

한강기수역에서의 암모늄 제거율 변화 및 질산화의 잠재적 역할

현정호¹ · 정경호² · 박용철² · 최중기²

¹한국해양연구소 심해저자원연구센터

²인하대학교 해양학과

Variations in Ammonium Removal Rate with Tidal State in the Macrotidal Han River Estuary: Potential Role of Nitrification

JUNG-HO HYUN¹, KYUNG HO CHUNG², YONG CHUL PARK² AND JOONG KI CHOI²

¹Deep-Sea Resources Research Center, Korea Ocean Research & Development Institute,
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

²Department of Oceanography, Inha University, Incheon 402-751, Korea

부영양화된 한강기수역에서의 용존산소 및 NH_4^+ 제거에 있어 조석의 영향 및 질산화의 중요성을 이해하고자 1995년 7월에 강화도 남단에서 만조, 중조 및 소조 시에 해수시료를 채취하였다. 수온과 DO를 제외한 하계 한강기수역의 생물, 화학적 환경을 결정짓는 요인들이 담수의 유입과 수역 내의 심한 조석 변화에 의해 조절되는 것으로 나타났다. 조석상태에 따른 용존산소 및 NH_4^+ 의 제거율은 만조 시 각각 $2.76 \mu\text{M O}_2 \text{ d}^{-1}$ 및 $1.76 \mu\text{M N d}^{-1}$ 이며, 간조 시 각각 $5.66 \mu\text{M O}_2 \text{ d}^{-1}$ 및 $3.36 \mu\text{M N d}^{-1}$ 로 최대로 나타나 간조 시 담수와 함께 유입되는 다량의 각종 유기물 및 무기영양염에 대한 미생물의 분해 및 흡수가 활발히 진행되고 있음을 알 수 있다. NH_4^+ -질산화는 간조 시 총 DO 소모량의 약 24%를 차지하며 NH_4^+ -질산화에 의한 NH_4^+ 의 회전율도 0.18 d^{-1} 로 만조 때에 비해 각각 3.7배 및 3배 높게 나타나, 담수성 NH_4^+ -질산화 박테리아가 간조 시 한강기수역으로 유입되면서 DO 및 NH_4^+ 의 소모에 중요한 역할을 담당하고 있는 것으로 사료된다. 만조 시 NH_4^+ 감소율 및 NH_4^+ -질산화가 낮은 것은 염분증가에 따른 담수성 NH_4^+ -질산화 박테리아의 활성이 위축되어 나타난 결과로 보이며, 이상의 결과들은 한강기수역에서 NH_4^+ 의 효율적인 생물학적 제거를 위해서는 NH_4^+ 를 포함하는 각종 오·폐수가 기수역으로 유입되기 이전에 처리됨이 바람직함을 의미한다. 향후 한강기수역과 같은 대규모 담수의 유입이 일어나는 부영양화된 기수역에서 질소계 원소의 순환을 보다 잘 이해하기 위해서는 NH_4^+ 및 NO_2^- 를 유일한 화학에너지원으로 이용하는 자가영양 질산화 박테리아에 대한 생태적 연구가 병행되어야 한다.

In order to understand the importance of tidal action and NH_4^+ -nitrification in the removal of dissolved oxygen (DO) and NH_4^+ , concentrations of DO, NH_4^+ , NO_2^- and NO_3^- were measured with time for water samples collected at different tidal state in the eutrophic macrotidal Han River estuary. Field measurements indicated that most environmental parameters, except for the water temperature and DO concentration, were tightly controlled by the eutrophic freshwater runoff and large-scale tidal action. Dark incubation of the water sample at 25°C showed that the removal rates of DO and NH_4^+ in high tide sample were $2.76 \mu\text{M O}_2 \text{ d}^{-1}$ and $1.76 \mu\text{M N d}^{-1}$, respectively, and increased to $5.66 \mu\text{M O}_2 \text{ d}^{-1}$ and $3.36 \mu\text{M N d}^{-1}$, respectively, in low tide sample. These changes indicated that microbial degradation and uptake of organic matter and inorganic nutrients were more active during low tide. NH_4^+ -nitrification responsible for total DO removal in low tide (23.81%) and NH_4^+ turnover rates due to NH_4^+ -nitrification in low tide (0.18 d^{-1}) were approximately 3.7 times and 3 times, respectively, higher than those in high tide. These results indicated that NH_4^+ -nitrifying bacteria introduced into the Han River estuary during low tide played a significant role in the removal of DO and NH_4^+ . The decreasing removal rates in DO and NH_4^+ with the increasing tidal level seemed to be associated with the salinity impact on the halophobic freshwater NH_4^+ -nitrifying bacteria. The results implied that anthropogenic NH_4^+ sources should be treated prior to the freshwater runoff into the estuary for the effective control of NH_4^+ in the Han River estuary. These results also suggest that parallel ecological studies on the chemoautotrophic nitrifying bacteria are essential for the elucidation of nitrogen cycles in the eutrophic Han River estuary.

서 론

암모늄(NH_4^+)은 유기물 분해에 의해 생성된 최종 질소계 부산물중에서 가장 환원된 형태로서, 식물플랑크톤에 의해 선호되는 주요한 영양염(McCarthy *et al.*, 1977)이며, 또한 NH_4^+ -질산화(ammonium nitrifying) 박테리아의 유일한 에너지원으로서 이용되는 등(Kaplan, 1983) 해양환경내 질소순환에 있어 핵심적인 역할을 하는 원소이다. 질산화 과정(nitrification process)은 생태계내의 산소를 소비시키고 NH_4^+ 로부터의 NO_2^- 와 NO_3^- 생성에 직접 연관된 중요한 질소순환 과정중의 하나로 미생물에 의해 진행된다(Ward *et al.*, 1982; Berounsky and Nixon, 1990). 특히, 오염된 하천이나, 기수역 및 연안환경내에서 질산화 작용은 유기물로부터 생성된 NH_4^+ 을 산화된 형태의 원소로 변형시킴으로서 질소계 유기오염물의 분해 및 제거에 필수적인 역할을 한다(Billen, 1975; Feliatra and Bianchi, 1993). 따라서 부영양화된 연안 및 기수환경내에서 환경요인과 연관되는 질산화물의 축적은 지역내의 질소계 오염원 및 영양염의 거동을 이해하고, 나아가 환경오염 문제에 대한 해결방안을 모색하는데 있어 중요한 정보를 제공할 수 있다.

