 아니라 2015년 제21차 기후변화협약 당사국총회에서 채택될 것으로 기대되는 신기후변화체제는 교토체제와는 달리 선진국 중심의 배출권거래가 아닌 글로벌 탄소 시장이 탄생하는 것을 의미한다. 따라서, 미국도 여기에서 예외가 될 수 없다. 물론 신기후변화체제에 대한 합의문 자체의 법적형태가 불분명한 상황이라 법적구속력에 대한 불확실성이 남아 있다.²⁾ 그러나, 법적 구속력이 없는 합의가 될지라도 당사국총회의 결정은 국가들의 행위에 영향력을 발휘하는 등 연성법(soft law)³⁾ 성격을 지닐 것으로 국제법 전문가들이 전망하고 있다. 특히 신기후변화체제에 대한 미국의 입장은 과거 교토의정서에 대한 태도와는 달리 중국과 기후변화에 관한 공동대응에 전격합의 하는 등 2025년까지 2005년

2) 신기후변화체제에 대한 합의문의 법적 형태는 기후변화협약 (UNFCCC: UN Framework Convention on Climate Change)과 교토의정서(Kyoto Protocol)와의 관계 설정에 따라 달라질 수 있음. 예를 들어 의정서 또는 법적문서로 채택될 경우 법적 구속력이 발휘될 수 있음. 그러나, 신기후변화체제는 UNFCCC를 대체할 가능성은 낮으며 대신 교토의정서와 병렬적 형태 또는 교토의정서를 대체할 수 있음. 가장 유력한 것은 마라케쉬 합의문(2001년 제7차 당사국총회 합의문)과 같이 총회 결정으로 법적 구속력을 발휘하는 것임.

3) 준법률문서(quasi-legal instrument)를 지칭함.

배출량 대비 26~28%를 감축하겠다는 계획을 발표하였다. 이는 지난 2001년 부시 정부가 교토의정서를 미국의 사회적 비용부담, 개도국 감축의무 배제, 의미 있는 감축목표 수립의 실패 등을 이유로 탈퇴한 것과는 극명한 대조를 보인다. 이렇게 미국정부가 기후체제에 대해 선회한 배경에는 정하운·이재승(2012)이 지적한 바와 같이, <그림 4>처럼 미 행정부의 기후정책과 에너지정책에 대한 기본적인 큰 틀의 변화를 들 수 있다.

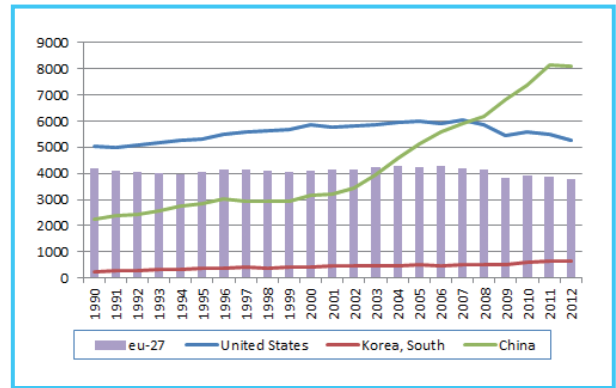


<그림 4> 미 행정부의 기후정책과 에너지정책의 변화

오바마 정부는 과거 클린턴 정부와 같은 민주당 정권에 기반을 두고 있지만 보다 시장중심적인 정책기능에 역점을 두고 있다. 또한 신재생에너지 보급과 동시에 석탄사용을 규제하는 강제적 에너지원 다변화를 꾀하면서 에너지가격 안정성보다는 공급안정성에 힘을 실어주고 있다. 그 이유는 에너지가격의 변동성 또한 시장기능이 제대로 작동한다면 그 리스크를 시장에서 흡수할 수밖에 없고 셰일가스 영향으로 석유를 대체하는 효과가 과거대비 긍정적이기 때문이다. 즉, 에너지원간의 상대가격을 고려할 때 셰일가스의 등장이 연료대체를 용이하게 해줌으로써 전반적으로 감축비용을 줄여주는 효과를 가져왔기 때문이다.

다음은 전 세계 온실가스 배출량 중 미국과 EU의 위상이 과거 대비 감소하고 있는 것도 미국이 지난 정부 대비 기후정책에 보다 적극적으로 대응하는 배경으로 작용한다. <그림 5>는 바로 이러한 현상을 보여주는 단면으로 미국과 중국의 배출추이가 극명한 대조를 이루고 있다. 즉, 셰일가스 수혜를 누린 미국이 온실가스 배출량이 급증하는 중국과 신기후변화 체제에 공동대응키로 한 것은 단지 정치적인 합의만을 의미하지 않는다는 얘기다. 중국은 셰일가스 매장량이 미국 다음

으로 많다. 결국 미국은 중국으로의 셰일가스 관련 기술이전을 염두에 두고 있고, 중국은 온실가스 감축을 셰일가스로 실현한다는 수혜를 기대한다는 것이다.



