



허우명 | 강원대학교 환경공학과 교수
(woo@kangwon.ac.kr)

경포호의 수질과 수환경 관리방안

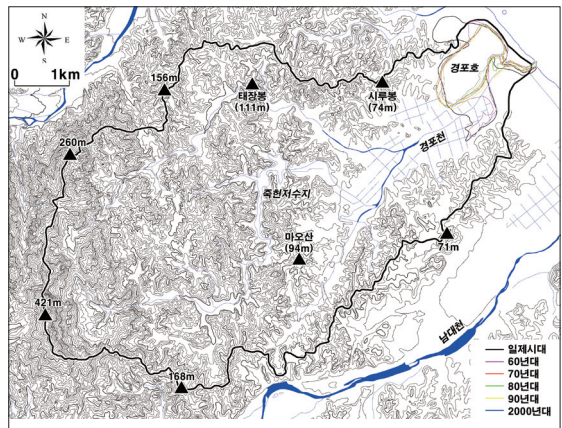
1. 경포호 유역과 면적변화

경포호는 해안선을 따라 해류의 작용으로 사주(沙州)나 사취(砂嘴)가 만 입구를 막아 생성된 석호(潟湖, Lagoon)로 무명 421m에서 발원한 주류길이 13.54km, 유역면적 36.60km²인 경포천이 유입하며 동해안의 주요 석호 가운데 유역 규모가 가장 크다(그림 1). 현재 경포호의 면적은 0.90km²로서 화진포, 영랑호 다음으로 넓은데, 과거에는 현재의 약 두 배로서 화진포에 이어 두 번째로 컸다. 1918년대 경포호는 북쪽의 안현천 하구부와 합쳐져 남북으로 긴 형태의 호수였으나 1960년대에 안현천 하구부가 대부분 메워지면서 동서방향으로

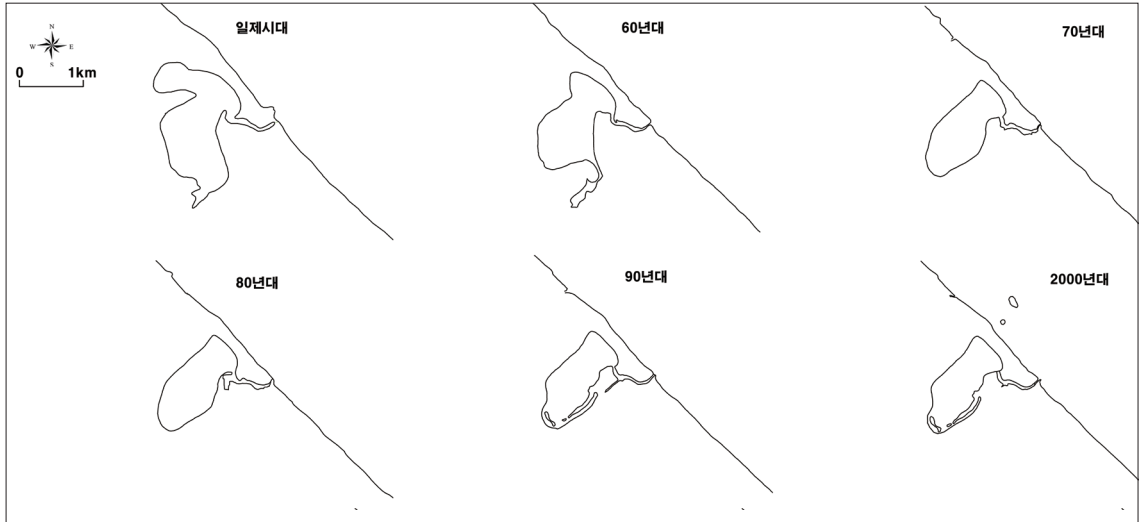
긴 호수로 변모하였다. 1970년대에도 이전 시기에 비해 크게 축소되어 호수 면적이 1.01km²(58%)가 되었으며, 이후 1980년대 1.04km²(60%), 1990년대 0.93km²(54%), 2000년대 0.90km²(52%)까지 꾸준히 감소하였다(그림 2, 3). 석호의 면적과 마찬가지로 호안길어도 현재 79%로 많이 줄었으며 특히 1970년대에 65%까지 급격하게 축소되었다. 즉 1918년도에 9.00km이었으나 1960년대 8.31km(92%), 1970년대 5.88km(65%)로 감소되었으며, 이후 1980년대 6.18km(69%), 1990년대 6.94km(77%), 2000년대 7.11km(79%)로 다소 호안 길이가 증가하였다(원주지방환경청, 2009).



