



# 남극 저온 적응 미세조류의 중요성

강성호 · 강재신

한국해양연구원, 극지연구소

## 1. 남극 해빙(海氷) 서식 생물

바이러스, 박테리아, 미세조류(식물플랑크톤), 원생동물, 동물플랑크톤 등 남극해에 서식하고 있는 플랑크톤들은 극지방의 겨울동안 해수가 얼 때 형성되는 작은 얼음 결정에 부착되어 해빙 속에서 겨울을 지내게 된다(Thomas and Dieckmann, 2002). 남극의 여름이 시작되어 광량이 증가하면 해빙 속에서 겨울을 지내던 해빙 미세조류의 성장이 활발하게 이루어진다. 해빙 미세조류 중 깃돌말류(pennate diatoms)가 가장 빠르게 성장하며, 이들이 포함하고 있는 갈색의 광합성 색소의 농도 증가로 인해 해빙에 갈색의 띠가 형성되게 된다(그림 1). 해빙 속 미세조류의 클로로필 농도가 1000  $\mu\text{g Chl } a \text{ l}^{-1}$ 까지 증가된 것을 측정할 적이 있으며, 이는 남극해 외양에 존재하는 식물플랑크톤 클로로필 농도인 0.1에서 5  $\mu\text{g Chl } a \text{ l}^{-1}$ 에 비해 상당히 높은 미세조류가 좁은 공간에 집중적으로 성장한다는 것을 의미한다. 남극해 해빙 미세조류에 의한 연간 일차생산력은  $63\sim70 \times 10^{12}\text{g C}$ 으로 전체 남극해 식물플랑크톤에 의한 일차생산력인  $1300 \times 10^{12}\text{g C}$ 의 5%에 해당한다(Lizotte, 2001). 이는 전

체 남극해 일차생산력에서 적은 부분을 차지하고 있는 것으로 생각되어 지지만, 실제로 남극해 일차생산력은 여름 2~3달 사이의 짧은 기간에 이루어지며 이때 해빙 미세조류에 의한 집중적인 일차생산력 증가로 인해 남극해 일차소비자인 동물플랑크톤에 높은 농도의 먹이가 집중적으로 제공된다. 이는 해빙 미세조류가 남극 해양생태계를 유지하는데 아주 중요한 역할을 한다는 것을 의미한다. 이로 인해 먹이 농도가 높은 해빙 주변 해역에 원생동물, 요각류, 크릴 등 여러 동물플랑크톤이 모이게 되며, 일차생산력의 증가로 인해 동물플랑크톤의 수가 외양에 비해 증가하게 된다(Loeb et al., 1997). 남극 해양생태계에서 중요한 부분을 차지하고 있는 크릴의 분포와 먹이 섭취활동은 해빙의 분포와 밀접한 관계가 있다. 남극해 크릴 자원량은 총 15억 톤에 이르며, 이는 지구상 모든 인간의 몸무게인 약 5억 톤에 비하면 3배 가량 많은 양이다. 크릴은 남극해에 서식하는 오징어, 펭귄, 물개 및 고래의 주요 먹이원으로 이용되고 있다. 크릴은 하계 동안 식물플랑크톤을 먹고살며, 해수 중 식물플랑크톤이 사라지는 겨울 동안에는 해빙 미세조류를 주요 먹이원으로 이용하면서 해빙주변에서 겨울을 지내게 된다.

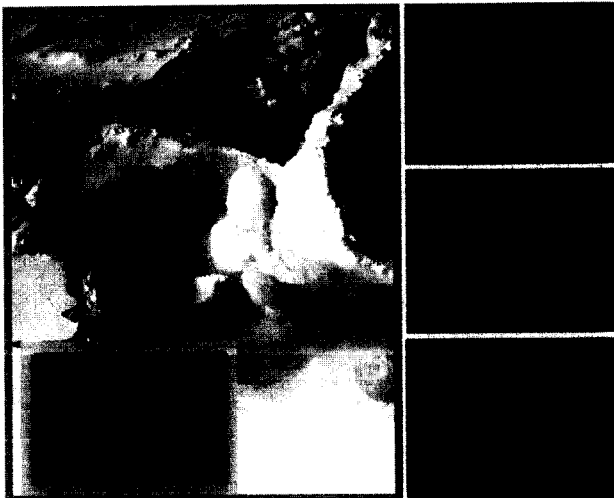


그림 1. 남극해빙 속에 서식하는 미세조류. 갈라진 해빙 틈으로 해빙 미세조류가 성장하여 갈색으로 보이고 있다.

