



No.1 (제 1호)

Polar Brief

창간호 2015년 5월 31일 | 발행 : 극지연구소 미래전략실

(406-840) 인천광역시 연수구 송도미래로 26 | Tel. 032-770-8400 | www.kopri.re.kr

Snapshot



- 발간사 (김예동 / 극지연구소장) 2면
- 격려사 (연영진 / 해양수산부 해양정책실장) 3면
- 북극이사회 의장국 변화에 따른 우리의 대응 (진동민 / 극지연구소 미래전략실장) 4면

지난 4월 장관급회의를 계기로 미국이 새로운 북극이사회 의장국(15~17)이 되었다. 지난 의장국(캐나다)의 주제어가 '북극민(Arctic people)을 위한 개발' 이었다면, 미국은 '하나의 북극 : 함께하는 기회, 도전, 책임'을 표방하고 있다. 미국의 북극정책을 토대로 향후 2년간 북극이사회의 운영 방향을 예측하고, 이에 우리의 대응과제는 무엇인지 살펴본다.

극지연구소

- 「환경보호에 관한 남극조약의정서 제6부속서」 비준 대비 극지연구소 대응 방안
(서원상 / 극지연구소 책임연구원) 7면

마드리드의정서 제6부속서는 '환경적 비상사태에 대한 운영자의 책임(Liability)'을 규정하고 있다. ATCM은 매 회기마다 협의당사국의 제6부속서 비준을 촉구하고 있으며, 우리나라도 비준 추진의사를 밝힌 바 있다. 제6부속서의 국내적 이행 시 제기 될 수 있는 법·제도적 쟁점들을 조약상 '운영자(Operator)' 관점에서 검토해 본다.

- 북극 툰드라 식생의 급격한 증가가 초래할 수 있는 미래 기후변화 양상에 대하여
(김백민 / 극지연구소 책임연구원) 11면

지구온난화는 소위 '피드백 현상'에 따라 증폭되고 있는데, 이 현상은 툰드라 동토층에서 가장 명확하게 관측되고 있다. 지구온난화와 빙하감소는 북극의 미생물 등 생명활동을 활성화 하고, 이는 탄소순환과 에너지순환을 교란하여, 다시금 지구온난화가 증폭되는 바, 궁극적으로는 대기대순환을 통하여 우리나라와 같은 중위도 지역기후에 영향을 미친다.

No.1 (제 1호)

Polar Brief



창간호 2015년 5월 31일 | 발행 : 극지연구소 미래전략실

(406-840) 인천광역시 연수구 송도미래로 26 | Tel. 032-770-8400 | www.kopri.re.kr

발간사



지구온난화, 기후변화, 지구의 미래 등 지구촌의 현안을 논의할 때 빠짐없이 등장하는 단어가 극지, 바로 남극과 북극입니다.

극지는 눈과 얼음으로 태양에너지를 반사할 뿐만 아니라 기후변화 모니터링에 필요한 최적의 조건을 제공해 주고, 지구환경의 역사기록을 간직하고 있으며, 막대한 양의 광물자원과 생물자원의 보고입니다. 이러한 환경적·경제적 가치 덕에 지구의 미래라 불리고 있습니다.

남극과 북극은 각각 남극조약과 북극이사회라는 상이한 거버넌스 체제를 갖추고 있지만, 공통적으로 환경의 지속가능성 확보와 과학연구를 통한 인류공영에 기여를 추구하고 있습니다.

극지정책과 북극진출 전략의 기반인 우리나라 극지연구는 기초과학연구의 심화, 응용과학연구 및 융·복합연구 추진, 국제공동연구의 확대, 자연과학과 인문·사회과학 연구의 연계 등의 과제를 안고 있습니다.

이에 극지연구소는 우리나라 극지연구·활동의 발전과 정책수립에 기여하기 위하여, 정책정보지 「Polar Brief」를 발간하게 되었습니다. 「Polar Brief」는 여타 소식지(뉴스레터)와는 달리 극지전문가들의 현안분석과 의견을 담아 극지과학 및 정책 이슈에 관한 담론을 나눌 것입니다.

독자 여러분의 업무와 연구에 참고가 되기를 바라오며, 「Polar Brief」의 발전을 위한 고견과 기고를 부탁드립니다.

감사합니다.

극지연구소 소장 김 예 동



No.1 (제 1호)

Polar Brief



창간호 2015년 5월 31일 | 발행 : 극지연구소 미래전략실

(406-840) 인천광역시 연수구 송도미래로 26 | Tel. 032-770-8400 | www.kopri.re.kr

격려사



하얀 눈과 얼음으로 뒤덮인 남극과 북극, 극지는 지구상에서 가장 신비로운 미지의 세계입니다. 국제사회는 극지가 지구환경 변화와 지구역사의 비밀을 밝히는 열쇠라 여겨 과학연구 활동에 매진하여 왔습니다.

세계 각국은 1959년에 채택된 남극조약에 따라 남극에서 각국의 영유권 주장을 동결한 채 29개국 80여개 과학기지에서 기후변화, 지질, 빙하, 해양, 생물, 생태계, 운석 등 다양한 연구를 진행하고 있습니다. 또한 지구온난화로 인해 얼음에 덮여있던 북극해가 개방되면서, 극지의 과학적 가치에 더하여 경제적·외교적 가치에 주목하고 있습니다.

우리나라는 1988년 남극 세종과학기지 건설과 2002년 북극 다산과학기지 건설을 통하여 세계 8번째로 남·북극 과학기지를 보유한 국가가 되었으며, 2009년 쇄빙연구선 아라온호 건조, 2014년 남극 장보고과학기지 건설 등 선진화된 연구인프라를 기반으로 세계 극지연구 선진국으로 발돋움하고 있습니다. 또한 1989년 남극조약협약당사국의 지위를 획득하고, 2013년 북극이사회의 옵서버 지위를 획득한 우리나라는 남·북극 거버넌스 체제의 핵심 국가로 자리매김 하였습니다.

우리나라가 국제사회에서 극지활동 선진국으로서 제 역할을 수행하기 위해서는 합리적·체계적인 정책수립과 그 이행이 필수적입니다. 우리 정부가 펼치고 있는 '남극연구활동진흥기본계획' 과 '북극정책기본계획' 등 극지정책 중에서도 극지 과학연구는 매우 크고 중요한 비중을 차지합니다. 예컨대 북극의 국제공동연구는 기후변화 등 인류 공통으로 처한 문제의 해결책을 제시하는 한편, 북극권 국가들과의 국제협력에 기여하고, 북극의 기후·해저(지질)·해양·생물 등에 관한 조사 결과는 비즈니스 모델 개발에 필요한 기초자료를 제공하고 있습니다.

해양수산부는 극지정책의 수립을 위하여 국제동향과 국내 전문가들의 다양한 의견에 귀를 기울이고 있습니다. 이에 극지 과학 및 관련분야 전문가의 분석과 제언을 담은 정책정보지의 간행은 매우 고무적입니다.

극지연구소가 간행하는 'Polar Brief' 가 우리나라의 다양한 극지전문가의 의견을 수렴하여 극지연구 진흥과 정책개발에 기여하는 정책정보지로 발전하기를 기대합니다.

해양수산부 해양정책실장 **연영진**





북극이사회 의장국 변화에 따른 우리의 대응 진 등 민 (극지연구소 미래전략실장)

I. 북극이사회 개요

지난 4월 24-25일 캐나다 이칼루이트(Iqaluit)에서 개최된 북극이사회 장관급회의를 계기로 의장국이 캐나다에서 미국으로 변경되었다. 북극이사회는 북극권 8개국¹⁾ 고위당국자간의 포럼으로 1996년 9월 캐나다 오타와(Ottawa)회의에서 북극이사회 설립선언문을 발표하면서 시작되었다. 의장국은 8개국이 2년씩 담당하고 있으며²⁾, 의장국이 종료될 때 장관급 회의를 개최하며 지난 2년간의 성과를 평가하는 내용과 신규 의장국의 중점방향을 포함하는 선언문을 채택하고 있다. 사무국은 별도로 두지 않고 의장국이 돌아가면서 담당하다가 노르웨이가 의장국을 수행하면서 스칸디나비아 3개국이 의장국을 수행하는 기간에 임시로 사무국을 노르웨이 트롬소(Tromsø)에 설치하였으며³⁾, 2013년 1월에는 공식적으로 상설 사무국을 트롬소에 설치하였다. 우리나라는 2002년부터 북극 스발바르(Svalbard)군도 니알슨(Ny-Alesund)에 운영하고 있는 다산과학기지과 쇄빙연구선 아라온호를 기반으로 한 북극연구활동 실적과 계획을 바탕으로 2008년 11월 임시옵저버(ad hoc observer)로 참여하기 시작해, 2013

년 5월 중국, 인도, 이태리, 일본, 싱가포르와 함께 옵저버(observer)자격을 획득하였다. 같은 해 12월 우리나라는 정부차원의 북극분야에 대한 정책기조를 담은 기본계획인 “북극정책기본계획”을 발표하고, 북극활동을 체계적으로 수행하기 위해 노력해 왔으며, 2015년 4월에는 북극권 국가와 양자협력 강화, 북극항로 운항 지원 등을 포함하는 “2015년 북극정책 시행계획”을 발표하였다. 북극이사회는 범북극권의 유일한 정부간 협의체라 할 수 있으며, 2011년 “북극 항공과 해상에서의 수색, 구조 협정(Agreement on Cooperation on Aeronautical and Maritime Search and Rescue in the Arctic)”, 2013년 “북극 해양유류오염준비와 대응에 대한 협력 약정(Agreement on Cooperation on Marine Oil Pollution Preparedness and Response in the Arctic)”을 채택하여 회원국간 국내입법을 권고하는 등 국제기구로서의 면모를 갖추어가고 있다. 신임 의장국인 미국은 2013년 5월 “북극지역에 대한 국가전략”을 발표하였으며 이에 근거하여 매년 실행계획을 발표하고 있다.



