

Ⅷ. 독도 천연보호구역의 물골지역 원생생물 다양성 및 환경조사

1. 서론

물골은 서도 북쪽의 조면암지역에 위치하고, 물골의 담수는 물골 상류지역의 토양이 두꺼운 지역에서 내린 강우가 계곡의 절리를 따라서 하류로 이동하다가 라필리응회암 에서는 물골쪽으로 흘러서 암석이 떨어져 나간 동굴인 물골에 이르러 더 이상 이동하지 못하고 가로 1.2m, 세로 1.4m, 깊이 1.68m의 저수조에 모인다 (<그림 Ⅷ-1> - 국토해양부, 2010).

물골의 담수는 과거 독도에서 음용수로 널리 이용되었지만, 2004년 서울시보건환경연구원에서 수행한 수질 조사 이후 일부 수질 항목의 기준치 초과로 인해 현재는 음용수의 기능보다는 독도 천연보호구역 내 유일한 담수라는 상징적 의미가 크다. 그래서 물골 본래의 음용수 기능을 복원하기 위한 대책 수립을 위해 물골에 대한 심층적 수질 조사가 우선 수행되어야 한다.



<그림 Ⅷ-1> 독도 천연보호구역의 물골



<그림 Ⅷ-2> 독도 천연보호구역의 물골 주변 환경



물골은 독도 유일의 담수 환경으로 주변 해역과는 다른 생물상이 관찰될 것으로 여겨진다. 전체 진핵생물 중 2~20 μ m 크기의 생물체는 대부분 원생생물에 속하며, 환경 내에서 가장 많은 개체수(대략 해수 100리터 당 1억 세포 수)와 높은 다양성(약 30만 종 이상 추정)을 보인다(Foissner 2008). 이들 원생생물은 생태적으로 물질 순환의 중요한 생물학적 요소지만(Karl 2007), 현미경을 통해서만 볼 수 있는 작은 크기 때문에 분류하기 어려운 그룹 중 하나로 알려져 있다. 분류학적으로 원생생물은 동물과 육상식물을 제외한 모든 진핵생물에 포함되며(Simpson and Roger 2004), 광합성 유무에 따라 각각 자가영양성과 종속영양성 미소진핵생물로 나눌 수 있다. 자가영양성 원생생물은 세포 내 색소체를 가지고 있으며 지구 온난화의 주요 요인인 이산화탄소를 이용하여 성장하고, 종속영양성 원생생물은 박테리아의 주된 섭식자(grazer)이자 상위 영양 단계(예, 동물플랑크톤)의 에너지 공급원이기도 하다(Azam and Malfatti, 2007). 하지만 물골의 담수 환경 내 원생생물의 다양성 연구는 전무하다.

2. 조사 시기 및 방법

1) 물골의 수질 조사 시기 및 항목

2014년 8월 물골 표층시료(고인 물)에서 총 8개 항목인 염분, 용존산소, pH, 클로로필-a, 부유사, 총질소 및 총인, 화학적 산소요구량(COD)를 수질오염공정시험 방법에 따라 측정하였다.

2) 물골 내 원생생물 다양성 연구

2014년 8월 현장 조사가 수행되었으며, 현장 시료 약 1L에 멸균한 barley grains을 넣고 enrichment를 하였다. 현재 plate method 또는 serial dilution 방법을 사용하여 원생생물을 분리 중에 있다. 순수 분리된 원생생물(2011년 6월 시료 및 2012년 4월 시료)은 광학현미경으로 관찰하였으며, 보다 객관적인 분석을 위해 DNeasy Blood and Tissue Kit (Qiagen)을 사용하여 핵산을 추출하였다. 핵산 내에 있는 다양한 18S rRNA 유전자를 증폭하기 위해 EukA(5'-AACCTGGTTGATCCTGCCAGT-3')와 EukB(5'-TG ATCCTTCTGCAGGT TCACCTAC-3')의 primer set를 사용하였다. 각 시료의 PCR를 위해 50 μ l PCR mixture 안에 최종 농도로 5U of ProofStart high fidelity Taq polymerase(Qiagen), x1 PCR buffer, 200nM dNTP, 0.5 μ M each primer, template 로써 3-10ng의 DNA를 PCR tube에 넣었다. PCR 조건은 초기 denaturation은 9

