

## 태화강 하류에서 겨울철 조류 발생과 수질의 공간적 특성

손은락 · 박정임 · 이보라 · 이진우 · 김종설\*

울산대학교 자연과학대학 생명과학부

### Winter Algal Bloom and Spatial Characteristics of Water Quality in the Lower Taewha River, Ulsan, Korea

Eun Rak Sohn, Jung Im Park, Bora Lee, Jin Woo Lee, and Jongseol Kim\*

Department of Biological Science, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Republic of Korea

(Received December 14, 2012 / Accepted February 6, 2013)

This study was carried out to assess the spatial and tidal effects on the water quality in the lower reaches of Taewha River, Ulsan, Korea and to understand the environmental factors affecting winter algal bloom in the river. From May, 2010 to January, 2011, water samples were collected at five locations (New Samho Bridge, Old Samho Bridge, Mungjung Stream, Taewha Bridge, and Mungchon Bridge) along the river at high and low tides of spring tide. We measured environmental parameters including salinity, dissolved oxygen (DO), biological oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), chlorophyll *a* (Chl *a*) and various nutrient concentrations. Salinity increased towards the downstream direction. Average values of Chl *a* concentrations ranged 10–26 mg/m<sup>3</sup> at high tide and 11–53 mg/m<sup>3</sup> at low tide depending on sampling locations. It was noteworthy that there were strong increases in Chl *a* concentrations during the November 21 to December 22 sampling period especially at the Taewha Bridge. At the location, Chl *a* concentrations were measured as 138–296 mg/m<sup>3</sup> for the period; *Rhodomonas lacustris* of class *Cryptophyceae* was the dominant algal species. Chl *a* concentrations at the Taewha Bridge were positively correlated with such parameters as salinity, BOD, DO, COD, pH, and T-N, and negatively correlated with temperature and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N. On the other hand, at the Mungchon Bridge the highest concentration of Chl *a* was 55 mg/m<sup>3</sup> on August 25, and Chl *a* concentrations were positively correlated with NH<sub>3</sub>-N, T-N, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P, T-P, and heterotrophic plate counts. The results suggested that water quality in the lower Taewha River fluctuated a lot with the sampling locations and the patterns of algal blooms were different between Taewha Bridge and Mungchon Bridge sampling locations.

**Keywords:** algal bloom, Taewha River, water quality, winter

태화강은 울산 울주군 가지산에서 발원하여 울산의 도심을 흘러 동해안에 이르는 길이 44.7 km, 유역면적 660.7 km<sup>2</sup>인 하천이다. 울산시의 환경개선 노력 중 가장 두드러진 것의 하나로 태화강 수질개선사업이 있다. 1990년대 초반부터 태화강의 수질개선을 위한 각종 사업이 시행되었으며, 대표적으로 1995년 준공된 용연하수처리장 및 차집관로 건설, 2004년 준공된 언양 수질개선사업소 건설, 2007년 완결된 가정 오수관 연결사업 등의 각종 수질개선 인프라 건설, 2004년부터 2007년까지의 퇴적토 준설, 하구하상준설, 지천환경개선 등을 들 수 있다(Kim, 2009; Ulsan metropolitan city, 2010). 2005년에는 2014년을 목표로 하는 10년 단위 계획인 태화강 마스터플랜을 확정하였으며, 2009년까지 50개 사업 중 20개 사업을 완료하였고, 현재 나머지 사업이 진행 중이거나 계획 단계에 있다(Ulsan Metropolitan City, 2010).

태화강의 경우 하류(삼호교 지점부터)에서 겨울철에 조류 발생(algal bloom) 현상이 매년 반복적으로 나타난다(Shin, 2007). 강수량이 줄어드는 11월에서 4월에 걸쳐 한시적으로 발생하며, 무독성의 *Cryptomonads* (은편모조류)가 조류 발생에서 우점하는 식물플랑크톤으로 분석되고 있다(Shin, 2007). 이러한 겨울철 조류 발생의 원인으로는 갈수기의 유량 및 유속 감소에 따른 정체수역 형성과 이에 따른 자정능력 저하, 염분에 의한 수환경 교란 등이 지목되고 있으나 정확한 기작은 아직 설명하지 못하고 있다(Shin, 2007). 겨울철 조류 발생에 대한 보고는 많지 않다. 미국 Chesapeake Bay로 흐르는 Patuxent River 하구의 겨울철 조류 발생에 대한 보고에서는, *Dinoflagellate*인 *Katodinium rotundatum*이 우점종으로 분석되었으며, 질소(N) 제한조건과 조류 발생의 연관성을 시사하였다(Sellner *et al.*, 1991).

2009년 태화강 하류 수질측정망의 생물학적 산소 요구량(biological oxygen demand, BOD)은 2.0 mg/L로 수질 및 수생태계 상태의 ‘ 좋음 ’ 등급(Ib)을 나타내지만 지점별로는 삼호 1.0 mg/L, 태화 2.6 mg/L, 학성 2.3 mg/L, 명촌 2.0 mg/L로 지점에

\*For correspondence. E-mail: [jkim@ulsan.ac.kr](mailto:jkim@ulsan.ac.kr); Tel.: +82-52-259-2387; Fax: +82-52-259-1694

다른 변동성을 보인다(Ulsan Metropolitan City, 2010). 또한 2009년 BOD 측정값은 2008년과 비교할 경우 삼호, 학성, 명촌 지점은 0.1 mg/L(삼호, 학성)에서 0.3 mg/L(명촌)의 감소가 있었지만 태화 지점은 2008년 2.1 mg/L에 비해 0.5 mg/L 증가한 수준이었다(Ulsan Metropolitan City, 2009, 2010).

수질 측정값은 시료 채취 및 측정의 시점, 조사 지점, 그리고 실험 방법에 따라 차이가 있을 수 있으며, 측정자에 따른 편차도 있다. 태화강 하류의 경우 하구언이 없어 조수의 영향을 직접 받기 때문에 수질 분석의 시점이란 측면에서 계절적 요인 뿐만 아니라 조수에 따른 영향도 고려할 필요가 있다. 또한 태화강 하류는 여러 지천이 합류하는 도심하천으로 수질측정망의 BOD에서도 볼 수 있듯이 수질이 상류방향에서 하류방향으로 경향성을 보이지 않고 지점에 따라 많은 편차를 나타내기도 한다.

본 연구에서는 태화강 하류에서 조수 및 조사 지점에 따른 태화강 수질의 특성과 겨울철 조류 발생에 영향을 주는 환경요인을 파악하고자 하였다.

