

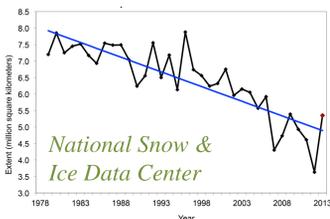
서북극해 장기 클로로필 변동성 연구

고은호^{1,2}, 박지수^{1,2}, 강성호²

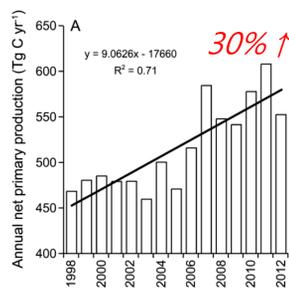
1 과학기술연합대학원대학교
2 극지연구소

Abstract 인공위성을 이용하여 남·북극의 해빙규모를 관측한 이래로 북극에서는 현재까지 해빙의 면적 및 두께 그리고 해빙기간이 지속적으로 감소하고 있다. 북극해의 해빙면적 감소의 원인으로 지구온난화에 의한 대기 기온 상승, 상대적으로 따뜻한 해수의 유입 등으로 보고되고 있으며, 이에 따른 북극해 알베도(albedo) 감소로 해빙을 투과하는 빛의 양이 증가하게 되어 겨울철 해빙이 형성되는 것을 저해시키며 봄, 여름철에 해빙농도의 감소를 증진시킨다. 이러한 북극의 환경요인 중 하나인 해빙면적의 감소는 해양생태계의 변화와 밀접한 관련이 있다. 특히, 북극해 식물플랑크톤의 일차생산은 지난 1998년부터 현재까지 대략 20% 증가했으며, 이는 해빙면적의 감소로 식물플랑크톤의 성장 가능한 시기가 늘어났기 때문이다(Arrigo and van Dijken, 2011). 그러나 북극해에서 지역적으로 해빙면적의 변동과 식물플랑크톤 생물량 또는 일차생산 변화가 어떤 관련이 있는지는 구체적으로 알려진 바는 없다. 본 연구에서는 우선적으로 해빙면적의 후퇴시기와 식물플랑크톤의 생물량과의 상관관계를 파악하고자 하였다. 초기 연구수행 결과 해빙의 후퇴시기(해빙면적의 감소)에 따라 해빙 연도 총 표층 클로로필 농도의 합은 지역적으로 다른 경향을 보였다. 보퍼트 해를 제외한 나머지 해역에서는 북극해빙이 이른 시기에 후퇴했을 때 당해 여름철 총 클로로필 농도의 합이 높게 나타났으며, 늦은 시기에 후퇴했을 때 총 클로로필 농도의 합은 낮게 나타났다. 흥미롭게도, 이와는 반대로 보퍼트 해에서는 해빙면적이 이른 시기에 후퇴했을 때 오히려 총 표층 클로로필 농도의 합이 낮게 나타났고, 늦은 시기에 해빙이 후퇴했을 때 총 클로로필 합은 높게 나타났다. 이는 해빙의 후퇴시기와 식물플랑크톤의 생물량과의 관계에 영향을 주는 어떠한 메커니즘이 있음을 나타내고 있다. 본 연구를 통해, 북극해빙의 후퇴시기와 총 클로로필 농도의 상관관계가 지역적으로 다른 경향을 나타내는 원인을 파악하고자 하였다.

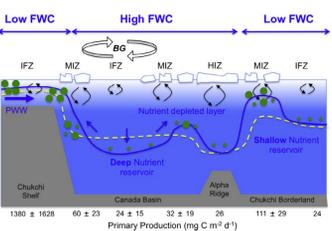
1. Background



- Average monthly Arctic Sea ice extent in September (1979 – 2013)
 - ✓ 북극해 여름철 해빙 면적은 위성 관측이래로 점진적으로 감소하는 경향을 나타냄
 - ✓ 해빙 규모는 십년 당 13.7% 씩 감소함