<그림 5> 미국과 중국의 에너지 기반 온실가스 배출량 추이 (자료: 미국 에너지성, 단위: 백만tCO₂)

이와 같이 미국의 에너지정책과 기후정책은 에너지원의 다변화와 공급원의 다변화를 통한 에너지안보에 근간을 두고 있다. 단지 80년대와 90년대의 오일쇼크를 경험할 때의 에너지안보와 다른 점은 글로벌 경기침체로 인하여 달러강세가 더욱 심화되었다는 점이다. 즉, 유가가 미시적 차원의 에너지비용 상승 또는 감소를 뛰어넘어 주요 거시경제지표로 자리매김을 하게 됨에 따라, 달러화 대비 신흥국들의 환율변동성이 글로벌 경제의 기초체력을 약화시키는 요인으로 작용하고 있다. 이러한 맥락에서 오바마 행정부는 2011년 12월 국무부 내에 에너지자원국(Bureau of Energy Resource)을 신설하는 등 에너지 협력외교를 다각적으로 추진하고 있다. 오바마 행정부의 에너지외교전략을 한마디로 요약하면, 에너지자립도를 키우고 중동 에너지 의존도를 감소시키며 국제유가를 안정시키고 석탄에서 가스로의 원활한 대체를 통하여 기후변화 대처능력중대로 함축된다. 이를 위하여 오바마 행정부는 다원주의와 이슬람세계와의 대화전략으로 외교정책의 변화를 시도했으나, 최근 들어 IS 테러 등 난민사태가 심각해지면서 외교전략에도 수정이 있을 것으로 전망된다.

IV. 북극 연구 및 경제활동 활성화를 위한 시사점

이상에서 북극에너지회의를 통하여 북극권국가들의 에너지-기후정책이 신재생에너지 정책으로 귀결됨을 서술하였다. 물론 에너지안보와 기후안보가 단지 신재생에너지에만 의존하는 것을 의미하는 것은 아니다. 그러나 신재생에너지에 대한

기술력을 확보하지 않고서는 에너지안보와 기후안보를 충족 시키기 어려운 것이 우리가 당면한 현실이다.

따라서 이번 2015년 북극에너지회의가 시사하는 바는 기존의 극지활동 활성화 전략이 에너지안보와 기후안보차원의 국제협력사업 발굴로 확대되어야 한다는 메시지로 함축된다. 이는 과학연구와 정책연구의 융합이 선제적으로 이루어져야 하고, 다양한 협력채널을 확보하는 노력이 수반되어야 함을 의미한다. 즉, 북극은 지역이슈가 아닌 글로벌 이슈임을 국제 사회와 함께 공유하는 인식의 변화에서 출발해야 할 것이다.