### 재료 및 방법

#### 조사 지점 및 시료 채취

태화강 하류의 신삼호교[SH(N)], 구삼호교[SH(O)], 명정천 합류 지점(MJ), 태화교(TW), 명촌교(MC) 등 5개 지점에서, 사리(spring tide)의 오전 만조(high tide)와 오후 간조(low tide) 시간에 시료를 채취하였다(Fig. 1). 2010년 5월에서 2011년 1월까지 만조(오전 7시-9시)와 간조(오후 1시-3시) 시간에 하류 지점(명촌교, MC)에서부터 상류 지점으로 이동하면서 시료 채취를 진행하였으며, 만조와 간조 각각 17회의 채수 및 분석이 이루어졌다. 실험실에서의 수질 분석을 위한 시료는 Van Dorn water sampler로 수심 0.3 m에서 채수하였으며, 냉장 상태로 실험실로 운반하였다(Kim *et al.*, 2004; Ministry of Environment, 2010). 수심, 수온, 기온은 채수 시 현장에서 측정하였다. 시료 채취 일과 채취 전일의 울산 지역 강수량과 기온, 그리고 조사 기간의 월별 강수량을 Fig. 2에 정리하였다(Korea Meteorological Administration, 2010, 2011).

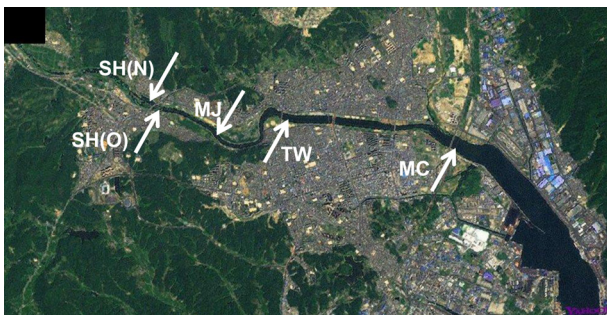


Fig. 1. Map showing the 5 sampling locations along the lower Taewha River, New Samho Bridge [SH(N)], Old Samho Bridge [SH(O)], junction with Mungjung stream (MJ), Taewha Bridge (TW), and Mungchon Bridge (MC).

#### 물리·화학적 수질 분석

용존산소 농도(dissolved oxygen, DO), 수소이온농도(pH), 염분도는 현장에서 DO meter (YSI, model 55/12), pH meter (LT Lutron, model PH-222), 염분도계(SATO, model SK-5S)를 이용하여 측정하였다.

부유물질(suspended solid), BOD, 화학적 산소 요구량(chemical oxygen demand, COD<sub>Mn</sub>), 암모니아성 질소(NH<sub>3</sub>-N), 질산성 질소(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N), 총 질소(T-N), 인산염 인(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P), 총 인(T-P) 등은 공정시험법(American Public Health Association, 1998; Ministry of Environment, 2010)에 의거하여 분석하였다.

#### 식물플랑크톤과 종속영양세균

식물플랑크톤의 현존량에 대한 정보를 얻기 위해 엽록소 *a* (chlorophyll *a*, Chl *a*) 농도를 공정시험법(American Public Health Association, 1998; Ministry of Environment, 2010)의 방법에 따라 측정하였다. 또한 2010년 11월 21일 이후 겨울철 조류 발생이 관찰되어 태화교 지점을 대상으로 2010년 12월 19일

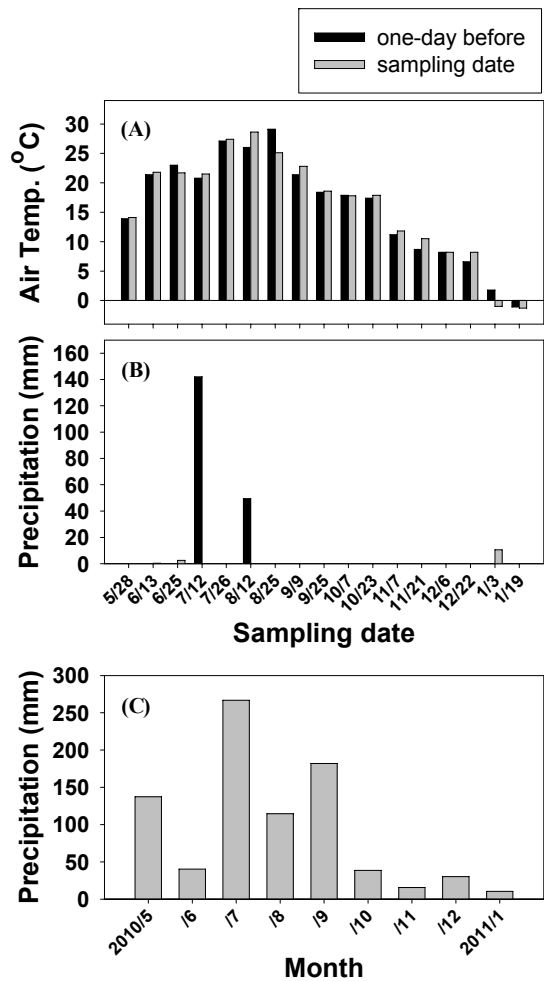


Fig. 2. Air temperature (A) and precipitation (B) on sampling date and the day before sampling date in Ulsan, and monthly precipitation (C) during the study period.

