



사육수 비교환 방식에 의한 흰다리새우의 고밀도 사육 II. 흰다리새우의 실내 중간양성

장인권*, 김종식, 서형철, 조국진
국립수산과학원 서해특성화연구센터

Intensive Culture of the Pacific White Shrimp *Litopenaeus vannamei*, under Limited Water Exchange II. Indoor Post-Nursery Culture of Juvenile Shrimp

In Kwon Jang, Jong-Sheek Kim, Hyung Chul Seo and Kook-Jin Cho

West Sea Mariculture Research Center, National Fisheries Research & Development Institute, Taeon 357-945, Republic of Korea

Shrimp farming which is entirely conducted in outdoor ponds in the west coast of Korea has been suffered from mass mortality due to viral epizootics. Intensive indoor shrimp culture under limited water exchange can solve these problems of outdoor ponds including viral transmission from environment, pollution due to discharge of rearing water, low productivity and limited culture period. In this study, juvenile *L. vannamei* (B.W. 0.08-0.09 g) was stocked with 3,000-5,455/m³ in density in four raceway tanks (two 12.9 m², two 18 m² tanks) and cultured for 42 days with 2.7-3.4% of daily water exchange. Results from four tanks showed FCR of 0.79-1.29, survival of 38.2-48.0%, and yields of 2.49-4.22 kg/m³ which is consistent with 12-20 and 8-14 times higher than those of commercial shrimp hatchery and outdoor pond in Korea, respectively. Concentrations of total ammonia nitrogen in all four tanks were 1.11-1.42 ppm in mean level and did not exceed 6.0 ppm (0.096 ppm of NH₃) which is still acceptable levels for shrimp growth. During the culture trial, concentration of NO₂-N rapidly increased from stocking, resulting in mean concentration of 18.45-22.07 ppm. It also exceeded 10 ppm over four weeks and maintained at 35-45 ppm for four days in all tanks, accounting for low survival of shrimp due to long-term exposure to high concentration of NO₂-N. Nevertheless, the results with survival rate over 38% from raceways which experienced the extreme NO₂-N levels suggests that under "biofloc system" white shrimp can acclimate to high NO₂-N concentration to some degree.

Keywords: *Litopenaeus vannamei*, White shrimp, Limited water exchange, Post-nursery culture

서 론

우리나라의 새우양식은 대부분 서해안을 중심으로 조성된 축체식 양식장에서 준집약적(semi-intensive)으로 이루어지고 있지만, 최근 바이러스성 질병에 의한 대량폐사와 생산성 저하로 많은 어려움을 겪고 있다(Jang et al., 2007a, 2007b). 축체식 방식에서 사육수 수질향상을 위하여 일반적으로 실시하는 대규모의 환수는 부영양염의 배출수에 의한 연안환경의 악화, 인근 양식 어장의 피해 뿐 아니라 질병의 유입 가능성을 높여 준다(Landesman, 1994; Boyd and Clay, 1998). 특히 새우 대량폐사를 유발하는 흰반점바이러스(WSSV, white spot syndrome virus)를 포함한 병원체들은 사육수 교환시 해수 혹은 중간숙주를 통

*Corresponding author: jangik@nfrdi.go.kr

하여 양식장 내로 쉽게 전염된다(Brock et al., 1997; Flegel et al., 1997; Lotz and Lightner, 2000). 사육수 비교환방식을 이용한 실내 양식기술은 이러한 문제점들을 해결해주는 방식으로 최근 다양한 방향으로 연구가 진행되고 있다(David and Arnold, 1998; Van Wyk, 1999, 2000; Samocha et al., 2000, 2007; Browdy et al., 2001). 사육수 비교환 혹은 저교환 방식은 사육수를 거의 교환하지 않기 때문에 병원체의 감염과 배출수에 의한 환경오염 문제를 근본적으로 해결할 수 있으며(Moss et al., 1998; Bratvold and Browdy, 1999; Lotz and Lightner, 2000; Samocha et al., 2002), 고밀도 혹은 초고밀도 양식 및 연중 생산에 의한 생산성 향상을 통하여 축체식보다 상대적으로 높은 시설비와 운영비를 상쇄할 수 있다(Browdy et al., 2001; Van Wyk, 2001). 또한 기후적 특성으로 양식기간과 출하가 매우 제

한적인 우리나라의 경우, 출하시기를 조절함으로써 양식새우의 부가가치를 높일 수 있는 장점도 있다.

어류양식에서 일반적으로 사용되고 있는 전통적인 순환여과 방식(RAS, recirculating aquaculture system)은 새우에도 이미 시도된 바 있는데, 이 방식은 어류양식에서와 마찬가지로 사육수의 수질을 개선하기 위하여 별도의 생물여과(biofilter) 시설을 필요로 하며(Malone et al., 1993; Browdy and Moss, 2005), 추가적으로 비드필터(bead filter)를 설치하여 슬러지를 제거하거나 질화세균(nitrifying bacteria)의 부착면적을 늘리기 위하여 사육수조 내에 인공기질(artificial substrate)을 설치하기도 한다(van Wyk, 1999; Moss, 2002). 이 방식을 이용한 새우양식은 오랜 기간동안 다양한 시도가 있었음에도 불구하고 높은 시설비와 운영비 등의 문제점은 상업화에 가장 큰 걸림돌이 되고 있다(Decamp et al., 2007). 이러한 경제적인 제한요인은 고밀도양식에 의한 생산성 향상으로 해결되어야 하지만 중산업화시설에서 1회의 생산량은 약 2-2.5 kg/m² 정도에 머물고 있다(Moss et al., 1998; van Wyk, 2001; Samocha et al., 2002).