1) 캐나다, 덴마크, 핀란드, 아이슬란드, 노르웨이, 러시아, 스웨덴, 미국.
2) 지금까지 의장국은 캐나다(1996~1998), 미국(1999~2000), 핀란드(2001~2002), 아이슬란드(2003~2004), 러시아(2005~2006), 노르웨이(2007~2008), 덴마크(2009~2010), 스웨덴(2011~2012), 캐나다(2013~2014)의 순서로 담당하였다.

3) 진등민 등, “북극의 관리체제와 국제기구: 북극이사회(Arctic Council)를 중심으로”, OPR, Vol.32 (1), 93면.

II. 지난 2년의 북극이사회(의장국 : 캐나다) 반추

캐나다가 의장국을 수임하면서 표방한 주제는 “북극민(Arctic People)을 위한 개발”이었다. 이를 위하여 북극거주자의 삶의 질 개선을 위한 정신건강, 전통지식, 유류오염예방 등을 추진하였으며, 북극 비즈니스를 활성화하기 위해 사업체 대표자들로 구성된 독립된 포럼으로 2014년 9월에 북극경제이사회(AEC)의 신설을 성과로 내세우고 있다. 북극경제이사회는 북극권의 책임 있는 경제개발을 촉진하고 북극이사회 업무에 환북극 비즈니스 전망을 제공하는 것을 목표로 비즈니스 대표들만으로 구성되며, 초대의장은 캐나다가 담당하며, 러시아, 핀란드, 환북극권이누잇이사회에서 각각 1명씩의 부의장을 담당하고 있다. 이외에도 캐나다는 의장국 기간 동안의 주요 실적으로 석유와 북극해 해양활동에서 기인하는 유류오염 예방 협력을 위한 기본계획 수립, 단기성 기후오염원과 관련한 자료 수집, 블랙카본과 메탄 배출 감축을 위한 기본계획 수립 등을 내세웠다. 한편, 캐나다의 정책방향이 북극민이 주도가 되는 것이 아니라, 중앙정부 주도로 이루어지고 북극민을 정책의 대상으로만 다루고 있다는 비판이 있지만, 그래도 우크라이나 사태와 같은 국제정세 속에서 미국을 포함한 유럽국가들과 러시아가 북극 환경보호와 지속가능한 개발을 위해 한 자리에 지속적으로 모였다는 점을 강조하고 있다.

●● <표> 캐나다와 미국의 북극이사회 운영 비전 비교

구분	캐나다 (13~15 의장국)	미국 (15~17 의장국)
비전	북극민을 위한 개발	하나의 북극 : 함께하는 기회, 도전, 책임
중점추진 분야	책임있는 북극자원 개발 / 안전한 북극 항행 / 지속가능한 환북극 사회	북극기후변화 영향 대응 / 북극해 보호 / 북극사회의 경제와 생활여건 개선
경제·사회 여건 개선	전통·지역지식의 활용	재생에너지 시연 개발 / 북극사회에 대한 식수와 폐수서비스 능력 제고
	환북극권 경제발전 촉진과 북극이사회에 비즈니스 참여 기회 제공을 위한 북극경제이사회 설치	범북극 수자원 취약성 지표 개발
기후변화 대응	정신건강증진전략 개발	북극시스템에서 담수의 역할 규명 / 북극권 국가의 자살행동 추적 연구 / 범북극 통신인프라 평가
	블랙카본과 메탄 배출 저감 방안 수립	국내 블랙카본 조사목록 개발 / 북극에 영향을 주는 블랙카본 배출 모니터링 / 북극 기후적응과 복원력에 대한 추가연구
북극환경 보호	기후변화에 대한 적응을 위한 지역사회의 지식과 best practice 공유	북극기후과학 증진 • 범북극디지털해발지도 개발 • 북극지표자 네트워크 개발 • 북극을 위한 조기경보지표개발
	유류오염방지를 위한 실행계획 수립	범북극권에 해양보호구역 설정과 해양환경보호를 위한 다양한 모델 검토 / 해양활동의 생태계기반관리 방안 검토
	국제해사기구의 강제적 Polar Code 개발 협력	Polar Code 2단계 개발 착수
	지속가능한 북극관광과 선박운영 지침 개발	북극해 관리를 위한 지역해프로그램 검토
북극이사회 체제 강화	철새 보호를 위한 북극권 및 비북극권국가의 협력 추진	북극해 오일생산에 따른 현장 소각, 얼음 등 위험물질의 환경영향에 대한 정보 공유 확대 유류유출 대응능력 향상과 결빙해역 및 깨진 얼음이 있는 수역에서 대응 가이드라인 개발 북극해양 산성화 모니터링 제고와 해양산성화에 대한 대중홍보 강화
	상시참여자 (원주민단체)의 능력 제고와 북극이사회외의 조정 능력 개선 및 효율성 극대화	북극해수로위원회, 국제해사기구 등 관련 국제기구와 협력 강화
	북극이사회 자료 아카이브 사업 추진	북극이사회 수요 충족을 위한 북극이사회 조직 검토

III. 향후 2년의 북극이사회(의장국 : 미국) 전망

미국무부 장관 John Kerry는 ‘하나의 북극’만이 존재한다는 점을 강조하면서 미국을 포함한 국가들, 원주민, 북극거주민이 함께 책임 있는 보호를 위해 동참해야 한다는 점을 강조했다. 미국은 의장국 기간의 주제를 “하나의 북극 : 함께하는 기회, 도전, 책임”으로 정하고 기후변화의 영향에 대한 대응, 북극해 안전 지원, 안보와 보호, 북극사회의 경제와 생활여건 개선을 집중 추진할 계획이다. 북극이사회는 북극해양협력 태스크포스와 북극통신인프라 태스크포스를 새롭게 설치하였다. 또한, 북극은 미국 외교정책의 중요한 부분으로 북극이사회가 상시참여자과 옵저버들도 참여하는 전지구적 포럼임을 강조하였다. 아래의 <표>는 세계야생생물기금(WWF)에서 캐나다와 미국의 핵심추진 사항을 비교한 것으로⁴⁾ 북극지역 사회가 석유에너지에 기반하고 있어 경제 및 생활에 고비용이 들어가는 것을 저감하기 위하여 재생에너지 활용을 적극 추진하고, 북극해의 보호를 위하여 생태계기반 관리 등을 체계적으로 추진하기 위한 과학연구 활동을 강화하고 있다.

4) WWF, "Comparing Programmes : Canada versus USA," The circle (WWF Magazine), No.1, 2015, pp.14~15.

