

인공하천에서 유량감소로 모사한 가뭄효과가 수질 및 부착돌말류 군집에 미치는 영향

박혜진 · 김백호 · 공동수¹ · 황순진*

(건국대학교 환경과학과, ¹경기대학교 생명과학과)

The Effect of Drought Simulated by Discharge Control on Water Quality and Benthic Diatom Community in the Indoor Experimental Channel. Park, Hye-Jin, Baik-Ho Kim, Dongsoo Kong¹ and Soon-Jin Hwang* (Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea; ¹Department of Biological Science, Kyonggi University, Suwon 443-760, Korea)

We investigated an ecological impact of drought simulated by discharge depletion on the water quality and benthic diatom community in the indoor experimental channel. As artificial substrates slide-glass was installed in acrylic channel for 16 days. Channels were supplied continuously with eutrophic lake water with a discharge rate of 6 L min⁻¹ in duplication during the colonized period. And then during the discharge depletion period, three discharge rates were provided: NDF (No depletion of flow rate (Control): 6 L min⁻¹), LDF (Low depletion of flow rate: 3 L min⁻¹) and HDF (High depletion of flow rate: 1 L min⁻¹). Environmental factors in the water, such as suspended solid, Chl-*a* and nutrients concentration, were measured with periphytic algae including AFDM (ash free dry matter), Chl-*a* concentration and cell density at 1-day intervals. Light intensity increased significantly with discharge depletion (F=229.5, p=0.000). NH₄-N concentration was highest at HDF. Suspended solid in outflowing water decreased at HDF (88%), LDF (97%) and NDF (99%), compared to inflowing water (100%). Chl-*a* in substrates increased more than two times at LDF and HDF than NDF (F=8.399, p=0.001). Also AFDM and benthic diatom density increased significantly at LDF and HDF than NDF (F=9.390, p=0.001; F=6.088, p=0.007). In all experimental groups, *Aulacoseira ambigua*, *Achnanthes minutissima* and *Aulacoseira granulate* were dominant species accounting for greater than 10% of benthic diatom density. The most dominant species, *A. ambigua* was highest at LDF, followed by HDF and NDF (F=8.551, p=0.001). In conclusion, the effect of drought simulated by discharge depletion in an artificial stream ecosystem caused significant changes on water quality and benthic diatom biomass. This result provides a useful data to understand the effect of draught on stream ecosystem in situ.

Key words : ecological impact, drought, discharge depletion, water quality, benthic diatom, artificial channel

* Corresponding author: Tel: 02) 450-3748, Fax: 02) 456-5062, E-mail: sjhwang@konkuk.ac.kr

서 론

하천생태계의 구조와 특성은 대개 물리-화학적 교란과 생물(개체 또는 군집)간의 상호작용에 의하여 결정된다(Sousa, 1980; Petraitis *et al.*, 1989). 특히 기후와 지질 그리고 토지이용을 포함하는 유역환경 인자들은 하천생태계에 영향을 미치는 최상위 인자들로써, 생물들에게 직접적으로 영향을 미치는 영양염, 온도, 독성물질, 이온, 흐름 및 서식처 등까지도 제한할 수 있다(Stevenson, 1997).

최근 환경문제의 중심이 되고 있는 기후변화는 지구의 평균 기온이 상승함에 따라 극지방 빙하의 후퇴와 지표면 증발량 증가를 유도하여 지구전체의 물순환과 물수지에 뚜렷한 변화를 유도하게 한다(National Institute of Meteorological Research, 2009). 이러한 현상은 극지역 집중호우와 심한 가뭄을 발생시켜 궁극적으로 유역의 토양침식이나 하천의 건천화를 가속화할 것으로 예상된다.

가뭄에 의한 하천의 건천화는 종종 지역성을 보이며 그 진행 속도는 비교적 느린 편이지만 다른 재해에 비해 하천에 미치는 생태학적 영향은 매우 심각하기 때문에(National Research Council, 1999), 문순성 집중호우와 함께 기후변화 연구에 있어 반드시 중요하게 취급되어야 할 요인중의 하나이다(Lytle and Poff, 2004; Gibson *et al.*, 2005; Dewson *et al.*, 2007). 특히 불규칙한 하천 유량의 감소는 생태계 내 1차 생산자(부착조류)와 소비자의 서식환경을 변화시켜 궁극적으로 하천생태계의 부정적 변화를 유도한다(Ledger *et al.*, 2008).

하천생물들은 다양한 인자들에 의한 교란을 받지만, 그 중에서 최하위 영양단계를 점하고 있는 부착성 조류는 교란의 크기나 정도가 작더라도 군집의 구조와 현존량의 변화가 심하게 변화하는 특성을 가지고 있다(Sabater *et al.*, 1998; Biggs, 2000; Hillebrand and Sommer, 2000; Villeneuve *et al.*, 2010). 특히, 부착돌말은 가뭄에 의한 환경변화(수온, 유량, 유속, 영양염 등)에 의하여 생물량의 변동이 심하지만 동일한 교란에 대하여 수서곤충이나 어류보다 군집의 회복속도는 상대적으로 빠르다(Allan, 1995). 뿐만 아니라 서식분포가 다양하여 오래 전부터 하천의 환경변화에 따른 수질 및 군집 변화를 평가 또는 예측하는데 이용하여 왔다(Minshall and Peterson, 1985; Hellawell, 1986).

하천생태계의 부착돌말에 관한 연구는 주로 분류 및 생리생태학적 측면(Peterson *et al.*, 1994; Biggs and Thomsen, 1995; Peterson, 1996; Biggs *et al.*, 1998; Death and Zimmermann, 2005) 대하여 집중되어 왔다. 반면 가뭄이나 유량 감소가 부착조류 군집에 미치는 영향에 관한 연

구는 매우 빈약한 실정이며(Ledger and Hildrew, 2001), 특히 국내에서는 갈수기 수질 및 식물플랑크톤(수중 Chl-*a*)의 변화에 대한 단편적 보고가 있을 뿐이다(Lee *et al.*, 2007; Joh and Kim, 2008; Kim *et al.*, 2009).

본 연구는 자연하천에서 유량감소가 수질 및 부착돌말 군집에 미치는 영향을 이해하고자 실험실에 설치한 인공수로에서 유량감소에 따른 부착돌말 군집의 천이를 추적하였다.

재료 및 방법

1. 인공수로 제작

실험에 사용한 수로는 투명 아크릴로 제작한 상부가 열려있는 직육면체 (10×300×20 cm)로서, 실험수 유입부와 배출부에는 동일한 크기 (10×10×20 cm)의 공간을 두어 환경요인을 측정하였다. 수로는 지면과 경사각을 약 0.3도로 하여 수로 내의 실험수의 흐름이 원활하도록 유도하였다. 수로는 대조군(NDF; No depletion of flow rate), 낮은 강도의 유량감소 처리군(LDF; Low depletion of flow rate), 높은 강도의 유량감소 처리군(HDF; High depletion of flow rate)으로 구분하고 각각 2개조씩(2반복) 총 6개를 설치하였다(Fig. 1).