이러한 순환여과방식의 문제점을 개선한, 새로운 개념의 타가영양(heterotrophic) 혹은 BFT (biofloc technology) 방식을 이용한 새우양식기술이 최근 많은 관심을 받고 있다(Samocha et al., 2000, 2007; Browdy et al., 2001). BFT 방식은 사육수를 교환하지 않고 질소화합물의 제거를 질화세균에 의존한다는 점에서는 근본적으로 기존의 RAS 방식과 동일하지만, 별도의 생물여과조가 없어 모든 질소순환과정이 사육수조 내에서 진행된다는 점에서 RAS 방식과 크게 차이가 난다. 최근 Mishra et al. (2008)은 BFT 방식을 이용한 중간육성에서 7.64 kg/m³의 흰다리새우를 생산하였으며, 이와 유사한 시스템을 이용한 이전의 연구들도 3-4 kg/m³ 이상까지 생산할 수 있어 BFT 방식은 기존 RAS 방식에 비해 생산성은 높을 뿐 아니라 시설투자비는 낮은 것으로 알려져 있다 (Samocha et al., 2002, 2007; Handy et al., 2004; Cohen et al., 2005). BFT 시스템에서는 사육수의 비교환, 충분한 양의 유기물(즉, 즉 유기질소와 탄소)와 산소의 공급 등의 조건 하에서 사육수는 초기의 식물플랑크톤이 우점한 자가영양(photoautotrophic) 상태에서 점차 세균 우점의 타가영양(heterotrophic) 상태로 천이가 진행된다(Sich and van Rijn, 1992; Avnimelech et al., 1994; Hopkins et al., 1996; Avnimelech, 1999; McIntosh, 1999). 주로 탄소와 질소를 에너지로 하는 우점의 질화세균은 높은 C:N ratio 조건 하에서 급속도로 증식하여 세균총(bacterial floc)을 형성하는데 새우는 세균총을 섭식함으로써 세균단백질을 재이용하는 것으로 알려져 있다(Moss et al., 1999; Browdy et al., 2001; Burford and Lorenzen, 2004; Avnimelech, 2006). 타가영양상태에 잘 발달하는 세균군은 질산화, 탈질화, 단백질분해, 황산염 환원 등의 기능을 갖는 다양한 세균류로 구성되어 있는데(Ebeling et al., 2006; Itoi et al., 2006; Schneider et al., 2007; Johnson et al., 2008), 이러한 세균군이 충분히 형성된 시스템은 자가영양에 의

존하는 기존의 방식보다 안정적인 것으로 보고되어 있다(Boyd and Clay, 2002). BFT 새우양식의 시설은 Reid and Arnold (1992)가 처음 제시한 구조를 기본으로 하고 있지만 이후 많은 시도를 거치면서 시스템의 구조 뿐 아니라 사료공급방식, 사육수 관리방식 등의 측면에서 많은 진보가 있었다(David and Arnold, 1998; Bratvold and Browdy, 2001; Samocha et al., 2000, 2002, 2007). 그럼에도 불구하고 이 기술은 이론적으로나 기술적인 측면에서 여전히 많은 연구가 필요하며 특히 우리나라에서는 새우양식 사육가들의 지대한 관심에도 불구하고 거의 연구되지 않고 있는 실정이다. 실내 고밀도 새우양식의 경우, 처음부터 postlarva를 직접 입식하기도 하지만 본양성에 앞서 1-2개월 중간육성(nursery culture)을 실시함으로써 생존율, 사료효율, 생산량을 더욱 향상시킬 수 있다(Sandifer et al., 1991; Samocha et al., 2002). 그러나 van Wyk(2000, 2001)는 중간육성과 본양성의 사이에 약 2개월간 치하를 중간양성(intermediate or post-nursery culture)하는 3단계 방식을 실시함으로써 생산량과 시설의 활용을 크게 향상시킬 수 있었다.

본 연구는 바이러스질병에 의한 피해방지와 새우양식생산성 향상 및 배출수를 억제할 수 있는 대안으로서 최근 급속도로 양식이 확산되는 흰다리새우를 대상으로 사육수 비교환방식을 이용한 초고밀도 중간양성 기술개발을 위한 기초를 확립하고자 한다.

재료 및 방법

사육수조 및 부속시설

중간육성은 수면적 12.9 m² (L 6.0×W 2.15×H 1.0 m; tanks 1, 2) 및 18 m² (L 6.0×W 3.0×H 1.0 m; tanks 3, 4)인 raceway 형 콘크리트 수조 4개를 이용하였다. 각 수조의 중앙을 따라 격벽(L 4.0×H 1.0 m)을 설치하고 격벽의 양측 아래를 따라서 water injector가 부착된 PVC 관(φ 50 mm)을 연결하였으며, 이 관은 ventruri 및 수중모터를 부착하여 전체적으로 사육수가 수조 내에서 순환하도록 시설하였다. 또한 수조 내에 별도의 PVC 관을 설치하여 foam fractionator를 통과하여 다시 수조 내로 사육수를 순환시켰다. 각 관의 흡입구에는 치하가 유입되지 못하도록 성장에 따라서 적합한 망목의 여과망을 부착하였다. 수조 내에는 4조의 air lift와 추가적인 에어스톤을 설치하였다. 충분한 산소공급을 위하여 oxygen generator (15 L/min, RAK-15L90C2, Oxycon Industrial Ltd., Korea)를 설치하였다. 흰다리새우의 성장에 적합한 수온을 유지하기 위하여 보일러(70,000 Kcal/hr)를 이용하여 가온을 실시하였다. 수조의 세부적인 부분은 Jang et al. (2008)에 기술되어 있다.

사육수 관리

사육수는 염소 50 ppm 소독 후 중화된 여과 해수(75%)에 유생의 중간육성에 사용되었던 사육수(25%)를 혼합함으로써 타

Table 1. Summary of stocking and production of Pacific white shrimp *L. vannamei* in four raceway tanks operated with limited water exchange condition over a 42-day post-nursery culture trial

	Initial B.W.(g)	Stocking density		Final B.W.(g)	Yield		WGR* (g/w)	Survival rate(%)	FCR
		(/m ²)	(/m ³)		(kg/m ²)	(kg/m ³)			
Tank 1	0.09	1,860	3,000	1.73 ^a	1.53	2.49	0.270	48.0	1.02
Tank 2	0.09	3,488	5,625	1.45 ^b	1.89	3.31	0.226	40.6	0.79
Tank 3	0.08	2,333	3,818	2.03 ^c	2.58	4.22	0.375	54.4	1.03
Tank 4	0.08	3,333	5,455	1.97 ^c	2.51	4.10	0.315	38.2	1.29

*weekly growth rate.

Superscripts indicate significant differences ($\alpha = 0.05$).

가영양세균의 발달을 용이하도록 하였다. 종묘입식 후에는 모든 수조에서 수온, DO, 염분은 YSI-85 model (Yellow Springs Instrument Co., Ohio, USA)을 이용, TAN, NO₂-N, 알칼리도 (alkalinity)는 영양염 분석용 colorimetric kit (Merck Co., Germany), 탁도(turbidity)는 Micro TPW 20000 turbidimeter (HF Scientific Inc., Florida, USA), pH는 YSI pH meter를 이용하여 매일 1회 이상 측정하였다. 사육수의 환수량 및 당밀공급량은 사육기간 동안의 총량을 일일 평균으로 계산하였다.