2013년 5월에 미국이 발표한 “북극지역에 대한 국가전략”⁵⁾은 1) 북극지역에서 미국의 안보이익 제고와 이를 위하여 안전한 상업활동과 국방을 위한 과학활동 지원, 2) 책임 있는 북극지역 보호와 이를 위하여 북극환경 자원보호, 통합북극 관리방안 수립, 북극해 해도 제작, 북극해 이해 제고를 위한 과학기술과 전통기술 강화, 3) 국제협력 강화와 이를 위한 북극이사회 등 다자간협력 및 양자협력 강화, 유엔해양법협약 가입 추진 등을 제시하고 있다. 이들 3대 목표를 효과적으로 추진하기 위한 전략으로 북극을 갈등이 없는 곳으로 유지하기 위한 협력을 적극 추진하고 북극에서 항행과 비행의 자유 등 합법적 이용을 유지하고, 가장 최신의 과학과 전통지식에 근거하여 의사결정을 추진하며, 건전한 재정을 유지하여 실행성을 제고하며, 북극권국가 및 국제기구 등과 적극적으로 협력하고 알래스카 원주민의 시의적절한 의견 수렴과 조정을 거칠 것을 제시하고 있다.⁵⁾

2015년 1월에 발간된 실행보고서에는 첫 번째 중점추진 사항인 북극지역에서 미국의 안보이익 제고를 위한 활동으로 북극해 해양활동 증가에 따른 북극해 해운활동 분석과 향후 10년간 북극선박활동 예측, 북극지역 통신 인프라를 개발, 북극지역에 대한 대국민 인식 제고, 결빙해역에서 해양활동 능력제고, 국제법과 항해의 자유 증진, 재생에너지 개발 추진, 북극해 부존 비재생에너지 자원의 안전하고 책임 있는 개발 추진 등을 포함하고 있다. 두 번째 중점추진 사항인 책임 있는 북극지역 보호를 위해서는 북극생태계 보전, 위험물질 유출 예방·봉쇄·대응 방안 향상, 균형 있는 경제개발과 환경보호 및 문화가치를 위한 통합북극관리(IAM) 활용, 과학 지식과 전통지식을 통한 북극 이해 증진, 해빙 예보 능력 향상을 위한 관측과 모델링 개발 등을 포함하고 있다. 특히 미국연구재단이 지원하는 북극환경변화연구(SEARCH), 태평양측 북극생물관측망구축(DBO) 추진 등을 포함하고 있으며, 동 연구활동에서 우리나라를 포함한 중국, 일본, 러시아와의 협력체계 구축을 강조하고 있다. 세 번째 중점추진 사항인 북극권국가 및 국제기구 등과 적극 협력을 위해서는 북극유류 유출 예방과 대응 능력을 국제적으로 증진하고, 북극 공해에서의 무질서한 어업활동 방지, 오염물질의 이동 저감, 외래종 유입의 위험성과 영향 평가, 과학연구와 모티터링 활동 증진, 북극해에서 블랙카본 저감, 북극해의 미국대륙붕한계 외측선 설정, IMO Polar Code 개발 및 채택 추진 등을 포함하고 있다.

IV. 우리나라의 대응 과제

미국은 북극이사회가 북극권 국가만의 포럼에서 전지구적 포럼으로 발전하고 있는 점과 북극 환경보전과 평화 유지를 위한 체계적 과학활동을 강조하고 있다. 우리나라는 아시아극지과학포럼(AFOPS)와 아시아북극연구그룹(PAG)의 의장국으로 활동하고 있으며, 쇄빙연구선 아라온호를 매년 북극에 보내 중국과 일본 뿐 아니라, 미국, 러시아, 캐나다 등 북극이사회 국가와 EU 국가에서도 참여하는 국제공동연구활동을 수행하고 있다. 또한, 북극이사회 상설사무국이 설치된 트롬소 프람센터에는 한·노르웨이연구센터를 설치하여 운영하고 있다. 동 센터에는 북극원주민사무국이 입주할 예정이며, 이미 국제동토연구협회(IPA) 사무국도 입주해 있어, 북극 연구활동의 거점으로 발전될 전망이다. 북극활동에서 우리나라의 입지를 강화하기 위해서는 이러한 연구기반을 주축으로 북극이사회가 중점 추진하는 사업에 지속적으로 참여하는 것이 무엇보다 중요하다. 또한, 미국은 북극 연구활동에서 아시아국가와의 협력을 강조하고 있는 바, 북극환경변화연구, 태평양측 북극생물관측망구축연구 등 이미 한·미 양국이 공동으로 추진하는 연구사업 뿐 아니라 양국의 협력을 강화할 수 있는 신규 연구분야로 확대할 필요가 있다. 또한 북극에서의 양국의 협력을 양국의 정상회담이 있을 때 논의될 수 있도록 의제화하는 것이 필요할 것이다.

5) The White House of U.S.A., National Strategy for the Arctic Region, 2013. 5. 10. at https://www.whitehouse.gov/sites/default/files/docs/nat_arctic_strategy.pdf.



「환경보호에 관한 남극조약의정서 제6부속서」 비준 대비 극지연구소 대응방안 * 서 원 상 (극지연구소 책임연구원/법학박사)

I. 머리말

「환경보호에 관한 남극조약의정서 제6부속서」(이하 제6부속서)는 「환경보호에 관한 남극조약의정서」(이하 마드리드의정서)의 제15조(비상대응조치) 및 제16조(배상책임)의 구체적 시행을 위하여 채택된 것으로, 마드리드의정서의 불가분의 일부를 구성하며 의정서와 동일한 법적 효력을 지닌다.¹⁾

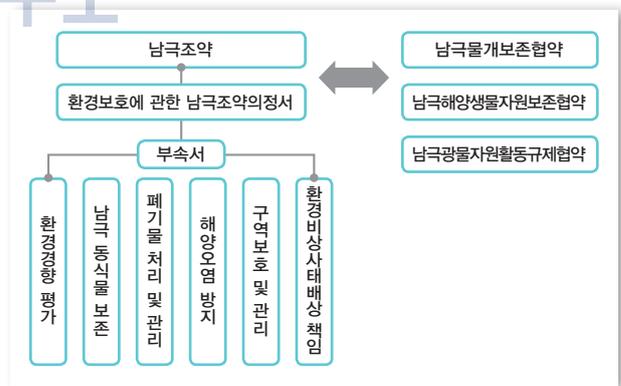
제6부속서는 남극활동 운영자(operator)에게 환경적 비상사태에 관한 배상 책임(liability)을 부과하고 있다. 이는 국제법상 'Liability' 가 금지되지 아니한 행위로부터 발생하는 해로운 결과에 대해 엄격하게 적용된다는 점,²⁾ 그리고 제6부속서의 책임 주체가 국가가 아닌 운영자(법인 또는 개인)라는 점에서 큰 특징이 있다.³⁾

남극조약협의당사국회의(이하ATCM : Antarctic Treaty Consultative Meeting)는 약 13년의 산고끝에 2005년 6월에 제6부속서를 채택하였고, 2015년 2월 현재 11개국이 비준하였으며, ATCM을 통해 협의당사국들의 제6부속서 비준 필요성이 거듭 확인되고 있는 터에, 우리나라도 제6부속서의 비준 및 국내이행입법 준비에 필요한 법적·실무적 논의가 필요한 시점이다.

더욱이 극지연구소는 사실상 국내 유일의 남극활동 운영자로서, 제6부속서의 비준 및 이행법을 제정(또는 개정)에 앞서 관련 쟁점분석 및 대응방안 마련이 시급하다.

II. 남극조약체제의 환경보호

제6부속서를 이해하기 위해서는 남극조약-마드리드의정서-부속서로 이어지는 일련의 남극조약체제에 대한 이해가 필요하다. 소위 남극조약체제(Antarctic Treaty System)는 <그림 1>과 같다.



<그림1> 남극조약체제 개관

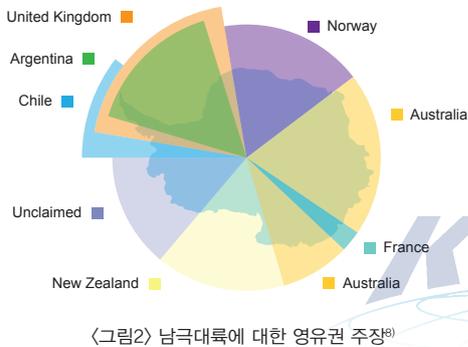
*이 글은 극지연구소의 정책과제 연구비(PE-14250)지원으로 작성되었음.

- 1) 마드리드의정서 제9조 제1항. 일반적으로 '문서로 된 국가 간의 국제적 합의로서 국제법에 의해 규율되는 것'은 명칭 여부를 불문하고 조약(treaty)에 해당한다(1969 조약법에 관한 비엔나협약 제2조).
- 2) 전통 국제법의 책임은 국가의 국제법상 의무위반 또는 불법행위 책임(state responsibility)을 의미하며, '피해국 또는 피해자의 본국에 대한 가해국 책임'으로 환언할 수 있다. 김정균·성재호, 「국제법」, (박영사, 2006), 194쪽.
- 3) 제6부속서와 비슷한 유형의 책임은 주로 환경보호를 목적으로 하는 조약들에서 확인할 수 있는데, 손해를 야기한 선박 소유자, 핵시설이나

해저광물자원 탐사시설 운영자, 지상차량 또는 내륙항행 선박을 관리하는 등록소유자, 철로운영자 등에 민사(배상)책임을 지우기도 한다. 강병근·이재완 역, 「국제법」, Antonio Cassese, *International Law*, 2nd edition, (삼우사, 2014), 629쪽.

