

국내 연안 하구역의 식물플랑크톤 생체량(chlorophyll a) 및 수질 동향

신용식* · 이창희¹ · 조기안² · 송은숙³

(목포해양대학교 해양시스템공학부, ¹한국환경정책·평가연구원, ²초당대학교 환경공학과, ³전북대학교 화학과)

Trends of Phytoplankton Community and Water Quality and Implications for Management in Estuarine River Systems. *Sin, Yongsik**, *Changhee Lee¹*, *Kian Cho²* and *Eunsook Song³* (Division of Ocean System Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo, Chonnam 530-729, Korea, ¹Korea Environment Institute, Seoul 122-040, Korea, ²Department of Environmental Engineering, Chodang University, Muan, Chonnam 534-803, Korea, ³Department of Chemistry, Chonbuk National University, Jeonju, Chonbuk 561-756, Korea)

Long-term data (Ministry of Environment Water Quality Monitoring data) of phytoplankton biomass (chlorophyll a) and water quality were analyzed to investigate trends in biomass of the primary producers and water quality for the estuarine systems in Korea: Sumjin River, Han River, Asan Lake-Bay, Youngsan River, Keum River and Nakdong River. The literatures were also reviewed to examine the characteristics of phytoplankton biomass and water quality in the estuarine systems. The Sumjin River estuary, the single estuary without a dike in Korea showed the characteristics similar to other typical estuarine systems. Phytoplankton biomass was high during the fall at transitional regions (5~15 psu) after riverine freshwater inputs were increased in summer. Concentrations of the nitrate and silicate were increased with the high river discharge rates. Phytoplankton biomass and nutrient concentrations were high during spring at the lower regions in the Han River whereas phytoplankton biomass and nutrient concentrations were high during spring at the upper regions in the Youngsan River. Phytoplankton biomass was the highest in the Asan Lake and nutrient concentrations were high at the upper region of the lake. In Nakdong River, phytoplankton biomass was high during winter and the biomass was slightly higher at upper region than at lower region. Long-term trends showed that total nitrogen and total phosphorus were mostly increased in the river systems. Implications of these results relevant to the water quality management for the river systems were also discussed.

Key words : phytoplankton biomass, water quality, estuarine river, water quality management

서 론

식물플랑크톤은 연안환경의 먹이사슬에서 탄소와 영양

물질 (N, P)의 순환에서 중요한 역할을 담당하고 있다 (Kemp and Boynton, 1981; Boynton *et al.*, 1982; Coffin and Sharp, 1987; Sundbaeck *et al.*, 1990). 이들은 또한 광합성과 호흡을 통해 수질 (특히 용존산소)에 영향을 미

* Corresponding author: Tel: 061) 240-7054, Fax: 061) 240-7284, E-mail: yongsik@mmu.ac.kr

치고 수화 (algal blooms)가 일어난 후 포식되지 않은 세포들이 바닥에 가라앉아 용존산소를 고갈시킬 수 있는 미생물 분해의 기질로서 작용하기도 한다 (Officer *et al.*, 1984; Seliger *et al.*, 1985; Malone *et al.*, 1986; Sundbaeck *et al.*, 1990). 몇몇 위해성 플랑크톤은 또한 brown tide나 red tide를 일으켜 연안생태계에 위협이 되기도 한다. 또한 식물플랑크톤은 광 (light) 흡수입자로서 작용해 빛의 투과를 막아 자신들의 성장을 제한 (self-shading) 하는 역할을 하기도 한다 (Kirk, 1994). 원양의 표층수에 비해 영양염류가 풍부한 연안하구 (estuary)에서는 일차생산량이 때에 따라서 급증할 수 있고 이러한 양적 변화에 동물플랑크톤이나 다른 소비자들의 포식이 늦을 경우 포식되지 않은 일차생산자들이 수중이나 바닥에 축적된다. 이러한 축적은 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 그리고 어류로 이어지는 먹이사슬에서 식물플랑크톤에서 분비되는 DOC (Dissolved Organic Carbon), 박테리아, 원생동물, 동물플랑크톤, 어류로 이어지는, 미생물이 다량 존재하는 먹이사슬 구조로 바뀌게 된다. 이러한 전환은 미생물 분해의 활성을 촉진시키게 되고 결국 수중의 용존산소를 고갈시켜 생태계내의 수질을 악화 시킨다 (Sundbaeck *et al.*, 1990; Jonas, 1992).

연안 환경에서 식물플랑크톤의 일차생산성은 일반적으로 크게 두 가지 기작에 의해 조절된다; 영양물질의 공급 (bottom-up control)과 포식자에 의한 섭식과 같은 생물학적 작용 (top-down control) (Carpenter *et al.*, 1987; Kivi *et al.*, 1993; Armstrong, 1994; Caraco *et al.*, 1997)이다. 하구에서는 특히 이러한 조절 기작들이 식물플랑크톤과 복잡한 관계를 갖는데 그 이유는 담수유입과 조석의 영향 그리고 오염물질 유입의 접근성 때문이라 할 수 있다 (Alpine and Cloern, 1992; Pennock and Sharp, 1994; Cloern, 1996).

연안하구는 생물의 생태를 연구하는 과학자들에게 복잡한 환경으로 인식되어왔으나 한편으로는 생태연구를 위한 훌륭한 장소로 손꼽히고 있다. 전체 시스템을 보았을 때 생물의 동역학 (dynamics)을 결정하는 생물학적, 무생물적 인자들이 시공간적으로 변하기 때문이다. 이런 복잡성 외에도 하구는 생산성이 높고 (Ryther, 1969) 많은 상업적 어류나 패류들에게 서식처나 먹이를 제공하고 있다 (Smith, 1966; EPA, 1982; Levinton, 1982). 하구는 또한 육지로부터의 영양물질 유입이 많은 환경이다. 이러한 부영양화는 위에서 언급했듯이 수질 악화를 초래할 수 있는데 하구에 따라 부영양화에 대한 반응 민감도가 다르다. 그 이유는 바로 식물플랑크톤의 생산성은 영양염류뿐만 아니라 소비자에 의한 섭식량에 의해서도 결정되

기 때문이다. 이러한 이유로 생태계의 효율적인 수질관리를 위해서는 일차생산자의 양과 질을 결정하는 조절인자들에 대한 정확한 진단이 선행되어야 한다. 국내에도 섬진강과 같이 담수와 해수가 교환하는 자연적인 하구가 존재하지만 대부분의 대형 하구들은 인공적인 하구언이나 수중보가 건설되었다. 이들 하구들의 식물플랑크톤 역학이나 수질에 대한 연구가 상당부분 이루어 졌지만 다양한 물리, 화학적 환경조건을 가진 하구들을 거시적 관점 (생태계 차원)에서 비교·검토한 문헌은 거의 없는 실정이다. 환경부에서는 또한 국내 하천 및 호소를 대상으로 1989년 1월부터 실시한 수질측정망 조사를 통해 많은 장기적 자료를 확보하였지만 이들 자료에 대한 동향 분석 결과는 아직까지 보고되지 않았다. 따라서 본 논문에서는 국내 하구의 식물플랑크톤과 수질에 대한 기존 자료 및 문헌 조사를 토대로 이들의 현황과 장기적 동향을 파악하여 비교·분석하고 이들 결과가 연안 하구의 수층 기초 생산량의 관리측면에서 무엇을 의미하는지를 살펴보았다.

재료 및 방법

본 연구에서 사용된 장기적 자료는 환경부에서 국내 하천 및 호소를 대상으로 1989년 1월부터 2004년 1월까지 실시한 수질측정망 조사를 통해 얻어진 자료들이다. 2003년도 환경부에서 고시한 수질측정망 운영계획에 의하면 하천수의 조사항목 중 수위 또는 유량, pH, DO, BOD, COD, SS, 총질소, NH₃-N, NO₃-N, 총인, 수온, 페놀류, 전기전도도, 분원성 대장균군수, 총대장균군수는 매월 조사를 하여 1년에 12회에 걸쳐 이루어지고 있고, DN, DP, PO₄-P, 클로로필 *a*, Cd, CN, Pb, Cr⁺⁶, As, Hg, ABS는 3, 6, 9, 12월에 조사하여 조사회수는 1년에 4회이다. PCB, 유기인, TCE, PCE는 매년 7월에 1회 조사하고 있다. 호소수의 경우 클로로필과 DTN, DTP, PO₄-P를 매월 실시한다는 점이 하천수와는 다르다. 상수원수의 하천수는 pH, BOD, SS, DO, 대장균군수를 월 1회 이상 실시하게 되어있으며, Cd, As, CN, Hg, Pb, Cr⁺⁶, F, Se, NH₃-N, NO₃-N, 페놀류, ABS, 카바릴, 1,1,1-트리클로로에탄, TCE, PCE, PCB, 유기인은 3, 6, 9, 12월에 조사하여 매년 4회 실시하고 있다.

본 연구에서 사용된 자료는 수질 항목으로 표층의 총질소, 총인, 영양염 (암모니아, 질산, 인산염), pH, DO (용존산소) 등과 식물플랑크톤의 생체량을 나타내는 클로로필 *a* (chlorophyll *a*)이며 채집 정점은 Fig. 1에 표시되어 있

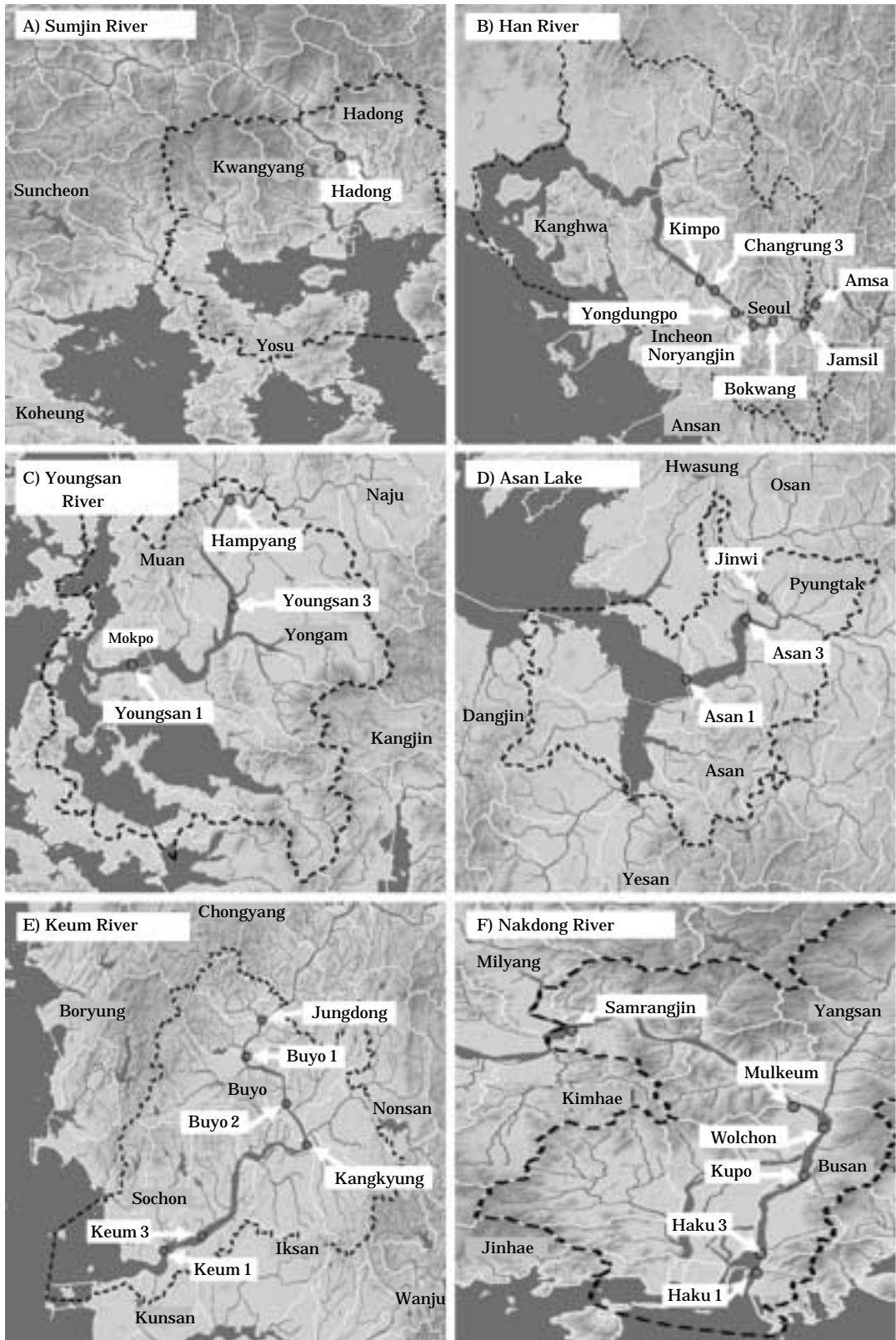


Fig. 1. Water quality monitoring (Ministry of Environment) stations in the Sumjin River (A), Han River (B), Youngsan River (C), Lake Asan (D), Keum River (E), and Nakdong River (F).

다. 이 정점들 중에서 상수원수의 하천수는 한강의 암사, 영산강의 함평, 낙동강의 삼랑진과 물금 등이고 호소수는 영산강의 영산호3과 영산호1, 아산만의 아산호3과 아산호1, 금강의 금강하구3, 금강하구1 등이며 나머지 정점은 모두 하천수에 포함된다. 시·공간적 분포 조사를 위해 정점별로 3월에서 5월은 봄, 6월에서 8월은 여름, 9월에서 11월은 가을, 12월에서 2월에 채집된 자료는 겨울철로 포함시켜 평균값을 취하였으며 영양염 제한을 조사하기 위하여 암모니아, 질산의 합과 인산염의 상대적인 비 (molar ratio)를 구하여 redfield ratio인 16 : 1 (redfield, 1958)보다 작으면 질소 제한 (N limitation), 크면 인 제한 (P limitation) 가능성이 많은 것으로 판단하였다. 환경부 수질측정망 자료 외에도 일반 보고서나 문헌 자료들도 사용되었다.