해수 중에 존재하던 박테리아는 크기가 큰 다른 생물들의 표면에 부착되어 있다가 해빙이 형성될 때 함께 해빙 생태계로 유입되게 된다(Thomas and Dieckmann, 2002). 온도가 감소함에 따라 다양한 박테리아가 해빙 속에 존재하게 된다. 초기에는 해수에서 유입된 다양한 박테리아 군집이 존재하다가 온도가 계속 낮아지면 저온성 박테리아가 점점 해빙 내 우점종이 된다(Nichols et al., 2000). 빛이 없는 겨울 동안 해빙 속에서 서식하는 저온성 종속영양생물들은 해빙 미세조류나 박테리아에서 만들어 진 유기물이나 해빙 생물들이 죽으면서 형성된 탄수화물로 이루어진 용존 유기물을 먹이원으로 이용하면서 성장하게 된다.

## 2. 저온 환경

해빙 생물들은 기본적으로 섭씨 영하 20도 이하의 온도에서

도 살아남을 수 있어야만 한다. 미세조류와 원생동물을 포함한 많은 해양 미생물들은 낮은 온도의 환경이 형성되면, 얼지 않기 위해 얼음 결정과 같은 강한 포자를 생활사의 한 시기에 형성하기도 한다. 그러나 포자 형성이 저온에 대한 적응 기작인지 아니면 광량 및 영양염 감소, 염분, pH 변화 등에 대한 생존 전략인지에 대해서는 더 많은 현장 관찰과 실험이 이루어져야 할 것이다(Stoecker et al., 1998).

저온의 환경에서 생명체의 신진대사를 위해서는 기능적 지질막이 잘 보존되어야만 한다. 막인지질의 지방산 구성에 따라 세포막의 유동성 정도가 결정된다. 따라서 불포화 지방산의 증가, 평균 고리길이의 감소 및 복합불포화 지방산(polyunsaturated fatty acids, PUFAs)의 증가 등은 저온 환경에서 세포막 흐름을 유지하는데 중요한 역할을 한다(Russell, 1997). 최근 해빙에서 분리된 호냉성 박테리아에서 새로운 효소인 폴리펩티드 효소가 발견되었다(Metz et al., 2001). 이 효소는 저온에서 잘 작용하고 PUFAs의 생물합성에 꼭 필요한 효소인 것으로 알려졌다. PUFAs는 저온 생물 자체에도 필요한 물질이지만, 물고기나 포유동물이나 포식생물의 먹이를 구성하는 중요한 물질이기도 하다. 겨울이 되면, 생태계 내에 PUFAs의 생산이 증가될 것이다. 이는 PUFAs 합성이 낮은 여름보다 겨울에 PUFAs가 증가된 매우 다른 형태의 먹이망이 형성되게 된다.

해빙서식 규조류의 경우 막지질의 구성을 조절하여 낮은 온도, 낮은 광조건 및 제한된 질산염 농도 하에서도 효율적인 전자전달이 이루어질 수 있도록 한다는 사실이 알려졌지만, 대부분의 세포막 인 및 막 대사 연구는 호냉성 박테리아에 국한되어 있다(Thomas and Dieckmann, 2002). 일반적으로 해빙의 낮은 온도와 낮은 광량은 밀접한 관계가 있다. 광 조건이 변하면 해빙 속에 서식하는 해빙 미세조류의 thylakoid 막의 유동성이 변하며, 광합성을 위한 광시스템 II의 저온환경 적응에도 간접적인 영향을 주게 된다. 낮은 광 조건하에서는 thylakoid 막의 주요 지질군인 monogalactosyldiacylglycerol 속에 존재하는 PUFAs의 비율이 증가한다. 일반적으로 주변환경에 질산염이 부족할 경우, 세포의 단백질 합성이 잘 이루어지지 않아서, 단백질과 색소체의 이중막이 사라지며 결국 엽록체 막이 파괴되어 광합성이 이루어지지 않게 된다. 그러나 호냉성 규조류의 경우, 영양염이 고갈된 상태에서 일어나는 막 단백질의 손실을 digalactosyldiacylglycerol과 phosphatidylglycerol과 같은 지질을 형성해서 세포에 이중막을 만들어 넣어서 생존이 가능하게 된다(Thomas and Dieckmann, 2002).

호냉성 효소는 낮은 온도에서 높은 촉매 효율을 보이고, 열 불안정이 높으며, 더 효율적인 기질 접근을 위해 구조적인 변형이 쉽게 일어나는 특징을 가지고 있다. 낮은 온도 하에 있는 생물체들에게 세포 내의 단백질이 겹겹이 형성되는 기작은 낮

은 온도에서 적응하면서 서식할 수 있는 중요한 현상이다(Devos et al., 1998). 대부분의 연구가 해빙 서식 호냉성 박테리아에서 이루어졌으며, 이들 박테리아가 저온과 고염의 환경에 잘 적응하기 위해서 세포 내에 저온 적응, 항고염 단백질 분해효소인  $\beta$ -galactosidases, phosphatase, amylase 등이 포함되어 있다는 것을 알게되었다(Pomeroy and Wiebe, 2001). 또 다른 적응 기작으로는 식물에 가장 많이 포함되어 있는 효소로서 광합성에 없어서는 안될 주요 효소들의 하나인 ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase (RUBISCO)에 의해 이루어진다. 저온의 호냉성 미세조류에서는 RUBISCO가 낮은 촉매 효율을 보이지만, 온도가 계속 낮아지면서 RUBISCO의 농도가 증가하면서 촉매 활동이 계속해서 일어난다는 사실이 알려졌다(Devos et al., 1998).