- 4) 현재 비준국은 스웨덴, 폴란드, 스페인, 핀란드, 페루, 이탈리아, 영국, 뉴질랜드, 러시아, 노르웨이, 남아프리카공화국 등 11개국이다.
- 5) 제6부속서는 29개 남극조약협의당사국 모두가 비준하여야만 발효되기 때문에, 우리나라가 비준한다 해서 곧바로 조약의 구속력이 발생하는 것은 아니다.

19세기의 남극탐험은 물개와 고래잡이의 근거지를 찾기 위한 것이었지만, 20세기 들어 영국, 프랑스, 노르웨이, 오스트레일리아, 뉴질랜드, 아르헨티나, 칠레 등 7개국은 자국민의 탐험과 발견 등을 근거로 남극에 대한 영유권을 공식적으로 선포하기에 이르렀다(〈그림2〉 참조). 1908년 이후 각국이 주장한 영유권의 중복은 국가 간 갈등을 초래하여, 제2차 세계대전 이후 외교적, 군사적 분쟁으로까지 확대되었다. 국제사회는 남극문제를 평화적으로 해결하기 위하여 외교적 노력을 경주하였고, 1957~1958년의 국제지구물리관측년(International Geophysical Year : IGY)을 통한 과학적 탐험활동의 성공을 계기로 미국 아이젠하워 대통령이 남극조약회의 개최를 제안하였으며, 이 회의 결과 1959년 남극조약⁶⁾이 채택되었다.⁷⁾



남극조약은 남극의 평화적 이용(제1조)과 과학적 탐사의 자유 및 국제협력의 지속(제2조)을 보장한다. 이러한 조약내용은 과학 발전은 물론 전 인류의 공영에 공헌하기 위한 것이었다. 동 조약은 남극에서 핵폭발이나 방사성폐기물의 처분을 금지(제5조)함으로써, 남극을 지구상의 첫 국제비핵지대로 지정하였다는 것에 큰 의의를 갖는다. 그러나 환경보호에 대해 직접 명시하고 있는 규정은 없다.

1970~1980년대의 국제사회는 남극의 자원개발과 이용이 초래할 남극 환경의 악영향에 주목하였다. 이 시기에 채택된 남극물개보존협약(convention for the Conservation of Antarctic Seals), 남극해양생물자원보존협약(Convention on the Conservation of Antarctic Marine Living Resources), 남극광물자원활동의 규제에 관한 협약(Convention on the Regulation of Antarctic Mineral Resources Activities : CRAMRA) 등은 남극의 자원개발과 환경보호라는 상반된 가치를 다루고 있다. 이러한 협약들은 합리적인 자원개발과 이용이 실시될 경우 남극생태계보호가 가능할 것이라는 기대하에 채택된 것이었다.⁹⁾

그러나 프랑스기지 활주로 건설(1982~85)로 인한 동물서식지 파괴, 아르헨티나 해군유조선 바이아 파라이스(Bahia Paraiso)호 좌초(1989)로 인한 기름유출¹⁰⁾ 등 대형 사고를 계기로, 광물자원활동 자체를 금지하여야 한다는 국제여론이 확산되었다. 결국 UN총회는 남극을 '자연보존구역 또는 세계공원(a natural reserve or a world park)'으로 지정하고 모든 인류를 위해 남극의 환경과 생태계는 보호되어야 한다고 선언하였고,¹¹⁾ 호주와 프랑스가 공동선언을 통해 UN총회의 입장을 지지하여 비준을 거부함으로써 CRAMRA는 발효되지 못하였다.¹²⁾

결국 1998년에 남극환경의 포괄적 보호를 규정하는 마드리드의정서가 채택되어, 남극의 평화적·과학적·환경적 목적의 이용을 강화함과 동시에 시추와 채광을 포함한 남극 광물개발활동에 관한 논의를 50년간 동결하였다. 이 의정서는 불가분의 6개 부속서를 두었는데, 제1부속서 내지 제4부속서 등 4건은 1998년에, 제5부속서는 2002년에 발효되었다.

6) 이 조약에는 아르헨티나, 칠레, 오스트레일리아 등 7개의 영유권 주장국(claimant states)과 미국, 러시아, 벨기에, 일본, 남아프리카공화국 등 5개의 영유권 비주장국(non-claimant states)이 원서명국으로 참여하였다. 남극조약은 1961년 6월 23일 발효되었고, 우리나라는 1986년에 가입하였으며, 2015년 2월 현재 당사국 수는 50개국이다.

7) 김기순, "남극과 북극의 법제도에 대한 비교법적 고찰", 「국제법학회논총」, 제55권 제1호, 대한국제법학회, (2010), 17-18쪽.

8) Antarctic Territorial Claims, at http://www.discoveringantarctica.org.uk/alevel_4_0.html.

9) 박덕영·오미영 옮김, 「환경문제와 국제법」, 西井 正弘·臼杵 編著, 「テキスト 國際環境法」, (세창출판사, 2013), 343쪽.

10) 1989년 1월 말 아르헨티나의 물자운반선인 Bahia Paraiso호가 미국의 파머 기지 앞에서 좌초·침몰하였다. 당시 기름이 흘러나와 생물들

이 적지 않은 피해를 입었으나, 몇 년 후 잠수 전문가들이 배 속에 남아 있던 기름을 제거하였다.

11) United Nations General Assembly, Question of Antarctica, A/RES/46/41, 6 Dec. 1991, at www.un.org/documents/ga/res/46/a46r041.htm.

12) 이 협약의 발효에는 호주·프랑스를 포함한 모든 청구국(claimant)의 비준이 필요하였기 때문이다. 인도, 벨기에, 이탈리아, 소련, 스페인, 뉴질랜드가 양국을 지지하였고, 미국과 영국은 1991년 초 채광활동의 일시적 중단을 승인하기에 이르렀고 일본은 1991년 4월 광물자원개발 금지를 지지할 것을 표명하였다.

13) 마드리드의정서는 2048년(발효 후 50년)까지 남극의 광물개발을 금지하였으며, 2048년 이후에야 그 변경 및 개정을 재검토 할 수 있다 (마드리드의정서 제25조).

III. 제6부속서의 주요내용

전문과 13개 조항으로 구성된 제6부속서는 당사국이 '부속서의 이행을 보장하기 위하여, 이행조치, 행정적 조치 및 법령채택 등 적절한 조치를 취하는 경우' 당사국의 배상책임 면제(제10조)함과 동시에, 아래와 같이 운영자의 의무를 중점적으로 기술하고 있다. 불가분의 6개 부속서를 두었는데, 제1부속서 내지 제4부속서 등 4건은 1998년에, 제5부속서는 2002년에 발효되었다.

1. 정부기관 또는 비정부기관을 불문하고, 남극조약 지역 내에서 수행될 활동을 조직하는 자연인 또는 법인에 해당하는 **운영자는**, (제2조)
2. 남극환경에 중대하고 해로운 영향을 초래하거나 또는 그러한 영향을 초래할 급박한 위협이 있는 우발적 사건(accidental event)으로서의 **환경적비상사태(environmental emergency)에 대하여**, (제2조)
3. 환경적 비상사태와 그 잠재적 부작용(adverse impact)의 위험을 감소시키도록 고안된 합리적 **예방조치(preventative measures)를 실시하고**, (제3조)
4. 남극 환경 또는 그에 종속되고 연관되는 생태계에 대하여 잠재적 부작용을 수반하는 사고에 대응하기 위한 **비상계획(contingency plans)을 수립하며**, (제4조)
5. 환경적 비상사태가 발생한 이후에 그 비상사태의 영향을 방지, 최소화 또는 억제하기 위해 취해지는 합리적인 조치, 즉 **대응조치(response action)를 취해야 하는데**, (제5조)
6. 환경적 비상사태에 즉각적이고 효과적인 대응조치를 이행하는데 **실패한 운영자는** 자신이 실시하여야 할 대응조치의 비용 또는 타 당사국이 실시한 **대응조치의 비용에 대한 책임(liability)을 지는바**, (제6조)

7. 제3자의 대응조치 행위 등에 대하여 책임을 부담할 수 있도록 적절한 **보험, 은행 기타 유사한 재정적 보증을 보유하여야 하나**, (제11조)

8. 당사국은 **과학연구 증진활동을 수행을 포함한 자국의 국가운영자에 대하여 자기보험(self-insurance)을 유지할 수 있다**. (제11조)

9. 배상에 관한 **분쟁이 발생할 경우**, 대응조치에 실패한 운영자의 당사국 또는 **상거소 소재지국 법원에서 소송을 진행할 수 있다**. (제7조)

IV. 제6부속서 비준 시 주요 쟁점

남극조약 및 마드리드의정서의 국내적 이행을 위하여 「남극활동 및 환경보호에 관한 법률」(이하 남극활동법)을 제정하였듯이, 제6부속서의 비준에 따르는 국내 이행입법의 제정 또는 개정은 필수다.¹⁴⁾ 따라서 제6부속서 비준에 수반되는 몇 가지 현안 과제들을 검토한다.