결과 및 고찰

1. 섬진강 하구역

1) 플랑크톤 현황

섬진강은 국내에서 유일하게 하구연이 축조되지 않아 전형적인 하구의 특성이 존재하는 유일한 시스템으로 양 등 (2003)의 조사결과에 의하면 식물플랑크톤 생체량 (클로로필 a)은 2000년 4월과 2002년 2월에 형성된 대발생 (bloom)을 제외하고 여름철보다는 가을철에 생체량이 높게 나타났고 겨울보다는 봄철에 높게 분포함을 알 수 있다 (Fig. 2). 공간적으로는 염분도가 5~15 psu인 범위에서 대발생이 형성된다. 이러한 시공간적 분포는 비슷한 위도 (37°)에 위치한 미국 동부의 York River estuary와

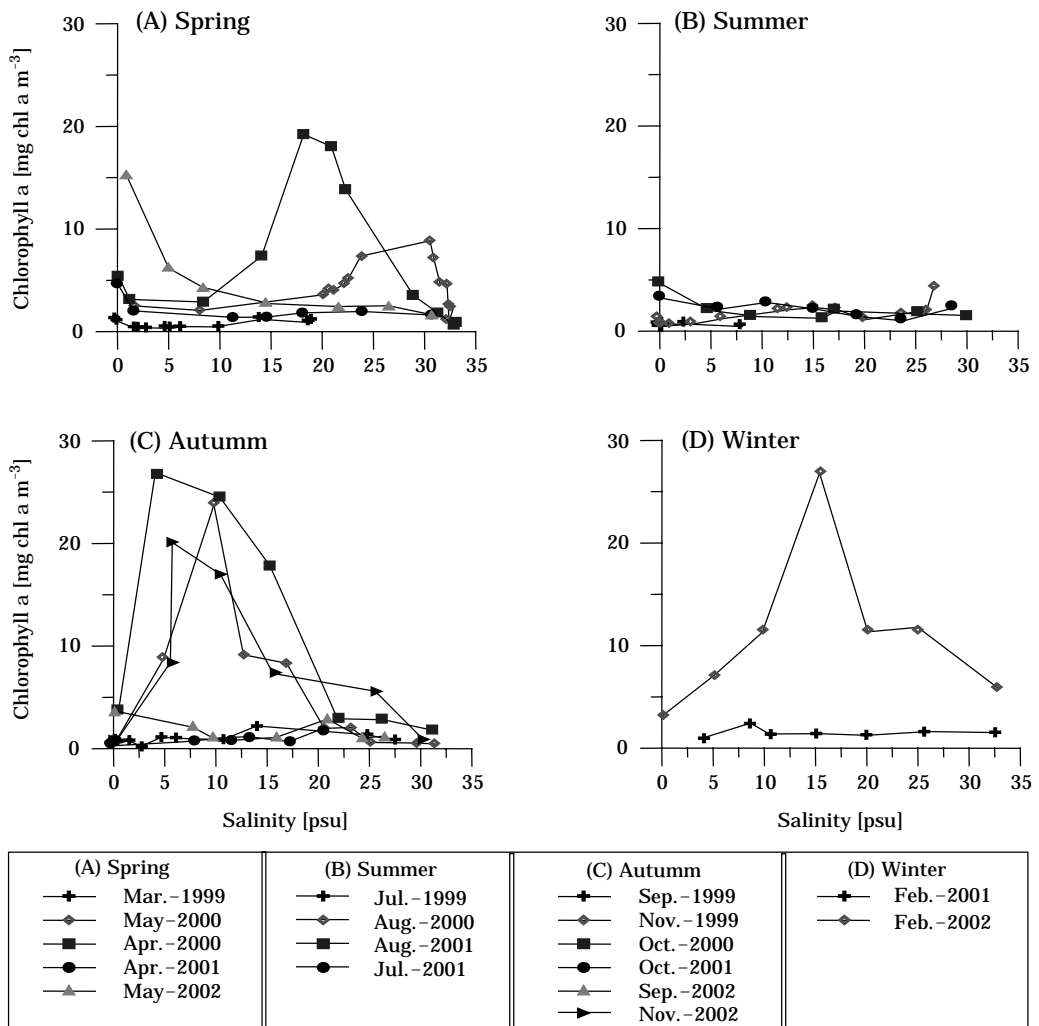


Fig. 2. Phytoplankton biomass along salinity gradient in the Sumjin River (citation of the figure from Yang *et al.* (2003)).

비교했을 때 공간적으로 어느 정도 비슷한 형태를 띠지만 계절적으로 상이한 분포를 보여준다. York River estuary에서는 10~15 psu 사이에서 가을보다는 강우기인 겨울과 봄에 대발생이 나타난다 (Sin *et al.*, 1999). 섬진강의 식물플랑크톤 종 구성을 보면 diatom이 전체질에 걸쳐 우점하여 총 62.5%의 비율을 보였고 다음으로 dinoflagellate가 17.7%, green algae가 11.5%의 비율로 나타났다 (권 등, 2001). 이외에도 blue-green algae (3.1%), cryptomonads (1.0%), euglenoids (2%), silicoflagellate (2.1%) 등이 출현하였다. 권 등 (2001)은 또한 저염분역은 녹조류의 종수가 비교적 높았지만 고염분역은 와편모조류의 종수가 높게 나타났다고 보고하고 있다. 가을철 (1999년 11월)에 5~15 psu에서 발생한 bloom의 주종은 diatom인 *Skeletonema costatum*으로 밝혀졌다.

권 등 (2001)에 따르면 동물플랑크톤은 총 83개의 분류군이 검색되었고 해산 분류군이 총 72개로 요각류가 34개 분류군을 차지하고 담수 분류군은 총 11개로 수서 곤충류가 대부분을 차지하였다. 섬진강의 염분에 따른 분포를 보면 동물플랑크톤의 종수와 개체수가 중염분역에서 가을철에 감소하고 있음을 알 수 있다. 심 등 (1984)은 식물플랑크톤의 개체수와 동물플랑크톤의 생체량 사이에 밀접한 음의 상관관계가 있다고 보고한 바 있어 광양만에서 식물플랑크톤의 생체량이 동물플랑크톤의 포식압의 영향 (top-down)을 받는다고 할 수 있겠으나 20년 동안의 지형적 변화 내지는 오염 부하량을 고려했을 때 현재의 메카니즘을 확인해 볼 필요가 있다.

2) 수질 현황

환경부에서 1989년 1월부터 2004년 4월까지 실시한 수질측정망 자료를 보면 하동 수역에서 총인은 분명한 장기적인 추세가 없지만 (자료 미제시) 총질소는 점차 확연하게 증가하는 추세를 보여 준다 (Fig. 3A). 용존 무기염류의 경우 질산은 미세하게 증가하고 암모니아와 인산염은 확연한 경향을 나타내지 않고 있다 (Fig. 3B). 수중 생물들이 생존하는데 필요한 용존산소는 1995년까지는 증가하다가 1996년 이후부터는 다시 감소하는 추세를 보이지만 pH는 전체적으로 약간 감소하는 경향을 띤다 (Fig. 3C). 클로로필 *a*의 경우는 자료의 부족으로 장기적인 추세를 파악할 수가 없었다. 풍수기인 여름철에 최고치를 보여주는 부유입자물질 (suspended solid)은 장기적인 증가나 감소가 발견되지 않았다.

섬진강에서 계절에 따른 표층 염분도의 분포를 보면 갈수기인 2000년 3월에는 난초도에서 상류지역으로 30 km 지점까지 해수가 영향을 미치고 풍수기인 1999년 7

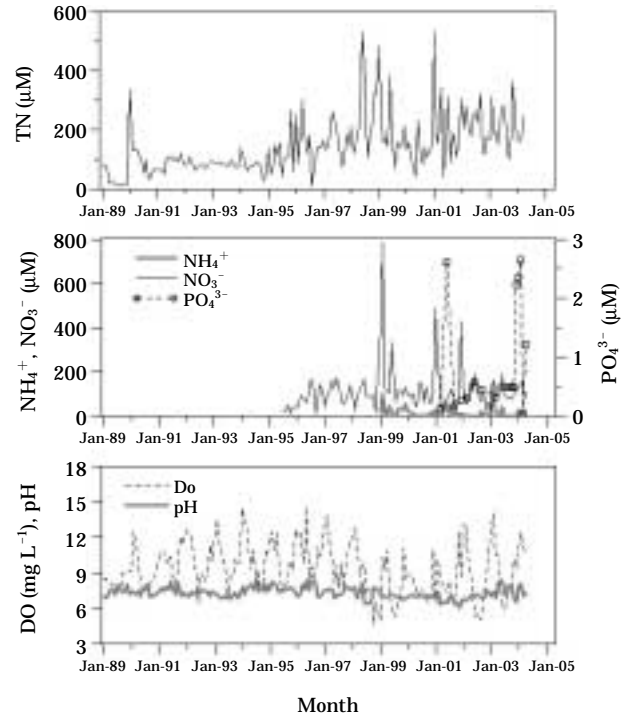


Fig. 3. Long-term trend in the concentrations of total nitrogen (TN), nutrients (ammonium, nitrate, orthophosphate), dissolved oxygen (DO) and pH (monitoring data collected by Ministry of Environment monthly) at the Hadong station in the Sumjin River.

월에는 담수가 난초도 5 km 전방 지점까지 영향을 미치고 있음을 알 수 있다 (양 등, 2003). 또한 염분과 영양염의 분포를 보면 질산과 규산질은 담수 유입과 함께 육상으로부터 공급되어 고염분역에서 제거되고 암모니아는 특별한 공급원과 제거를 보여주지 않았고 인은 육상보다는 해양 (광양만)이 공급원으로 작용하고 있음을 확인할 수 있다 (권 등, 2004). 이러한 결과는 섬진강 하류와 섬진강 하구와 인접한 여수해만에서 질산 및 규산질의 공급원은 섬진강이고, 인산염의 공급원은 광양만 주변에서 나오는 생활하수나 공장폐수라는 주장 (Moon, 1990; Kim, 1992)과 일치하고, 이 등 (2001, 2004)도 광양만 남쪽에 위치한 여천공단내의 인광석을 처리하는 남해화학에서 유입되는 용존 무기인이 광양만의 인산염 농도를 높게 한다고 보고한 바 있다. 따라서 권 등 (2004)은 상류에 큰 도시나 오염시설이 없어 인산염의 유입이 적은 섬진강의 특성이 다른 하구역과 달리 상부역보다 하구역에서 농도가 높고, 해양에서 하구로 유입되는 인산 염의 거동양상을 보이게 하는 원인인 것으로 판단하였다. 암모니

아는 계절이나 공간적으로 일정한 거동양상을 보이지 않았는데 이에 대해 권 등 (2004)은 하구 내에서의 공급은 담수와 해수의 혼합으로 발생하는 지화학적 과정보다는 본류 이외의 불특정한 공급원에 의해 유입되는 것으로 추론하였다. 하지만 일반적으로 암모니아나 인산염은 여름철이나 가을철에 수온이 상승하면서 퇴적층의 미생물들에 의해 재순환되고 이렇게 재순환된 암모니아나 인산염은 수층의 기초생산자들에게 중요한 영양염 공급원으로 작용한다 (Kemp and Boynton, 1984). 따라서 퇴적층으로부터의 영양염 공급 (benthic nutrient flux)에 대한 조사는 명확한 메커니즘을 파악하는데 도움이 될 것이다.

3) 식물플랑크톤 생체량 변화와 관리

식물플랑크톤에 의한 섬진강의 기초생산량은 저염분역에서는 담수유입과 함께 공급되는 질소 영양염 (특히 질산)으로 인한 인 제한 (P limitation)에 의해 조절되고 고염분역에서는 질소 제한 (N limitation)에 의해 조절된다고 보고되었다 (이 등, 2004). 다시 말하면 저염분역에서 만약 인산염이 유입되면 식물플랑크톤 생체량의 증가를 초래하고 역으로 고염분역에서는 질산이나 암모니아 같은 무기 질소가 유입되면 식물플랑크톤 생체량의 급증을 초래하게 된다는 것이다. 섬진강 본류에는 대도시나 공업단지보다는 지리산과 같은 청정지역이 위치하고 있어 수질이 비교적 좋지만 강 입구에는 광양제철, 여천화학단지, 하동화력발전소 및 광양 콘테이너 부두 등과 같은 대단위 공업단지와 광양시 및 여천시로부터 폐수와 생활하수가 배출되고 갯벌을 매립해 산업단지 (울촌산단)를 조성하면서 퇴적상 변화 및 하구의 생태계 변화를 초래하였다 (류, 2003; 정 등, 1997). 또한 섬진강 하류에서 많은 준설이 이루어져 수심이 깊어짐으로서 해수의 역류범위가 증가하여 염수에 의한 피해가 발생하고 있다. 따라서 갯벌 면적의 감소는 폐수나 생활하수 등의 오염물질 정화 능력의 감소를 야기하고 점오염원 및 비점오염원을 통해 증가된 영양염 (특히 암모니아)은 고염분역에서 식물플랑크톤 생체량을 급격하게 증가시킬 수 있다. 2003년 4월에 광양만 광양콘테이너 부두와 울촌산단 사이의 해역에서 실시한 현장 조사에서 식물플랑크톤의 생체량 (chlorophyll a)이 $36 \mu\text{g L}^{-1}$ 까지 도달하는 대발생을 목격하였다. 이러한 갈수기의 대발생은 인근 산업단지에서 유입될 수 있는 암모니아나 인산염과 같은 용존 무기 영양염의 영향이라 사료된다. 20년전의 조사에서도 규조류인 *Rhizosolenia delicatula*의 개체수와 암모니아가 밀접한 관계가 있다고 보고되었다 (심 등, 1984). 광양만의 경우 평균 수심이 얕고 광양, 하동, 암해 및 여천 등에 둘러 싸

여 반폐쇄적인 시스템으로 유속이 느려 체류시간이 길 것이기 때문에 영양염과 광량이 어느 정도 확보되면 쉽게 식물플랑크톤 생체량의 증가를 초래할 것이다. 또한 수심이 얕고 탁도가 높지 않아 수층에 광량이 풍부한 까닭에 광양만은 저서미세조류 (benthic microalgae)가 성장하기에 좋은 환경이고 실제로 Kang et al. (2001)은 이들 저서미세조류가 광양만 해양생태계의 중요 먹이원이라 하였다. 동물플랑크톤과 같은 상위소비자의 섭식이 활발하지 못하게 되면 급작스런 식물플랑크톤 생체량의 증가는 퇴적층의 유기물 증가를 초래하고 이는 곧 미생물의 분해 작용에 의한 산소 고갈로 이어져 저산소층 (hypoxia)을 형성하게 된다. 또한 고염분역에서 점오염원을 통해 유입된 인산염은 해수의 역류를 타고 저염분역까지 운반되어 수층혼합을 통해 표층에 공급됨으로서 식물플랑크톤 생체량의 증가를 초래할 수도 있다.