종묘입식 및 사육관리

새우종묘는 2008년 2월 미국 하와이에서 수입된 무병(SPF) 어미 흰다리새우를 이용하여 국립수산물학원 서해특성화센터에서 생산된 postlarva를 중간육성한 치하(B.W. 0.08-0.09 g)를 이용하였다. 사육은 2007년 7월 16일부터 8월 27일까지 42일간 실시하였으며, tank 1과 2에는 평균체중 0.09 g의 치하를 각각 24,000마리(3,000/m³), 45,000마리(5,625/m³), tank 3과 4에는 평균체중 0.08g의 치하를 각각 42,000마리(3,818/m³), 60,000마리(5,455/m³)의 밀도로 입식하였다(Table 1). 사료는 치하용 배합사료(CP 40%, ϕ 0.9-1.1 mm; Purina Co., Korea)를 공급하였다. 배합사료는 수조별 4개씩 설치된 먹이망(20×30 cm)에만 4회/일 공급하였다. 사료공급량은 새우의 주간성장률에 근거하였으며 주간성장률(WGR, weekly growth rate)은 매주 30-50마리의 새우를 3회씩 채집하여 평균체중을 계산하였다.

결 과

새우의 성장

흰다리새우 치하를 Table 1과 같이 4개의 raceway tank에서 다른 밀도로 입식하고 42일간 중간양성한 결과, tank에 따라 2.49-4.22 kg/m³가 생산되었다. 0.08 g의 치하를 3,818, 5,455 마리/m³ 입식한 tank 3과 4에서 각각 4.22, 4.10 kg/m³로 가장 높은 생산량을 보였으며, 0.09 g의 치하를 5,625, 3,000 마리/m³ 입식한 tank 2와 1에서 각각 3.31, 2.49 kg/m³를 생산하였다. 입식 시 체중은 모든 tank에서 비슷하였으나, 수확시 체중은 면적이 18 m²인 tank 3과 4가 각각 2.03, 1.97 g이며, 12.9 m²인 tank 1, 2가 각각 1.73, 1.45 g으로 면적이 넓은 tank 3, 4에서 성장

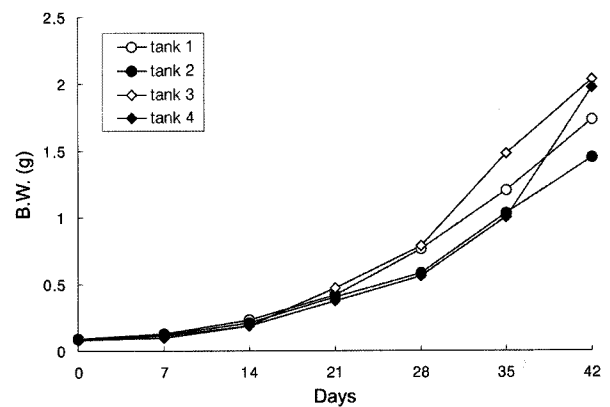


Fig. 1. Growth of Pacific white shrimp *L. vannamei*, in four raceway tanks over a 42-day post-nursery culture under limited water exchange condition.

률이 15.6-40% 높았다. 생존율은 면적이 넓고 밀도가 상대적으로 낮은 tank 3이 54.4%로 가장 높았으며, tank 1, 2 및 4가 각각 48, 40.6, 38.2%의 순으로 나타났다. FCR은 tank 2에서 0.79로 가장 낮았으며, 나머지 tank는 1.02-1.29의 범위였다. 평균 주간성장률은 최종 체중과 비슷하게 tank 3, 4가 각각 0.372, 0.315 g으로 높았으며, tank 1, 2가 각각 0.27, 0.226 g의 순서로 나타났다. 사육 3주째까지는 모든 수조에서 주간성장률이 비슷하였지만, 3주 이후에는 tank 3과 4의 주간성장률이 tank 1, 2의 성장률보다 크게 높게 나타났다(Fig. 1).

사육수의 수질 및 영양염 농도의 변화

모든 tank에서 수온은 사육 전 기간동안 27.8-31°C의 범위로서 평균 30°C를 안정적으로 유지하였다. 전 기간 oxygen generator를 가동하여 용존산소(DO)는 모든 tank에서 5.0 ppm 이상이 유지되었으며 tank 별 평균 9.4-11.8 ppm으로 높게 나타났다. DO는 사육 1주일째까지 점차 상승하여 모든 tank에서 10 ppm을 넘었으며 2주째에는 tank 별로 11-20 ppm까지 상승한 후 점차 하강하여 3주 이후에는 tank 1을 제외한 나머지 tank에서는 5-10 ppm의 범위를 유지하였다. Tank 1은 5주까지 지속적으로 10 ppm 이상을 유지한 후 점차 6 ppm까지 저하되었다. pH는 모든 tank에서 큰 차이를 보이지 않았다. 사육 1주일

간 pH는 8.0 전후를 유지한 이후 꾸준히 하강하여 31일째 6.5-6.87까지 내려간 이후 마지막 주에는 7.0 전후로 다시 상승하였다. 탁도(turbidity)는 전 기간 평균 27.2-36.8 NTU로서 tank 별 큰 차이를 보이지 않았다. 3일째 탁도는 tank 4 (26 NTU)를 제외하고는 모두 20 NTU 이하였으나 9일째부터는 대부분 20 NTU 이상으로 증가하였으며 31일까지는 20-40 NTU를 유지하였다. 31일 이후 tank 4를 제외하고는 나머지 tank에서는 약 60 NTU 이상 상승하였으며 tank 3은 100 NTU의 높은 값을 보였다. 알칼리도(alkalinity)는 tank별 평균 106.9-114.3 ppm으로 새우의 성장에 적합한 범위를 유지하였다. 총암모니아성 질소(TAN)의 평균 농도는 모든 tank에서 1.11-1.42 ppm으로 비슷한 농도를 유지하였으나 기간에 따라 각 tank는 큰 차이를 보였다. 처음 2주간은 tank 2를 제외한 나머지 tank의 TAN 농도