- Annual net primary production in Arctic Ocean (1998 – 2012) *Arrigo and Dijken, 2015*
 - ✓ 위성을 활용한 북극해 일차생산은 다양한 범위를 보임 (460 ~ 608 Tg C yr⁻¹)
 - ✓ 북극해의 일차생산은 1998년부터 2012년까지 약 30% 증가함
 - ✓ 일차생산 증가의 원인으로 해빙 규모의 감소에 따른 식물플랑크톤 성장 가능 시기의 증가를 들고 있음



- The impact of freshening on PP in the Pacific Arctic Ocean *Coupez et al., 2014*
 - ✓ 해빙 면적 감소에 따라 melting water의 성층화가 식물플랑크톤 성장에 제한을 주는 요인으로 작용
 - ✓ 표층의 강한 성층화는 영양염 공급에 제한을 줌
 - ✓ 특히, 캐나다 분지에서 melting water에 의한 성층화가 강하게 나타남

2. Data and methods

Satellite observed Chlorophyll-a concentration

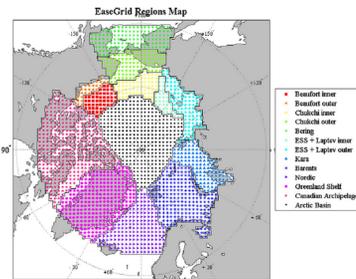
- Sensor: SeaWiFS, MODIS, MERIS, VIIRS >> GlobColour
- Period: 1998 – 2014 (17years)
- Source: GlobColour (<http://hermes.acri.fr/index.php>)

Satellite observed Sea ice concentration

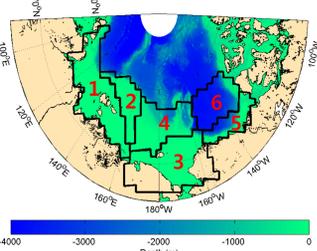
- Sensor: SMMR, SSM/I, SSMIS
- Period: 1998 – 2014 (17years)
- Source: National Snow & Ice Data Center (<http://nsidc.org/data>)

Geographical classification (Study area)

- EASE grid: Functional regions were delimited by latitude and longitude boundaries, and by the 1000 m isobath in the IBCAO database (Hill et al., 2013)



3. Study area and Surface chlorophyll-a

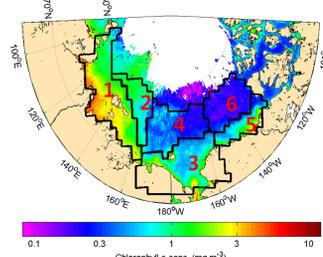


Bathymetry in study area

1. East Siberian Sea + Laptev outer
2. East Siberian Sea + Laptev inner
3. Chukchi outer
4. Chukchi inner
5. Beaufort outer
6. Beaufort inner

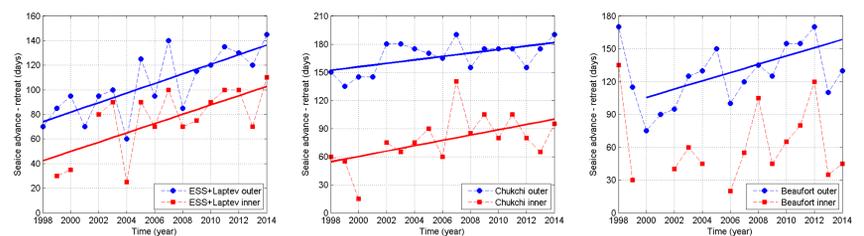
Chlorophyll-a climatology (17 years)

- ✓ 지역에 따른 평균 클로로필 농도는 East Siberian Sea + Laptev outer에서 1.71 mg m⁻³으로 상대적으로 가장 높았으며 Beaufort inner는 0.4 mg m⁻³으로 가장 낮은 농도를 보임
- ✓ 특히, 매켄지와 야나 강이 흐르는 East Siberian Sea + Laptev 연안과 Beaufort 연안해역에서 상대적으로 높은 클로로필 농도를 보임 (>3 mg m⁻³)