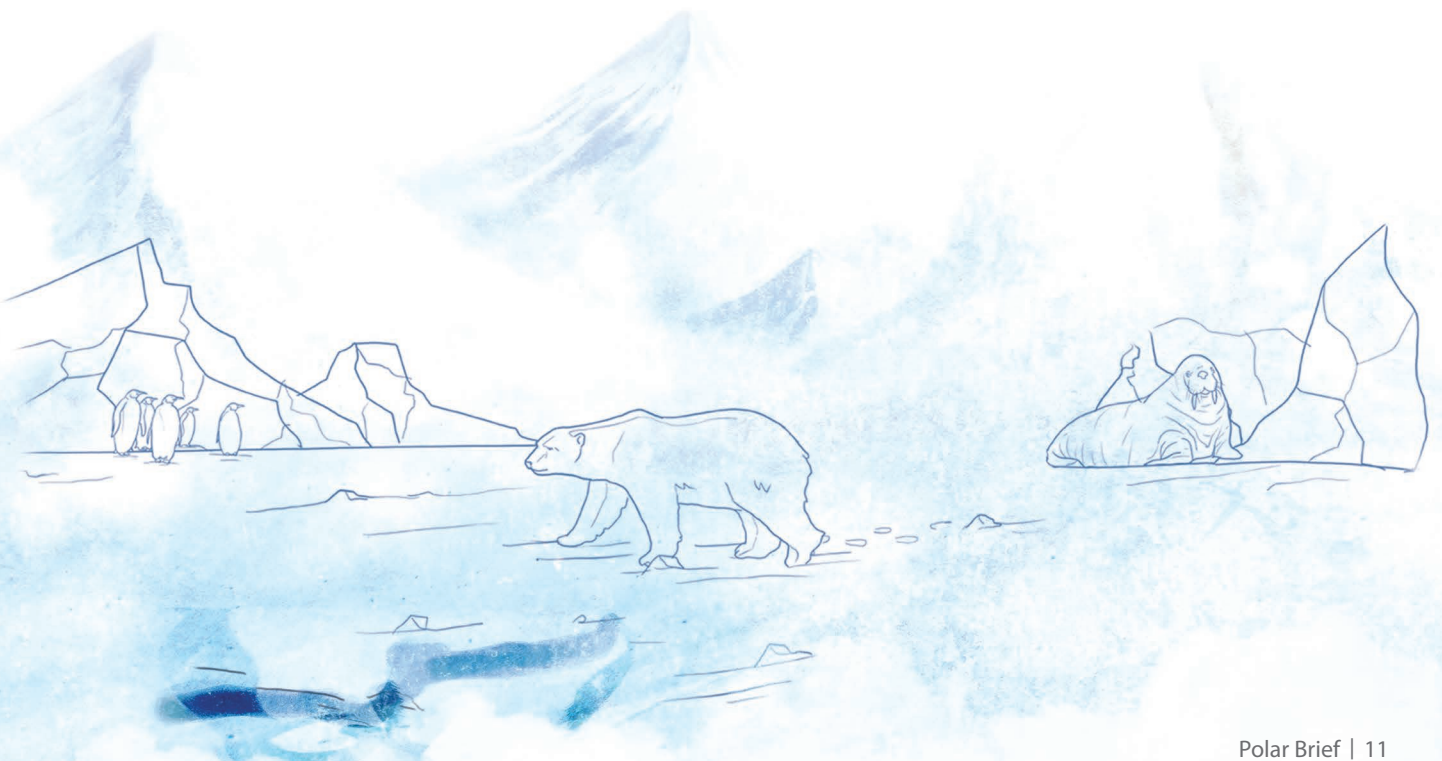
참고문헌

정하윤 · 이재승, 2012. "미국의 기후변화 및 신재생에너지 정책의 전개 과정 분석: 행정부별 특징을 중심으로," 『국제관계연구』, 제17권 제2호, 5-45.

EIA, 2015. Short-Term Energy Outlook 2015.

Kim, Hyo-Sun, 2015. "New Nexus of Climate and Energy Security for the Sustainable Arctic Future," Arctic Yearbook 2015, 422-426.

Nordic Council of Ministers, 2014, Nordic Action on Climate Change.





빙하가 사라지면 북극 툰드라는 어떻게 변할까? - 북극다산기지 기반 육상 생태계 연구 - 이 유 경 (극지연구소 북극환경·자원연구센터)

I. 머리말

북극이라고 하면 흔히 북극해를 덮고 있는 얼음(海氷)과 새하얀 얼음 위를 어슬렁거리며 먹이를 찾고 있는 북극곰을 먼저 떠올리게 된다. 하지만, 북극은 북극해뿐만 아니라 북극을 둘러싸고 있는 툰드라 지역을 포함하고 있다. 툰드라에는 인류의 발이 닿지 않은 미지의 땅이 아직도 많다. 그런데 사람들이 툰드라를 미처 알아보기도 전에 지구 온난화로 인해 툰드라는 줄어 들고 있다.

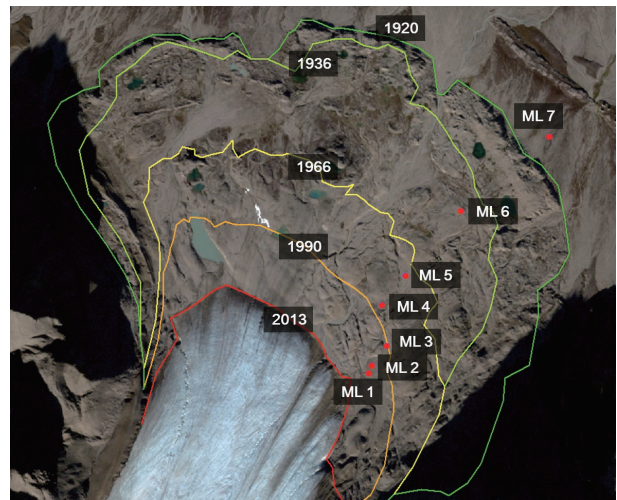
북극은 지구상의 어느 곳보다도 지구온난화로 인한 변화가 뚜렷한 곳이다. 지난 30년 동안 대기온도 뿐만 아니라 툰드라를 덮고 있는 동토의 지면 온도도 높아졌다. 북극해를 덮고 있는 얼음도 해마다 점점 더 녹고 있다. 북극해 해빙은 여름철에 녹아 해마다 9월 초순이면 가장 면적이 줄어들는데 인공위성으로 관측을 시작한 1979년 이후 점차 그 최소 면적이 줄어들어 한반도의 약 18배에 달하는 얼음이 사라졌다고 한다.

북극해 뿐만 아니라 북극의 육상에서도 빙하가 줄어들고 있다. 우리나라 다산과학기지가 위치한 스발바르에서도 빙하가 녹아서 사라지는 현상을 직접 확인할 수 있다. 다산과학기지에서 동쪽으로 6 km 정도 가면 지구상에서 가장 빠르게 빙하가 사라지고 있는 빙하중의 하나인 중앙로벤빙하가 있다. 중앙로벤빙하는 지난 100여 년 동안 5 km²나 되는 빙하가 사라졌다(그림 1). 서울월드컵경기장 23개나 되는 빙하가 사라져버린 것이다. 빙하가 녹으면 빙하에 덮여 있던 지면이 드러나고, 빙하 녹은 물이 낮은 곳으로 흘러내리면서 일시적으로 개울이 만들어진다. 때로는 개울물이 넘쳐 주변에 흙과 모래가 쌓이면서 생태계에 교란이 일어나기도 한다. 본 연구에서는 빙하가 사라지면서 새롭게 드러나는 지면에 토양 미생물과 식물이 정착하는 과정을 파악하고, 이러한 변화가 토양 유기물과 대기중의 온실