섬진강 본류에서의 식물플랑크톤에 대한 연구조사 결과는 혼하지 않고 특히 담수가 유입되는 fall line에서부터 강 입구까지 염분에 따른 플랑크톤 연구는 양 등 (2003)외에는 거의 전무한 실정이다. 양 등 (2003)은 식물플랑크톤 생체량에 대해 상당부분 조사했지만 퇴적층으로부터 재순환된 영양염이나 식물플랑크톤과 동물플랑크톤과의 상관성 내지는 상호작용에 대해서는 언급하지 않았다. 가령 강우기가 한참 지난 10월이나 11월에 5~15 psu 수역에서 식물플랑크톤 생체량이 급격히 증가하게 되는 기작을 설명하지 못하고 있고 이러한 구체적인 기작을 파악하기 위해서는 앞으로도 더욱 많은 연구가 이루어져야 된다고 본다.

광양만의 경우 기초생산량과 식물플랑크톤 생태에 대한 지속적이고 체계적인 연구가 이루어지지 않았고 검증된 연구 결과들을 찾기 힘든 상황에서 하구 수질 및 생태계의 생산성을 결정하는 식물플랑크톤과 같은 기초생산자들의 효율적 관리 대책을 마련하는 것은 쉽지 않을 것이다. 따라서 섬진강 하구를 효율적으로 관리하기 위해서는 먼저 기초 생산성을 결정하는 주요 환경인자들 (수층 광량 (탁도), 영양염 공급 및 제거 메커니즘, 체류시간, 상위소비자들에 의한 포식 등)에 대한 종합적이고 체계적인 조사를 통해 어떤 시점의 어떤 지점에서는 어떤 영양염이 식물플랑크톤 생체량을 조절하는지를 파악해야 구체적으로 어떻게 어떤 영양염의 공급을 줄일 것인지를 결정할 수 있을 것이다.

2. 한강 하구역

1) 플랑크톤 현황

환경부의 수질 측정망 자료 (1990~2004년 4월)를 분

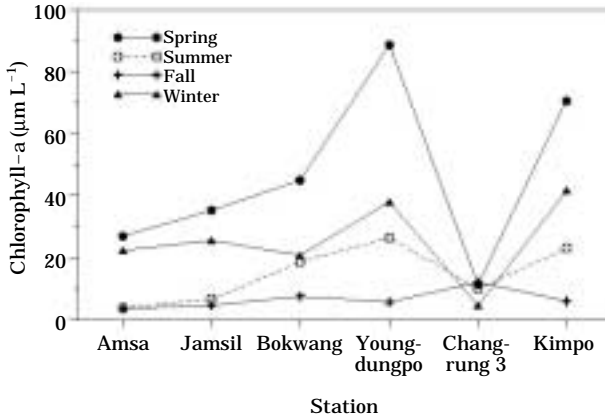


Fig. 4. Seasonal variations of phytoplankton biomass (chlorophyll a) from mid-regions to lower regions along the Han River system (monitoring data collected by Ministry of Environment monthly).

석한 결과, 식물플랑크톤의 생체량은 계절적으로는 봄철에 가장 높은 값을 보였고 가을철에 가장 낮은 생체량을 보였다 (Fig. 4). 정 등 (2004)의 2002년 2월부터 2002년 2월까지의 조사 결과에도 3월에 평균 65.99 µg L⁻¹로서 가장 높은 값을 보였고 하계에 감소한다고 보고하였다. 공간적인 분포에서는 팔당댐 아래에 위치한 암사정점에서 하류로 내려갈수록 생체량이 증가하다가 지류인 창릉천 입구에서 급격히 감소했다가 마지막 정점인 김포에서 다시 증가하는 양상을 띠고 있다 (Fig. 4). 정 등 (2004)도 비슷한 결과를 보였는데 팔당댐 아래의 정점 1에서 점차 증가하여 하류인 정점 6에서 최고치를 나타냈다. 1993년 6월부터 1994년 5월까지 측정된 일차생산성 자료를 보면 겨울철과 봄철에 높은 생산성을 보였고 가을철과 여름철 (최저치)에 낮은 생산성을 보였다 (Hyun et al., 2001). 식물플랑크톤의 종구성을 보면 diatom이 57.5%, green algae가 29.4%, blue-green algae가 5.5%, dinoflagellate가 3.0%, euglenoids와 기타종이 각각 2.0%, 2.5%를 차지했다 (정 등, 2003). 계절별로 우점한 종을 보면 봄과 겨울에는 규조류인 *Stephanodiscus hantzschii* f. *tenuis*가 우점했고 여름과 가을에는 역시 규조류인 *Aulacoseira granulata*가 우점하였다.

1989년과 1990년에 한강 하류에서 출현한 동물플랑크톤은 총 64종이고 지각류가 28종, 요각류가 19종, 윤충류가 17종이었고 우점종은 *Asplanchna priodonta*, *Brachionus calyciflorus*, *Bosmina longirostris* 그리고 *Cyclops vicinus*이었으며, 생체량은 여름과 가을에 최대치를 보였고 겨울철과 봄철에 상대적으로 낮은 개체수를 보였다 (You and Lim, 1991). 이는 먹이 생물인 식물플랑크톤의

생체량 분포와 상이한 결과로서 거시적인 관점에서 동물플랑크톤이 상위소비자로서 식물플랑크톤 생체량을 조절하고 있다고 사료된다.

2) 수질 현황

총인과 총질소는 중류에서 하류로 갈수록 증가하고 여름과 겨울철에 약간 높게 나타났다 (Fig. 5A, B). 영양염에서 질산은 계절이나 공간적 변동이 크지 않지만 추운 계절과 하류역에서 좀 더 높은 농도를 보였고 (Fig. 5C) 이 결과는 질산이 강우나 담수 유입의 영향을 많이 받는 것으로 나타나는 심진강과는 다르다고 할 수 있다. 암모니아와 인산염은 하류로 갈수록 증가하고 암모니아의 경우는 여름철에 좀 더 높은 농도를 나타냈다 (Fig. 5D, E). N:P molar ratio를 볼 때 중류지역은 잠재적 P limitation이 하류로 갈수록 약해지기는 하지만 역시 P limitation이 나타나는 전형적인 하구와는 다른 모습을 보이고 있다 (Fig. 5F).

총질소와 총인의 장기적 추세를 보면 팔당댐 아래의 암사정점에서 완만하게 감소하는 총인을 제외하면 모든 정점에서 증가추세이다 (Fig. 6). 특히 최근 들어 정체내지는 감소추세를 보이고 있는 김포정점을 제외하고 총질소의 경우 증가가 빠르게 진행되고 있다 (Fig. 6B). TN:TP ratio를 보면 암사와 노량진정점에서는 N:P ratio가 완만하게 증가하는데 김포정점에서는 완만하게 감소한다 (Fig. 6C). 영양염의 경우 암모니아는 암사정점을 제외하고는 나머지 두 정점에서 감소 추세인 반면 질산은 세 정점에서 모두 완만하게 증가한다 (Fig. 7A, B). 인산염은 노량진 정점에서 상당히 감소하는 것으로 나타났다 (Fig. 7C). DO는 세 정점 모두에서 점차 감소하고 있는 것으로 나타나 수질이 점차 악화되고 있는 것으로 판단된다 (Fig. 7D). 전기전도도가 김포정점에서 미세하게 감소하는 경향을 제외하고는 부유고형물질, pH 등은 명확한 증감 추세가 발견되지 않았다.

3) 한강 하구의 식물플랑크톤 생체량 변화와 관리

팔당댐 아래의 한강 중류에서의 식물플랑크톤 생체량 분포는 풍수기의 집중강우로 인한 수문개방과 함께 유입되는 담수의 영향을 많이 받을 것으로 사료된다. 담수 유입이 많은 계절인 여름철에는 식물플랑크톤의 생체량이 낮게 나타나고 오히려 갈수기인 겨울이나 봄에 높은 생체량을 보이기 때문이다. 이러한 현상은 심진강이나 낙동강과 같은 담수 유입이 많은 하구에서 나타나는 현상으로 빠른 유속으로 인해 (짧은 체류시간) 식물플랑크톤이 성장하기 전에 하류쪽으로 이동 되어버리기 때문인 것으로 사료된다. Sin et al. (1999)은 York River estuary에서

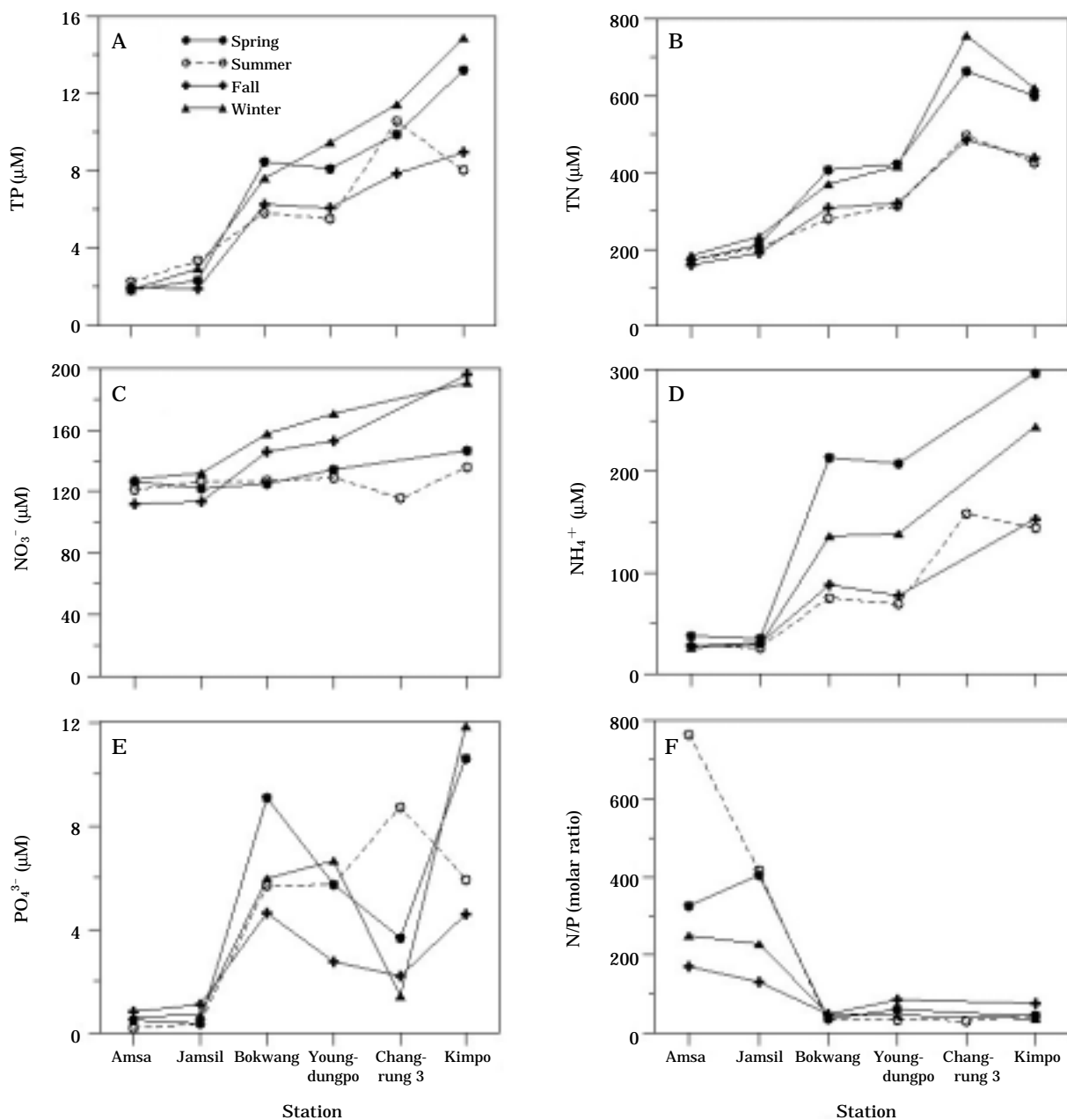


Fig. 5. Seasonal variations in the concentrations of TN, TP, nutrient including ammonium, nitrate, orthophosphate, and N : P molar ratio from mid-regions to lower regions along the Han River system (monitoring data collected by Ministry of Environment monthly).

실제로 유속과 성장속도를 비교함으로써 빠른 **flushing rates**가 식물플랑크톤의 생체량 증가를 제한한다고 보고 했다. 하지만 이렇게 풍수기에 팔당댐으로부터 유입되는 담수와 함께 영양염이 유입되고 있지는 않다. 특히 질산은 하구시스템에서 일반적으로 담수 유입이 공급원으로 작용하지만 한강의 경우는 그렇지 않고 오히려 한강 하류의 유입하천(왕숙천, 탄천, 중량천, 안양천 및 불광천

등)에서 유입되는 것으로 사료 된다. 물론 하수종말처리장으로부터의 유입 가능성도 배제할 수 없다. 영양염의 공간 분포를 보았을 때 암모니아와 인산염이 한강 하류에서 상당히 높게 나타나는데 하류에서 유입되는 이러한 영양염이 하류의 높은 기초 생산량의 자원이라 할 수 있다. 하류의 N:P ratio (31~84)가 중류(130~764)보다 상대적으로 낮기는 하지만 수치상으로 여전히 인 제한 가

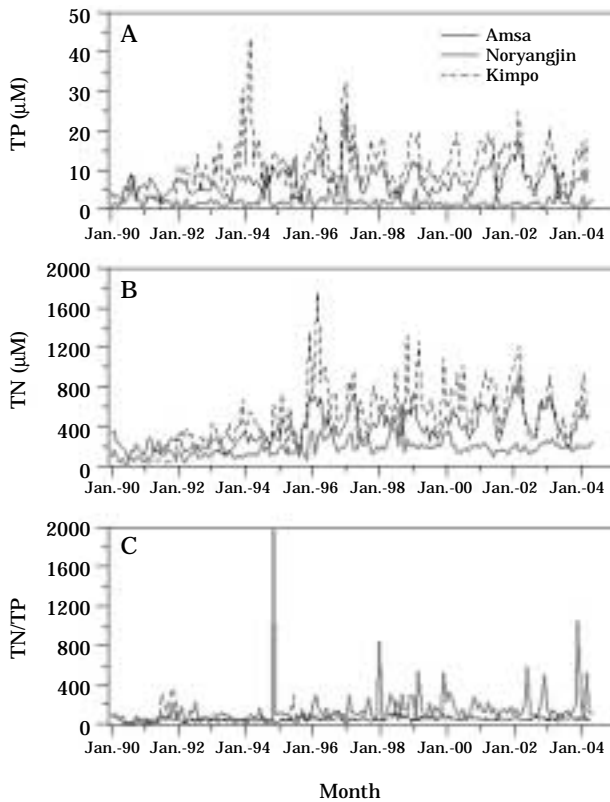


Fig. 6. Long-term trend in the concentrations of TN, TP and TN/TP molar ratio from the Amsa, Noryangjin, and Kimpo stations in the Han River (monitoring data collected by Ministry of Environment monthly).