는 대부분 1.0 ppm 이하를 유지하였으나 tank 2에서는 1.0-2.5 ppm의 높은 농도를 나타냈다. 2주 후부터 TAN 농도는 tank 2의 일부 기간을 제외하고는 대부분 1.0-3.0 ppm으로 점차 증가하였으며 5주 이후에는 tank 별로 약간의 차이는 있지만 약 1.0의 범위에 머물렀다. 예외적으로 34일째(tank 1)와 39일째(tank 4)에 TAN이 6.0 ppm 까지 상승하였다. 전 기간 아질산성 질소(NO₂-N)의 평균 농도는 tank 1, 2가 각각 19.51, 22.07 ppm이며, tank 3, 4가 각각 18.51, 18.45 ppm으로 면적이 큰 tank 3과 4에서 상대적으로 낮았으나 전체적으로 매우 높은 농도를 보여주었다. 사육 1일째 아질산염은 3.5-4.0 ppm이었으나 이후 꾸준히 증가하여 33일째에는 29-33 ppm까지 상승하였다. 이후 아질산염 농도는 약간 감소하여 5주째 모든 tank에서 15-25 ppm까지 저하된 이후 35-40 ppm까지 다시 증가하는 경향을 보였

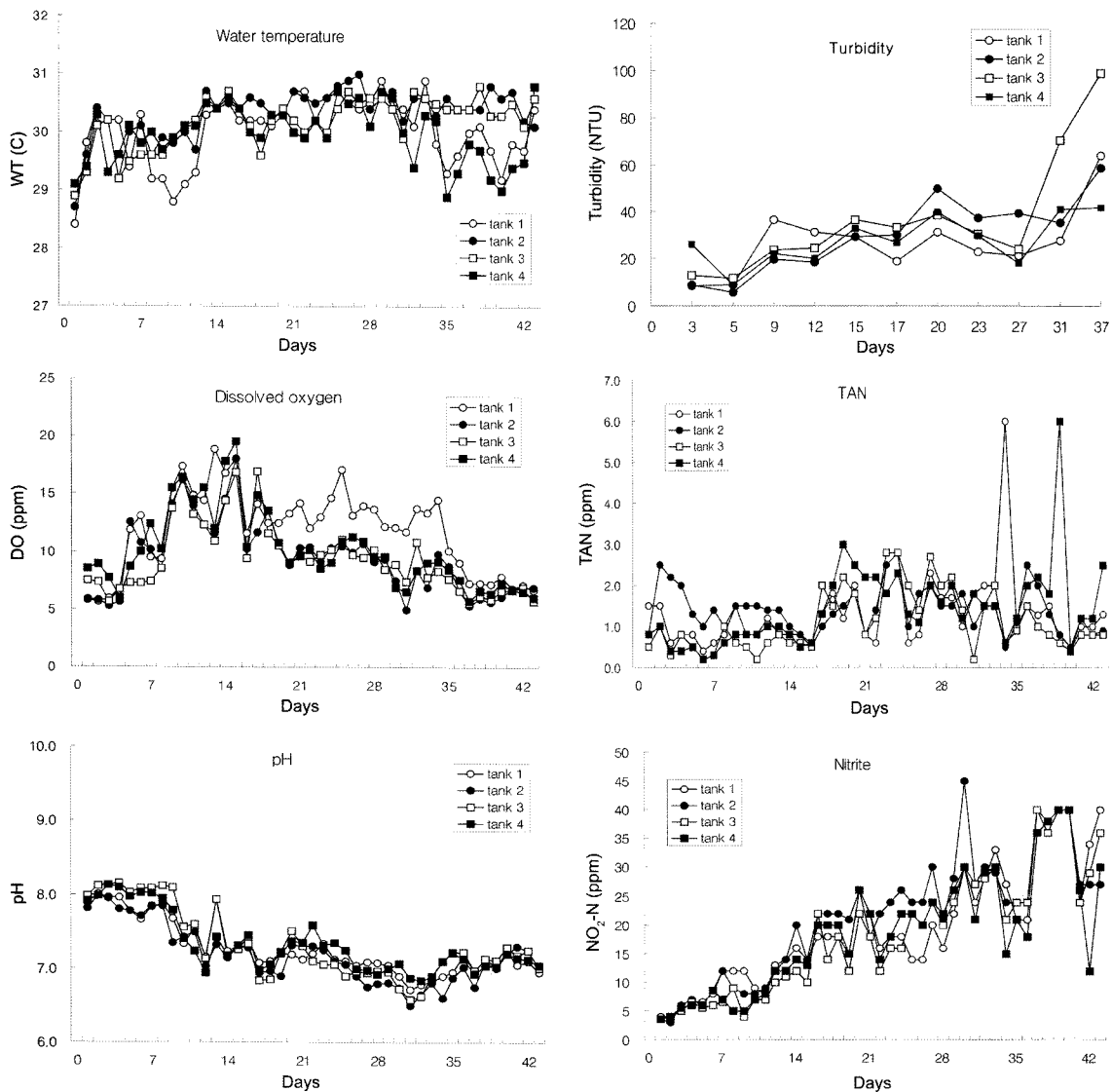


Fig. 2. Daily changes in water quality indicators for four raceway tanks under limited water exchange condition over a 42-day post-nursery culture trail with Pacific white shrimp *L. vannamei*.

Table 2. Summary of water quality indicators for four raceway tanks under limited water exchange condition over a 42-day post-nursery culture trial with Pacific white shrimp, *L. vannamei* (mean value with range)

	Water Temp.(°C)	DO (ppm)	Salinity (psu)	pH	TAN (ppm)	NO ₂ -N (ppm)	Alkalinity(ppm)	Turbidity(NTU)	Water exchange (%/day)	Molasses (L/day)
Tank 1	30.0 27.8-30.9	11.8 5.6-18.9	32.1 30.6-33.3	7.28 6.7-8.0	1.32 0.4-6.0	19.51 4.0-40.0	114.3 75-130	27.2 8.6-63.7	3.2	0.083
Tank 2	30.3 28.7-31.0	9.5 5.0-18.1	32.1 31.2-33.7	7.19 6.5-7.9	1.40 0.5-2.8	22.07 3.0-45.0	106.9 55-140	30.2 5.5-58.5	3.4	0.083
Tank 3	30.2 28.9-30.8	9.4 5.6-17.0	32.6 31.4-34.4	7.32 6.6-8.2	1.11 0.2-2.8	18.51 3.6-40.0	110.0 65-130	36.8 11.7-98.9	3.1	0.102
Tank 4	30.0 28.9-30.8	10.1 5.7-19.6	32.4 31.3-33.3	7.32 6.8-8.1	1.42 0.2-6.0	18.45 3.5-40.0	110.0 70-130	27.9 9.0-41.5	2.7	0.113

다. 아질산염 농도가 가장 높았던 농도는 tank 2에서 40일째는 증가하여 30일째 45 ppm을 기록하였다. 사육수의 환수는 4주째까지는 실시하지 않았으며 아질산염 농도가 높았던 4주 이후에 주로 이루어졌다. 전 기간의 평균 일일 환수율은 2.7-3.4%의 범위였다. 당밀은 TAN과 아질산염의 농도가 급격히 상승하는 시기에 주로 공급되었으며 일일 평균공급량은 전 tank에서 0.083-0.113 L이었다(Fig. 2, Table 2).