실험수는 부영양 저수지의 수심 50 cm에 소형펌프를 설치하고 호스를 연결하여 실험실의 저류조(2000 L)로 유입하였다. 저류조의 하단부와 실험수로의 유입부 사이에 밸브를 설치하여 유량을 조절하였으며, 수로를 통과한 물

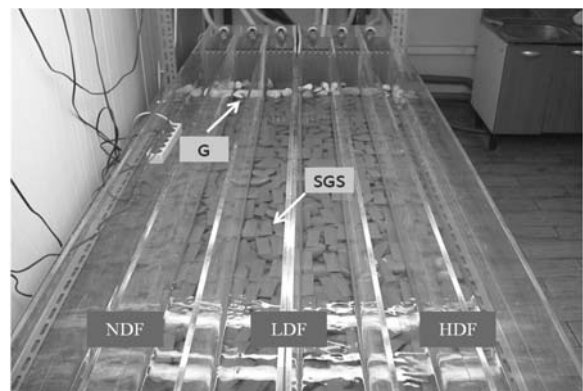


Fig. 1. Schematic over-view of indoor artificial channels used in the study. NDF; No depletion of flow rate over the experiment (6 L min^{-1}), LDF; Low depletion of flow rate during the treatment (3 L min^{-1}), HDF; High depletion of flow rate during the treatment (1 L min^{-1}). G: Gravels. SGS: slide-glasses as a substrate.

은 배출시켜 다시 이용하지 않았다

유입수가 통과할 때 수류에 의한 교란을 줄이기 위하여 수로의 유입부에 15 cm 길이에 작은 자갈(직경 < 10 cm)을 깔았으며, 그 위에 부착조류의 기질로서 slide glass (7.6 × 2.6 cm)를 깔았다. 유입수의 낙차로 인한 교란을 최소화 하기 위해 물이 낙하하는 지점에서 10 cm 떨어진 지점부터 기질을 설치하였다. 수로 전체에 빛을 고르게 공급하기 위해 수로 1 m 위에 형광등을 설치하여 광도 2560 lux, 광주기 24L:0D를 제공하였다.

2. 실험디자인

유량감소(가뭄효과)가 부착돌말 군집과 수질에 미치는 영향을 조사하기 위하여 총 16일 동안 부착돌말류 군체 형성기(8일)와 가뭄처리기(8일)로 구분하여 실시하였다. 모든 실험군에서 수심은 5 cm로 하였으며, 군체형성기 동안의 유량은 동일하게 6 L min⁻¹, 가뭄처리기 동안 각 실험군의 유량은 NDF 6 L min⁻¹, LDF 3 L min⁻¹, 그리고 HDF 1 L min⁻¹으로 각각 설정하였다. 가뭄의 영향을 비교하기 위하여 각 실험군의 유입수와 배출수 내의 환경요인(수온, 전기전도도, 용존산소, pH, 탁도, 부유물질), 엽록소 *a* (Chl-*a*)와 영양염(질소, 인), 부착기질의 Chl-*a*, AFDM (ash-free dry-matter), 부착돌말류 분류군과 세포 밀도를 각각 분석하였다.

3. 환경요인 분석

실험기간 동안 수온, 용존산소(DO), pH, 전기전도도 및 탁도는 수로의 유입부와 배출부에 만들어진 공간에서 다항목 수질 측정기(YSI 600QS-O-M, YSI inc., USA)를 이용하여 매일 일정한 시간(16:00 PM)에 측정하였다.

광도는 수로 끝(배출부)에 HOBO Pendant Temperature/Light Data Logger(UA-002-08)을 설치하여 실험 시작부터 30분 간격으로 측정하였으며, 센서가 있는 부분에 침강된 유기물을 매일 같은 시간에 닦아 주었다. HOBO의 측정범위는 0~32,000 lux(900 mm에서 최고치)이다.

수중의 부유물질(SS)과 영양염(NO₂-N, NO₃-N, NH₄-N, TN, PO₄-P, TP) 농도는 수로를 통과한 실험수를 채수하여 분석하였다. SS는 24시간 동안 105°C의 dry oven(OF-11, JEIO Tech Inc. Korea)에서 건조시킨 GF/C-filter의 초기 무게(S1)와 실험수를 여과하고 동일하게 24시간 동안 105°C dry oven에서 건조시킨 후 측정된 무게(S2)의 차이(S2-S1)로 계산하였다(APHA, 2001).

영양염 농도를 측정하기 위해 NO₂-N은 phenate법, NH₄-N은 colorimetric법, NO₃-N과 TN(Total Nitrogen)

은 cadmium reduction법을 따랐으며, PO₄-P는 ascorbic acid법, TP(Total phosphorus)는 persulfate로 분해한 후 ascorbic acid으로 각각 분석하였다(APHA, 2001).

4. 부착돌말류 분석

부착조류는 기질을 무작위로 3개씩 수거하여 일정 면적의 표면을 솔로 긁어 채집하였다. 채집된 시료의 일부는 부착조류의 엽록소 *a* (Chl-*a*)와 AFDM(Ash free dry matter)을 측정하는데 사용하였으며, 일부는 formalin 용액으로 고정하여 부착 돌말류를 분석하는데 사용하였다.

부착조류의 Chl-*a*는 시료를 Whatman GF/F(Whatman International Ltd Maidstone, England)로 여과하여 24시간 동안 4°C 암상태에서 90% Aceton 10 mL로 추출한 후 1647 rpm에서 20분간 원심 분리하여(VS-5000N, Vision Scientific, Korea) 분광광도계(Optizen 2010 UZ, MECASYS Inc., Korea)를 이용하여 흡광도를 측정된 후 농도를 계산하였다(APHA, 2001). AFDM은 시료를 24시간 동안 105°C dry oven(OF-11, JEIO Tech Inc. Korea)에서 건조시킨 GF/F-filter에 여과한 후 105°C dry oven에서 건조시킨 무게(A1)와 550°C 도가니에서 2시간 태운 GF/F-filter의 무게(A2)의 차이(A1-A2)로 계산하였다.

부착돌말류 시료는 질산(HNO₃)으로 세척하여 프레파라트를 만든 다음 광학현미경(Zeiss, Germany)을 이용하여 1000배 하에서 검경하고 동정하였으며, Simonsen(1979)의 분류체계에 따라 분류하였다(MOE/NIER, 2011). 부착돌말류는 300개 이상의 피각(frustule)을 계수하여 종별 밀도를 계산하였다. 부착돌말류의 동정은 Patrick and Reimer(1966), Krammer and Lange-Bertalot(1986, 1988, 1991a, b) 등을 참고하였다.

5. 자료분석

대조군과 가뭄 처리군의 수질 및 부착돌말류 군집의 차이에 대한 통계적 유의성을 검증하기 위하여 일원배치 분산분석(one-way ANOVA)을 실시하였으며 실험군 간의 차이는 Tukey's HSD test를 사용하여 사후 검정하였으며 유의 수준은 p < 0.05를 기준으로 하였다(SPSS Inc., v. 18.0.0).