능성을 보여주고 있어 (Fig. 5F) 인산염의 유입이 식물플랑크톤의 생체량 변동에 영향을 미칠 것으로 사료된다. 한강의 식물플랑크톤 생체량 (Fig. 4)을 보았을 때 섬진강 (Fig. 2)이나 새만금 하구 (2002년에 최대 19.8)보다 상당히 높게 나타나고 있어 수질 악화가 우려되고 실제로 표층의 DO (용존산소)의 농도가 완만하게 감소하고 있는 것으로 나타나고 있다 (Fig. 7D). 여름이나 가을철보다 겨울이나 봄철에 높은 식물플랑크톤 생체량을 보이는 것은 낮은 수온을 선호하는 규조류의 우점과 여름철의 빠른 유속으로 인한 생체량 증가의 제한 때문일 수 있고 상온에서 활발한 동물플랑크톤의 포식압 영향도 배제할 수 없다고 본다. 하지만 효율적인 수질관리를 위해서는 식물플랑크톤 생체량의 변동에 영향을 미치는 중요 환경인자들에 대한 복합적이고 생태 통합적인 조사가 이루어져야 하며 하류의 오염시설로부터 오염물질 부하량도 어느 정도 파악되어야 한다고 본다.

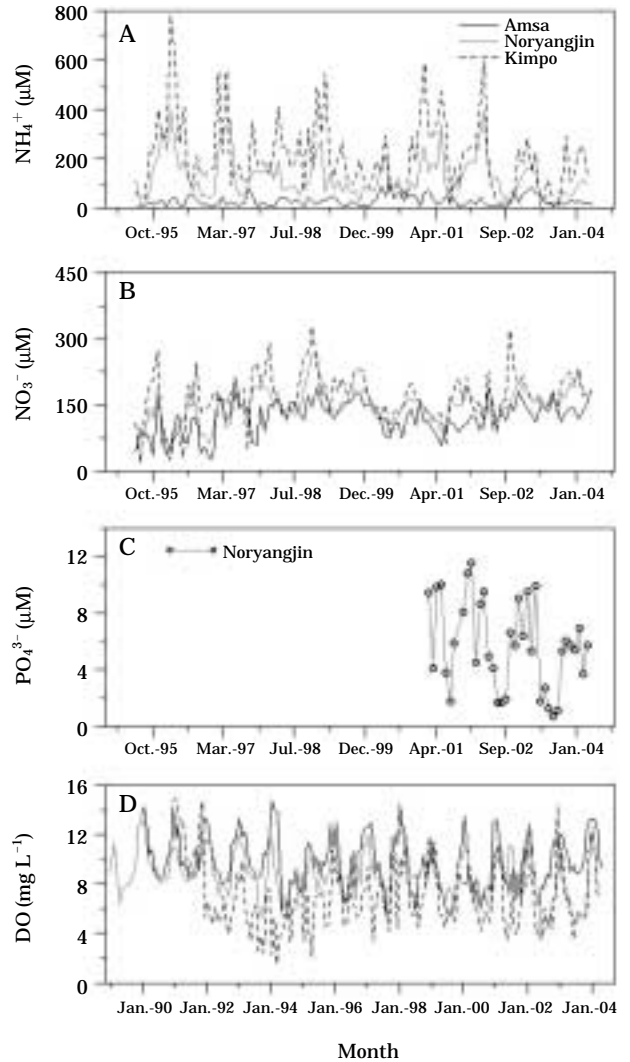


Fig. 7. Long-term trend in the concentrations of ammonium, nitrate, orthophosphate, and DO from the Amsa, Noryangjin, and Kimpo stations in the Han River (monitoring data collected by Ministry of Environment monthly).

3. 영산강 하구역

1) 플랑크톤 및 수질 현황

2001년 1월부터 2002년 2월까지 표층 식물플랑크톤 생체량의 공간 분포를 살펴보면 (신과 조, 2003), 영산호 상류 (하구언으로부터 56 km 지점)쪽에서 높은 생체량을 보이다가 하류가 갈수록 낮아지는 양상을 보인다 (Fig. 8A). 영양염도 식물플랑크톤과 마찬가지로 하류보다는 상류에서 높은 농도를 보이고 있다 (Fig. 8B). 수층의 탁도를 나타내는 광소산계수 (K_d)의 분포를 보면 상류보다 하류에서 낮은 탁도를 나타냈다 (Fig. 8C). N : P molar

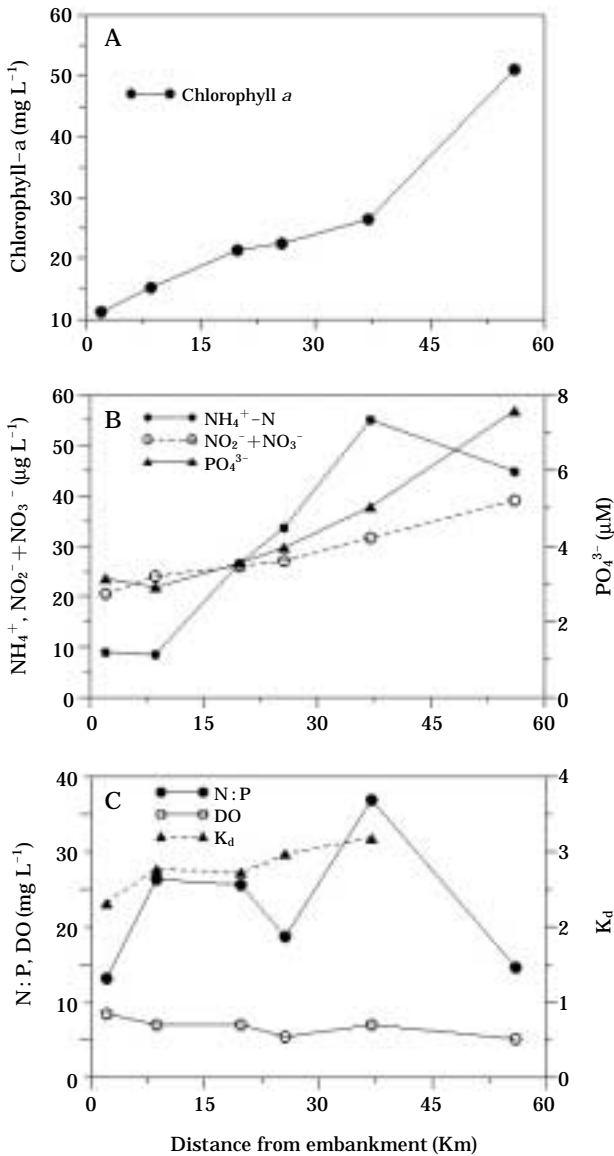


Fig. 8. Spatial distributions of chlorophyll *a*, nutrient (ammonium, nitrite+nitrate, and orthophosphate), N : P molar ratio, DO in bottom water and light attenuation coefficients (K_d) in the Youngsan River (annual mean data from January 2001 to February 2002).

ratio는 상류에서는 N limitation (potential)을 보이다 바로 아래의 정점에서 P limitation이 나타나고 ratio가 점차 감소하여 하류에서 다시 N에 의해 성장이 제한되는 형태를 보였다. 식물플랑크톤의 계절적인 분포를 보면 봄철에 가장 높게 나타났고 가을, 여름이 중간이고 겨울에 가장 낮은 농도를 보였다 (Fig. 9A). 탁도는 가을에 가장 높았고 겨울에 가장 낮았고 저층의 DO의 농도는 여름철

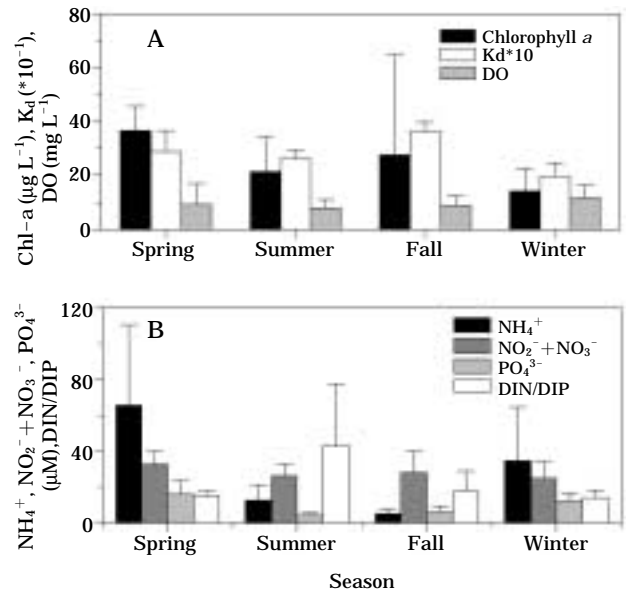


Fig. 9. Seasonal variations of chlorophyll *a*, light attenuation coefficients (K_d), DO (bottom), ammonium, nitrite+nitrate, orthophosphate and N : P molar ratio from 5 stations along the axis of the Youngsan River.

에 가장 낮고 겨울에 가장 높았다 (Fig. 9A). 영양염은 전체적으로 봄철에 가장 높았다 (Fig. 9B). 특히 암모니아는 봄철에 매우 높은 농도를 보였고 겨울에도 상당히 높은 농도를 나타냈지만 가을에는 낮은 농도를 유지하였다. 아질산+질산은 계절적으로 큰 변동이 없었는데 이는 풍수기의 담수 유입이 주요 공급원으로 작용하고 있지 않음을 보여준다. 인산염은 따뜻한 계절인 여름이나 가을보다 봄과 겨울에 더 높은 농도를 나타냈는데 이는 재순환에 의한 공급보다는 점오염원을 통한 공급이 상대적으로 많기 때문인 것으로 사료된다. 영양염의 상·중·하류(함평, 하구언3, 하구언1 정점)의 총인과 총질소의 장기적인 추세를 보면 총인은 완만하게 증가하는 반면 총질소는 좀 더 빠르게 증가하고 있는 것으로 나타났다 (Fig. 10A, B). TN:TP ratio는 아주 완만하게 증가하는 경향을 보였다 (Fig. 10C).

김 (2003)의 종 조성 조사를 보면 green algae가 42%로 가장 많았는데 이는 diatom이 우점했던 다른 강들과 다른 결과이다. 다음으로 30.3%를 차지한 diatom이 많았고 euglenoids가 13.5%, blue-green algae가 8.4%, chrypsophyceae가 3.3%, dinoflagellate와 Xanthophyceae가 각각 1.5%와 1.0%를 차지했다. 다양도 지수는 0.14부터 1.58범위에서 평균 1.14의 지수를 보였다.

영산강 하구언의 수문 개방시 많은 양의 담수가 유입

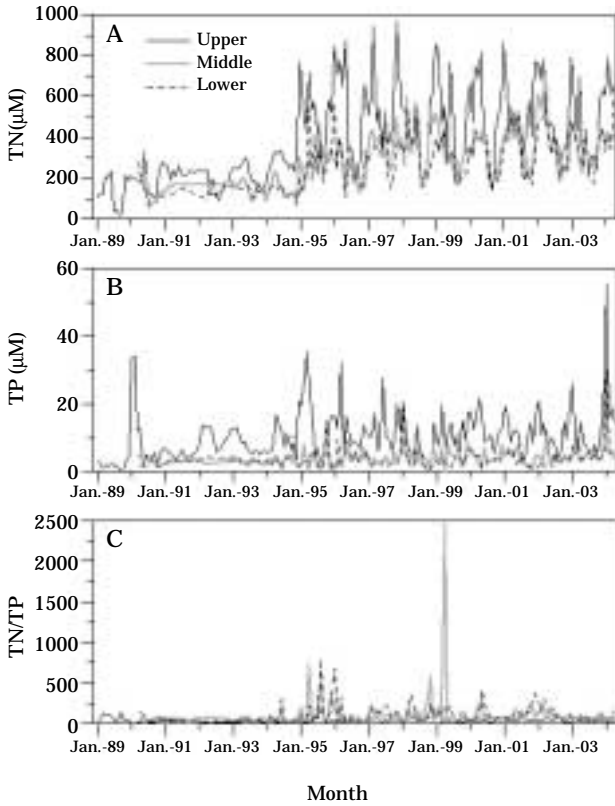


Fig. 10. Long-term trend in the concentrations of TN, TP and TN/TP molar ratio from the Hampyung (upper), Youngsan-Ho 3 (mid) and Youngsan-Ho 1 (lower) stations in the Youngsan River (monitoring data collected by Ministry of Environment monthly).

되는 목포해역에서 담수유입의 영향에 대한 조사를 2003년 10월부터 2004년 9월까지 실시한 결과(신과 서, 2005)에 따르면 영산강 하구연의 인위적 수문 개폐에 따라 영산강 수층의 물성의 변화 외에도 일차생산자인 식물플랑크톤과 상위소비자인 동물플랑크톤의 크기구조 및 생체량의 상당한 변화를 나타내며 식물플랑크톤 대발생의 생성과 사멸에는 영양염이나 포식압보다는 탁도, 유속(flushing rate), 수온과 같은 물리적 환경 변화의 영향이 상대적으로 크다고 하였다.

서남해역에 출현하는 동물플랑크톤은 전체적으로 요각류, 지각류, 화살벌레류, 크릴새우류 등이 주로 우점하고 있고 요각류는 신안권역에서 년중 50% 이상의 높은 출현 비율을 나타내었다(서, 미발표). 전형적 육식자인 화살벌레류의 출현 비율은 신안군 해역에서 여름과 겨울에 상대적으로 높게 나타났으며, 유생의 출현 비율은 수온이 상승하는 여름철에 상대적으로 증가하였다.

3) 영산강 하구의 식물플랑크톤 생체량 변화와 관리

영산호의 일차 생산량은 봄에 상류 쪽에서 높은 값을 보이고 있다. 상류지역에서 높은 식물플랑크톤 생체량을 보이는 것은 영양염 그중에서도 암모니아나 인산염과 같은 재순환성 영양염의 영향이 크다고 본다. 특히 상류에서는 P가 제한 요소로 작용하는 일반 강들과는 달리 영산호에서는 N:P molar ratio가 14.7 (Fig. 8B)로 잠재적으로 N에 의해 성장이 제한되고 있는 것으로 나타나 암모니아의 영향이 생체량을 결정하는 결정적인 요인으로 작용하고 있다고 사료된다. 물론 단순히 N과 P의 상대적인 비로만 제한 영양염을 정확하게 파악하는 것은 한계가 있으므로 영양염 추가 실험(bioassay)이 수행되어야 할 것이다. 참고적으로 암모니아의 농도가 봄철에 최대치를 보였고 봄철에 농도가 증가하는 이유는 상류지역의 오염시설로 부터의 점오염원의 영양염 유입일 가능성이 존재한다. 비록 탁도가 상류에서 높게 나타났지만 이는 생체량 증감에 큰 영향을 주지 못한 것으로 보이고 광량보다는 암모니아와 같은 영양염의 인자를 중요한 것으로 사료된다. 특히 장기적인 추세로 급격하게 증가하고 있는 총질소의 농도를 고려했을 때 영산호의 효율적 수질관리를 위해서는 이러한 점오염성의 영양염 유입에 대한 조사가 어느 정도 이루어져야 한다고 본다.