(그림 1) 경포호와 유역분지의 3-D map(자료: 원주지방환경청, 2009)



(그림 2) 경포호의 지형개관도와 시대별 석호변화(자료: 원주지방환경청, 2009)



〈그림 3〉 경포호의 20세기 면적변화(자료: 원주지방환경청, 2008)

2. 경포호의 수질 실태

경포호의 수질을 1998년부터 장기적으로 모니터링 하였으며(그림 4) 그 결과를 〈표 1〉과 같이 정리하였다. 염분은 2004년 경호교 하부에 있던 수중보를 철거한 이후 크게 증가하였다. 철거 전(1998~2003)에는 연평균 7~14psu이었으나 철거 후(2004년 이후)에는 16~26psu로 약 2배 정도 증가하였다(그림 5). 염분의 월별변화는 시기적으로 큰 차이를 보였다(표 2). 2012년 9월에는 12.4psu이었으나 10월에는 26.2psu로 시기적으로 큰 변이를 보였으며 수평적 분포는 큰 차이를 보이지 않았다(그림 6). 계절별 염분의 변이는 강우량에 따른 영향이 큰 것으로 나타났다(그림 7). 2012년 10월에는 강수량이 10mm 내외로 적었으며 이때 호내 염분은 26.2psu로 높았으나 9월에는 강수량이 300mm 내외로 많았으며 이때 염분은 12.4psu로 낮았다(표 2, 그림 7 참조). 이는 강수량 증가로 하천 유입수량이 크게 증가한 것에 기인하는 것으로 판단된다.

투명도는 조사기간 동안 0.3~0.7m의 범위를 보였으며 회귀분석결과 1998년에 0.4m에서 2012년에 0.6m로 매년 조금씩 증가하고 있다(그림 5 참조). 투명도의 증가는 해수 유입에 따른 희석효과와 엽록소a의 감소에 따른 영향으로 판단된다.