① 비준을 서둘러야 하는가?

ATCM은 2005년 이후 제6부속서를 핵심 법률의제로 다루고 있는바,¹⁵⁾ 우리나라의 조속한 비준은 남극조약협약당사국으로서 적극적이고 선도적인 국가위상을 정립하는 데 기여할 것이다. 그러나 비준과 동시에 국내이행입법을 추진할 것이라면, 그에 앞서 남극활동과 관련된 정부부처 간, 정부와 운영자 간의 충분한 의견교환과 실무적 준비가 선행되어야 한다.

② 이행입법의 적절한 유형과 시기는?

우리나라는 이미 남극조약체제의 이행을 위해 제정된 남극활동법을 시행하고 있는바, 제6부속서의 이행입법은 동 법률의 개정방식이 적절하다. 스웨덴, 핀란드, 영국, 호주 등 국내입법을 완료한 타국 입법례의 공통된 선택이기도 하다. 다만 시기와 관련하여, 국내입법의 제·개정 시기와 그 발효 시기는 구별되어야 한다. 조약이 미발효 상태에서 그 취지를 담은 국내입법이 발효되면, 우리나라와 운영자는 발효되지도 않은 조약상 의무를 법률에 따라 구속받게 된다. 따라서 남극

14) 마드리드의정서 제13조(의정서의 준수) 및 제6부속서 제10조(국가의 배상책임)의 의무사항이다.

15) ATCM의 주요 법률의제에는 제6부속서, 형사관할권, 생물자원탐사(bioprospecting) 등이 있다.

활동법의 개정을 비준 시에 하더라도, 제6부속서 관련 조항의 발효는 제6부속서의 발효시점과 맞추어야 한다.¹⁶⁾

③ 우리나라의 운영자는 누구인가?

현재로서는 극지연구소가 유일하다. 그러나 향후에 국내 연구기관 또는 기업 등이 신규로 남극활동을 개시하거나, (우리나라를 포함한) 다국적 기업의 남극활동도 가능하므로, 극지활동법의 개정은 국가 및 비국가 운영자를 포괄하여 고려되어야 한다.

④ 선택 가능한 재정보증제도는 무엇인가?

비국가 운영자의 경우, 보험과 은행의 지불보증서 등이 가능할 것이다. 다만, 제6부속서에 적용 가능한 보험 상품이 국내에 존재하는가에 대한 검토가 필요하다.

극지연구소와 같은 국가운영자의 경우, 타국입법례는 예외 없이 보증제도 의무를 면제하고 있는데, 이 경우에도 자기보험 차원의 예산확보는 필요하다. 제6부속서 제11조(책임의 한도)에 따르면 비선박 사고와 선박 사고를 나누어 책임의 한도를 정하고 있는데, 과학기지는 각 300만 SDR, 아라온호(7,487톤)의 경우 약 320만 SDR(약 50억원)이 필요하다. 다만, 지불수단이 현금인 SDR(특별인출권)이기 때문에, 정부부처간의 긴밀한 협조체제가 전제된다면 사후적 예산확보 방안도 가능할 것이다.¹⁷⁾

⑤ 배상책임 유발자에 대한 형사처벌이 필요한가?

제6부속서의 배상책임을 유발한다는 것은 국가관할권 외역(남극)에서 우리 국민이 환경오염을 발생시킨 경우에 해당하는데, 남극활동법과 해양환경관리법 등에서 이와 유사한 사유에 대한 형사처벌 예를 찾아볼 수 있다. 해의 입법례에서도 징역, 금고, 벌금 등의 형사처벌을 규정하고 있다.

⑥ 예방조치 및 비상계획의 수립은 어찌해야 하나?

제6부속서는 예방조치와 비상계획을 운영자의 의무로 규정하고 있는데, 이에 대하여 타국 입법례는 제6부속서 규정을

그대로 옮기는 수준에서 운영자에게 예방조치 및 비상계획의 수립을 의무화하는 경우도 있고, 예방조치 및 비상계획을 남극활동의 실제적·절차적 허가요건으로 요구하기도 한다. 후자의 경우에 제6부속서의 이행을 확보하려는 국가의 의지가 좀 더 명확해 보인다. 만일 예방조치 및 비상계획을 남극활동 허가요건으로 한다면, 상업적 활동과 과학연구 활동을 달리 정해야 할 것이다. 상업적 활동의 경우 다양한 주체가 다양한 형태의 남극활동을 수행할 것이기에 매 건당 개별적인 예방조치 및 비상계획의 검토가 필요하다. 그러나 과학연구 활동은 환경영향평가를 바탕으로 반복·한정된 활동을 수행한다는 점에서 최초에 수립된 계획을 3~5년 단위로 갱신하는 방식을 적용함이 적절할 것이다.

V. 맺음말

현재의 제6부속서는 운영자의 범위에서 어선을 제외하였고, 환경적 비상사태의 유발에 대한 책임이 아닌 대응조치에 실패한 운영자의 배상책임에 그치고 있으며, 대부분의 조약이 그러하듯이 추상적인 단어들로 점철되어 있다. 따라서 11개 비준국을 제외한 18개 협의당사국들의 비준이 완료될 때까지 제6부속서에 대한 후속 회의가 계속될 것으로 전망된다. 그러나 그 시기가 문제일 뿐 우리나라의 제6부속서의 비준과 국내입법 정비는 기정사실이다.

제6부속서가 국가에 대하여 조약의 준수에 필요한 법령제정 등 절차적 의무만을 규정한 반면, 실제적인 모든 의무를 운영자에게 부과하고 있다는 점을 상기해 볼 때, 제6부속서 이행에 있어 사실상 국내 유일의 운영자인 극지연구소의 역할이 중요함은 이견의 여지가 없다.

극지연구소는 국가운영자로서 제6부속서의 국제법 연구, 남극연구활동 종사자에 대한 제6부속서 교육, 예방조치 및 비상계획의 수립, 대응조치에 필요한 훈련프로그램 마련, 그리고 자기보험과 관련된 예산확보에 필요한 배상범위의 추산 등 법·제도적, 실무적 준비를 선행하여, 우리나라 남극연구 및 정책개발에 이바지하여야 한다.

16) 부칙을 두어 특정 조항의 발효시점을 개별적으로 명시할 수 있다.

17) SDR(Special Drawing Rights : 특별인출권)이란 국제통화기금(International Monetary Fund : IMF)이 회원국의 국제수지악화를 해소하고 국제유동성을 공급하기 위하여 창출한 준비자산으로 일종의 가상화폐라 할 수 있다. IMF는 각 회원국에 출자액을 할당(Quota)하고, 각국은 할당액의 25%를 SDR로 납입하고 있다. 다만, SDR은 화폐와 같은 지불수단이 아니라 IMF의 SDR회계 내에 설정된 각국 계정에 그 수지만이 기록된

다. 따라서 SDR은 IMF로부터 통화를 인출할 수 있는 권리가 아니라 IMF의 타 회원국으로부터 통화를 수취할 수 있는 권리를 의미한다. 예컨대 A국이 국제수지적자를 메우기 위하여 자국에 할당된 SDR을 사용하고자 하면, IMF는 국제수지상황이 양호한 B국을 수취국으로 지정한다. B국이 지정되면 A국이 요구하는 SDR은 IMF SDR회계상 A국 계정에서 B국 계정으로 이체되며, 대신 B국은 이체된 SDR에 상당하는 국제통용통화를 A국에 게 인도하여야 한다. 최승환, 「국제경제법」, (법영사, 2014), 702-703쪽.



북극 툰드라 식생의 급격한 증가가 초래할 수 있는 미래 기후변화 양상에 대하여 김 백 민(극지연구소 책임연구원/이학박사)

1. 머리말

유라시아 대륙과 북미 캐나다 지역 등에 광범위하게 분포하고 있는 얼어붙은 땅인 동토층 툰드라 지역이 기후 및 생태계를 연구하는 자연과학자들에게 최근 큰 주목을 받고 있다. 그 이유는 수세기에 걸쳐 진행되고 있는 지구 온난화로 인해 대기중에 꾸준히 축적된 열이 바다와 땅으로 서서히 누적되어 전달되기 시작함에 따라 수천년 동안 얼어붙어 있던 영구동토층이 녹아내리고 있기 때문이며, 이로 인해 특히, 동토층 내에 매장되어 있던 메탄가스의 심각한 방출 가능성이 대두되고 있기 때문이다. 또한, 이러한 동토층의 해빙과 더불어 더 살기 좋아진 동토층의 지표면에서는 툰드라 식물들이 크게 증가하거나 보다 크고 복잡한 관목 및 나무들로 진화하게 되는데, 이러한 예상되는 변화는 지구 전체 규모의 에너지 평형에 크게 영향을 미칠수 있음이 최근 과학자들에 의해 알려지고 있다. 온실효과가 지구 밖으로 빠져나가는 에너지의 양을 줄여 지구를 덥힌다면, 이러한 식물들의 증가는 지구로 들어오는 짧은 파장의 태양빛을 흡수하는 양을 증가시켜 지구 온도를 증가시킬수 있다. 더 나아가, 고위도 지역에서의 지구 온도 증가는 다양한 형태로 지구를 감싸고 돌고 있는 극지 소용돌이(polar vortex)에도 영향을 주어 지구촌 곳곳에 이상 기후 현상을 가져올 수도 있게 된다.