5℃에서 5분간 놔두고, 매 cycle마다 94℃에서 30 초, 56℃에서 45초, 72℃에서 1분간 총 40cycles를 수행하였다. 마지막으로 PCR 종료 후 72℃에서 10분간 놔두었다. PCR 산물을 MinElute PCR purification kit로 정제하였으며, 증폭된 PCR 산물은 pGEM-Teasy vector에 cloning 한 후 염기서열을 분석하였다. 분석된 염기서열은 BLASTn search를 통해 기존의 염기서열과 비교 분석하였으며, 순수 분리된 원생생물의 보다 명확한 계통분류학적 위치를 확증하기 위해서 분자계통학적 계통수 분석을 수행하였다. 분자계통학적 계통수는 PAUP 프로그램을 이용하여 maximum likelihood와 maximum parsimony 방법을 사용하였으며, 계통수의 신뢰도는 bootstrapping 방법을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

1) 물골의 수질

물골 담수의 근원은 상류지역의 토양층에 내린 강우가 조면암내 발달한 절리와 조면암과 응회암의 경계부를 따라서 이동하다가 조면암내 절리가 대기에 노출된 물골에서 유출된 것으로 알려져 있기 때문에(국토해양부, 2010) 지하수보다는 지표수의 개념으로 접근할 필요가 있다. 2014년 8월 조사에서 측정된 물골 담수(고인 물)의 염분은 1.4 ppt로써, 이는 2011년 10월 조사와 유사한 결과(1.5 ppt)로써 물골 담수에 소량의 무기이온이 녹아 있음을 시사한다. pH는 8.3로 알칼리성을 나타냈으며, 이는 한국지질자원연구원에서 2007년 10월, 2010년 10월에 측정된 7.37~7.45와 본 연구진에 의해 2011년 10월에 측정된 7.53보다 다소 높게 나왔다.

용존산소는 9.6 mg/L로 측정되었으며, 이는 호소 기준 I등급에 해당하며 2007년 10월과 2010년 10월에 측정된 9.3~10.4 mg/L와 유사하였으나, 2011년 10월 측정값(8.09 mg/L) 보다는 다소 높았다. 기존 연구와 비교시 pH와 용존산소 측정값의 차이는 계절적인 요인에 기인한 것으로 사료된다.

총 질소는 56.2 mg/L로 측정되었으며, 이는 호소 VI 등급에 해당하여 호소 I 등급 기준치(0.2 mg/L 이하)의 약 280배 높은 수치로 조류의 배설물에 때문으로 추정된다. 한국지질자원연구원의 보고서(국토해양부, 2010)에 따르면 물골지역에서 2009년 10월과 2010년 10월에 측정된 총 질산이 각각 38.7 mg/L과 41.9 mg/L이며, 본 연구진에 의해 2011년 10월에 측정된 총 질소는 50.9 mg/L로, 이는 물골 내 총 질산의 양이 시간에 따라 점차 증가하고 있음을 시사한다. 더불어 측정 기관 및 시기에 상관없이 물골 내의 총질산은 항상 호소 I 등급 기준치보다 약 200배 높은 값을 보였다. 이는 물골 지역 주변에 높은 총질소의 주된 공급원이 항시 존재



하고 있음을 시사한다. 더불어 본 조사에 수행된 고인 물 뿐만 아니라 주변 유수역시 조사가 수행되어 비교 평가가 추가적으로 이뤄져야 할 것으로 사료된다. 총인 역시 호소 I등급 기준치(0.01 mg/L)보다 약 5배 높은 값(0.048 mg/L)으로 측정되었으며, 2011년 10월의 측정값인 0.036 mg/L와 유사하였다. 높은 총인 측정값 역시 조류의 배설물에 기인한 것으로 여겨진다<표 VIII-1>.

부유사는 0.37 mg/L로, 2011년 10월 측정값에 비해 약 15배 낮은 값을 보였으며, 호소 기준 I 등급으로 물골 담수 내로 유입되는 부유물질과 바닥의 부유물질 재현탁이 극히 제한적임을 시사한다. 화학적 산소요구량(COD)는 수중의 각종 유기화합물이 산화제에 의해 산화되면서 소비되는 산소량을 나타내는 것으로 유기성수질오염의 지표로 사용되고 있다. 2014년 8월에 측정된 화학적 산소요구량은 6.7 mg/L으로, 2011년 10월에 측정된 값(3.6 mg/L)에 비해 약 2배 정도 높았다. 이는 호소 기준 IV 등급(약간 나쁨)으로 상당량의 유기화합물이 물골 담수 내에 존재함을 시사한다.