한강기수역은 경인지역을 가로질러 유입되는 한강(연간 약 26 km^3)을 통해 많은 양의 육상기원 영양염들이 유입되는 부영양화된 수역이다(최, 1985; 홍, 1991). 한편, 한강기수역의 심한 조차(소조 시 3.5 m; 대조 시 8.0 m) 및 강한 조류(최대 $1.19\text{--}1.26 \text{ m sec}^{-1}$)(OHA, 1978)는 수역내로 유입되는 NH_4^+ 을 포함한 영양염 농도의 일변화에 직접적으로 영향을 끼치고 있다. 그 예로서, 담수의 유입에 따른 환경변화가 심한 세어도 부근에서 1995년 2월의 경우 표층수의 NH_4^+ 농도가 만조 시 $6.06 \mu\text{M}$ 에서 간조 시 $16.84 \mu\text{M}$ 까지 급격히 변화하는 것으로 보고되고 있으며(Jeon, 1995), 그에 따른 생물환경도 조석변화에 따른 변화양상이 뚜렷하게 나타나는 것으로 보고되고 있다(정, 1996). 최근에 Hyun *et al.*(1999)은 한강기수역에서 서로 다른 조석상태에서 채수한 시료의 미생물의 수(colony forming unit; CFU)를 조사한 결과 간조 시에 획득한 시료의 경우 염분도가 증가하면서 CFU가 급격히 감소한다는 사실과, 또한 미생물의 생장률이 만조에서 간조로 갈수록 감소한다는 사실을 발견하였다. 이상의 결과들을 토대로, Hyun *et al.*(1999)은 한강기수역에서의 미생물 생장 및 군집구조의 변화가 조석변화에 의한 영향을 받아 간조 시 담수와 함께 유입되어 염분증가에 의해 생장이 제한되는 담수성 유입종(halophobic allochthonous microbial populations)과 염분변화에 의한 영향은 받지 않고 육상으로부터의 영양염 유입에 따른 부영양화된 환경에서 높은 생장률을 보이는 기수성 고유종(halotolerant autochthonous microbial populations)으로 이루어져 있다고 보고했다. 이러한 결과들은 담수와 함께 유입된 영양염 및 오염원의(분포, 분해 및 축적 등과 연관된) 거동이 조석에 따른 염분도 변화에 의해 영향을 받는 미생물군들의 생태와 밀접한 관계가 있음을 의미하는 것이다. 본 논문에서는 조석에 따른 NH_4^+ 농도 변화(즉, 간조시의 높은 영양염 농도)와 관련하여, (1) NH_4^+ -질산화에 의한 NH_4^+ 회전율(turnover rate)이 한강기수역의 심한 조석변화에 의해 조절되고 있음을 밝히고, (2) 간조 시 담수와 함께 한강기수역으로 유입되는 NH_4^+ -질산화 박테

리아가 NH_4^+ 제거에 미칠 수 있는 잠재적 영향에 대해 토의하고자 하였다. 질소순환에 있어서의 질산화 과정의 중요성에 대한 외국의 많은 연구보고(Feliatra and Bianchi, 1993; Lipschultz *et al.*, 1986; Priscu and Downes, 1985; Ward *et al.*, 1984)에 반해, 국내에서는 금강(하구)에서 하류로 정점을 이동하면서 NH_4^+ 및 NO_2^- 의 농도를 측정하는 방법으로 질산화가 금강하구의 무기질소계 영양염 생성과 관련된 중요한 과정이라는 연구보고(Kim and Ki, 1987)가 있으나, 한강기수역과 같은 대규모 조석변화를 보이는 부영양화된 지역에서 조석상태에 따른 NH_4^+ 의 감소율(removal rate) 및 회전율의 변화와 그에 따른 질산화의 역할에 관한 연구는 보고되지 않았다.

재료 및 방법

환경요인 분석

물리, 화학 생물학적 환경요인의 측정을 위해 1995년 7월 15일(소조)에 염하수로를 통해 담수가 유입되는 강화도 아래쪽(Fig. 1)에 정선을 한 후 만조, 중조 및 간조의 세 조석상태에서 각각 채수를 하였다. 수온과 염분도는 T-S bridge(Kent Co.)를 사용하여 현장에서 측정하였다. 용존산소(DO)는 용존산소측정기(Yellow Spring Instrument Co.)를 사용하여 현장에서 측정하였다. 총 부유물질(SPM)의 측정을 위해 부피를 알고있는 해수를 500°C 에서 2 시간동안 연소시킨 유리섬유여지(GF/C, 직경 47 mm; Whatman Co.)로 여과한 후, 미리 무게를 잰 알루미늄 접시에 올려놓고, 건조기(40°C)에서 48시간 동안 건조시켰다. SPM의 농도는 여과 전후의 여과지 무게 차로부터 계산하였다. 암모늄, 아질산염 및 질산염과 같은 질소계 영양염류와 인산염 및 규산염은 현장에서 채수한 시료를 냉동 운반한 후 실험실에서 분광광도계를 이용하여 측정하였다(Parsons *et al.*, 1984). 엽록소-a(Chl-a) 농도는 형광측정기(Turner Designs, Sunnyvale, CA)를