기체 방출과 어떤 상관관계가 있는지 이해하고자 한다. 본 연구는 정부의 '북극정책 기본계획(2013. 12)' 과 '북극정책시행계획(2015. 4)' 에서 제시한 '북극다산기지 기반 연구·활동 확대' 를 구체적으로 시행하는 연구이며, 극지연구소 연구발전 전략 2025의 8대 중점연구분야 중 '북극환경·자원연구' 에 해당하는 연구이다.

II. 중앙로벤빙하 후퇴 지역에 정착한 토양 미생물

빙하후퇴 시기에 따른 토양 세균 다양성과 분포 패턴 변화를 분석하기 위하여, 중앙로벤빙하 후퇴지역에서 빙하 후퇴시기에 따라 총 7지점에서 각 지점당 3개씩 선상법(line transect)으로 표층토양(0~5cm)을 시료를 확보하였다(그림 1).

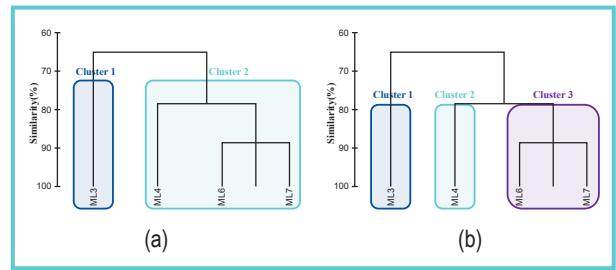


〈그림 1〉 중앙로벤빙하의 빙하 후퇴 지역. ML 1부터 ML7은 토양 시료를 채취한 지점이며, 실선은 인공위성과 항공 사진을 분석하여 빙하에 덮여있던 위치를 표시한 빙하 후퇴선으로 지난 97년 동안 꾸준히 빙하가 녹아서 사라진 것을 볼 수 있다.

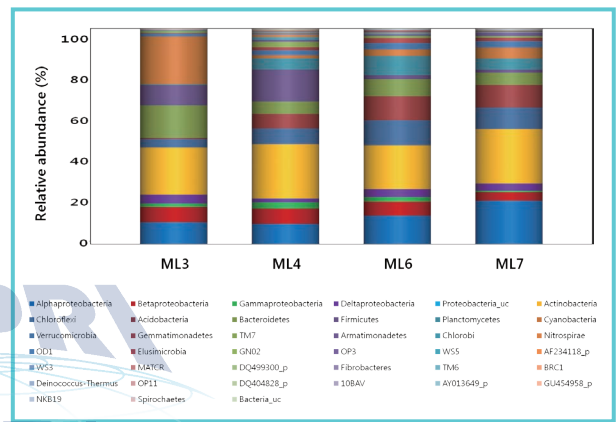
토양으로부터 직접 DNA 추출을 시도하였는데, 빙하가 사라진 지 얼마 지나지 않았거나 하천 범람으로 인해 교란을 받아 맨땅이 드러난 토양에서는 DNA가 확인되지 않았다(표 1). 세균 군집은 시간의 흐름에 따라 명확하게 구분되어서, 빙하로부터 벗어난 지 오래된 6번과 7번은 비교적 최근에 빙하가 사라진 3번, 4번과 따로 묶였다(그림 2).

지점	서식 생물	빙하후퇴 시기	노출된 평균연도 (years)
ML1	맨땅		
ML2	녹조류, 남조류	2011-1990	10.5
ML3	생물학적 토양피막 (Biological soil crust)		
ML4	자주범의귀 (Saxifraga oppositifolia)가 드물게 분포	1990-1966	33
ML5	맨땅		
ML6	맨땅	1966-1936	66
ML7	북극콩버들, 북극이끼장구채 (Salix polaris, Silene acaulis)	소빙하기 (Little Ice Age, LIA) No data	No data

〈표 1〉 샘플링 지점의 식생 분포와 빙하 후퇴 시기



〈그림 2〉 종양로벤빙하 후퇴지역 토양 세균 군집의 유사도 비교. (a) Bray-Curtis similarity 70%일 때 세균 군집은 2개의 클러스터로 구분되고, (b) Bray-Curtis similarity 80%일 때 세균 군집은 3개의 클러스터로 구분되었다.