클로로필-a의 농도는 <math><0.01 \mu\text{g/L}</math>를 나타냈으며, 이는 호소 I 등급 기준치 (<math><5 \mu\text{g/L}</math>)보다 500배 이상 낮은 수치이다. 물골의 담수 환경이 높은 영양염의 상태임에도 불구하고 원생생물인 식물플랑크톤의 생물량이 매우 적음을 시사한다. 일반적으로 영양염이 풍부한 수서 환경에서는 식물플랑크톤의 대번식이 나타나지만, 물골 환경 내에서는 이와 같은 일반적인 현상이 관찰되지 않았다. 이는 식물플랑크톤의 번식이 일어날 수 있는 환경 조건이 아님을 시사하고, 물골 담수 보호를 위해 뚜껑을 덮어 빛을 차단한 것이 원인으로 사료된다. 더불어 Martin and Fitzwater(1988)에 의해 높은 질산염-낮은 클로로필 환경(high-nitrate, low-chlorophyll: HNLC)에서 철의 결핍 때문에 식물플랑크톤의 대번식이 억제될 수 있음을 보고하였지만, 물골 내에서 HNLC의 paradox에 대한 원인규명은 추후에 체계적으로 수행되어야 할 것으로 사료된다. 물골에서 측정된 수질 항목에 대한 결과는 <표 VIII-1>에 나타내었다.

WHO의 질산성 질소의 먹는물 기준값이 10 mg/L로써, 우리나라 역시 이 값을 채택하고 있다. 일반적으로 오염되지 않은 지하수에서 질산성 질소는 3 mg/L 미만으로 검출되고 있으며, 분뇨에 의해 오염되면 질산성 질소 농도가 급격하게 증가하게 된다. 과도한 질산성 질소는 성인에게 암을 유발할 수 있으며, 어린이에게는 산소전달을 방해하는 치명적인 청색증(methenoglobinemia)의 원인물질로 알려져 있다.

<표 Ⅷ-1> 2014년 8월 물골 표층시료(고인 물)에서 측정된 수질 항목의 결과 값

조사항목	결과 값	I 등급 기준치 (호소 기준)	물골 수질 등급
염분	1.4 ppt		
용존산소	9.6 mg/L	7.5 mg/L 이상	I
수소이온농도	8.3	6.5~8.5	I
클로로필- <i>a</i>	<0.01 µg/L	5 µg/L 이하	I
부유사	0.37 mg/L	1 mg/L 이하	I
총질소	56.2 mg/L	0.2 mg/L 이하	Ⅵ: 매우 나쁨
총인	0.048 mg/L	0.01 mg/L 이하	Ⅲ
화학적 산소요구량	6.7 mg/L	2 mg/L 이하	Ⅳ

어른의 경우 질산성 질소(NO3)는 위 속에서 흡수되어 장내에서 아질산성 질소(NO2)로 환원되기 전에 소변으로 방출되어 인체와는 직접 대사하지 않지만 어린이(특히 6개월 이내의 신생아)의 경우에는 위 속의 산이 감소하여, pH가 높아지게 되면 박테리아에 의해 환원되어 아질산성 질소로 된다. WHO에서는 고농도 질산성 질소(22 mg/L 이상)를 함유하는 수돗물을 유아식에 사용을 금지하고 있다. 결론적으로 먹는 물 수질기준을 초과하는 물골 내 담수는 가급적 음용하지 않는 것이 바람직하다.

