

# 북극 겨울철 운량의 장기변화가 지면 복사량에 끼치는 영향

조희제<sup>1,2</sup>, 허창희<sup>1</sup>, 박두선<sup>3</sup>, 전상윤<sup>2</sup>

<sup>1</sup>서울대학교, <sup>2</sup>극지연구소, <sup>3</sup>조선대학교

## 1. 서론

지난 수십 년 동안 북극과 주변 지역의 표면 온도는 지구 평균의 두 배에 이르는 크기를 갖고 꾸준히 높아지고 있다. 겨울철 (12월 - 2월)에 국한시켜서 살펴보면 북위 67° 이북 지역의 온도는 1990년대 말까지는 뚜렷한 선형 추세를 보이지 않았지만, 이후 급격한 온난화 추세를 보이고 있다. 북극의 표면 기후에 결정적 역할을 하는 해빙 면적의 겨울철 평균값에서도 같은 추세가 나타나고 있다. 겨울철의 북극 해빙이 본격적으로 녹기 시작한 것은 1990년대 후반 혹은 2000년대 초반 이후의 일이며, 그 이전에는 해빙 면적의 선형 추세가 유의미하지 않았고, 심지어 약한 증가 경향을 띠기도 했다. 이와 비슷한 시기에 북극의 겨울철 평균 운량도 선형 추세가 급격히 변화하였다. 겨울철 평균 운량은 1990년대 후반까지 뚜렷한 감소 추세를 보이다가, 이후 다시 증가하고 있다. 이런 변화는 다양한 위성 자료 및 재분석 자료에서 공통적으로 나타난다 (Jun et al., 2016).

겨울철 극지역의 구름은 다른 계절에 비해 지표면 온난화 효과가 클 수 있는데, 이는 태양광이 적어서 단파 반사에 의한 구름의 냉각효과가 거의 없기 때문이다. 북위 70° 이북의 고위도 지역에서는 겨울철에 구름의 온난화 효과의 기후값이  $20 \text{ W m}^{-2}$  이상인 것이 알려져 있다 (Screen and Simmonds, 2010). 따라서 구름 기후값의 강한 선형 추세가 표면 열수지 및 표면 온도에 어느 정도의 영향을 끼치고 있는지를 정확히 알 필요가 있다. 본 연구에서는 재분석 자료를 이용하여 북극 및 고위도 각 지역의 운량 추세 및 그에 상응하는 구름 복사 강제력의 추세를 분석하고, 이것이 근래의 북극 겨울철의 급격한 온난화와 어떤 관계가 있는지를 살펴보고자 한다.

## 2. 자료 및 방법

본 연구에서는 겨울철 (12월 - 2월) 동안의 ERA-Interim 재분석 자료를 평균해서 분석했다. 기간은 1979년부터 2017년까지로 총 37 번

의 겨울이 포함되는데, 선행 연구들을 참고하여 북극 해빙, 표면 온도, 운량 등의 선형 추세가 크게 변화하는 1996/97년 겨울을 기준으로 전반기 (1979/80 - 1996/97)와 후반기 (1997/98 - 2016/17)로 나누었다. 사용한 변수는 운량과 지표 구름 장파 복사 강제력이다. 여기에서 지표 구름 장파 복사 강제력을 지표 하향 장파 복사량에서 청천 지표 하향 장파 복사량을 빼서 구하였다.

## 3. 결과

선행연구 결과와 같이 북극해의 광범위한 지역에서 겨울철 평균 운량이 전반기에는 감소하고 (그림 1, 왼쪽) 후반기에는 증가하고 있다 (그림 1, 오른쪽). 후반기에는 랩테프 해와 동시베리아 해에서 특히 강한 증가 추세가 나타나는데, 지난 17 년 동안 30% 이상의 운량 증가가 나타난 지역도 있다.

북극해 운량의 전반적인 변화와는 다르게 바렌츠 해에서는 1990년대 후반 이후 거의 증가 추세가 없거나 약한 감소 추세를 보인다. 잘 알려져 있듯이 바렌츠 해는 지난 두 세기에 걸쳐 겨울철 지표면 온난화가 가장 강하게 일어나고 해빙이 가장 많이 녹은 지역이다. 해빙 감소로 해수면 면적이 늘어나고 잠열의 방출이 증가할 가능성이 높아졌다는 점을 고려했을 때 운량의 감소는 주목할 만하다.