극지연구소는 2011년부터 미래창조과학부(당시 교육과학기술부)로부터 지원받은 극지기초 원천기술개발사업의 일환으로 '환북극 동토층 환경변화 관측시스템 원천기술 개발 및 변화추이 연구'를 수행해오고 있다. 우리는 이 사업을 통해

미국 알래스카, 북극 다산기지, 캐나다 캄브리지 베이, 그린란드 자켄버그 등 북극권 내에 있는 영구동토층의 대기/툰드라 식물/땅 속 미생물에 대한 감시와 모델링 연구를 확대해 나가고 있으며, 이를 통해 극지역의 동토에서 일어나고 있는 다양한 기후변화 연구를 수행하고 있다(그림 1).

왜 우리는 고위도 지역에 살고 있는 식물들과 미생물들에 대한 연구에 이렇게 주목하게 되었으며, 또 적극적인 투자를 하고 있는걸까? 그 이유에 대한 과학적인 설명을 본 글을 통해 제시해 보고자 한다.



〈그림1〉 알래스카 카운실 지역에 극지연구소가 설치한 챔버 시스템 전경. 챔버 시스템은 지중에서 올라오는 이산화탄소 양을 포집하여 동토층에 살고 있는 툰드라 식생의 변화와 미생물 변화에 따라 달라지는 이산화탄소 양을 측정해 주는 시스템이다.

II. 온난화 이해와 기후 피드백

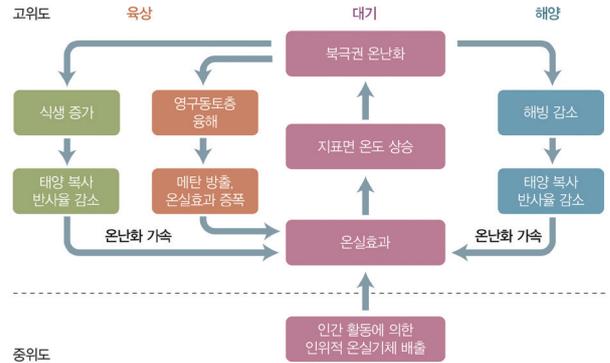
지구온난화의 원리를 이해함에 있어 가장 중요한 개념은 잘 알려진 바와 같이 인간이 방출하고 있는 이산화탄소가 마치 지구를 온실처럼 만들어 덥힌다는 온실효과일 것이다. 산업혁명 이후로 비정상적인 속도로 지구가 뜨거워지고 있는 것은 온실효과 때문임은 의심할 여지가 없어 보인다. 그럼에도 불구하고 왜 아직까지도 지구온난화에 대한 논란이 사그러들지 않고 있을까? 그 이유는 이산화탄소 증가에 의한 온실효과만이 지구온난화 이야기의 전부가 아니기 때문이다. 어쩌면, 온실효과는 시작에 불과할지도 모른다. 분명한 것은 이산화탄소에 의한 온실효과가 지구를 직접적으로 덥히는 효과는 그리 크지 않아서 마치 음원에서 나온 소리가 스피커를 통해 증폭되듯이 다른 간접적인 프로세스를 거치지 않고서는 지구온난화를 전부 설명할 수 없다는 사실이다. 즉, 우리가 지구온난화를 제대로 이해하기 위해서는 자연이 지니고 있는 독특한 증폭 메커니즘인 피드백 현상을 이해하는게 무엇보다 중요하다.

자연계의 되먹임 현상을 예를 들어 설명해 보겠다. 잘 알려진 바와 같이 인간이 방출한 이산화탄소가 대기를 덥혀 따뜻해지면, 남아도는 열은 바닷물로 전달되어 바다도 서서히 따뜻해진다. 그러면 따뜻해진 바다는 평소보다 훨씬 많은 수증기를 대기 중으로 내뿜게 된다. 수증기는 이산화탄소보다 훨씬 강력한 온실가스이므로 이에 의해 지구는 더욱 달아오르게 되고¹⁾ 이로 인해 다시 바다는 더욱 뜨거워지게 되며 더 많은 수증기를 방출하게 된다. 이러한 과정을 통해 이산화탄소에 의해 시작된 지구온난화가 증폭되게 되는 것이다. 이러한 현상을 기후 피드백이라고 하며 지역마다 피드백의 주된 메커니즘과 정도가 다 다르다.

그렇다면, 이러한 기후 피드백이 가장 강력한 지역에서 온도 증가가 가장 크게 나타날 것임은 쉽게 예측해 볼 수 있을 것이다. 어디일까? 바로 북극이다. 북극은 전지구상에서 기후 피드백이 가장 강력하게 발생하고 있는 지역이다. 그 이유는 북극해의 해빙이 녹아내리기 시작하면서 지구시스템의 가장 강력한 피드백 메커니즘 중의 하나인 해빙 피드백이 발생하고 있기 때문이다(그림 2). 즉, 태양빛을 대부분 반사하던 해빙이 녹으면서 검푸른 바닷물로 바뀌게 되면, 태양빛은 바다에 흡수되어 바닷물을 데우면서 다시 해빙을 훨씬 더 많이 녹이게 된다. 이러한 과정이 반복되면서 현재 해빙은 엄청난 양이 줄어들었으며, 향후 10년 이내에 북극의 여름철에는 해빙을 보지 못할 것으로 과학자들은 예상하고 있다. 이에 더해 북극에는 온난화에 따른 생물활동 증가와 이에 따른 태양빛 흡수로 인한 온도 상승,

1) 이 과정이 증폭과정에 해당된다.

영구동토층 해빙에 따른 메탄과 같은 강력한 온실기체 방출 등 과거에 유례를 찾아보기 힘들 정도로 다양한 온난화 증폭 메커니즘이 동작하고 있거나, 막 시작되고 있는 단계라서 앞으로로도 계속 다른 지역과 비교하여 급격한 온도 상승을 보일 것으로 예상하고 있다.



〈그림2〉 북극의 주요 기후 피드백 메커니즘이 작동하는 원리를 나타낸 그림 (국지과학자가 쓴 기후변화이야기-하호경, 김백민 공저) 중에서.

III. 북극 툰드라 식생이 초래하는 두가지 완전히 다른 피드백 메커니즘

이제 영구동토층의 툰드라 식물이 피드백 형태로 지구온난화를 증폭시키는 원리를 보다 자세히 살펴해보도록 하자. 이를 위해서는 툰드라 식물이 기후에 미치는 형태가 다른 두가지 피드백 양상을 각각 살펴봐야 한다. 첫번째는 툰드라 식물의 폭발적 성장이 탄소 순환을 어떻게 바꾸어 나가는가 하는 관점이고, 두번째는 에너지 순환에 대한 변화에 주목하는 관점이다. 지역적으로 지구 온난화는 근본적으로 인간 활동에 의해 증가된 탄소가 그 근본 원인이기 때문에 미래 툰드라 식물의 증가가 얼마나 탄소를 더 증가시킬 것인지 아니면 혹은 감소시킬 것인지를 아는 것이 중요하며, 이것이 탄소 순환 관점이다. 에너지 순환의 관점은 광범위한 영역에서의 툰드라 식물 증가 혹은 다른 종으로의 천이가 지구 표면이 태양 빛을 더욱 쉽게 흡수할 수 있는 어두운 색깔의 표면으로 바뀌게 되고, 결과적으로 지구 온난화를 더욱 가속화시킬 수 있는데 주목한다. 이제 두가지 다른 방식에 대해 알아보자.