비록 해빙 속에 존재하는 영양염의 농도가 해수 중에 존재하는 농도보다는 훨씬 높게 존재하지만, 저온 환경의 해빙 내에 서식하는 미소생물의 성장은 해빙 내에 존재하는 영양염 흡수 기작의 저하로 인해 제한될 수 있다(Pomeroy and Wiebe, 2001). 그러나 이 현상이 모든 영양염에 다 적용되는 것은 아니다. 예를 들면, 암모늄에 대한 미세조류와 박테리아에 대한 친화력은 온도 저하와 무관하지만, 질산염의 친화력은 이들 미소생물의 최적 성장 온도 이하가 되기 시작하면서 감소하게 된다(Reay et al., 1999). 결과적으로, 온도가 아주 낮은 해빙 속에 서식하는 미세조류나 박테리아의 영양염 공급원으로 질산염이 아닌 암모늄이 이용되게 된다. 영양염 공급원으로 암모늄에 대한 의존은 해빙 미소생물의 세포 내로 직접 침투될 수 있게 암모늄이 암모니아로의 전환이 증가하면서 형성되는 pH 값의 상승에 따라 높아지게 된다(Raven et al., 2000; Reay et al., 1999). 해수 중에 존재하는 암모늄 농도가 보통 1  $\mu$ M 이하인데 비해, 해빙의 암모늄 농도는 150  $\mu$ M 정도까지 존재할 수 있다. 이와 같이 해빙에 높게 존재하는 암모늄 농도로 인해 해빙 서식 미소생물의 암모니아 동화 기간 동안에 형성되는 글루타민때문에 질산화 효소가 작용하지 않아서 질산염 동화가 이루어지지 않게 되는 것이다(Priscu and Sullivan, 1998).

### 3. 해빙 내 염분 농도의 증가

해빙 미소생물들이 결빙으로부터 생존하기 위해서는 해수가 얼 때 이루어지는 낮은 온도에서의 탈수현상과 고염분의 환경을 극복해내야 한다. 결빙과 탈수에 대한 식물의 내성 기작은 일반적인 유전 물질과 조절 경로와 관련이 있으며(Thomashow, 2001), 이런 기작은 해빙서식 미소생물에서도 일어난다. 해빙 속에 형성되는 높은 고염 공간에서 일어나는 탈수현상은 주변 해수에 비해 3배정도 높은 농도를 보이는데 이는 해빙 속 염분 공간에 서식하는 미소생물들에게 가장 큰 스트레스 요인으로

작용한다. 반대로, 해빙이 녹으면서 주변 해수에 유입되는 해빙 미세조류들은 담수에 가까운 저염의 해수에 갑자기 노출되게 될 것이다. 염분에 대한 스트레스를 받으면 저온의 호냉성 박테리아는 세포의 지질 응집과 모노불포화 및 고리화 지방산의 비율을 조절한다(Nichols et al., 2000). 또한 급격하게 변화하는 염분에서 기능을 하는 내염성 효소도 호냉성 미소생물과 같은 특징을 보인다(Pomeroy and Wiebe, 2001).

삼투압의 변화에 대한 스트레스에서 살아남기 위해서는 세포 안쪽과 바깥 쪽의 주변 환경 사이의 삼투압의 균형을 유지하기 위한 세포 속 삼투분해산물 농도가 조절되어야만 한다. 세포 외부의 염분 농도가 증가하면 주변 삼투압 증가로 인해 세포 내에 proline, mannitol, glycine betaine과 같은 유기 용질과 무기 이온을 포함한 삼투분해산물이 합성되거나 세포 내에 축적되게 된다. 반대로 외부의 염분이 낮아지면 세포 내 삼투압을 낮추기 위해 삼투분해산물이 세포 밖으로 방출되게 된다. 또 다른 삼투분해산물과 결빙방지제로 작용하는 물질로 고농도의 해빙 미세조류에서 만들어지는 dimethylsulfoniopropionate (DMSP)도 존재하는 것으로 조사되었다(Kirst and Wiencke, 1995).

