

## 해수 암모늄 자료의 재평가: 독특한 단주기 수질지표 가능성

정용훈<sup>1</sup> · 양재삼<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>군산대학교 새만금환경연구센터  
<sup>2</sup>군산대학교 해양학과

### Re-evaluation of Ammonium Data in Seawater: an Unique Short-Term Index

YONG HOON JEONG<sup>1</sup> AND JAE SAM YANG<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>SERC, Kunsan National University, Kunsan 54150, Korea

<sup>2</sup>Department of Oceanography, Kunsan National University, Kunsan 54150, Korea

해수 내 용존 암모늄이온의 농도 자료가 해양환경의 지표로서 가치가 있는지 평가하였다. 먼저 암모니아의 화학적인 특성을 정리하였고, 본문에서 해양환경의 대표성을 띠는 일반해역(원양, 연안, 자연하구역)과 집중비교해역(골재채취해역, 하구역)에서 암모늄 자료의 가치를 비교하였다. 암모늄은 일반해역에서 전반적으로 DO와 음의 상관관계를 갖고, COD와 양의 상관관계를 보임으로써 수질지표로서 광범위한 적용 가능성을 보였다. 특히 DO 또는 COD가 유사한 농도를 나타내는 해양환경조건인 경우, 보다 상세한 해석이 불가능하였으나 ODIN 비율 (산화성용존무기질소: ODIN/TDIN ratio) 혹은 RDIN 비율 (환원성용존무기질소: RDIN/TDIN ratio)를 적용하면, 비교대상 해역의 산화 및 환원 조건에 대한 보다 향상된 정보를 얻을 수 있었다. 집중비교해역에서는 저층퇴적물의 확산, 식물플랑크톤의 단기변화 등 주로 단주기 환경변화와 관련하여 암모늄의 지표로서 잠재력을 확인하였다. 암모늄은 기존의 몇 가지 단점을 보완한다면 해양환경에서 단주기로 변화하는 해양환경을 이해하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

We have evaluated the ammonium data in seawater as a potential short-term index for marine environment through the following steps. 1. reviewing of chemical characteristics of ammonium in seawater, 2. comparative relationships of ammonium data with other water quality indices such as DO, COD, and nutrients from Typical Marine Environment(TME) and Special Marine Environment(SME). Ammonium data generally represent negative correlation with DO, while positive correlation with COD. In particular, under frequent cases of seawater conditions showing similar concentration of COD or DO, we have limited choice of explanation for such situation. However ODIN(ODIN/RDIN) or RDIN(RDIN/TDIN) ratio could provide advanced information to understand these seawater conditions. Based on these results, we suggest ammonium data as a potential short-period index for transilient marine environment, such as benthic flux of bottom sediment, hypoxia, and algal bloom. Under overcoming several handicaps, ammonium data could be an useful tool for better understand short transformation of marine environment.

**Key words:** re-evaluation, short-term index, ammonium, seawater, hypoxia, algal bloom

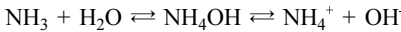
### 서 론

암모니아는 질소와 수소로 이루어진 화합물이며, 상온에서는 특유의 자극적인 냄새가 나는 기체 상태로 존재한다. 토양 중에 질소를 포함하는 유기물이 세균에 의하여 분해하는 과정에서 암모니아가 발생하고, 대기나 수중으로 소량 퍼지게 된다. 또한 비료, 냉각

기, 폭발재료의 생산과정에서 배출되기도 한다. 암모니아는 빙점(freezing point)에서 약 45 질량%까지 녹을 수 있으며, 표준상태(standard condition)에서는 약 30 질량%까지 녹을 수 있을 정도로 용해도가 높다. 공기 중 약 5 ppm 이상 존재하면, 쉽게 냄새로 감지할 수 있다(Wikipedia, 2015).

암모니아는 토양이나 물에 존재하는 수소 이온과 반응하여 암모늄염이 되고 이는 다시 암모늄이온과 수산이온으로 해리되며 이런 반응은 아래와 같이 평형을 이루고 있다.

Received October 12, 2015; Revised May 13, 2016; Accepted May 25, 2016  
\*Corresponding author: yangjs@kunsan.ac.kr

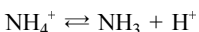


즉, 암모니아, 암모늄염, 그리고 암모늄이온은 사실상 수중 농도를 분석할 때 구분이 불가능하며 합쳐진 농도로 표현된다.

암모니아는 생명체가 단백질을 통해서 에너지를 얻는 과정에서 노폐물로 생성된다. 암모니아는 독성을 가진 물질이기 때문에 빠르게 체외로 배출시켜야 하고, 암모니아의 형태로 배출하기 위해서는 많은 양의 물이 필요하기 때문에 수생 생물에서만 볼 수 있다. 그 반면, 포유류를 비롯한 양서류 성체, 상어, 몇몇 경골어류 및 거북이는 요소의 형태로 바꾸어 배출하고, 곤충을 비롯한 뱀, 새 및 파충류 등은 요소의 형태로 배출한다. 이렇게 배출된 수중 질소의 주요 반응은 질산화과정(nitrification), 탈질산화과정(denitrification), 및 질소고정과정(nitrogen fixation)을 통해 다양한 형태로 변화한다(Yang, 1991). 수중에 존재하는 질소성분 중 암모늄이온은 직접 식물(혹은 식물플랑크톤)로 흡수되지만, 대부분은 호기성 조건에서 질산화박테리아에 의한 산화과정을 거쳐 최종적으로 질산염(nitrate,  $\text{NO}_3^-$ ) 상태로 남게 된다. 이를 질산화과정 이라고 한다. 호기성 환경에서 용존무기질소의 최종산화상태는 질산염상태이며 호기성 해수에서 무기질소의 대부분을 차지한다. 따라서 해양에서 식물(플랑크톤)은 대부분 질산염을 무기질소원으로 사용한다(Willey and Paerl, 1993). 반대 경로로는 호기성환경과 혐기성환경이 교차하는 곳에서 질산염이 질소가스로 전환되는데, 이를 탈질화과정 이라고 하며, 주로 탈질산화세균에 의해서 진행된다. 또 다른 경로는 대기 중의 다량으로 존재하는 질소가스를 질소고정 이라는 과정을 통해 직접 생물이 흡수하는 과정이 있다. 육상식물 중에는 콩과 식물이 좋은 예이며 해양생물 중에는 일부 한정된 세균 등이 이런 능력을 가지고 있다.

이렇게 복잡하고 다양한 형태를 가지는 암모니아는 몇 가지 문제점 때문에 지표(index)로서 널리 사용되지 못하고 있다. 이러한 이유는 첫째, 최근 개정된 우리나라의 해양환경기준에서는 수질평가지수의 대상항목으로 아질산염(nitrite,  $\text{NO}_2^-$ ), 질산염(nitrate,  $\text{NO}_3^-$ ), 암모늄(ammonium,  $\text{NH}_4^+$ )을 모두 합한 용존무기질소(DIN, dissolved inorganic nitrogen)를 제시하고 있다(MOF, 2013b). 둘째, 상기한 바와 같이 암모니아는 복잡한 형태와 함께 질산염에 비하여 상대적으로 농도가 낮다. 셋째, 암모니아는 질산염이나 아질산염에 비하여 시료보관 상태에서 문제가 발생할 가능성이 있기 때문에 신뢰할 만한 자료를 구하기 어렵다. 넷째, 해양학자들이 암모니아를 DIN의 한 구성원으로서 사용할 뿐, 독특한 가치가 있는 자료로서 관심을 두고 연구를 한 경우가 매우 귀하기 때문이었다.