물골 수질 개선안으로는

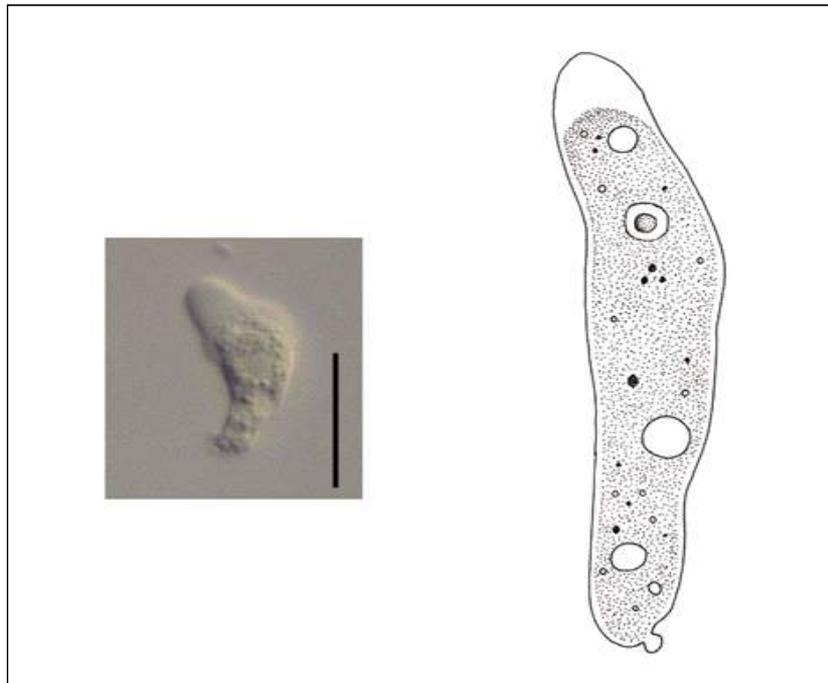
- (1) 주변 철조망 및 시멘트 구조물을 제거한 후 독도 주변에 서식하는 수변식물을 물골 주변에 심어 질소와 인을 감소시키고, 물골 담수를 예전처럼 흐르게 하여 질소와 인이 저수조에 고이지 않게 한다.
- (2) 이온교환 방식 등과 같은 환경공학적 처리 방식을 통해 질소와 인을 제거하거나 생물학적 탈질소 원리를 이용하여 질산성 질소를 제거한다. 더불어 (3) 질소와 인의 주된 오염원을 규명하고, 오염원을 최소화 할 수 있는 친환경적 방안을 마련한다. 마지막으로 (4) 철을 첨가하여 식물플랑크톤의 대번식을 유도한 후 질소와 인을 감소시킨다.

본 연구팀에서는 물골의 종합적인 조사를 기반으로 하여 친환경적인 설계와 관리를 통하여 역사적으로 의미가 매우 큰(독도의용수비대의 음용수) 물골 담수의 수질을 개선하여, 음용수 기준에 적합하게 바꾸어야 할 것으로 생각되어진다.