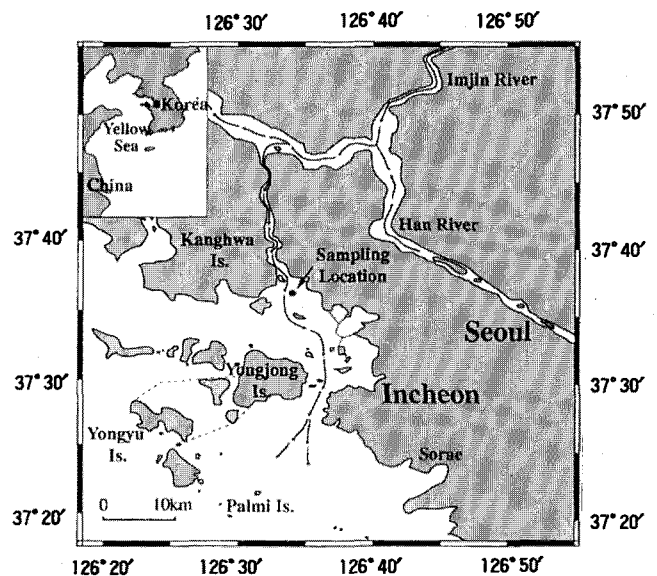


Fig. 1. A map showing sampling location. The narrow arrows indicate the direction of freshwater flowing into the Han River estuary. The dotted lines represent the reclaimed area for the Incheon international airport complex under construction.

사용하여 측정하였다(Parsons *et al.*, 1984).

$$= \text{NH}_4^+ \text{ 질산화율 } (\mu\text{M d}^{-1}) / \text{현장 } \text{NH}_4^+ \text{ 농도 } (\mu\text{M})$$

조석에 따른 DO 및 NH_4^+ -질산화를 변화

시료채취: 서로 다른 조석상태(만조, 중조 및 간조)에서 획득된 시료의 시간에 따른 DO 및 질소계 영양염의 변화율과 NH_4^+ -질산화율을 측정하기 위한 시료를 압축 가능한 20 L 폴리에틸렌 배양용기(Cubitainer; Hedwin Co.)로 채수를 한 후 실험실로 옮겨 항온 실험실(25°C)에서 빛을 차단한 상태로 배양하였다. 이때 배양용기는 항상 압축된 상태로 보관하여, 용기내부는 해수시료로 차있는 상태로 배양조건을 유지함으로써, 산소가 배양용기 내의 빈 공간으로 유입되는 걸 방지하였다.

DO 변화: 위와 같이 배양중인 시료 각각에 대해 시간에 따른 DO의 변화율을 측정하기 위해: (1) 배양용기를 압축한 상태에서 뚜껑에 연결된 호스를 통해 부시료를 60 mL BOD 병에 담아 Winkler법에 따라 DO를 측정하였으며(Parsons *et al.*, 1984), (2) 배양용기 표면을 통한 공기의 확산율은 별도로 멸균된 증류수를 압축된 상태로 보관하여 시간에 따른 배양용기내 용존산소의 농도변화를 측정하였다. 시간에 따른 DO 변화를 직선회귀분석을 통해 구한 관계식의 기울기로부터 배양용기내의 DO 감소율을 계산하였으며, 총 DO 감소율은 배양용기내의 DO 감소율에 배양용기 표면을 통해 확산되어 들어간 DO 농도($14 \mu\text{M d}^{-1}$)를 더한 값으로부터 계산하였다.

순 NH_4^+ -질산화율(Net NH_4^+ -nitrification rate): 시간에 따른 NH_4^+ , NO_2^- 및 NO_3^- 의 농도변화를 측정하기 위해 시간에 따라 배양용기로부터 부시료를 취하여 각각의 농도를 측정하였다. NH_4^+ -질산화율은 배양용기내의 NO_2^- 의 증가율로부터 측정되었다(Bianchi *et al.*, 1992). 이는 유산소(oxic) 환경 하에서 NO_2^- 는 환경 내에 축적되지 않고 단기간 내에 질산염으로 산화되므로 NO_2^- 의 농도는 NH_4^+ -질산화에 의해 결정되며, 또한 NH_4^+ 1 mole의 질산화로부터 1 mole의 NO_2^- 가 생성된다는 조건(Kaplan, 1983)에 의한 것이다. 본 연구에서는 nitrapyrin이나 allylthiourea와 같은 NH_4^+ -질산화 억제제(inhibitor)나 NaClO_3 와 같은 NO_2^- -질산화의 억제제를 사용하지 않았다(Bedard and Knowles, 1989; Feliatra and Bianchi, 1993). 따라서 배양용기내의 NH_4^+ 의 감소율은 질산화와 생물에 의한 흡수 및 분비의 결과로 나타난 전체적인 NH_4^+ 의 소모를 의미한다. 또한 NO_2^- 의 질산화에 대한 억제제를 쓰지 않았으므로 NO_2^- 증가율로부터 구한 NH_4^+ -질산화는 NO_2^- 가 NO_3^- 로 질산화된 부분을 제외한 순 NH_4^+ -질산화로 간주하였다.