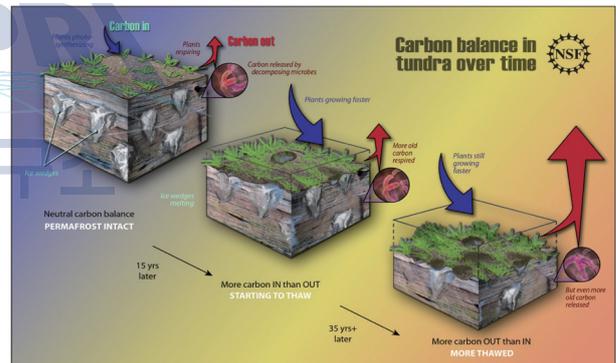
① 탄소순환 관점

먼저 동토층의 툰드라 식물이 탄소순환에 미치는 영향을 논하기에 앞서 지구상 식물이 대기중 이산화탄소 변동에 얼마나 큰 영향을 줄수 있는지부터 알아보자. 식물은 항상 호흡을 통한 대기중으로의 이산화탄소 방출과 광합성을 통한 이산화탄소 흡수 및 이를 통한 몸집 불리기를 동시에 수행하고 있다.

지구상에 존재하는 식물들이 얼마나 대기중에 존재하는 이산화탄소 양을 조절하는데 관여하고 있을까? 그 해답은 하와이의 마누아 로아섬에서 지속적으로 관측되고 있는 대기중 이산화탄소 양을 자세히 들여다 보면 나온다. 이 자료를 자세히 보면 인간활동에 의해 대기 중 이산화탄소 양이 해마다 꾸준히 증가하고 있으며, 특히 2014년에는 산업혁명 이전에 280ppm 수준이었던 대기중 이산화탄소 양이 드디어 400ppm을 넘어서는 것을 알 수 있다. 한편, 이 자료에는 이산화탄소가 증가하는 경향 외에 독특한 패턴이 존재하는데 매년 반복되는 매우 독특한 톱니바퀴 모양의 패턴이 관찰된다. 이 부분이 바로 식물 성장기에 월등하게 우월한 광합성으로 인한 식물의 탄소 흡수와 비성장기 호흡으로 인한 탄소 방출을 나타낸다. 즉, 광합성을 통한 탄소 변동 즉, 한해 중에서도 식물이 폭발적으로 성장하는 북반구 여름철에는 광합성을 통해 대기중의 탄소를 끌어당겨 쓰게 되는데 이 양이 매우 커서 대기중 탄소량을 눈에 띄게 조절하고 있다. 이를 통해 알 수 있는 사실은 식물 성장에 의해 지구상 이산화탄소 총량이 조절될 수 있을 정도로 지구상 식물이 전지구적 탄소순환에 미치는 영향이 매우 크다는 것이다.

이제 툰드라 식물의 경우를 생각해 보자. 툰드라 식물의 경우 일반적인 호흡과 광합성으로 요약되는 지표 식물의 탄소순환 과정에 더해 더욱 중요한 요소가 존재한다. 바로 미생물의 존재이다. 툰드라 아래 영구동토층에는 무수히 많은 양의 탄소가 비활성 미생물 형태로 갇혀 있다. 그런데, 지구온난화가 진행되어 영구동토층이 녹으면, 이 속에 갇혀 있던 미생물들의 활동이 증가하고 이들이 분해를 시작하면서 엄청난 양의 이산화탄소와 메탄을 땅 밖으로 방출할 수 있기 때문이다. 즉, 툰드라 식물은 영구동토라는 변수로 인해 온난화 정도에 따라 지구상 탄소수지에 있어서는 매우 다른 역할을 할 수 있는 것이다. 그림 3을 보자. 아래 그림은 영구동토층을 연구하는 과학자들이 예상하는 툰드라 지역에서의 탄소수지에 대한 미래변화를 나타낸다. 그림에서 주목해야 할 점은 동토로 들어오는 탄소의 양을 나타내는 푸른 화살표와 동토에서 대기중으로 방출되는 탄소의 양인 붉은 화살표의 크기가 현재(왼쪽), 가까운 미래(가운데), 먼 미래(오른쪽)에서 다른 점에 주목해야 한다. 즉, 현재의 경우는 두 화살표 크기가 같다. 즉, 탄소 균형을 의미하고, 가까운 미래의 경우, 동토층이 녹기 시작하면서 미생물 분해에 의한 탄소가 증가가 있긴 하나, 이보다는 폭발적으로 지표면에서 증가하는 툰드라 식물의 양에 의한 탄소 흡수량이 방출량을 압도하는 시기가 오게 된다. 이 시기는 탄소순환 측면에서 툰드라 식물은 오히려 지구온난화를 방해하는 역할을 할 수 있게 된다. 그러

나, 이 시기가 지나 영구동토층이 본격적으로 녹게 되면, 미생물의 폭발적 분해가 시작되고, 지표면 툰드라 식물의 탄소 흡수량을 압도하는 시기가 오게 된다. 이렇게 되면, 영구동토층에 존재하는 툰드라 지역은 지구에 대재앙 수준의 탄소를 방출하게 되어 돌이킬 수 없는 기후변화를 초래하게 된다. 무서운 점은 이러한 변화는 비가역적이라는 점을 주목해야 한다. 동토층에 갇혀있는 탄소가 대기중으로 한번 방출하게 되면 다시 온도를 인위적으로 급격히 낮춘다고 해도 그 탄소가 다시 쉽게 동토층으로 녹아 들어가지는 않는다는 것이다. 이러한 자연의 비가역성으로 인해, 이는 이러한 시기가 도래하면 더이상 인류가 어떠한 노력을 해도 다시 예전처럼 돌아갈 수 없다는 것을 의미한다. 따라서, 영구동토층은 극단적으로 표현한다면 인류가 절대 건드리지 말아야 할 폭탄저장고라고 할 수 있다. 물론, 앞에서 설명한 내용들은 아직 과학적으로 가설로 받아들여지고 있으며, 여러가지 논란도 있지만, 이미 지역적으로 빠르게 진행되고 있는 동토층의 관측 자료들을 분석한 연구들을 통해 학계에서 입증되어 가고 있다.



〈그림3〉 북극 영구동토층 툰드라 지역에서의 시간에 따른 탄소순환 과정의 변화를 나타낸 그림. 좌측에서 우측으로 갈수록 영구동토층의 미래를 의미하며, 가운데는 현재로부터 15년 후, 오른쪽은 35년 이상 시간 경과후 동토층의 상태를 의미한다. 각 그림에서 푸른색 화살표는 대기중에서 동토로 들어오는 탄소의 양을 의미하며, 이는 주로 식물의 광합성에 의해 들어오게 되므로 동토층 식물의 양에 비례한다. 붉은색 화살표는 동토층에서 대기로 나가는 탄소의 양을 의미한다. 주로 호흡(respiration)과 박테리아 등 미생물의 분해(decomposition)의 합으로 결정된다-미국 National Science Foundation(NSF) 제공.

④ 에너지 순환 관점

이제 에너지 수지 관점에서 동토층 식물의 역할을 살펴보자. 일반적으로 식물들은 에너지 순환 관점에서 두가지 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 첫번째는 대부분의 식물이 잎의 기공을 통해 증발산 작용을 하는데 이 때 물이 수증기로 되면서 대기중의 열을 빼어오기 때문에 대기를 식히는 역할을 하게 된다. 이 증발산 작용은 대부분 식물의 일반적인 기능이지만, 대체로 잎 면적이 넓은 활엽수가 증발산 양이 훨씬 크기 때문에 에너지 수지 관점에서 동토층의 툰드라 식물의 경우 이러한

증발산에 의한 냉각효과는 매우 미약하다고 볼 수 있다. 에너지 수지 관점에서 동토층 식물의 역할은 매우 쉽다. 왜냐하면, 온난화에 따라 동토층 식물이 증가하면 앞에서 얘기했듯이, 이들이 토양에 비해 반사도가 적고, 특히 고위도에서 눈에 덮혀 있던 땅에 비해서는 급격히 지표면을 어둡게 만들어서 들어오는 태양에너지를 많이 흡수하게 된다. 이렇게 더 많이 지표면이 흡수한 에너지는 다시 다양한 형태로 대기중으로 방출되게 되고, 이는 대기를 더욱 뜨겁게 덥히게 된다. 즉, 온난화를 가속화하는 방향으로 작용하게 된다는 점이다.

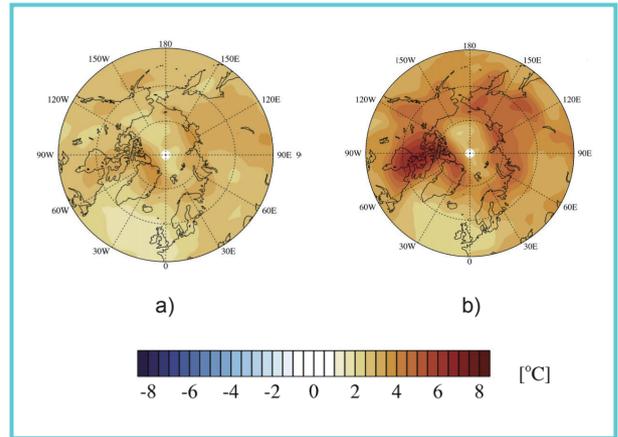
극지연구소와 전남대학교는 최근 연구를 통해 이러한 툰드라 식물의 증가로 인한 태양에너지 흡수 증가효과가 얼마나 미래의 북극 온난화를 가속화시키는지 정량적으로 알아보기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 실험한 바 있다. 본 실험에서는 약 380ppm¹⁾ 현재 기후의 이산화탄소 농도가 2배로 증가된 720ppm이 되었을때의 기후를 재현해 보았다. 미래기후에서의 툰드라 식물들의 효과를 모델 실험을 통해 확인하기 위하여, 두가지 실험을 구상하였다.