#### 4. 낮은 광량 환경

일반적으로 해빙 미세조류는 낮은 광량에서도 효율적으로 광합성을 할 수 있도록 적응되어 있다. 해빙이 형성된 후 눈이 해빙 위에 쌓이면 빛의 투과를 막아 해빙 미세조류에 도달하는 빛의 양이 급격히 줄어들게 된다. 이때 해빙 미세조류들은 낮은 광량에서도 살아남기 위해 생리적인 변화가 일어난다. 예를 들면, 오랜 세월동안 진화되어 온 해양 일차생산자들은 아주 낮은 광량(<math>10 \text{ nm photon m}^2 \text{ s}^{-1}</math>)에서도 잘 성장할 수 있도록 진화되어 왔다(Raven et al., 2000). 이와 같이 미세조류가 낮은 광량에 적응하기 위해 광합성 색소의 양을 조절하거나 색소의 조성을 변화한다. 해빙 서식 미세조류에는 보조색소인 fucoxanthin의 농도가 증가하는데, 이는 해빙을 투과하는 빛의 파장을 이 fucoxanthin이 가장 효율적으로 흡수하기 때문이다(Lizotte, 2001). 이렇게 낮은 광 조건에 적응된 해빙 미세조류들은 갑자기 강한 빛이 투과되면 광 저해 현상이 일어나 광합성에 역효과가 나타난다(Kirst and Wiencke, 1995). 낮은 광량과 저온 환경에서 미세조류의 호흡에 대해서는 잘 알려져 있지 않지만, 호흡이 낮은 광 조건하에서 미세조류가 적응할 수 있게 하는 주요 조절 요인일 것으로 추정하고 있다(Kirst and Wiencke, 1995).

확실한 증거는 찾지 못했지만, 광량이 급격히 감소하는 겨울이 되면 해빙 미세조류들은 광합성을 통한 자가영양에서 유기물을 직접 흡수하는 타가영양자로 전환되어 존재한다(Thomas and Dieckmann, 2002). 최근 한 연구에 의하면 빛이 전혀 없는 상태에서 광합성 해양 규조류에 포도당 전달자를 포함한 유

전자가 주입되면 빛이 없는 상태에서도 포도당을 이용해 성장할 수 있다는 사실이 알려졌다(Zaslavskaja et al., 2001). 마찬가지로 해빙 서식 미세조류도 이와 같은 대사기능의 변화를 통해 낮은 빛 조건에서도 살아남을 수 있게 된다.

#### 5. 용존 기체

해빙 미세조류의 대량증식을 야기 시키는 우점종의 종류를 결정하는 중요한 요인 중 하나가 종에 따른 무기 탄소 흡수의 생리적 차이이다. 해빙 미세조류의 광합성을 통해 해빙 속에 녹아있던 용존 무기 탄소가 고갈되어 해빙 염수 내 pH가 11까지 증가한다(보통 해수 중 pH는 8임) (Gleitz et al., 1995). 해빙 속에 형성되는 낮은 무기탄소 농도로 인해 해빙 미세조류의 안정 탄소 동위원소가 변한다. 이로 인해 해빙 속에 서식하는 미세조류와 해수 중에 서식하는 미세조류의 탄소 안정 탄소 동위원소의 차이가 이루어진다(Gleitz et al., 1995). 이와 같은 차이를 이용해 고환경을 연구하는 고해양학자들은 퇴적물에 포함되어 있는 안정 탄소 동위원소의 차이를 이용해 과거 해양이 해빙으로 덮여있었던 빙하기인지 아니면 해빙이 녹은 간빙기의 해양이었던 지를 유추한다.

해빙 염수 속에 존재하는 산소 농도 측정에 대한 연구는 별로 이루어지지 않았다. 한 연구에 의하면 해빙 미세조류에 의한 광합성으로 해빙 내 무기 탄소 농도가 낮아지는 반면에, 산소 농도가 과도하게 존재하는 과산소 상태가 되는 것으로 조사되었다(Gleitz et al., 1995). 반응 산소종과 수산기를 생성하는 과산소 상태는 생물에게 아주 독성을 보이며 해양에서 드물게 나타난다(Raven, 2001). 독성의 광화학물질은 UV-B, 산소 그리고 특정의 유기 분자들이 서로 반응하여 생성되기도 한다. 어떻게 해빙 미소생물들이 산화에 대한 압력에 대응하는지에 대해서 잘 알려져 있지 않지만, 해빙 미세조류에서 catalase, glutathione peroxidase, glutathione reductase와 같은 활성 항산화 효소가 존재한다는 사실이 알려졌다. 이 항산화 효소들은 최대 광합성과 호흡 작용이 일어나는 빛과 온도 조건의 범위를 넘어서 기능을 한다(Thomas and Dieckmann, 2002).