**Table 1.** Average value of each water quality parameter at the 5 sampling locations of the lower Taewha River

| Parameters                              | SH(N)        |              | SH(O)        |              | MJ           |              | TW           |              | MC           |              |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|   | high tide    | low tide     | high tide    | low tide     | high tide    | low tide     | high tide    | low tide     | high tide    | low tide     |
| Water depth (m)                         | 0.8 (±0.3)   | 0.6 (±0.3)   | 0.7 (±0.2)   | 0.5 (±0.2)   | 0.7 (±0.2)   | 0.4 (±0.1)   | 0.9 (±0.2)   | 0.5 (±0.2)   | 0.9 (±0.2)   | 0.5 (±0.2)   |
| Water temperature (°C)                  | 17.3 (±7.2)  | 19.1 (±6.9)  | 17.1 (±7.8)  | 19.2 (±6.6)  | 16.9 (±8.3)  | 20.2 (±7.3)  | 17.5 (±8.2)  | 19.4 (±7.6)  | 16.4 (±7.1)  | 19.9 (±7.4)  |
| Air temperature (°C)                    | 15.3 (±10.3) | 19.3 (±9.1)  | 17.1 (±10.7) | 20.7 (±9.0)  | 15.9 (±11.6) | 22.7 (±8.6)  | 14.7 (±10.8) | 19.2 (±8.6)  | 14.3 (±11.0) | 21.1 (±9.6)  |
| Salinity (‰)                            | 0.1 (±0.0)   | 0.1 (±0.1)   | 1.3 (±1.9)   | 0.5 (±0.6)   | 3.2 (±3.5)   | 2.8 (±3.5)   | 5.6 (±4.4)   | 5.4 (±4.7)   | 13.4 (±6.6)  | 12.6 (±6.9)  |
| DO (mg/L)                               | 5.9 (±3.1)   | 6.4 (±4.1)   | 5.4 (±2.6)   | 5.9 (±3.1)   | 5.4 (±3.1)   | 6.1 (±3.8)   | 6.1 (±4.0)   | 6.2 (±3.8)   | 5.1 (±3.4)   | 6.8 (±4.2)   |
| BOD (mg/L)                              | 1.7 (±1.2)   | 2.1 (±1.8)   | 2.2 (±1.8)   | 2.1 (±1.7)   | 2.8 (±2.4)   | 3.0 (±2.6)   | 3.0 (±2.6)   | 3.4 (±3.5)   | 2.6 (±2.1)   | 2.6 (±1.7)   |
| COD (mg/L)                              | 4.6 (±1.6)   | 4.5 (±1.7)   | 6.6 (±2.6)   | 6.4 (±2.7)   | 8.2 (±3.8)   | 9.5 (±4.0)   | 9.9 (±3.1)   | 10.1 (±4.2)  | 10.6 (±3.9)  | 10.6 (±3.4)  |
| NH <sub>3</sub> -N (mg/L)               | 0.07 (±0.06) | 0.05 (±0.03) | 0.11 (±0.10) | 0.10 (±0.12) | 0.34 (±0.40) | 0.35 (±0.39) | 0.18 (±0.20) | 0.14 (±0.18) | 0.66 (±0.97) | 0.16 (±0.09) |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N (mg/L)  | 1.5 (±0.4)   | 1.4 (±0.4)   | 1.3 (±0.5)   | 1.5 (±0.5)   | 1.0 (±0.6)   | 1.0 (±0.5)   | 0.7 (±0.4)   | 0.8 (±0.5)   | 0.6 (±0.4)   | 0.7 (±0.5)   |
| T-N (mg/L)                              | 1.8 (±0.4)   | 1.8 (±0.4)   | 1.8 (±0.5)   | 2.2 (±1.0)   | 2.1 (±0.8)   | 1.9 (±0.8)   | 1.5 (±0.5)   | 1.7 (±0.7)   | 1.7 (±1.0)   | 1.4 (±0.6)   |
| PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P (mg/L) | 0.03 (±0.03) | 0.03 (±0.02) | 0.03 (±0.03) | 0.03 (±0.03) | 0.06 (±0.07) | 0.07 (±0.07) | 0.06 (±0.04) | 0.05 (±0.03) | 0.11 (±0.06) | 0.11 (±0.08) |
| T-P (mg/L)                              | 0.07 (±0.07) | 0.06 (±0.05) | 0.09 (±0.06) | 0.11 (±0.11) | 0.16 (±0.15) | 0.13 (±0.08) | 0.15 (±0.11) | 0.13 (±0.07) | 0.25 (±0.20) | 0.27 (±0.22) |
| pH                                      | 7.9 (±0.3)   | 8.1 (±0.7)   | 7.8 (±0.3)   | 8.4 (±0.7)   | 7.7 (±0.3)   | 7.9 (±0.6)   | 8.0 (±0.4)   | 8.2 (±0.6)   | 8.0 (±0.4)   | 8.6 (±0.6)   |
| Suspended solid (mg/L)                  | 0.01 (±0.02) | 0.01 (±0.01) | 0.01 (±0.01) | 0.02 (±0.02) | 0.04 (±0.04) | 0.04 (±0.05) | 0.04 (±0.04) | 0.05 (±0.05) | 0.06 (±0.04) | 0.06 (±0.05) |
| Chl <i>a</i> (mg/m <sup>3</sup> )       | 10.4 (±6.2)  | 11.4 (±9.4)  | 14.5 (±9.6)  | 17.9 (±15.3) | 22.2 (±33.4) | 28.6 (±43.1) | 25.6 (±22.8) | 53.3 (±75.8) | 13.2 (±11.9) | 16.6 (±10.3) |
| HPC (×10 <sup>3</sup> CFUs/ml)          | 3.1          | 3.1          | 4.3          | 12.6         | 4.7          | 6.4          | 4.0          | 3.1          | 43.0         | 3.2          |

과 22일, 2011년 1월 3일, 7일, 11일, 19일, 그리고 2월 1일 등 7회에 걸쳐 식물플랑크톤 개체 수와 종 조성을 분석하였다. 간략히 설명하면 시료를 현장에서 Lugol 용액으로 고정된 후 실험실로 운반하였으며, 3일 이상 자연 침강시켰다. 농축한 시료를 1 ml 용량의 Sedgwick-Rafter chamber에 골고루 분산시킨 뒤 현미경(Olympus, model CK2)으로 계수하였으며, 식물플랑크톤의 동정은 담수조류도감을 참고하였다(Javornický, 2003; Novarino, 2003; Kim et al., 2004).

종속영양세균의 수준을 파악하기 위해 중온 일반세균 농도 (heterotrophic plate count, HPC)를 측정하였으며, 시료를 10<sup>1</sup>-10<sup>4</sup>로 희석한 후, plate count agar (Atlas and Parks, 1996)에 접종하고 24시간 배양한 다음 생겨난 집락의 수로부터 구하였다.

### 상관성 분석

태화강 하류에서 물리·화학적 환경요인들 사이의 상호 관계를 파악하기 위해 Windows 용 SPSS v.13.0을 사용하여 모든 측정값에 대해 Pearson의 상관계수를 구하였다. 지점별로 만조와 간조를 구분하여 Chl *a* 농도 및 염분도와 다른 환경요인과의 상관성을 중심으로 분석하였으며, 측정값 사이에 유의성 있는 양의 상관관계가 있다는 것은 해당 환경변수에 영향을 주는 환경요인이 동일한 방향으로 작용하는 것으로 해석할 수 있다.

## 결 과

### 물리·화학적 환경요인

태화강 하류의 5개 지점에서 조사기간 동안 만조와 간조에 측정된 물리·화학적 환경요인의 평균값을 Table 1에 요약하였다. 수심의 지점별 평균값은 만조 때 0.7-0.9 m, 간조 때 0.4-0.6 m의 범위였다. 각 지점에서 만조와 간조 평균 수심 차이는 하류 방향으로 갈수록 증가하는 경향이 있었다(Table 1). 만조와 간조 때 측정된 수온의 지점별 평균값은 각각 16.4-17.5°C와 19.1-20.2°C

로, 만조와 간조의 수온 차이는 시료의 채수 시간대에 따른 영향으로 판단된다(Table 1). 여름에는 수온이 기온보다 낮았고 겨울에는 수온이 기온보다 높았으며, 만조와 간조의 수온 차이는 기온 차이에 비해 그 차이의 정도가 적었다.