결과 및 고찰

1. 환경요인의 변화

광도는 처리 유량에 따라 실험군 간에 유의한 차이(F=

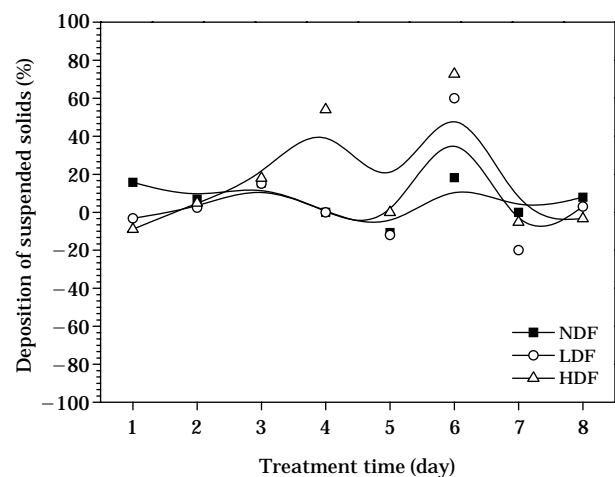
Table 1. The mean values of experimental parameters in each treatment and statistical comparison (Tukey's HSD test) among treatments. Small alphabetical characters indicate statistical significance.

Parameters	NDF	LDF	HDF	F	P
Water temperature (°C)	26.05±0.27	26.03±0.59	25.62±0.65	0.258	0.774
Light intensity (lx)	477.06±7.85a	653.23±11.62b	769.00±11.29c	229.57	0.000
Electric conductivity (µS cm ⁻¹)	260.23±2.64b	249.38±3.70ab	246.94±3.73a	5.183	0.011
Dissolved oxygen (mg L ⁻¹)	9.93±0.11	9.80±0.21	9.81±0.19	0.238	0.790
pH	9.03±0.03	9.07±0.02	9.03±0.01	0.543	0.586
Turbidity (NTU)	14.96±0.81	12.88±1.12	12.04±1.07	2.509	0.097
Chlorophyll- <i>a</i> in water (µg L ⁻¹)	27.53±3.52	32.92±3.55	31.42±4.81	0.537	0.590
Suspended solids in water (mg L ⁻¹)	14.79±1.68	15.97±3.68	14.00±3.38	0.112	0.895
NO ₂ -N (µg L ⁻¹)	20.35±2.24	15.04±1.05	15.46±1.23	2.492	0.102
NO ₃ -N (mg L ⁻¹)	1.12±0.08	0.80±0.12	1.16±0.14	3.147	0.059
NH ₄ -N (µg L ⁻¹)	23.42±1.96	21.74±3.07	30.68±3.51	2.664	0.088
Total nitrogen (mg L ⁻¹)	0.60±0.04	0.62±0.04	0.66±0.04	0.696	0.507
PO ₄ -P (µg L ⁻¹)	11.24±0.78	10.67±0.43	10.27±1.27	0.324	0.726
Total phosphorus (µg L ⁻¹)	55.88±4.12	54.28±6.37	41.97±5.77	1.976	0.159
Ash-free dry-weight in substrate (mg cm ⁻²)	1.76±0.18a	2.78±0.24b	2.65±0.12b	9.390	0.001
Chlorophyll- <i>a</i> in substrate (µg cm ⁻²)	2.76±0.60a	5.70±0.50b	5.45±0.55b	8.399	0.001
Total diatom abundance in substrate (10 ⁵ cells cm ⁻²)	2.7±0.3a	4.0±0.3b	3.5±0.3ab	6.088	0.007
<i>Aulacoseira ambigua</i> (10 ⁴ cells cm ⁻²)	10.6±0.9a	16.7±1.3b	14.8±1.4b	8.551	0.001
<i>Achnanthes minutissima</i> (10 ⁴ cells cm ⁻²)	5.2±0.5	6.5±0.6	6.0±0.3	1.736	0.195
<i>Aulacoseira granulata</i> (10 ⁴ cells cm ⁻²)	3.9±0.5	5.4±0.6	4.9±0.9	1.538	0.233
Dominant index	0.62±0.02	0.60±0.01	0.61±0.01	0.396	0.677
Diversity index	0.83±0.02	0.84±0.02	0.84±0.01	0.143	0.868
Taxa richness	3.80±0.12	3.62±0.17	3.84±0.09	0.666	0.522
Evenness index	0.62±0.01	0.63±0.01	0.62±0.01	0.355	0.704

229.5, $p=0.000$)가 나타났다. 가뭄 처리 강도가 가장 높은, 즉 유입 유량이 가장 적은 HDF에서 평균 769.00 lux로 가장 높은 광도를 보였으며, LDF (평균 653.23 lux), NDF (평균 477.06 lux) 순으로 낮아졌다 (Table 1).

전기전도도는 NDF에 비하여 HDF에서 유의하게 감소하였으나 ($F=5.183$, $p=0.011$) 처리군 간에 유의한 차이는 보이지 않았다. 또한 수온, 용존산소 (DO), pH, 탁도 역시 처리군 간에 유의한 차이를 보이지 않았다 (Table 1).

가뭄 처리시 수중의 Chl-*a*와 SS 농도는 모든 실험군들에서 유의한 변화를 나타내지 않았다 (Table 1). 하지만 가뭄 처리 기간 동안 각 수로에 유입된 실험수는 유사한 수준의 SS 농도를 나타냈지만 수로를 통과한 배출수 내의 SS 농도는 처리 유량에 따라 다른 양상을 띠었다. 수로를 통과한 후 SS의 침강율은 Fig. 2에 나타내었다. 실험기간 동안 처리 유량이 가장 적은 HDF에서 유입수의 SS 농도 (100%) 대비 배출수의 SS 농도는 평균 88%로 감소하였으며 LDF (97%)와 NDF (99%)에 비하여 높은 감소율을 보였다. Lee *et al.* (2007)에 의하면 봄철 충주호에서 유입수량이 감소하고 체류시간이 길어짐에 따라 유입된 부유물질의 상당부분이 침강되어 방류수의 부유물질 농도가 감소하였다. 본 연구에서도 배출수의 SS 농도가 고강도 처

**Fig. 2.** Percent deposition of suspended solids in each treatment.

리군 (HDF)에서 감소하였는데 (Table 1), 이러한 효과는 (1) 가뭄 (유량감소)에 의한 유량감소가 체류시간을 증가시켜 수중 내 부유물질의 침강을 활발하게 유도하고, (2) 수중 내 부유물질 감소가 수중 광도를 증가시키며, (3) 최종적으로 바닥기질에 분포하는 부착돌말류 군집에 충분한