#### 6. 해빙 속에 형성되는 미소환경

저온 환경에 서식하는 해빙 미세조류의 세포 내 반응에 대한 연구는 많이 진행되고 있지만, 최근 연구에 의하면 해빙 미세조류가 세포 밖으로 당단백질 이라 생각되어지는 ice-active substances (IASs, 얼음 활성 물질)를 분비하여 얼지 않고 해빙 속에서 생존할 수 있게 한다는 사실이 알려졌다 (Raymond, 2000). 아직 IASs라는 당단백질은 어떤 구조로 되어있는지 알려져 있지 않다. 해빙 속에 서식하는 미세조류 (특히 해빙 규조류)에서 분비되는 이 당단백질은 해빙 규조류 주변의 얼음

표면의 모양을 변화시키거나 혹은 얼음의 광학적 특성을 변화시켜서, 해빙 미세조류들이 얼음 결정에 파괴되지 않고 잘 부착되거나 혹은 얼음과 얼음 사이의 결정에 눌러서 파괴되고 않고 살아남을 수 있게 하는 역할을 하는 것으로 알려져 있다 (Raymond, 2000). 해빙 미세조류와 박테리아에서 다당류로 구성되어 있는 extracellular polymeric substances (EPS)의 형태로 많은 양의 용존 유기물이 외부로 분비되는 것으로 알려져 있다(Thomas et al., 2001). 해빙 미세조류와 박테리아가 많은 양이 존재할 경우 생물막과 같은 층이 얼음 속의 염수 이동경로 내부에 형성될 가능성이 있다. 해빙 미소생물의 세포 주변에 형성되는 이 점액질의 생물막으로 인해 세포 주변의 물리화학적 환경에 많은 변화가 일어난다. 아직 해빙 내에 미세조류가 분비한 IASs 혹은 EPS의 생물막에 대한 어떤 것도 알려져 있지 않지만, 이들이 해빙 내에 생존하는 미소생물들이 얼음 결정에 파괴되지 않고 보호되거나, 급격한 pH와 염분 변화의 완충 역할을 하며, 다른 여러 가지 화학적 스트레스를 막아주는 역할을 한다고 생각한다. EPS가 첨가된 해빙은 해빙 속에 형성되는 염수 공간의 형태가 변형되어 해빙 내 미소생물과 용질의 침투율이 변화되는 것으로 알려져 있다(Thomas and Dieckmann, 2002). EPS는 해빙 미소생물들이 성장하고, 이동할 수 있고, 포식자로부터 보호될 수 있는 해빙 내 공간을 형성하는 중요한 역할을 한다.

### 7. 해빙연구의 응용

최근 해빙 미소생물에 대한 연구가 전세계적으로 집중적으로 이루어지고 있다. 여러 가지 이유가 있겠지만 초저온의 극한지 해빙 속에서 생리적, 생화학적으로 적응하면서 살아남을 수 있는 기작을 이해하고, 어떤 물질이 이런 역할을 하는지를 생명공학적인 측면에서 잠재적으로 이용하려는 시도가 이루어지고 있기 때문이다. 현재 산업적으로 이용되고 있는 물질들로는 양식업, 축산업 및 식품의 재료로 PUFAs가 생산되고 있고, 세계나 식품가공을 위해 저온성 효소가 이용되고 있다(Russell, 1997). 또한 극지의 저온 환경에 적응한 생물들로 추출한 결빙방지물질을 이용한 응용 연구가 많이 진행되고 있다(Feeney and Yeh, 1998). 극지에서 추출한 결빙방지 단백질을 이용해 식품 저장, 의약 분야에서 초저온 수술, 장기 보관 및 혈액 보관 등에 이용하기 위한 노력이 세계적으로 이루어지고 있다(그림 2). 기존의 결빙방지 단백질은 자원이 한정되어 있는 극한지의 동물로부터 추출했기 때문에 대량생산의 한계가 있다는 약점이 있다. 그러나 현재 한국해양연구의 극지연구소에서는 극한지 미세조류를 대량으로 배양할 수 있는 시설을 확충하여 새로운 결빙방지 물질을 대량생산할 수 있는 방안을 마련하기 위한 연구가 진행중이다.