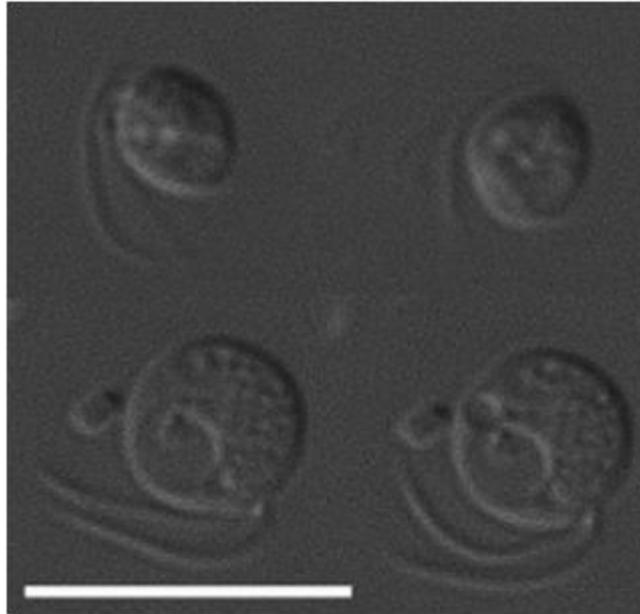


2) 물골 내 원생생물 다양성 연구

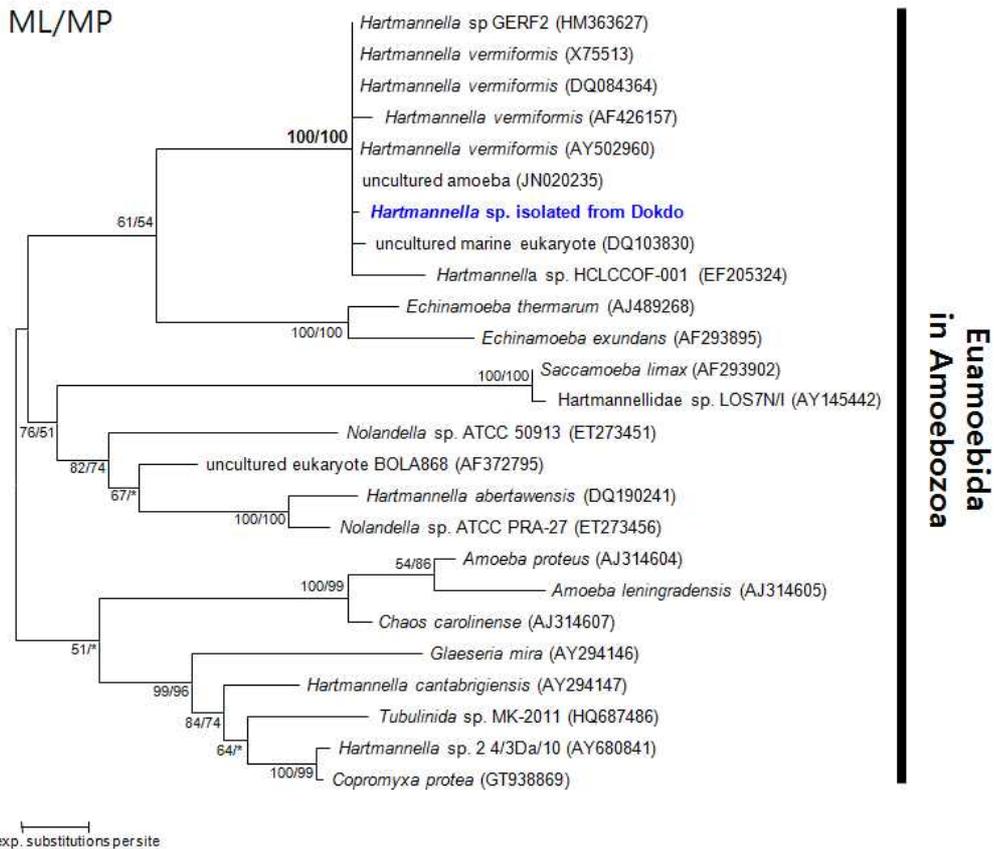
2011년 6월과 2012년 4월 물골 표층 시료에서 각각 *Hartmannella vermiformis*와 unknown flagellate를 순수 분리하였다<그림 VIII-3, VIII-4> 국내 최초로 독도의 담수 환경인 물골에서 분리된 아메바인 *Hartmannella vermiformis*(미기록종)은 18S rRNA 유전자 분석 시 Amoebozoa의 Euamoebida 강에 속하는 것으로 여겨지며, 공중보전에 직간접적으로 중요한 역할을 한다. 본 연구에서 분리된 *Hartmannella vermiformis*는 다른 시료에서 분리된 *Hartmannella vermiformis*와 통계적으로 유의한 단계통을 형성하였다(ML:100, MP:100, 그림 VIII-5). 이는 본 연구에서 분리된 종이 *Hartmannella vermiformis*임을 시사한다. *Hartmannella vermiformis*는 수막뇌염과 기관지폐렴의 환장의 뇌척수액에서 발견되기도 하며, 레지오넬라균의 숙주로 알려져 있다(Centeno et al. 1996). 결국 독도 유일 담수인 물골이 상당히 심각하게 오염되어 있음을 시사한다. *Hartmannella vermiformis*는 국내 미기록종으로 ‘한국원생생물도감’에 출판될 예정이다. 더불어 2012년 4월 물골 표층 시료에서 분리된 unknown 편모류는 광학현미경 관찰시 편모의 운동성이 전형적인 stramenopile(anterior flagellum이 물결처럼 움직임)과 유사했으며, 신종(new species)로 여겨진다. 향후 추가적인 18S rRNA 유전자 염기서열 분석이 완료되면, 정확한 분류학적 위치를 확증할 계획이다. 만일 본 연구에서 분리된 종이 신종(new species)일 경우, 종(species)명은 *dokdoensis*를 사용하여 이들 새로운 원생생물 속이 독도에서 분리되었음을 전문학술지를 통해 알릴 계획이다.