NH_4^+ 회전을

서로 다른 조석상태에서 획득한 시료 각각의 배양용기내 NH_4^+ 의 감소에 의한 NH_4^+ 회전율은 NH_4^+ -감소율을 시료채취 당시 현장의 NH_4^+ 농도로 나누어 구하였으며, NH_4^+ -질산화에 따른 암모늄의 회전율은 서로 다른 조석상태에서 획득한 시료의 NH_4^+ -질산화율을 시료채취 당시 현장의 NH_4^+ 농도로 나누어 구하였다. 즉,

$$\begin{aligned} & \text{NH}_4^+ \text{ 제거에 의한 } \text{NH}_4^+ \text{ 회전율 } (\text{d}^{-1}) \\ & = \text{총 } \text{NH}_4^+ \text{ 제거율 } (\mu\text{M d}^{-1}) / \text{현장 } \text{NH}_4^+ \text{ 농도 } (\mu\text{M}) \\ & \text{NH}_4^+ \text{ 질산화에 따른 } \text{NH}_4^+ \text{ 회전율 } (\text{d}^{-1}) \end{aligned}$$

결과 및 토의

조석에 따른 환경요인 변화

만조, 중조 및 간조의 세 조석상태에서 조사된 환경요인들을 분석한 결과(Fig. 2), 수온은 21.6–22.2°C의 범위로 조석상태에 따른 일변화 없이 일정하게 나타났다. 염분도는 만조 시 21.4‰에서 간조 시 2.70‰로 조석상태에 따른 변화가 뚜렷하게 나타났는데, 소조임에도 불구하고 이러한 조석에 따른 뚜렷한 염분 변화는 7월의 강우량 증가에 따라 불어난 담수의 유입에 의한 것이다. 무기영양염류의 농도도 조석 및 담수유입의 영향으로 조석에 따른 변화양상이 명확히 나타났다. NH_4^+ , NO_2^- 및 NO_3^- 의 농도는 만조 시 각각 12.55, 6.02, 94.65 μM 에서 간조 시 17.14, 9.65, 111.06 μM 로 각각 증가한 것으로 나타났다. PO_4^{3-} 와 Si의 경우도 만조 시 각각 1.81과 57.75 μM 에서 간조 시 2.18 및 147.84 μM 로 증가했다. 간조 시의 높은 영양염 농도로부터 영양염류들이 담수와 함께 육지로부터 유입되고 있음을 알 수 있다. 부유물질(SPM)의 농도는 간조 시에 228.4 mg L^{-1} 로 최대값을 나타내, 육지로부터 유입되는 부유물 및 저층혼합(turbulent mixing)의 영향을 받고 있음을 알 수 있다. DO는 7.2–6.8 mL L^{-1} 의 범위를 나타내 조석에 따른 변화가 나타나지 않았다. Chl-*a* 농도가 간조 시에 5.58 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 최대값을 보인 것은 저층혼합에 의한 저서규조류의 재부유 및 담수종의 유입에 따른 것으로 보인다(Kwon and Choi, 1994). 조석상태에 상관없이 크기 20 μm 이하의 미소 식물플랑크톤의 Chl-*a*가 전체의 80% 이상을 나타내 하계의 일차생산력의 주요한 부분이 크기가 작은 식물플랑크톤에 의해 이루어짐을 알 수 있다. 이상의 결론을 종합해 보면, 수온과 DO를 제외한 하계 한강기수역의 생물, 화학적 환경을 결정짓는 요인들이 담수의 유입과 수역 내의 심한 조석 차에 의해 조절되고 있음을 알 수 있다(정, 1996; Hyun *et al.*, 1999).

용존산소 및 질소계 영양염 변동

시간에 따른 DO, NH_4^+ , NO_2^- 및 NO_3^- 의 농도변화는 조석상태에 따라 확연히 변화하는 양상을 보였다(Fig. 3). DO는 만조 시 128 시간(배양) 동안 2.76 $\mu\text{M d}^{-1}$ 에서 간조 시 97 시간동안 5.66 $\mu\text{M d}^{-1}$ 의 속도로 감소하였다(Table 1). NH_4^+ 는 만조 시 176 시간동안 1.20 $\mu\text{M d}^{-1}$ 에서 간조 시 68.5 시간동안 3.36 $\mu\text{M d}^{-1}$ 의 속도로 빠르게 감소했으며, 순 NH_4^+ -질산화율(NO_2^- 증가율)은 만조 시 176 시간 동안 0.72 $\mu\text{M d}^{-1}$ 에서 간조 시 47.5 시간 동안 3.12 $\mu\text{M d}^{-1}$ 의 속도로 증가하는 것으로 나타났다. 이상의 결과에서 한가지 뚜렷한 공통점은 만조에서 간조시점으로 옮겨 갈수록 DO 감소, NH_4^+ -감소, 순 NH_4^+ 질산화 및 NO_3^- 감소의 속도(기울기)가 증가하고 있는 것이다(Fig. 3). 이러한 결과들로 부터: (1) 간조 시 담수와 함께 유입되는 다량의 각종유기물 및 무기영양염(Fig. 2)에 대한 미생물의 분해 및 흡수가 활발히 진행되고 있으며, (2) NH_4^+ -질산화 박테리아가 담수와 함께 한강기수역으로 유입되면서 NH_4^+ 의 제거에 중요한 역할을 담당하고 있는 것으로 사료되었다. 이는 NH_4^+ 질산화 박테리아가