〈그림 3〉 빙하 후퇴시기에 따른 토양 세균 군집구조 변화

ML3	ML4	ML6	ML7	OTUs	Phylum	Class	Order	Family	Genus	Species	Acc. No.	Identity %
9.8	37.6	4.8	2.7	OTU_1	Firmicutes	Bacilli	Bacillales	Bacillaceae	Bacillus_g26	<i>Bacillus pseudoculphilus</i>	X76449	92
5.8	11.6	5.5	0.4	OTU_2	Actinobacteria	Actinobacteria_c	Micrococcales	Intrasporangiaceae	Oryzihumus	<i>HQ462540_s</i>	HQ462540	97
22.8	6.9	1.2	0.0	OTU_3	Actinobacteria	Actinobacteria_c	Micrococcales	Intrasporangiaceae	Oryzihumus	<i>GQ397075_s</i>	GQ397075	96
0.0	0.3	11.3	10.6	OTU_4	Acidobacteria	Chloracidobacterium_c	Blastococcales	Blastococcaceae	AY281958_g	<i>FJ479144_s</i>	FJ479144	99
17.0	0.3	1.3	3.5	OTU_5	Cyanobacteria	Chroobacteria	Oscillatoriales	Pseudanabaenaceae	Pseudanabaena	<i>Pseudanabaena tremula</i>	AF218371	100
3.5	2.2	5.3	2.4	OTU_6	Proteobacteria	Alphaproteobacteria	Sphingomonadales	Sphingomonadaceae	Sphingomonas	<i>FM211709_s</i>	FM211709	99
0.2	2.4	2.4	3.8	OTU_7	Proteobacteria	Alphaproteobacteria	Rhizobiales	Rhodoglotrophi_f	FM877535_s	<i>FM877535_s</i>	FM877535	99
4.0	2.1	4.3	0.0	OTU_8	Actinobacteria	Actinobacteria_c	Micrococcales	Intrasporangiaceae	Oryzihumus	<i>HQ462540_s</i>	HQ462540	96
0.0	1.3	2.0	4.8	OTU_9	Actinobacteria	Thermoleophilina	Solirubrobacterales	EU861899_f	EU861899_g	<i>Patulibacter ginsengiterrae</i>	AJ243919	94
0.2	3.8	1.9	0.2	OTU_10	Actinobacteria	Actinobacteria_c	Micrococcales	Dermatophilaceae	Austwickia	<i>Austwickia cholonae</i>	JF417732	97
0.0	0.6	3.7	5.6	OTU_11	Actinobacteria	Actinobacteria_c	Frankiales	Nakamurellaceae	Nakamurella	<i>JF417732_s</i>	JF417732	94
0.0	0.2	9.5	0.0	OTU_12	Acidobacteria	HQ645210_c	HQ645210_o	HQ645210_f	HQ190481_f	<i>HQ190481_f</i>	HQ190351	97
12.7	0.0	0.0	0.0	OTU_13	Bacteroidetes	Bacteroidia	Bacteroidales	Paludibacter_f	Paludibacter_f_uc	<i>AJ488070_s</i>	AJ488070	94
0.9	1.1	4.5	1.5	OTU_14	Actinobacteria	Actinobacteria_c	Micrococcales	Intrasporangiaceae	Oryzihumus	<i>HQ462540_s</i>	HQ462540	97
0.0	0.6	1.9	4.3	OTU_15	Proteobacteria	Alphaproteobacteria	Rhodospirillales	EU861940_g	EU861940_g	<i>AM696989_s</i>	AM696989	96
1.2	2.9	1.7	0.1	OTU_16	Actinobacteria	Actinobacteria_c	Micrococcales	Intrasporangiaceae	Oryzihumus	<i>GQ397075_s</i>	GQ397075	96
0.0	0.0	1.5	5.1	OTU_17	Proteobacteria	Alphaproteobacteria	Rhizobiales	Hyphomicrobiaceae	EU753663_g	<i>FJ455876_s</i>	FJ455876	94
0.9	0.3	0.9	4.3	OTU_18	Cyanobacteria	Cyanobacteria_c	Oscillatoriales	Pseudanabaenaceae	DQ181682_g	<i>DQ181682_g</i>	DQ181682	99
0.0	0.0	0.9	5.3	OTU_19	Actinobacteria	Actinobacteria_c	Pseudonocardiales	Pseudonocardiaceae	Pseudonocardia	<i>Pseudonocardia mongoliensis</i>	AB521671	98
0.0	0.1	0.1	5.8	OTU_20	Proteobacteria	Alphaproteobacteria	Rhodospirillales	Acetobacteraceae	EU861940_g	<i>EU861940_g</i>	EU861940	95
0.0	0.2	0.5	5.1	OTU_21	Actinobacteria	Thermoleophilina	Solirubrobacterales	Solirubrobacteraceae	Solirubrobacter	<i>FJ479288_s</i>	FJ479288	97
0.0	2.8	1.2	0.4	OTU_22	Nitrospirae	Nitrospira_c	Nitrospirales	Nitrospiraceae	Nitrospira	<i>DQ058676_s</i>	DQ058676	99
0.0	0.4	4.3	1.6	OTU_23	Chloroflexi	Anaerolineae	Anaerolineales	Anaerolineaceae	GQ396701_g	<i>AB240474_s</i>	AB240474	94
0.2	0.2	2.7	2.5	OTU_24	Chloroflexi	Chloroflexia	Chloroflexiales	FJ479339_f	FJ478841_g	<i>GQ397052_s</i>	GQ397052	96