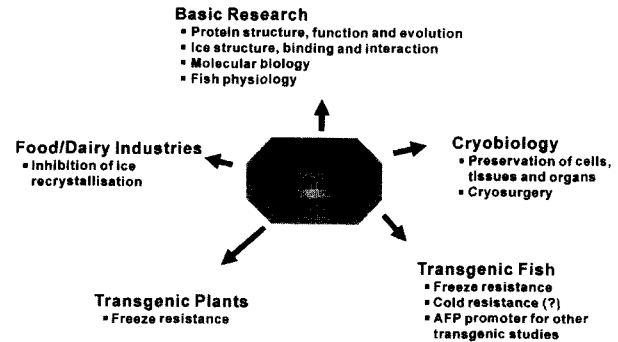


그림 2. 결빙방지 단백질에 대한 연구와 응용 분야

이런 산업적인 응용에 관심뿐만 아니라, 해빙 미소생물들이 서식하고 있는 해빙의 계절적 변화와 환경 변화와의 관계를 규명하기 위한 많은 지구환경변화 연구가 진행되고 있다. 지구 온난화로 인해 해빙의 크기가 점점 줄어들고 있으며, 이는 해빙 미소생물의 생물량, 종조성, 분포 등에 영향을 미쳐 해빙 미소생물과 밀접한 관계가 있는 생물들의 먹이원 변화를 초래할 지도 모른다. 특히 남극해 해양 생태계의 중추적인 생물인 크릴의 중요한 먹이원으로 이용되고 있는 해빙 미세조류가 지구환경변화로 인해 생물량, 우점종, 생산력 등이 변화하여 크릴의 계절적 먹이 행동과 생활사를 변화시킨다면, 전체 남극 해양 생태계의 변화가 초래될 것이다(Kang et al., 2000). 최근 해빙 미소생물에 대한 관심이 집중되기 시작하였는데, 이는 우주생물학자들이 목성의 위성인 유로파와 가니메테(McCord et al., 2001)와 화성(Malin and Edgett, 2000)에 존재하는 얼음 바다를 집중적으로 조사하다가 이곳에 해빙으로 덮여있는 neoproterozoic "snowball earth"에 지구에 존재하는 해빙 미소생물과 유사한 생명체가 존재할 가능성을 제기한 후부터 시작되었다(Hoffman et al., 1998). 유로파의 표층에서 발견된 갈색의 얼음층과 지구의 해빙에 나타나는 해빙 구조유에 의한 갈색 표층과 비교를 시도해 보았지만, 이는 우주에 존재하는 수십, 수백 km의 두께로 존재하는 외계 해빙 시스템과 수 미터 이하의 얇은 해빙 두께를 보이는 지구의 해빙 시스템과 근본적으로 차이가 날 것이다. 만약에 우주에 생명체가 존재하거나 존재하여 왔다면, 이는 오늘날 지구에 존재하는 해빙 미소생물과 아주 다른 생명체일 것이다(Chyba and Hand, 2001).

### 8. 환경변화에 대한 극지 미세조류의 생물학적 파라미터

1980년대 초반부터 오존층 파괴에 의한 자외선 증가로 인한 영향을 조사하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다(Prezelin et al., 1998). 자외선 중 특히 생물에 유해한 자외선-B (UV-B) 파장의 양이 증가하는 남극의 봄철에도 해빙에 서식하는 생물

들은 해빙이 UV-B 파장을 막아주는 역할을 하기 때문에 해빙의 표층에 서식하는 생물을 제외하고는 그렇게 큰 영향을 받지 않는 것으로 조사되었다. 하지만 자외선에 대한 방어기작으로 생성되는 자외선 방어물질인 mycosporine-like amino acid, porphyrin-334가 해빙 서식 미세조류에서도 측정되었다. UV-B 파장은 해빙 미세조류의 RNA transcription과 DNA replication 뿐만 아니라 광합성을 위한 photosystem II를 손상시켜서 미세조류가 광합성을 통한 탄소 흡수를 저해하는 역할을 한다(Prezelin et al., 1998). 해빙 자체에서 대부분의 유해한 자외선이 흡수되기 때문에 해빙 서식 미세조류 전체의 일차생산력에는 크게 영향을 주지 못하지만, 해빙 서식 미세조류의 우점종 조성 변화가 일어날 수 있을 것이다(Karentz and Spero, 1995).

남극 해양생태계는 오존층 파괴와 지구 온난화 현상 등과 같은 지구 환경 변화에 의해 위협받고 있다(Kang et al., 2001). 특히 연안해역에 서식하는 미세조류는 비교적 쉽게, 빨리 이들 변화에 노출되기 때문에 환경변화를 감지하고 감시하기 위한 주요 생물학적 파라미터로 이용될 수 있다(Kang et al., 2000). 낮은 빛조건과 온도에 적응 되어온 남극 미세조류는 오존층 파괴에 의한 자외선(UV-B)의 침투 및 지구 온난화에 의한 미세한 해수온도의 변화에도 민감하게 반응하게 된다(Karentz et al. 1991). 일차생산자인 미세조류는 남극 해양생태계를 유지하는데 중요한 역할을 하며, 이들의 변화는 전체 남극해양생태계의 변화를 의미한다(Davidson and Marchant, 1992). 남극 세종기지 주변의 연안역에 서식하고 있는 미세조류를 장기적인 감시 체계 구축을 위해 지표종으로 이용하기 위한 연구의 일환으로 1996년부터 미세조류를 생물학적 파라미터로 한 연구가 수행되고 있다(Kang et al., 2002).