첫번째 실험은 툰드라 식물이 미래에도 현 수준을 그대로 유지한다고 가정한 실험이고, 두번째 실험은 이산화탄소 증가로 인해 기후가 바뀌는데 툰드라 식물이 반응하여 크게 변창하는 시나리오를 가정한 것이다. 이 경우, 미래의 툰드라 식물의 분포는 사용한 지구시스템 모델의 요소 모델인 동적 식물 모델(Dynamic Vegetation Model)이 기후에 반응하여 도출한 미래 식물 분포를 사용하였다. 이렇게 두 실험을 구성한 후 각 두 실험에서 이산화탄소를 2배 증가시킬 때 대기의 지표 온도가 현재에 비해 얼마나 증가하는지를 비교해 보면, 툰드라 식물의 변창정도가 기후에 다시 피드백하여 온도를 얼마나 정량적으로 증가시키는지에 대한 값이 계산되게 된다.

〈그림 4〉를 살펴보면, 그 툰드라 식물의 성장을 고려한 시뮬레이션 (b)에서 여름철 북극 온도 증가가 더 큼을 알 수 있고, 그 차이는 3~5도 정도로 크게 나타남을 확인하였다. 특히, 주로 온도 증가는 기대한 바와같이 영구동토층 식생이 많이 분포하는 지역을 중심으로 증가 폭이 큼을 알 수 있어서 이러한

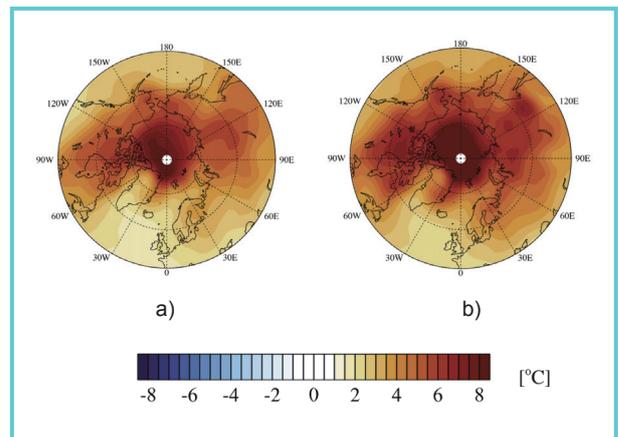
차이가 영구동토층 식생의 폭발적 성장에서 기인하였음을 확인할 수 있다.

1) 현재는 400ppm을 넘어섰다.

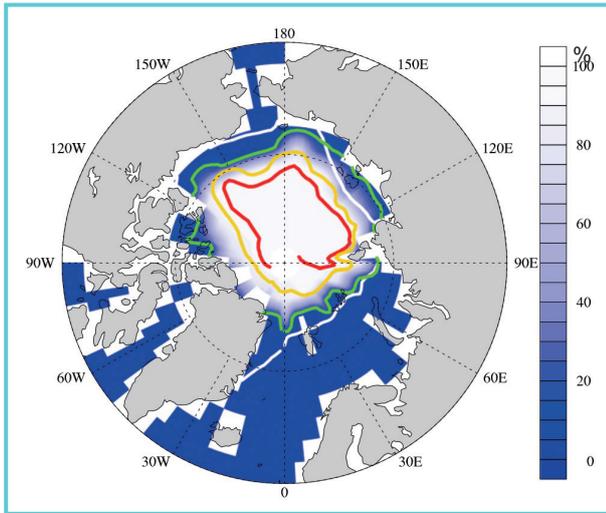


〈그림4〉 이산화탄소가 현재에 비해 2배로 증가되었을때 모델이 시뮬레이션 한 온도증가. a)툰드라 식물이 현재기후 상태로 고정되어 있다고 가정하였을 때의 결과, b) 동적 식생 모델을 적용하여 미래기후에서의 툰드라 식물 변창 효과를 고려하였을 때의 결과. 두 그림 모두 식물의 성장기인 3월~9월까지의 평균 지표 온도를 나타냄. Jeong et al. (2014)에서 발췌하였으며, 설명을 위해 그림을 재배치/수정 하였음.

우리는 동토층 툰드라 식물들이 피드백 효과로 온도를 상승시키는 작용을 하는 시기가 식물 성장이 주로 이루어지는 여름철에 국한되어 있을 것이라는 기존 예상과 달리 식물성장이 멈추는 겨울철에도 뚜렷한 영향이 있음을 실험을 통해 확인하였다(그림 5). 이에 대한 원인을 살펴 본 결과, 여름철 폭발적인 툰드라 식생 증가로 인해 증가한 열에너지는 육지에 머물러 있지 않고, 인근 북극해에까지 전달되어 북극 해빙을 더 많이 녹게하고, 이로 인해 북극해빙이 얼어붙는 겨울철에 상대적으로 덜 얼어붙게 하는 결과를 초래하게 됨을 확인하였다(그림 6). 이는 열적으로 매우 중요한 의미를 지니는데, 그 이유는 겨울철에 상대적으로 따뜻한 북극해에서 대기로 방출되는 열량의 총량은 북극해빙 면적에 매우 민감하게 반응하기 때문이다. 이 결과는 선행 연구에서 밝혀진 바 있다 (Kim et al. 2014).



〈그림5〉 위 그림과 동일. 단, 여름철이 아닌 10월부터 2월까지 평균된 북반구 겨울철 지표온도를 나타냄.



〈그림6〉 가을철 해빙 면적. 현재 기후에서의 해빙면적(녹색), 툰드라 식생 변화를 고려하지 않고 이산화탄소를 2배증하였을 때 미래 해빙면적(노란색), 툰드라 식생 변화를 고려하고 이산화탄소를 2배증하였을 때 미래 해빙면적(붉은색), Jeong et al. (2014)에서 발췌.

레퍼런스

Kim, B.-M., S.-W. Son, S.-K. Min, J.-H. Jeong, S.-J. Kim, X. Zhang, T. Shim, and J.-H. Yoon (2014), Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea-ice loss., Nat. Commun., 5, 4646, doi:10.1038/ncomms5646.

하호경, 김백민 공저 (2014) 극지과학자가 쓴 기후변화 이야기. 지식노메드.

IV. 맺음말

이 글에서 기술한 내용을 요약해 보면, 지구온난화에 의해 지금까지 잠들어 있던 영구동토층에 생명활동이 커지고 식물들이 급증하게 되면, 이로 인해 지구급 규모의 탄소순환과 에너지순환이 교란될 수 있다는 사실이다. 또한, 이 과정에서 온난화 증폭 과정인 기후 피드백 메커니즘이 활성화되면서 온난화가 더욱 크게 증폭되며 이로 인하여 달라지는 대기대순환은 궁극적으로 우리가 살고 있는 중위도 지역의 지역기후에까지 큰 영향을 미칠수 있다.

그러나, 실제 미래에 동토층이 얼마나 녹을지, 이로 인해 메탄이 얼마나 방출될 지, 또한 툰드라 식생이 온난화에 의해 얼마나 증가할지 등에 대해서는 아직까지 정확한 추정이 불가능한 상황이고, 다만 본 글에서 소개한 연구에서와 같이 기후 모델을 이용한 미래기후 시뮬레이션을 통해 이들에 대한 추정이 가능할 뿐이다. 물론, 이러한 기후 모델들은 현재 기술력으로는 동토층 내에서 일어나고 있는 다양하고 복잡한 물리과정을 모델링 함에 있어 아직까지 큰 불확실성이 있고, 따라서 영구동토층 해빙이 초래할 수 있는 여러 미래의 파급효과들에 대해 모의된 결과들은 아직까지는 하나의 가능한 시나리오로 참고해야 하는 상황이다. 이러한 점을 극복하기 위해서는 지금보다 더욱 다양하고 정교한 동토에 대한 입체 관측이 요구되고, 이에 근거한 동토층에서 일어나고 있는 다양한 시공간 규모 현상에 대한 정교한 프로세스 모델링 연구가 더욱 활성화되어야 한다. 이를 통해 모델이 예측하는 동토층의 미래는 더욱 정교해지고 신뢰성이 확보될 수 있을 것이다.



No.1 (제 1호)

Polar Brief

ISSN 2384-2946