우리나라 환경관련 법규에 표현된 암모니아성 질소에 대하여 설명이 필요하다. 암모니아성 질소는 암모늄염을 그에 상응하는 질소량으로 표현한 것이므로 암모늄이온으로 존재하거나 아래식과 같이 평형을 이룬다.



따라서 담수를 연구하는 환경학자들은 수중 용존 암모니아를 통칭하여 암모니아성 질소라고 정하고 있지만, 해양화학자들은 암모늄이온이라는 용어를 사용하고 있다. 개념이나 분석 기술적인 면에도 차이가 없으므로 이 논문에서는 특별한 경우가 아닌 경우, 암모늄이라고 표현할 것이다.

지난 반세기 동안 해양학 자료에서 암모늄 분포를 독립적으로 구분하여 환경 지표로 사용한 자료는 찾아보기 매우 어렵다. 암모늄을 포함하여 무기질소성분의 시계열측정 자료는 서해 경기만(Park, 1987), 아산만(Moon *et al.*, 1993), 서해 EEZ해역(Yang *et al.*, 2008a) 등이 있고, 인간 활동에 의하여 심각하게 훼손된 연안해역에 대한 자료는 새만금 사업이후 조성된 기수호수(Lee, 2008; Yang *et al.*, 2008b), 천수만 사업이후 연안해역(KORDI, 1997; KORDI, 1999) 등이 있으며, 다른 해역에 비하여 동해를 포함한 외해역 자료는 그 수가 매우 적다(Moon *et al.*, 1996; Chung *et al.*, 2000; Kim *et al.*, 2010; Choi *et al.*, 2012).

해수 중 암모늄 관련 연구는 1970년대 시작되어 활발하게 진행되었으며, 특히 동물플랑크톤에 의한 암모늄의 배설물 관련 연구(McCarthy and Whitedge, 1971; Hermandez-Leon *et al.*, 2008)와 용승해역에서 재생산력 측정 등 연구(Wiggert *et al.*, 2000; Hermandez-Leon *et al.*, 2001; Bode *et al.*, 2002)에 집중되어 발전하였다. 이 연구들은 용승해역에서 멀치의 배설량 중 암모니아가 대부분(80% 이상)을 차지하며, 식물플랑크톤을 포함하여 박테리아도 질산염이나 아질산염 보다 암모니아를 먼저 사용한다는 것을 발견하였고, 재생산된 질소의 대부분은 암모늄이 차지하기 때문에 해수 중 체류시간이 매우 짧다는 점도 지적하였다. 또한 용승해역에서 새롭게 생산되는 유기물의 50%는 재공급된 암모늄에 의해 만들어진다고 주장하였다.

해양환경에서 암모늄 자료가 이렇게 중요한 기능을 가지고 있으나 우리나라에서는 그다지 사용되지 않고 있다. 최근 몇몇 연구(Oh, 2003; Rahmadi, 2010; Cortes and Kim, 2009)들이 시도되었으나, 통계적인 처리, 처리된 자료의 다양성, 해양현장자료의 사용 등에서 다소 미흡한 점이 있었다. 그리고 2010년 이후 해양환경관리공단이 국가해양측정망 자료를 국가해양환경정보통합시스템(MEIS, Marine Environment Information System, <http://www.meis.go.kr/rest/main>)에서 총괄하여 정기적으로 여러 기관들이 취득한 해양관련 자료를 제공하고 있으나 이 자료에 수록된 암모늄 자료를 이용하여 연구한 학술논문은 발견할 수 없었다. 따라서 이 연구에서는 기존 연구자료와 MEIS에 포함된 다양한 지역에서 암모늄 자료가 가진 잠재적인 가치를 분석하고 평가하고자 한다.

## 재료 및 방법

### 비교자료의 선정

암모늄 자료가 지표로서 가능하기 위하여 기존의 관측 자료에 대한 신뢰성을 확보할 필요성이 있으므로 다음과 같은 조건에 가장 부합하는 자료를 선정하였다. 1. 국가기관이 발행한 공인된 자료, 2. 적어도 4-5년 이상 장기간 연속된 자료, 3. 해양환경 수질분석 대상항목이 모두 포함된 자료, 4. 비교대상 해역을 대표할 수 있는 자료, 5. 개인자료인 경우, 다양한 방법으로 신뢰성이 확인된 자료만을 선별하였다.

**일반비교해역의 선정:** 일반비교해역은 서로 다른 환경 특성을 갖는 연안해역, 하구, 만을 대상으로 선택하였으며, 분기별로 관측된 MEIS 자료를 사용하였다. 연안해역 조건으로는 동해 감포해역의 두 곳의 정점(감포01, 감포02)에서 2000~2013년까지 관측된 자료를 사용하였고, 하구 조건은 자연 상태의 하구를 대표하는 섬진강 하구

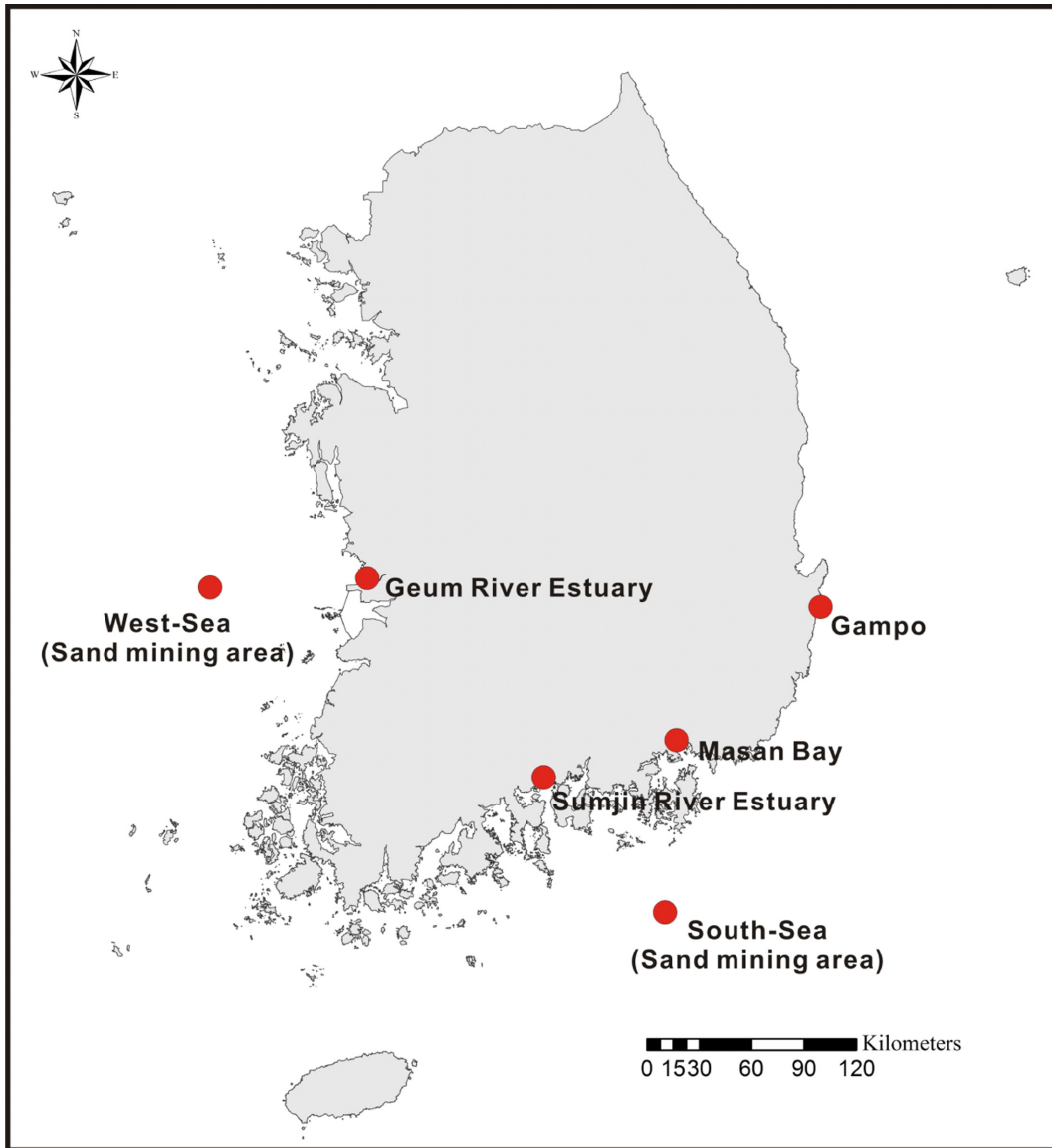


Fig. 1. Locations of the studied areas.