0.2	1.8	1.2	1.1	OTU_25	Proteobacteria	Alphaproteobacteria	Rhizobiales	Rhodoglotrophi_f	AF370880_g	<i>GQ396966_s</i>	GQ396966	99
1.6	2.6	0.0	0.0	OTU_26	TM7	TM7_c	TM7_o	TM7_f	TM7_g	<i>AJ318136_s</i>	AJ318136	98
0.0	0.2	0.8	3.7	OTU_27	Proteobacteria	Alphaproteobacteria	Rhizobiales	Bradyrhizobiaceae	Bradyrhizobium	<i>Bradyrhizobium canariense</i>	AJ58025	100
0.5	1.7	1.5	0.4	OTU_29	Proteobacteria	Betaproteobacteria	Bacteroidales	HQ014645_f	HQ014645_g	<i>EFS16814_s</i>	EFS16814	98
0.0	1.2	1.3	1.5	OTU_30	Acidobacteria	EU686603_c	EU686603_o	EU686603_f	EU686603_g	<i>EF688341_s</i>	EF688341	99
0.0	2.7	0.0	0.0	OTU_31	Acidobacteria	HQ645210_c	HQ645210_o	HQ645210_f	HQ190481_f	<i>AY921884_s</i>	AY921884	97
2.1	0.5	1.2	1.1	OTU_32	Proteobacteria	Alphaproteobacteria	Sphingomonadales	Sphingomonadaceae	Sandarakinorhabdus	<i>FR682701_s</i>	FR682701	100
0.7	2.4	0.1	0.0	OTU_33	Actinobacteria	Actinobacteria_c	Corynebacteriales	Nocardiaceae	Nocardia	<i>Nocardia nova</i>	Z36930	99
0.0	0.7	0.5	2.5	OTU_34	Chloroflexi	GQ396871_c	GQ396871_o	GQ396871_f	GQ396871_g	<i>GQ396871_g</i>	GQ396871	98
4.7	0.8	0.0	0.0	OTU_35	Proteobacteria	Betaproteobacteria	Burkholderiales	Comamonadaceae	Rhodoferax	<i>Rhodoferax fermentans</i>	LD16211	99
0.5	0.5	3.5	0.3	OTU_36	Proteobacteria	Betaproteobacteria	Burkholderiales	Oxalobacteraceae	EU636042_g	<i>EU636042_g</i>	EU636042	98
0.0	0.0	0.0	3.6	OTU_37	Proteobacteria	Alphaproteobacteria	Rhizobiales	Acetobacteraceae	EU861940_g	<i>AM696989_s</i>	AM696989	100
0.0	0.7	0.1	2.5	OTU_38	Actinobacteria	Actinobacteria_c	Kinnosporales	Kinnosporaceae	Kinnosporina	<i>Kinnosporina rhamosa</i>	AB03035	95
0.0	0.0	0.0	3.6	OTU_39	Proteobacteria	Alphaproteobacteria	Rhizobiales	Acetobacteraceae	EU861940_g	<i>AY192273_s</i>	AY192273	95
6.5	0.0	0.0	0.0	OTU_40	Cyanobacteria	Hormogoneae	Nostocales	Nostocaceae	Trichormus	<i>Trichormus variabilis</i>	DQ234832	97
0.0	1.3	0.4	1.3	OTU_41	Acidobacteria	Chloracidobacterium_c	Blastocellales	Blastocellaceae	EU861940_g	<i>AY395388_s</i>	AY395388	98
2.1	0.3	1.3	0.9	OTU_42	Firmicutes	Clostridia	Clostridiales	Clostridiaceae	Clostridium	<i>Clostridium estertheticum subsp. laramiense</i>	AJ506115	97
0.0	0.2	2.1	1.5	OTU_43	Gemmatimonadetes	Gemmatimonadetes_c	Gemmatimonadales	Gemmatimonadaceae	EU421850_g	<i>EU421850_g</i>	EU421850	97
0.0	0.1	1.5	2.2	OTU_44	Proteobacteria	Betaproteobacteria	Burkholderiales	Sphaerotilus_f	AM77983_g	<i>AJ964894_s</i>	AJ964894	96
0.4	1.2	1.3	0.3	OTU_45	Proteobacteria	Betaproteobacteria	Burkholderiales	Comamonadaceae	Polaromonas	<i>Polaromonas glacialis</i>	HMS58368	99
0.0	0.8	1.3	1.0	OTU_46	Proteobacteria	Alphaproteobacteria	Rhizobiales	Bradyrhizobiaceae	DQ123621_g	<i>EU937939_s</i>	EU937939	98
0.4	0.2	0.3	2.4	OTU_47	Cyanobacteria	Gloeobacteriales	Gloeobacterales	Gloeobacteraceae	Gloeobacter	<i>Gloeobacter violaceus</i>	BA000045	95
0.2	1.4	1.3	0.0	OTU_48	Proteobacteria	Betaproteobacteria	Burkholderiales	EU786132_o	EU786132_f	<i>AB252928_s</i>	AB252928	98
0.0	0.0	1.7	1.8	OTU_49	Cyanobacteria	Hormogoneae	Nostocales	Nostocaceae	Toxopsis	<i>AY495396_s</i>	AY495396	100
0.0	0.5	3.7	0.0	OTU_50	Proteobacteria	Betaproteobacteria	Burkholderiales	Comamonadaceae	Variovorax	<i>Variovorax ginsengisoli</i>	AB245358	99
1.4	0.8	1.2	0.3	OTU_51	Actinobacteria	Actinobacteria_c	Micrococcales	Intrasporangiaceae	Oryzihumus	<i>HQ462540_s</i>	HQ462540	96