4. Sea ice trend

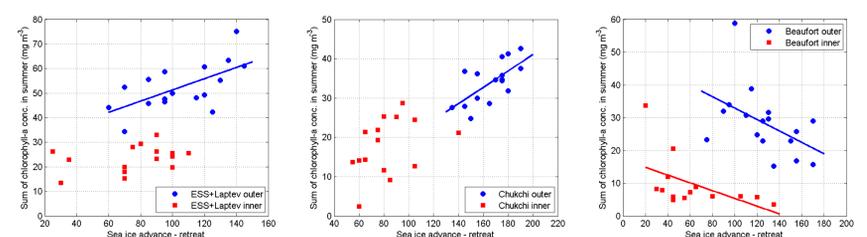
Sea ice advance – retreat ≈ open water duration



- ✓ 해빙 규모를 지역별 면적의 90% 기준으로 해빙의 후퇴시기와 발달시기를 설정함
- ✓ Sea ice advance – retreat은 간접적으로 해빙이 없는 Open water 기간을 의미함
- ✓ Beaufort inner를 제외하고 대부분 해역에서 Open water 기간이 점진적으로 증가하는 통계적으로 유의한 관계를 나타냄 (linear regression line)
- ✓ Open water 기간의 증가는 식물플랑크톤 성장 가능한 시기의 증가를 의미함
- ✓ 따라서, Open water 기간의 증가는 식물플랑크톤 생물량 증가와 양의 관계를 가질 것으로 예상

5. The relationship between Chl-a and Sea Ice

Open water duration vs Sum of Chl-a



- ✓ 여름철 클로로필 값의 총합은 한 해의 누적된 클로로필 양으로 보고 Open water 기간과의 관계를 보기 위한 변수로 활용함
- ✓ ESS+Laptev outer & Chukchi outer 에서 Open water 기간과 여름철 총 클로로필의 합은 양의 상관관계를 보임
- ✓ 반대로, Beaufort outer & inner 에서는 Open water 기간과 여름철 총 클로로필의 합은 음의 상관관계를 나타냄
- ✓ Beaufort outer & inner 에서는 Open water 기간 증가가 양의 관계로 작용하지 않음, 해당 지역에서는 다른 메커니즘에 의해서 음의 관계가 나타났을 것으로 예상

6. Conclusion & Hypothesis

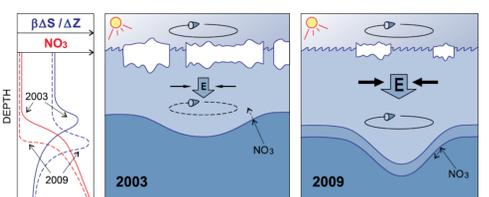
- Background : The Arctic has historically been considered to be a nutrient limited ocean (Walsh et al., 2005; Tremblay and Gagnon, 2009; Taylor et al., 2013)

Positive correlation : Sum of chl-a vs Open water duration

- ① 해빙 면적 감소로 인한 Open water 기간 증가
- ② 식물플랑크톤의 성장 가능한 시기 증가
 - 복사에너지가 open water 표층에 도달하는 기간 증가
- ③ ESS+Laptev outer & Chukchi outer : Open water 기간 ↑ -> Sum of chl-a ↑
- ④ 영양염 제한 : high-nutrient Pacific water, shelf-break upwelling, river run-off 등의 영양염 기원으로 상대적으로 표층 영양염 제한은 적을 것으로 예상됨

Negative correlation : Sum of chl-a vs Open water duration

- ① 해빙 면적 감소로 인한 Open water 기간 증가
- ② 식물플랑크톤의 성장 가능한 시기 증가
- ③ Open water 기간의 증가는 해빙의 melting water가 증가하는 것을 의미하며, 결과적으로 fresh water가 Beaufort Gyre에 갇히게 됨
- ④ 대기와의 상호 작용으로 anticyclonic Ekman pumping (Downwelling) 증가
- ⑤ 염분약점이 깊어짐 -> Nitracline 깊어짐 & 표층 성층화 강화 (fresh water) -> 영양염 수직 흐름의 제한



McLaughlin and Carmack, 2010

- ⑥ Beaufort outer & Beaufort inner : Open water 기간 ↑ -> Nutrient vertical flux limitation -> Sum of chl-a ↓