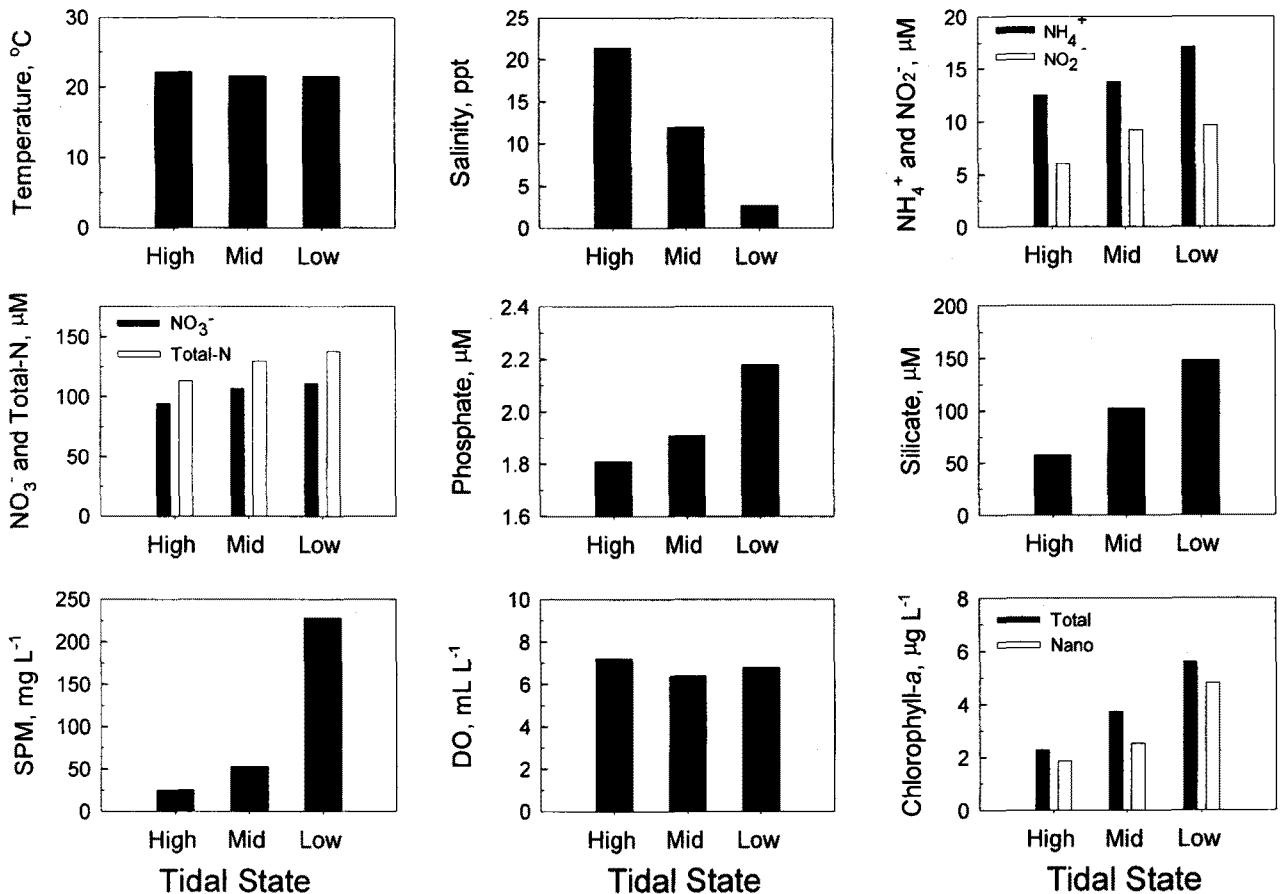


Fig. 2. Physico-chemical and biological parameters at different tidal states. SPM and DO indicate suspended particulate matter and dissolved oxygen, respectively. Nano represents the concentration of small-sized chlorophyll-*a* passing through 20 μm screen.

담수를 통해 육지로부터 유입된다는 Scheldt 기수역(Billen, 1975) 및 Rhone River 기수역(Feliatra and Bianchi, 1993)에서의 연구 결과와 일치하는 것으로 부영양화된 기수역의 전형적인 현상으로 보인다. 만조 시 NH_4^+ 감소율 및 NH_4^+ -질산화율이 간조 때 보다 낮은 것은 기수환경에서 담수성 NH_4^+ -질산화 박테리아의 염분도에 대한 낮은 적응도를 반영하는 것이다. Chen *et al.* (1975)은 East River의 질산화율이 NaCl의 농도에 반비례한다고 보고했으며, Somville(1984)은 Scheldt 기수역에서 담수성 질산화 박테리아의 활성이 염분도 증가에 따라 급격히 떨어진다고 보고했다. 이러한 사실들은 한강기수역의 담수성 박테리아의 생장이 만조에 따른 염분도 증가에 의해 억제된다는 최근의 보고(Hyun *et al.*, 1999)와도 일치되는 결과이다. 간조 시 담수성 박테리아의 높은 활성을 뒷받침하는 또 다른 예로 NH_4^+ -질산화에 의한 DO 제거율을 들 수 있다. 즉, NH_4^+ 1 mole의 질산화에는 1.5 mole의 O_2 가 소모된다(Kaplan, 1983)는 전제하에, NH_4^+ -질산화에 따른 DO 소모율은 만조 시 $1.08 \mu\text{M d}^{-1}$ 에서 간조 시 $4.68 \mu\text{M d}^{-1}$ 로 증가한 것으로 나타났다(Table 2). 이는 총 DO 소모량에서 NH_4^+ 의 질산화에 의해 제거되는 O_2 의 비율이 만조 시 6.44%에서 간조 시 23.81%를 차지하는 것임을 의미한다(Table 2).