태화강 하류는 조수의 영향을 받으며, 조사 지점별 조수의 영향을 확인하고자 염분도를 측정하였다(Table 1 and Fig. 3). 염분도의 지점별 평균값은 만조 때 0.1-13.4‰, 간조 때 0.1-12.6‰였고, 하류 방향으로 갈수록 증가하였다. 명촌교 지점에서 염분도의 최대값은 만조 때 20.5‰, 간조 때 19.5‰였으며, 태화교 지점의 최대값은 만조와 간조 때 모두 12.0‰이었고, 명정천 합류 지점에서는 만조 때 최대 9.0‰, 간조 때 최대 10.0‰이었다(Fig. 3). 이들 지점은 조수에 따라 해수의 영향을 받음을 알 수 있다. 측정 전날 많은 양의 비가 내린 7월 12일과 8월 12일 만조(오전) 측정의 경우 명촌교를 포함한 전 지점에서 염분도는 0.1‰ 이하였다(Figs. 2 and 3). 또한 10-11월의 염분도가 7-9월에 비해 높았는데, 강수량에 기인한 담수 유량 및 유속 변화의 영향으로 판단된다(Figs. 2 and 3).

DO의 지점별 평균값은 만조 때 5.1-6.1 mg/L, 간조 때 5.9-6.8 mg/L로, 수온이 낮은 만조 때보다 수온이 높은 간조 때 평균 0.1-1.7 mg/L 정도 더 높았다(Table 1). 간조(낮 시간) 때의 조류 광합성 활성에 의한 DO 증가가 온도 상승에 따른 용해도 감소의 물리적 영향을 상쇄하는 것으로 보인다. 만조와 간조 때 측정된 BOD의 지점별 평균값은 각각 1.7-3.0 mg/L와 2.1-3.4 mg/L였으며, 만조와 간조 모두 태화교 지점이 가장 높았고, 다음으로 명정천 합류 지점, 명촌교 지점의 순서였다(Table 1). COD<sub>Mn</sub>의 지점별 평균값은 만조 때 4.6-10.6 mg/L, 간조 때 4.5-10.6 mg/L였으며, 만조와 간조 모두 하류 방향으로 갈수록 증가하였다(Table 1).

NH<sub>3</sub>-N의 지점별 평균값은 만조 때 0.07-0.66 mg/L, 간조 때 0.05-0.35 mg/L였으며, 만조 때 명촌교 지점에서 0.66 mg/L로 특히 높았는데, 인근 배수장에서의 하수 유입과 관련 있을 것으로 여겨진다(Table 1). 만조와 간조 때 측정된 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N의 지점별

평균값은 각각 0.6-1.5 mg/L와 0.7-1.5 mg/L였으며, 만조와 간조 모두 하류 방향으로 갈수록 감소하였다(Table 1). T-N의 지점별 평균값은 만조 1.5-2.1 mg/L, 간조 1.4-2.2 mg/L의 범위였다(Table 1). PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P의 지점별 평균값은 만조와 간조 모두 0.03-0.11 mg/L의 범위였으며, 명촌교 지점에서 가장 높았다(Table 1). T-P의 지점별 평균값은 만조 0.07-0.25 mg/L, 간조 0.06-0.27 mg/L였으며, 만조와 간조 모두 명촌교 지점이 가장 높았다(Table 1).

만조와 간조 pH의 지점별 평균값은 각각 7.7-8.0와 7.9-8.6로, 만조 때보다 간조 때에 평균 0.2-0.6 정도 더 높았다(Table 1). Suspended solid의 지점별 평균값은 하류 방향으로 갈수록 증가하는 경향을 보였다(Table 1).

**식물플랑크톤과 총속영양세균**

태화강 하류에서 식물플랑크톤의 분포에 대한 정보를 얻기 위해 Chl *a*의 농도를 지점별로 측정하였다(Table 1 and Fig. 4). Chl *a*의 지점별 평균값은 만조 10.4-25.6 mg/m<sup>3</sup>, 간조 11.4-53.3 mg/m<sup>3</sup>로, 만조 때보다 간조 때에 더 높았다. 태화교 지점의 경우 11월 21일, 12월 6일, 12월 22일의 만조에 각각 138.3 mg/m<sup>3</sup>, 295.5 mg/m<sup>3</sup>, 155.0 mg/m<sup>3</sup>로 높은 Chl *a* 농도를 보이고 있다(Fig. 4). 명정천 합류 지점의 경우에도 11월 21일과 12월 6일의 만조에 각각 178.4 mg/m<sup>3</sup>, 85.5 mg/m<sup>3</sup>의 높은 Chl *a* 농도를 나

타내었고, 구삼호교 지점은 12월 6일의 만조에 66.1 mg/m<sup>3</sup>의 높은 Chl *a* 농도를 보이고 있다. 반면 명촌교 지점의 경우에는 8월 25일의 만조와 간조에 각각 54.5 mg/m<sup>3</sup>와 43.2 mg/m<sup>3</sup>로 Chl *a*의 최고 농도를 보이고 있어 태화교나 명정천 합류 지점과 다른 양상을 나타내었다(Fig. 4). Chl *a* 농도에 기초할 때 겨울 조류 발생은 태화교 지점, 명정천 합류 지점의 순으로 가장 빈번하고 심하게 나타남을 알 수 있다.

Chl *a* 농도가 가장 높은 태화교 지점을 대상으로 2010년 12월 19일부터 2011년 2월 1일까지 7회에 걸쳐 식물플랑크톤의 종분포를 조사하였으며, 7회 측정된 식물플랑크톤 개체수 밀도는 554-9,952 cells/ml의 범위였다(Table 2). *Cryptophyceae*의 *Rhodomonas lacustris* var. *nanoplantica*가 개체수 밀도 250-6,900 cells/ml로, 12월 19일부터 1월 11일까지 가장 우점하였고, *Cryptomonas erosa*는 개체수 밀도 4-3,150 cells/ml이었으며, 7회 측정에서 모두 관찰되었다(Table 2). *Euglenophyceae*의 *Trachelomonas volvocina*도 7회 측정에서 모두 확인되었으며(개체수 밀도 1-14 cells/ml), 1월 7일부터 출현한 *Euglena gracilis*는 개체수 밀도 250-5,300 cells/ml로 1월 19일과 2월 1일의 조사에서 가장 우점하였다(Table 2). 1월 19일에는 *Dinophyceae*의 *Glenodinium pulvisculus*, 2월 1일에는 *Cryptophyceae*의 *Cryptomonas ovata*가 새로 출현하였다(Table 2).