〈그림 4〉 51개의 우점하는 분류군(operational taxonomic units)을 보여주는 Heat map

토양 세균 중 풍부도와 종 다양성은 빙하 후퇴시기에 따라 유사한 패턴을 보여서, 빙하후퇴 초기시기 보다 후기에 세균 다양성이 증가하였다. 빙하가 사라지고 20년 정도 경과한 초기에는 남세균과 의간균이 우점하다가 30년 이상 지난 시기 부터 이들은 급격하게 줄어들었다(그림 3).

빙하후퇴 시기에 따라 우점하는 세균의 종류도 변했다. 빙하 후퇴 초기(ML-3)에 우점한 OTU-3(22.3%), OTU-5(17.0%), OTU-40(6.5%)은 각각 방선균 *Oryzihumus*속 세균 및 남세균 흔들말목에 속하는 *Pseudanabaena tremula*, 나세균 염주말속에 속하는 *Trichormus variabilis*와 높은 상동성을 보였다(그림 4). 반면, 빙하후퇴 중기(ML-4)에 우점한 OTU-1(37.6%)은 후벽균에 속하였고, OTU-2와 3은 방선균 *Oryzihumus*속에 속했다. 또한 빙하후퇴 중기(ML-6, 7)에 우점한 OTU-4($\geq 10\%$)는 아키토박테리움에 속했다.

III. 중앙로벤빙하 후퇴 지역에 정착한 식물

본 연구에서는 빙하가 사라진 뒤 정착한 식물의 천이를 보여주는 식물 분포 지도를 제작하였다. 우리는 중앙로벤빙하 후퇴 지역을 오랫동안 연구해온 프랑스 연구팀, 고위도 북극지역 식생 전문가인 노르웨이 연구팀과 공동으로 현장 탐사를 하였다. 프랑스 툴루즈대학 라플리 교수의 과거 연구지 정보와 현장의 식생 분포 현황을 종합하여 총 129개 지역을 선정하였다. 고위도 북극지역 식생 전문가인 노르웨이 트롬소 대학의 닐센 교수도 현장 탐사에 참여하여 각 지점마다 4개의 방형구를 놓고 빙하가 사라진 뒤에 정착하여 자라고 있는 식물을 정확하게 조사하였다. 총 129개 지역에서 환경요소와 식생을 광범위하게 조사한 뒤 다변량 분석으로 정량적 식생 데이터를 정성적 데이터 형태로 변환하였다. 또한 식생 데이터와 샘플링 지점 자료를 이용하여 대응 인자를 분석하고, 이 지역에 식물은 종류에 따라 식생 피도나 토양 연대, 노출 정도, 수분 경사 등과 관련되어 있는 것을 확인하였다.

식생과 샘플링 지점을 8개의 계층으로 분류하였는데, 각 계층의 식생 특성은 다음과 같다.

- ① 식생이 거의 존재하지 않음. 토양이 노출된 지 얼마 되지 않아 식물이 정착할 기회가 적었거나, 눈 또는 빙하가 녹은 물이 흘러 식생을 제거하였을 수도 있고, 매우 노출된 지역처럼 식생이 정착하기에 환경 조건이 아주 열악해서 일 수 있음
- ② 노출이 많이 되지 않았으나, 낮은 식생 피도. 2-5 종류의

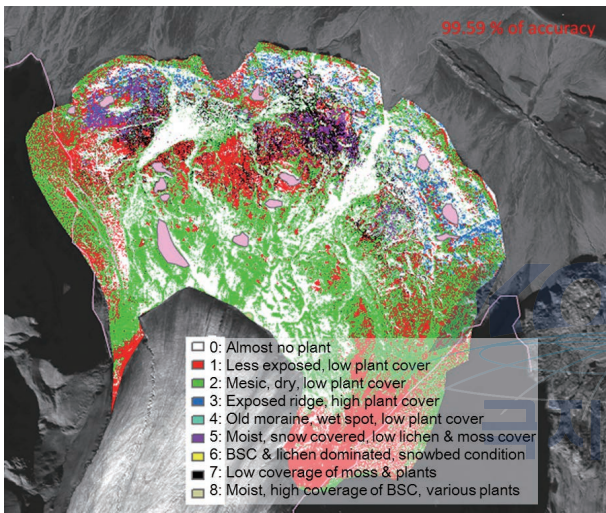
식물이 10% 이하의 식생피도를 이룸. 생물학적 토양 피각 5% 이하, 지의류는 1% 이하임. 이 지역을 구성하는 식물은 주로 자주범의귀 또는 북극콩버들