<그림 VIII-3> 2011년 6월 독도 천연보호구역의 물골 주변 환경에서 순수 분리된 *Hartmannella vermiformis*의 광학현미경 관찰 (scale bar: 20 μ m)



<그림 VIII-4> 2012년 4월 독도 천연보호구역의 물골 주변 환경에서 순수 분리된 *unknown flagellate*의 광학현미경 관찰 (scale bar: 10 μ m)



<그림 VIII-5> Euamoebida(Amoebozoa에 속함)의 18S rRNA 유전자 염기서열 분자계통수 (파란색, 독도 물골에서 분리된 아메바 종). ML과 MP는 각각 maximum likelihood와 maximum parsimony에서 나온 bootstrap value를 의미함. node 주변에 ML과 MP의 순서로 bootstrap value를 표기함.



4. 결 론

독도 천연보호구역의 수질 조사 결과 총질소의 양이 호소 I등급 기준치의 약 280배 높은 값으로 측정되었으며, 총인 역시 호소 I등급 기준치의 약 5배 높은 값을 보였다. 이는 고농도의 영양염이 물골 내에 존재하여 음용수로 사용하기에는 부적합하며, 고농도 영양염의 원인으로서는 조류의 배설물 때문으로 여겨진다. 물골 수질의 개선 방향으로는

- 1) 물골 주변의 철조망과 시멘트 구조물을 철거하고 그 자리에 질소와 인을 제거할 수 있는 독도에서 자생하는 수변식물을 심는다.
- 2) 이온교환 방식 등과 같은 환경공학적인 처리 방식을 통해 질소와 인을 제거하거나 생물학적 탈질소 원리를 이용하여 질산성 질소를 제거한다.
- 3) 질소와 인의 주된 오염원을 규명하고, 오염원을 최소화 할 수 있는 친환경적 방안을 마련한다.
- 4) 철을 첨가하여 식물플랑크톤의 대번식을 유도한 후 질소와 인을 감소시킨다.

이상의 방법이 있겠다. 더불어 총질소의 경우 2009년~2014년 동안 점차 증가 추세에 있기 때문에 물골의 수질개선이 시급히 이뤄져야 할 것으로 사료된다.

배양 방법에 의해 분리된 원생생물은 두 종류로, 한 종은 광학현미경 관찰과 분자계통학 분석시 *Hartmenella vermiformis*로 입증되었지만, 나머지 한 종은 unknown 편모류였다. 뇌척수염 환자에게서 발견되는 *Hartmenella vermiformis*는 국내 미기록종으로 ‘한국원생생물도감’에 출판될 예정이며, unknown 편모류는 초미세구조 및 분자계통학적 분석이 추가적으로 필요하다. unknown 편모류가 신종으로 입증될 경우, 신종(new species)명은 *dokdoensis*를 사용하여 이들 새로운 원생생물 속이 독도에서 분리되었음을 전문학술지를 통해 알릴 계획이다.

5. 참고문헌

- 국토해양부. 2010. 2010년 독도 지방환경 모니터링. 국토해양부, pp 155.
- Azam F, Malfatti F. 2007. Microbial structuring of marine ecosystems. *Nature Reviews* 5: 782-791.
- Centeno MF, Rivera F, Cerva L, Tsutaumi V, Gallegos E, Calderon A, Ortiz R, Bonilla P, Ramirez E, Suarez G. 1996. *Hartmannella vermiformis* isolated from the cerebrospinal fluid of a young male patient with meningoencephalitis and bronchopneumonia. *Arch Med Res* 27: 579-586.
- Foissner W. 2008. Protist diversity and distribution: some basic considerations. *Biodivers Conserv* 17: 235-242.
- Martin JH, Fitzwater SE. 1988. Iron deficiency limits phytoplankton growth in the north-east Pacific subarctic. *Nature* 331: 341-343.
- Simpson AGB, Roger AJ. 2004. The real 'kingdoms' of eukaryotes. *Curr Biol* 14: R693-696.