목포 해역은 영산강 하구연의 수문 개방으로 인한 담수 유입의 영향을 많이 받는 것으로 사료된다. 높은 농도를 보인 식물플랑크톤의 대발생은 수문을 개방하지 않은 시점에 하구연 바로 아래 해역에서 나타나며 외해로 갈수록 그 양이 감소하고 있고 세포의 크기 또한 감소했다. 따라서 부정기적으로 이루어지는 수문개방에 따른 목포해역의 물성 내지는 수질의 변화가 나타나고 식물플랑크톤이나 동물플랑크톤과 같은 부유 생태계에 적지 않은 영향을 미치는 것으로 나타나 수문개방과 관련된 목포해역의 생태계 및 수질관리가 필요할 것으로 판단된다.

4. 아산만 하구역

1) 플랑크톤 및 수질 현황

신과 전(2002)이 1997년에 실시한 아산호의 생태학적 조사 결과를 보면 아산만은 매우 높은 기초 생산량을 보였다. 3월에 상류에서는 클로로필 a가 100 µg L⁻¹ 이상의 높은 생체량을 나타냈고 하류로 갈수록 감소했다. 7월에는 평균 176.4 ± 121.7 µg L⁻¹로 녹조현상이 발생했고 아산호 중간지점에서 매우 높게 나타났지만 9월에는 전 수역에서 녹조현상이 발생했고 339.4 ± 171.2 µg L⁻¹로 아주 높은 분포를 보였다. 11월에는 49.3 ± 29.5 µg L⁻¹로 낮게

나타났지만 전체적으로 보았을 때 아주 높은 기초 생산량을 보였다. 영양염 중에서 암모니아는 3월에 가장 높고 녹조가 발생한 7월과 9월에 가장 낮았으며 질산은 7월에 가장 높고 11월에 가장 낮은 농도를 보였다 (신과 전, 2002). 인산염도 암모니아와 비슷하게 3월에 가장 높고 9월에 가장 낮게 나타났다. 환경부의 환경측정망 자료 분석 결과 영양염들은 대부분 상류에서 높게 나타났으며 이는 신과 전 (2002)의 조사 결과와 일치한다. 장기적인 추세를 보면 총인은 완만하게 감소하지만 총질소는 어느 정도 기울기를 가지고 증가하며 (최근에는 감소추세) 이러한 증가는 TN:TP molar ratio를 더욱 증가시키는 결과를 낳았다 (Fig. 11). 질산은 전반적으로 증가하지만 암모니아나 인산염은 전체적으로 감소하는 경향을 나타냈다 (Fig. 12A-C). 본 연구 결과에서 표층 DO는 증감 추세가 확실하게 나타나지 않았지만 (자료 미제시) 부유입 자물질 (SS)은 상류에서는 감소추세, 중-하류에서는 미소한 증가 추세를 보였다 (Fig. 12D).

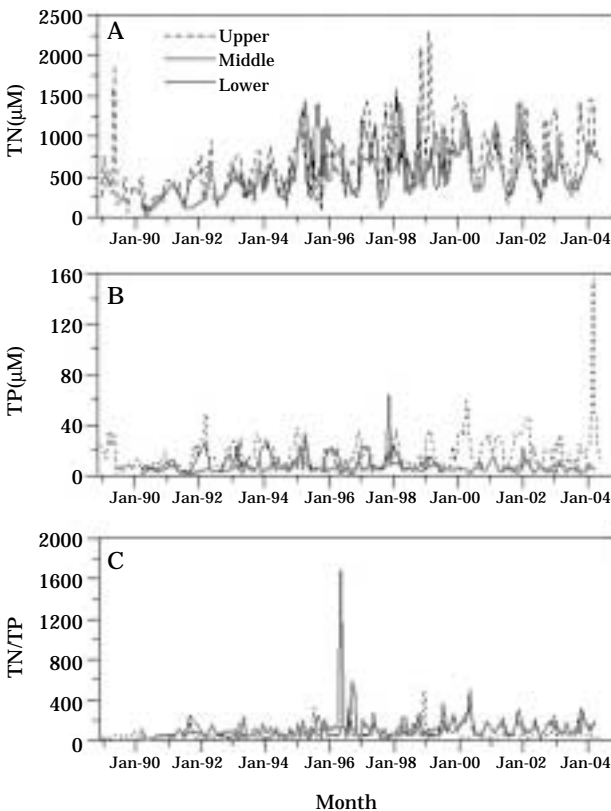


Fig. 11. Long-term trend in the concentrations of TN, TP and TN/TP molar ratio from the Jinwui-Cheon 3 (upper), Asan-Ho 3 (mid) and Asan-Ho 1 (lower) stations in the Lake Asan (monitoring data collected by Ministry of Environment monthly).

아산호의 식물플랑크톤 중 구성을 보면 green algae가 51%로 가장 많이 존재하였고 다음으로 diatom이 29%, blue-green algae가 12%를 차지하였다 (신과 김, 2002). Dinoflagellate나 euglenoids, cryptophyceae, chryso-phyceae 등은 5% 미만으로 발견되었다. 계절적으로는 *Micratinum pusillum*과 같은 녹조와 *Microcystis aeruginosa*와 같은 남조류가 많이 출현하였다. 종 다양성 지수는 7월과 8월에 가장 낮았고 평균적으로 1.87을 나타냈다.

아산만 (아산방조제 외측 해역)의 수질과 기초 생산량

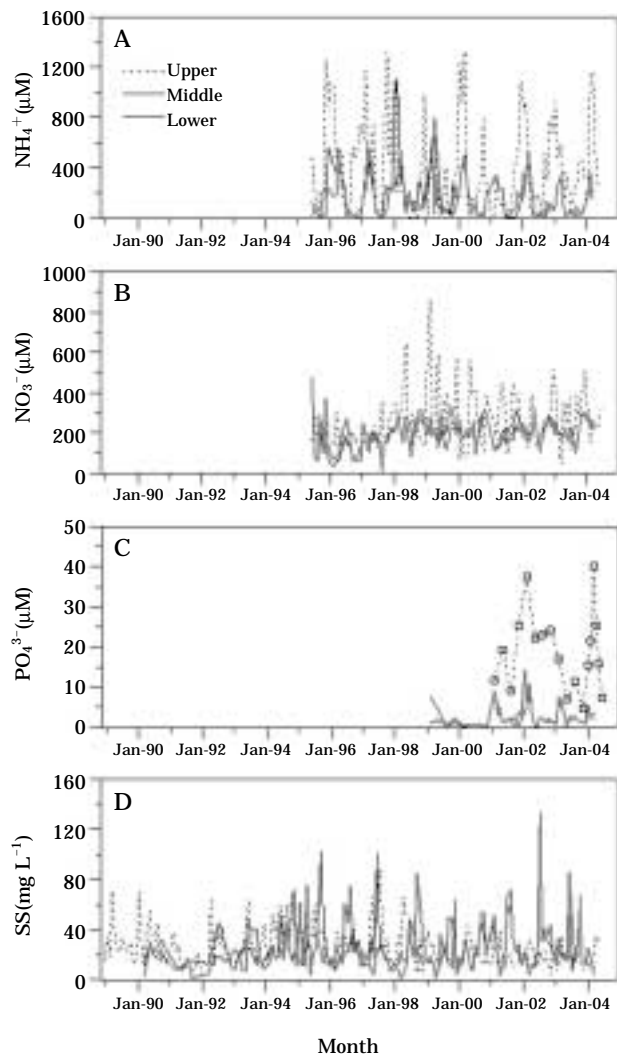


Fig. 12. Long-term trend in the concentrations of ammonium, nitrate, orthophosphate, and suspended solids from the Jinwui-Cheon 3 (upper), Asan-Ho 3 (mid) and Asan-Ho 1 (lower) stations in the Youngsan River (monitoring data collected by Ministry of Environment monthly).

분포를 보면 (현 등, 2005) 아산만 역시 수문개방으로 인한 담수 유입이 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 식물플랑크톤의 생체량은 전체적으로 내만 쪽에서 높게 나타났다. 내만에서는 2, 3, 4월초에 높게 나타났고 외만에서는 4월초에만 높은 농도를 보였다 (Fig. 13). 질산염, 암모니아, 규산염 그리고 인산염이 전체적으로 내만으로 유입되는 담수의 영향으로 내만에서 높은 농도를 보이고 외만으로 갈수록 낮아지기 때문이다. 이러한 담수의 유입이 영양염 분포에 미치는 영향은 1992년 5월과 8월의 영양염 공간 분포를 제시한 문 등 (1993)의 연구 결과에서도 확인할 수 있다. 5월의 dilution plot을 보면 외만으로 갈수록 증가하는 인산염을 제외하면 질산, 암모니아, 규산염은 내만에서 높은 농도를 보이다 점차 감소하지만 외만쪽 (32 psu 근처)에서 다시 증가하는 형태를 띤다. 하지만 풍수기인 8월에는 암모니아를 제외한 질산, 인산염,

규산염은 외만으로 갈수록 감소하는 (역상관) 형태를 보임으로서 담수유입이 이들 영양염의 주공급원임을 암시한다.

2) 식물플랑크톤 생체량 변화와 관리

아산호에서의 식물플랑크톤 생체량은 다른 강에 비해서 상당히 높은 값을 보이고 있다 (신과 전, 2002). 식물플랑크톤 생체량에 대한 장기적인 자료가 많지 않아 전체적인 조사 결과는 없지만 아산호 하류 정점의 클로로필 a는 장기적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 하류의 탁도 또한 증가 추세이다. 더구나 질산의 증가가 확인되고 있는 만큼 이러한 영양염이 아산호 상류의 지천을 통해 유입되는 것을 어느 정도 줄일 필요가 있겠다. 영양염의 농도 분포를 살펴보았을때 안성천보다는 진위천의 영양염 유입을 관리할 필요가 있겠다. 계절적으로는 여름철에 녹조 발생이 심화되고 특히 남조류의 대발생이 빈번하고 다른 강들과 달리 인산염도 지천을 통해 유입되고 있으므로 인산염에 대한 특별한 관리가 필요하다고 본다. 아산만의 경우 식물플랑크톤의 생체량이 기본적으로 수문개방과 함께 유입되는 영양염에 의해 조절된다고 보지만 조류나 해류와 같은 물리적인 작용도 상당부분 영향을 미치고 또한 상위소비자인 동물플랑크톤과의 상호작용도 영향을 미친다고 본다. 가령 아산만 지역은 조류의 소통이 만의 남쪽 해안을 따라 만의 북쪽으로 흘러 상대적으로 내만에서는 조류의 흐름이 적고 유속이 완만하다는 특징을 가지고 있는데 이러한 체류시간의 변화는 기초 생산량을 결정하는 중요한 요소로 작용하기 때문이다. 목포해역과 마찬가지로 기초 생산량의 변동 요인을 규명하기 위해서는 담수 유입과 연관하여 물리, 화학, 생물학적 인자들에 대한 좀 더 체계적인 조사가 이루어져야 비로소 아산만의 수질이나 생태계의 효율적인 관리가 가능할 것이다.

5. 금강 하구역

1) 플랑크톤 및 수질 현황

환경부의 수질측정망 자료에서 금강의 식물플랑크톤 분포를 보면 하류지점을 제외하고는 명확한 계절변화를 찾아볼 수 없다 (Fig. 14A). 하류 정점에서만 장기간의 생체량 조사가 이루어졌기 때문에 계절적 특성이 적은 것이 실제로 금강에서 일어나는 현상인지는 확실치 않다 (Fig. 15C 참조). 하류정점에서는 겨울에 높은 생체량을 보였으며 겨울에는 상류에서 하류로 갈수록 높아지는 경향을 보였다 (Fig. 14A). 영양염은 전체적으로 겨울철에 높게 나타났으며 겨울과 봄에 특히 질산과 암모니아가

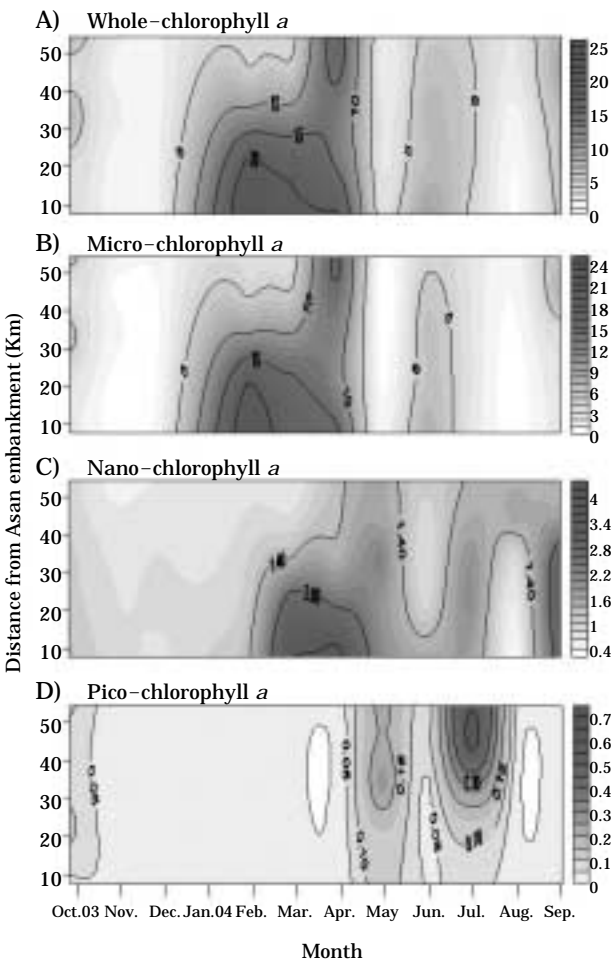


Fig. 13. Spatial and temporal variations of chlorophyll a concentrations in the Asan Bay outside the Asan and Sapkyo dikes (Hyun et al., 2005).