전반기, 즉 1980년대와 1990년대에는 북극해 전반에 걸쳐 운량이 감소했는데, 이에 의한 지표 장파 복사 강제력의 변화는 랩테프 해와 그린란드 북부의 좁은 지역을 제외하고는 미미한 것으로 나타났다 (그림 2, 왼쪽). 이는 운량의 변화를 통한 일차 근사로는 구름의 효과를 잘 알 수 없음을 시사한다. 운량을 고정된 상태에서 지표 복사를 모의하면, 운량의 변화 없이도 구름은 온도 이류의 온난화/한랭화 효과를 증폭시킬 수 있기 때문이다.

한편, 1990년대 후반 이후에는 바렌츠 해를 제외한 북극해의 넓은 영역에서 구름의 장파

효과에 의한 지표 온난화 추세가 나타난다. 하지만 운량의 추세와는 달리, 랍테프 해, 동시베리아 해보다 바렌츠 해와 카라 해의 북부에서 구름 장과 복사 효과의 추세가 큰 값을 보이고 있어 구름 복사 강제력이 운량 이외의 요소에 의해 유의미한 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 토의

겨울철 북극 운량은 1980년대와 1990년대에 넓은 지역에서 걸쳐 뚜렷한 감소 추세가 있으므로 장기 변동성을 분석하면 추세가 존재하지 않는 것으로 오인될 수 있다. 또한 북극의 전반적인 운량은 최근 증가하고 있지만 운량의 증가 추세가 강한 지역이 해빙이 녹는 추세가 강한 지역과 일치하지는 않기 때문에 북극 전체를 평균한 관점으로 물리량들 간의 관계를 짓기 어려울 수 있다.

구름이 지표면에 미치는 장과 복사 강제력은 운량 뿐 아니라 구름 하부 대류권의 기온 및 표면 온도에도 크게 좌우된다. 복사 전달 모델을 이용한 근사적 실험에서 구름 복사 강제력의 경년변동성 중 절반 이하의 변동성만이 운량의 변동성에 의해 설명되고 있음을 확인하였다. 겨울철 북반구 고위도의 대기 순환장이 급격한 패턴의 변화를 겪고 있음을 고려하면 온도 이류의 변화 추세 역시 구름 효과에 영향을 주고 있음을 추정할 수 있다.

북반구 겨울철에 바렌츠 해의 해빙 감소하면서 해수면에서의 증발량도 증가하고 있음이 동일 재분석자료에서 확인되었지만 운량의 증가는 관측되지 않았다. 바렌츠 해가 기후적으로 운량이 높은 지역임을 고려했을 때 북극 지역 내에서 이루어지는 대기 중 수증기의 수평적 수송 과정이 다른 지역의 운량에 영향을 주고 있음을 분석할 필요가 있다.

#### 5. 참고문헌

- Jun, S.-Y., Ho, C.-H., Jeong, J.-H., Choi, Y.-S., & Kim, B.-M. (2016). Recent changes in winter Arctic clouds and their relationships with sea ice and atmospheric conditions. *Tellus A*, 68, 29130.
- Screen, J. A., & Simmonds, I. (2010). The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification. *Nature*, 464(7293), 1334 - 1337.

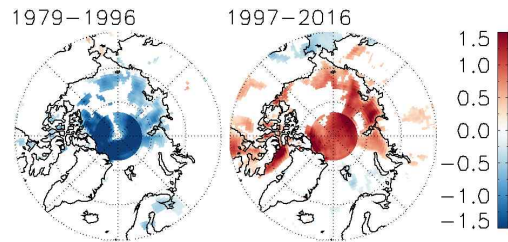


그림 1. 전반기(1979/80 - 1996/97, 왼쪽)와 후반기(1997/98 - 2016/17, 오른쪽)의 겨울철(12월 - 2월) 평균 운량의 선형 추세 (%/년). 5% 유의 수준에서 추세가 존재하는 격자만 표시.

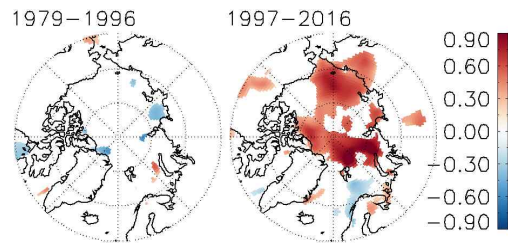


그림 2. 지표 구름 장과 복사 강제력의 선형 추세 ( $W m^{-2}/년$ )를 그림 1과 같은 형식으로 표시.