NH_4^+ -질산화에 의한 NH_4^+ 회전을

NH_4^+ -질산화율을 각 시료채취 시점의 조석상태에서 측정하

현장의 NH_4^+ 농도로 나누어 계산한 NH_4^+ -질산화에 의한 NH_4^+ 회전율은 만조 시 0.06 d^{-1} 에서 간조 시 0.18 d^{-1} 로 나타났다. 이는 전체 NH_4^+ 감소에 의한 NH_4^+ 의 회전율에서 NH_4^+ -질산화율이 차지하는 비율이 만조 시 59.69%에서 간조 시 92.86%로서 간조 시의 NH_4^+ 제거가 대부분 질산화 작용에 의해 주도되고 있음을 의미한다(Table 2). 본 연구결과가 빛을 차단한 상태에서 배양된 시료로부터 측정된 값으로서 식물플랑크톤의 흡수(uptake)에 의한 NH_4^+ 의 소모가 배제되어 NH_4^+ -질산화 박테리아에 의한 NH_4^+ 의 소모율이 과대 평가된 것일 수 있다. 그러나 NH_4^+ 산화에 있어 NH_4^+ -질산화 박테리아의 중요성은 시간에 따른 NO_3^- 의 변화율(Table 1, Fig. 3)로부터도 추측이 가능하다. 즉, NO_3^- 는 만조 시 176 시간 동안 $0.24 \mu\text{M d}^{-1}$ 에서 간조 시 68.5 시간 동안 $6.00 \mu\text{M d}^{-1}$ 의 속도로 감소하는 것으로 나타났는데, 간조 시의 빠른 NO_3^- 의 제거율은 NH_4^+ 의 산화가 NH_4^+ -질산화 박테리아에 의해 주도되는 관계로 질소계 영양염을 필요로 하는 중속영양 박테리아를 포함한 다른 미생물군의 NO_3^- 에 대한 의존도가 증가한 때문으로 사료된다. Priscu and Downes(1985)는 뉴질랜드의 쿡 해협 연안에서 NH_4^+ -질산화 박테리아에 의한 NH_4^+ 의 소모가 박테리아 및 식물플랑크톤에 의한 총 NH_4^+ 소모량의 30%를 차지하여 질소거동에 중요한 역할을 한다고 보고하였다.

본 연구를 통해서 나타난 뚜렷한 결과는 대규모의 조석작용

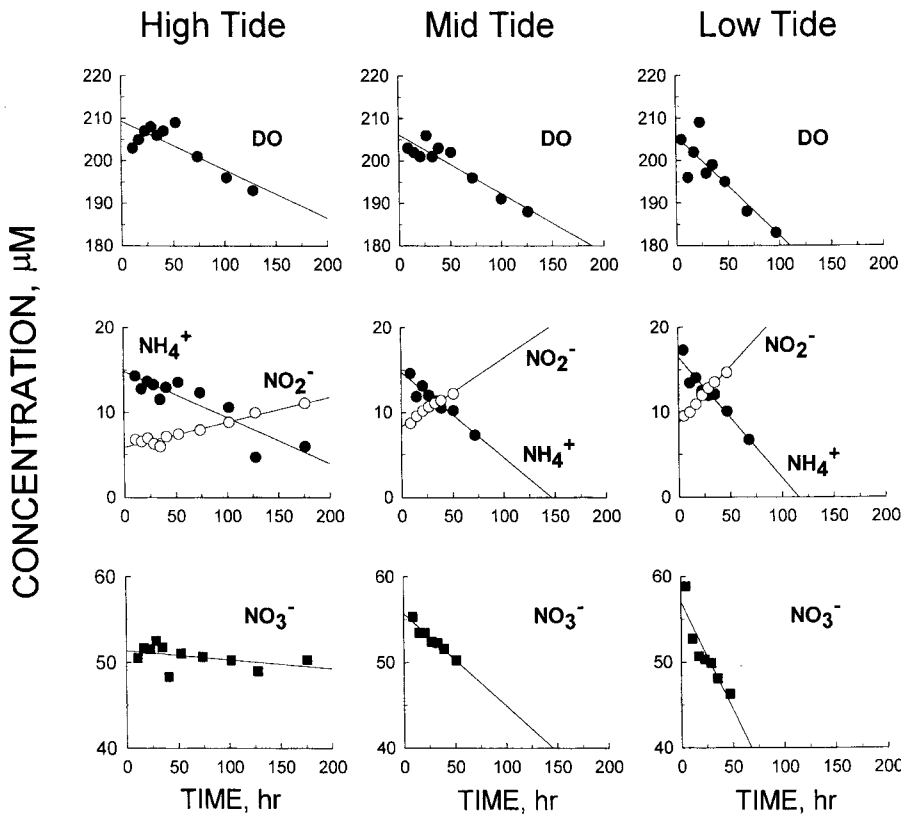


Fig. 3. Net flux of dissolved oxygen (DO), ammonium (NH_4^+), nitrite (NO_2^-) and nitrate (NO_3^-) during dark incubation of the water samples collected at different tidal states. Note that the slopes of low tide samples are steeper than those of the high tide samples.

Table 1. Net flux of dissolved oxygen (DO), ammonium (NH_4^+ -N), nitrite (NO_2^- -N), and nitrate (NO_3^- -N) with different tidal state in July 15 (neap tide), 1995

Tidal State	Net Flux ¹ (M d^{-1})	Incubation time ² (hr)
DO:		
High Tide	-2.76 ($r^2=0.69$, $n=11$)	128
Mid Tide	-3.34 ($r^2=0.86$, $n=10$)	125
Low Tide	-5.66 ($r^2=0.74$, $n=9$)	97
NH_4^+-N:		
High Tide	-1.20 ($r^2=0.80$, $n=11$)	176
Mid Tide	-2.40 ($r^2=0.90$, $n=8$)	72
Low Tide	-3.36 ($r^2=0.91$, $n=8$)	68.5
NO_2^--N³:		
High Tide	+0.72 ($r^2=0.94$, $n=11$)	176
Mid Tide	+1.92 ($r^2=0.97$, $n=7$)	51
Low Tide	+3.12 ($r^2=0.99$, $n=7$)	47.5
NO_3^--N:		
High Tide	-0.24 ($r^2=0.19$, $n=11$)	176
Mid Tide	-2.57 ($r^2=0.94$, $n=7$)	51
Low Tide	-6.00 ($r^2=0.81$, $n=7$)	68.5

¹ calculated from the slope of each regression line in Fig. 3.
² indicates the duration of experiment that showed the best r^2 for the regression analysis in Fig. 3.
³ indicates net NH_4^+ -nitrification rate.

