

고밀도 축제식 양식장의 질소역학과 대하 (*Fenneropenaeus chinensis*) 성장

강윤호* · 윤양호¹

여수대학교 수산증양식연구센터, ¹여수대학교 해양시스템학부

Nitrogen Dynamics and Growing of Shrimp (*Fenneropenaeus chinensis*) in the High Density Aquaculture Ponds

Yun Ho KANG* and Yang Ho YOON¹

Aquaculture Research Center, Yosu National University, Yeosu 550-749, Korea

¹Division of Ocean System, Yosu National University, Yeosu 550-749, Korea

A mathematical model is used to investigate nitrogen dynamics in the intensive aquaculture ponds in the western coast of Korea. Parameters associated with water quality, sediments and growing of shrimp (*Fenneropenaeus chinensis*) are measured to calibrate the model for feeding ponds A and B and storage ponds. The model describes the fate of nitrogen including loadings of ammonia from feeds, phytoplankton assimilation, nitrification, sedimentation, volatilization and discharge. The model obtains good agreements with the measured values of TAN (NH₄, NH₃), NO (NO₂, NO₃) and Chl (chlorophyll a). Impacts of water exchange on TAN and Chl are investigated, showing that the range of 0.01-0.2 (/day) cannot effectively reduce TAN but reduces Chl. Nitrogen in the ponds A is removed by sedimentation 66%, volatilization 18%, discharge of particulate and dissolved 8%. The pond B shows 56% and 26% of sedimentation and volatilization, respectively, to yield 10% decrease and 8% increase compared to those in the pond A. While the pond A has larger area (1.02:0.66 ha) and same stocking density (0.025 ind./L) at the beginning of culture, the pond B obtains higher stocking density (0.0065:0.0091 ind./L), longer feeding period (103:121 day) and resultant higher shrimp production (1.15:2.13 t/ha/cycle) at harvest. This is possibly due to the hydraulic characteristics driven by paddlewheels. At low ratio of the low speed area and the pond area, the rate of sedimentation is high, while the rate of gas exchange is low. Thus, the measurement and model analysis suggest that water quality and shrimp production are positively correlated with the hydraulic characteristics in the shrimp ponds.

Keywords: Shrimp pond, Nitrogen dynamics, Paddlewheel, *Fenneropenaeus chinensis*

서 론

질소성분은 호지의 수질관리에서 영양염과 독성이란 두 가지 측면에서 중요한 역할을 한다 (Lorenzen et al., 1997). 대하의 성장은 사료 중 단백질로 공급되는 질소에 크게 의존한다. 사료의 일부는 생체량 증가에 사용되거나 배설 혹은 배출되어 암모니아성 질소로 전환된다. 먹지 않은 사료는 바닥에 가라앉거나 암모니아성 질소로 전환된다. 이들 무기용존성 질소성분은 식물플랑크톤의 성장에도 또한 매우 중요하다. 질소성분 중 NH₃-N와 NO₂-N는 독성이 강해 대하의 성장을 저해하는 것으로 보고되었다 (Wickins, 1976). 따라서, 질소 중 독성성분의 농도를 감소하는 것은 양식장관리에 매우 중요하다 (Montoya et al., 2002).

본 연구는 서해안 축제식 대하양식장의 수질, 저질 및 대하 성장에 대해 조사하고 질소역학모형을 이용하여 질소수지 및 생태계를 재현하고자 한다. 모형의 초기조건으로 두 곳의 사육호지에 동일한 사육밀도와 교환율을 산정하였으나 수차

(paddlewheel) 에 의한 순환특성은 다르게 하였다. 모형에는 사료급이에 의한 유입, 대하에 의한 섭식과 배설, 식물플랑크톤에 의한 동화, 박테리아에 의한 질산화, 휘발, 취수 및 배수에 대한 기구를 포함시켰다 (Briggs and Funge-Smith, 1994; Burford and Longmore, 2001; Burford and Lorenzen, 2004; Jackson et al., 2003; Lorenzen et al., 1997; Montoya et al., 2002). 모형을 사육호지에 적용하여 관측값과 모형결과를 비교하여 보정하였다. 호지의 질소제거 기구를 정량적으로 비교하였으며, 교환율이 질소와 식물플랑크톤 농도에 미치는 영향을 평가하였다. 아울러, 대하 생산량과 수질 및 수리 역학적 환경요인의 상관관계에 대해 해석하였다.

재료 및 방법

연구지역

본 연구는 전북 고창군에 위치하는 대하양식장에서 수행되었다. 사육장은 보리새우 보리새우속에 속하는 대하 (*Fenneropenaeus chinensis*)이다. 양식장은 9개의 사육호지와 2개의 저

*Corresponding author: ykang@yosu.ac.kr

장호지로 구성되어 있다. 본 연구에서는 사육호지 A, B와 저장호지 R1과 R2를 사용하였다. 호지 면적은 각각 1.02, 0.66, 0.93, 0.60 ha이며 수심은 A와 B가 1.2 m, R1과 R2는 각각 2.0와 1.5 m이다. 저장호지는 사육수를 일시적으로 취수하여 모아두는 장소이다. 양식장 주위는 조차가 크고 (대조시 약 8 m), 공간대가 넓게 발달되어 있다. 양식장은 상부 공간대에 위치하기 때문에 해수를 취수할 수 있는 고조시 충분한 양의 해수를 확보하여야 한다. 취수는 호지 R1에 설치된 도수관을 통해 유입되어 R2로 이동되며, 펌프를 이용하여 주위 호지로 운반된다. 배수는 중력에 의해 배수로로 배출된다. 호지의 일일 교환율은 호지 체적의 약 5%이다. 사육수의 흐름과정은 A의 경우, 취수 → R1 → A → 배수 그리고 B의 경우, 취수 → R1 → R2 → B → 배수의 과정을 거친다.

환경요인 측정 및 분석

양식장의 환경조사는 치하가 입식되는 2001년 5월 27일부터 사육이 종료되는 10월 1일까지 이루어졌다. 사료량과 수온은 매일 측정되었다. 수질 및 저질 항목에 대해서는 7차례 (6월 10일, 6월 24일, 7월 26일, 8월 19일, 9월 1일, 9월 23일, 10월 1일)에 걸쳐 호지 A, B, R1, R2에서 층별 (0, 0.5, 0.8, 1, 1.5, 2 m)로 관측되었다. 수질항목에는 암모니아성 질소, 질산성 질소, 아질산성 질소, 무기 인, 용존산소, pH, Chl-a를 포함한다. 저질항목은 화학적 산소요구량, 황화수소, 강열감량을 포함한다. 현장에서 관측할 수 없는 항목에 대해서는 시료를 밀폐된 용기 혹은 비닐봉지에 넣어 냉동박스를 이용하여 실험실로 운반한 후 실험하였다 (Parsons et al., 1984).