다른 계절에 비해서 높게 분포하였다 (Fig. 14B, C). 다른 시스템들처럼 영양염의 공간적 변동 또한 확연하게 나타나지 않았다. 총질소는 모든 상, 중, 하류에서 모두 증가하고 있는 것으로 나타났고 총인은 장기적으로 상류와 하류에서는 감소하는 추세고 중류에서만 증가하고 있는 것으로 나타났다 (Fig. 15A, B) 식물플랑크톤 생체량은 하류에서 1999년까지 증가하다 이후 감소하고 최근에 다시 약간 증가하는 것으로 나타났고 암모니아는 감소하는

반면 인산염은 증가하고 있는 것으로 나타났다 (Fig. 15C, D). 영양염을 N:P ratio로 분류했을 때 P limitation이 전 수역에 나타나는 것으로 확인되었다 (자료 미제시).

금강 상류에서는 담수성 diatom이 절대적인 우세 (59%)를 보였으며 상류에서 출현한 식물플랑크톤의 종수는 중, 하류 (조 등, 1995)에 비해 매우 적었던 것으로 보고 되었다 (김 등, 1997). 금강 중, 하류에서는 green algae가 46%로 가장 빈번히 출현했고 diatom과 blue-green algae

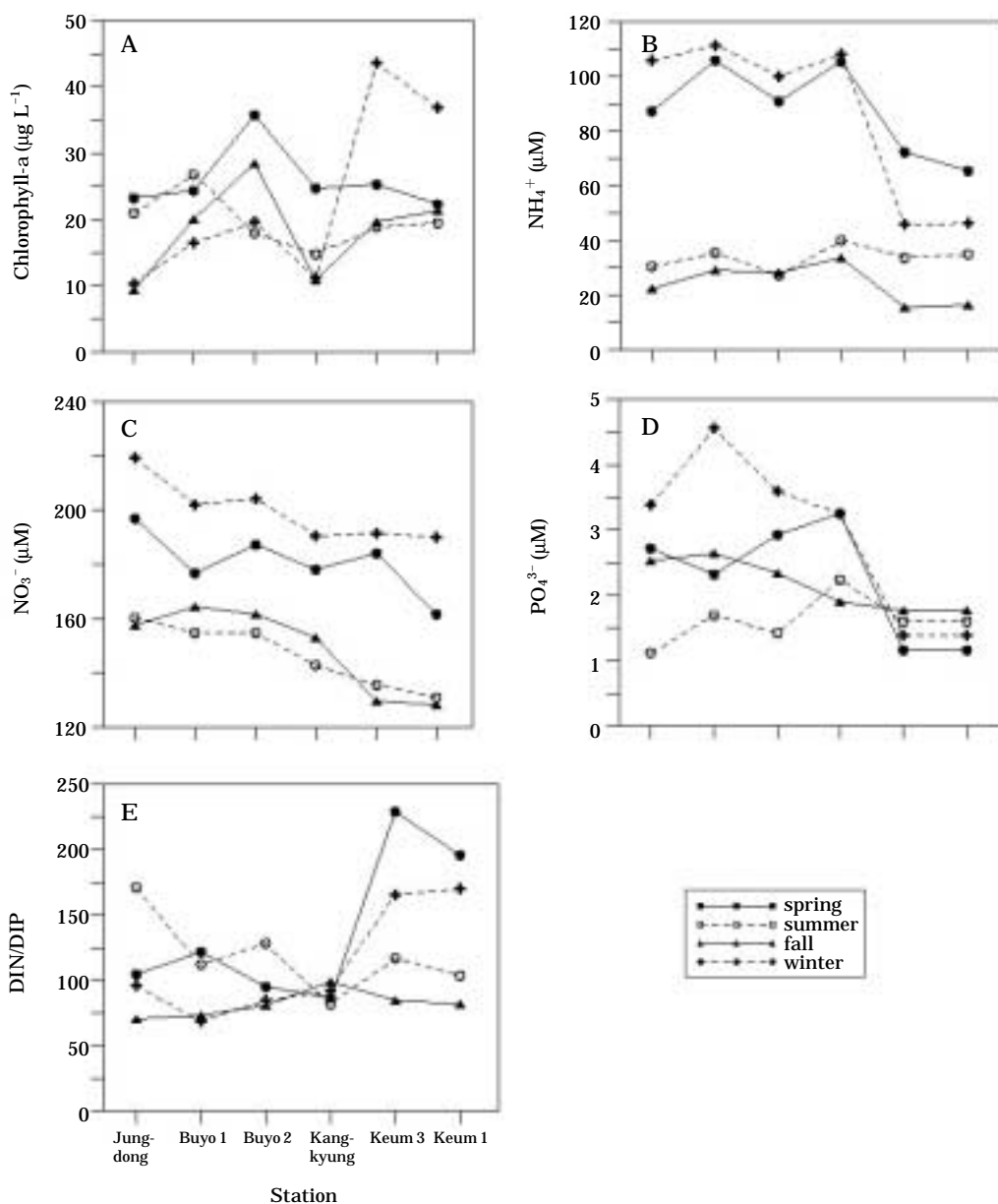


Fig. 14. Seasonal variations in the concentrations of chlorophyll *a* (phytoplankton biomass), nutrient including ammonium, nitrate, orthophosphate, and N:P molar ratio from upper regions to lower regions along the Keum River system (Ministry of Environment monitoring data monthly except orthophosphate (quarterly)).

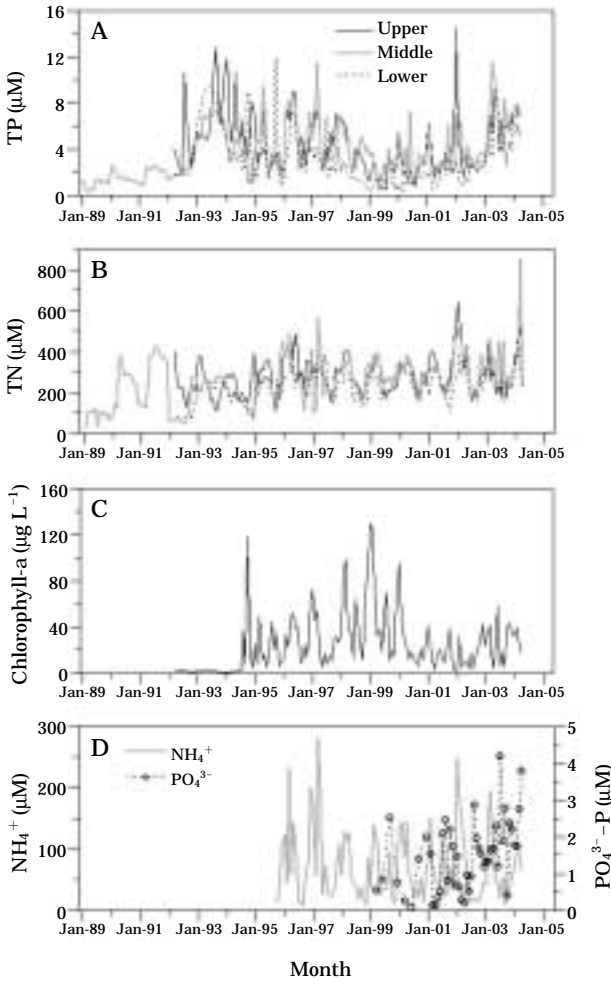


Fig. 15. Long-term trend in the concentrations of TN, TP and TN/TP molar ratio from the Jungdong (upper), Kangkyung (middle) and Keumganghaku1 (lower) stations in the Keum River (monitoring data collected by Ministry of Environment monthly).

가 그 뒤를 이었다(김 등, 1996). Euglenoids도 6.6%를 차지했고 dinoflagellate, cryptomonads, xanthophyceae 등이 나머지를 차지했다.

이와 양(1997)에 의하면 금강 하구언 아래 해역에서 500일간의 조사를 통해 식물플랑크톤 생체량이 7월보다 4월에 높게 ($20 \sim 30 \mu\text{g L}^{-1}$) 나타났고 이는 부유입자물질 농도의 감소로 인해 빛 투과율이 증가함으로써 엽록소 농도가 증가한 것으로 사료된다고 하였다. 이러한 부유입자물질의 농도는 조류에 비례하였고 영양염의 농도가 수문 개방을 통한 담수 유입량과 비례하게 나타났다고 보고했는데 이러한 결과는 다른 하구역과 비슷하다 할 수 있다.

2) 식물플랑크톤 생체량 변화와 관리

금강 하구역에서는 자료가 충분하지 않아 기초 생산량의 시공간적 변동을 파악하기가 쉽지 않았다. 하지만 금강 중, 하류에서 인산염의 꾸준한 증가를 확인할 수 있었고 총질소나 클로로필 a 그리고 탁도(SS)가 증가 추세이므로 부영양화에 대한 대책을 마련해야 된다고 본다. 또 금강 하구 해역에서는 하구언의 건설이후로 기초 생산량이 증가하고 영양염 또한 하구언 건설전보다 높아진 것으로 보고되어 있는바(이와 양, 1997) 금강 하구언 수문 개방을 통한 담수 유입에 대한 관리도 병행되어야 할 것이다.

6. 낙동강

1) 플랑크톤 및 수질 현황

낙동강 본류에서 1994년 2월부터 2004년 4월까지의 식물플랑크톤 생체량의 분포(환경부 수질측정망 자료)를 보면 평균적으로 겨울에 가장 높은 농도를 보였고 가을과 여름에 낮은 농도를 나타냈다. 겨울과 봄에는 상류에서 높은 생체량이 나타났고 하류에서 낮게 나타났으며 여름과 가을에는 변화가 크지 않았다(Fig. 16A). 영양염의 경우 계절적 변동이 적은 인산염을 제외하고는 여름과 가을보다는 겨울과 봄에 질산과 암모니아의 농도가 높게 나타났으며 N:P molar ratio도 이 두 계절에 상당히 높게 나타났다(Fig. 16B-E). 이러한 결과는 연중 거의 모든 지역에서 P limitation의 잠재력이 나타나고 이러한 P limitation은 겨울에 낙동강 하구에서 두드러진 것으로 드러났다. 총질소는 97년 1월 정도까지는 증가하다가 이후 다소 감소하는 경향을 보였고 총인은 상류, 중류에서 1996년까지 증가하다가 이후 미소하게 감소하는 경향을 나타냈지만 하류에서는 최근들어 증가하는 추세이다(Fig. 17A, B). TN:TP ratio는 최근에 계절적 변동의 크기가 상당히 감소했다(Fig. 17C). 암모니아와 질산은 장기적 추세에서 점차 감소하는 것으로 나타났지만 인산염은 증가하고 있는 경향을 나타냈다. 탁도를 나타내는 SS 농도도 점차 증가하는 추세인데 특히 최대치(peaks)의 크기가 증가하고 있음을 확인할 수 있다(Fig. 18A-D).

종 구성을 보면 diatom이 42.9%로 다수를 차지했고 다음으로 green algae와 blue-green algae가 각각 23.1%와 20.3%를 차지했는데 blue-green algae의 우점은 다른 강 시스템들과 다른 결과라 하겠다. 이러한 그룹에서 중류에서는 여름철에 *Dictyosphaerium pulchellum*과 같은 녹조류가 겨울철에는 *Navicula cryptotenulla*와 같은

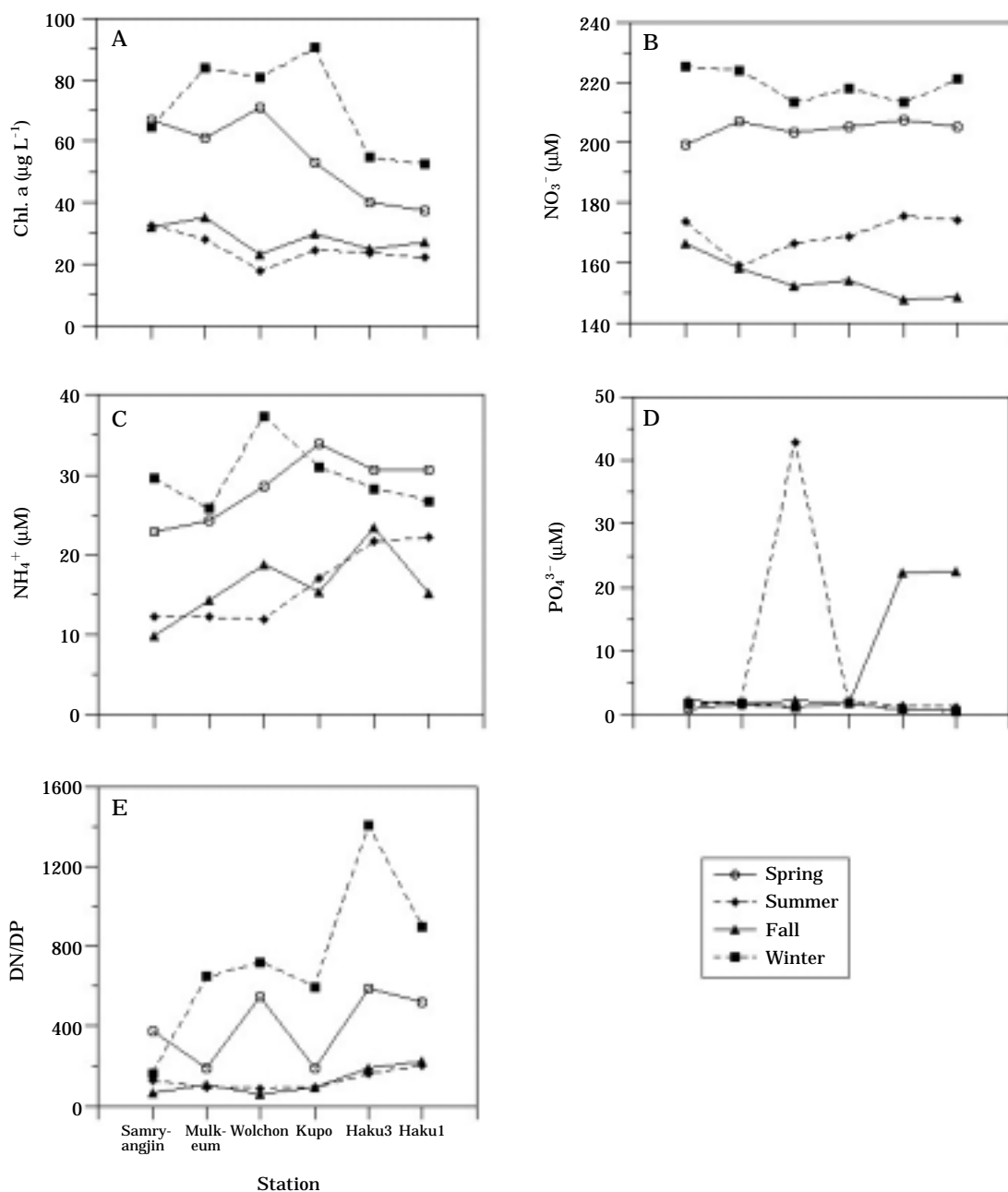


Fig. 16. Seasonal variations in the concentrations of chlorophyll *a* (phytoplankton biomass), nutrient including ammonium, nitrate, orthophosphate, and N:P molar ratio from upper regions to lower regions along the Nakdong River system (monitoring data collected by Ministry of Environment monthly).