고 찰

중간육성(nursery culture)은 새우 종묘(postlarva)를 본양성 이전에 별도의 시설에서 1-2개월 사육하는 과정을 말하지만, 중간양성(post-nursery 혹은 intermediate culture)은 중간육성과 본양성 기간 사이에 새우의 밀도와 시설 등을 재조절하여 별도로 사육하는 단계를 말한다(Samocha et al., 2000). 중간육성은 생존율과 사료효율을 향상시키고 야외에서의 양성기간을 단축시키는 등의 장점이 있어 외국에서는 보편화된 과정의 하나이지만(Sandifer et al., 1991; Samocha et al., 2002) 중간양성은 적용된 사례가 많지 않다. Van Wyk (2000, 2001)는 순환여과방식(RAS)을 이용한 실내 고밀도 새우양식에서 중간육성, 중간양성 및 본양성을 각각 2개월씩 3단계 방식으로 운영한 결과, 기존의 1단계 방식보다 연간 생산량을 75% 이상 높임으로써 중간양성 단계의 효율성을 보여주었다. 상품크기의 새우를 실내 양식시설에서 생산하기 위해서는 약 5-6개월이 소요되는데, 1단계 방식은 연간 2회 수확하는데 비하여 3단계 방식은 이론적으로 6회 수확이 가능하다. 따라서 중간양성을 적용한 3단계 방식은 생산성 향상과 시설의 효율적인 운영 면에서는 바람직하지만 연중 안정적으로 종묘를 공급해야하는 부담이 뒤따른다.

본 연구에서 사용된 방식은 RAS 방식과 달리 생물여과조가 없이 하나의 raceway형 tank로 구성된 사육수 비교환 시스템(see Jang et al., 2008)으로 흔히 타가영양(heterotrophic) 혹은 BFT (biofloc technology) 방식으로 알려져 있다(Samocha et al., 2000, 2007; Browdy et al., 2001). 본 실험은 중간육성을 마친 흰다리새우 종묘를 BFT raceway tank에서 42일간 중간

양성하여 체중 1.45-2.03 g의 새우를 2.49-4.22 kg/m³ 생산하였다(Table 1). 이것은 새우종묘배양장의 평균 생산량 약 0.2 kg/m³ (PL₁₂₋₁₅의 종묘 60,000마리/m³ 기준)의 12-20배, 일반 축제식 새우양식장(생산량 0.3 kg/m² 기준)의 8-14배에 달한다. 이에 앞서 Handy et al. (2004)은 74일간 흰다리새우의 중간육성을 통하여 3.18 kg/m³을 생산하였으며, Cohen et al. (2005)은 50일간 중간육성으로 4.33 kg/m³을 생산하여 본 연구와 비슷한 결과를 보여주었다. BFT 방식을 이용한 중간육성에서 현재까지 보고된 가장 높은 생산량은 Mishra et al. (2008)이 얻은 7.64 kg/m³으로 이들은 수면적 68.5 m²의 raceway형 수조에서 흰다리새우 유생을 71일간 사육하였다.

BFT 방식을 이용한 새우 고밀도 사육에서의 생존율과 생산량은 사육수의 수질환경 및 영양염 농도에 크게 영향을 받는다(Barajas et al., 2006; Cohen et al., 2005). 본 연구에서의 생존율은 40.6-54.4%로서 이와 유사한 앞선 연구들에서 보고된 90% 이상(Cohen et al., 2005; Mishra et al., 2008)에 비해서 크게 낮았는데 이것은 사육수의 수질환경과 관련이 있는 것으로 추측된다. BFT 방식의 새우양식시스템에서는 고밀도의 새우와 세균에 의한 산소의 소비, 유기물의 산화 등으로 용존산소가 크게 부족한 것이 일반적이지만, 사육기간 동안 모든 tank에서 용존산소는 새우의 산소요구량을 충분히 초과하는 5.0 ppm 이상을 유지하였다. 이것은 시스템에 설치된 oxygen generator의 가동 및 venturi를 통한 지속적인 공기의 공급과 사육수의 교반에 의한 것으로 판단된다. pH는 사육 초기의 약 8.0에서 4주째까지는 6.5까지 꾸준히 하강하였으며, 이러한 양상은 BFT system에서 자주 관찰되는 현상으로서 주로 활발한 질산화과정의 결과에 기인한다(Ebeling et al., 2006). 그러나 4주 이후에는 사육수 교환으로 pH는 7.0 전후를 유지함으로써 전반적으로 새우의 생존에는 큰 영향을 미치지 않은 것으로 사료된다.

BFT system에서 질소화합물(NH₃와 NO₂-N)은 새우의 성장과 생존에 가장 큰 영향을 미치는 요인이지만 농도의 조절이 가장 어려운 부분이기도 하다(Cohen et al., 2005; Samocha et al., 2007). 사육기간 동안 총암모니아성 질소(TAN)가 가장 높았던 tank 4에서 평균 농도는 1.42 ppm이었지만 이중 NH₃의

농도는 약 0.023 ppm (tank 4의 pH 7.3, 수온 30 기준)으로 새우의 유해농도인 0.1 ppm (van Wyk, 1999)에 비해 크게 낮다. 또한 tank 1과 4에서 하루 동안 TAN의 농도가 6.0 ppm (NH₃ 0.096 ppm) 까지 상승한 적이 있으나(Fig. 2) 이것도 새우의 생존에는 영향을 미칠 만한 농도는 아니었다. Wajsbrot et al. (1990)에 따르면 본 연구에서와 비슷한 크기의 새우치하의 경우 96hr-LC50의 NH₃ 농도는 1.43 ppm이며, Frias-Espéricueta et al. (2000)은 흰다리새우 postlarva의 12hr-LC50의 농도를 0.70 ppm으로 보고하고 있어 본 연구에서 나타난 NH₃의 최고 농도와는 여전히 큰 차이를 보인다.