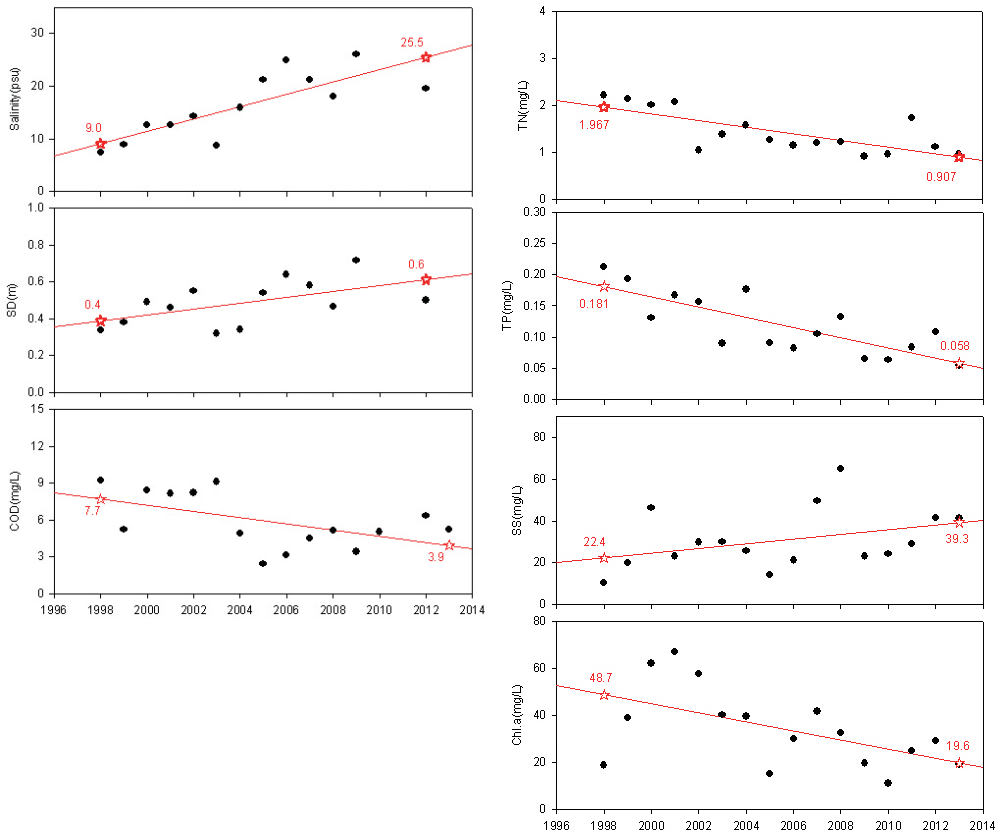


〈그림 4〉 경포호 수질 조사

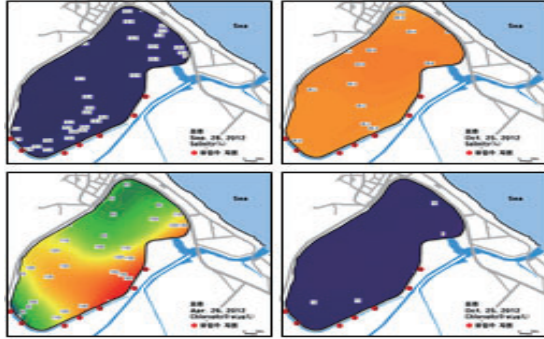
엽록소a 농도는 연평균 11.0~67.1mg/m³의 범위를 보였으며 회귀분석결과 1998년에 48.7mg/m³에서 2012년에 19.6mg/m³로 매년 큰 폭으로 크게 낮아졌다(그림 5 참조). 엽록소a 농도는 식물플랑크톤의 생체량을 표현하는 하나의 단위로 엽록소a가 증가는 식물플랑크톤의 증가를 의미한다. 경포호에서 식물플랑크톤의 점진적인 감소는 2004년 경호교 하부의 보

〈표 1〉 경포호의 장기 수질자료

| 연도 | Sal. (psu) | SD (m) | TN (mg/L) | TP (mg/L) | SS (mg/L) | Chl.a (mg/m ³) | COD (mg/L) |
|------|---------------|-----------|--------------|--------------|--------------|-------------------------------|---------------|
| 1998 | 7.4 | 0.3 | 2,213 | 0.213 | 10.2 | 18.6 | 9.2 |
| 1999 | 8.9 | 0.4 | 2,143 | 0.193 | 20.0 | 38.8 | 5.2 |
| 2000 | 12.6 | 0.5 | 2,014 | 0.131 | 46.3 | 62.2 | 8.4 |
| 2001 | 12.6 | 0.5 | 2,075 | 0.167 | 23.1 | 67.1 | 8.1 |
| 2002 | 14.3 | 0.6 | 1,045 | 0.156 | 29.8 | 57.6 | 8.2 |
| 2003 | 8.7 | 0.3 | 1,384 | 0.090 | 30.0 | 40.2 | 9.1 |
| 2004 | 15.9 | 0.3 | 1,572 | 0.176 | 25.8 | 39.5 | 4.9 |
| 2005 | 21.2 | 0.5 | 1,273 | 0.091 | 14.1 | 14.9 | 2.4 |
| 2006 | 24.9 | 0.6 | 1,149 | 0.082 | 21.1 | 29.8 | 3.1 |
| 2007 | 21.2 | 0.6 | 1,209 | 0.105 | 49.5 | 41.7 | 4.5 |
| 2008 | 18.0 | 0.5 | 1,220 | 0.133 | 65.0 | 32.4 | 5.1 |
| 2009 | 26.0 | 0.7 | 0,912 | 0.065 | 23.0 | 19.5 | 3.4 |
| 2010 | | | 0,958 | 0.064 | 24.2 | 11.0 | 5.0 |
| 2011 | | | 1,743 | 0.084 | 28.9 | 24.7 | |
| 2012 | 19.5 | 0.5 | 1,122 | 0.108 | 41.4 | 29.2 | 6.3 |
| 2013 | | | 0,960 | 0.055 | 41.2 | 19.1 | 5.2 |