규조류가 우점하였고 하류에서는 여름철에 *Microcystis aeruginosa* (남조류)가 겨울철에는 *Stephanodiscus hantzschii* (규조류)가 우점 하였다(이 등, 2002).

2) 식물플랑크톤 생체량 변화와 관리

신 등(2002)은 낙동강 중·하류수역에서 1997년 1월부터 1999년 12월 사이의 조사 연구에서 생체량의 최대

발생 지점이 강수량에 따른 하천유량의 증감에 의해 조절된다고 하였다. 조와 신(1995)은 낙동강 중·하류의 식물플랑크톤 생체량이 겨울철에도 최대량이 발생할 수 있는데 겨울에는 저온성 규조류가 대발생하고 영양염 과다 유입이 그 원인이라고 보고하였다. 조와 신(1998)은 또한 낙동강 하류에서 남조류 *Microcystis aeruginosa*가

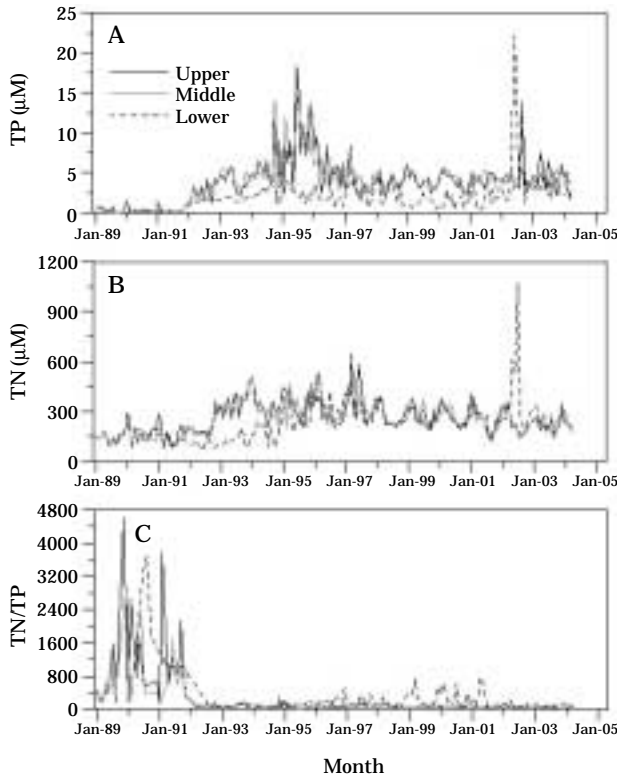


Fig. 17. Long-term trend in the concentrations of TN, TP and TN/TP molar ratio from the Samryangjin (upper), Kupo (middle) and Haku 1 (lower) stations in the Nakdong River (monitoring data collected by Ministry of Environment monthly)

대발생한 여름에는 암모니아 농도가 상대적으로 낮았고 규조류 *Stephanodiscus hantzschii* f. *tenuis*가 대발생한 겨울에는 규산염 및 인산염이 거의 고갈상태에 도달하기 때문에, 여름에는 암모니아가 겨울에는 인산염과 규산염이 기초 생산량을 결정하는 중요한 영양염이라고 했다. 결국 낙동강에서는 여름과 겨울에 수온이나 영양염 등 환경변화에 적응하는 식물플랑크톤의 종 천이가 일어나면서 전체적으로 높은 기초 생산량을 보이는 부영양화된 시스템이라 할 수 있겠다. 낙동강에서 bioassay 또는 TN/TP 분석을 토대로 담수조류의 성장에 P 영양염 첨가의 영향이 계절에 관계없이 일어났는데 (조와 신, 1996) 이것은 환경부 수질측정망 자료 결과 (Fig. 16E)와도 일치한다. 특히 인산염의 장기적 증가 추세와 낙동강 하류의 긴 체류시간을 고려했을 때 인산염의 저감은 낙동강 수질 악화를 방지하는 지름길이라 하겠다. 하지만 동물플랑크톤이 식물플랑크톤의 생체량을 조절한다는 연구 결과 (Kim et al., 2003)도 존재하고 광량의 중요성 (Jeon

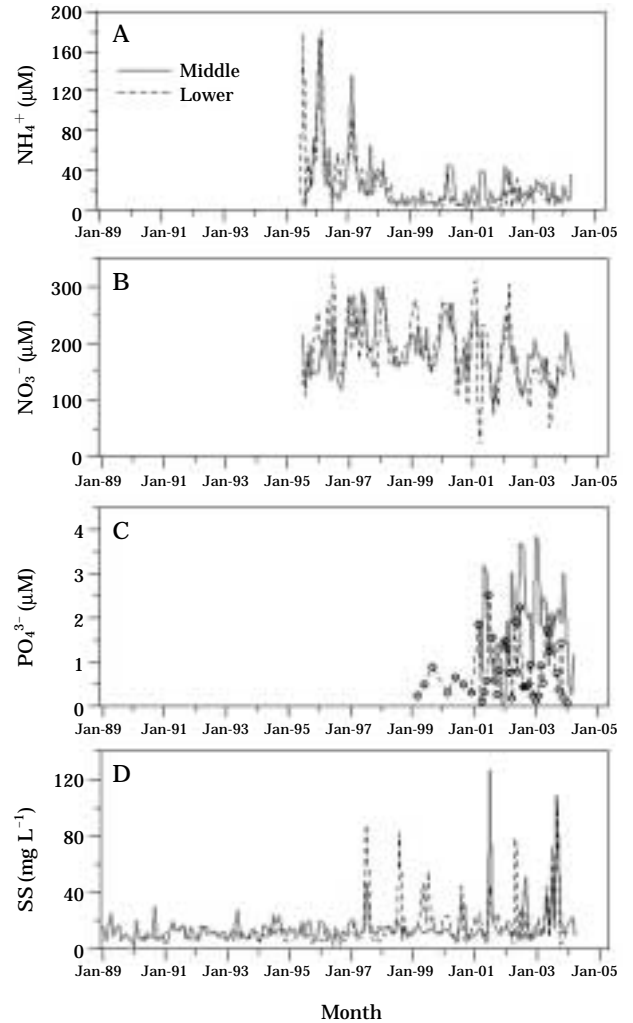


Fig. 18. Long-term trend in the concentrations of ammonium, nitrate, orthophosphate, and suspended solids from the Samryangjin (upper), Kupo (middle) and Haku 1 (lower) stations in the Nakdong River (monitoring data collected by Ministry of Environment monthly).

and Cho, 2004)도 강조 되었기에 낙동강의 효율적인 수질 관리를 위해서는 식물플랑크톤의 역학에 대한 통합적인 조사 연구가 필요하다고 본다. 낙동강 본류에 비해 낙동강 하구 해역에 대한 연구 조사는 흔치 않으며 양 등 (2001)은 낙동강 하구역의 식물플랑크톤의 군집구조 및 종조성과 생산력 그리고 하구환경 변화에 미치는 가장 큰 영향은 담수 유입량이라 하였다. 문과 최 (1991)와 정 등 (2000)도 담수 유입의 중요성을 강조하였다. 하지만 풍수기, 갈수기 각 1회의 조사이거나 수문개방 등 해수순환에 대한 자료 부족 때문에 하구 변화를 이해하는 것은

한계가 있다고 지적하였다.

총 합

국내·외적으로 매우 생산적인 시스템으로 알려진 하구역의 개념은 담수와 해수가 만나는 수역이라기보다는 육지와 해양을 연결하는 고리역할을 하는 수역이라고 해야 할 것이다. 강우시 담수 유입을 통해 흘러들어오는 여러 물질 내지는 생물들을 여러 물리, 화학, 생물학적 작용을 거쳐 해수로 전달해 주기 때문이다. 이러한 이유로 인해 하구역에서는 물리, 화학, 생물학적 구배 (gradient)가 심하고 이렇듯 다양한 환경아래에서 적응해온 다양한 생물들이 서식하고 있다. 하지만 복잡한 환경과 생물들 그리고 생물들과 환경 내지는 생물들간의 상호작용 때문에 하구역의 동태를 이해하기가 쉽지 않다. 이러한 자연적인 어려움 외에도 연안으로의 인구 증가 내지는 산업 활동의 증가로 인한 추가적인 오염물질의 유입 증가도 예견된다. 국내에서는 전형적인 하구는 섬진강이 유일하지만 준설내지는 골재채취, 갯벌의 매립 등으로 몸살을 앓고 있는 실정이며 나머지 하구들은 하구언 내지는 수중보의 건설로 하구 고유의 특성을 잃어 버렸다. 하구언 외측의 해수역은 비록 인위적이기는 하지만 하구언의 수문개방 등을 통해 담수가 유입되므로 대부분 아직 하구의 특성을 어느 정도 가지고 있다고 볼 수 있지만 담수 유입에 대한 해양 생태계의 반응 조사 등을 통해 하구의 기능을 상실하기 전에 이들 해수 하구역들에 대한 관리가 필요하다고 하겠다.

하구의 중요한 특징 중의 하나는 상류에서 일어나는 생물학적, 화학적 작용들이 하구 지형에 따라 변하면서 하류의 생태에 영향을 미친다는 'river continuum (하천의 연속성)'이라 할 수 있는데 이는 국내의 섬진강 하구와 새만금 하구를 제외하고 나머지 하구에서는 찾아보기 힘든 개념이다. 새만금 하구도 일부 개방된 구간을 통해 어느 정도 'river continuum'을 보이고 있지만 방조제가 완성되면 사라질 것이다 (신, 2003). 이렇듯 강과 바다의 연결고리가 상실됨으로서 담수 수역과 해수 수역의 생태계 특히 기초 생산량들이 변하고 있다고 볼 수 있겠다. 연결고리가 단절된 하구는 본 연구의 여러 문헌과 자료 조사에서 나타나듯이 방조제 건조후의 담수 수역은 대부분 부영양화가 나타나고 있고 일부 방조제 밖의 해수 수역도 식물플랑크톤의 우점종 변화 내지는 영양염 농도 변화 (문과 최, 1991; 이와 양, 1997)가 보고되어 있다. 본 조사 결과에서도 방조제가 건설된 하구에서 좀 더 높은

식물플랑크톤 생체량을 보여주고 있다. 하구언이 없는 섬진강에서 가장 높았던 가을철 (2000년 10월)의 평균 chlorophyll *a* 농도는 $11.5 \pm 11.2 \mu\text{g L}^{-1}$ (Fig. 2)이었지만 하구언이나 수중보가 존재하는 낙동강, 아산호, 한강, 영산강 및 금강의 년평균 농도 (환경부 수질측정망 자료)는 각각 $44.8 \pm 22.1 \mu\text{g L}^{-1}$ (Fig. 16), $29.7 \pm 15.0 \mu\text{g L}^{-1}$, $23.2 \pm 21.6 \mu\text{g L}^{-1}$ (Fig. 4), $22.4 \pm 13.3 \mu\text{g L}^{-1}$, $21.7 \pm 8.4 \mu\text{g L}^{-1}$ (Fig. 14참조)이었다. 또한 담수역의 경우 유역의 도시나 산업이 발달한 낙동강이나 아산호 등이 상대적으로 낙후된 유역을 가진 금강이나 섬진강보다 식물플랑크톤 생체량이 다소 높게 나타났는데 이는 점오염원 뿐만 아니라 비점오염원에 대한 관리의 필요성을 나타내는 결과라 사료된다. 하지만 영양염의 관리에 있어서 각 하구의 식물플랑크톤 생체량에 영향을 미치는 민감 영양염의 종류를 파악할 필요가 있고 또 절대적인 양만을 줄이기보다는 상대적인 비 (TN/TP나 DIN/DIP)를 고려해야 할 것이고 제한 영양염의 계절별 내지는 수계 내의 지역별 변동도 파악하면서 관리해야 할 것으로 사료된다. 식물플랑크톤 대변성이 형성되었던 계절을 보면 낙동강, 한강, 영산강, 아산호 등은 추운 계절인 겨울과 봄철이었던 반면 섬진강은 여름과 가을에 주로 형성되었다. 상류, 중류 및 하류에 대한 정확한 정의가 필요하겠지만 대변성의 공간분포를 보면 상류에서는 영산강, 하류에서는 한강 그리고 섬진강, 낙동강 및 아산호는 중류와 하류 사이에서 대변성이 발생하였다. 기초 생산량의 질이라 할 수 있는 종 분포를 보면 섬진강, 새만금, 한강, 낙동강에서는 규조류가 우점 하였고 아산호와 영산강에서는 녹조류가 우점 하였다. 영양염 분포를 보면 질산은 한강을 제외하고 담수를 통해 유입되고 섬진강과 한강에서는 고염분 해역의 암모니아, 인산염 재순환 혹은 점오염원으로부터 유입되는 것으로 사료되고 영산강을 제외하고는 대부분 담수역에서는 P limitation, 해수역에서는 N limitation의 가능성이 많은 것으로 보인다. 이렇듯 국내 하구에 따라 나타나는 기초 생산 및 환경 특성이 다양하기에 일률적인 관리 대책보다는 그 하구 특성에 맞는 특화된 대책이 필요하다고 하겠다. 실제 미국 동부에 위치한 가장 큰 만인 Chesapeake Bay의 경우에도 질소보다는 인이 기초 생산량을 결정하는 주요 영양염이라 하여 한동안 인을 획기적으로 줄였지만 수질이 많이 개선되지 않았고 최근에는 질소가 주요 영양염이라 하여 다시 질소 쪽으로 초점이 맞추어지는 오류를 범하기도 하였다. 결국 기초 생산량을 적절하게 유지하여 건강한 생태계로 보전하기 위해서는 각 하구역에 대한 일차생산자 및 플랑크톤들에 대한 기초적인 조사가 이루어져야 하고 장기적 동향이나