의 네 곳의 정점(섬진01, 섬진02, 섬진03, 섬진04)에서 2004~2008년까지 관측된 자료를 사용하였으며, 마지막으로 만 조건은 반폐쇄해역을 대표하는 마산만의 두 곳의 정점(마산01, 마산02)에서 1997~2012년까지 관측된 자료를 사용하였다(Fig. 1). 각 해역별로 관측된 모든 조사시기의 자료를 사용하였으며, 모두 표층 자료만 사용하여 비교하였다. 마산만의 경우에는 지역의 특성상 저층 자료도 사용하여 분석하였다.

**집중비교해역의 선정:** 해수 중 암모늄의 체류시간은 비교적 짧기 때문에(McCarthy and Whitledge, 1971; Yang *et al.*, 2008a), 분기별로 관측된 자료에서는 집중적인 비교가 어려우므로, 단기간에 환경 충격을 받았을 것으로 예상되는 지역을 선정하였다. 대상해역은 먼저 서해 중부 EEZ 바다모래 채굴해역에서 2004~2007년까지 총 8회 관측된 자료를 사용하였고(Yang *et al.*, 2008a), 두 번째는 남해 중부 EEZ 바다모래 채굴해역에서 2009~2012년까지 총 15회 관측된 자료를 사용하였으며(K-water, 2010, 2012), 세 번째는 하구언이 조

성된 이후 1995~1999년까지 매일 관측된 금강하구해역 자료를 사용하였다(Jeong *et al.*, 2005). 마지막으로 일반비교해역에서 선정한 환경 충격이 없고, 자연 상태로 남아있는 섬진강하구해역을 선정하였다(Fig. 1).

#### 질소성분에 대한 명칭과 자료 분석 방법

이 연구에서는 아래와 같이 질소성분을 재구성하였다. 암모늄과 아질산염을 합하여 환원성용존무기질소(RDIN: Reduced Dissolved Inorganic Nitrogen), 질산염을 산화성용존무기질소(ODIN: Oxidized Dissolved Inorganic Nitrogen), 둘을 모두 합하여 총용존무기질소(TDIN: Total Dissolved Inorganic Nitrogen)라고 새롭게 정의하였다. 따라서 ODIN/TDIN은 총용존무기질소 중 이미 산화가 완료된 비율을 나타내고, RDIN/TDIN은 아직 산화가 완료되지 못한 상태로 남아 있는, 즉 앞으로 산화가 더 진행되어야 할 비율이다. 또한 총질소(TN)에서 총용존질소(TDN)를 뺀 값을 총입자성질소(TPN,

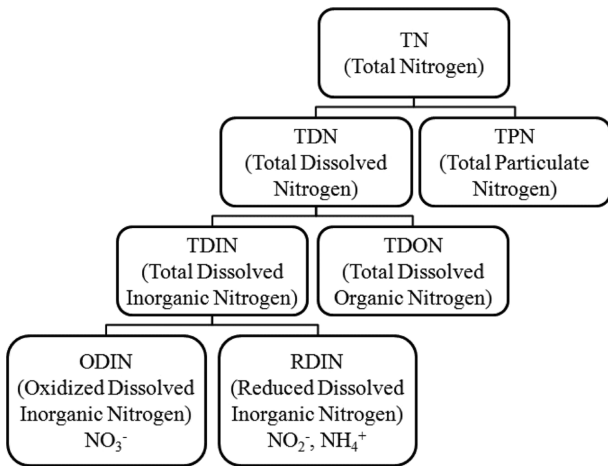


Fig. 2. Summary of the diverse nitrogen indices in this paper.

Total Particulate Nitrogen) 라고 표현하여 입자 상태로 존재하는 유기무기질소성분에 해당한다. 이러한 다소 복잡한 질소성분들의 관계를 Fig. 2에 정리하였다.

자료는 주로 통계분석을 통해 비교·분석하였다. 암모늄 자료가 환경 지표로서 가치가 있는지 객관적으로 증명하기 위해 이미 널리 사용되고 있는 기존의 다른 환경 지표들(수온, 염분, pH, DO, 영양염, Chl-*a* 등)과 상관관계를 분석하였다. 특히, 산화/환원 관련

지표(DO 혹은 DO포화도), 유기물 존재(COD), 다른 영양염(DIP, TP), 식물플랑크톤(Chl-*a*)에 초점을 두었다. 해수 중 용존 암모니아의 대부분이 암모늄 이온이라는 점을 감안하여 모든 자료를 암모늄이라고 통칭하였다. 모든 통계 분석은 SPSS(ver., 11.5)을 사용하였다.

## 결 과

### 일반비교해역

일반비교해역인 3지역에서 표층수의 평균 암모늄 농도를 Table 1에 제시하였다. 비교해역 중 동해의 원양해역조건에 해당하는 감포해역이 가장 낮은 평균 1.37 μM을 보였고, 다음은 자연 하구 환경을 대표하는 섬진강하구에서 평균 1.72 μM을 보였으며, 가장 높은 농도는 항만 조건을 대표하는 마산만에서 평균 13.80 μM을 보였다.

일반비교해역에서 표층수의 RDIN(NH<sub>4</sub><sup>+</sup> + NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)의 각 성분들과 다른 수질 항목들(수온, 염분, pH, DO, COD, Chl-*a*, SS, DIP, TP, 투명도)과의 상관관계를 분석한 결과가 Table 2에 있다. 해수 중 암모늄은 조사대상 모든 해역에서 공통적으로 DO와 음의 상관관계를 보였고, 대부분 해역에서 염분 및 pH와 음의 상관관계를 보였다. 반면 DIP 또는 TP와는 양의 상관관계를 보였다. 또한 섬진강을 제외하면 COD와 양의 상관관계를 보였다.

반폐쇄성 환경인 마산만의 저층수에서 RDIN은 표층수하고 유사하게 염분, DO와는 음의 상관관계를 보였고, 수온, DIP, TP와는

Table 1. Comparison of ammonium data among three typical marine environments

Typical marine environments	Location	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (μM)	Data Number
Off Shore	East Sea (Gampo) <sup>1)</sup> (2000-2013)	1.37	109
Natural Estuary	Sumjin-River Estuary <sup>1)</sup> (2004-2008)	1.72	80
Harbour	Masan Bay <sup>1)</sup> (1997-2012)	13.80	128

<sup>1)</sup>MEIS data

Table 2. Comparison between ammonium and other indices for the 3 typical mariner environments

Typical Marine Environments	Location	Characteristics	RDIN <sup>2)</sup>	Correlation with water parameters (+/-) <sup>3)</sup>
Off Shore	East Sea(Gampo) <sup>1)</sup> (2000-2013)	Clean Off-shore	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	+: COD, TP, -: Salinity
			NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	+: DIP -: Temperature, pH, DO, Chl- <i>a</i>
			NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	+: COD, TP -: -
Natural	Sumjin-River Estuary <sup>1)</sup> (2004-2008)	Natural Estuary	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	+: DIP -: DO
			NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	+: Temperature, DIP -: pH, DO
			NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	+: Temperature, DIP -: pH, DO, Chl- <i>a</i>
Harbour	Masan Bay <sup>1)</sup> (1997-2012)	Semi-Closed Bay	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	+: Temperature, COD, DIP, TP -: Salinity, DO, Transparency
			NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	+: Temperature, DIP, TP, SS -: Salinity, DO, Transparency
			NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	+: Temperature, COD, DIP, TP -: Salinity, DO, Transparency

<sup>1)</sup>MEIS data

<sup>2)</sup>RDIN reduced dissolved inorganic nitrogen

<sup>3)</sup>positive (+) or negative (-) correlation, >95% confidence level

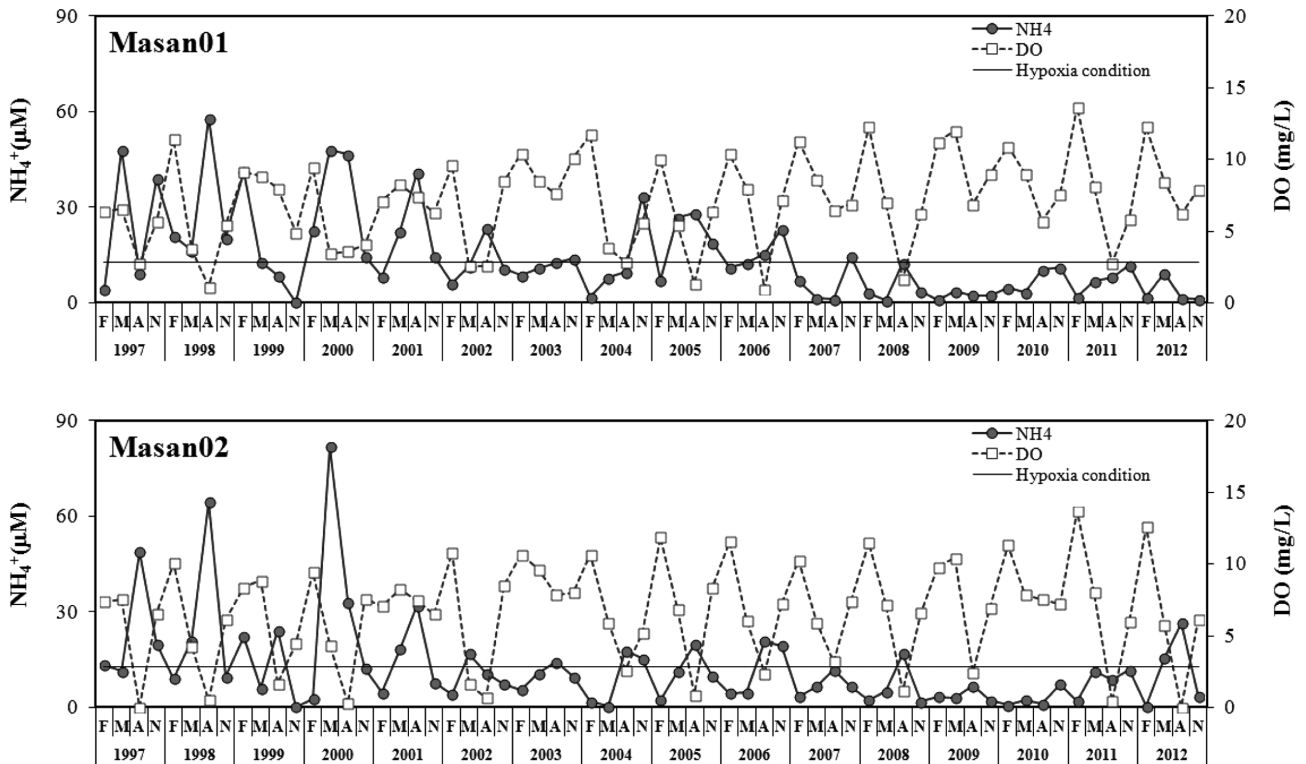


Fig. 3. Long-term variations of DO and ammonium concentrations from the bottom water of the Masan Bay.

양의 상관관계를 보였다. 특히, 마산만의 저층수에서 하계에 지속적으로 저산소 농도(hypoxia: 2.8 mg/L 미만, Diaz and Rosenberg, 1995; Wu, 2002)가 관측되고 있으며, 이와 함께 암모늄 농도는 하계에 증가하는 뚜렷한 경향을 보였다(Fig. 3).

#### 집중비교해역

집중비교해역 4곳에 대한 수질 항목들의 평균 농도를 Table 3에 정리하여 제시하였다. 해역별로 DO의 포화도를 상호 비교해보면, 섬진강은 101.5%를 보였고, 서해와 남해 EEZ 모래채굴해역(이하 EEZ로 표현)은 각각 71.8%와 97.0%를 나타냈다. 이렇게 DO의 자

료로만 보면, 비교해역간의 뚜렷한 차이점을 발견하기 어렵다. 그러나 총용존무기질소 중 산화성용존무기질소의 비율을 나타내는 ODIN/TDIN은 뚜렷한 차이점을 보이고 있다. 섬진강의 경우 ODIN/TDIN은 84.4%를 보이고, EEZ는 21.3%와 28.6%를 나타내고 있다. 이것은 EEZ 지역은 앞으로도 산화가 진행되어야 할 질소성분이 많이 남아있다는 것을 의미한다. 즉, ODIN/TDIN은 현재의 산소농도를 나타내는 DO와는 다른 정보를 제공하고 있다. 또한 유기물의 대표적인 지표인 COD의 경우, 서해 EEZ가 2.9 mg/L로 가장 높고, 섬진강은 1.2 mg/L, 남해 EEZ는 가장 낮은 1.1 mg/L를 나타냈다. 그러나 RDIN/TDIN은 섬진강이 15.6%로 가장 낮고, 서해와

Table 3. Comparison between ammonium and other indices for the intensified studied areas

Parameter	West-Sea EEZ	Sand-Mining Area	South-Sea EEZ	Sand-Mining Area	Geum-River Estuary	Sumjin-River Estuary
SS (mg/L)		15.2		2.6	43.0	11.5
COD (mg/L)		2.9		1.1	NA	1.2
DO (%)		71.8		97.0	NA	101.5
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (μM)		4.27		2.63	68.31	15.46
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (μM)		0.13		0.20	2.96	1.14
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (μM)		5.01		7.59	22.10	1.72
RDIN <sup>1</sup> /TDIN <sup>2</sup> (%)		78.7		71.4	28.3	15.6
ODIN <sup>3</sup> /TDIN <sup>2</sup> (%)		21.3		28.6	71.7	84.4
Chl- <i>a</i> (μg/L)		1.41		NA	7.62	4.63
Data Number		59-131		138-150	998-1352	80
References		Yang <i>et al.</i> , 2008a		K waters, 2010, 2012	Jeong <i>et al.</i> , 2005	MEIS, 2015

<sup>1</sup>)RDIN: reduced dissolved inorganic nitrogen (NH<sub>4</sub><sup>+</sup> + NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)

<sup>2</sup>)TDIN: total dissolved nitrogen (NH<sub>4</sub><sup>+</sup> + NO<sub>2</sub><sup>-</sup> + NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)

<sup>3</sup>)ODIN: oxidized dissolved inorganic nitrogen (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)

\*NA: Not Analyzed

**Table 4.** The seventeen density change studies of Chl-*a* in the Geum-River Estuary by the multiple regression analysis (quotation from Fig. 6 data in Jeong *et al.*, 2005)

Season	Flow rate < 50 m <sup>3</sup> /sec	Flow rate > 200 m <sup>3</sup> /sec
Spring	1. DIP, TDIN/DIP, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	11. DIP, TDIN/DIP, SS, NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>
	2. DIP, TDIN/DIP, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	12. DIP, TDIN/DIP, Salinity
	3. DIP, TDIN/DIP, Salinity, NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	
Summer		13. DIP, TDIN/DIP, NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
		14. DIP, TDIN/DIP, Salinity, NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
		15. DIP, TDIN/DIP, Salinity
		16. DIP, TDIN/DIP, TDIN, SS
Fall	4. NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , Salinity, DIP	17. NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , SS, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , TDIN/DIP
	5. NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	
	6. NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , Salinity, N/P	
Winter	7. NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , DIP, SS, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	
	8. NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , DIP, SS, NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	
	9. NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , DIP, SS, Salinity, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , TDIN/DIP	
	10. NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , Salinity	

1: 97.02.28~03.16, 2: 97.03.17~04.02, 3: 97.04.16~05.06, 4: 96.10.13~10.24, 5: 96.11.11~11.24, 6: 97.11.14~12.06, 7: 96.11.25~12.08, 8: 96.12.09~12.23, 9: 97.01.10~01.25, 10: 97.12.12~12.23, 11: 97.05.19~05.31, 12: 98.05.11~05.23, 13: 97.06.01~06.13, 14: 97.06.14~06.28, 15: 98.08.02~08.17, 16: 98.08.18~09.02, 17: 98.10.04~10.19

\*ten low fluvial flow cases: 1~10, seven high fluvial flow cases: 11~17

\*each case covers approximately 15 days which span a full half-month tidal cycle

남해 EEZ는 78.7%와 71.4%를 나타내고 있어 COD와 다른 추가적인 정보를 제공하고 있다는 점을 발견하였다.

집중비교대상 해역인 금강하구에서 매일 관측한 자료를 이용하여 Chl-*a*의 농도 변화에 영향을 미치는 수질 인자를 분석한 결과를 Table 4에 제시하였다. Chl-*a*에 대한 다중회귀분석을 수행한 결과 중 갈수기인 가을철과 겨울철에 분석된 8번의 case(각 15일 주기)에서 암모늄이 Chl-*a*를 결정하는 중요한 요인임을 보여준다(Table 4). 다중회귀분석에 사용된 각 수질인자들의 특징은 Table 5에 제시하였다. 또한 동일 기간에 유량이 높은 시기(98.10.04~10.19)를 제외하고 각 항목들 간의 상관관계를 분석한 결과는 Chl-*a* 농도와 DIP 농도는 유의한 상관관계를 나타내지 않았으나, Chl-*a* 농도와 암모늄 및 아질산염 농도는 유의한 상관관계를 보였다(Table 6). Chl-*a*가 식물플랑크톤의 생물량 혹은 생산력의 계산 근거자료로서 광범위하게 사용되고 있다는 점에서, 큰 의미가 있다. 특히 암모늄

이나 아질산염 농도가 식물플랑크톤의 성장에 결정적인 영향을 준다는 것을 의미하는 귀중한 현장자료이다.

## 토 의

### 암모늄 지표의 약점

**짧은 체류시간:** 서론에서 검토한바와 같이 해수 중 암모늄 성분은 질산화과정을 거쳐 아질산염, 질산염으로 산화되고 최종적으로 식물플랑크톤 등에 의하여 사용되어 다시 질소 순환 고리를 순환하게 된다. 연구에 의하면, 해수 중 암모늄의 상대적인 산화속도는 아질산염보다는 길지만 전체적으로 단시간 내에 산화된다(Rahmadi, 2010). 따라서 바다모래 채굴현장의 표층시료에서 관찰된 암모늄은 예외 없이 항상 아질산염보다 높은 농도로 존재 하였고, 1 km 이상 떨어진 해역에서는 이러한 높은 암모늄농도가 모두 소멸되었다

**Table 5.** The characteristics of water quality parameters from 17 case studies of the Geum-River Estuary

Season	Spring		Summer	Fall		Winter
	Low	High	High	Low	High	Low
Salinity	4.1-27.3 (17.5)	4.8-17.8 (11.4)	0.0-23.8 (8.4)	4.1-24.2 (16.5)	2.7-28.8 (8.9)	6.1-28.4 (19.0)
Chl- <i>a</i> (µg/L)	0.0-54.5 (10.6)	0.5-20.8 (6.9)	0.3-38.6 (4.2)	0.0-19.0 (3.8)	0.0-8.1 (4.2)	0.0-4.1 (1.0)
SS (mg/L)	2-90 (35)	8-48 (18)	6-458 (69)	10-224 (38)	8-144 (44)	14-210 (64)
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (µM)	4.91-160.62 (69.44)	52.36-120.99 (86.32)	19.96-123.15 (70.52)	11.67-204.80 (69.32)	58.09-204.22 (88.07)	3.02-154.05 (83.86)
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (µM)	0.44-6.42 (2.68)	2.40-4.93 (3.82)	1.00-13.39 (4.15)	1.81-6.13 (3.40)	1.25-3.85 (2.13)	0.71-4.67 (2.24)
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (µM)	0.69-57.17 (29.57)	9.84-34.61 (20.94)	3.58-47.10 (17.03)	6.54-89.39 (18.42)	2.88-10.98 (7.32)	0.21-56.27 (25.59)
DIP (µM)	0.13-3.86 (1.06)	0.40-2.33 (1.35)	0.68-3.41 (1.58)	0.65-9.06 (2.01)	1.44-2.75 (1.97)	0.39-5.49 (1.96)
TDIN/DIP	5-1022 (183)	43-248 (96)	25-213 (65)	6-149 (55)	32-113 (50)	2-216 (71)
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> /DIP	0-221 (46)	6-42 (18)	2-32 (11)	3-18 (10)	1-5 (4)	0-50 (16)
RDIN <sup>2)</sup> /TDIN (%)	3.9-65.1 (35.2)	16.1-29.1 (22.2)	4.5-52.9 (24.9)	10.4-60.7 (27.5)	4.8-17.4 (10.5)	15.7-54.4 (25.6)
ODIN <sup>3)</sup> /TDIN (%)	34.9-96.1 (64.8)	70.9-83.9 (77.8)	47.1-95.5 (75.1)	39.3-89.6 (72.5)	82.6-95.2 (89.5)	45.6-84.3 (74.4)

<sup>1)</sup>Low: < 50 m<sup>3</sup>/sec, High: > 200 m<sup>3</sup>/sec

<sup>2)</sup>RDIN: reduced dissolved inorganic nitrogen (NH<sub>4</sub><sup>+</sup> + NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)

<sup>3)</sup>ODIN: oxidized dissolved inorganic nitrogen (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)

\*Values in parentheses indicate the mean concentration of each parameter.

**Table 6.** Correlation coefficients of environmental indices during the ammonium-dominated case studies in the Geum-River Estuary

	SS	Chl- <i>a</i>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	DIN	RDIN	DIP
Salinity	0.283 <sup>2)</sup>	-0.413 <sup>2)</sup>	-0.326 <sup>2)</sup>	-0.175	-0.293 <sup>2)</sup>	-0.321 <sup>2)</sup>	-0.200 <sup>1)</sup>	0.093
SS		-0.210 <sup>1)</sup>	0.057	0.011	-0.215 <sup>1)</sup>	0.044	-0.010	-0.004
Chl- <i>a</i>			0.178	0.204 <sup>1)</sup>	0.438 <sup>2)</sup>	0.210 <sup>1)</sup>	0.243 <sup>1)</sup>	0.170
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>				0.551 <sup>2)</sup>	0.328 <sup>2)</sup>	0.976 <sup>2)</sup>	0.574 <sup>2)</sup>	0.129
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>					0.106	0.717 <sup>2)</sup>	0.995 <sup>2)</sup>	0.613 <sup>2)</sup>
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>						0.324 <sup>2)</sup>	0.200 <sup>1)</sup>	0.348 <sup>2)</sup>
DIN							0.738 <sup>2)</sup>	0.275 <sup>2)</sup>
RDIN								0.637 <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> P<0.05, <sup>2)</sup> P<0.01

(Yang *et al.*, 2008a). 이런 점을 감안하면, 해수 중 암모늄을 지표로 사용하려면, 측정간격이 지금 보다 시공간적으로 훨씬 짧아져야 한다. 이는 우리나라 해양환경측정망과 같은 공식적인 자료가 대부분 분기별 1회 조사에 그치고, 해양환경영향평가에 사업의 규모와 상관없이 조사 정점을 10개 정도로 제시하고 있다는 점을 감안하면(MOF, 2013c), 환경영향평가와 같이 통상적으로 얻어지는 관측 자료로부터 암모늄 자료를 지표로 사용하는 데에는 한계가 있다는 점이 나타난다.

**시료 보관 및 분석의 주의사항:** 해수 시료의 채취, 보관, 전처리 및 분석에 이르는 일련의 과정 중에서 채취된 시료의 올바른 보관은 측정하고자 하는 대상 물질의 변형을 막기 위해 매우 중요하다. 특히 암모늄 시료는 시료 채취 후 유리 또는 폴리에틸렌(HDPE) 용기에 보관해야 하고, 냉장보관이 불가할 때에는 수 시간 이내에 실험실로 옮겨져 분석되어야 한다. 만일 수 시간 내에 분석이 불가할 경우 폐놀용액을 시료에 1:25의 비율(예, 폐놀용액 4 mL : 해수시료 100 mL)로 넣거나 또는 냉동 보관(-20 °C 이하)한다. 이 경우 15일 정도 보관이 가능하다(MOF, 2013a). 이렇듯 암모늄은 시료의 보관에 더욱 더 주의를 기울여 분석해야 한다.

## 장점

**DO, COD와 차별되는 누적적인 산화환경의 지표:** DO는 용존산소를, COD는 화학적 산소요구량(유기물 존재의 간접적인 지표)을 표시하는 목적으로 가장 광범위하게 사용되고 있는 지표이다. 그러나 암모늄은 RDIN/TDIN, 혹은 ODIN/TDIN의 비율로서 총용존질소 중 얼마나 산화되었고, 앞으로 얼마나 산화되어야 하는지를 보여주는 지표이다. 즉, 산화성질소(ODIN/TDIN)는 DO와는 다른 정보를 제공하고, 환원성질소(RDIN/TDIN)는 COD를 다소 보완하는 추가 정보를 제공한다는 점에서 기존 지표들과 차별성이 있는 지표라는 것을 알 수 있다(Table 3). 따라서 여기에 암모늄의 잠재적인 가치가 있다. 일반비교해역은 물론, 집중비교해역에서도 다른 지표와 비교하여 차별성이 있는 결과를 얻었다. 일반비교해역에서 예외 없이 DO와 음의 상관관계를 나타냄으로서 광범위한 적용 가능성이 확인되었다(Table 2). 특히 마산만의 저층수에서 저산소 농도가 관측된 시기에 암모늄의 평균 농도는 22.96±16.15 μM(n=21)이었으며, 저산소 농도가 관측되지 않은 시기에 암모늄의 평균 농도는 11.66±12.77 μM(n=107)로 통계적으로 두 시기에 유의한 차이를 보였다(t-test, p<0.05). 또한 유기물 농도가 높은 해역에서 통상적으로 낮은 DO가 나타나는 것과는 다르게 환원성 질소를 나타

내는 지표(RDIN/TDIN)는 유기물의 공급량이 급변하는 해역(예, 하구, 모래채굴해역, 오염진행해역 등)이나, 생물학적인 산화는 이미 충분히 진행되었지만 생물이 잘 산화할 수 없는 유기물이 잔존하여 아직도 COD가 높게 나타나는 해역에서 향후 유기물의 산화 가능성을 지시하는데 있어서 기존의 COD 보다 훨씬 개선된 정보를 제공할 수 있을 것이다(Table 3). COD는 이분해성 물질과 난분해성 물질 등을 모두 포함하기 때문에 COD의 농도만으로는 해당 지역에서 산화 가능한 유기물의 양을 판단하는 것은 한계가 있다. 만약 암모늄의 생성이 다량의 유기물 공급에 의해서 영향을 받는 환경이라면, 암모늄은 상대적으로 이분해성 유기물의 분해에 의해서 빠르게 공급됨으로 이러한 유기물의 산화 과정에 민감하게 반응할 것이다. 새로 공급된 유기물 중 이분해성 유기물의 분해 과정에서 생성된 암모늄은 RDIN/TDIN의 비율을 증가시킴으로써 우리에게 산화가 더 진행될 환경임을 지시해 줄 수 있다. 이분해성 유기질의 분해가 완료되면 암모늄은 질산화 또는 식물 흡수 과정을 통해 감소됨으로 RDIN/TDIN의 비율은 감소되고, 우리는 산화가 완료되고 있는 환경임을 간접적으로 알 수 있을 것이다. 상대적으로 COD의 농도가 높은 지역이더라도 난분해성 유기물의 비율이 높을 경우에는 RDIN/TDIN의 비율이 상대적으로 낮게 나타날 수 있다. 따라서 암모늄은 산화환경의 지표로서 충분히 잠재적인 가치가 있다고 판단된다.

**단주기 변화에는 단주기 지표가 적합:** 산화환경이 유지되는 해수에서 암모늄은 질산화과정을 통해 아질산염과 질산염으로 산화되는 과정 중 식물플랑크톤 등에 의해 우선적으로 흡수 된다(Yang, 1991). 또한 서해 EEZ 모래채굴해역에서 바다모래 채굴로 인해 부유물질 등은 채굴선박으로부터 넓은 범위로 확산되는 것에 반해 암모늄 농도는 다른 수질인자들 보다 매우 좁은 범위를 보이는 것으로 보아, 해수 중 체류시간이 매우 짧다는 것을 알 수 있다(Yang *et al.*, 2008a). 이는 식물플랑크톤이 우선적으로 흡수한 결과일 수도 있고, 암모늄의 산화가 빨리 진행되어 나타난 결과일 수도 있는데, Yang *et al.*(2008a)은 암모늄 농도가 사라지는 해역에서 질산염의 농도가 급격하게 상승하는 점을 증거로 이러한 현상이 암모늄의 빠른 산화현상의 결과로 설명하였다. 이러한 점은 그 과정이 산화현상이던지, 식물플랑크톤의 흡수이던지 간에 해수 중 확산범위가 좁고, 체류시간도 매우 짧다는 점을 확인시켜준다. 또한 용승현상이 있을 때, 저층수에 공급되었거나 혹은 표층의 재생산과정을 통해 공급된 암모늄이 해수 상층부에서 오래 존재할 수 없다는 점을 유추해 한다. 즉 체류시간이 짧기 때문에 분기별 한번 관측하는 방식

으로는 용승현상에서 암모늄이 공급되는 현상을 발견할 수 없음은 물론, 바다모래 채굴현장에서 암모늄의 증가현상 또한 발견할 수 없는 것이 당연해 보인다. 따라서 분기별로 관측하는 현재의 해양 수질조사 시스템보다는 더 빈번하고, 더 자주 관측해야한다는 점을 알 수 있다. 그럼에도 불구하고 장기간에 걸쳐 조사된 자료에서는 간간히 해수 중 암모늄의 영향이 용승해역에서 유기물의 간접지표인 COD와 양의 상관관계를 나타내기도 한다(Table 2, See Gampo). 이러한 점에서 암모늄 자료는 체류시간이 짧은 인간의 활동에 대한 영향을 조사하는데 사용한다면 효과적인 것으로 판단된다. 예를 들면, 불법적인 도시하수의 유입과 범위 추적 등 짧은 event에 대해 특화된 지표로서 사용가치가 높다고 생각된다. 암모늄 자료는 다른 환경인자와 다르게 산화과정에 소요되는 시간이 비교적 짧고, 발생 이후 식물플랑크톤 등에 의해 선택적으로 흡수되므로 체류시간이 짧아서 결국 환경변화에 매우 민감하게 반응하게 된다. 이러한 점을 잘 적용한다면, 지표로서의 잠재력과 경쟁력을 확보할 수 있다.

**일차생산력의 간접적인 지표:** 만약 해수 중 암모늄 농도를 짧은 주기로 장기적으로 관측한 자료가 있다면, 식물플랑크톤의 성장에 어떠한 영향을 줄 수 있는지 판단할 수 있을 것이다. Jeong *et al.* (2005)은 금강하구에서 약 1,400일 동안 매일 측정된 자료를 기반으로 봄, 여름기간에는 DIP가 Chl-*a* 농도를 결정하는데 지배적인 인자(factor)인 반면, 가을과 겨울철에는 암모늄이 지배적이라고 보고하였다(Table 4). 이들의 자료에서 우리는 그 동안 이론적으로만 이해해왔던 “식물플랑크톤의 선택적인 암모늄 흡수과정”을 일부 확인할 수 있다. 이 17번의 case 연구에서 TDIN/DIP 비율은 조사된 모든 시기에 평균적으로 DIP가 식물플랑크톤의 제한인자로 작용하고 있는 것을 나타내고 있다(Table 5). 그러나 식물플랑크톤이 쉽게 가용할 수 있는 형태인 암모늄과 DIP의 비율은 금강하구에서 Chl-*a* 농도를 결정하는 인자들의 계절적 변화에 대한 해석을 가능하게 한다. NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/DIP의 비율을 보면, 봄철은 DIP가 제한인자로 작용하고 있으나 가을철과 겨울철에는 상대적으로 암모늄이 제한인자로 작용하고 있음을 알 수 있다(Table 4). 금강하구에서 암모늄과 DIP의 농도에 영향을 미치는 요인들은 식물플랑크톤의 흡수, 퇴적물 용출, 도시하수 유입 등 여러 요인들이 있으나 가장 큰 영향을 미치는 요인은 금강호의 방출수이다(Yang *et al.*, 1999; Jeong *et al.*, 2005; Jeong *et al.*, 2014). Jeong *et al.*(2010)은 금강호에서 장기간 관측된 자료를 분석한 결과 암모늄의 농도는 겨울철에 높고 여름철과 가을철에 낮으며, DIP는 다른 계절보다 겨울철에 상대적으로 낮은 농도를 보인다고 보고하였다. 이들의 결과에서 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/DIP의 비율을 계산해 보면 봄철에 41.22, 여름철에 13.79, 가을철에 11.10, 겨울철에 31.51로 계산되고, 이러한 결과는 금강하구와 유사하게 가을철이 봄철과 여름철 보다 상대적으로 낮은 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/DIP 비율을 보이고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 금강하구에서 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/DIP 비율은 금강호의 변화에 따라 영향을 받는 것으로 보이며, 이러한 금강호의 영향에 따라 하구 내에서 Chl-*a*를 결정하는 주요 인자들이 계절에 따라 변화되는 것으로 보인다. 또한 하구에서 갈수기는 풍수기보다 RDIN/TDIN 비율이 높고, 반대로 ODIN/TDIN 비율은 낮은 경향을 보이고 있어(Table 5), 이들의 비율 변화로 담수 유입 등 하구의 환경 변화에 대한 영향을 평가할 수 있을 것으로 보인다.

흔히 담수 호수나 담수유입의 영향을 강하게 받는 하구환경에서는

강물의 유입량, 즉 담수유입량이 가장 지배적인 영향을 주고, 다음으로 인 성분(TP 혹은 DIP)이 주도한다고 잘 알려져 있다(Jeong *et al.*, 2005). 그러나 사실상 이러한 현상은 홍수기에 지배적이다. 우리나라는 홍수기인 6-8월을 제외하면, 나머지 9개월이 갈수기에 해당하며, 이 기간 동안 강우의 영향은 작아지고, 인 성분은 저층으로 침전하게 되어 그 영향을 잃게 되는 반면, 용해도가 높은 암모늄은 수층에 남아 식물플랑크톤의 성장에 강력한 요인으로 작용하게 될 것이 예상된다. 따라서 강물의 유량이나, 인 성분(특히 총인)의 양을 관리하는데 초점을 두고 있는 현행 담수 수질관리 정책은 연안의 적조현상이나 담수호의 녹조현상을 방지하는데 크게 효과를 보지 못하고 있다. 만약, 암모늄자료가 가진 수질관리 지표로서의 장점에 관심을 둔다면, 훨씬 더 효율적인 수질관리가 가능할 것으로 판단된다. 일 년 중 수량이 풍부하여 관리가 어려운 여름철 홍수자료에 관심을 줄이고, 갈수기동안 암모늄자료에 집중하면, 적조나 녹조와 같은 식물플랑크톤의 폭발적인 성장에 관련된 문제를 보다 쉽게 해결하는 데 필요한 정보를 얻을 수 있을 것이다. 이런 점에서 암모늄 자료는 수질문제해결이라는 관점에서 소중한 지표로 사용될 잠재력이 충분하다.

## 결론

암모늄자료는 다음과 같이 특화된 분야에서 해양환경의 지표로서 잠재적인 가치가 높다. 1. 짧은 시간 주기를 가진 생물활동관련 지표(사례1: 금강하구에서 15일 주기를 가진 식물플랑크톤의 생물량 및 기초생산력, 사례2: 다양한 해역에서 저산소환경의 존재). 2. 좁은 공간 범위를 가진 오염원관련 지표(사례1: 바다모래 채굴해역에서 수백 m 범위의 저층퇴적물의 존재, 사례2: 하구와 같은 반 폐쇄해역에서 육상기원 오염물의 존재). 기존의 암모늄 자료가 가진 몇 가지 단점을 보완한다면, 현재 해양환경에서 미해결 분야로 남아있는 짧은 시공간적인 주기를 가진 현상들, 예를 들면, 적조/녹조 현상과 같은 식물플랑크톤의 폭발적인 증식현상, 저산소층의 지속적인 확대현상 등을 해결하는데 도구로 사용될 수 있을 것이다.

## 사사

이 논문은 해양환경관리공단(2014년 사업)과 한국해양과학기술진흥원(2015년 미래해양산업기술개발사업)으로부터 연구비를 지원받았으며, 연구시설 및 장비는 군산대학교 해양생물연구교육센터에서 지원을 받았습니다.

## 참고문헌(References)

- Bode, A., C.G. Castro, M.D. Doval and M. Varela, 2002. New and regenerated production and ammonium regeneration in the western Bransfield Strait region (Antarctica) during phytoplankton bloom conditions in summer. *Deep-Sea Research II*, **49**: 787-804.
- Choi, M.Y., D.S. Moon, D.H. Jung and H.J. Kim, 2012. Seasonal distribution of water masses and spatio-temporal characteristics of nutrients in the coastal areas of Ganwon province of the Korean East Sea in 2009. *J. Kor. Soc. Mar. Environ. Eng.*, **15**: 76-88.



- Chung, C.S., G.H. Hong, S.H. Kim, Y.I. Kim, D.S. Moon, J.K. Park, Y.C. Park, J.H. Lee and H.J. Lie, 2000. The origin of dissolved inorganic nutrients by Kuroshio Intermediate Water in the eastern continental shelf of the East China Sea. *J. Kor. Soc. Mar. Environ. Eng.*, **3**: 13–23.
- Cortes, A. and W.H. Kim, 2009. Factors influencing the removal of nutrient by seawater. In: *Proceeding of The Korean Society of Marine Environment & Safety in Spring*, pp. 145–147.
- Diaz, J.R. and R. Rosenberg, 1995. Marine benthic hypoxia: a review of its ecological effects and the behavioral responses of benthic macrofauna. *Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev.*, **33**: 245–303.
- Hernández-León, S., C. Almeida, M. Gómez, S. Torres, I. Montero and A. Portillo-Hahnefeld, 2001. Zooplankton biomass and indices of feeding and metabolism in island-generated eddies around Gran Canaria. *J. Marine Systems*, **30**: 51–66.
- Hernández-León, S., C. Fraga and T. Ikeda, 2008. A global estimation of mesozooplankton ammonium excretion in the open ocean. *J. of Plankton Research*, **30**: 577–585.
- Jeong, Y.H., H.S. Kim and J.S. Yang, 2010. Statistical analyses of long-term water quality variation in the Geumgang-Reservoir: focused on the TP load by migrating birds excrement. *J. Kor. Soc. Mar. Environ. Eng.*, **13**: 223–233.
- Jeong, Y.H., Y.T. Kim, Y.Z. Chae, C.W. Rhee, K.R. Ko, S.Y. Kim, J.Y. Jeong and J.S. Yang, 2005. Analysis of long-term monitoring data from the Geum River estuary. *The Sea, J. Korean Soc. Oceanogr.*, **10**: 139–144.
- Jeong, Y.H., J.S. Yang and K. Park, 2014. Changes in water quality after the construction of an estuary dam in the Geum River Estuary Dam System, Korea. *J. Coastal Res.*, **30**: 1278–1286.
- Kim, S.-W., W.-J. Go, S.-S. Kim, H.-D. Jeong and K. Yamada, 2010. Characteristics of ocean environment before and after coastal upwelling in the southeastern part of Korean Peninsula using an in-situ and multi-satellite data. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, **16**: 345–352.
- KORDI (Korea Ocean Research and Development Institute), 1997. *Marine Environmental Monitoring and Assessment Technology; Development of Coastal Water Quality Assessment and Prediction Technology*, Ministry of Environment, 356 pp.
- KORDI (Korea Ocean Research and Development Institute), 1999. *Marine Environmental Monitoring and Assessment Technology; Development of Coastal Water Quality Assessment and Prediction Technology*, Ministry of Environment, 258 pp.
- K-water, 2010. *Sea Area Utilization Impact Assessment Report on the Change of Sand Mining Site in Exclusive Economic Zone (EEZ), South Sea of Korea*, 702 pp.
- K-water, 2012. *Sea Area Utilization Impact Assessment Report (2nd) on the Change of Sand Mining Site in Exclusive Economic Zone (EEZ), South Sea of Korea*, 592 pp.
- Lee, H.-Y., 2008. *Water Quality Simulations after Completion of Saemangeum Reservoir Construction*, MS thesis, Kunsan National University, 95 pp.
- McCarthy, J.J. and T.E. Whitledge, 1971. Nitrogen excretion by anchovy (*Engraulis mordax* and *E. ringens*) and jack mackerel (*Trachurus symmetricus*). *Fishery Bulletin*, **70**: 395–401.
- MEIS (Marine Environment Information System), 2013. <http://www.meis.go.kr/rest/main>.
- MOF (Ministry of Oceans and Fisheries), 2013a. *Korean Standard Method of Examination for Marine Environment*, MOF Notification No. 2013–230.
- MOF (Ministry of Oceans and Fisheries), 2013b. *Marine Environmental Standards Pursuant to Article 8 of Marine Environment Management Act*, MOF Notification No. 2013–186.
- MOF (Ministry of Oceans and Fisheries), 2013c. *Rules on Detail of Sea Area Utilization Impact Assessment Report*, MOF Notification No. 107.
- Moon, C.-H., C. Park and S.Y. Lee, 1993. Nutrients and particulate organic matter in Asan Bay. *Bull. Korean Fish. Soc.*, **26**: 173–181.
- Moon, C.-H., H.-S. Yang and K.W. Lee, 1996. Regeneration processes of nutrients in the polar front area in the East Sea. *J. Korean Fish. Soc.*, **29**: 503–526.
- Oh, H.K., 2003. *A Study on the Improvement Effect of Sediment Quality by Using the Improvement Material*, MS thesis, Yosu National University, 108 pp.
- Park, Y.C., 1987. *Biochemical Study of Nitrogen Regeneration by Zooplankton in the Kyungki Bay, Yellow Sea*, Korea Science and Engineering Foundation Report, 108 pp.
- Rahmadi, P., 2010. *Oxidation Effects of Different Levels of Ozone on Ammonia, Nitrite, Nitrate and Dissolved Organic Carbon in Seawater*, MS thesis, Pukyong National University, 52 pp.
- Wiggert, J.D., B.H. Jones, T.D. Dickey, K.H. Brink, R.A. Weller, J. Marra and L.A. Codispoti, 2000. The Northeast Monsoon's impacts on mixing, phytoplankton biomass and nutrient cycling in the Arabian Sea. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, **47**: 1353–1385.
- Wikipedia, 2015. <https://en.wikipedia.org>.
- Willey, J.D. and H.W. Paerl, 1993. Enhancement of chlorophyll a production in Gulf Stream surface seawater by synthetic versus natural rain. *Marine Biology*, **116**: 329–334.
- Wu, R.S.S., 2002. Hypoxia: from molecular responses to ecosystem responses. *Mar. Pollut. Bull.*, **45**: 35–45.
- Yang, J.S., 1991. *Introduction to Oceanography*, Jeongdam, 459 pp.
- Yang, J.S., J.Y. Jeong, J.Y. Heo, S.H. Lee and J.Y. Choi, 1999. Chemical mass balance of materials in the Keum River Estuary 1. Seasonal distribution of nutrients. *The Sea, J. Korean Soc. Oceanogr.*, **4**: 71–79.
- Yang, J.S., Y.H. Jeong and K.H. Ji, 2008a. Changes in the sensitive chemical parameters of the seawater in EEZ, Yellow Sea during and after the sand mining operation. *The Sea, J. Korean Soc. Oceanogr.*, **13**: 1–14.
- Yang, J.S., Y.H. Jeong, K.H. Ji, H.S. Kim, J.H. Choi and W.J. Kim, 2008b. The early-stage changes of water qualities after the Saemangeum sea-dike construction. *J. Kor. Soc. Mar. Environ. Eng.*, **11**: 199–213.

2015년 10월 12일 원고접수

2016년 5월 13일 수정본 접수

2016년 5월 25일 수정본 채택

담당편집위원: 김기범