아질산성 질소는 전 사육기간에 걸쳐 꾸준히 상승하여 2주째부터는 모든 tank에서 10 ppm 이상의 높은 농도가 계속 유지되었으며 또한 전 기간의 평균 농도도 18.45-22.07 ppm으로 높게 나타났다. 이러한 농도는 Sower et al. (2004)이 보고한 흰다리새우 치하의 아질산염에 대한 96h-LC50 (8 ppm)보다는 크게 높다. 그러나 사육수 비교환 시스템에서는 사육 후반기로 진행됨에 따라서 질산염과 함께 아질산염 농도가 증가하는 현상이 나타나는 것이 일반적이는데(Browdy et al., 2001; Cohen et al., 2005) 이러한 환경 하에서 새우는 시간이 경과함에 따라 점차 높은 아질산염 농도에 어느 정도 적응하는 것으로 알려져 있다(Chen and Lei, 1990; Chen and Chin, 1998). Cohen et al. (2005)은 흰다리새우의 중간육성 기간동안 26 ppm 이상의 아질산염 농도가 1주일간 지속되었지만 97.5% 이상의 생존율을 얻었으며 이와 유사하게 Mishra et al. (2008)도 중간육성 과정에서 20 ppm 이상의 농도가 2주간 지속되었으나 생존율 96.2%, 생산량 7.23 kg/m³을 수확하여 이러한 주장을 뒤받침 해준다. 그러나 본 실험에서는 모든 tank에서 10-45 ppm의 높은 농도가 4주일 동안이나 유지되었으며 후반기의 4일 동안에는 35 ppm 이상의 농도가 지속되어 앞선 연구들에서 관찰된 새우의 아질산염에 대한 적응한계를 범위를 벗어났을 가능성이 있으며 이것은 본 실험에서 얻은 낮은 생존율과 관계가 있을 것으로 판단된다. 그러나 이와 같이 장기간의 높은 아질산염의 농도에도 불구하고 타가영양을 기본으로 하는 본 실험에서 얻은 40% 이상의 생존율은 식물플랑크톤의 자가영양에 의존하는 축적식양식장 조건에서는 기대하기 불가능한 결과로서 충분히 주목할 만 하다. 사육수 비교환 조건 하에서의 새우의 아질산염에 대한 적응은 이 시스템의 중요한 장점의 하나가 될 수 있으며 적응능력의 범위와 기작에 관해서는 향후 많은 연구가 필요할 것으로 여겨진다.

본 사육 기간동안 암모니아와 아질산염의 농도가 상승할 경우에는 일부의 사육수를 환수하거나 당밀을 공급하였다(Table 2). 사육수의 평균 환수율은 2.7-3.4%/day로서 앞선 연구들의 1.1-3.59% (Cohen et al., 2005; Samocha et al., 2007; Mishra et al., 2008)와 크게 차이가 나지 않았다. 당밀은 질화세균의 질산화과정을 촉진시키기 위하여 C:N ratio를 높일 목적으로 사육수에 첨가하는 추가적인 탄소원으로 주로 사용되는데

(Avnimelech, 1999; Samocha et al., 2007), 본 실험에서는 TAN의 농도는 감소하지만 아질산염의 제거에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 관찰되었다.

질소화합물은 새우에게 유해하기도 하지만 BFT system에서는 새우의 부가적인 먹이원으로 작용한다(Burford and Lorenzen, 2004). 이와 같은 조건 하에서 타가영양세균은 사육수의 유기질을 동화하여 세균단백질로 전환시키는데, 과량으로 증식한 세균은 세균총(bacterial floc)을 형성하며 이것은 다시 잡식성인 흰다리새우에게 섭식되어 새우단백질로 전환된다(Avnimelech, 1999; Moss, 2000; McIntosh, 2001; Burford et al., 2004). 이러한 질소의 재동화 과정은 FCR을 낮추는데 크게 기여한다. 새우는 초기 성장 기간에는 FCR이 매우 높은 것이 일반적이지만 본 실험에서 얻어진 낮은 FCR (0.79-1.29)은 이러한 질소동화와 재순환과정을 설명해준다. 유사한 조건하에서 Mishra et al. (2008)은 1.03, Cohen et al., (2005)은 0.86-0.96의 FCR을 얻은 것으로 보고하여 본 실험의 FCR 범위와 크게 차이가 나지 않는다. 사육수 비교환 시스템은 흔히 타가영양 혹은 bacterial floc 시스템으로 불리긴 하지만 실제로는 '자가영양/타가영양 복합 시스템'(phototrophic/heterotrophic mixed system)의 상태를 유지한다(McIntosh, 2001). 이러한 시스템의 사육수에는 정도의 차이는 있으나 식물플랑크톤도 상당기간 고농도로 존재하면서 타가영양세균과 유사한 기능, 즉 영양염의 순환 및 새우의 부가적인 먹이로서의 역할을 수행하는 것으로 알려져 있다(McIntosh, 2000, 2001; Browdy et al., 2001). Wasielesky et al. (2006)은 미세조류와 세균군이 잘 발달한 BFT raceway의 사육수와 단백질 함량이 다른 사료를 이용한 흰다리새우의 다양한 사육실험을 통하여 raceway 사육수가 청정 해수에 비해 새우의 성장을 및 단백질 함량이 현저히 높다는 것을 발견하였으며, 또한 사료 공급 없이도 raceway 사육수에서는 76.8%(청정해수 38.2%)의 새우가 생존하여 사육수 내의 타가영양세균 뿐 아니라 미세조류도 새우의 성장과 생존에 중요한 역할을 수행함을 확인하였다. 본 연구에서는 식물플랑크톤의 농도는 조사하지 않았지만, 이들 미세조류는 타가영양세균과 더불어 새우의 부가적인 먹이로 작용하여 FCR을 낮추는데 기여했을 것으로 추측된다.