이 한강기수역의 질산화율의 변화에 영향을 미치며, 결국 수역 내로 유입되는 NH_4^+ 의 회전을 조절한다는 것이다. NH_4^+ -질산화에 의한 NH_4^+ 회전을 및 NH_4^+ 감소율이 담수성 NH_4^+ -질산화 박테리아의 유입으로 간조 시 높게 나타나는 결과(Table 2)

가 한강기수역의 환경오염과 연관되어 시사하는 바는, 한강기수역에서 NH_4^+ 를 효율적으로 제거하기 위해서는 NH_4^+ 를 포함하는 각종 오폐수가 기수역으로 유입되기 이전에 처리됨이 바람직하다는 점이다. 이는 만조에 따른 염분도 증가에 의해 담수성 NH_4^+ -질산화 박테리아의 활성이 위축되어(Chen *et al.*, 1975; Somville, 1984), NH_4^+ -질산화가 원활히 이루어지지 못하기 때문이다(Fig. 2). 따라서 한강기수역의 활발한 조석활동에 의한 희석작용(예로서 시화호의 방류)을 기대한 오·폐수의 방류는 한강기수역의 효율적인 생물학적 오염문제 해결을 위해서는 바람직하지 못하며, 각종 오·폐수의 처리가 한강기수역으로 유입되기 전에 필수적으로 선행되어야 한다.

질산화 박테리아의 잠재적 중요성

NH_4^+ -질산화가 NH_4^+ 의 제거에 중요한 역할을 하고 있다는 생지화학적 사실로부터 유추할 수 있는 미생물 생태적 관점은 부영양화된 담수의 유입이 대규모로 일어나는 기수역에서는 화학합성을 통해 에너지를 획득하는 자가영양 박테리아가 종속영양 박테리아보다 NH_4^+ 의 거동에 더 중요할 수도 있다는 점이다. Hoch and Kirchman(1995)은 종속영양 박테리아에 의한 NH_4^+ 의 흡수가 부영양화가 많이 진행된 정점에서 낮게 나타나며 이는 질소순환에 있어서의 종속영양 박테리아의 역할에 증대한 전환점이 될 수도 있다고 보고했다. 이와 관련하여 Hyun *et al.*(1999)도 세어도 부근의 부영양화된 수역에서 종속영양 박테리아에 의한 NH_4^+ 의 제거가 상대적으로 오염의 정도가 낮은 팔미도 부근의 수역에서보다 낮게 나타난다고 보고하였다. 이는 부영양화된 수역의 박테리아가 성장을 위해 필요한 NH_4^+ 에

Table 2. Summary on the role of NH_4^+ -nitrification in the dissolved oxygen (DO) removal, NH_4^+ turnover rate and NH_4^+ removal for the water samples collected at different tidal state

	High Tide	Mid Tide	Low Tide
DO removed by NH_4^+ -nitrification ($\mu\text{M d}^{-1}$) ¹	1.08	2.88	4.68
NH_4^+ -nitrification responsible for total DO removal (%) ²	6.44	16.61	23.81
NH_4^+ turnover rate due to NH_4^+ -nitrification (d^{-1}) ³	0.06	0.14	0.18
NH_4^+ turnover rate by total NH_4^+ removal (d^{-1}) ⁴	0.10	0.18	0.20
NH_4^+ -nitrification responsible for NH_4^+ removal (%) ⁵	59.69	77.78	92.86

¹ DO removal rates were calculated from the 1.5 mole O_2 per 1 mole NH_4^+ -nitrification (Kaplan, 1983).

² Total DO removal rates were calculated from the sum of DO decrease rate in Table 1 and diffusion rate of DO into the incubation container (i.e., $14 \mu\text{M d}^{-1}$).

³ Turnover rates were calculated by dividing NH_4^+ -nitrification rate from ambient NH_4^+ concentration at the time of water sampling.

⁴ Turnover rates were calculated by dividing NH_4^+ removal rate from ambient NH_4^+ concentration at the time of water sampling.

⁵ Percentage was calculated from the ratio of NH_4^+ turnover rate by total NH_4^+ removal and NH_4^+ -nitrification responsible for NH_4^+ removal.

대한 의존도가 상대적으로 낮기 때문이며, 따라서 한강기수역에서 간조시 NH_4^+ 의 제거에 있어 NH_4^+ -질산화(자가영양) 박테리아가 중속영양 박테리아보다 더 중요한 역할을 담당할 수도 있음을 의미한다. 따라서 향후 한강기수역으로 유입되는 NH_4^+ 또는 NO_2^- 를 에너지원으로 사용하는 질산화 박테리아에 대한 생태학적 연구가 보다 구체적으로 이루어져야 하며, 이러한 연구는 연안역내의 질소계 영양염의 거동을 이해하고 연안역의 오염문제 해결에 필수적인 기초자료를 제공하게 될 것이다.

결 론

한강기수역의 DO 및 NH_4^+ 의 감소율 그리고 NH_4^+ -질산화는 심한 조석 차와 강한 조류의 영향을 받아 조석상태에 따른 변화가 뚜렷이 나타났다. 간조시 부영양화된 담수와 함께 유입되는 담수성 박테리아에 의한 NH_4^+ -질산화는 수역내로 유입되는 NH_4^+ 의 제거에 중요한 역할을 담당하는 것으로 보인다. 그러나 만조에 따른 염분증가로 이러한 담수성 박테리아의 활성이 감소되어, 수역내의 NH_4^+ 제거율도 감소되는 것으로 나타났다. 미생물에 의한 NH_4^+ -질산화가 담수성 박테리아에 의해 주도된다는 사실로부터, 한강기수역에서 NH_4^+ 를 효율적으로 제거하기 위해서는 NH_4^+ 를 포함하는 각종 오·폐수가 기수역으로 유입되기 이전에 처리됨이 바람직함을 알 수 있다. 또한 간조시의 높은 NH_4^+ -질산화로부터 한강기수역내의 NH_4^+ 거동을 보다 잘 이해하기 위해서는 NH_4^+ 를 유일한 에너지원으로 이용하는 자가영양 NH_4^+ -질산화 박테리아의 중요성에 대한 보다 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 보인다.