질소수지모형

양식장 호지의 체적이 시간에 관계없이 일정하다고 가정할 때, 박스모형을 이용한 물질수지는 아래와 같다 (Schnoor, 1996):

$$V_j \frac{dC_j}{dt} = \sum_{i=1}^n Q_{ij} C_i - \sum_{k=1}^n Q_{jk} C_j + S_R \quad (1)$$

위 식에서 V 는 체적 (m^3), C 는 용존물의 농도 (mg/L), t 는 시간, n 은 박스 j 에 인접한 박스의 수, Q_{ij} 는 i 에서 j 로 유입되는 유량 (m^3/s), S_R 은 직접부하량과 생지화학적반응에 의한 양이다. 강수는 유입 유량으로 유량수지에 포함된다. 호지의 일일 교환율은 호지 체적의 약 5%이며, 유출량은 강수량과 유입량의 합으로 가정하였다. 수질과라미터로는 TAN (total ammonia nitrogen), NO (nitrate and nitrite N), Chl (chlorophyll a)을 포함하였다. 이들의 생지화학적반응은 식 1에서 유입-유출 항과 체적을 제거하였을 때 각기 아래와 같다 (Lorenzen et al., 1997):

$$\frac{d[C_{TAN}]}{dt} = -(k_n + v) [C_{TAN}] - g c [C_{Chl}] \frac{[C_{TAN}]}{[C_{TAN}] + [C_{NO}]} + \frac{L_{TAN}}{H} \quad (2)$$

$$\frac{d[C_{NO}]}{dt} = k_n [C_{TAN}] - g c [C_{Chl}] \frac{[C_{NO}]}{[C_{TAN}] + [C_{NO}]} \quad (3)$$

$$\frac{d[C_{Chl}]}{dt} = (g - s) [C_{Chl}] \quad (4)$$

위 식에서 $[C_{TAN}]$ 는 TAN 농도 (mg/L), t 는 시간 (day), k_n 은 질산화 속도 (day), v 는 휘발속도 (/day), g 는 조류의 성장속도 (/day), c 는 질소와 엽록소의 비 (무차원), $[C_{Chl}]$ 는 Chl-a 농도 (mg/L), $[C_{NO}]$ 는 NO 농도 (mg/L), L_{TAN} 은 TAN 외부부하량 ($g/m^2/day$), H 는 수심 (m), s 는 퇴적속도 (/day)이다.

대하양식장에서 질소의 휘발속도에 대해서는 측정된 바 없어 다음과 같이 추정하였다. 수심 1m 호소에서 질소의 휘발속도는 약 0.2/day이며, 수차를 사용하는 새우양식장에서 산소전달속도는 호소의 5배까지 증가하였다. 수차가 질소에 대해서도 유사한 효과를 갖는다고 가정하면, 휘발속도는 1/day가 가능하다. Lorenzen et al. (1997)은 평균 pH 8.5에서 총암모니아의 20%가 암모니아로 전환되기 때문에 TAN의 최대 휘발속도를 0.2/day로 정의하였다. 본 연구에서는 동일한 값을 적용하였다.

조류의 성장속도는 빛과 영양염에 의해 조절되며 아래와 같다:

$$g = g_{max} \cdot F(L) \cdot \min(F(N), F(P)) \cdot F(T) \quad (5)$$

위 식에서 g_{max} 는 조류 최대성장속도 (/day), $F(L)$ 은 Lambert-Beer law에 의한 빛 조절인자, $F(N)$ 과 $F(P)$ 는 Michaelis-Menten 모델에 의한 질소 및 인에 의한 조절인자, $F(T)$ 는 수온에 의한 성장 조절인자이다. 이들은 무차원이며 아래와 같다:

$$F(L) = \frac{2.718}{k} \left[\exp\left(-\frac{I_0}{I_s} \exp(-kH)\right) - \exp\left(-\frac{I_0}{I_s}\right) \right] \quad (6)$$

$$F(N) = \frac{[C_{TAN}] + [C_{NO}]}{[C_{TAN}] + [C_{NO}] + K_{sN}} \quad (7)$$

$$F(P) = \frac{[C_{DRP}]}{[C_{DRP}] + K_{sP}} \quad (8)$$

$$F(T) = \begin{cases} \text{EXP}(-k_1[T - TM]^2) & \text{if } T \leq TM \\ \text{EXP}(-k_2[TM - T]^2) & \text{if } T > TM \end{cases} \quad (9)$$

위 식에서 k 는 소광계수 (Steele, 1962; $k = k_{Chl} [C_{Chl}] + k_{other}$; k_{Chl} 는 단위 엽록소농도 당 소광계수이며 k_{other} 는 비엽록소원에 의한 소광계수이다), I_0 는 표면에서 빛의 강도 ($E/m^2/day$), I_s 는 포화강도 ($E/m^2/day$), K_{sN} 은 질소의 반포화상수 (mg/L), K_{sP} 는 인의 반포화상수 (mg/L), $[C_{DRP}]$ 는 용존반응성 인 농도 (mg/L), T 는 수온 ($^{\circ}C$), TM 은 조류성장 최적온도 ($^{\circ}C$), k_1 과 k_2 는 온도가 TM 보다 낮거나 높을 때 온도효과 ($^{\circ}C^{-2}$)이다. 위 식에서 사용된 각종 변수에 대해서는 Table 1에 제시하였다.

Table 1. Input parameter description and values for ponds A and B

Parameters	Pond A	Pond B
Environmental parameters		
Pond depth H (m)	1.2	1.2
Pond area (ha)	1.01	0.66
Surface light intensity I_0 (E/m ² /day)	40	40
Saturation light intensity I_s (E/m ² /day)	40-50	40-50
Extinction from Chl k_{Chl} (/m/mg)	11.9	11.9
Extinction from non-Chl k_{other} (/m)	4.0	4.0
Nitrogen dynamics parameters		
Nitrification rate k_n (/day)	0.1	0.1
Max. phytoplankton growth rate g_{max} (/day)	2.1	2.1
Nitrogen half-saturation K_{SN}	0.0002	0.0002
Phosphorus half-saturation K_{SP}	0.008	0.008
Sedimentation rate s (/day)	0.3	0.3
Volatilization rate v (/day)	0.15	0.2
Saturation temp. for algae growth TM (°C)	30	30
Temp. effect at $T \leq TM$ k_{T1} (°C ⁻²)	0.02	0.02
Temp. effect at $T > TM$ k_{T2} (°C ⁻²)	0.004	0.004
Shrimp growing parameters		
Shrimp VBGF growth rate G (/day)	0.0011	0.00115
Shrimp stocking density at time of stocking N_0 (ind./L)	0.025	0.025
Shrimp mortality M (/day)	0.012	0.0081
Shrimp VBGF asymptotic body weight W_∞ (g)	60	60
Shrimp VBGF body weight at time of stocking W_0 (g)	0.01	0.01

대하의 성장

대하의 성장을 파악하기 위해 체장과 체중을 6월 28일부터 9월 26일까지 10일 간격으로 모두 11회 측정하였다. 매회 각 호지에서 대하 30마리 이상을 채집한 평균값을 사용하였다. 호지내 모든 대하의 연령과 크기가 같을 때, 대하의 체중과 사육밀도는 von Bertalanffy growth function (VBGF)과 지수함수적 사망모델을 사용하여 구하였다 (Gulland, 1983):

$$W_t = [W_\infty^{1/3} - (W_\infty^{1/3} - W_0^{1/3}) \text{EXP}(-G t)]^3 \quad (10)$$

$$N_t = N_0 \text{EXP}(-Mt) \quad (11)$$

위 식에서 W_∞ 은 대하의 점근체중 (g), W_0 은 사육 시작 때 대하의 체중 (g), G 는 대하의 성장속도 (/day), N_0 은 사육 시작 때 대하의 사육밀도 (ind./L), M 은 대하의 사망속도 (/day)이다. 각종 변수 값에 대해서는 Table 1에 제시하였다. 대하생산량은 체중, 밀도와 양식장체적 (m³)을 이용하여 구하였다:

$$P_s = N_t W_t V \quad (12)$$

결과 및 토의

관측결과

수온은 매일 오전 9시와 오후 3시경에 각기 19-31°C와 19.5-33.5°C의 범위를 보였으며, 최대 일일 온도차는 4.5°C인

것으로 나타났다. 최대수온은 8월 12, 13일 관측된 33.5°C로서 강수가 없고 풍속이 비교적 약할 때 태양복사가 호지 수면에 장시간 입사한 결과로 생각되었다. 사료는 대하의 성장에 따라 일일 4-6 차례 투하되었다. Fig. 1에서 호지 A와 B의 일일 최대 투여량은 0.0065, 0.0079 kg/m²이며 총량은 각기 0.183, 0.27 kg/m²이다. 투여량은 대하성장에 따라 일정하게 증가하나, 수온하강과 강수로 인해 급격한 환경변화가 발생할 경우 대하가 먹이를 먹지 않는 습성을 고려하여 관리자가 먹이투여를 조절하였다.

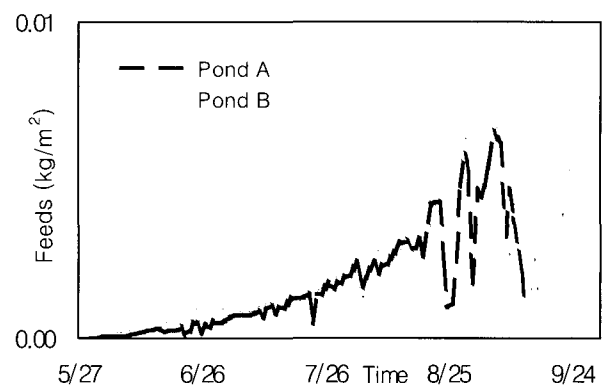


Fig. 1. Feed inputs for ponds A and B during culture period.

Table 2. Environmental parameters measured in feeding and storage ponds (unit: COD-mgO₂/g-dry, H₂S-mgS/g-dry)

Date	Pond	Water column								Sediments		
		TAN mg/L	NO mg/L	PO ₄ -P mg/L	Chl mg/L	N/P	DO mg/L	SS ng/L	pH	COD	H ₂ S	IL %
June 10	A	0.015	0.011	0.014	5.68	3.33	-	26.40	-	-	-	-
	B	0.009	0.011	0.007	10.06	6.46	-	29.80	-	-	-	-
	R1	0.035	0.008	0.009	5.57	4.17	-	22.60	-	-	-	-
	R2	0.020	0.012	0.008	6.07	6.12	-	22.00	-	-	-	-
June 24	A	0.012	0.010	0.031	10.08	1.15	6.21	45.95	8.34	5.14	0.39	1.80
	B	0.026	0.011	0.025	13.58	1.73	7.13	38.50	8.56	4.44	0.03	1.76
	R1	0.007	0.012	0.008	7.24	5.11	6.93	24.90	7.95	3.39	0.00	1.33
	R2	0.010	0.009	0.004	4.93	8.92	7.27	23.30	8.25	3.43	0.02	1.53
July 26	A	0.055	0.006	0.031	9.03	0.81	7.49	21.40	8.17	5.94	0.69	1.78
	B	0.009	0.008	0.041	11.26	0.87	8.15	26.70	8.38	4.70	0.60	1.77
	R1	0.001	0.006	0.007	9.06	3.38	6.73	21.40	8.00	3.52	0.00	1.76
	R2	0.015	0.006	0.008	8.08	2.82	6.88	31.40	7.87	5.93	0.15	1.74
Aug. 19	A	0.096	0.006	0.086	18.75	0.52	7.34	36.65	8.10	4.30	0.03	0.96
	B	0.016	0.010	0.112	74.95	0.33	8.65	44.55	8.58	3.93	0.51	1.55
	R1	0.008	0.004	0.008	3.12	2.11	5.86	26.00	7.95	7.40	0.01	1.58
	R2	0.004	0.005	0.006	1.63	3.21	5.81	26.80	7.86	7.01	0.35	1.18
Sep. 1	A	0.194	0.026	0.061	59.08	1.37	8.50	67.93	7.83	7.65	0.76	1.63
	B	0.019	0.006	0.031	42.51	0.83	9.31	66.00	8.17	5.55	0.66	1.29
	R1	0.018	0.005	0.006	8.14	3.42	6.85	23.60	7.86	6.13	0.23	1.90
	R2	0.014	0.003	0.006	10.89	1.90	8.90	24.50	7.93	6.22	0.15	1.97
Sep. 23	B	0.134	0.007	0.056	42.65	0.38	9.23	36.75	8.39	4.89	0.79	1.39
	R1	0.020	0.003	0.007	5.00	2.82	10.19	20.60	8.36	8.18	0.30	1.56
	R2	0.026	0.003	0.006	1.88	3.55	9.15	17.50	7.86	7.49	0.60	1.86

호지 A, B, R1과 R2에서 관측된 TAN의 농도범위는 각각 0.012-0.194, 0.009-0.134, 0.001-0.035 그리고 0.004-0.026 mg/L 이다 (Table 2). 호지 A에서는 TAN의 농도가 일정하게 증가하여 8월 19일 0.096 mg/L, 9월 1일 최대 0.194 mg/L 까지 증가하였다. 이 시기 대하의 폐사가 발생하기 시작하여 9월 14일 수확이 이루어졌다. 호지 B에서는 9월 1일 0.019 mg/L의 수치를 보이다가 9월 28일 0.134 mg/L 까지 급격히 증가하였다. 이 시기는 대하가 폐사하기 시작하여 수확이 이루어진 때이다. 한편, 국내외 새우양식장에서 보고된 자료로는 국내 0.08-0.32 mg/L (Kang et al., 2000), 태국 0.98-6.50 mg/L (Dierberg and Kiattisimkul, 1996), 동남아시아 0.05-1.0 mg/L (Boyd and Tucker, 1998) 등이 있다. 본 연구의 관측값은 기존자료에 비해 낮으며, 이는 사육밀도가 작기 때문에 TAN의 공급원인 사료와 대하생체량이 감소한 까닭으로 생각되었다. 최대농도는 대하가 폐사하며 수질이 가장 악화되는 시기에 관측되었다. 사육호지에서 질소의 주 공급원은 사료이다. 사료는 단백질이 풍부하며 투여량은 Fig. 1에 도시한 바와 같다. 사료 중 조단백질의 함량은 37-55% (평균 45%)이며, 조단백질에서 질소가 차지하는 함량은 일반적으로 16%를 가정할 수 있지만, 사료의 종류에 따라 다양하게 나타날 수 있다. 투여된 사료 중 90-95%는 먹이로 사용되고 나머지 5-10%는 바닥에 가라앉

는다 (Boyd and Tucker, 1995). 섭취된 양 중 80-90%가 장으로 흡수되어, 이 중 20-25% 만이 생물성장에 사용된다. 결과적으로 호지에 투여된 사료의 15-20% 만이 성장에 사용되고 나머지 80-85%는 암모니아로 사육수로 공급된다 (Folke and Kautsky, 1989). 따라서, 투여된 사료량의 약 6% 만이 질소형태로 사육수로 공급된다고 할 수 있으며, 이를 모형실험의 입력값으로 사용하였다.

암모니아성 질소의 독성은 NH₃-N에 기인하며 TAN에서 NH₄-N과 NH₃-N의 비율은 수온과 pH의 함수로서 다음과 같이 구할 수 있다 (Emerson et al., 1975):

$$NH_3 - N = \frac{TAN}{1 + \text{antilog}(pK_a - pH)} \quad (13)$$

위 식에서 pKa는 산도상수 (=0.09018+2729.92/(273.15+T))이다. 계산결과 호지 A와 B에서 NH₃-N 범위는 각각 0.016-0.151, 0.011-0.149 mg/L이다. Chen and Lin (1992)의 최대허용농도 0.16-0.22 mg/L를 기준으로 독성은 크지 않은 것으로 나타났다. 그러나 하루를 주기로 생물의 호흡과 광합성에 따른 CO₂ 농도변화는 pH 변화를 유발하고 이는 다시 NH₃-N 농도를 변화시킬 수 있다(Tucker and Lloyd, 1984). TAN 농도는 일정하게 유지될 수 있는 반면, NH₃-N는 급격한 변화를 보일 수

있음에 주의가 요구된다.

NO의 농도범위는 호지 A, B, R1, R2에서 각각 0.006-0.026, 0.006-0.011, 0.003-0.012, 0.003-0.018 mg/L인 것으로 나타났다 (Table 2). 국내의 경우 0.122- 0.270 mg/L (Kang et al., 2000), 사육밀도 (30-70 ind./m²)에 따라 0.09-0.23 mg/L (Dierberg and Kiattisimkul, 1996)가 보고된 바 있다. 최대관측값 0.026 mg/L는 보고된 최소값보다 작게 나타났다. NO 농도 변화는 질산화 및 탈질산화 두 가지 과정에 기인한다. 연구 호지는 두 가지 기구가 동시에 발생할 수 있는데 이는 수차를 사용하는 호지의 흐름특성에 기인한다. 수차는 호지의 모서리에 설치되어 호지 벽을 따라 강한 흐름을 생성시키는 반면 중앙에는 흐름이 약화되는 와류를 생성한다 (Kang, 2001; Kang et al., 2004). 따라서 호지의 가장자리는 얇은 수심과 강한 흐름에 의해 비교적 산화환경이 유지되고 중앙은 수온증가와 용존산소 감소로 인해 환원환경이 발생할 가능성이 있다. 향후, 호지의 가장자리와 중앙에서 관측이 동시에 이루어져야 전체의 수질을 정확히 파악할 수 있을 것으로 생각되었다. 한편, NO₂-N의 독성에 따른 *Penaeus monodon*의 최대허용농도 2 mg/L (Chen and Chen, 1992)를 고려하였을 때, 사육호지에서 NO₂-N 농도는 대하의 생육에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 생각되었다.

PO₄-P의 농도범위는 사육호지에서 0.007-0.112 mg/L이며 최대값은 보고된 값의 범위에 속하는 것으로 나타났다 (Table 2). 호지 방류수의 경우 0.05-0.4 mg/L (Boyd and Tucker, 1998), 사육밀도 (30-70 ind./m²)에 따라 0.18-0.32 mg/L (Dierberg and Kiattisimkul, 1996)의 값이 보고된 바 있다.

N/P비를 이용하면 식물플랑크톤이나 해수의 화학조성이 일정하다는 Redfield비에 근거해서 조류의 성장에 미치는 영양염의 영향을 평가할 수 있다 (Redfield et al., 1963; Rhee, 1978). 사육호지와 저장호지에서 N/P비는 각각 0.33-6.46, 1.90-8.92 이다 (Table 2). 질소가 인에 비해 상대적으로 작기 때문에 조류성장의 제한자는 질소라고 생각할 수 있다. 한편, 호지에서 N/P비가 29 이상이면 남조류는 거의 발생하지 않으나 (Smith, 1983), 16 이하로 낮을 경우 대량증식이 발생하는 것으로 보고된 바 있다 (Rhee and Gotham, 1980; Seymour 1980; Yusoff and McNabb, 1989; Paerl and Tucker, 1995). 남조류는 담수 및 염분이 작은 기수에 서식하며 (Paerl and Tucker, 1995), 집약식 새우양식장에서는 27.2-35.5 psu에서도 16개 속이 보고된 바 있다 (Lovell and Broce, 1985). 본 연구에서 남조류에 대한 동정자료는 없으나, 호지 저층의 색과 생물번식 양상을 보아 남조류로 의심되는 현상이 사육호지에서 장기간 발생되었다. 사육호지의 낮은 N/P비는 남조류의 발생에 영향을 미칠 것으로 생각되었다.

Chl의 농도범위는 호지 A, B, R1, R2에서 각각 5.68-59.08, 10.06-74.95, 3.12-9.06, 1.63-10.89 µg/L으로 높게 나타났다 (Table 2). 호지 방류수의 경우 20-250 µg/L (Boyd and Tucker, 1998), 사육밀도 (30-70 ind./m²)에 따라 70-350 µg/L (Dierberg and Kiattisimkul, 1996)의 값이 보고된 바 있다. 본 연구에서

최대관측값 75 µg/L는 사육밀도 30 ind./m² 경우에 해당하는 값과 유사하다. 호지 A의 최대값은 8월 19일 발생하였다. 이 시기의 최대 수온범위는 30-33°C이며 N/P비는 0.33인 것으로 나타났다. 호지 B의 최대값은 9월 1일 발생하였으며 이 시기의 수온은 26-30°C이며 N/P비는 1.37인 것으로 나타났다.

DO는 사육호지에서 6.2-9.3 mg/L인 것으로 나타났다 (Table 2). 국내의 경우 약 4.8-6.5 mg/L (Kang et al., 2000), 일반적인 방류수 농도 4-12 mg/L (Boyd and Tucker, 1998) 등이 보고된 바 있다. 최소관측값이 6.2 mg/L인 것으로 보아 산소공급은 충분한 것으로 보이나 호지의 순환특성에 따라 국부적인 DO 분포는 낮을 수도 있을 것으로 생각되었다. SS는 사육호지에서 21.4-67.9 mg/L, 저장호지에서 평균 20 mg/L인 것으로 보아 사육호지의 물질수지와 순환특성에 따른 증분은 약 50 mg/L인 것으로 파악되었다 (Table 2).

퇴적물에서 측정된 COD, H₂S, IL(강열감량)는 유사한 대하 양식장에서 보고된 값 (2.4-14.8 mgO₂/g-dry, 0.9-4.7 mgS/g-dry, 4-11.8%)에 비해 낮게 나타났다 (Kang et al., 2000). 특히, 폐사가 발생한 9월의 관측값 또한 비교적 양호한 것으로 나타났다. 이는 수주의 SS 분포와 마찬가지로 수차에 의한 호지의 수리적 흐름특성에 다소 기인하는 것으로 생각된다. 와류 생성은 와류 중심에서 흐름의 유속을 약화시키고 아울러 바닥층으로 입자를 끌어 모아 퇴적시키는 “찾잔효과”를 갖는다 (Kang et al., 2004; Peterson et al., 2001). 대하 사육호지와 같이 수차를 장기간 일정하게 이용하는 경우, 호지의 흐름은 정류가 되어 부유입자가 세립질일수록 가장자리보다는 중앙으로 이동하여 가라앉게 된다. 따라서 유기물 입자들은 호지중앙으로 이동하여 저질에 영향을 미칠 수 있을 것으로 생각되었다.

모형보정

TAN, NO, Chl에 대한 모형의 결과는 호지 A와 B에서 관측값과 유사하게 계산되었다 (Fig. 2). TAN 지배방정식은 질산화, 휘발, 조류섭식 및 외부부하 항으로 구성된다 (식 2). 질산화상수와 휘발계수는 각각 0.06-0.2, 0.007-0.2 (Lorenzen et al., 1997)으로 보고된 바 있으나, 본 연구에서는 0.1과 0.15-0.2로 보정되었다. 특히, 휘발계수는 수차에 의한 효과를 고려하여 면적이 작은 호지 B에서 크게 주어졌다. 사료투여에 따른 외부부하량은 농도변화의 가장 큰 요인으로 파악되었다. 급이된 사료는 먹지 않은 양, 먹어서 배설 및 배출된 양 모두 호지로 유입되면서 암모니아 형태로 전환된다 (Folke and Kautsky, 1989). 실험결과 TAN 부하량은 이론적으로 계산된 사료량의 5.7% 보다 작은 3%와 0.5%로 보정되었다. 이에 대한 원인은 급이사료 중 많은 부분이 대하의 체중으로 사용된 것으로 생각되었다. 즉, 대하의 사료계수 (=사료총급이량/증육량)가 작은 것을 의미한다. 계산결과, 사료계수는 호지 A와 B에서 각각 평균 1.6과 1.3으로 나타났다.

Chl 농도는 조류성장과 침강에 의해 결정된다 (식 4). 성장속도는 빛, 수온, 영양염에 의해 결정된다 (식 5). 빛에 의한 제한효과는 태양복사가 수주를 투과하는 수심과 시간에 의해

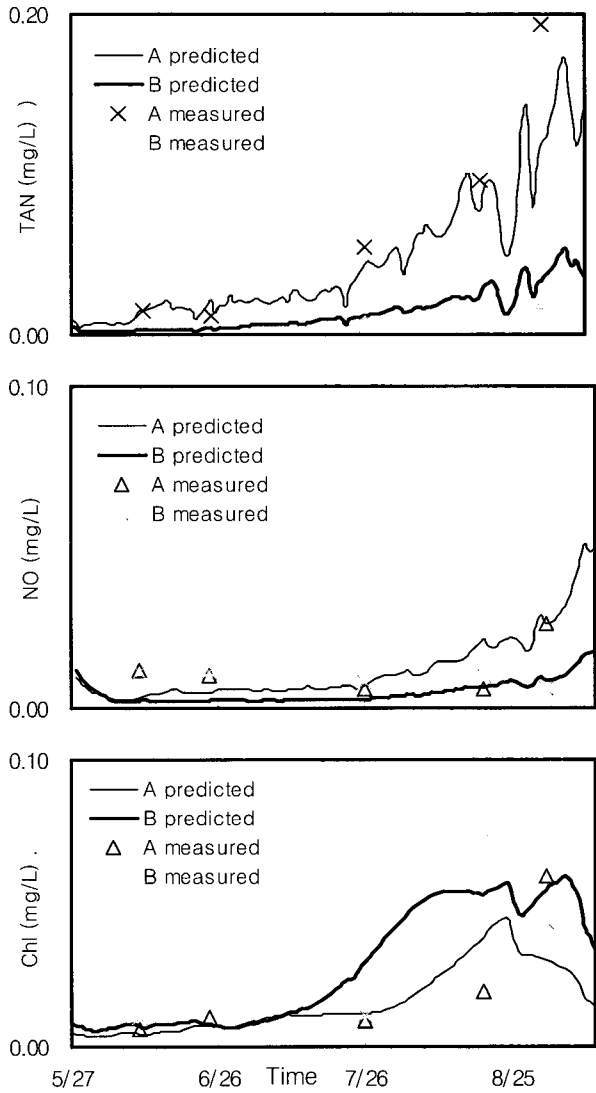


Fig. 2. Comparison between the predicted and measured values of TAN, NO and Chl from the top.

결정된다 (식 6). 특히, 부유고형물 및 플랑크톤 생물량에 의해 투과량은 감소할 수 있다. 8월과 9월 높은 Chl은 수온 상승과 영양염증가로 인한 것으로 생각되었다. 호지 A에서 Chl이 상승한 8월 19일 수온은 매우 높고, TAN과 NO는 높지 않았으나 PO₄-P가 높아 N/P비는 가장 작았다. 호지 B에서 Chl이 상승한 9월 1일 수온은 높고, TAN과 NO는 매우 높고, PO₄-P 높아 N/P비는 호지 B에서 6월 자료를 제외하고는 가장 높았다.

질소수지

모형을 이용하여 사육기간 동안 호지에 투여된 총질소의 거동을 계산하여 비교하였다 (Fig. 3). 호지의 수주로부터 질소가 제거되는 기구는 침강, 휘발, 배수에 의한 입자성, 용존성 질소의 감소를 포함한다. 이들 기구의 중요도는 호지에 따라 다른 것으로 나타났다. 호지 A의 경우, 입자성질소 (식물플랑크톤)의 침강이 전체의 66%로 가장 크고, 다음은 휘발 18%, 용존성과 입자성 질소의 배수에 의한 제거가 각각 8%로 나타났다. 호지 B의 경우 침강 56%, 휘발 26%, 배수 18%로 나타났다. 호지 A는 B에 비해 침강이 약 10% 많은 반면, 휘발은 8% 작게 나타났다. 이는 호지 A가 B에 비해 면적은 1.5배 큰데 반해 수차는 동일하게 네 대를 사용하는 수리적 특성에 기인하는 것으로 생각되었다. 호지 A는 약한 유속구간이 상대적으로 많아 침강이 많이 발생하고, 호지내 유량순환이 약하기 때문에 대기와의 접촉에 의한 휘발은 감소하는 것으로 해석되었다.

교환율과 수질

사육수 교환율이 TAN과 Chl의 농도에 미치는 영향을 모형 실험을 통해 조사하였다 (Fig. 4). TAN과 Chl이 가장 높게 관측되는 9월 1일을 기준으로 교환율 조건은 0, 0.05, 0.1에 0.1 씩 증가하여 1 (/day)까지 실험하였다. TAN의 경우 호지 A에서는 서서히 감소하여 최대감소량은 0.066 mg/L이었으며, 호지 B에서는 일정값에 이른 후 변화가 없었고 최대감소량은 0.015 mg/L인 것으로 나타났다. Chl의 경우 모든 호지에서

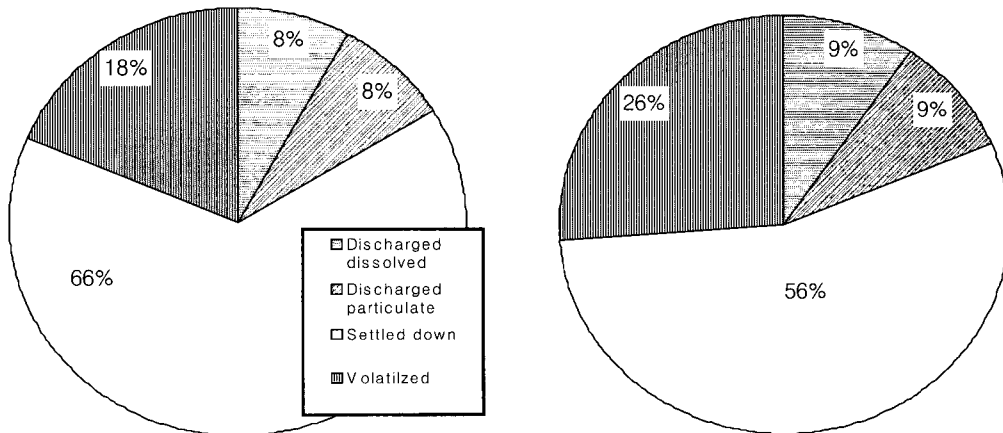


Fig. 3. Fate of the total nitrogen added to ponds A (left) and B (right).

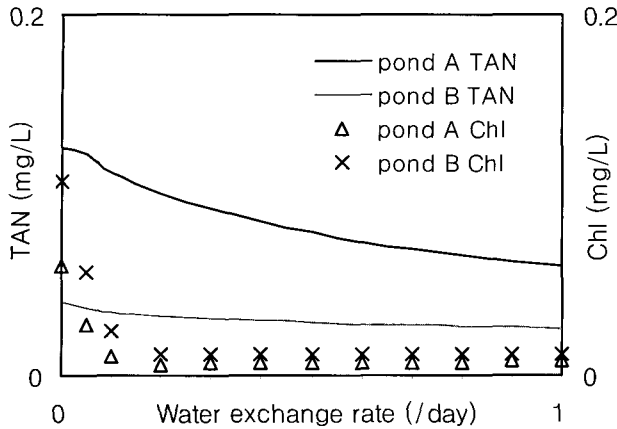


Fig. 4. Impacts of the water exchange rate on TAN and Chl at ponds A and B.

급격히 감소하여 0.2 (/day) 이상에서는 거의 변화가 나타나지 않았다. 이는 교환율이 일정값 이상일 때, 사육호지의 농도는 저장호지의 농도에 지배됨을 보이고 있다. 교환율증가는 TAN 농도를 감소시키는데 효과적이지 않았으나, Chl의 농도는 상당히 감소시키는 것으로 나타났다. 실험결과는 동남아시아 지역에서 행하여지고 있는 새우양식장의 일반적인 교환율과 태국에서의 실험결과와도 잘 일치하는 것으로 나타났다 (Lorenzen et al., 1997).

휘발과 수질

양식장 수주에서 암모니아 농도는 암모니아와 암모늄이온의 평형에 의해 결정된다. 이들의 평형은 pH와 수온에 의해 결정된다 (식 13). 수온이 25°C이고 pH가 9.3, 8.3, 7.3일 경우 TAN의 50, 10, 1%가 암모니아 형태를 갖게 된다. 따라서, pH<7.3에서 암모니아는 거의 생성되지 않아 휘발도 발생하지 않는다. 한편, 암모니아의 휘발은 대기와 수주내 암모니아 기체의 분압과 바람 그리고 유동의 난류특성에 의한 물리적 기구에 의해 영향을 받는다. 특히, 수차를 사용하는 경우 휘발 속도는 수차이용에 따라 크게 영향을 받으며 수차와 산소포기에 대해서는 많은 연구가 이루어진 바 있다 (Ahmad and Boyd, 1988; Boyd and Watten, 1989; Fast et al., 1999). 양식장의 암모니아휘발에 대해서는 실험이 어렵기 때문에 직접 관측보다는 질소수지 해석을 통한 간접적 방법으로 제시된 경우가 많다. 어류양식장에서 휘발속도는 4% (Gross et al., 1999), 새우양식장에서는 3% (Jackson et al., 2003), 5% (Burford and Lorenzen, 2004), 12.5% (Gross et al., 2000), 27.4% (Paez-Osuna et al., 1997), 8-30% (Lorenzen et al., 1997) 등으로 보고된 바 있다.

암모니아 휘발속도가 TAN 농도에 미치는 영향을 모형실험을 통해 조사하였다 (Fig. 5). TAN과 Chl이 가장 높게 관측되는 9월 1일을 기준으로 휘발속도는 0에서 0.1 씩 증가하여 1 (/day)까지 실험하였다. 일반적으로 예상된 바와 같이, TAN 농도는 호지 A와 B에서 급격히 감소하여 휘발속도 0.6/day에

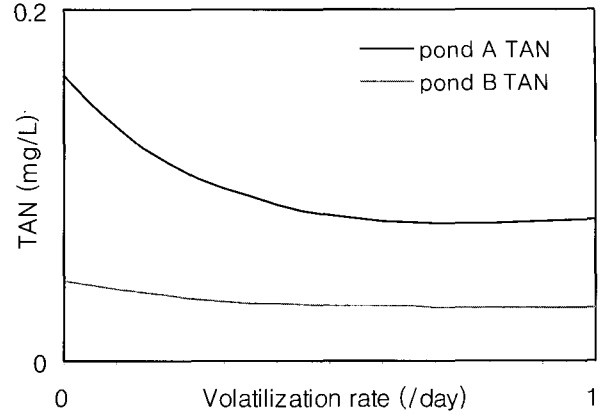


Fig. 5. Impacts of volatilization rate on TAN at ponds A and B.

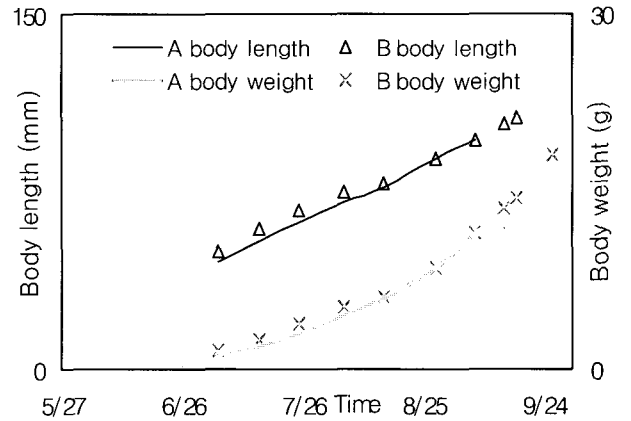


Fig. 6. Body length and weight of shrimp at ponds A and B.

서 일정하게 유지되었으며 농도는 최대값에 비해 약 50% 감소하였다.

대하성장

대하의 체장과 체중 관측결과 호지 B가 A에 비해 각기 20-2, 25-4% $(=(B\text{관측값}-A\text{관측값})/B\text{관측값})$ 큰 것으로 나타났다 (Fig. 6). 이는 8월 15일까지 유지되다 8월 28일과 9월 1일에는 유사하게 나타났다. 대하체중 계산시 관측 및 문헌자료를 이용하여 W_{∞} 와 W_0 를 입력하였고 G 는 호지 A와 B에서 각각 0.0011, 0.00115로 보정하였다 (Fig. 7, 식 10). G 는 태국의 집약식 및 반집약식 새우양식장에서 보고된 0.0055에 비해 작게 나타났다 (Lorenzen et al., 1997). 사육밀도 계산시 사육시작과 종료시 관측자료를 이용하여 N_0 와 N_t 를 입력하였고, M 은 호지 A와 B에서 각각 0.012, 0.0081로 보정하였다 (Fig. 8). 이 값은 보고된 값 0.006-0.007에 비해 높게 계산되었다 (Lorenzen et al., 1997). 대하생산량은 사육밀도, 체중, 호지체적을 사용하여 구하였다. 호지 A와 B에서 생산량은 각각 1172

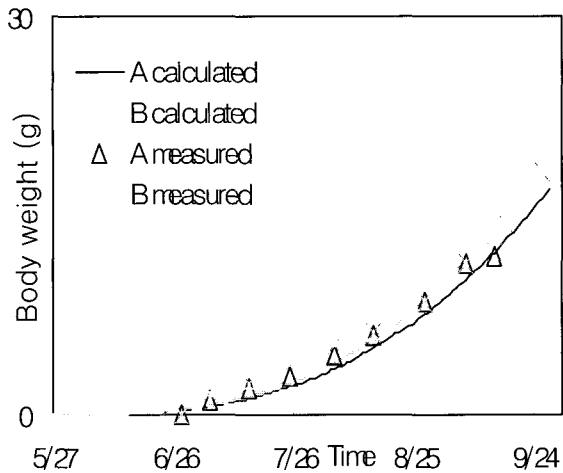


Fig. 7. Comparison between the predicted and measured values of body weight of shrimp at ponds A and B.

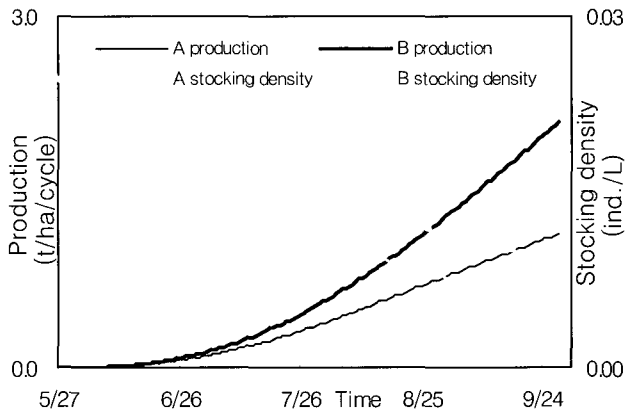


Fig. 8. Shrimp production and stocking density at ponds A and B.

kg (=1.15 t/ha/cycle), 1408 kg (=2.13 t/ha/cycle)으로 전체 2580 kg (=1.54 t/ha/cycle)으로 나타났다. 유사한 규모의 새우양식장에서 보고된 반집약식 호지 4 t/ha/cycle, 집약식 호지 9 t/ha/cycle에 비해 38-17%에 불과한 것으로 나타났다. 호지 A는 B에 비해 면적과 입식된 치하의 양 모두 1.5:1 입에도 불구하고 총생산량은 1:1.2로 감소하였다. 8월까지 대하의 체중과 체장은 호지 B가 크고, 9월 환경악화로 호지 A는 B에 비해 18일 일찍 수확된 것으로 보아, 호지 B의 서식환경은 A에 비해 양호한 것으로 판단되었다.

사육호지에서 서식환경의 차이는 수차에 의한 수리적 순환 조건이 크게 영향을 끼칠 수 있을 것으로 생각되었다. 강한 유속은 물질 및 DO 등이 수평 및 연직방향에서 잘 혼합되고 세립질 유기물이 부유하도록 하여, 퇴적물을 감소시키고 DO 감소에 의한 환원환경을 방지하는 역할을 한다. 따라서, 강한 유속구간이 상대적으로 많은 호지 B가 A에 비해 환경이 양호

할 수 있다고 판단되었다.

사 사

본 연구에 필요한 시설사용과 수온, 염분, 사료 및 대하성장에 대한 자료를 제공한 선일수산의 김 영돈 대표에게 감사 드립니다.

참 고 문 헌

Ahmad, T. and C.E. Boyd. 1988. Design and performance of paddle wheel aerators, *Aquacult. Eng.*, 7, 39-62.

Boyd, C.E. and C.S. Tucker. 1995. Sustainability of channel catfish farming. *World Aquacult.*, 26, 45-53.

Boyd, C.E. and C.S. Tucker. 1998. *Pond Aquaculture Water Quality Management*. Kluwer Academic Publishers, Norwell, USA, pp. 548-551.

Boyd, C.E. and B.J. Watten. 1989. Aeration systems in aquaculture. *Rev. Aquacult. Sci.*, 1, 425-472.

Briggs, M.R.P. and S.J. Funge-Smith. 1994. A nutrient budget of some intensive marine shrimp ponds in Thailand. *Aquacult. Fish. Manage.*, 25, 789-811.

Burford, M.A. and K. Lorenzen. 2004. Modeling nitrogen dynamics in intensive shrimp ponds: the role of sediment remineralization. *Aquaculture*, 229, 129-145.

Burford, M.A. and A.R. Longmore. 2001. High ammonium production from sediments in hypereutrophic shrimp ponds. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 224, 187-195.

Chen, J.C. and S.F. Chen. 1992. Effect of nitrite on growth and molting of *Penaeus monodon* juveniles. *Comp. Biochem. Physiol.*, 101(C), 453-45.

Chen, J.C. and C.Y. Lin. 1992. Lethal effects of ammonia on *Penaeus chinensis* Osbeck juveniles at different salinity levels. *J. Exp. Mar. Bio. Ecol.*, 156, 139-148.

Dierberg, F.E. and W. Kiattisimkul. 1996. Issues, impacts, and implications of shrimp aquaculture in Thailand. *Environ. Manag.*, 20, 649-666.

Emerson, K., R.C. Russo, R.E. Lund and R.V. Thurston. 1975. Aqueous ammonia equilibrium calculations: Effect of pH and temperature. *J. Fish. Res. Board Can.*, 32, 2379-2388.

Fast, A.W., E.C. Tan, D.F. Stevens, J.C. Olson, J. Qin and D.K. Barclay. 1999. Paddlewheel aerator oxygen transfer efficiencies at three salinities. *Aquacult. Eng.*, 19, 99-103.

Folke, C. and N. Kautsky. 1989. The role of ecosystems for a sustainable development of aquaculture. *Ambio*, 18, 234-243.

Gross, A., C.E. Boyd and C.W. Wood. 1999. Ammonia volatilization from fresh water fish ponds. *J. Environ. Qual.*, 28, 793-797.

- Gross, A., C.E. Boyd and C.W. Wood. 2000. Nitrogen transformations and balance in channel catfish ponds. *Aquacult. Eng.*, 24, 1-14.
- Gulland, J.A. 1983. *Fish Stock Assessment: A Manual of Basic Methods*. Wiley-Interscience, Chichester, UK, pp. 223.
- Jackson, C., N. Preston, P. Tompson and M. Burford. 2003. Nitrogen budget and effluent nitrogen components at an intensive shrimp farm. *Aquaculture*, 218, 397-411.
- Kang, Y.H. 2001. Effects of paddle wheel on water circulation in shrimp culture ponds, *J. Aquacult.*, 14(1), 43-50. (in Korean)
- Kang, J.C., J.K. Koo and J.S. Lee. 2000. Environmental survey for productivity enhancement of cultured fleshy prawn *Penaeus chinensis*. *J. Aquacult.*, 13(1), 39-46. (in Korean)
- Kang, Y.H., M.O. Lee, S.D. Choi and Y. Sin. 2004. 2-D Hydrodynamic model simulating paddlewheel driven circulation in rectangular shrimp culture pond, *Aquaculture*, 231, 163-179.
- Lorenzen, K., J. Struve and V.J. Cowan. 1997. Impacts of farming intensity and water management on nitrogen dynamics in intensive pond culture: a mathematical model applied to Thai commercial shrimp farms. *Aquacult. Res.*, 28, 493-507.
- Lovell, R.T. and D. Broce. 1985. Cause of musty flavor in pond-cultured penaeid shrimp. *Aquaculture*, 50, 169-174.
- Montoya, R.A., A.L. Lawrence, W.E. Grant and M. Velasco. 2002. Simulation of inorganic nitrogen dynamics and shrimp survival in an intensive shrimp culture system. *Aquacult. Res.*, 33, 81-94.
- Paerl, H.W. and C.S. Tucker. 1995. Ecology of blue-green algae in aquaculture ponds. *J. World Aquacult. Soc.*, 26, 109-131.
- Paez-Osuna, F., S.R. Guerrero-Galvan, A.C. Ruiz-Fernandez and R. Espinoza-Angulo. 1997. Fluxes and mass balances of nutrients in a semi intensive shrimp farm in north-western Mexico. *Mar. Pollut. Bull.*, 34, 290-297.
- Parsons, T.R., Y. Maita and C.M. Lalli. 1984. *A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis*. Pergamon Press, Oxford, pp. 173.
- Peterson, E.L., L.C. Wadhwa and J.A. Harris. 2001. Arrangement of aerators in an intensive shrimp growout pond having a rectangular shape. *Aquacult. Eng.*, 25, 51-65.
- Redfield, A.C., B.H. Ketchum and F.A. Richards. 1963. The influence of organisms on the composition of sea-water. In: *The Sea*. Vol.2, The composition of sea-water comparative and descriptive oceanography. Hill, M.N., ed. John Wiley and Son, New York, pp. 26-77.
- Rhee, G.Y. 1978. Effect on N/P atomic ratios and nitrate limitation on algae growth, cell composition and nitrate uptake: a study of dual nutrient limitation. *Limnol. Oceanogr.*, 23, 10-25.
- Rhee, G.Y., and I.J. Gotham. 1980. Optimum N:P ratios and coexistence of planktonic algae. *J. Phycol.*, 16, 486-489.
- Schnoor, J.L. 1996. *Environmental Modeling: fate and transport of pollutants in water, air, and soil*, John Wiley and Sons. Inc., New York, pp. 62-64.
- Seymour, E.A. 1980. The effects and control of algal blooms in fish ponds. *Aquaculture*, 19, 55-74.
- Smith, V.H. 1983. Low nitrogen to phosphorus ratio favors dominance by blue- green algae in lake phytoplankton. *Science*, 221, 669-671.
- Steele, J.H. 1962. Environmental control of photosynthesis in the sea. *Limn. Oceanogr.*, 7, 137-150.
- Tucker, C.S. and S.W. Lloyd. 1984. Phytoplankton communities in channel catfish ponds. *Hydrobiologia*, 112, 137-141.
- Wickens, J.F. 1976. The tolerance of warm water prawns to recirculated water. *Aquaculture*, 9, 19-37.
- Yusoff, F.M. and C.D. McNabb. 1989. Effects of nutrient available on primary productivity and fish production in fertilized tropical ponds. *Aquaculture*, 78, 303-319.

2003년 12월 29일 접수
2004년 2월 19일 수리