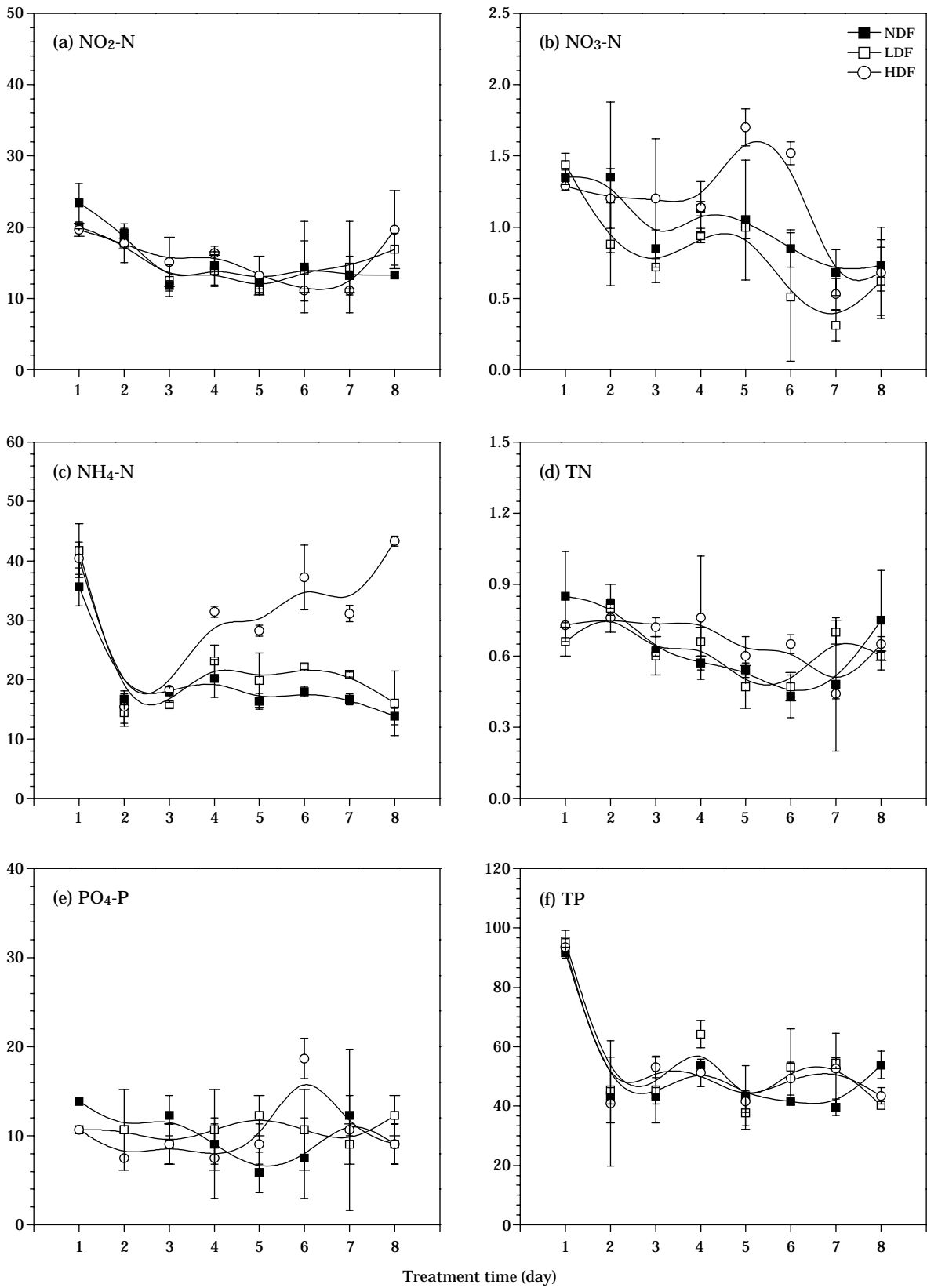


Fig. 3. Changes of nutrients concentration in the experimental waters of each treatment.

빛을 공급함으로써 돌말류의 성장을 촉진한 것으로 판단된다.

실험기간 동안 가뭍처리에 따라 수중 내 인보다 질소계 열 영양염에서 변화를 나타냈다(Fig. 3). 특히 $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 모든 실험군에서 시간이 지남에 따라 점차 증가하는 패턴을 보였으나 증가량은 고강도 유량감소군(HDF)에서 크게 나타났으며, NDF와 LDF보다 상대적으로 높은 농도를 보였다(Fig. 3b). $\text{NH}_4\text{-N}$ 은 처리 3일째까지 모든 실험군에서 비슷한 수준을 보였으나 그 이후부터 실험군 간의 차이를 나타냈다. 특히 유량이 NDF보다 유량을 1/6배 낮은 HDF에서 현저하게 높은 농도를 보였으며, 1/2배로 감소시킨 LDF에서는 NDF보다 약간 높은 농도를 나타냈다(Fig. 3c). 일반적으로 수중 유기물의 퇴적이 심화될수록 퇴적층 깊이가 증가되어 혐기화가 빨라지는데(Jensen *et al.*, 1990), 짧은 시간에도 질산화 및 탈질화가 일어나기 때문에 특히 수중 $\text{NO}_3\text{-N}$ 와 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 질소계열 농도가 증가한다(Yoon *et al.*, 2007). 본 연구에서는 짧은 기간 동안 처리한 가뭍영향에 의하여 뚜렷한 퇴적층 발달이나 질소계열 영양염 용출현상은 낮았을 것으로 판단되지만(Table 1), 만일 장기간 진행되었다면 $\text{NO}_3\text{-N}$ 와 $\text{NH}_4\text{-N}$ 농도 증가현상이 보다 뚜렷하게 나타났을 것으로 예상된다.

선행연구에서 Joh and Kim (2008)은 하천의 유량이 감소하는 갈수기에 하류의 영양염, 특히 $\text{NH}_4\text{-N}$ 와 $\text{PO}_4\text{-P}$ 가 급격히 감소한다고 보고하였다. 대개 몬순성 또는 일반 강우시 자연적 혹은 인위적 원인으로 인하여 질소계열 영양염(질산염)이 증가한 반면(Showers *et al.*, 1990), 가뭄이 발생하면 외부기원 영양염의 유입이 급격하게 줄어들어 하천 내 질산염 농도가 점차 감소한다고 하였다(Dahm *et al.*, 2003) 그러나 본 연구는 실험용 수로에서 진행되었기 때문에 외부로부터 높은 유량에 따른 영양염의 차별적 유입은 배제되었기 때문에 현장에서 수행된 선행연구와는 상이한 결과를 나타낸 것으로 판단된다.

2. 부착돌말류의 변화

기질의 Chl-*a*과 AFDM은 대조군(NDF)과 처리군(LDF, HDF) 간에 높은 유의성을 보였다(Table 1, Fig. 4). 기질의 Chl-*a*는 실험기간 동안 LDF에서 평균 $5.70 \mu\text{g cm}^{-2}$, HDF에서 평균 $5.45 \mu\text{g cm}^{-2}$ 로 NDF(평균 $2.76 \mu\text{g cm}^{-2}$)에 비하여 약 2배 이상 유의하게 증가하였다($F=8.399$, $p=0.001$). 기질의 AFDM 또한 Chl-*a*와 마찬가지로 NDF(평균 1.76 mg cm^{-2})에 비하여 두 처리군(LDF= 2.78 mg cm^{-2} , HDF= 2.65 mg cm^{-2})에서 유의하게 증가하였다($F=9.390$, $p=0.001$). 이는 선행연구들과 일치하는 결과로 부

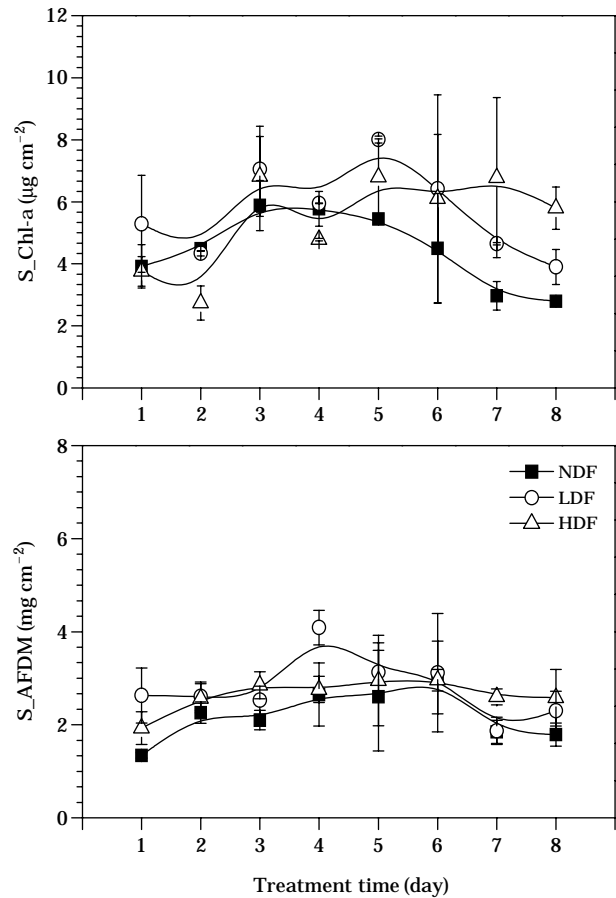


Fig. 4. Changes of chlorophyll-*a* (S_Chla) and ash-free dry-matter (S_AFDM) in the slide-glass substrate in each treatment.

착조류의 축적은 주로 이입과 생식으로 기인하는데 유체의 흐름이 느릴 때 부착조류가 기질에 축적되는 정도가 커지기 때문에 부착조류의 Chl-*a*의 농도가 증가한다(Ghosh and Gaur, 1998; Besemer *et al.*, 2007, Villeneuve *et al.*, 2010).

유량이 감소하였을 때, 기질의 부착돌말류 총 밀도는 두 처리군 모두에서 유의하게 증가하였으며($F=6.088$, $p=0.007$), LDF(평균 $4.0 \times 10^5 \text{ cells cm}^{-2}$)에서 가장 높게 나타났다(Table 1, Fig. 5a). 실험기간 동안 모든 실험군에서 우점한 부착돌말류는(각 조사별 총 밀도의 10% 이상을 보이는 분류군) 총 3종 - *Aulacoseira ambigua*, *Achnanthes minutissima*, *Aulacoseira granulata*로 밝혀졌다. 이중 가장 높은 밀도를 보인 종은 *Aulacoseira ambigua*로 가뭄처리에 상관없이 모든 실험군에서 40% 이상의 높은 우점율을 나타냈으며, 3종의 우점종 밀도의 합은 전체의 70% 이상으로 매우 높게 나타났다. 제1 우점종인 *A. ambigua*

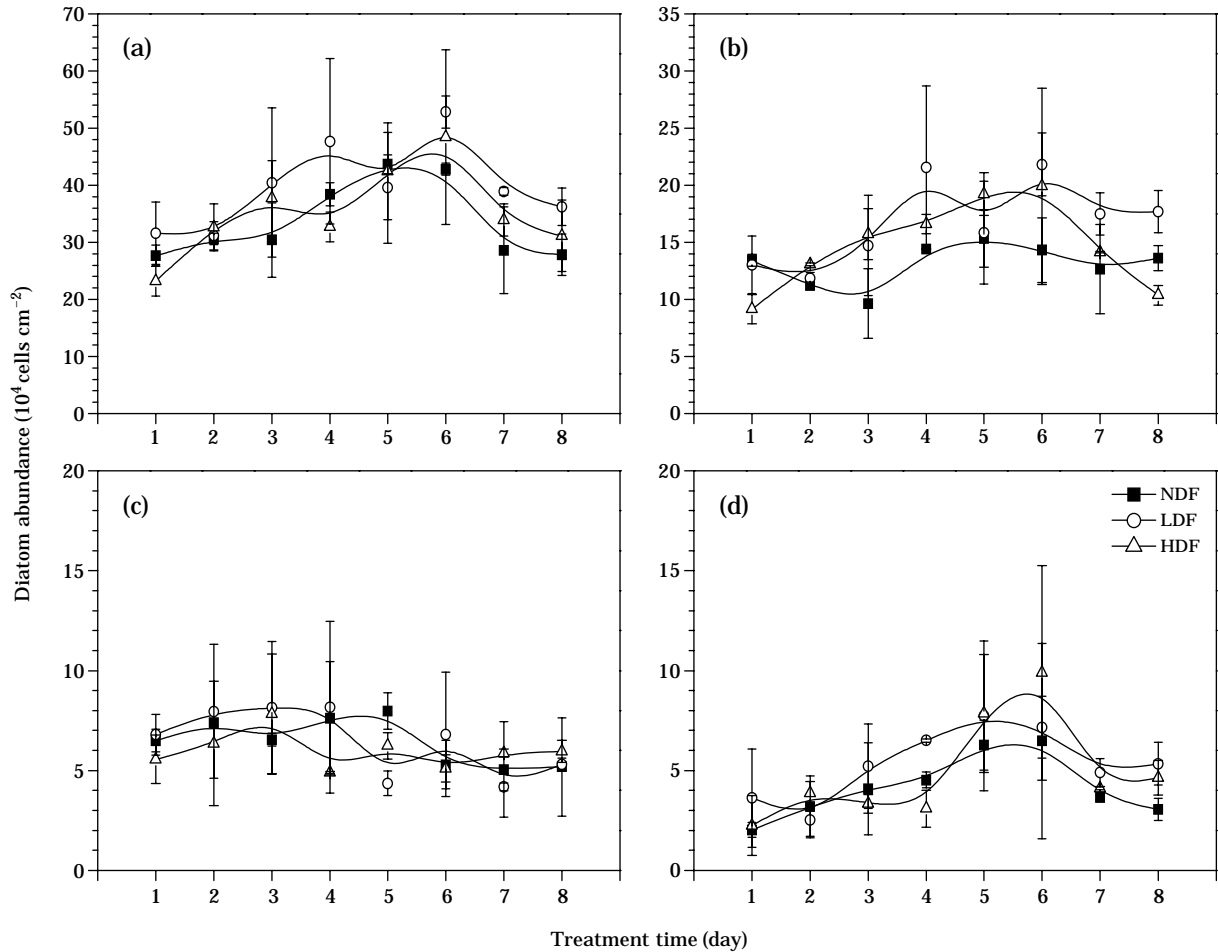


Fig. 5. Changes of total cell abundance of benthic diatoms (a), *Aulacoseira ambigua* (b), *Achnanthes minutissima* (c), and *Aulacoseira granulata* (d) in the substrate in each treatment.

는 부착돌말류의 총 밀도와 유사한 패턴으로 변화하였으며 실험군 간의 유의한 차이를 보였다 (Table 1, Fig. 5b). 가뭄처리 전에는 3개의 실험군에서 비슷한 수준이었으나 처리기간 동안에는 LDF에서 평균 1.7×10^5 cells cm^{-2} 으로 높은 생물량을 보였으며, HDF (평균 1.5×10^5 cells cm^{-2})와 NDF (평균 1.1×10^5 cells cm^{-2}) 순으로 생물량이 낮았다 ($F=8.551$, $p=0.001$). 제2 우점종인 *A. minutissima*는 실험군 간에 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았으며, 처리기간 동안 실험군과 시간 변화에 따라 비슷한 수준의 세포밀도를 보였다 (Table 1, Fig. 5c). 제3 우점종인 *A. granulata*는 모든 실험군에서 처리 시작일부터 5 일째까지 세포밀도가 증가하였으며 부착돌말류의 총 밀도와 제1 우점종의 밀도와 마찬가지로 실험기간 동안 2 개의 처리군 모두 NDF보다 높게 나타났다 (Fig. 5d). 하지만 처리군 사이에 유의한 차이를 나타내지는 않았다

(Table 1). 처리군 별로 종의 세포밀도 변화를 살펴보면, LDF에서는 가뭄 처리기간에 NDF에 비하여 제1 우점종인 *A. ambigua*가 높은 증가율을 보였으며 제3 우점종인 *A. granulata*가 증가하는 경향을 나타냈다. HDF에서는 LDF와 같은 결과를 나타내었다. 이 두 종은 실험기간 동안 증감의 변화 경향이 유사하였다. 부착돌말류 군집, 즉 우점도지수 (DI), 다양도지수 (H'), 풍부도지수 (R), 균등도지수 (E)의 변화에 있어서는 실험군 간의 유의한 차이가 나타나지 않았다 (Table 1). 이러한 결과는 가뭄에 따른 유량 감소의 효과가 부착돌말류의 종조성 변화보다는 생물량 변화에 더 큰 영향을 미치는 것을 시사한다.

현장에서 발생하는 가뭄의 효과를 연구한 선행연구에서는 영양염 이용성의 감소와 무척추동물에 의한 포식 증가로 부착조류의 세포밀도가 감소되고, 살아있는 규조류 비율이 감소함을 보고하였다 (Peterson *et al.*, 2001). 하지

만 본 연구는 작은 인공수로 시스템에서 수행되었고 고강도의 유량감소 처리군이라도 최소 1 L min^{-1} 의 유량으로 부영양 실험수가 지속적으로 유입되었기 때문에 영양염의 가용성 감소로 성장이 억제되는 현상이 일어나지 않았을 것으로 판단된다. 한편으로, 본 연구에서는 부영양 저수지의 표층수를 실험수로 사용하였기 때문에 부유성 돌말류의 영향을 배제할 수 없으며 (Kim *et al.*, 2011) 유량의 감소에 의해 체류시간이 길어짐에 따라 부유성 돌말의 침강과 간섭이 증가하였을 것으로 사료된다. 돌말류 우점종의 변화에서도 나타났듯이 (Fig. 5), 부착성이 강한 *A. minutissima*보다 부유성이 강한 *A. ambigua*와 *A. granulata* 증가한 것은 가뭄처리에 따른 유량감소의 반응의 결과로 판단된다 (Hwang *et al.*, 2011).

본 연구는 하천에서 가뭄으로 인해 나타나는 갈수현상을 단기간의 유량 감소로 모사하여 이것이 수질 및 부착돌말류 군집에 미치는 생태학적 영향을 인공수로에서 비교 분석하였다. 가뭄은 갑자기 발생하는 홍수와 다르게 점진적으로 발생하는 특성을 지니기 때문에 가뭄의 기간은 가뭄의 강도를 결정짓는 중요한 요인이며 (Boulton, 2003; Lehner *et al.*, 2006), 이에 따라 하천생태계에 미치는 영향이 다르게 나타난다. 가뭄이 진행되면 유량이 감소되어 부착조류의 서식처가 줄어들고 (즉, 부착기질의 공기중 노출) 영양염과 빛의 가용성이 변화한다. 가뭄의 초기에는 얇은 수위에 의해 부착기질에 도달하는 빛의 양이 증가되어 기질의 부착조류 성장이 촉진되고 한편으로는 길어진 체류시간으로 인해 부유성 조류가 침강, 성장하여 기질의 유기물 총량이 증가된다. 하지만 가뭄이 점차 진행되면 영양염 고갈과 수질악화 등의 서식환경 악화로 생물체가 받는 스트레스가 가중되며 (Ylla *et al.*, 2010) 이는 곧 부착조류의 생물량 감소로 이어진다. 이에 비추어 볼 때, 본 연구에서의 유량감소 처리강도는 가뭄의 초기 형태를 모사한 것으로 판단할 수 있다. 하지만 본 연구의 가뭄 처리군 간의 비교 시, 낮은 강도의 유량감소군 (LDF) 보다 높은 강도의 유량감소군 (HDF)에서 부착조류의 Chl-*a*, AFDM, 세포밀도의 평균값이 약간 낮은 수준을 보였다. 그 원인을 명확하게 확인할 수는 없으나, 수질과 부착조류 생물군집에 미치는 보다 명확한 처리군 간의 효과를 도출하기에는 본 연구에서 조절한 유량감소의 범위가 충분치 않았을 수 있다고 판단된다. 그러나 전반적으로 대조군에 비하여 가뭄처리군에서 나타난 수질 및 부착조류 군집변화는 실제 하천에서 가뭄에 의한 생태계의 변화를 이해하는데 유용한 기초자료를 제공할 수 있다. 또한 가뭄이 발생한 후 유량이 다시 회복되었을 때, 하천생태계의 생지화학적 반응은 이전에 발생한 가뭄의 기간

과 강도에 따라 다르게 나타나기 때문에 (Vázquez *et al.*, 2007) 앞으로 이에 대한 연구도 기후변화에 대비하여 하천생태계를 관리하는 방안을 모색하는데 필요하다고 판단되었다.

적 요

본 연구는 하천에서 가뭄으로 인해 나타나는 갈수현상을 단기간의 유량의 감소로 모사하여 수질 및 부착돌말류 군집에 미치는 생태학적 영향을 인공수로에서 분석하였다. 아크릴로 제작한 실내 인공수로에 부착돌말 인공기질로는 슬라이드글라스를 설치하고, 부영양 저수지의 표층수를 유입시켜 실험수로 이용하였다. 실험기간 중 부착돌말 군체형성기 동안 모든 실험군의 유량은 6 L min^{-1} , 이후 유량감소기 동안 각 실험군의 유량은 NDF (No depletion of flow rate (Control): 6 L min^{-1}), LDF (Low depletion of flow rate: 3 L min^{-1}), 그리고 HDF (High depletion of flow rate: 1 L min^{-1})로 설정하였다. 유량감소의 영향을 비교하기 위하여 16일간의 실험기간 동안 유입수와 배출수의 수온, 전기전도도, 용존산소, pH, 탁도, 부유물질, 영양염 및 Chl-*a* 농도를 분석하였으며, 또한 부착기질의 Chl-*a*와 AFDM (ash free dry matter), 그리고 부착돌말류의 조성과 세포밀도를 1일 간격으로 분석하였다. 광도는 처리 유량이 적어질수록 유의하게 증가했다 ($F=229.5$, $p=0.000$). $\text{NH}_4\text{-N}$ 는 NDF보다 HDF에서 현저하게 높은 농도를 유지하였다. 유입수의 SS 농도(100%) 대비 배출수의 SS 농도는 HDF에서 88%로 감소하였으며 LDF (97%)와 NDF (99%)에 비하여 높은 감소율을 보였다. 기질의 Chl-*a*는 NDF에 비하여 유량감소 처리군에서 약 2배 이상 유의하게 증가하였다 ($F=8.399$, $p=0.001$). 또한 기질의 AFDM과 부착돌말류 총밀도는 NDF에 비하여 두 처리군에서 유의하게 증가하였다 ($F=9.390$, $p=0.001$; $F=6.088$, $p=0.007$). 실험기간 동안 대조군과 처리군 모두에서 *Aulacoseira ambigua*, *Achnanthes minutissima*, *Aulacoseira granulata* 등 총 3종의 부착조류가 총 밀도의 10% 이상을 보인 우점종으로 나타났고, 제1 우점종인 *A. ambigua*는 LDF에서 가장 높은 밀도를 보였으며 HDF, NDF순으로 생물량이 낮았다 ($F=8.551$, $p=0.001$). 본 연구 결과, 인공 하천생태계에서 가뭄(갈수) 효과는 수질과 부착돌말류 현존량에 유의한 변화를 야기하였으며, 특히 부착돌말류 현존량이 유의하게 증가하였다. 이는 실제 하천에서 가뭄에 의한 생태계의 변화를 이해하는데 유용한 기초자료를 제공할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 2011년도 한강수계 환경기초조사사업 “기후 변화가 수생태계에 미치는 영향과 대응전략” (과제번호 1333-406-260)의 일환으로 수행되었다. 실험과 분석을 도와준 애크람군에게 감사드린다.

인 용 문 헌

- Allan, J.D. 1995. Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters. Chapman and Hall, Netherlands. pp. 388.
- APHA. 2001. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th ed. American Public Health Association. Washington, D. C. USA.
- Besemer, K., G. Singer, R. Limberger, A.K. Chlup, G. Hochedlinger, H. Iris, C. Baranyi and T.J. Battin. 2007. Biophysical controls on community succession in stream biofilms. *Applied and Environmental Microbiology* **73**: 4966-4974.
- Biggs, B.J.F. and H.A. Thomsen. 1995. Disturbance of stream periphyton by perturbations in shear stress: time to structural failure and differences in community resistance. *Journal of Phycology* **31**: 233-241.
- Biggs, B.J.F., R.J. Stevenson and R.L. Lowe. 1998. A habitat matrix conceptual model for stream periphyton. *Archiv für Hydrobiologie* **143**: 21-56.
- Biggs, B.J.F. 2000. New Zealand periphyton guidelines: detecting, monitoring and managing the enrichment of streams, vol A. Background and guidelines. Ministry for the Environment, Wellington. 151 pp.
- Boulton, A.J. 2003. Parallels and contrasts in the effects of drought on stream macroinvertebrate assemblages. *Freshwater Biology* **48**: 1173-1185.
- Dahm, C.N., M.A. Baker, D.I. Moore and J.R. Thibault. 2003. Coupled biogeochemical and hydrological responses of streams and rivers to drought. *Freshwater Biology* **48**: 1219-1231.
- Death, R.G. and E.M. Zimmermann. 2005. Interaction between disturbance and primary productivity in determining stream invertebrate diversity. *Oikos* **111**: 392-402.
- Dewson, Z.S., A.B.W. James and R.G. Death. 2007. Invertebrate responses to short-term water abstraction in small New Zealand streams. *Freshwater Biology* **52**: 357-369.
- Ghosh, M. and J.P. Gaur. 1998. Current velocity and the establishment of stream algal periphyton communities. *Aquatic Botany* **60**: 1-10.
- Gibson, C.A., J.L. Meryer, N.L. Poff, L.E. Hay and A. Geor-gakakos. 2005. Flow regime alterations under changing climate in two river basins: implications for freshwater ecosystems. *River Research and Applications* **21**: 849-864.
- Hellawell, J.M. 1986. Biological indicators of freshwater pollution and Environmental management. Elsevier applied science publishers, London. pp. 546.
- Hillebrand, H. and U. Sommer. 2000. Diversity of benthic microalgae in response to colonization time and eutrophication. *Aquatic Botany* **67**: 221-236.
- Hwang, S.J., N.Y. Kim, S.A. Yoon, B.H. Kim, M.H. Park, K.A. You, H.Y. Lee, H.S. Kim, Y.J. Kim, J.H. Lee, O.M. Lee, J.K. Shin, E.J. Lee, S.L. Jeon and H.S. Joo. 2011. Distribution of benthic diatoms in Korean rivers and streams in relation to environmental variables. *Annales De Limnologie* **47**: 15-33.
- Jensen, M.H., E. Lomstein and J. Sørensen. 1990. Benthic NH₄⁺ and NO₃⁻ flux following sedimentation of a spring phytoplankton bloom in Aarhus Bight, Denmark. *Marine Ecology Progress Series* **61**: 87-96.
- Joh, G.J. and S.J. Kim. 2008. Trend of the water quality and algal blooms during the dry season in the Nakdong river. Proceedings of Korean Water Congress. P-98.
- Kim, B.H., H.J. Park, H.N. Min, D.S. Kong and S.J. Hwang. 2011. Short-term effects of turbid water and flow rate on the benthic diatom community in an artificial channel. *Journal of Korean Society on Water Quality* **27**: 855-861.
- Kim, H.S., S.J. Hwang and J.M. Ko. 2003. Evaluation of water quality variation and sediment of a shallow artificial lake (lake ligam) in located the metropolitan area. *Korean Journal of Limnology* **36**: 161-171.
- Kim, S.M., H.R. Noh, S.H. Kim, S.H. Kim, H.K. Park and D.S. Kong. 2009. Characterization of water quality for the low water season in Paldang Lake. Proceedings of Korean Water Congress. P-79.
- Krammer, K. and H. Lange-Bertalot. 1986. Bacillariophyceae 1. Teil: Naviculaceae. *In: Süßwasserflora von Mitteleuropa, Band 2/1.* (Ettl, H., J. Gerloff, H. Heying and D. Mollenhauer, eds.). Gustav Fischer Verlag. Stuttgart.
- Krammer, K. and H. Lange-Bertalot. 1988. Bacillariophyceae 2. Teil: Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae. *In: Süßwasserflora von Mitteleuropa, Band 2/2.* (Ettl, H., J. Gerloff, H. Heying and D. Mollenhauer, eds.). Gustav Fischer Verlag. Stuttgart.
- Krammer, K. and H. Lange-Bertalot. 1991a. Bacillariophyceae 3. Teil: Cenrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae. *In: Süßwasserflora von Mitteleuropa, Band 2/3.* (Ettl, H., J. Gerloff, H. Heying and D. Mollenhauer, eds.). Gustav Fischer Verlag. Stuttgart.
- Krammer, K. and H. Lange-Bertalot. 1991b. Bacillariophy-