세종기지(<http://sejong.kordi.re.kr>)는 남위 62° 13', 서경 58° 47'의 마리안 코부에 인접한 곳에 위치하고 있기 때문에 미세조류의 장기적인 관찰을 위해 이상적인 장소이다. 세종기지 주변 해역은 남쪽의 브랜스필드 해협과 북쪽의 드레이크 해협의 직접적인 영향을 받고 있지는 않고, 지역적으로 발생하는 조석간만의 차, 빙산의 유입, 바람에 의한 영향 등에 의해 독특한 환경을 이루고 있다. 그래서 이 지역에 서식하는 미세조류들은 바람, 조석, 빙산, 포식자 등에 의해 구조적인 특징이 결정되어지는 것으로 생각된다. 하계 동안에는 주변의 빙하와 해빙이 녹아 형성된 안정된 수괴의 영향을 받으며, 지속적인 바람에 의해 수괴의 변화가 미세조류의 성장에 가장 큰 영향을 준다고 생각한다(Kang et al., 1997). 그래서 미세조류의 계절적인 물리환경의 변화에 따른 천이과정, 종 구성, 생물량등이의 구조적인 양상을 이해하는 것은 장기적인 변화양상을 이해하기 위한 기본 데이터로 이용될 수 있는 것이다. 현재 진행중인 연구를 통해 1) 극지 생물권 보존 및 다양성 연구의 일환으로 연안

에 서식하고있는 플랑크톤의 구조, 기능 및 역할을 이해하는데 중요한 기초자료가 확보될 것이며, 2) 지구환경변화(온실효과, 오존층 파괴)와 관련한 이들의 변화감지와 장기감시(Long-term monitoring) 시스템 구축을 위한 생물학적 파라미터로서 미세조류가 이용됨으로서 남극 해양생태계에서의 변화 및 적응양상 이해에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

### 감사의 글

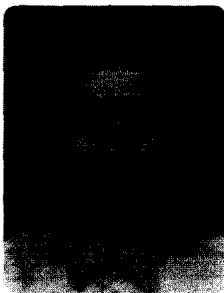
본 논문의 저자는 한국해양연구원 극한환경 유전자원 및 바이오신소재 개발 사업(PE83500)과 남극 환경 모니터링 사업(PP03102)의 지원으로 연구과제를 수행하고 있습니다. 본 논문에 서술된 내용의 일부는 상기 사업에서 연구비를 지원 받아 수행한 연구결과이며 이에 감사 드립니다.

### 참고문헌

- Chyba, C.F. and K.P. Hand. 2001. Planetary science: life without photosynthesis. *Science* 292, 2026-2036.
- Davidson, A.T. and H.J. Marchant. 1992. Protist abundance and carbon concentration during a *Phaeocystis*-dominated bloom at an Antarctic coastal site. *Polar Biol.* 12, 387-395.
- Devos, N., M. Ingouff, R. Loppes, and R.F. Matagne. 1998. Rubisco adaptation to low temperatures: a comparative study in psychrophilic and mesophilic unicellular algae. *J. Phycol.* 34, 655-660.
- Feeney, R.E. and Y. Yeh. 1998. Antifreeze proteins: Current status and possible food uses. *Trends Food Sci. Technol.* 9, 102-106.
- Gleitz, M., M.R. Loeff, D.N. Thomas, G. S. Dieckmann, and F.J. Millero. 1995. Comparison of summer and winter inorganic carbon, oxygen and nutrient concentrations in Antarctic sea ice brine. *Mar. Chem.* 5, 81-91.
- Hoffman, P.F., A.J. Kaufman, G.P. Halverson, and D.P. Schrag. 1998. A Neoproterozoic Snowball Earth. *Science* 281, 1342-1346.
- Kang, J.-S., S.-H. Kang, J.H. Lee, K.H. Chung, and M.-Y. Lee. 1997. Antarctic micro- and nano-phytoplankton assemblages in the surface water of Maxwell Bay during the 1997 austral summer. *Korean J. Polar Res.* 8, 35-45.
- Kang J.-S., S.-H. Kang, J.H. Lee, and S. Lee. 2002. Seasonal variation of microalgal assemblages at a fixed station in Marian Cove, King George Island, Antarctica, *Marine Ecology Progress Series* 229, 19-32.
- Kang S.-H., J.-S. Kang, S. Lee, D.K. Kim, and D.Y. Kim. 2000. Importance of Polar Phytoplankton for the Global Environmental Change, *Korean J. Environ. Biol.* 18, 1-20.
- Kang S.-H., J.-S. Kang, S. Lee, and Y.-H. Lee. 2001. Effects of the Antarctic ozone depletion on the marine phytoplankton. *Algae*, D. *Korean J. Phycol.* 16, 303-314.
- Karentz, and H.J. Spero. 1995. Response of a natural *Phaeocystis* population to ambient fluctuations of UVB radiation caused by