감사의 글

논문의 심사를 맡아 귀중한 시간을 내주신 이홍금 박사님과 다른 한 분의 심사인께 감사드립니다. 본 연구는 국립환경연구원의 G-7 연구과제(to J.K. Choi, 1995)와 인하대학교 및 한국해양연구소의 연수연구원 지원제도(to J.-H. Hyun, 1995)의 보조를 받아 수행되었습니다. 현장에서의 시료채취에 도움을 준 인하대학교 해양학과 대학원의 윤석현, 전형주, 김문구 군과 양은진, 이은희 양에게 감사의 마음을 전합니다.

참고문헌

- 정성용, 1996. 해양오염감시망 구축 및 오염실태 변화에 관한 연구(III). 국립환경연구원. 343 pp.
- 홍기훈, 1991. 한반도 주변 해역의 화학물질 수치 및 순환연구 (서남해역). 한국해양연구소. BSPG00132-391-4. 143 pp.
- Bedard, C. and R. Knowles, 1989. Physiology, biochemistry, and specific inhibitors of CH_4 , NH_4^+ and CO oxidation by methanotrophs and nitrifiers. *Microbiol. Rev.*, **53**: 68-84.
- Berounsky, V.M. and S.W. Nixon, 1990. Temperature and the annual cycle of nitrification in waters of Narragansett bay. *Limnol. Oceanogr.*, **35**: 1610-1617.
- Bianchi, M., D. Marty, J.-L. Teyssie and S.W. Fowler, 1992. Strictly aerobic and anaerobic bacteria associated with sinking particulate matter and zooplankton fecal pellets. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **88**: 55-60.
- Billen, G., 1975. Nitrification in the Scheldt Estuary (Belgium and the Netherlands). *Estuar. Coast. Mar. Sci.*, **3**: 79-89.
- Chen, M., E. Canelli and G.W. Fuhs, 1975. Effects of salinity on nitrification in the East River. *J. Water. Poll. Cont. Fed.*, **47**: 2474-2481.
- Choi, J.K., 1985. The ecological study of phytoplankton in Gyeonggi Bay, Korea. Ph.D. Thesis, Seoul National University, Seoul, 320 pp.
- Feliatra, F. and M. Bianchi, 1993. Rates of nitrification and carbon uptake in the Rhone River plume (Northwestern Mediterranean Sea). *Microb. Ecol.*, **26**: 21-28.
- Hoch, M.P. and D.L. Kirchman, 1995. Ammonium uptake by heterotrophic bacteria in the Delaware estuary and adjacent coastal waters. *Limnol. Oceanogr.*, **40**: 886-897.
- Hyun, J.-H., J.K. Choi, K.H. Chung, E.J. Yang and M.K. Kim, 1999. Tidally induced changes in bacterial growth and viability in the macrotidal Han River estuary, Yellow Sea. *Estuar. Coast. Shelf. Sci.*, **48**: in press.
- Jeon, H.J., 1995. Distribution of nutrients and trace metal speciation in coastal environment of Incheon. M.S. thesis, Inha University, 113 pp.
- Kaplan, W.A., 1983. Nitrification. In: Nitrogen in the marine

- environment, edited by E.J. Carpenter and D.G. Capone, Academic Press, New York, 139–190 pp.
- Kim, K.-R. and J.-H. Ki, 1987. Studies on chemical and biological processes in the Keum River estuary, Korea. I. The cycle of dissolved inorganic nitrogen: General considerations. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **22**: 191–206.
- Kwon, S.K. and J.K. Choi, 1994. Ecological studies on phytoplankton in the lower Han River and Han River estuary. I. Environmental factors and primary productivity. *Yellow Sea Res.*, **6**: 77–99.
- Lipschultz, F., S.C. Wofsy and L.E. Fox, 1986. Nitrogen metabolism of the eutrophic Delaware River ecosystem. *Limnol. Oceanogr.*, **31**: 701–716.
- McCarthy, J.J., W.R. Taylor and J.L. Taft, 1977. Nitrogenous nutrition of the plankton in the Chesapeake Bay. 1. Nutrient availability and phytoplankton preferences. *Limnol. Oceanogr.*, **22**: 996–1011.
- OHA, 1978. Technical reports of hydrographic office of republic of Korea. Office of Hydrographic Affairs, Pub. No. 1101, 127–226 pp.
- Parsons, T.R., Y. Maita, C.M. Lalli. 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis, Pergamon press, Oxford, 173 pp.
- Priscu, J.C. and M.T. Downes, 1985. Nitrogen uptake, ammonium oxidation and nitrous oxide (N₂O) levels in the coastal waters of western Cook Strait, New Zealand. *Estuar. Coast. Shelf. Sci.*, **20**: 529–542.
- Somville, M., 1984. Use of nitrifying activity measurements for describing the effect of salinity on nitrification in the Scheldt estuary. *Appl. Environ. Microbiol.*, **47**: 424–426.
- Ward, B.B., R.J. Olson and M.J. Perry, 1982. Microbial nitrification rates in the primary nitrite maximum off southern California. *Deep-Sea Res.*, **29**: 247–255.
- Ward, B.B., M.C. Talbot and M.J. Perry, 1984. Contributions of phytoplankton and nitrifying bacteria to ammonium and nitrite dynamics in coastal waters. *Cont. Shelf. Res.*, **3**: 383–398.

1998년 11월 9일 원고 접수

1999년 1월 14일 수정본 채택