- ③ 중간 정도의 건조 또는 건조한 지역이며, 빙하퇴적물(moraine)이 오래 노출된 지역. 식생 피도가 낮음. 전체 식생 피도는 12% 이하. 생물학적 토양 피각 10% 이하이고 지의류는 5% 이하. 대표적인 관속식물은 자주범의귀
- ④ 언덕처럼 노출이 많고, 식생 피도가 높음. 3-7종의 식물이 분포. 생물학적 토양 피각과 지의류의 피도는 10% 이하. 다발범의귀와 얼룩사초와 같은 빙하퇴적물에서 잘 발견되지 않는 종들이 분포. 자주범의귀보다 북극콩버들의 피도가 더 높음(10-20%). 식생이 간헐적으로 분포하는 class 1-3 중에서 class 3은 노출이 많이 된 지역으로 보다 많은 종들이 분포하고 식생 피도도 상대적으로 높음
- ⑤ 식생 피도가 낮음. 생물학적 토양 피각과 지의류의 피도가 5% 이하이며, 종의 숫자도 3-6 종임. 이끼류와 관속식물의 피도는 2% 이하. 긴털송이풀과 *Draba*(꽃다지류) 종의 분포는 이 지역이 빙하퇴적물에서 오래된 지역임을 나타내고, *Juncus biglumis*(골풀류) 분포는 습윤한 상태의 지역이 있음을 나타냄
- ⑥ 식물 종은 3-6종이 분포. 이 class는 생물학적 토양 피각이 3-50%의 넓은 범위를 보이고, 지의류와 이끼류의 피도가 낮은 것이 특징임. 관속식물의 피도는 2-16%에 달함. *Silene furcate*와 *Juncus biglumis*, 자주꽃다지아재비 종들이 분포하는 것으로 보아 미세한 입자의 토양(미사, 점토)이며, 습윤하고, 눈으로 덮인 서식처의 특성을 가지는 것으로 사료됨
- ⑦ 식물은 2-4종이 분포하고 있는 식물 종수가 낮은 class. 생물학적 토양 피각과 지의류가 우점하고, 이끼류와 관속식물의 피도는 10% 이하임. 중간정도의 snowbed 조건에서 주로 나타나는 경향이 있는 북극이끼장구채가 종종 발견이 됨
- ⑧ 식물은 2-4종이 분포하고 있는 식물 종수가 낮은 class. 생물학적 토양 피각과 지의류의 피도는 15-20% 범위임. 이끼류와 관속식물은 주로 1-4, 4-5% 수준으로 낮음. 주요 식생은 자주범의귀와 북극콩버들
- ⑨ 식물은 2-7종이 분포. 생물학적 토양 피각의 피도가 15-70%로 매우 높으나, 지의류는 15-20% 수준. 이끼류는 3-4%이고 관속식물의 피도는 약 20%. 여러 식물 종으로

구성된 지역도 있지만, 자주범의귀가 대부분의 식생 피도를 이루고 있음. *Phippsia algida*와 *Luzula nivalis*와 같은 식물의 분포는 이 지역이 중간정도의 snowbed 조건임을 나타냄

주기로 이 지역의 토양유기탄소-식생-미생물 분포 변화 정보를 국제사회에 제공할 계획이다.

식생 자료와 계층을 알고 있는 지점의 자료를 학습집합(training set)으로 설정하고, 최대우도 추정법(maximum likelihood estimator)을 통해 식생 데이터가 없는 픽셀의 환경인자(고도, 사면 경사, 위성자료, 토양 연대 및 2013년 빙하 끝에서부터 거리)를 고려하여, 계층을 지정하여 식물 분포 지도를 완성하였다(그림 5).



〈그림 5〉 중앙로벤빙하 후퇴 지역의 식물 분포 지도

식물 분포 지도를 보면 중앙로벤빙하 후퇴 지역에는 주로 0, 1, 2 계층이 많았다. 계층 0, 1, 2에는 식생이 거의 분포하지 않거나, 매우 피도가 낮은 곳이다. 나머지 계층은 빙하쪽 방향, 사면을 따라 빙하퇴적물의 바깥쪽 가장자리에 주로 분포했다. 빙하에 가까운 지역보다 빙하퇴적물의 가장자리의 경관이 보다 다양하므로, 다양한 서식처를 제공하여 더 많은 계층이 분포하는 것으로 보인다. 빙하가 사라지고 공기중에 노출된 토양에 새롭게 정착하여 자리를 잡은 식물로는 북극콩버들(*Salix polaris*), 자주범의귀(*Saxifraga oppositifolia*), 북극점나도나물(*Cerastium arcticum*), 눈개미자리(*Sagina nivalis*), 씨범꼬리(*Bistorta vivipara*) 등이 있었다.

IV. 맺음말

우리는 앞으로 다산기지주변에서 극지연구소의 장기 모니터링 사이트로 중앙로벤빙하 후퇴지역을 확보하고 향후 10년



No.7 (제7호)

Polar Brief

ISSN 2384-2946