- Antarctic ozone depletion. *J. Plank. Res.* **17**, 1771-1789.
- Karentz, D., J.E. Cleaver, and D.L. Mitchell. 1991. Cell survival characteristics and molecular responses of Antarctic phytoplankton to ultraviolet-b radiation. *J. Phycol.* **27**, 326-341.
- Kirst, G.O. and C. Wiencke. 1995. Ecophysiology of polar algae. *J. phycol.* **31**, 181-187.
- Lizotte, M.P. 2001. The contributions of sea ice algae to Antarctic marine primary production. *A. zool.* **41**, 57-73.
- Loeb, V., V. Siegel, O. Holm-Hansen, R. Hewitt, W. Fraser, W. Trivelpiece, and S. Trivelpiece. 1997. Effects of sea-ice extent and krill or salp dominance on the Antarctic food web. *Nature* **387**, 897-899.
- Malin, M.C. and K.S. Edgett. 2000. Evidence for Recent Groundwater Seepage and Surface Runoff on Mars. *Science* **288**, 2330-2334.
- McCord, T.B., G.B. Hansen, and C.A. Hibbitts. 2001. Hydrated Salt Minerals on Ganymede's Surface: Evidence of an Ocean Below. *Science* **292**, 1523-1524.
- Metz, J.G., P. Roessler, D. Facciotti, C. Levering, F. Dittrich, M. Lassner, and Valentine. 2001. Production of Polyunsaturated Fatty Acids by Polyketide Synthases in Both Prokaryotes and Eukaryotes. *Science* **293**, 290-292.
- Nichols, D. S., J. Olley, H. Garda, R.R. Brenner and T.A. McMeekin. 2000. Effect of Temperature and Salinity Stress on Growth and Lipid Composition of *Shewanella gelidimarina*. *Appl. Environ. Microbiol.* **66**, 2422-2429.
- Pomeroy, L.R. and W.J. Wiebe. 2001. Temperature and substrates as interactive limiting factors for marine heterotrophic bacteria. *Aqu. Microb. Ecol.* **23**, 187-204.
- Prézelin B.B., M.A. Moline and H. A. Matlick. 1998. Biological processes, interactions and variability. *Antarctic Res. Ser.* **73**, 45-83.
- Priscu J.C. and C.W. Sullivan. 1998. Nitrogen metabolism in Antarctic fast-ice microalgal assemblages. *Antarctic Res. Ser.* **73**, 147-160
- Raven, J.A., J.E. Kubler, and J. Beardall. 2000. Put out the light, and then put out the light. *J. Mar. Biol. Assoc. U.K.* **80**, 1-26.
- Raymond, J.A. 2000. Distribution and partial characterization of ice-active molecules associated with sea-ice diatoms. *Polar Biol.* **23**, 721-729.
- Reay, D.S., D.B. Nedwell, J. Priddle, and J.C. Ellis-Evans. 1999. Temperature Dependence of Inorganic Nitrogen Uptake: Reduced Affinity for Nitrate at Suboptimal Temperatures in Both Algae and Bacteria. *Appl. Environ. Microbiol.* **65**, 2577-2584
- Russell, N.J. 1997. Psychrophilic Bacteria--Molecular Adaptations of Membrane Lipids. *Comp. Biochem. Physiol. A* **118**, 489-493.
- Stoecker, D.K., D.E. Gustafson, M.M.D. Black, and C.T. Baier. 1998. Population dynamics of microalgae in the upper land-fast sea ice at a snow-free location. *J. phycol.* **34**, 60-69.
- Thomas, D.N. and G.S. Dieckmann. 2002. Antarctic Sea Ice-a Habitat for Extremophiles. *Science* **295**, 641-644.
- Thomas, D.N., G. Kattner, R. Engbrodt, V. Giannelli, H. Kennedy, C. Haas, and G. Dieckmann. 2001. Dissolved organic matter in Antarctic sea ice. *Ann. Glaciol.* **33**, 297-303.
- Thomashow, M.F. 2001. So What's New in the Field of Plant Cold Acclimation? Lots!, *Plant Physiol.* **125**, 89-93.
- Voytek M.A. 1989. Ominous future under the ozone hole: Assessing biological impacts in Antarctica, report, Environ. Def. Fund, Washington, D.C.
- Zaslavskaja, L.A., J.C. Lippmeier, C. Shih, D. Ehrhardt, A.R. Grossman, and K.E. Apt. 2001. Trophic Conversion of an Obligate Photoautotrophic Organism Through Metabolic Engineering. *Science* **292**, 2073-2074.

## 강성호



- 1981. 3.~1985. 2. 인하대학교 이과대학 해양학과 (이학사)
- 1986. 7.~1989. 8. 미국 Texas A&M 대학교 해양학과 (이학석사, 해양학)
- 1990. 6~1992. 12. 미국 Texas A&M 대학교 해양학과 (이학박사, 해양학)
- 1992. 12.~1995. 8. 한국해양연구원 극지연구소 Postdoctoral Associate
- 1995. 9.~2002. 2. 한국해양연구원 극지연구소 선임연구원
- 1995. 12.~1997. 1. 제9차 대한민국 세종과학기지 월동연구대(생물 연구원)
- 1999. 6.~9. 제1차 대한민국 북극탐사대 연구원 (팀장, 제 1차 한-중국 북극해 공동연구)
- 2000. 7.~현재 남극과학위원회(SCAR) 생명과학 분과위원회 한국 대표
- 2001. 3.~현재 충남대학교 해양학과 겸임교수(부교수)
- 2002. 3. 1 ~ 현재 한국해양연구원 극지연구소 책임연구원