중간양성은 종묘의 크기와 성장을 측면에서는 중간육성단계와 유사하지만 생산량의 극대화, 즉 최대 biomass를 얻기 위한 사육관리 측면을 고려하면 본 양성을 위한 연구들과 비교하는 것도 바람직하다. BFT 방식을 이용한 본양성(grow-out) 시스템은 90년대에 기본형이 개발된 이래 주로 상업화를 위한 대형의 사육시스템의 개발과 새우생산에 의한 수익성 위주의 실험이 이루어졌기 때문에 정확한 연구결과가 보고되지 않는 경향이 있다. 타가영양방식을 이용한 대형의 상업용 양성시스템은 WMC (Waddell Mariculture Center, South Carolina, USA)에서 1999년 개발한 수면적 55 m²의 prototype과 2001년 시설한 282 m²의 그린하우스형 raceway가 대표적이다(Weirich et al., 2002). WMC는 이 시설을 이용하여 15.4 g의 흰다리새우를 3.3 kg/m²

생산하였으며(Weirich et al., 2002; McAbee et al., 2003) 이후 생산량은 매년 증가하여 현재는 6.8 kg/m²까지 생산이 가능한 것으로 알려져 있다(C. L. Browdy, personal communication). WMC 보다는 규모는 작지만 최근 TAES (Texas Agricultural Experiment Station, Texas, USA)는 중간육성용으로 개발된 수면적 68.5 m²의 시스템을 이용하여 94일간의 본양성을 실시한 결과, 18.4 g의 흰다리새우를 9.29 kg/m³ 생산하여 상업화의 가능성을 보여 주었다(T. M. Samocha, personal communication). 전통적인 RAS 방식에 의한 새우의 양성기술로는 HBOI (Harbor Branch Oceanographic Institute, Florida, USA)에서 개발된 70 m² raceway system이 잘 알려져 있는데, 여기에서는 180일의 양성으로 14.1 g의 새우를 2.07 kg/m² 생산되어 BFT 방식에 비해 생산성이 낮다(van Wyk, 2000, 2001).

본 실험에서 사용된 수면적 18 m²의 raceway (tank 3)에서 얻어진 4.22 kg/m³의 생산량은 앞서 보고된 본양성의 연구결과들과 크게 차이가 나지 않지만, 생산성이 높은 상업적 규모의 본양성 시스템을 개발하기 위해서는 효율적인 탈질소 과정의 시설을 포함한 시스템의 보완과 확장, 단백질 함량이 낮은 전용사료의 개발, 사육수의 수질관리 등에 관한 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

사 사

이 논문은 국립수산물과학원의 연구과제인 갑각류양식기술개발연구과제(RP-2008-AQ-100)의 지원에 의해 수행되었습니다. 사육실험에 헌신적으로 도움을 준 서해특성화연구센터의 김용평, 오세갑 님에게 감사드립니다.

요 약

새우양식은 서해안의 축제식 양식장에서 거의 전적으로 이루어지고 있지만 최근 바이러스성 질병 피해와 생산성 저하로 해마다 피해가 증가하고 있다. 사육수 비교환 방식의 실내 고밀도 새우양식은 바이러스의 유입의 억제, 배출수에 의한 연안 환경 오염 방지, 생산성 향상 뿐 아니라 출하시기의 조절 등 장점이 있어 축제식 양식장의 문제점을 해결할 수 있다. 본 연구는 타가영양을 기본으로 하는 BFT (biofloc technology) 방식으로 제작된 4개의 raceway 형 tank (12.9, 18 m² 각 2개)에 흰다리새우 치하(B.W. 0.08-0.09 g)를 3,000-5,455 마리/m³의 밀도로 입식하고 42일간 환수율 2.7-3.4%/day로 사육한 결과, 생산량은 2.49-4.22 kg/m³으로 일반 새우종묘배양장의 12-20배, 축제식 양식장의 8-14배에 달하였다. 수확시 tank에 따라서 새우의 평균 체중은 1.45-2.03 g, 생존율은 38.2-48.0%, FCR은 0.79-1.29이었다. 총암모니아성 질소의 농도는 평균 1.11-1.42 ppm이며 최고 6.0 ppm (NH₃ 농도, 0.096 ppm)까지 상승하였으나 새우에게 영향을 미칠만한 농도는 아니었다. 아질산성 질

소는 사육 초기부터 꾸준히 상승하여 전 기간 평균 18.45-22.07 ppm으로 높게 유지되었다. 또한 아질산성 질소는 모든 tank에서 4주간 10 ppm 이상의 농도가 지속되었으며 후반기 4일 동안은 35-45 ppm의 높은 농도를 보여주어 새우의 생존에 영향을 미친 것으로 판단된다. 그러나 본 실험에서 보여준 장기간의 높은 아질산염의 농도에도 불구하고 최저 38%의 새우가 생존한 점은 BFT 조건 하에서 아질산염에 대한 새우의 적응능력을 설명해주며 이에 대한 기작과 내성관계 등에 대한 추가적인 연구가 필요할 것이다.

참고문헌

- Avnimelech, Y., 1999. Carbon/nitrogen ratio as a control element in aquaculture systems. *Aquaculture*, 176, 227-235.
- Avnimelech Y., 2006. Bio-filters: The need for a new comprehensive approach. *Aquacult. Eng.*, 34, 172-178.
- Avnimelech, Y., M. Kochva and S. Diab, 1994. Development of controlled intensive aquaculture systems with a limited water exchange and adjusted carbon to nitrogen ratio. *Bamidgeh*, 46, 119-131.
- Barajas, F. M., R. S. Villegas, G. P. Clark, J. G. Mosqueda and B. L. Moreno, 2006. Daily variation in short-term static toxicity of unionized ammonia in *Litopenaeus vannamei* (Boone) post-larvae. *Aquaculture Research*, 37, 1406-1412.
- Boyd, C. E. and J. W. Clay, 2002. Evaluation of Belize Aquaculture, Ltd: a superintensive shrimp aquaculture system. Washington, DC. World Bank, Network of Aquaculture Centres in Asia-Pacific, World Wildlife Fund and Food and Agriculture Organization of the United Nations Consortium Program on Shrimp Farming and the Environment.
- Bratvold, D. and C. L. Browdy, 1999. Disinfection, community establishment and production in a prototype biosecure shrimp pond. *J. World Aquacult. Soc.*, 30, 422-432.
- Bratvold, D. and C. L. Browdy, 2001. Effects of plastic sand, or additional vertical substrates on shrimp production water quality and microbial ecology in an intensive culture system. *Aquaculture*, 195, 81-94.
- Brock, J. A., R. B. Gose, D. V. Lightner and K. Hasson, 1997. Recent developments and an overview of Taura Syndrome of farmed shrimp in the Americas. (in) T. W. Flegel and I. H. McRae (eds.), *Diseases in Asian Aquaculture III*. Fish Health Section, Asian Fisheries Society. Manila, Phillipines, pp. 275-284.
- Browdy, C. L., D. Bratvold, A. D. Stokes and R. P. McIntosh, 2001. Perspectives on the application of closed shrimp culture systems. (in) C. L. Browdy and D. E. Jory (eds.), *The new wave, proceedings of the special session on sustainable shrimp culture*, Aquaculture, The World Aquaculture Society, Baton Rouge, Louisiana, USA, pp. 20-34.
- Browdy, C. L. and S. M. Moss, 2005. Shrimp culture in urban, super-intensive closed systems. (in) B. Costa-Pierce, A. Desbonnet, P. Edwards and D. Baker (eds.), *Urban Aquaculture*. CABI Publishing, Oxfordshire, UK. pp. 173-186.

