

물, 인간 그리고 문화적 부영양화¹⁾

강 상 준²⁾

충북대학교 명예교수 · 협회 충북지부장

물의 분포와 순환

물은 지구의 탄생 역사에서 보면 최초로 생긴 물질 중의 하나이며 지구상에서 가장 풍부한 자원이다. 그러므로 지구를 “물의 행성(The Water Planet)”이라 부르기도 한다. 우주 공간에서 지구를 내려다보면 둥근 모양의 지구 대부분이 파란색을 보이는 것은 바로 물이 많기 때문이다.

지구에 있는 물의 양은 얼마나 될까. 약 13억 8천 4백만 km^3 (1 km^3 는 10억 톤)로 추정되며 이 중 바닷물이 97%인 13억 5천만 km^3 이고 나머지 3%인 약 3천 4백만 km^3 만 민물(淡水)이다. 민물 중 약 69%인 2천4백만 km^3 은 빙산과 빙하 형태이고(그림 1), 지하수는 29%인 1천만 km^3 이며 나머지 2%인 1백만 km^3 이 육상의 호수나 강, 늪, 하천 등의 지표수와 대기층에 수증기 상태로 들어있다. 특히 강이나 하천에 있는 물의 양은 지구 총 수자원의 0.0001%인 1,200 km^3 뿐임으로 매우 적은 양임을 알 수 있다. 이 양이 수자원으로서 인간에게 중요한 물인 것이다(그림 2).

지구 생태계에는 여러 가지 생물지구화학적 순환(biogeochemical cycles)이 있는데 인



그림 1. 알라스카의 빙하.

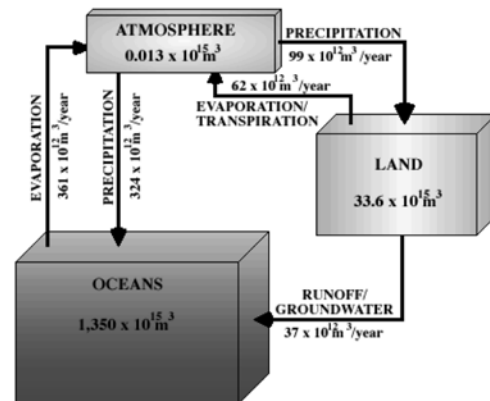


그림 2. 해양, 육상 및 대기 중 물의 양과 순환 루프.

간에게 가장 중요한 순환 가운데 하나가 물의 순환(hydrological cycle)이다.

1)Water, Human and Cultural Eutrophication

2)KANG, Sang-Joon, Emeritus Prof., Chungbuk National University and Director of Chungbuk Chapter, The Korean Association for Conservation of Nature; E-mail: kangsj@chungbuk.ac.kr

물은 순환한다. 100년을 한 주기(period)로 본다면, 물 1 분자는 바다에서 98년, 얼음으로 20개월, 호수나 강에서 약 2주 그리고 대기 중에서 1주 이하를 보낸다. 물의 순환은 태양 에너지에 의한 상승루프(uphill loop)와 생태계에서 호수, 강, 습지, 인간의 유용한 일에 직접 이용되는 수력발전과 같은 하강 루프(downhill loop)로 되어 있다. 물의 순환에서 보면 바다에서는 강우에 의해 돌아오는 것($324 \times 10^{12} \text{ m}^3/\text{년}$)보다 많은 양의 물이 증발($361 \times 10^{12} \text{ m}^3/\text{년}$)하며, 육상에서는 그와 반대(강우 $99 \times 10^{12} \text{ m}^3/\text{년}$, 증발산 $62 \times 10^{12} \text{ m}^3/\text{년}$)이다. 다시 말하면 인류의 생존과 식량 생산 대부분이 행해지고 있는 육상생태계를 지탱하고 있는 강우의 대부분은 바다에서 증발되는 물에 의존한다고 할 수 있다 (Odum, 1983).

우리나라에는 연평균 1,283 mm의 비가 내리는데 강우량을 물의 양으로 환산하면 약 1,276억 톤 정도라 한다. 이 중에서 43%는 직접 대기 중으로 증발산(evapotranspiration)되거나 또는 땅속으로 침투되어 버리고 57%인 731억 톤만이 하천을 통하여 흐른다.

우리나라는 주로 여름에 비가 많이 내리는데 국토의 70%가 경사 20% 이상인 지형적 특성 때문에 하천으로 일시에 유입된 물 가운데 39%인 493억 톤은 이 시기에 바다로 흘러가 버리며 평상시에는 18%인 238억 톤만이 강을 따라 흐른다. 강이나 하천을 흐르는 물 238억 톤 가운데 하천의 물 161억 톤은 직접 이용되고 나머지 133억 톤의 물은 댐이라는 대형 구조물에 저장되었다가 필요할 때 공급된다. 그리고 지하수 이용량은 37억 톤으로 총 331억 톤을 우리가 이용하고 있다(한국수자원공사, 1995).

우리나라의 강우량은 세계 평균 973 mm의 1.3배가 되지만 좁은 국토에 높은 인구 밀도, 산업화 및 1인당 물 사용량이 다른 나

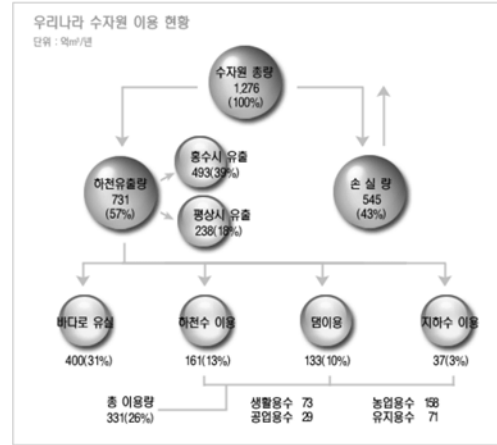


그림 3. 우리나라 수자원 이용 현황.

라에 비해 많은 탓에 이미 물 부족 국가로 분류되었다.

이제 물은 우리의 생활에 필수 불가결한 자원으로 더 이상 자유재가 아닌 경제재이다. 그러므로 국가는 국민의 생존과 번영을 위해 양질의 물을 안정적으로 공급해야 할 책임이 있으며 국민 개개인은 이를 효율적으로 사용해야 할 의무가 있는 것이다.

물과 인간의 성격 형성

지구상의 모든 생물은 그 생명의 원천을 물에 두고 있다. 그렇다면 인간의 몸속에는 물이 얼마나 들어 있으며 어떻게 작용할까. 사람에게 따라, 체질에 따라 다르지만 뇌 74.5%, 신장 82.7%, 혈액 83%, 근육 75.6%, 뼈 22% 등으로 우리들 몸의 약 70% 이상이 물이다. 사람은 음식물이 없어도 1개월은 살 수 있으나 물 없인 1주일도 살지 못 한다. 그러므로 몸속의 물이 1-2%가 부족하면 심한 갈증을 느끼게 되고 5%가 부족하면 혼수상태가 되며 12%가 부족하면 생명까지도 잃게 된다.

물은 지구의 온도를 조절할 뿐 아니라 인간의 경우, 체온을 조절하며 생명 유지에 필

요한 여러 가지 영양분과 산소를 용해하여 세포까지 운반하는 일도 한다. 우리 몸에 필요한 물의 양은 기온, 습도, 체질, 노동량 등에 따라 다르나 평균 2,400 cal를 필요로 하는 사람인 경우, 봄과 가을에는 2,285 cc, 여름에는 500 cc 정도가 더 필요하며, 겨울에는 이 보다 500 cc가 덜 필요하다고 한다.

우리나라 속담에 무엇인가를 아낌없이 흥청망청 써 버릴 때 “물 쓰듯 한다”라는 말이 있다. 그리고 지금도 흔히 관청 물을 먹었다느니, 미국 물을 먹었다느니 하면서 인간의 성품마저도 물이 좌우하는 것처럼 표현한다. 이것은 성격을 형성함에 있어서 물의 비중이 크다는 것을 의미한다. 그러기에 우리 조상들은 물을 세심하게 골라 마신 것은 당연하다 하겠다. 그 집의 샘물이 경수(硬水)냐, 연수(軟水)냐, 감수(甘水)냐, 고수(苦水)냐에 따라 성품이 청결하고 탐욕스럽고 유순하고 고집 세고 근면하고 게으르고 정절하고 음탕해지는 성격까지 결정된다고 믿었던 것이다.

그 뿐만이 아니다. 우리 조상들은 물에 대한 품격도 정했다고 한다. 충주 달천수(獺川水, 達川水)가 으뜸이요, 오대산에서 흐르는 한강의 우중수(牛重水)가 버금이며, 속리산에서 흐르는 삼타수 혹은 삼파수(三陀水, 三派水)를 그 다음으로 친 것이 그것이다. 물은 성격 형성에 영향을 미친다고 했던 것이다.

산 좋고 물이 맑아 금수강산이라고 하던 이 나라에 이제는 한 잔의 물을 마시기 위하여 슈퍼마켓에서 생수를 사 마셔야하는 실정이다. 거의 모든 사람이 동일 지역에서 퍼올린 똑같은 성분의 물을 마시는 어이없는 세상이 되었으므로 이 물을 마신 사람은 모두 같은 성격과 품성을 보이지는 않을지 걱정이 된다. 이제는 시냇가에서 빨래하는 모습도 사라진지 오래되었고 앞마당에 우물을 파서 마시던 일은 하나의 추억 속 사진에서

나 볼 수 있는 현실이 되고 말았으니 안타까운 일이 아닐 수 없다.

자연적 부영양화와 문화적 부영양화

80년대 이후 빠르게 진행된 산업화, 도시화, 인구증가 등 고도성장의 반대급부로 강과 하천, 호수 등 환경이 크게 훼손되면서 그 흔하고 깨끗하던 물은 오염되었고 금수강산은 오염강산으로 변해 우리들의 생존권마저 위협받고 있다.

백두산 천지나 한라산 백록담과 같이 빗물이나 용천수(湧泉水) 같은 천연수로 되어 있는 수역(水域)은 영양염류가 결핍되어 있어 빈영양계(貧營養系, Oligotrophic system)이지만 암석의 풍화, 바람에 의한 물질의 운반, 지표수의 유입 등에 의해 차차 영양염류가 축적되게 되고 그 곳에 서식하는 생물체의 생산과 분해에 의해 수체의 영양염류가 증가하게 된다. 이와 같은 현상을 자연적 부영양화(自然的 富營養化, Natural eutrophication)라고 한다.

인간이 토양을 침식시키거나 삼림을 벌채하는 등 동화를 넘는 속도로 다량의 유기물(예를 들면, 생활하수, 축산폐수, 산업폐수 등)이 수체(水體)로 유입될 경우, 이들 물질의 급속한 축적은 영양염류의 농도를 증가시키게 되고 그 수역이 파괴되게 된다. 이와 같은 인간 활동의 결과 나타나는 유기물 오염을 표현하는데 문화적 부영양화(文化的 富營養化, Cultural eutrophication)라는 말이 널리 사용된다.

빈영양화(Oligotrophy)와 부영양화(Eutrophy)란 용어는 1907년 독일의 육수학자인 베버(C. A. Weber)가 처음 만들었고, 그 후 나우만(E. Naumann)은 이 용어를 호수에서 식물플랑크톤의 대량 증식 및 생산과 연관시켜 사용하였다.

빈영양호는 수체에 대한 수면의 비(Surface-to-volume ratio)가 낮으므로 물은 투명하고 햇빛이 비추게 되면 청색 또는 청록색을 띠게 된다. 표수층(Epilimnion)의 수온은 낮으나 심수층(Hypolimnion)의 용존산소 농도는 높으며, 바닥의 퇴적물은 주로 무기물로 되어 있다. 질소(N)는 많을지 모르나 인(P)이 제한요인이 되며 물속의 영양염류는 전반적으로 낮은 편이다.

영양염류가 없기 때문에 유기물 생산, 특히 식물플랑크톤의 생산력이 낮다. 유기물 생산이 낮거나 적기 때문에 이를 영양원으로 생활하는 미생물인 분해자(Decomposer)가 없으므로 심수층(深水層)에 용존산소량이 많은 것이다. 이러한 산화적 조건은 저토로부터 영양염류의 방출을 낮추며 분해될 유기물이 없으므로 또한 미생물군집이 적고 대사양도 낮은 것이다.

한편 부영양호는 수체에 대한 수면의 비가 크다. 즉 깊이에 비하여 수면이 상대적으로 넓다. 부영양호에서는 질소와 인이 풍부하므로 조류(藻類, Algae)나 기타 수생식물의 성장을 촉진시킨다. 광합성에 의한 생산량이 많아지므로 유기화합물이나 영양염류의 재생이 증가 되게 되며, 이러한 생산과 분해 또는 재생과정을 반복하게 된다.

식물플랑크톤은 수온이 높은 표수층에 모이게 되므로 물빛이 짙은 녹색(Green)이 되는 것이다. 조류 Mat에 의해 탁도(Turbidity)가 높아져 햇빛이 투과되지 못하므로 생물의 생산력은 수표면의 좁은 층에만 제한되어 일어나게 되는 것이다.

국제생물학계획(International Biology Project, IBP)의 조사결과에 따르면, 부영양호에서 식물플랑크톤에 의해 생산된 유기물의 46%는 즉시 식물의 호흡에 이용되고, 나머지 52%는 동물플랑크톤과 박테리아 등 종속영양생물(Heterotrophs)의 활동으로 소비되고 바다

에 침전하는 양은 16%라고 한다(宗宮 1990).

죽은 조류(Algae)나 수생식물의 유체(遺體)가 침전, 퇴적되므로 바닥의 저토에는 유기물의 양이 또한 많아지게 된다. 바닥의 미생물들은 이들 유기물 일부를 무기물로 전환시키게 되는데 이런 미생물의 분해과정으로 말미암아 저토의 산소가 부족하게 된다. 이런 상태의 저토에서는 호기성 생물(Aerobic life)은 서식할 수 없으므로 호소의 생물 중수가 급감하게 되는 것이다.

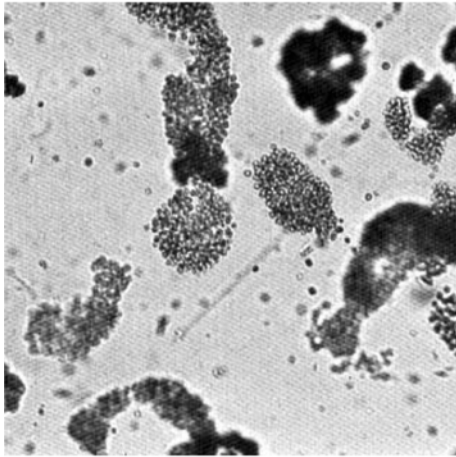
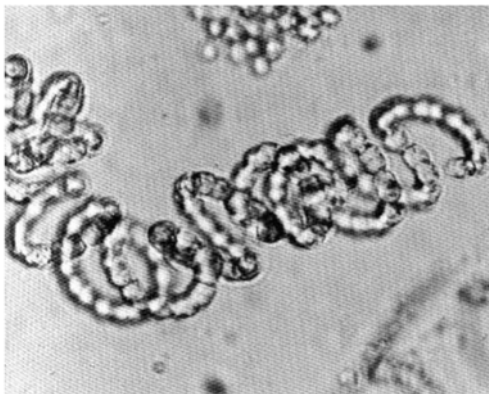
부영양화(녹조현상)와 마이크로시스틴(Microcystin)

호소나 저수지는 하천에 비하여 물의 정체시간(停滯時間)이 길고 또 외부에서 유입되는 물질이 호소 내에서 체류되는 시간도 길다. 전술한 바와 같이 인간의 활동 결과 나타나는 호소에서 유기물의 오염을 문화적 부영양화 또는 인위적 부영양화(人爲的 富營養化)라고 하지만, 우리나라에서는 흔히 녹조현상(綠藻現狀)이라고 부르고 있다(그림 4).

녹조현상을 일으키는 조류는 녹조류(綠藻類, Chlorophyceae, Green-algae)가 아니고 정확히 말하면 남조류(藍藻類, Cyanophyceae, Blue-green algae)이기 때문에 남조현상(藍藻現狀)이라고 하는 것이 옳을 것 같다. 일본



그림 4. 남조류에 의한 부영양화 현상(일명 녹조현상).

그림 5. *Microcystis aeruginosa* (×200).그림 6. *Anabaena spiroides* (×800).

에서는 수화(水華, Water-bloom)라고 부르고 이것은 물꽃이라는 의미이며 또는 아오코(Aoko, 靑粉)라고도 한다.

용어가 어떻든 우리나라의 호소에서 녹조현상을 일으키는 식물플랑크톤은 주로 *Microcystis* 속(그림 5)과 *Anabaena* 속(그림 6) 등이다 (Park *et al.*, 2001; 이 등, 2005).

녹조현상을 일으키는 남조류 중에는 독소(Toxin)를 생산하는 종이 있고 외국에서는 이런 독소가 있는 물을 먹은 가축이나 야생동물이 죽는 피해가 보도되어 사회적 문제가 되었던 적이 있다.

Microcystis 속은 다수의 구형세포(球形細

胞)가 다당류의 점액질을 분비하고 부정형(不定形), 구형(球形), 수지형(樹枝形)으로 세포가 불규칙하게 집합되어 군체(群體, Colony)를 형성한다. *Microcystis*속은 질소고정이나 아미노산 합성을 하는 이질세포(異質細胞, Heterocyst) 또는 휴면포자(休眠孢子, Akinete)를 형성하지 않으므로 사상체(絲狀體)를 형성하는 남조류와는 구별할 수 있다. 그리고 세포 속에 기포(氣胞, Gas vesicle)가 있기 때문에 수면위에 떠서 모이게 되는 것이다.

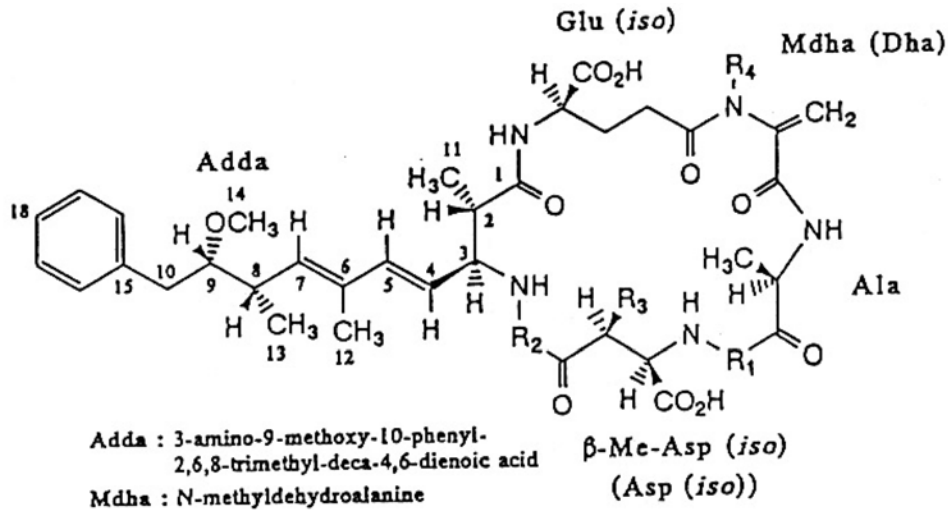
그림 7과 같이 Microcystin은 남조류 *Microcystis* 속, 특히 *Microcystis aeruginosa*가 생산하는 강력한 간독소(肝毒素) (쥐의 복강내 주사 LD₅₀은 0.05-0.1 mg/kg)의 하나로서 7개의 아미노산(Amino acid)으로 구성된 환상(環狀) Peptide(Cyclic heptapeptides)이다 (Botes *et al.*, 1984, 1985).

*Microcystis*속이 생산하는 Microcystin은 7종이 보고되었으나 중요한 것은 그림 7에서 보는 바와 같이 Microcystin-LR, Microcystin-YR 및 Microcystin-RR이다. 함유량에서 보면 Microcystin-RR과 Microcystin-LR의 함유량이 높고 Microcystin-YR은 소량인 경우가 많다(Watanabe *et al.*, 1992; 渡辺 등, 1994). 이들 유도체 중 독성이 가장 강한 것은 Microcystin-LR(MCLR)이라고 한다(서 등 2005).

Microcystin을 생산하는 남조류는 *Microcystis* 속을 비롯하여 *Anabaena*, *Nostoc*, *Oscillatoria* 등이 알려져 있다(Watanabe *et al.*, 1988; Harada *et al.*, 1991; Meriluoto *et al.*, 1989).

한편, Antoxin-a는 *Anabaena*가 생산하는 강력한 신경독(神經毒) (쥐의 복강내 주사 LD₅₀은 0.2 mg/kg)으로 *Anabaena flos-aquae*, *A. circinalis*, *Aphanizomenon flos-aquae*, *Oscillatoria agardhii*가 생산한다(Sivonen *et al.*, 1989).

Anatoxin-a는 신경-근육 접합부의 화학전



	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	MW
Microcystin LR	Leu	Arg	CH ₃	CH ₃	994
Microcystin YR	Tyr	Arg	CH ₃	CH ₃	1044
Microcystin RR	Arg	Arg	CH ₃	CH ₃	1037

그림 7. 3종의 Heptapeptide toxins의 화학구조.

달 물질인 Acetylcholine receptor와 결합하여 Synapse의 탈분극(脫分極)을 일으킨다. 그 결과 Anatoxin-a를 섭취한 동물은 호흡 곤란을 일으키게 되어 5-10분의 짧은 시간내에 죽는다.

녹조현상을 일으키는 원인종(原因種)은 미국대륙이나 북유럽에서는 *Anabaena* 속, 그보다 남쪽 지역에서는 *Microcystis*속에 의한 경우가 많다고 하며, 일본의 경우는 동북 지방과 북해도 지방과 같이 비교적 추운 지방에서는 *Anabaena*속, 관동지방 이하에서는 *Microcystis*속이 많다(渡辺 등, 1994).

우리나라 대부분의 댐호(Impoundment lakes)나 서울 지역 공원의 연못, 한강 수계에서는 원인종이 주로 *Microcystis*속이라고 하는데(이 등, 2005; 서 등, 2005), 이들의 연구에 의하면, 남조류가 대발생하게 되면 윤충류의 일종인 *Brachionus calyciflorus*(꽃받침완미운충), *Euchlanis dilatata*(넓은배수

족운충), *Keratella cochlearis*(중선거북등운충)이 우점적으로 나타나고 물벼룩의 일종인 *Daphnia galeata*와 같은 대형 물벼룩의 개체군의 크기가 급감했으며 그 대신 *Bosmina longirostris*와 같은 소형 물벼룩의 개체군 크기가 급증하였다고 한다. 녹조현상이 나타나게 되면 동물플랑크톤의 종조성도 바뀔 수 있다.

맺는 말

지구촌의 물 부족 현상은 갈수록 심각해지고 있다. 우리나라의 경우에는 물 부족뿐만 아니라 수질문제가 더욱 우리에게 위협으로 닥아 오고 있다. 1995년 스웨덴의 스톡홀름에서 있었던 ‘국제 물 심포지엄’에서 “20세기의 국제적 분쟁 원인이 석유에너지 자원에 있었다면 21세기는 물의 시대가 될 것이다”라는 경고에 우리는 잘 대처해야 한다.

어떤 신문의 기사 내용을 보면, “기름 값이 오르고 있지만 우리나라는 충분한 대비가 없다. 먹는 물에서도 비슷하다. 우리는 물만큼은 풍족하게 사용하고 있다. 그러나 국제기구들은 중동국가를 제외하고 우리나라를 유일한 물 부족 국가로 분류하고 있다. 물이 진정 부족하거나 오염으로 마시지 못하는 사태가 발생했을 때 과연 높이 뛰는 물값을 누가 보살할 것인가. 또 돈 주고도 마시지 못하는 사태가 발생한다면 어떻게 될지 걱정이 앞선다”라고 물 부족 사태발생을 우려했다.

앞으로도 경제의 발전과 인구증가에 따라 물 부족은 더욱 심각해질 것은 자명하다. 물 공급을 위하여 댐을 건설하자는 주장도 있지만 생태계 파괴라는 또 다른 문제를 야기하게 된다. 한정된 물 자원을 어떻게 이용할 것인가. 오염되지 않은 물을 어떻게 확보할 것인가. 국민의 환경의식 고취와 더불어 우리 무두의 지혜를 모아야 할 때이다.

참고문헌

서미연, 김백호, 배경석, 한명수, 2005. 한강 하류의 남조류 및 환경요인의 연간(2000-2003) 변화에 대하여. *육수학회지*. 38(2): 181-187.

이지민, 이정준, 박종근, 이정호, 장천영, 윤성명, 2005. 대청호 남조류 대발생기의 동물플랑크톤 및 *Microcystis aeruginosa*와 물벼룩류 개체군 변동의 상관관계. *육수학회지*. 38(2): 146-159.

한국수자원공사, 1995. 물길 따라 내려온 물 이야기. 한국수자원공사. p. 97.

宗宮 功, 1991. 自然의 淨化機構. 技報堂出版. 東京. p. 252.

渡辺眞利代, 原田健一, 藤木博太, 1994. Aokko (Waterbloom). 그 出現과 毒素. 東京大學 出版會. 東京. pp. 75-99.

Botes, D. P., Tuinman, A. A., Wessels, P. L., Vijoer, C. C., Kruger, K., Williams, D. H., Santikarn, S., Smith, R. J. and Hammond, S. J., 1984. The structure of cyanoginosin-LA, a cyclic heptapeptide toxin from the Cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*. *J. Chem. Soc. Perkin. Trans. 1*: 2311-2318.

Botes, D. P., Wessels, P. L., Kruger, H., Runneger, M. T. C., Santikarn, S., Smith, R.J., Barna, J. C. J. and Williams, D. H., 1985. Structure studies on cyanoginosin-LR. -YR, -YA and -YM, peptide toxins from *Microcystis aeruginosa*. *J. Chem. Soc. Perkin. Trans. 1*: 2747-2748.

Harada, K. I., Ogawa, K., Matsuura, K., Nagai, H., Murata, H., Suzuki, M., Itezon, Y., Nakayama, N., Shirai, M. and Nakano, M., 1991. Isolation of two toxic heptapeptide Microcystins from an axenic strain of *Microcystis aeruginosa*-K-139. *Toxincon*. 29: 479-489.

Meriluoto, J. A. O., Sandstrom, A., Erikson, J. E., Remand, G., Craig, A. G., and Chattonpadhyaya, J., 1989. Structure and toxicity of a peptide heptatotoxin from the cyanobacterium *Oscillatoria agardhii*. *Toxincon*. 24: 1021-1034.

Watanabe, M.F., S. Oishi, K.L. Harada, K.

Odum, E. G., 1983. *Basic Ecology*. Saunders College Publishing. Philadelphia. p. 613.

Park, D. K., Maeng, J. S., Ahn, C. Y. and Chung, A. S., 2001. Geosmin concentration and its relation to environmental factors in Daechung Reservoir, Korea. *Korean J. Limnol*. 34(4): 319-326.

Sivonen, K. K. Himberg, R. Luukkainen, S. I. Niemels, G. K. Poon and Codd, G. M., 1989. Preliminary characterization of neurotoxic cyanobacteria blooms and strains from Finland. *Toxicity Assess*. 4: 339-352.

Watanabe, M. F., Oishi, S., Harada, K. L., Matsumura, K., Kawai, H. and Suzuki, M., 1988. Toxins contained in *Microcystis* species of cyanobacteria (blue-green algae). *Toxincon*. 26: 1017-1025.