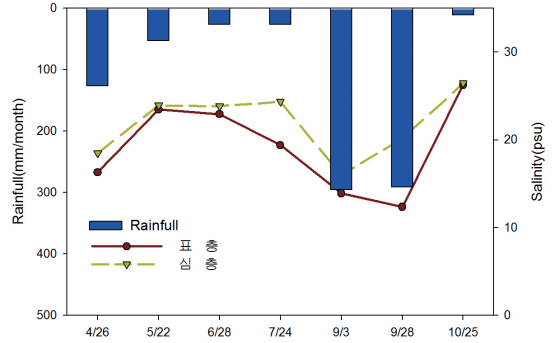
〈그림 5〉 경포호 표층의 장기적인 수질변화(염분, 투명도, COD, 총질소, 총인, 부유물질, 엽록소a)



(그림 6) 경포호 표층의 염분 및 엽록소a의 수평적 변이



(그림 8) 경포호 수면 위에 집적된 파래류(와우코리아 인터넷강릉뉴스, 2011.6.13) <http://gnin.kr/ArticleView.asp?ASection=001001&intNum=4664>



(그림 7) 경포호 염분과 강우량(2012년 4월~10월)

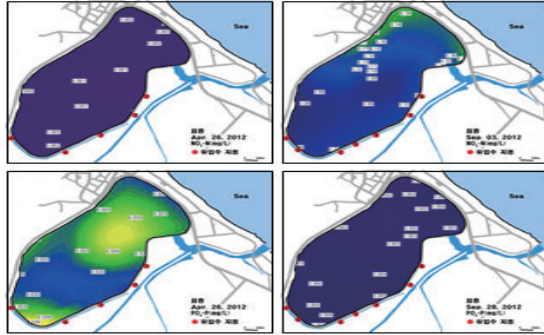


철거 이후 해수의 유입이 증가하면서 파래류가 호수 전역에서 크게 번식한 것에 기인할 수 있다. 일반적으로 수중에서 식물플랑크톤과 수생식물(파래류 등)은 서로 경쟁관계에 있다. 이들은 성장을 위해 빛과 영양염류에 대한 경쟁을 한다. 따라서 해수의 유입으로 파래류의 성장이 증가하면서 상대적으로 식물플랑크톤의 성장이 둔화되고 있는 것으로 사료된다. 경포호의 파래류 증가는 2004년 이후 점차 증가 양상을 보이고 있는 것으로 판단되며, 2011년 5~6월에는 호수 전역에 걸쳐 크게 번성하였다(그림 8, 와우코리아 인터넷강릉뉴스, 2011.6.13). 2012년도에는 전체적으로 파래류의 발생범위가 2011년도 대발생시기에 비하여 규모 및 생물량이 미미한 것으로 추정되었으며, 대량으로 발생한 파래류가 부유하여 부패하는 현상이 발생하지 않았다(이은주, 2012). 식물플랑크톤은 계절적으로도 큰 변화폭을 보인다. 파래류의 증가가 시작되기 전인 2012년 4월에는 호수 전역에서 90~140mg/m³ 정도로 엽록소a 농도가 크게 높았다(그림 7 참조).

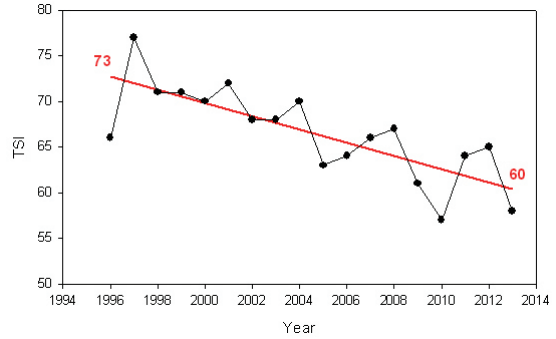
유기물오염의 지표로 사용되는 COD 농도는 1998년부터 2013년까지 연평균 2.4~9.2mg/L의 범위를 보였으며 회귀분

석결과 1998년에 7.7mg/L에서 2013년에는 3.9mg/L로 매년 감소되고 있는 것으로 나타났다(그림 5 참조). 이 또한 2004년 보철거 전·후의 변화가 뚜렷한 것으로 보아 보철거 이후 해수의 유입으로 희석되어 낮아지고 있는 것으로 보인다. 즉, COD의 감소가 호수내의 오염원 감소 등에 의한 영향보다는 해수의 유입에 의한 영향으로 판단된다.

영양염류 중 총질소(TN)는 1998년부터 2013년까지 연평균 0.912~2.213mg/L의 범위를 보였으며 회귀분석결과 1998년에 1.967mg/L에서 2013년에는 0.907mg/L로 매년 감소되고 있는 것으로 나타났다(그림 5 참조). 총인(TP)은 1998년부터 2013년까지 연평균 0.055~0.213mg/L의 범위를 보였으며 회귀분석결과 1998년에 0.181mg/L에서 2013년에는 0.058mg/L로 총질소와 마찬가지로 매년 감소되고 있는 것으로 나타났다(그림 5 참조). 총인의 경우 OECD가 제시한 기준에 의하면 연평균 인 농도가 0.010~0.035mgP/L이면 중영양, 0.035~0.100mgP/L이면 부영양, 0.100mgP/L 이상이면 과부영양인데, 이 기준에 의하면 경포호는 과부영양 상태에서 부영양상태로 다소 호전되고 있는 것으로 보인다. 물론 이러한



〈그림 9〉 경포호 표층의 질산성질소(NO₃-N) 및 용존무기인(PO₄-P) 농도의 수평적 변이



〈그림 10〉 경포호 표층의 부영양화도 지수 (TSI; Trophic state index)

변화가 오염원 감소에 의한 영향으로 판단하기에는 오염원 조사와 같은 좀 더 많은 연구가 있어야 할 것으로 판단된다.

부유물질(SS)은 조사기간 동안 10.2~65.0mg/L의 범위를 보였으며 회귀분석결과 1998년에는 22.4mg/L에서 2013년에는 39.3mg/L로 매년 증가하고 있는 것으로 나타났다(그림 5 참조). 이는 2004년 이후 해수의 유입으로 저층 바다퇴적물의 부유에 의한 영향으로 판단되며 또한 바람에 의한 저층 혼합도 부유물질 증가의 한 원인으로 사료된다. 일반적으로 해안가에 위치한 호수들이 수심이 얇고 주변 지형이 평탄하여 바람에 그대로 노출됨으로 바람에 의한 영향이 크다. 경포호는 최대 수심이 1.2m 내외로 얇으며 지형 또한 평탄하여 바람에 의한 영향을 많이 받는 호수에 해당된다.

2012년 4월부터 10월까지 조사한 결과 질산성질소(NO₃-N)는 평균 0.002~0.125mg/L으로 8월을 제외하면 매우 낮은 수준이었다(표 2 참조). 4월에는 호수 전역에서 0.002mg/L 내외로 거의 고갈 수준의 농도를 보였으며(그림 9), 이때 식물플랑크톤은 호수 전역에서 크게 번성하였다(그림 5 참조). 용

존무기인(PO₄-P)은 조사기간 동안 평균 0.004~0.023mg/L로 질산성질소와 마찬가지로 낮은 수준을 보였다. 특히 9월에는 0.004mg/L 내외로 거의 고갈 수준으로 파래류의 증가와 관련이 있을 것으로 사료된다(그림 9 참조).

U.S. EPA(1976)에서는 Chl. a 농도가 10mg/m³ 이상, Likens(1975)는 총인과 총질소에 대해 총인은 30mgP/m³ 이상, 총질소는 1.1mgN/L 이상이면 부영양화 수준이라고 분류하였다. 이러한 기준과 비교해 볼 때 경포호는 전반적으로 부영양화 수준인 것으로 보인다. 이러한 결과는 허 등(1999)의 연구결과와 유사한 것으로 판단된다.

경포호의 부영양화도 지수(TSI)는 1996년부터 2013년까지 식물플랑크톤의 성장시기를 고려하여 하계평균치를 사용하였으며 Carlson(1977)이 제안한 방법으로 계산하였다. 계산 결과 TSI(SD), TSI(Chl), TSI(TP) 및 TSI(TN)의 평균은 조사기간 동안 47~77의 범위를 보였으며 회귀분석결과 1996년에는 73에서 2013년에는 60으로 점차 낮아지고 있는 것으로 나타났다(그림 10). Carlson 지수는 TSI가 ≥60이면 부영양

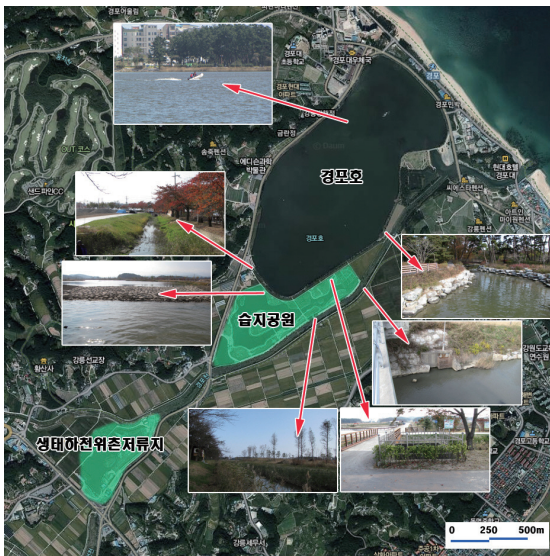
〈표 2〉 경포호 수질의 월별 표층자료(2012년)

| Date | Temp (°c) | Sal (psu) | TUR (NTU) | SD (m) | SS (mg/l) | COD (mg/l) | Chl.a (mg/m ³) | TP (mg/l) | PO ₄ -P (mg/l) | TN (mg/l) | NO ₃ -N (mg/l) | NO ₂ -N (mg/l) | NH ₃ -N (mg/l) |
|------|-----------|-----------|-----------|--------|-----------|------------|----------------------------|-----------|---------------------------|-----------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 4월 | 16.5 | 16.3 | 38.6 | 0.3 | 57.7 | 8.7 | 106.3 | 0.194 | 0.023 | 1.019 | 0.002 | 0.001 | 0.087 |
| 5월 | 21.7 | 23.5 | 38.9 | 0.2 | 67.2 | 10.9 | 50.2 | 0.199 | 0.019 | 0.968 | 0.019 | 0.002 | 0.098 |
| 6월 | 23.1 | 22.9 | 8.9 | 0.5 | 26.6 | 8.0 | 35.2 | 0.078 | 0.010 | 0.883 | 0.008 | 0.004 | 0.051 |
| 7월 | 25.8 | 19.4 | 4.6 | 0.6 | 21.8 | 6.4 | 19.9 | 0.141 | 0.008 | 1.483 | 0.024 | 0.004 | 0.045 |
| 8월 | 23.9 | 13.9 | 6.3 | 0.7 | 18.8 | 6.7 | 28.3 | 0.090 | 0.008 | 0.888 | 0.125 | 0.020 | 0.074 |
| 9월 | 20.8 | 12.4 | 7.9 | 0.6 | 21.4 | 3.7 | 20.4 | 0.078 | 0.004 | 0.738 | 0.091 | 0.003 | 0.088 |
| 10월 | 14.3 | 26.2 | 6.9 | 0.7 | 29.0 | 6.7 | 8.8 | 0.044 | 0.006 | 0.476 | 0.026 | 0.007 | 0.089 |

호로 판단한다. 따라서 경포호는 현재 부영양호의 수준에 있으며 향후 중영양호로 하향 조정될 가능성도 있는 것으로 판단된다.

3. 수환경 관리방안

경포호는 인위적인 면적변화 이외에도 오랜 세월 자연적 부영양화가 진행되어 왔다. 그러나 최근 인위적 부영양화가 가속화 되면서 매우 빠른 속도로 수질이 악화되어 왔으며 호수 주변의 갈대가 매년 자라고 죽고를 반복하면서 호수의 많은 부분이 자연적으로 매워지고, 수심이 매우 얇은 상태로 천이(遷移)가 진행 중이다. 따라서 석호의 원형을 보전하고, 생물다양성의 유지 및 증가, 그리고 수질관리를 위해서는 유역의 오염원 차단 및 내부오염원(저니층 제거, 겨울철 죽은 갈대 제거 등)을 보다 과학적으로 제거하는 등의 적절한 방안이 필요하다.



〈그림 11〉 경포호의 습지 및 저류지 조성 모습

경포호는 최근 상류지역에 습지조성 및 저류지 확보와 같은 복원사업을 진행하여왔다(그림 11). 그러나 유입수량이 부족하여 경포호의 수질개선에 크게 못 미치는 것으로 판단된다. 현재 경포호는 해수의 유통이 비교적 자유로워 해수의 영향을 많이 받는 석호가 되었다. 하지만 수질관리 차원으로

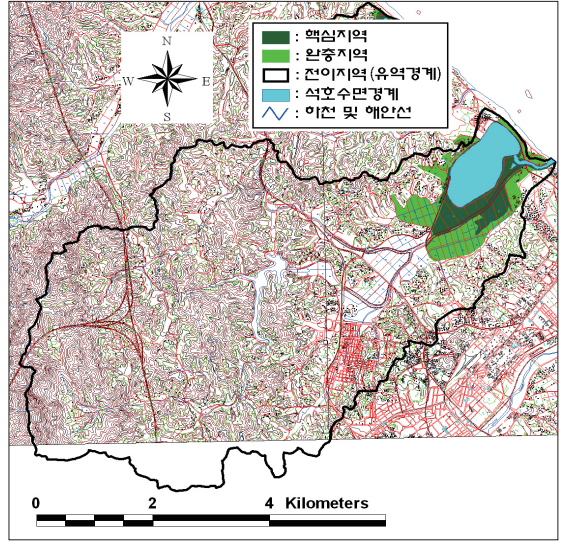
볼 때 유입수량 확보나 해수유통이 더 필요한 것으로 판단된다. 해수의 유입에 있어서는 다소 의견이 상이한 부분도 있다. 즉, 지나친 해수화를 우려하는 것이 그것이다. 하지만 과거의 경포호는 하천의 하구였으며 하천을 통해 유입된 오염물질이 쉽게 바다로 유출될 수 있는 open system이었다. 물론 해류의 작용에 의해 모래톱이 하구를 막으면서 석호가 형성되었으나 모래톱 사이로 충분한 해수의 유통이 있어왔다. 문제는 현재 모래톱위에 건설된 해안도로와 건물들이다. 또한 유역의 오염원 증가로 인한 오염부하량 증가가 수질 및 수생태계를 악화시켜 왔다. 1990년대 초에는 오랜 세월 동안 진행된 육역화로 인해 경포호 전역이 수초로 뒤덮여 늪지화(육상으로 천이되기 직전) 수준이었다. 이에 강릉시에서는 1991년부터 경포호 정화사업의 일환으로 퇴적물을 준설하였으며 현재의 수심을 유지하게 되었다. 하지만 그동안의 많은 노력에도 불구하고 경포호의 수질관리는 여전히 어려움 많다. 경포호의 원형 보전차원에서 퇴적물을 준설한 것은 충분히 이해가 되고 필요한 것으로 사료되나 계속되는 개발압력으로 경포호 수생태계의 많은 부분이 훼손되고 있다. 지역주민을 위한 공원 및 위락시설 조성으로 자연과의 조화가 훼손되고 인공호수로 변하면서 그 부작용과 폐해가 큰 것으로 판단된다. 이러한 개발과 석호생태계의 변화는 장기적으로 지역주민에게 도움이 된다고 보기 어렵다.

현재 경포호 차원에서 호수를 복원하고 수질을 관리하기 위해서는 보다 많은 노력이 요구된다. 필자도 이를 위해 몇 가지 제언을 보태고자 한다.

- 훼손된 지역에 대한 복원이 필요하다. 인위적 매립에 의해 훼손된 지역을 가능한 한 복원하는 것이 우선되어야 한다. 경포호의 복원 범위는 〈그림 12〉와 같이 과거에 훼손된 지역을 의미한다. 복원 원칙은 생물권보전지역 설정에 근거하여 수립하는 것이 타당할 것으로 사료된다. 원주지방환경청(2009)에서는 이미 경포호를 비롯한 동해안 주요 석호의 생태계보전 방안을 수립하면서 경포호의 생물권보전지역을 설정하였다(그림 13). 생물권보전지역은 MAB(인간과 생물권 계획 Man and the Biosphere Programme: MAB)



〈그림 12〉 경포호 복원 범위(자료: 원주지방환경청, 2009)



〈그림 13〉 생물권보전지역 설정(자료: 원주지방환경청, 2009)

사업을 실현하는 주요 수단으로서 생물 다양성의 보전과 이의 지속가능한 이용을 조화시킬 수 있는 방안을 모색하기 위해 전 세계적으로 보전할 가치가 있는 뛰어난 생태계를 유네스코가 지정한 곳이다. 생물권보전지역으로 지정하는 것은 그 지역의 토지이용계획을 촉진하여 생물다양성과 생태계의 여러 요소들을 효과적으로 보전하고, 자원의 지속가능한 이용을 허용하면서 그 지역의 고유한 전원적 또는 야생적 특성을 유지하며, 또 국가 및 국제 과학단체들에게 아주 다양한 현장을 포괄하는 연구지와 실험지를 제공하기 위해서이다. 그래서 생물권보전지역은 새로운 규제를 반드시 필요로 하지 않는 융통성이 매우 크고 실용적인 토지이용관리 방안이라고 할 수 있다. 2005년 7월 현재 102개국에 482곳이 생물권보전지역으로 지정되어 있다.

- 경포호는 염분조절이 필요하다. 담수유입량을 증가시켜 염분을 낮추던가 아니면 호수 상류부에 해수를 펌핑하여 바닷물이 상류에서 하류로 자연스럽게 호수의 내부를 관통하여 흐를 수 있게 하는 등 적절한 조치가 필요하다. 현재 경포호의 염분은 평균 20psu 이상으로 거의 해수화가 진행되었다고 볼 수 있다. 완전 해수화가 된다면 어린 해양생물들이 서식 산란하는 인큐베이터 역할을 기대할 수 있을 것이다. 파래류 또한 이들의 서식공간이 될 수 있어 파래류

에 대한 과학적인 연구가 지속적으로 필요하다.

- 염분도를 낮추기 위해 과거처럼 수문을 설치하여 조절하는 것은 더 어려운 문제를 낳을 수도 있다. 2004년 이전과 같이 다시 수문을 설치할 경우 과거처럼 수질 악화가 우려되고, 특히 용존산소(DO) 부족 등의 문제로 어류가 대량 폐사할 수 있다. 그러므로 염분을 낮추기 위해서는 유입수량을 증가시키는 방안이 최선책으로 시료되나 이 또한 많은 비용이 소요되어 현실적으로 쉽지 않다. 경포호의 유입수량 증가 방안으로는 남대천의 물을 끌어오거나 지하수 등을 활용하는 방법 등이 있을 수 있다.
- 파래류와 같은 해조류의 번식을 억제하기 위해서는 빛 조절이 필요하다. 빛 조절을 위해서는 호수 수면 위에 부유식물섬(부유식 산란장 등)을 활용할 수 있다. 부유식물섬을 설치하게 되면, 수중 해조류에게 빛 공급을 차단하여 성장을 억제할 수 있다. 또한 영양염류 등 오염물질 정화에도 도움이 되며, 여러 생물들의 서식처(어류, 저서생물, 양서파충류 등)를 제공할 수도 있다. 또한 직접 수거처리하는 방안도 있으나 파래류의 습증량이 커서 수거처리 비용이 부담될 수 있다. 그러므로 수거 후 퇴비로 재활용하는 방법과 기름을 추출하는 방법 등 보다 다양한 연구가 필요하다.
- 영양염류의 조절이 필요하다. 생활하수나 상가의 폐수 등

의 호수 유입을 차단하거나 고도처리 후 유입시켜야 한다. 즉, 하수나 폐수를 차집하여 하수처리장으로 이송하는 방안이 요구된다. 또한 내부부하량(사멸된 갈대, 파래류, 저니층 제거 등)을 줄일 수 있는 방안도 함께 고민해야 할 것으로 사료된다. 🌐

참고문헌

이은주(2012), 경포호 이상조류 번식 원인분석과 수질개선 방안. 강원 녹색환경지원센터.

원주지방환경청(2008), 동해안 석호 생태계 보전 및 복원을 위한 생태계 정밀조사 연구 및 관리방안(II) 연구용역.

원주지방환경청(2009), 동해안 석호 생태계 보전 및 복원을 위한 생태계 정밀조사연구 및 관리방안(II).

원주지방환경청(2009), 석호생태계 복원기법 및 지침 개발.

허우명, 김범철, 전만식(1999), 동해안 석호의 부영양화 평가. 한국육수학회지 32(2):141-151.

Carlson, R.E.(1977), A trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanogr.* 22:361-369.

Likens, G. E.(1975), Primary production of inland aquatic ecosystem, In H. Lieth and R.H. Whittaker (eds), *Primary productivity of the biosphere*, springer Verlag, New York, pp. 185-202.

OECD(1982), *Eutrophication of Waters: Monitoring, Assessment and Control*. OECD, Paris, 154p.

U.S. EPA(1976), *Water Quality Criteria Research of the U.S. Environmental Protection Agency, Proceeding of an EPA Sponsored Symposium*, EPA-600 (3-76-079): 185.