- Burford, M. A. and K. Lorenzen, 2004. Modeling nitrogen dynamics in intensive shrimp ponds: the role of sediments remineralization. *Aquaculture*, 229, 129–145.
- Burford, M. A., P. J. Thompson, R. P. McIntosh, R. H. Bauman and D. C. Pearson, 2004. The contribution of flocculated material to shrimp (*Litopenaeus vannamei*) nutrition in a high-intensity, zero exchange system. *Aquaculture*, 232, 525–537.
- Chen, J. C. and S. C. Lei, 1990. Toxicity of ammonia and nitrite to *Penaeus monodon* juveniles. *J. World Maricult. Soc.*, 21(4), 300–306.
- Chen, J. C. and T. C. Chin, 1998. Joint action of ammonia and nitrite on tiger prawn, *Penaeus monodon*, postlarvae. *J. World Aquacult. Soc.*, 19, 143–148.
- Cohen, J., T. M. Samocha, J. M. Fox, R. L. Gandy and A. L. Lawrence, 2005. Characterization of water quality factors during intensive raceway production of juvenile *L. vannamei* using limited discharge and biosecure management tools. *Aquacult. Eng.*, 32, 425–442.
- Davis, D. A. and C. R. Arnold, 1998. The design, management, and production of a recirculating raceway system for the production of marine shrimp. *Aquacult. Eng.*, 17, 193–211.
- Decamp, O., L. Conquest, J. Cody and I. Forster, 2007. Effect of shrimp stocking density on size-fractionated phytoplankton and ecological groups of ciliated protozoa within zero-water exchange shrimp culture systems. *J. World Aquacult. Soc.*, 38, 395–406.
- Ebeling, J. M., M. B. Timmons and J. J. Bisogni, 2006. Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia-nitrogen in aquaculture systems. *Aquaculture*, 257, 346–358.
- Flegel, T. W., 1997. Special topic review: major viral diseases of the black tiger prawn (*Penaeus monodon*) in Thailand. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 13, 433–442.
- Frias-Espericueta, M. G., M. Harfush-Melendez and F. Paez-Osuna, 2000. Effects of ammonia on mortality and feeding of postlarvae shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 65, 98–103.
- Handy, M., T. M. Samocha, S. Patnaik, R. L. Gandy and D. A. McKee, 2004. Nursery trial compares filtration system performance in intensive raceways. *Global Aquaculture Advocate*, 8, 77–79.
- Hopkins, J. S., P. A. Sandifer, C. L. Browdy and J. D. Holloway, 1999. Comparison of exchange and no-exchange water management for the intensive culture of marine shrimp. *Journal of Shellfish Research*, 13, 441–445.
- Itoi S., A. Niki and H. Sugita, 2006. Changes in microbial communities associated with the conditioning of filter material in recirculating aquaculture systems of the puffer fish *Takifugu rubripes*. *Aquaculture*, 256, 287–295.
- Jang, I. K., Y. R. Cho, J. Y. Lee, H. C. Seo, B. L. Kim, J. S. Kim and H. W. Kang, 2007a. Selective predatory effect of river puffer on WSSV-infected shrimp in culture of shrimp with river puffer under laboratory scale. *J. Aquaculture*, 20(4), 270–277 (in Korean).
- Jang, I. K., J. C. Jun, G. J. Jo, Y. R. Cho, H. C. Seo, B. L. Kim and J. S. Kim, 2007b. Polyculture of fleshy shrimp *Fenneropenaeus chinensis* and white shrimp *Litopenaeus vannamei* with river puffer *Takifugu obscurus* in shrimp ponds. *J. Aquaculture*, 20(4), 278–288 (in Korean).
- Jang, I. K., J. S. Kim, K. J. Cho, H. C. Seo, Y. R. Cho, A. Gopalakannan and B. L. Kim, 2008. Intensive culture of the Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, under limited water exchange. I. Indoor nursery culture of postlarvae. *J. Aquacult.*, in press (in Korean).
- Johnson, C. N., S. Barnes, J. Ogle and D. J. Grimes, 2008. Microbial community analysis of water, foregut and hindgut during growth of Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, in closed system aquaculture. *J. World Aquacult. Soc.*, 39, 251–25
- Landesman, L., 1994. Negative impacts of coastal aquaculture development. *J. World Aquacult.*, 25, 12–17.
- Lotz, J. M. and D. V. Lightner, 2000. Shrimp Biosecurity: Pathogens and Pathogen Exclusion. (in) R. A. Bullis and G. D. Pruder (eds.), *Controlled and Biosecure Production Systems, Proceedings of a Special Session-Integration of Shrimp and Chicken Models*, The Oceanic Institute, Waimanalo, Hawaii, USA, pp. 67–74.
- Malone, R.F., B. S. Chitta and D. G. Drennan, 1993. Optimizing nitrification in beads filters for warm water recirculating aquaculture systems. (in) J. K. Wang (ed.), *Techniques for modern aquaculture*. American Society Aquaculture Engineering, St. Joseph, Michigan, USA. pp. 315–325.
- McAbee, B. J., C. L. Browdy, R. J. Rhodes and A. D. Stokes, 2003. Greenhouse raceways considered for superintensive U.S. shrimp production. *Global Aquaculture Advocate*, 6(4), 40–41.
- McIntosh, R. P., 1999. Changing paradigms in shrimp farming. I. General description. *Global Aquaculture Advocate*, 2(4/5), 42–47.
- McIntosh, R. P., 2000. Changing paradigms in shrimp farming: V. Establishment of heterotrophic bacterial communities. *Global Aquaculture Advocate*, 3(6), 52–54.
- McIntosh, R. P., 2001. High rate bacterial systems for culturing shrimp. (in) S. T. Summerfelt et al. (eds.), *Proceedings from the Aquacultural Engineering Society's 2001 Issues Forum*. