

낙동강 하류 수계에서 저층수 및 저질퇴적층의 환경

정 하 영 · 조 경 제*

(인제대학교 환경시스템학부)

Environmental Conditions of Sediment and Bottom Waters near Sediment in the Downstream of the Nagdong River. *Jung, Ha-Young and Kyung-Je Cho** (School of Environmental Science and Engineering, Inje University, Gimhae 621-749, Korea)

We surveyed physico-chemical properties of bottom water and sediment to evaluate the influence of sediment on the eutrophication in the downstream of Nagdong River from 1998 to 2000. From May to August, DO concentration of bottom waters dropped below 5 mg O₂/l and NH₄⁺ and PO₄³⁻ concentrations significantly increased in the bottom waters, resulting in the great differences between surface and bottom waters. Fluxes across water-sediment interface would be substantially active in this period. The serial orders of the water fertility or eutrophication were Joman River > Sonagdong River > Nagdong River. The organic nutrient contents of sediment increased toward the lower parts of the river system. Organic contents of the sediment would be under the influence of water pollution and exhibited a negative correlation with sediment bulk-density or particle size. The concentrations of exchangeable inorganic nutrients of sediment were greater than those of pore waters, and PO₄³⁻, NH₄⁺ and SiO₂ increased along the sediment depth. PO₄³⁻ and NO₃⁻ concentrations of the pore water were less than the overlying waters, while NH₄⁺ and SiO₂ concentrations showed opposite trends. Exchangeable nutrients of sediment could be the repository for the nutrient exchange in the water-sediment interface.

Key words : sediment, pore water, exchangeable nutrient, Nagdong River

서 론

강우에 의하여 수계로 유입된 영양물질이나 각종 오염물질은 입자상태로 침강하며 용존물질이라 하더라도 입자에 흡착되어 상당량이 저층에 퇴적된다. 퇴적물은 하구 바깥으로 운반되는 경우도 있지만 저질에 축적된 영양물질은 분해되어 무기영양염의 상태로 수체로 다시 용출되어 내부 부하 (internal load)의 원인이 된다 (Forsberg, 1989). 수질의 부영양화 정도는 외부에서 발생하여 유입되는 오염물질 (allochthonous matter) 뿐 아니라 수체 내부에서 발생하는 자생 오염물질 (autochthonous

matter)의 부하량과 그 상호관련성 (coupling)에 영향을 받는다 (Kemp and Boyton, 1984). 하류는 각종 영양염이 풍부하기 때문에 식물플랑크톤 등 자생유기물 생산성이 높아 저질 퇴적층이 발달하고 내부부하의 기여도가 상대적으로 높다. 국내에서 하천이나 호수의 수질오염이 사회적 문제로 부각되고 있고 여러 가지 수질관리 방안이 강구되고 있으나, 저질퇴적층에 대한 평가는 소홀히 다루어져 왔다.

낙동강 하류는 삼각주 (delta) 환경사 평원 지형이고 낙동강, 서낙동강, 조만강과 그 샛강이 층적토 지형에서 그물처럼 연결된 독특한 곳으로 저질의 영향이 어느 곳보다도 크다 (Fig. 1). 낙동강 본류를 비롯한 하류 수계는

* Corresponding author: Tel: 055) 320-3216, Fax: 055) 334-7092, E-mail: kjcho@inje.ac.kr

하구호가 조성된 이후 수질 악화로 식수는 물론 농업용 수로도 적합지 못한 것으로 평가 받고 있다. 낙동강 하류지역에서 저질퇴적층에서 발생하는 오염부하량과 수질오염에 대한 저질의 기여도를 정량적으로 평가하기 앞서 저질퇴적층의 유기오염도 등 저질과 저층수의 환경과 오염물질의 분포를 조사하였다.

조사지 개황

낙동강 하류는 국내에서 유일한 삼각주 지형이며, 1987년 하구둑과 수문으로 하구호를 건설하여 완전 담수화 되었다. 하구둑에서 삼랑진까지 이르는 52 km 구간은 유속이 매우 느린 호수로서 상류에서 유입되는 오염물질로 인하여 수질오염이 심하고 조류가 대발생하는 구간이다.

하구둑에서 상류 17 km 지점에서 서낙동강이 본류와 갈라져 흐르며 김해시 해반천, 주촌면과 장유면 지역을 집수역으로 하는 조만강이 서낙동강으로 유입되고 있다 (Fig. 1). 서낙동강의 유역면적은 총 303 km² 유로 연장 19 km로서 상류부는 대동수문(1934년 건설), 하류부에는 녹산 배수문이 축조되어 호수 상태를 이룬다. 하상 경사는 1/24,000~1/30,000 정도의 완경사로서 고도가 없는 평야이고 강변에 수생식물이 풍부하고 흐름이 정체되어 수질오염이 심한 곳이다(조 등, 2001). 평상시에는 대동에서 녹산 하류로 정상적으로 흐르나 홍수 시에는 서낙동강과 낙동강 본류 수위가 높아지면서 일부 침수되고 배수능력이 없어진다. 서낙동강에는 역류를 방지하기 위하여 다수 배수갑문이 설치되었고 홍수 시에는 다량의 토사 또는 부유물질이 하상에 퇴적되고 있다.

서낙동강 하류에서는 부산시 강서구 주관으로 1997년 4월부터 2002년 5월까지 7년동안 녹산 수문부에서 서낙동강 대교까지(녹산수문~둔치도 장락나루~봉림동) 일부 구간에서 골재 채취를 목적으로 총 70만 루베의 하상모래를 준설하였다(부산시 강서구, 1996). 한편, 낙동강 하구호 하류에 토사 퇴적을 방지하기 위하여 하구둑에서 낙동대교(6 km 구간)까지 구간에서 매년 4월부터 10월까지 퇴적된 모래를 준설 제거하고 있다. 낙동강 본류와 서낙동강 하류에서 저질 준설은 수질 개선적인 차원에서 추진되기 보다는 홍수 또는 수위가 낮아지는 것을 방지하거나 건축 재료인 모래를 채취할 목적으로 추진되고 있다. 평상시 서낙동강과 조만강은 수심이 2~3 m로 얕고 하구 수문 건설로 호수화 된지 70여년 동안 저질 퇴적층이 깊게 발달하여 수질에 대한 저질의 영향

이 매우 큰 곳이다.

서낙동강 유역에는 도시 인구가 많고 농경지가 발달하여 생활하수 및 강우 유출에 의한 오염 부하가 매우 높은 곳이다(대우건설, 2002). 그러나 1999년 부터 김해시에서 발생하는 하수는 김해하수처리장(하루 10만톤 규모)으로 차집 처리되고 있으며, 장유하수처리장이 2005년 준공 예정으로 있어 하수 유입으로 인한 오염부하량은 크게 감소할 전망이다. 한편, 서낙동강 또는 조만강에서 농업용수를 양수하며 김해평야로 공급하고 조만강으로 배수되기 때문에 낙동강 하류 수계는 농업용수의 영향이 크다.

본 연구에서는 낙동강 본류, 서낙동강 및 조만강 수계에서 총 11개 지점에서 저질 시료를 채취하였다. 낙동강 본류 구간에서 삼랑진(SAM)에서부터 원동(WON), 물금(MUL), 구포교(GUP), 낙동대교(NAG), 하구둑(HAG) 6개 지점에서, 서낙동강에서는 김해교(GIM), 서낙동대교(SON) 2개 지점에서, 조만강 수계에서는 조만교(JOM), 마찰교(MAC), 해반천(HAE) 3개 지점에서 저질을 채취하였다(Fig. 1). 하천 바닥의 저질 상태를 보면 SAM~HAG 구간의 낙동강 본류는 사질(모래질)이었고, 서낙동강과 조만강은 미사와 점토가 많은 저질이었다. 특히 서낙동강의 상부인 김해교(GIM) 부근은 음식점이 밀집되어 있고 대수 양식장이 운영되고 있는 등 근접 오염원이 많아 채취시 저질은 검은 색깔을 띠었고 심한 악취가 났다.

재료 및 방법

하천의 저질을 대상으로 하면서 수질도 동시에 조사하였다. 1998년 1월부터 2000년 10월까지 월 1~3회 낙동강의 구포교(GUP), 서낙동강의 김해교(GIM), 조만강의 조만교(JOM) 세 지점에서 수표면과 저질에 가까운 저층의 수질을 모니터링 하였다. 표층과 저층에서 수평식 Van Dorn 채수기로 채수하여 수온과 DO는 현장에서 DO meter (YSI 58)로 측정하였고, 수중의 NH₄⁺, NO₃⁻, PO₄³⁻, SiO₂ 등 무기 영양염 농도는 시료를 GF/C로 여과한 후 APHA (1995)의 표준방법에 따라 실험실에서 분석하였다. 식물플랑크톤의 chl-a는 90% ethanol로 비등 추출하여 정량하였다(Nusch, 1980).

11개 조사지점에서 저질의 입도, 유기물(COD, TKN 등) 및 저질 공극수의 무기물을 분석하였고 저질의 치환성 무기물(NH₄⁺, NO₃⁻, PO₄³⁻, SiO₂)을 추출하였다. 세 지점(GUP, GIM 및 JOM)에서는 20 cm까지 깊이 별로

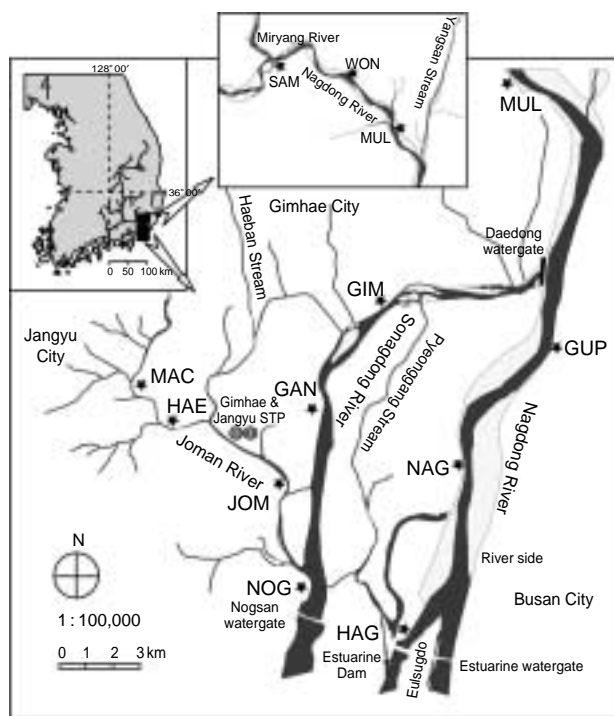


Fig. 1. Map showing the sampling stations for the sediment study in the downstream of the Nagdong River. Organic matters of sediment were analyzed over the eleven stations and pore water of sediment over three stations (GUP, GIM and JOM station)

저질을 채취하여 분석하였다. 음건 저질 토양을 calgon 용액으로 전처리하여 비중계법 (hydrometry) (Herschy, 1999)으로 저질토양의 사질 (sand), 미사 (silt) 및 점토 (clay)의 비율을 측정하였다.

음건시킨 저질 토양 0.5 g를 산화시킨 후 ferrous ammonium sulfate로 적정하는 Gaudette and Flight (1974) 방법으로 유기탄소 (org-C) 함량을 정량하였다. 총질소 (TKN, total Kjeldahl nitrogen)는 음건 토양 2 g을 Büchi 425 및 426 digester로 분해시켜 증류하는 micro-Kjeldahl법으로 분석하였다.

내경 2.3 cm, 길이 30 cm인 투명한 원통관을 내경 4 cm 아크릴 원통에 끼워 수심이 깊은 곳의 저질을 채취하였다. 20 cm의 저질 core를 깊이 별로 7등분으로 절단 (2~3 cm 간격으로 7등분)하여 50 ml centrifuge tube에 넣고, 질소가스를 충전시켜 냉암 조건하에 실험실로 운반하였다. 공극수는 실험실로 운반 즉시, 냉동 원심 분리기에서 5,000 rpm, 20분 동안 원심분리 (T-124, KONTRON)하여 추출하였다. 추출된 공극수는 GF/C (ø25 mm)로 여과하여 냉동 보관시켰다. 공극수의 무기 영양염 (NH_4^+ ,

NO_3^- , PO_4^{3-} , SiO_2)은 수질 자동분석기 (TRACCS 2000, Bran Luebbe Co.)로 정량하였다. 공극수를 추출하고 이를 완전히 제거한 저질은 치환성 무기영양염 (exchangeable inorganic nutrient)을 추출하는데 사용하였다. 공극수를 추출한 저질에 2M KCl을 첨가하여 실온에서 1시간 동안 교반시켰다. 추출액은 GF/C로 여과하여 NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} 및 SiO_2 를 수질 자동분석기로 정량하였다 (Reddy and Graetz, 1987).

결 과

1. 하천 수질

1) 수온과 DO

GUP, GIM 및 JOM 세지점에서 저질에 가까운 저층수의 수온을 3년간 (1998~2000년) 모니터링한 결과는 Fig. 2와 같다. 저층의 수온은 2.3~28.6°C 범위였고, 저층과 수표면의 수온 차는 최소 2.1°C, 최대 -4.8°C였으며 대개 -1.78~1.01°C 범위였다. 세 지점에서 저층과 수표면의 수온차는 GUP 지점에서 -3.2~0.2°C, GIM 지점에서는 -3.7~2.0°C, JOM 지점에서는 -4.8~1.4°C로서 JOM 지점이 가장 컸다. 저층과 수표면의 수온 차이는 시기적으로 5~8월에 가장 컸으며 저층의 수온이 가장 높은 시기는 7~8월이었다. GUP, GIM 및 JOM 지점의 수심은 각각 9 m, 3 m 및 2 m로서 수심이 얇은 곳일 수록 상 하층의 수온차가 다소 크게 나타났다. 한편, 겨울에는 저층과 수표면의 수온 차가 매우 줄어들었으나 GIM과 JOM 지점에서는 수표면보다 저층 수온이 더 높은 경우도 있었다.

저층 DO 농도는 매우 불규칙하였으나 5~8월중에 5 mg O_2/l 이하인 횡수가 많았으며 이 시기에 저질 퇴적층에는 빈산소 상태가 유지되었다. 저층수와 수표면의 DO 차이는 GUP 지점에서는 5 mg O_2/l 이하였으나 GIM과 JOM 지점은 5 mg O_2/l 이상 나타나는 빈도가 높았다. 수온과 DO를 측정할 때에는 바람이 많지 않은 날을 택하였다. 고수온기에는 대체로 오전에는 바람의 영향이 적어 상 하층의 수온과 DO 차는 컸으며 오후에는 바람의 영향으로 이와 같은 상 하층의 구배는 미미하게 되는 경우가 많았다. 5~8월은 저층의 수온이 20°C 이상 되는 시기로서 이 기간에 빈산소 상태가 되는 경우가 많았다. 반면 겨울에 GUP 지점에서는 상 하층 DO 차는 1 mg O_2/l 이하였으나, GIM과 JOM 지점에서는 최대 5 mg O_2/l 로서 저수온기에도 상 하층의 구배가 컸다.

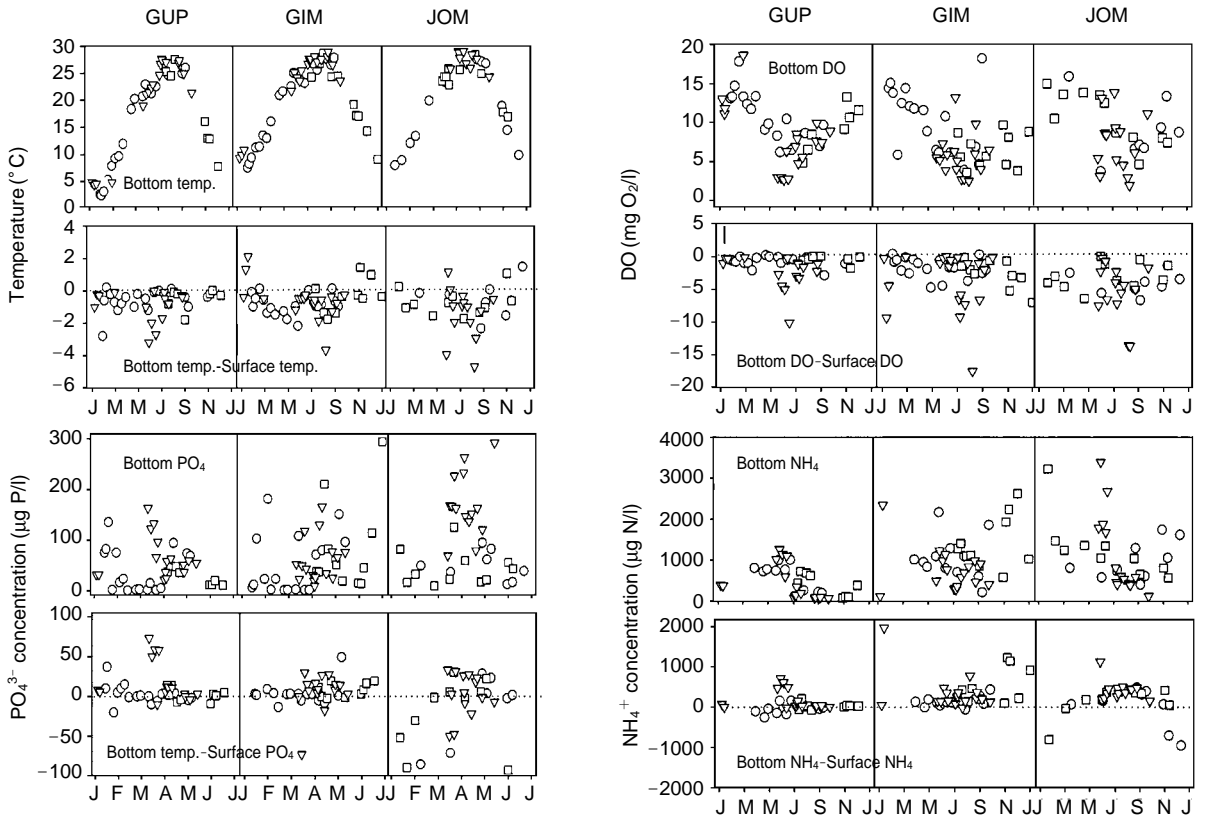


Fig. 2. Environment of bottom waters and difference of bottom and surface water (values of bottom waters minus values of surface waters) for four factors (temperature, DO, PO_4^{3-} , NH_4^+) in the three stations of downstreams of the Nagdong River from 1998 to 2000. ○ 1998, □ 1999, ▽ 2000.

2) 무기 영양염

세 지점에서 저층수와 수표면의 NH_4^+ , PO_4^{3-} 을 3년간 측정된 결과는 Fig. 2와 같다. GUP 지점에서 저층의 NH_4^+ 농도는 58~1,262 $\mu g N/l$ 범위였으며 5~6월에 특히 높았다. GIM과 JOM 지점에서는 다소 불규칙하였으며 GIM 지점에서는 114~2,612 $\mu g N/l$, JOM 지점에서는 110~3,377 $\mu g N/l$ 범위였다. GIM 지점에서는 11월, 12월과 1월에 특히 높았으며, JOM 지점에서는 6월에 특히 높았다. 상 하층의 NH_4^+ 농도 차이는 세 지점에서 각기 다르게 나타났다. GUP 지점에서는 5~6월에서만 저층에서 높았고 GIM 지점에서는 6~9월 사이에 저층 NH_4^+ 농도가 높았으며 11, 12월에 높은 경우가 3회 관찰되었다. 그러나 JOM 지점에서는 11월부터 1월까지의 수표면의 NH_4^+ 농도가 저층보다 훨씬 더 높았으며 6~9월에는 수표면 보다 저층에서 최대 236 $\mu g N/l$ 더 높았다.

한편, PO_4^{3-} 농도는 저층에서 5~8월에 가장 높았고 3곳 중에서 JOM 지점에서 가장 높았다. 저층과 수표면에서 PO_4^{3-} 농도 차이는 GUP 지점은 2월과 6월, GIM 지

점은 6~8월, JOM 지점은 6~8월에 차이가 가장 컸다 (Fig. 2). JOM 지점에서 1~5월에 수표면에서 PO_4^{3-} 가 저층보다 -0.6~7.1 $\mu g P/l$ 높았다. 특히, 6~8월에 저층의 NH_4^+ 와 PO_4^{3-} 농도가 높았던 시기는 저층 수온이 20°C 이상 유지되고 저층수의 DO가 5 mg O_2/l 이하로 유지되었던 기간과 대체로 일치하였다.

NO_3^- 농도는 GUP 지점과 GIM 지점에서 3,135 $\mu g N/l$ 이하였으나, JOM 지점에서는 461~6,620 $\mu g N/l$ 로서 농도 범위가 컸다. 저층과 수표면의 NO_3^- 농도 차이는 연중 불규칙하였고 그 경향성은 일정하지 않았다. 그러나, GIM 지점에서 저층의 NO_3^- 농도는 수표면보다 500~1,400 $\mu g N/l$ 낮게 유지되었다. GIM 지점은 조사 기간 동안 내내 저질 토양이 검정색이었고 악취가 발생하는 강력한 환원 상태로서 저층의 NO_3^- 농도가 매우 낮았다.

3) 식물플랑크톤의 발생량

GUP 지점에서 상층 chl-a 농도는 3년 평균 32 $\mu g/l$ 이었고 저층은 33 $\mu g/l$ 이었으나 GIM 지점에서는 3년 연

Table 1. Physico-chemical properties of sediment in downstream of the Nagdong River and in the Seonagdong River. May 12~16, 2000. Water content, org-C and TKN content are based on dry weight (dw), chl-*a* and pheopigment are based on fresh weight (fw).

Sampling station	Water depth (m)	Bulk density (g/ml)	Water content (%)	Temp (°C)	DO* (mg O ₂ /l)	ORP (mV)	Org-C (mg C/g)	TKN (mg N/g)	Chl- <i>a</i> (µg/g)	Pheopigment (µg/g)
SAM	3.5	0.92	56	14.3	9.3	-116	11.0	0.78	14.72	16.45
WON	2.0	0.87	58	15.2	8.3	-132	6.2	0.56	9.59	19.55
MUL	2.5	1.28	37	15.0	7.8	-63	3.6	0.20	1.37	6.18
GUP	2.5	1.05	53	14.0	9.0	-72	6.4	0.43	8.83	27.14
NAG	5.5	1.30	32	13.9	9.2	-210	3.9	0.20	12.72	36.09
HAG	0.3	0.61	71	-	-	-116	12.3	1.51	18.10	45.35
GIM	2.0	0.39	77	14.0	10.0	-232	27.1	3.25	25.22	61.00
SON	2.0	0.57	69	13.6	14.5	-329	13.4	1.68	20.06	62.63
MAC	2.0	1.15	44	13.4	9.8	-120	4.0	0.37	3.87	16.84
HAE	1.5	0.85	60	-	-	-248	11.4	1.22	7.89	29.43
JOM	2.0	1.00	52	13.6	10.3	-309	10.4	0.87	10.85	10.54

* DO of the overlying water

평균 chl-*a* 농도는 상층에서 64 µg/l이었고 하층에서 47 µg/l였으며 JOM 지점에서 chl-*a* 차이는 평균 26 µg/l였다. GIM 지점에서 여름(7, 8월)의 경우 상 하층 chl-*a* 농도 차이(저층수 농도-수표면 농도)가 -146~15 µg/l(평균 -37 µg/l)이었으나 겨울에는 -43~6 µg/l(평균 -3.7 µg/l)였다. GUP 지점에서는 수표면과 저층수의 Chl-*a* 농도차가 크지 않았으나 GIM과 JOM 지점에서는 고수온기에 chl-*a* 농도차가 매우 컸다. 낙동강 하류 수계에서 낙동강 본류 쪽 보다는 서낙동강 쪽 조류 발생량이 더 많았고, 서낙동강보다는 조만강이 더 높아 부영양화 정도는 낙동강 본류<서낙동강<조만강의 순서였다.

2. 저질 환경

1) 저질 입도 및 가비중

2000년 4월 12~16일에 낙동강 11개 지점을 대상으로 저질 토양을 채취하였다. 채집 시 현장에서 저질 상태를 관찰한 결과, SAM 지점의 저질 상층이 니질(mud)과 사질(sand)이 혼합된 상태였고 하층은 완전 사질이었다. MUL과 WON 지점의 저질은 사질이었다고, GUP 지점의 저질은 상층에 니질이 저층에는 사질이 다소 포함되어 있었다. NAG 지점의 저질은 상층이 사질이 포함된 점토질이었다. HAG 지점의 저질은 완전 니질이었다. GIM 지점의 저질은 상 하층 모두 니질이었으며 시료 채취시에는 암모니아와 황화수소와 같은 악취가 났다. SON 지점의 저질 상층은 니질과 사질이었다고 하층은 전형적인 환원형이었다. 조만강 수계의 하상 저질을 보면 상 하층은 주로 미사 또는 점토질이었다. 결과적으로 낙

동강 본류는 강의 바닥이 주로 사질이었다고 서낙동강과 조만강의 하상은 미사와 점토질이 많은 니질이었다.

11개 지점의 저질을 채취하여 분석한 결과는 Table 1과 Figs. 3-5와 같다. 저질의 온도는 13.4~15.2°C 범위였다. 저질을 채취한 곳의 수심은 0.3~5.5 m이었다. 가비중(bulk density)은 0.39~1.30 g/ml 범위였으며 낙동강과 서낙동강 하류 지역에서 특히 낮았다. 수분 함량은 32~77% 범위였으며 산화환원전위(ORP)는 -63~-329 mV 범위였다. 산화환원전위는 SON, JOM, HAE, GIM 지점의 순으로 낮았고, 유기물 또는 chl-*a*와 pheopigment 등 광합성 색소 함량이 높은 저질에서 산화환원전위가 대체로 낮았다.

저질의 유기탄소 함량은 3.6~27.1 mg C/g 범위였고, GIM 지점에서 가장 높았고 MUL 지점에서 가장 낮았다(Fig. 3). TKN 함량은 0.2~3.3 mg N/g 범위로서 조사지점별 경향성은 유기탄소와 같았다. 저질 내 탄소, 질소, chl-*a* 등 각 유기물 인자와 가비중 등과의 상관관계를 보면 Fig. 6과 같다. TKN, chl-*a*, org-C 함량은 서로 높은 상관성이 있었고, Org-C와 chl-*a* 함량은 저질의 가비중과 유의한 역상관 관계를 보였다.

2) 깊이별 저질 환경

(1) 유기물 함량

2000년 9월 6~8일 측정된 GUP, GIM 및 JOM 지점에서 저질 깊이에 따른 유기탄소(org-C), TKN은 Fig. 3과 같다. 세 지점에서 저질의 유기물 함량은 저질 표면에서 하층으로 갈수록 감소하였다. GUP 지점에서는 깊이 5 cm에서 최대인 25.3 mg C/g였고, 5 cm를 제외한 나

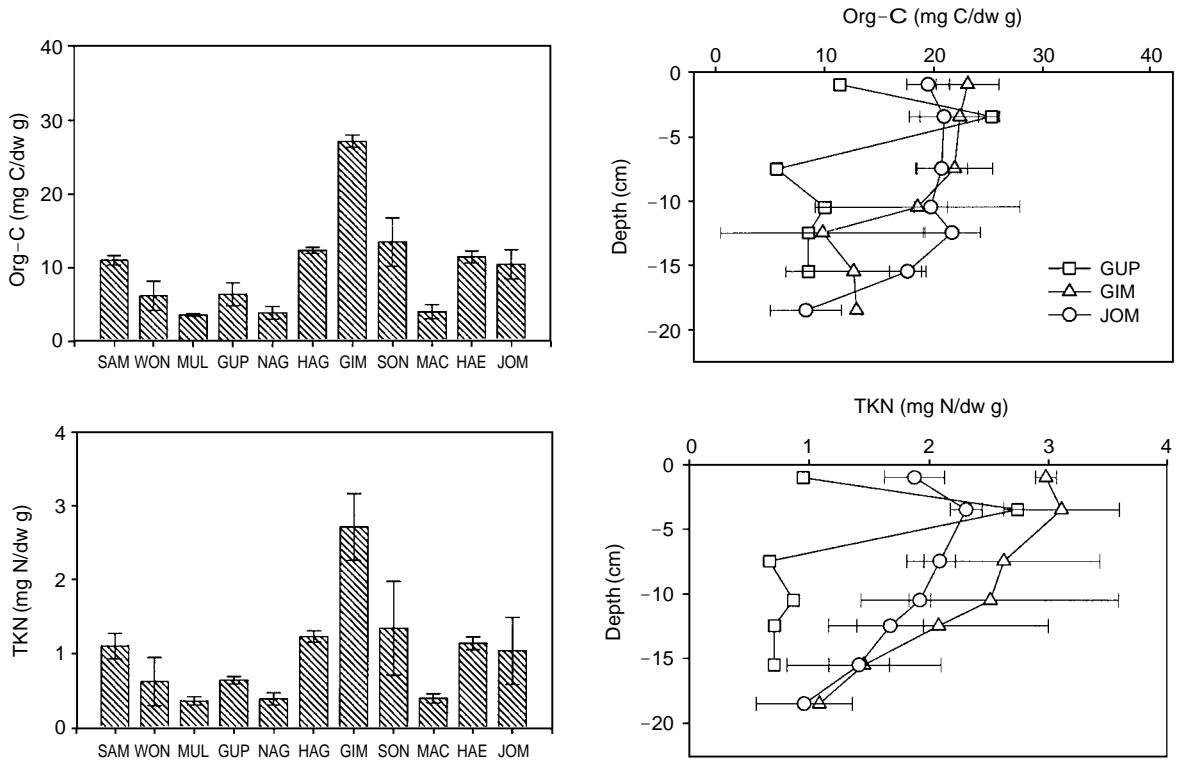


Fig. 3. Organic-C and TKN distribution along the sampling stations in April 2000 (left figure) and depth profiles of organic-C and TKN in the downstream of the Nagdong River in September 2000 (right figure).

머지는 5.6~11.4 mg C/g 범위였다. 반면 GIM과 JOM 지점은 상층에서 깊이 10 cm까지 7.8~26.0 mg C/g 범위였고, 그 이하에서는 감소하였다. 평균 함량은 GUP 지점은 8.8 mg C/g이었고, GIM과 JOM 지점은 18.8 mg C/g와 18.3 mg C/g이었다.

세 지점의 TKN 함량은 GUP 지점은 깊이 5 cm에서 최대인 2.74 mg N/g였고 5 cm를 제외한 나머지는 0.7~1.0 mg N/g 범위였다. GIM과 JOM 지점에서 TKN 함량은 각각 0.8~3.6 mg N/g (평균 2.4 mg N/g) 및 0.7~2.4 mg N/g (평균 1.8 mg N/g) 범위였다. TKN 함량은 GIM 지점에서 가장 높았다. Org-C와 TKN 함량 비 즉 C/N 비율을 계산하면 GUP 지점에서 상층(0~5 cm)은 평균 12.0이었고 5.0 cm 이하 하층에서는 9.2이었다. 특히, 깊이 15 cm에서는 최대인 11.9이었다. GIM 지점에서 상층(0~5 cm)은 7.3~7.8이었고 깊이 20 cm에서는 11.8이었다. JOM 지점에서 상층(0~5 cm)은 10.4이었고 깊이 15 cm에서는 12.8이었다. 세 지점에서 저질 상층에서 아래로 내려갈수록 C/N 비율은 서서히 증가를 하였다.

(2) 공극수의 무기영양염 함량

저질 내 공극수를 추출하여 공극수 내 NH₄⁺, NO₃⁻,

PO₄³⁻ 및 SiO₂ 함량을 정량하였다(Fig. 4). 저질 상층에서 공극수의 무기영양염 함량이 가장 높았으며 저층으로 갈수록 그 양은 크게 감소하였다. GIM과 JOM 지점의 경우 상층부에서 공극수 함량은 55~87%이었고 깊이 15~20 cm에서는 1~23%이었다.

공극수의 무기 영양염 농도도 미사와 점토 함량이 높았던 GIM과 JOM 지점에서 높게 나타났다. 저질-수층 경계면에서 저질 깊은 곳까지 무기 영양염의 농도를 보면, NO₃⁻와 PO₄³⁻ 농도는 저질 공극수보다 저층수에서 농도가 높았고, NH₄⁺와 SiO₂ 농도는 저질 공극수에서 더 높았다(Fig. 4). 조사 당시 세 지점에서 경계면 위의 저층수의 NH₄⁺ 농도는 0.1~0.6 mg N/l였으나 저질 공극수는 깊이에 따라 점차 증가하여 저질 20 cm 깊이에서는 GIM과 JOM 지점에서 각각 9.5 mg N/l 및 23.2 mg N/l였다. 저질 내 공극수의 NH₄⁺ 농도는 조사 지점 별로 차이가 컸다. 반면 NO₃⁻는 저층수에서는 1.1~2.9 mg N/l 농도 범위였으나, 저질의 공극수 내 함량은 0.01~0.14 mg N/l로서 저질 깊이와 조사 지점 별로 차이가 없었다. 저층수 내 PO₄³⁻ 농도는 14~59 µg P/l 범위이었고 저질 깊이에 따라 점진적으로 감소하는 경향을 띠었다.

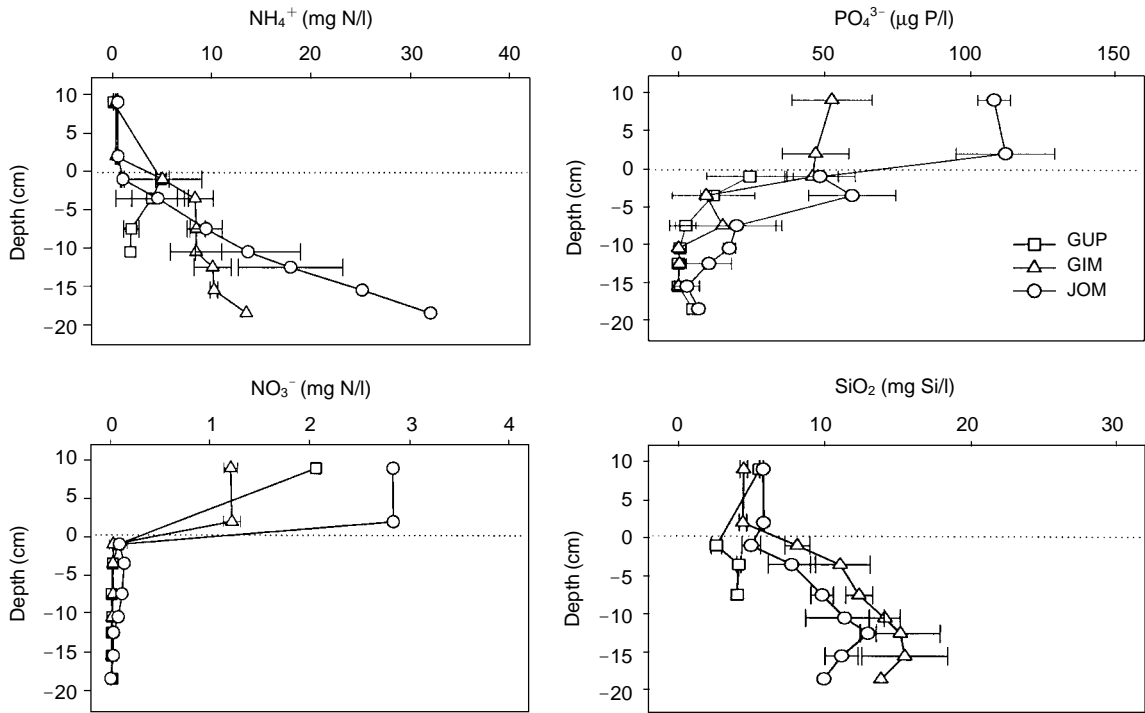


Fig. 4. Depth profiles of PO_4^{3-} , NH_4^+ , NO_3^- and SiO_2 concentration of the sediment porewater in the three stations.

저질의 표층에서 공극수 PO_4^{3-} 농도는 0.01~0.06 mg P/l로서 저층수의 38~48% 정도였으며, 세 조사지점 중에서 JOM 지점에서 비교적 높았다. SiO_2 는 저층수에서는 4.1~5.8 mg Si/l이었고 저질 공극수는 증가하여 12 cm 깊이에서 농도를 보면 10.4~18.9 mg Si/l로서 최대였다. 그러나 공극수 내 SiO_2 함량은 GUP 지점에 비해 GIM과 JOM 지점에서 매우 높았다.

(3) 저질의 치환성 무기 영양염

GUP, GIM 및 JOM의 세 지점을 대상으로 저질에 2 M KCl로 처리하여 저질 토양의 치환성 무기영양염 함량을 분석한 결과는 Fig. 5와 같다. 치환성 PO_4^{3-} 의 농도는 저질의 상층부가 하층보다 높았다. 조사 당시 세 지점의 저질 상층의 치환성 PO_4^{3-} 의 평균 함량은 각각 1.5 $\mu\text{g P/g}$, 4.5 $\mu\text{g P/g}$ 및 4.0 $\mu\text{g P/g}$ 였다. GUP와 GIM 지점에서 저질 상층의 치환성 NH_4^+ 농도는 각각 835 $\mu\text{g N/g}$, 2,308 $\mu\text{g N/g}$ 였고, 하층 15 cm에서는 각각 259 $\mu\text{g N/g}$, 960 $\mu\text{g N/g}$ 였다. JOM 지점의 경우 저질 상층은 1,944 $\mu\text{g N/g}$ 의 농도 범위를 나타냈고, 하층 15 cm는 2,211 $\mu\text{g N/g}$ 이었다. 저질 내 치환성 NH_4^+ 농도는 지점 별로 약간의 차이가 있었다. GUP와 GIM 지점은 저질 깊이에 따라 치환성 NH_4^+ 는 점진적으로 감소하였고 JOM 지점에서는 증가하였다. 치환성 NO_3^- 농도는 세 지점에서 하층으

로 갈수록 증가하였고, JOM 지점은 하층 10 cm 지점에서 크게 증가하였다 (Fig. 5). 각 세 지점의 저질 상층의 NO_3^- 농도는 각각 0 $\mu\text{g N/g}$, 1.50 $\mu\text{g N/g}$ 및 0 $\mu\text{g N/g}$ 였다. 세 지점에서 치환성 SiO_2 농도는 저질 하층으로 내려갈수록 감소하였다. 저질 상층에서 SiO_2 농도는 각각 205 $\mu\text{g Si/g}$, 394 $\mu\text{g Si/g}$ 및 376 $\mu\text{g Si/g}$ 였고, 하층 15 cm에서 각각 94 $\mu\text{g Si/g}$, 131 $\mu\text{g Si/g}$ 및 140 $\mu\text{g Si/g}$ 였다. 이상의 결과에서 치환성 NH_4^+ 농도는 NO_3^- 보다는 173~813 배, PO_4^{3-} 보다는 173~650배, SiO_2 보다는 2.5~7.6배 높았다.

고 찰

낙동강 하류의 3개 조사 지점 (GUP, GIM 및 JOM)에서 수표면과 저질에 가까운 저층 수질을 모니터링 한 결과, 각 항목의 계절적인 변동은 뚜렷하였으나 조사 지점 별 차이는 크지 않았다. 수온과 DO의 상 하층의 차이는 6~8월에 주로 나타났으며 수온은 5°C 이내, DO는 10 mg O_2/l 이내였다 (Fig. 2). 고수온기에는 저층의 DO가 5 mg O_2/l 이하로 유지되는 빈도가 높게 나타나 성층 현상이 나타났다. 저질 퇴적층은 저층 DO와 수온의 영향

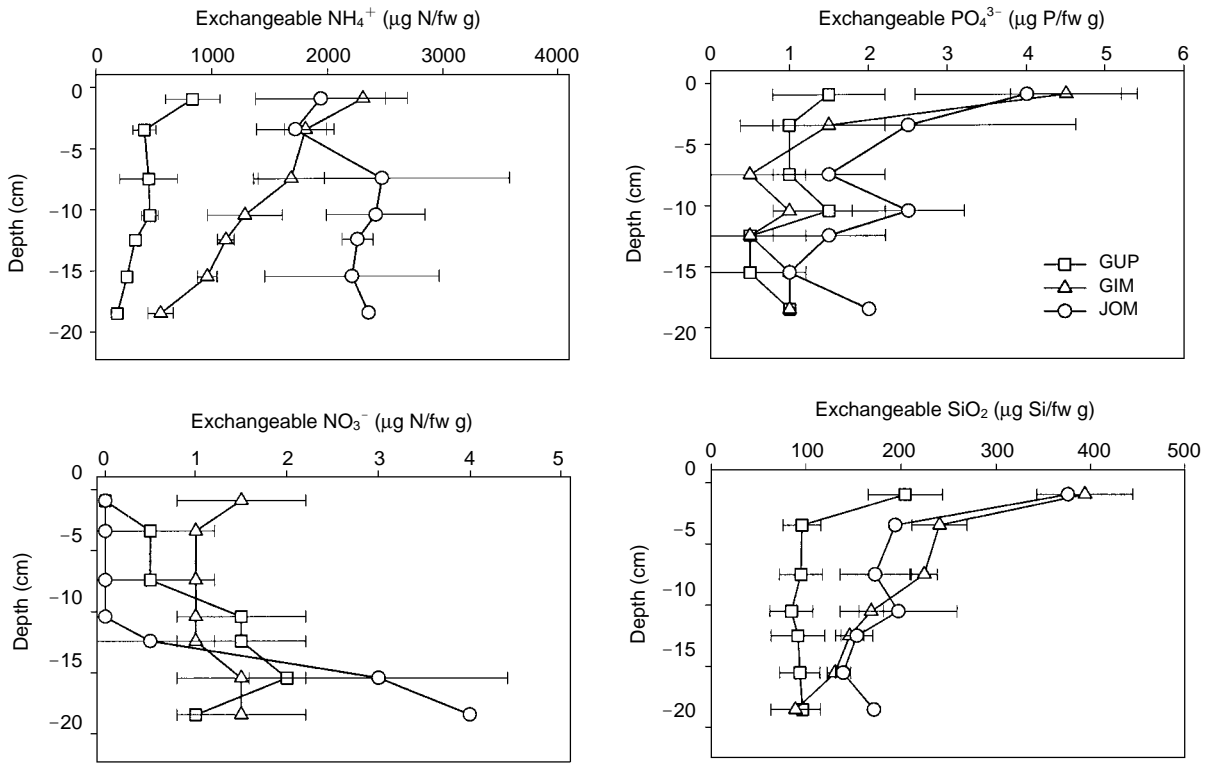


Fig. 5. Depth profiles of exchangeable PO_4^{3-} , NH_4^+ , NO_3^- and SiO_2 concentration of the sediment collected in the three stations.

을 직접 받을 것이며, 저층 DO 농도가 $5 \text{ mg O}_2/\text{l}$ 이하가 되는 시기에는 저질에서 영양염 용출이 활발할 것으로 추정된다. 본 조사와 동일한 저질에서 호기상태 (oxic)와 빈산소상태 (hypoxic)에서 무기영양염의 용출량을 측정 한 결과 빈산소상태에서 NH_4^+ 와 PO_4^{3-} 의 용출량은 호기상태와 비교하여 크게 증가하였다 (정과 조, 2003). 그러나 저층의 DO 농도는 조사시기에 따라 변동이 컸으며 특히 서낙동강과 조만강에서는 수심이 2m 안팎으로 바람에 의하여 성층화가 쉽게 소멸되었다. 하절기에는 오전 중에는 성층화가 뚜렷하나 오후에는 바람의 영향으로 저층의 빈산소 수위가 소멸되는 경우가 많았다. 이러한 영향으로 인하여 수심이 얇은 GIM과 JOM 지점에서 저층 DO는 GUP 지점보다 연중 변동이 크게 나타났다.

저층수의 NH_4^+ 와 PO_4^{3-} 농도는 6~8월 중에 증가하였다. 하절기에 저층의 영양염 농도가 증가하는 현상은 NH_4^+ 보다 PO_4^{3-} 가 더 뚜렷하였다 (Fig. 2). 과거 낙동강 하류에서 수심별 NH_4^+ 및 PO_4^{3-} 농도 변화를 보면 여름과 겨울에 저층으로 갈수록 NH_4^+ 및 PO_4^{3-} 농도가 증가하고, 조류 성장잠재력 (algal growth potential, AGP)도 수심에 따라 증가하였다 (신과 조, 1999a, b). 저층의 무기

영양염이 증가하는 것은 저질에서 용출되는 영양염과 관련이 있으며 이는 내부에서 생성되는 자생 부하량으로 평가할 수 있다. 특히 AGP에 미치는 NH_4^+ 와 PO_4^{3-} 의 절대적인 영향으로 볼 때 저질에서 용출되는 NH_4^+ 와 PO_4^{3-} 는 수층 내 식물플랑크톤을 증가시키는 요인으로 작용할 것이다. 한편, NO_3^- 와 SiO_2 는 계절에 따른 변동이 불규칙하여 일정한 경향성을 띠지 않아 부영양화에서 2차적 요인으로 평가할 수 있었다.

토양의 가비중은 자연 상태의 토양 비중으로서 무기 및 유기질 입자 외에 토양의 공기, 수분의 무게를 합친 것이다. 가비중은 저질의 구조를 잘 반영해주고 통기성, 보수력 및 투수성을 암시한다. 저질에서 가비중은 저질 입도 구성과 관련이 있어 사질에서는 크고, 유기물 함량이 많은 경우에 적다 (Foth, 1984; 정, 2000). 낙동강 하구 저질에서는 입도가 작고 가비중이 낮을수록 함수량과 유기물 함량은 증가했으며 산화환원전위는 감소하는 경향성을 띠었다 (Table 1). 가비중은 유기물 관련 항목과는 역 상관 관계에 있을 것이고 함수량과는 정 상관관계에 있을 것이다. 저질의 입도는 산화환원전위와 유기물 함량에 영향을 미치며 산화환원전위는 영양염의 변

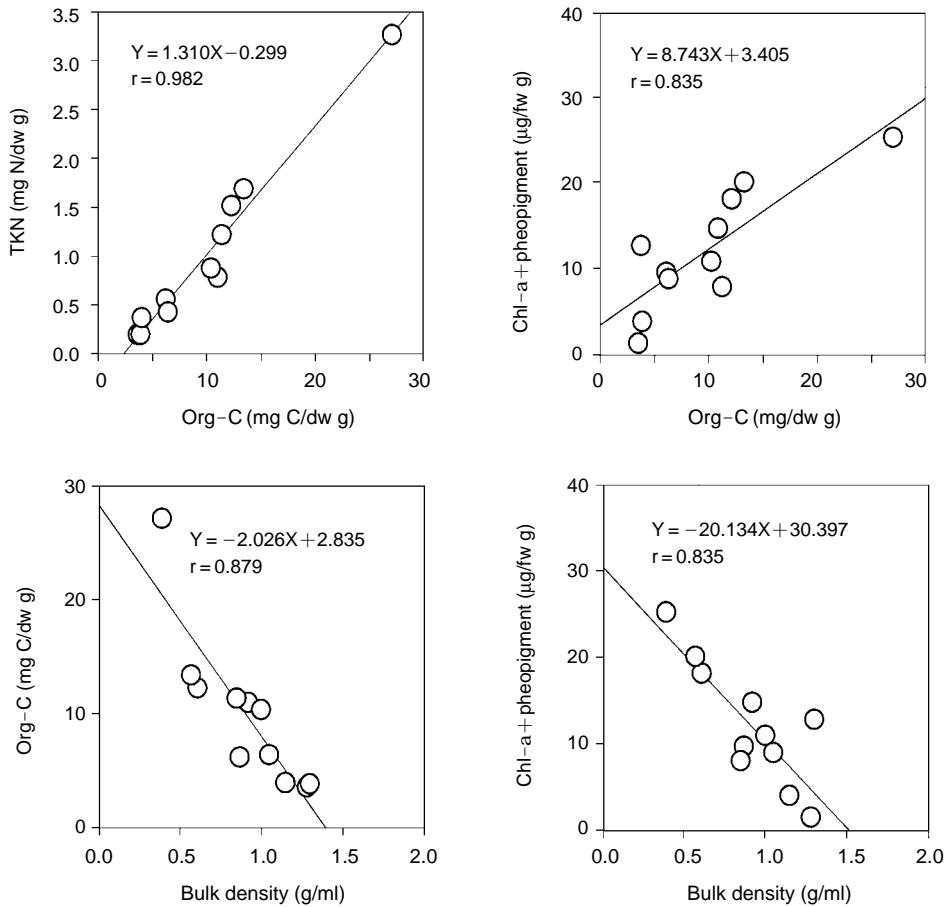


Fig. 6. Relationships between some organic matters and sediment bulk-density in the downstream of the Nagdong River.

화에 큰 영향을 미치게 될 것으로 추정된다.

한편, 저질내 영양염의 분포는 저질 내 유기물, 치환성 영양염과 공극수 내 영양염으로 구분할 수 있다. 특히 저질의 깊이에 따라 C/N 비율이 증가하는 현상은 탄소 유기물보다 질소 유기물의 분해가 더 빠르기 때문으로 추정된다. 공극수 내 영양염 보다 치환성 영양염의 농도가 매우 높았으며 치환성 무기영양염은 토양 입자에 흡착된 것으로서, 저질의 화학적 변동이나 pH, 산화 환원 전위 등에 의해 토양 공극수 내로 유리되는 영양염이며 저질에서 용출과도 관련이 있을 것이다

저질에서는 산소이용이나 요구도는 높으나 산소전달이 어려워 저층에서는 무산소 또는 혐기성 상태가 되기 쉽다 (Harper, 1992). 따라서 저질 상층을 제외하고는 산소가 없는 환원층으로서 저질은 산화-환원층으로 구분된다. 저질의 산화환원 상태는 유기물 함량 및 토양 내 공기 함량이나 온도와 pH 등에 따라 다르며 유기물 함량이 많을수록, 온도가 높을수록, 환원을 촉진한다(정,

2000). 이러한 산화 환원상태는 저서동물의 활동, 저질의 산소소비 및 이동과 밀접한 관련성을 갖는다 (Hwang *et al.*, 1998). 저질 토양 내에 유기물 함량이 높을수록 저질의 가비중은 낮아지게 될 것이다.

금번 조사에서 저질의 org-C와 TKN 함량은 GUP에서 6~11 mg C/g 및 0.7~1.0 mg N/g, GIM과 JOM 지점에서는 8~26 mg C/g 및 0.8~3.6 mg N/g이었다. 최근 조사자료에 따르면 질소 및 인 함량은 낙동강 하류에서 각각 0.5~0.8 mg/g 및 90~244 µg P/g이었고, 서낙동강에서는 각각 0.1~1.5 mg N/g 및 4~107 µg P/g로서 (신, 2002) 질소 함량은 유사하였다. 팔당호에서 org-C 함량은 1.2~2.6 mg C/g (강과 송, 2000)였고, 과거 조사한 org-C 및 질소 함량은 각각 0.4~2.5% 및 0.04~0.35% (신과 이, 1995)였다. 대청호에서 저질의 탄소와 질소 함량은 각각 0.5~2.7% 및 0.11~0.25% (Hwang *et al.*, 1998)로서 질소보다 탄소의 지역별 변동이 매우 컸다. 서낙동강의 저질 내 탄소와 질소 유기물 함량은 다른 지역보

다 특별히 높지 않았다.

저질 내의 유기물 함량은 저질을 구성하는 입자가 미세할수록 많고, 이로 인해 표면적이 넓어지기 때문에 미생물의 양도 증가하게 될 것이다 (Hwang *et al.*, 1998; Foth, 1984). 저질 내에 포함되어있는 유기물은 chl-*a* 및 pheopigment 함량과 상관이 높은 점으로 볼 때 (Fig. 6) 하천에서 운반된 유기물 등이 퇴적될 뿐만 아니라 식물플랑크톤이 주요 유기물 원이 되는 것으로 추정된다. Pheopigment는 chlorophyll 분자가 분해된 불활성 색소로서 저질에서 오랫동안 보존되는 안정된 화합물로서 낙동강 저질 조사에서도 총 광합성 색소의 41~82%를 차지하였다 (Table 1). 총 광합성 색소(chl-*a*와 pheopigment의 합)를 유기탄소와 질소로 환산하였을 때 저질 내에서 광합성색소로부터 유래된 유기물은 총 유기탄소와 질소 함량의 30 및 40%를 차지하는 것으로 추정되었다. 분해된 식물플랑크톤을 고려할 때 유기물에 대한 식물플랑크톤의 기여도는 추정치 보다 높을 것이다. 일차생산성이 높을수록 저질의 유기물 함량은 증가하고 유기물의 증가로 저질이 활성화되고 빈산소 또는 무산소 상태에서 각종 영양염의 용출을 증가시키는 요인으로 작용할 것이다 (Southam and Mackenzie, 1999).

적 요

낙동강의 하류지역(낙동강, 서낙동강 및 조만강)의 수질오염에 있어서 저질퇴적층의 영향을 파악하기 위하여 저질과 저층수의 환경을 조사하였다. 세 지점에서 수질을 모니터링 하였을 때, 고수운기인 5~8월에 수표면과 저층간의 수온, 용존 산소, PO_4^{3-} , NH_4^+ 의 차이가 컸다. 7~8월 중에 저층의 용존 산소는 대체로 5 mg O_2/l 이하로 유지되는 빈도가 높았고, 이 기간에 저질-수층 경계면에서 PO_4^{3-} 와 NH_4^+ 의 이동이 활발할 것으로 추정된다. 저질에 가까운 저층에서 무기 영양염 농도와 수층 chl-*a* 농도는 지역적으로 낙동강<서낙동강<조만강의 순이었고 수심이 얕고 저질 퇴적층이 발달할수록 수질에 미치는 영향이 컸다. 저질의 유기물 함량은 하류 쪽으로 갈수록 증가하였고, 낙동강보다는 서낙동강 수계에 더 높았으며 저질의 가비중과 역 상관관계로서 오염도 뿐 아니라 저질입도와 관련이 있었다. 저질 공극수 내 PO_4^{3-} 와 NO_3^- 은 수층보다 그 농도가 매우 낮았으나 NH_4^+ 와 SiO_2 농도는 수층과 유사하거나 더 높았다. 공극수 내 NH_4^+ 와 SiO_2 농도는 저질 깊이에 따라 증가하였고, PO_4^{3-} 는 감소한 반면 NO_3^- 은 일정하였다. 반면 저

질 내 치환성 무기영양염은 공극수 무기영양염 농도보다 최대 수백배 높았으며 PO_4^{3-} , NH_4^+ , SiO_2 는 저질 깊이에 따라 감소했으나 NO_3^- 은 증가하였다.

인 용 문 헌

- 강양미, 송홍규. 2000. 팔당호 수변부 퇴적물이 수층의 산소소모에 미치는 영향, 한국육수학회지 **33**: 23-30.
- 대우건설. 2002. 장유하수처리장 사후환경관리 보고서, 연구기관-인제대학교 낙동강환경센터. 120pp.
- 부산시 강서구. 1996. 하천 실태조사 및 정비기본계획수립 보고서 (서낙동강, 평강천, 맥도강, 조만강), 보고서 작성기관-(주)해강. 281pp.
- 신경훈, 이광우. 1995. 팔당호 퇴적물과 공극수에 의한 상부수층의 오염가능성, 수질보전학회지 **11**: 9-15.
- 신재기, 조경제. 1999a. 낙동강에서 AGP에 의한 수질평가, 한국육수학회지 **32**: 349-357.
- 신재기, 조경제. 1999b. 낙동강하구에서 환경요인과 담수조류의 일변화, 한국육수학회지 **32**: 341-348.
- 신현무. 2002. 낙동강 하류·서낙동강의 토양과 저질. 낙동강 하류·회동수원지 수계 물관리 연구보고서, 부산광역시, pp. 257-267.
- 정진해. 2000. 토양학. 부민문화사. pp 75-76.
- 정하영, 조경제. 2003. 낙동강 하류 수계에서 저질퇴적층의 SOD와 영양염 용출. 한국육수학회지 **36**: 322-335.
- 조경제, 신재기, 이옥희, 정민경, 이선애. 2001. 서낙동강-조만강 부영양화에 따른 오염양상과 수질개선에 대한 고찰, 인제대학교 낙동강환경센터 심포지움논문집 **11**: 1-48.
- APHA. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater. 19th ed. American Public Health Association, Washington, D.C.
- Forsberg, C. 1989. Importance of sediments in understanding nutrient cyclings in lakes. *Hydrobiologia* **176/177**: 263-277.
- Foth, H.D. 1984. Fundamentals of soil science. John Wiley & Sons. 37pp.
- Gaudette, H.E. and W.R. Flight. 1974. An inexpensive titration method for the determination of organic carbon in recent sediments. *J. Sediment. Petrol.* **44**: 249-253.
- Harpter, D. 1992. The biochemical manifestations of eutrophication of freshwaters. 72pp.
- Herschy, R.W. 1999. Hydrometry Principles and Practices Second edition. John Wiley & Sons. New York, 376pp.
- Hwang, J.Y., E.J. Han, T.K. Kim, S.J. Kim, S.J. Yu, Y.S. Yoon, Y.S. Jung and P.W. Park. 1998. Distribution of nutrients in Dae-Cheong Reservoir sediment. *Env. Sci.* (by Korean Env. Sci. Soc.) **2**: 169-179.

- Kemp, W.M. and W.R. Boyton. 1984. Spatial and temporal coupling of nutrient inputs to estuarine primary production: The role of particulate transport and decomposition. *Bull. Mar. Sci.* **35**: 242-247.
- Nusch, E.A. 1980. Comparison of different methods for chlorophyll and phaeopigment determination. *Arch Hydrobiol. Beih. (Ergebn. Limnol.)*. **14**: 14-36.
- Reddy, K.R. and D.A. Graetz. 1987. Internal nutrient budget for Lake Apopka. Chaper 3. St. Johns River Management District Palatka, Florida. pp. 1-13.
- Southam, G. and C. Mackenzie. 1999. Sediment bacterial populations and methodologies to study the populations important to xenobiotic degradation. *In: Bioassessment of Aquatic Sediment Quality* (A. Mudroch *et al.* eds). Lewis Publisher, Boca Raton, London New York Washington, D.C. pp. 55-81.
- (Manuscript received 10 July 2003,
Revision accepted 27 August 2003)