시스템적인 현상 (behavior)에 대해서도 이해를 해야 할 것이다. 국내에서는 일차생산자나 동물플랑크톤의 종 구성에 대한 연구는 많지만 정작 이들의 생산량이나 변동에 영향을 미치는 기작(특히 수리학적인 기작) 연구는 미진하다고 볼 수 있으며 또 생물들 간의 상호작용에 대한 연구는 거의 전무하다시피 하다. 또한 생태계의 건강 혹은 복원정도를 평가하는데 사용되는 생태 건강지수나 현재 식물플랑크톤 연구에 유용하게 사용되는 생태계 모델의 이용도 찾기 힘든 상황이다. 요즘에는 한 생물 자체에 대한 연구와 더불어 환경과 다른 생물간의 상호작용 나아가 한 시스템에 대한 행동 (behavior)에 대한 연구 (holistic approach)가 활발하고 이러한 연구는 하구와 같이 복잡한 수 환경을 시스템적이고 통합적으로 관리하는데 있어서 필수적인 과정이라 할 수 있겠다. 자료를 정리 하면서 담수에서는 인산염과 클로로필 *a*, 저층 용존산소에 대한 장기적 자료가 많지 않고 하구의 담수역에 비해 해수역에서의 식물플랑크톤 생태에 대한 자료가 적다는 것을 확인 할 수 있었다. 끝으로 본 논문의 결과는 제한된 자료 안에서 거시적 관점에서 얻어진 것이라는 한계가 분명 존재하지만 각 하구 시스템들이 서로 다른 독특한 특성을 가지고 있음을 확인할 수 있었고 각 시스템들에 대한 나름대로의 특성을 고려하여 추가적인 연구 조사와 관리가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

적 요

일차생산자인 식물플랑크톤의 생체량 (클로로필 *a*)과 수질의 장기적 자료 (환경부수질측정망)를 분석하여 국내 하구역 (섬진강, 한강, 아산호 (만), 영산강, 금강, 낙동강)의 일차생산자와 수질의 추세 (trend)에 대하여 조사하였다. 식물플랑크톤의 생체량과 수질에 영향을 미치는 환경인자들에 대한 문헌이나 보고서 검토도 이루어졌다. 국내에서 하구연구가 없는 유일한 하구인 섬진강은 다른 전형적인 하구와 유사한 특성을 나타내었다. 식물플랑크톤의 생체량은 강 상류지역으로의 담수유입이 많은 여름이 지난 가을철에 중염지역 (5 ~ 15 psu)에서 높았고 질산과 규산염은 강 배출량 (담수유입)이 많을수록 높아지는 형태를 띠었다. 한강에서는 식물플랑크톤 생체량과 영양염의 농도가 하류지역에서 높았다. 계절적으로는 봄철에 높은 농도를 보였는데 이에 반해 영산강은 봄철에 상류지역에서 식물플랑크톤 생체량과 영양염 농도가 높게 나타났다. 아산호의 식물플랑크톤 생체량은 본 연구의 조사 하구역중에서 가장 높은 값을 보였고 대부분의 영양염이 상류쪽

에서 높게 나타났다. 낙동강은 식물플랑크톤의 생체량이 겨울철에 높았고 하류보다 상류지역에서 약간 높게 나타났다. 국내 하구역의 수질에서는 총질소와 총인이 대부분 증가하는 경향을 보였다. 본 연구 결과들이 하구역의 수질관리 측면에서 내포하는 의미에 대해서도 언급하였다.

사 사

방대한 양의 자료 수집과 분석에 도움을 주신 김명희 양께 감사드립니다.

인 용 문 헌

- 권기영, 이평강, 박 철, 문창호, 박미옥. 2001. 섬진강 하구역에서 염부경사에 따른 동·식물플랑크톤의 현존량 및 종조성. 한국해양학회지 바다 **6**: 93-102.
- 권기영, 문창호, 이재성, 양성렬, 박미옥, 이필용. 2004. 섬진강 하구역에서 영양염의 하구내 거동과 플럭스. 한국해양학회지 바다 **9**: 153-163.
- 김용재. 2003. 영산강의 식물플랑크톤 군집 동태. 한국조류학회지 **18**: 207-215.
- 김준태, 박유라, 조현실, 부성민. 1996. 금강 수계에서 식물플랑크톤의 군집 구조. 한국육수학회지 **29**: 187-195.
- 류상욱. 2003. 한반도 남해안 광양만 표층퇴적물 입도의 시공간적 변화. 한국해양학회지 바다. **8**: 340-348.
- 문창호, 최혜지. 1991. 낙동강 하구 환경특성 및 식물플랑크톤의 군집구조에 관한 연구. 한국해양학회지. **26**: 144-154.
- 문창호, 박 철, 이승용. 1993. 아산만의 영양염 및 입자성 유기물. 한국수산학회지 **26**: 173-181.
- 신성교, 백경훈, 송미경. 2002. 낙동강 중·하류수역에서 클로로필 *a* 최대농도 출현지역 평가. 한국육수학회지 **35**: 21-27.
- 신용식. 2003. 새만금 외측수역의 해양생태계 변화 예측 및 대응책. 새만금 해양환경보전대책을 위한 조사연구 기획과제 최종보고서.
- 신용식, 서호영, 현봉길. 2005. 해수층의 염분 변화가 일차생산자와 상위소비자와의 크기구조에 미치는 영향. 한국해양학회지 바다. **10**: 113-123
- 신용식, 조기안. 2003. 담수성 식물플랑크톤의 크기별 구조 및 전체 생체량의 계절적 공간적 분포. 2003한국육수학회 춘계 학술 발표대회 초록.
- 신윤근, 김영길. 2002. 아산호의 생태학적 연구 2. 식물플랑크톤 군집 구조. 한국육수학회지 **35**: 187-197.
- 신윤근, 전상호. 2002. 아산호의 생태학적 연구 1. 이화학적 특성과 영양상태. 한국육수학회지 **35**: 181-186
- 심재형, 신윤근, 이원호. 1984. 광양만 식물플랑크톤 분포에 관

- 한 연구. 한국해양학회지 **10**: 172-186.
- 양성렬, 문창호, 박미옥, 박 철, 김석윤. 2003. 섬진강 하구역의 물질순환 기작과 생물생산성: 수층과 퇴적층 경계면의 상호작용을 중심으로. 한국과학재단 특정기초연구 최종보고서.
- 양성렬, 송환석, 문창호, 권기영, 양한섭. 2001. 낙동강 하구역의 담수유입에 따른 해양환경 및 일차생산력 변화. 한국조류학회지. **16**: 165-177.
- 이영식, 유준, 권기영, 최용규, 조은섭. 2004. 광양만에서 식물플랑크톤증식 제한영양염의 시공간적 변동 특성. 대한환경공학회지 **26**: 890-895
- 이영식, 이재성, 정래홍, 김성수, 고우진, 김귀영, 박종수. 2001. 광양만에서 식물플랑크톤증식의 제한영양염. 한국해양학회지 바다. **6**: 201-210.
- 이용혁, 양재삼. 1997. 금강 하구역에서 영양염류, 엽록소, 부유물질과 염분 변화에 대한 500일간의 연속관측. 한국해양학회지 바다 **2**: 1-7.
- 이정호, 권진남, 양상용. 2002. 낙동강의 식물플랑크톤 군집의 계절 변화. 한국조류학회지 **17**: 267-273.
- 정래홍, 홍재상, 이재학. 1997. 광양제철소 건설을 위한 매립과 준설공사 기간 중 저서 다모류 군집의 공간 및 계절 변화. 한국수산학회지 **30**: 730-743
- 정승원, 이진환, 유종수. 2003. 한강하류의 환경학적 연구 V. 식물플랑크톤 군집 대발생의 특징. 한국조류학회지 **18**: 255-262.
- 정승원, 이진환, 허희권. 2004. 한강 하류의 환경학적 연구 VI. 부영양 요인의 통계적 해석. 한국육수학회지. **37**: 78-86.
- 정익교, 강영작, 권오섭, 서정관. 2000. 낙동강 하구 해역 식물플랑크톤의 군집동태. 한국조류학회지 **15**: 99-110.
- 조경제, 신재기. 1998. 낙동강 하류에서 동하계 무기 NP 영양염류와 식물플랑크톤의 동태. 한국육수학회지. **31**: 67-75.
- 조경제, 신재기. 1996. 낙동강 담수조류 N·P 요구도 분석을 위한 bioassay. 한국육수학회지. **29**: 263-273.
- 조경제, 신재기. 1995. 낙동강 중·하류의 엽록소 a 분포와 변동. 한국육수학회지 **28**: 421-426.
- 조현실, 김준태, 부성민. 1995. 금강 수서생태계의 구조와 기능에 관한 연구 - 식물플랑크톤. 충남대 환경연구보고. **31**: 92-105.
- 현봉길, 신용식, 박 철, 양성렬. 2005. 아산만 크기별 식물플랑크톤의 분포 특성에 대한 연구. 한국환경생물학회지(투고)
- Alpine, A.E, J.E. Cloern. 1992. Trophic interactions and direct physical effects control phytoplankton biomass and production in an estuary. *Limnol Oceanogr* **37**: 946-955
- Armstrong, R.A. 1994. Grazing limitation and nutrient limitation in marine ecosystems: Steady state solutions of an ecosystem model with multiple food chains. *Limnol. Oceanogr.* **39**: 597-608.
- Boynton, W.R., W.M. Kemp and C.W. Keefe. 1982. A comparative analysis of nutrients and other factors influencing estuarine phytoplankton production, p. 69-90. In: *Estuarine Comparisons V.* Kennedy (ed.). Academic Press, New York.
- Caraco, N.F, J.J. Cole, P.A. Raymond, D.L. Strayer, M.L. Pace, S.E.G. Findlay and D.T. Fisher. 1997. Zebra mussel invasion in a large, turbid river: Phytoplankton response to increased grazing. *Ecology* **78**(2): 588-602
- Carpenter, S.R., J.F Kitchell., J.R Hodgson, P.A. Cochran, J.J. Elser, M.M. Elser, D.M. Lodge, D. Kretchmer, X. He and C.N. von Ende. 1987. Regulation of lake primary productivity by food web structure. *Ecology* **68**: 1863-1876
- Cloern, J.E. 1996. Phytoplankton bloom dynamics in coastal ecosystems: a review with some general lessons from sustained investigation of San Francisco Bay, California. *Rev. Geophys.* **34**(2): 127-168.
- Coffin, B. Richard, Sharp, H. Jonathan. 1987. Microbial trophodynamics in the Delaware Estuary. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **41**: 253-266.
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency). 1982. Chesapeake Bay: Introduction to an ecosystem. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C. p. 33
- Jeon, S. and K. Cho. 2004. Primary productivity of phytoplankton in the shallow and hypertrophic river (Seonakdong River). *Korean J. Limnol.* **37**: 57-63.
- Jonas, R. 1992. Microbial processes, organic matter and oxygen demand in the water column. p. 113-148. In: *Oxygen dynamics in the Chesapeake Bay* (D.E. Smith, M. Leffler and G. Mackiernan eds.). Maryland Sea Grant College, College Park,
- Kang, C.K., J.B. Kim, P.Y. Lee and J.S. Hong. 2001. The importance of intertidal benthic autotrophs to the Kwangyang Bay (Korea) food webs: $\delta^{13}\text{C}$ analysis. *J. Oceanol. Soc. Korea* **36**: 109-123.
- Kemp, W.M., and W.R. Boynton. 1984. Spatial and temporal coupling of nutrient inputs to estuarine primary production: the role of particulate transport and decomposition. *Bull. Mar. Sci.* **35**: 522-535.
- Kemp, W.M. and W.R. Boynton. 1981. External and internal factors regulating metabolic roles of an estuarine benthic community. *Oecologia* **51**: 19-27.
- Kim, H.W., K.H. Chang, K.S. Jeong and G.J. Joo. 2003. The Spring Metazooplankton Dynamics in the River-Reservoir Hybrid System (Nakdong River, Korea) : Its Role in Controlling the Phytoplankton Biomass. *Korean J. Limnol.* **36**: 420-426
- Kirk, J.T.O. 1994. Light and Photosynthesis in Aquatic

- Ecosystems. p. 75-77. Cambridge University Press, Cambridge, England.
- Kivi, K., S. Kaitala, H. Kuosa, J. Kuparinen, E. Leskinen, R. Lignell, B. Marcussen and T. Tamminen. 1993. Nutrient limitation and grazing control of the Baltic plankton community during annual succession. *Limnol. Oceanogr.* **38**(5): 893-905.
- Levinton, J.S. 1982. Marine Ecology. p. 526. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Malone, T.C., W.M. Kemp, H.W. Ducklow, W.R. Boynton, J. H. Tuttle and R. B. Jonas. 1986. Lateral variation in the production and fate of phytoplankton in a partially stratified estuary. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **32**: 149-160.
- Kim, T.J. 1992. Sorption behavior of radium isotopes and nutrient fluxes in the Seomjin estuary of Korea, during high river discharge. Master thesis., Chungnam National University, Daejeon.
- Moon, C.H. 1990. Studies on the phytoplankton and nutrients in the Yeosu Heman. *J. Kor. Fish. Soc.*, **22**: 408-414.
- Nam, K.H. G.S. Hwang, B.C. Kim and K.S. Kim. 2001. Primary Productivity of phytoplankton at the Eutrophic down Reach of a Regulated River (the Han River, Korea). *Korean J. Limnol.* **34**: 267-276.
- Officer, C.B., R.B. Biggs, J.L. Taft, L.E. Cronin, M.A. Tyler and W.R. Boynton. 1984. Chesapeake Bay anoxia: origin, development, significance. *Science* **223**: 22-27.
- Redfield, A.C. 1958. The biological control of chemical factors in the environment. *American Science* **46**: 205-222.
- Ryther, J.H. 1969. Photosynthesis and fish production in the sea. *Science* **166**: 72-76.
- Seliger, H.H., J.A. Boggs and W.H. Biggley. 1985. Catastrophic anoxia in the Chesapeake Bay in 1984. *Science* **228**: 70-73.
- Sin Y, R.L. Wetzel and I.C. Anderson. 1999. Spatial and temporal characteristics of nutrient and phytoplankton dynamics in the York River estuary, Virginia: Analyses of long-term data. *Estuaries* **22**: 260-275.
- Smith, R.F. 1966. Foreword, pp. vii-viii. In: R. F. Smith, A. H. Swartz, and W. H. Massmann (eds.), A Symposium on Estuarine Fisheries. Amer. Fish. Soc. Spec. Publ. No. 3. Allen Press, Lawrence, Kansas.
- Sundbaeck, K., B. Joensseon, P. Nilsson and I. Lindstroem. 1990. Impact of accumulating drifting macroalgae on a shallow-water sediment system: An experimental study. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **58**(3): 261-274.
- You, K.I. and B.J. Lim. 1991. Seasonal variation in the zooplankton community structure of the Lower Han River system. *Korean Journal of Limnology.* **24**: 85-91.

(Manuscript received 7 February 2005,
Revision accepted 8 June 2005)