만조와 간조에 측정된 HPC의 지점별 평균값은 각각 3,142-

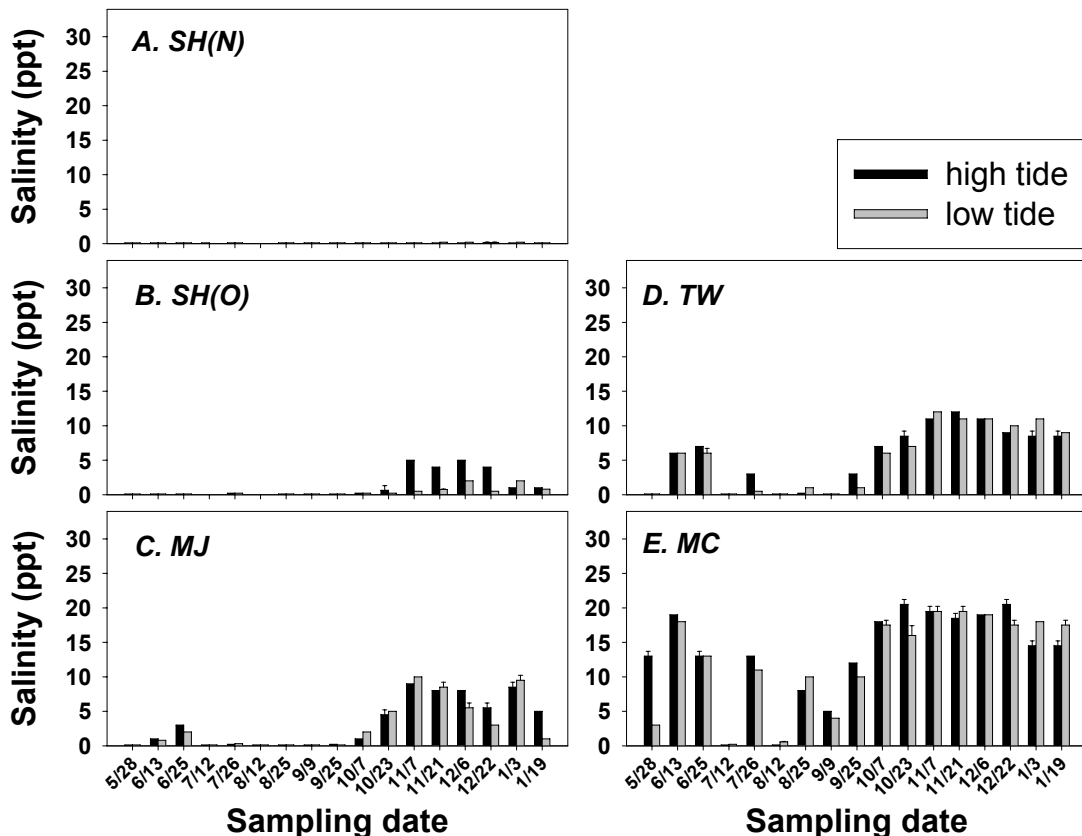


Fig. 3. Salinity measured at high and low tides of the 5 sampling locations along the Taewha River.

**Table 2.** Abundance of algal populations at Taewha Bridge from Dec. 19, 2010 to Feb. 1, 2011

| Species   | No. of cells/ml |       |       |     |       |       |       |
|---|-----------------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|
|   | 12/19           | 12/22 | 1/3   | 1/7 | 1/11  | 1/19  | 2/1   |
| Class Euglenophyceae                                  |                 |       |       |     |       |       |       |
| <i>Euglena gracilis</i>                               |                 |       |       | 250 | 800   | 2,200 | 5,300 |
| <i>Trachelomonas volvocina</i>                        | 1               | 2     | 2     | 4   | 4     | 6     | 14    |
| Class Dinophyceae                                     |                 |       |       |     |       |       |       |
| <i>Glenodinium pulvisculus</i>                        |                 |       |       |     |       | 2     | 2     |
| Class Cryptophyceae                                   |                 |       |       |     |       |       |       |
| <i>Cryptomonas erosa</i>                              | 900             | 3,150 | 1,400 | 50  | 17    | 12    | 4     |
| <i>Cryptomonas ovata</i>                              |                 |       |       |     |       |       | 108   |
| <i>Rhodomonas lacustris</i> var. <i>nanoplanctica</i> | 3,300           | 6,800 | 6,900 | 250 | 2,900 | 1,200 | 2,700 |
| Total   | 4,201           | 9,952 | 8,302 | 554 | 3,721 | 3,420 | 8,128 |

43,031 CFUs/ml, 3,119–12,609 CFUs/ml의 범위였다(Table 1). 지점별 HPC 평균값의 경우 만조에는 명촌교 지점, 간조에는 구삼호교 지점에서 가장 높았고, 만조와 간조 모두 신삼호교 지점이 가장 낮았다(Table 1).

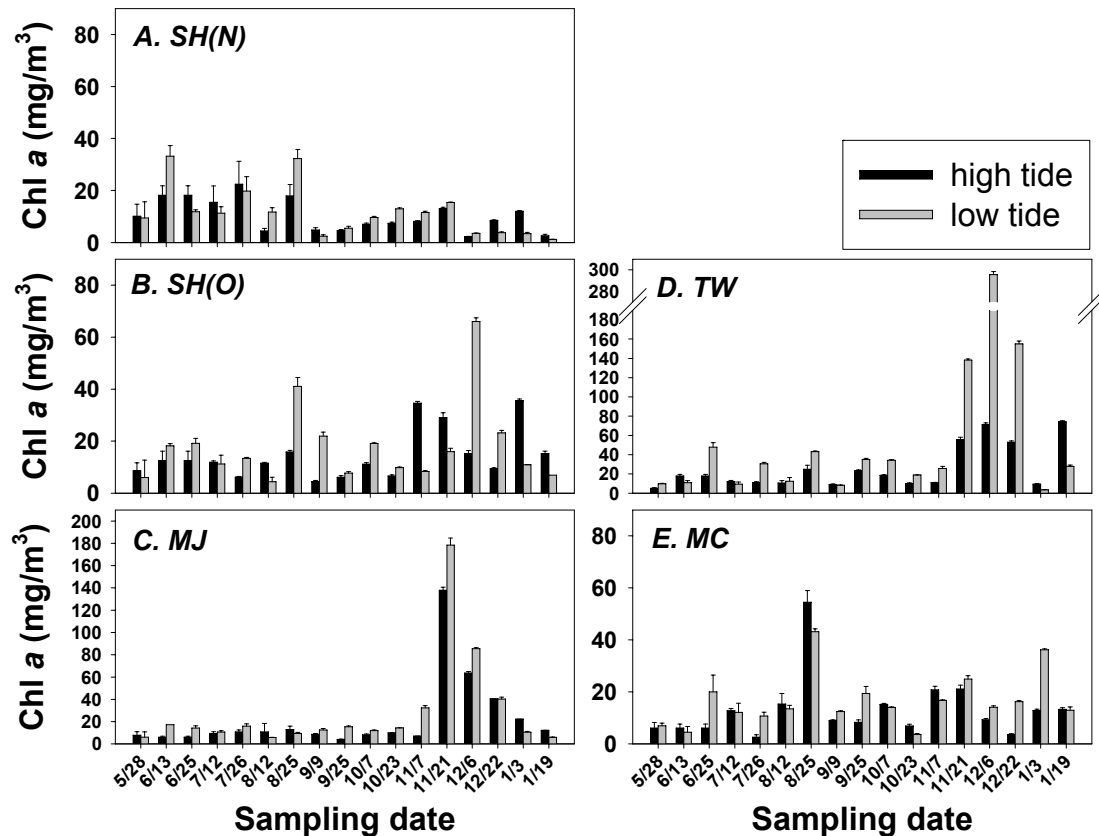
**상관성 분석**

식물플랑크톤 분포에 대한 정보를 제공하는 Chl *a*와 다른 환경변수 측정값과의 Pearson 상관계수를 각 지점의 만조와 간조에서 계산하였으며, 유의성 있는 상관관계를 보이는 것을 Table

3에 정리하였다.

겨울철 조류 발생이 관찰된 태화교 지점을 살펴보면, Chl *a* 농도는 염분도, BOD, DO, COD, pH, T-N와 양의 상관관계가 있었으며, 수온, 기온, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N과는 음의 상관관계가 있었다(Table 3). 명정천 합류 지점에서도 태화교에서와 유사한 상관관계를 보이는데, Chl *a* 농도는 염분도, BOD, pH와 양의 상관관계가 있었고, 기온과는 음의 상관관계가 있었다(Table 3).

태화교 지점이나 명정천 합류 지점과는 달리 가장 하류인 명촌교 지점의 경우, 만조 때의 Chl *a* 농도는 NH<sub>3</sub>-N, T-N,



**Fig. 4.** Chlorophyll *a* concentration at high and low tides of the 5 sampling locations along the Taewha River.

**Table 3.** Pearson's correlation coefficient between chlorophyll *a* and other environmental parameters at the 5 sampling locations along the lower Taewha River

| Parameters                       | SH(N)     |                | SH(O)          |                | MJ             |                | TW              |                 | MC             |          |
|----------------------------------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------|
|                                  | High tide | Low tide       | High tide      | Low tide       | High tide      | Low tide       | High tide       | Low tide        | High tide      | Low tide |
| Water temperature                | 0.463     | <b>0.598*</b>  | <b>-0.565*</b> | 0.015          | -0.426         | -0.286         | <b>-0.594*</b>  | -0.330          | 0.156          | -0.104   |
| Air temperature                  | 0.442     | <b>0.525*</b>  | <b>-0.585*</b> | -0.016         | <b>-0.499*</b> | -0.106         | <b>-0.657**</b> | -0.302          | 0.072          | -0.223   |
| Salinity                         | 0.116     | -0.225         | <b>0.531*</b>  | 0.446          | <b>0.550*</b>  | <b>0.535*</b>  | <b>0.560*</b>   | <b>0.494*</b>   | -0.215         | 0.142    |
| BOD                              | -0.231    | -0.286         | 0.329          | <b>0.585*</b>  | <b>0.716**</b> | <b>0.761**</b> | <b>0.865**</b>  | <b>0.852**</b>  | -0.224         | 0.414    |
| DO                               | -0.370    | -0.429         | 0.399          | 0.090          | 0.377          | 0.425          | <b>0.744**</b>  | <b>0.653**</b>  | -0.207         | 0.112    |
| COD                              | 0.210     | 0.054          | 0.365          | <b>0.568*</b>  | 0.472          | 0.480          | 0.316           | <b>0.864**</b>  | 0.479          | 0.016    |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N  | -0.082    | 0.126          | -0.287         | 0.089          | -0.311         | -0.397         | <b>-0.591*</b>  | <b>-0.609**</b> | 0.029          | -0.170   |
| pH                               | 0.332     | <b>0.729**</b> | -0.232         | -0.348         | 0.148          | <b>0.535*</b>  | <b>0.716**</b>  | 0.479           | 0.027          | 0.370    |
| Suspended solid                  | 0.203     | 0.212          | 0.204          | <b>0.714**</b> | -0.091         | -0.147         | -0.212          | -0.118          | 0.037          | 0.026    |
| NH <sub>3</sub> -N               | 0.285     | -0.372         | <b>0.517*</b>  | 0.459          | -0.176         | -0.302         | -0.105          | 0.282           | <b>0.941**</b> | 0.452    |
| T-N                              | 0.050     | 0.139          | -0.097         | 0.449          | 0.104          | 0.142          | 0.031           | <b>0.629**</b>  | <b>0.879**</b> | 0.430    |
| PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P | 0.090     | 0.140          | -0.393         | -0.100         | -0.225         | -0.215         | -0.444          | -0.270          | <b>0.746**</b> | -0.057   |
| T-P                              | 0.170     | 0.272          | -0.209         | <b>0.711**</b> | -0.011         | -0.054         | -0.012          | 0.348           | <b>0.815**</b> | 0.370    |
| HPC                              | 0.199     | -0.003         | -0.106         | 0.124          | -0.154         | -0.167         | -0.201          | -0.182          | <b>0.580*</b>  | -0.094   |

Significant values are shown in grey areas; \* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$

PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P, T-P, HPC와 양의 상관관계를 나타내었으며, 조류 발생과 영양물질 농도와의 뚜렷한 상관성을 보였다(Table 3). 반면, 만조와 비교하여 간조에서는 그러한 상관성이 관찰되지 않았는데 명촌교 인근 배수장의 방류 시점과 관계가 있을 것으로 여겨진다. 이러한 결과는 태화교와 명정천 합류 지점에서의 조류 발생은 명촌교 지점과는 그 발생 시기 및 원인에 있어 차이가 있음을 시사한다.

태화강 하류는 조수에 따른 해수의 영향을 받기 때문에, 염분도와 다른 환경변수 측정값과의 Pearson 상관계수를 각 지점의 만조와 간조에서 계산하여 Table 4에 정리하였다. 염분도는 수온, 기온, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P와 모든 조사 지점에서, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N과는 명정천 합류 지점, 태화교, 명촌교에서 유의성 있는 음의 상관관계가 있었다(Table 4). 또한 염분도는 BOD, DO와 모든 조사 지점에서, Chl *a* 농도와는 구삼호교, 명정천 합류 지점, 태화교에서 유의성 있는 양의 상관관계가 있었다(Table 4).

## 고찰

겨울 조류 발생이 심각하였던 태화교 지점과 명정천 합류 지점의 경우 Chl *a* 농도는 염분도와 유의성 있는 양의 상관관계가 있었다. 하지만 조사 지점 중 염분도가 가장 높은 명촌교에서는 겨울철 조류 발생이 관찰되지 않았는데, 이는 염분의 농도가 직접적으로 겨울 조류 발생에 원인을 제공하지는 않음을 시사한다. 태화강 하류에서 염분도는 다수의 환경변수와 상관성을 보이는데, 강수량에 따른 담수 유량 및 유속의 변화에 따른 계절적 변동성과 관련 있는 것으로 여겨진다.

태화교 지점의 12월 겨울 조류 발생에서 우점하였던

*Cryptophyceae* 강(Cryptomonads, 은편모조류)의 *Cryptomonas erosa*, *C. ovata*, 그리고 *Rhodomonas lacustris*는 기본적으로 담수에서 발견되는 식물플랑크톤으로 알려져 있다(Tranvik *et al.*, 1989; Javornický, 2003; Novarino, 2003; Cerino and Zingone, 2006; Kim *et al.*, 2007). 태화교 지점과 명정천 합류 지점에서 Chl *a* 농도는 온도와 유의성 있는 음의 상관관계를 보이며, 겨울 조류 발생에서 우점하는 *Cryptomonads*가 낮은 온도에 의해 경쟁적 우위를 차지할 가능성이 있다. 또한 이들 지점에서 Chl *a* 농도와 BOD 사이에 양의 상관관계를 보이는데, 조류의 대량 발생에 따른 생분해성 유기물의 증가와 함께 그 반대 방향, 즉 생분해성 유기물의 증가에 따른 조류 대량 발생의 가능성도 생각해 볼 수 있다. *Cryptomonas* 속의 경우 세균의 포식에 의한 탄소의 획득도 가능하다고 알려져 있다(Tranvik *et al.*, 1989). 태화교 지점에서 Chl *a* 농도는 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N과는 음의 상관관계를 보이고 있다. 미국 Patuxent River 하구의 연구에서 겨울철 조류 발생이 질소(N) 제한조건과 관련이 있으며, N/P 비의 증가와 유속 증가에 따라 조류 발생이 사라짐을 보고하였다(Sellner *et al.*, 1991). 태화강 겨울 조류 발생에서 우점하는 *Cryptomonads*를 대상으로 온도에 따른 성장 특성, 영양물질을 공유하는 다른 미생물 개체군과의 경쟁관계에 대한 분석이 필요하다고 판단된다.

태화강에서 가장 심각한 조류 발생은 수온이 낮고 강수량이 적은 겨울에서 봄까지 한시적으로 발생하고 있으며, 본 연구에서도 그와 같은 경향을 확인하였다(Shim, 2007). 강수량이 풍부한 계절의 경우 조류의 증가보다 더 빠른 속도로 공급되는 강물에 의해 증식하는 조류가 희석되어 씻겨 내려가는 것으로도 볼 수 있다.

태화강 겨울 조류 발생에서 우점하는 식물플랑크톤은 독소나 유해 대사산물을 생성하지는 않는 것으로 알려져 있다. 하지만

**Table 4.** Pearson's correlation coefficient between salinity and other environmental parameters at the 5 sampling locations along the lower Taewha River

| Parameters                       | SH(N)     |          | SH(O)     |          | MJ        |          | TW        |          | MC        |          |
|----------------------------------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
|                                  | High tide | Low tide | High tide | Low tide | High tide | Low tide | High tide | Low tide | High tide | Low tide |
| Water temperature                | -0.339    | -0.585*  | -0.567*   | -0.740*  | -0.815**  | -0.547*  | -0.700**  | -0.771** | -0.542*   | -0.541   |
| Air. temperature                 | -0.402    | -0.616** | -0.630**  | -0.767** | -0.858**  | -0.447   | -0.773**  | -0.758** | -0.557*   | -0.474   |
| Chl <i>a</i>                     | 0.116     | -0.225   | 0.531*    | 0.446    | 0.550*    | 0.535*   | 0.560*    | 0.494*   | -0.215    | 0.142    |
| BOD                              | 0.313     | 0.694**  | 0.922**   | 0.832**  | 0.753**   | 0.669**  | 0.725**   | 0.742**  | 0.536*    | 0.491*   |
| DO                               | 0.423     | 0.646**  | 0.548*    | 0.756**  | 0.760**   | 0.695**  | 0.658**   | 0.827**  | 0.400     | 0.625**  |
| COD                              | -0.195    | -0.518*  | 0.439     | -0.114   | 0.151     | -0.086   | 0.323     | 0.330    | -0.207    | -0.341   |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N  | -0.296    | 0.034    | -0.215    | 0.125    | -0.619**  | -0.526*  | -0.750**  | -0.776** | -0.820**  | -0.831** |
| pH                               | 0.103     | 0.074    | -0.186    | 0.001    | 0.319     | 0.230    | 0.730**   | 0.449    | 0.563*    | 0.417    |
| Suspended solid                  | -0.060    | -0.437   | -0.034    | 0.093    | -0.318    | -0.328   | -0.597*   | -0.255   | -0.222    | -0.346   |
| NH <sub>3</sub> -N               | 0.006     | -0.199   | 0.100     | 0.160    | -0.222    | -0.445   | 0.164     | 0.232    | -0.102    | -0.310   |
| T-N                              | -0.011    | -0.040   | -0.179    | -0.041   | -0.271    | -0.407   | -0.448    | -0.094   | -0.233    | -0.515*  |
| PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P | -0.369    | -0.739** | -0.561*   | -0.557*  | -0.572*   | -0.497*  | -0.785**  | -0.647** | -0.554*   | -0.693** |
| T-P                              | -0.323    | -0.625** | -0.441    | 0.035    | -0.475    | -0.369   | -0.360    | -0.164   | -0.387    | -0.360   |
| HPC                              | -0.066    | -0.544*  | -0.220    | -0.282   | -0.387    | -0.365   | -0.445    | -0.360   | -0.232    | -0.534*  |

Significant values are shown in grey areas; \* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$

조류 발생이 시각적으로 미관을 해치고 수질개선 사업에 대한 불신을 야기한다는 등의 이유로 태화강에 상업용 미생물제 투여를 실시하고 있다. 구삼호교 기점의 태화강 하류 11.3 km는 국가 하천으로 관리되고 있는데(Ulsan Metropolitan City, 2010), 이런 규모의 자연 하천에서 수질 정화를 위해 강물에 직접 미생물제를 투여하는 예는 찾아보기 어렵다. 일반적으로 오염지역에서 오염물질의 분해를 위한 미생물 투여 기술(bioaugmentation)은 오염물질의 신속한 분해가 필요할 경우 적용된다(Alexander, 1999). 만일 미생물제를 적용할 경우 조류 발생이 관찰되는 겨울철에 집중하여 처리하여야 한다는 점에서 수온에 의한 미생물의 활성 감소를 고려하여야 한다. 따라서 투여하는 미생물은 이상적으로는 태화강에서 자연적으로 분포하는 저온성의 미생물이어야 하며, 높은 성장 속도와 영양염류 획득으로 식물플랑크톤과 경쟁할 수 있는 것이어야 한다. 태화강의 조류 발생은 지점별 및 계절별로 발생 양상에 차이가 있으며 구체적으로 문제가 되는 시점과 지점을 택해 처방을 마련해야 할 필요가 있다.

하천 생태계는 그 자체가 동적인 상태에 있다. 본 연구에서 태화강 하류의 주된 오염 부하는 본류에 합류하는 지천(무거천, 명정천)과 배수장에 의한 것임을 시사한다. 태화강 본류로 각종 오염물질이 유입되는 점오염원을 확인하고 오염부하를 경감하도록 관리하는 것이 부영양화와 조류 발생에 대한 이상적이고 궁극적인 방안이라 할 수 있다.

## 적요

본 연구에서는 태화강 하류에서 조수 및 조사 지점에 따른 태화강 수질 특성을 알아보고, 겨울 조류 발생에 영향을 주는 환경요인을 분석하고자 하였다. 2010년 5월에서 2011년 1월까지 태

화강 하류의 신삼호교, 구삼호교, 명정천, 태화교, 명촌교 등 5개 지점에서, 사리의 만조와 간조에 시료를 채취하였다. 염분도, 용존산소(DO), 생물학적 산소 요구량(BOD), 화학적 산소 요구량(COD), 엽록소 *a*(Chl *a*), 여러 영양염류 등의 환경변수를 측정하였다. 염분도는 하류 방향으로 갈수록 증가하였으며, Chl *a*의 지점별 평균값은 만조 10-26 mg/m<sup>3</sup>, 간조 11-53 mg/m<sup>3</sup>였다. 특히 태화교의 경우 11월 21일-12월 22일에 Chl *a* 농도가 138-296 mg/m<sup>3</sup>로 급격히 증가하였으며, *Cryptophyceae*의 *Rhodomonas lacustris*가 우점하는 식물플랑크톤이었다. 태화교에서 Chl *a* 농도는 염분도, BOD, DO, COD, pH, T-N와 양의 상관관계, 수온, 기온, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N과는 음의 상관관계가 있었다. 반면 명촌교의 경우 Chl *a* 농도는 8월 25일에 55 mg/m<sup>3</sup>로 최고값을 보였으며, Chl *a* 농도는 NH<sub>3</sub>-N, T-N, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P, T-P, 일반세균과 양의 상관관계를 나타내었다. 연구의 결과는 태화강 하류에서 조사 지점에 따른 수질의 변동폭이 매우 크며, 조류 발생의 양상도 태화교와 명촌교 사이에 차이가 있음을 보여준다.

## 감사의 말

본 연구는 2010년 울산지역환경기술개발센터의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

## 참고문헌

- Alexander, M. 1999. Biodegradation and bioremediation, 2nd ed. Academic Press, San Diego, California, USA.  
 American Public Health Association. 1998. Standard methods for the examination of water and wastewater, 20th ed. American Public

- Health Association, Washington, D.C., USA.
- Atlas, R.M. and Parks, L.C.** 1996. Handbook of microbiological media. CRC press, Boca Raton, Florida, USA.
- Cerino, F. and Zingone, A.** 2006. A survey of cryptomonad diversity and seasonality at a coastal Mediterranean site. *Eur. J. Phycol.* **41**, 363–378.
- Javomický, P.** 2003. Taxonomic notes on some freshwater planktonic Cryptophyceae based on light microscopy. *Hydrobiologia* **502**, 271–283.
- Kim, J.** 2009. The effects of the project investment for water quality improvement in the River Taehwa. *Korea Spatial Planning Rev.* **62**, 263–279.
- Kim, J.-H., Boo, S.M., and Shin, W.** 2007. Two freshwater cryptomonads new to Korea: *Cryptomonas marssonii* and *C. pyrenoidifera*. *Algae* **22**, 147–152.
- Kim, D.K., Choi, A.R., Lee, H.K., Kwon, O.S., and Kim, J.** 2004. Community dynamics of phytoplankton and bacteria as affected by physicochemical environmental factors in Hoeya Dam Reservoir. *Korean J. Limnol.* **37**, 26–35.
- Korea Meteorological Administration.** 2010. Annual climatological report 2010. Korea meteorological administration, Seoul, Korea.
- Korea Meteorological Administration.** 2011. Annual climatological report 2011. Korea meteorological administration, Seoul, Korea.
- Ministry of Environment.** 2010. Official test methods of water quality, Ministry of environment revision notification 2010-48. Ministry of environment, Seoul, Korea.
- Novarino, G.** 2003. A companion to the identification of cryptomonad flagellates Cryptophyceae (=Cryptomonadea). *Hydrobiologia* **502**, 225–270.
- Sellner, K.G., Lacouture, R.V., Cibik, S.J., Brindley, A., and Brownlee, S.G.** 1991. Importance of a winter dinoflagellate-microflagellate bloom in the Patuxent River estuary. *Estuarine Coastal Shelf Sci.* **32**, 27–42.
- Shin, M.K.** 2007. Final report: research on algal bloom in the Taehwa River. Ulsan regional environmental technology development center, Ulsan, Korea.
- Tranvik, L.J., Porter, K.G., and Sieburth, J.M.** 1989. Occurrence of bacterivory in *Cryptomonas*, a common freshwater phytoplankter. *Oecologia* **78**, 473–476.
- Ulsan Metropolitan City.** 2009. An environment white paper 2009. Ulsan Metropolitan City, Ulsan, Korea.
- Ulsan Metropolitan City.** 2010. An environment white paper 2010. Ulsan Metropolitan City, Ulsan, Korea.