- ceae 4. Teil: Achnanthaceae Kritische Eragänzungen zu *Navicula* (Lineolatae) und Gomphonema. In: Süßwasserflora von Mitteleuropa, Band 2/4. (Ettl, H., J. Gerloff, H. Heying and D. Mollenhauer, eds.). Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
- Ledger, M.E. and A.G. Hildrew. 2001. Recolonization by the benthos of an acid stream following a drought. *Archiv für Hydrobiologie* **152**: 1-17.
- Ledger, M.E., R.M.L. Harris, P.D. Armitage and A.M. Milner. 2008. Disturbance frequency influences patch dynamics in stream benthic algal communities. *Oecologia* **155**: 809-819.
- Lee, H.J., D.S. Kong, S.H. Kim, K.S. Shin, J.H. Park, B.I. Kim, S.M. Kim, S.H. Jang and S.U. Cheon. 2007. Investigation on water quality variation characteristics during dry season in Namhan river drainage basin. *Journal of Korean Society on Water Quality* **23**: 889-896.
- Lehner, B., P. Döll, J. Alcamo, T. Henrichs and F. Kaspar. 2006. Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: a continental, integrated analysis. *Climatic Change* **75**: 273-299.
- Lytle, D.A. and N.L. Poff. 2004. Adaptation to natural flow regimes. *Trends in Ecology and Evolution* **19**: 94-100.
- Minshall, G.W. and R.C. Peterson. 1985. Towards a theory of macroinvertebrate community structure in stream ecosystems. *Archiv für Hydrobiologie* **104**: 49-76.
- MOE/NIER. 2011. Survey and Evaluation of Aquatic Ecosystem Health in Korea, The Ministry of Environment/National Institute of Environmental Research, Korea (in Korean).
- National Institute of Meteorological Research Korea meteorological administration. 2009. Understanding of climate change 2-climate change of the Korea Peninsula: the present and future.
- National Research Council. 1999. The impacts of natural disasters: a framework for loss estimation. National Academy Press, Washington, DC. 80 pp.
- Patrick, R. and C.W. Reimer. 1966. The diatoms of the United States, exclusive of Alaska and Hawaii. Vol. 1: Fragilariaceae, Eunotiaceae, Achnanthaceae, Naviculaceae. Academy of natural sciences of Philadelphia, Philadelphia.
- Peterson, C.G. 1996. Response of benthic algal communities to natural physical disturbance. In: Stevenson RJ, Bothwell ML, Lowe RL (eds) *Algal ecology: freshwater benthic ecosystems*. Academic Press, San Diego, pp. 375-402.
- Peterson, C.G., A.C. Weibel, N.B. Grimm and S.G. Fisher. 1994. Mechanisms of benthic algal recovery following spates: comparison of simulated and natural events. *Oecologia* **98**: 280-290.
- Perterson, C.G., H.M. Valett and C.N. Dahm. 2001. Shifts in habitat templates for lotic microalgae linked to inter-annual variation in snowmelt intensity. *Limnology and Oceanography* **46**: 858-870.
- Petraitis, P.S., R.E. Latham and R.A. Niesenbaum. 1989. The maintenance of species diversity by disturbance. *Quarterly Review of Biology* **64**: 393-418.
- Sabater, S., S.V. Gregory and J.R. Sedell. 1998. Community dynamics and metabolism of benthic algae colonizing wood and rock substrata in forest stream. *Journal of Phycology* **34**: 561-567.
- Schindler, D.W., F.A.J. Armstrong, S.K. Holmgren and G.J. Brunskill. 1971. Eutrophication of lake 227, experimental lakes area, northwestern Ontario, by addition of phosphate and nitrate. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* **28**: 1763-1782.
- Showers, W.J., D.M. Eisenstein, H.W. Paerl and J. Rudek. 1990. Stable isotope tracers of nitrogen sources to the Neuse River, North Carolina. Water Resources Research Institute Report. No. 253, Univ. of North Carolina, Raleigh.
- Sousa, W.P. 1980. The responses of a community to disturbance: the importance of successional age and species life histories. *Oecologia* **45**: 72-81.
- Stevenson, R. 1997. Scale-dependent causal frameworks and the consequences of benthic algal heterogeneity. *Journal of the North American Benthological Society* **16**: 248-262.
- Vázquez, E., A.M. Romani, F. Sabater and A. Butturini. 2007. Effects of the dry-wet hydrological shift on dissolved organic carbon dynamics and fate across stream-riparian interface in a Mediterranean catchment. *Ecosystems* **10**: 239-251.
- Villeneuve, A., B. Montuelle and A. Bouchez, 2010. Influence of slight differences in environmental conditions (light, hydrodynamics) on the structure and function of periphyton. *Aquatic Sciences* **72**: 33-44.
- Ylla, I., I. Sanpera-Calbet, E. Vázquez, A.M. Romani, I. Muñoz, A. Butturini and S. Sabater. 2010. Organic matter availability during pre- and post-drought periods in a Mediterranean stream. *Hydrobiologia* **657**: 217-232.
- Yoon, M.H., J.T. Hyun, N.S. Huh, S.H. Kwon and D.C. Cho. 2007. A study on release characteristics of lake sediments under oxic and anoxic conditions. *Journal of The Korean Society of Environmental Engineers* **29**: 1003-1012.

(Manuscript received 8 March 2012,
Revised 23 March 2012,
Revision accepted 24 March 2012)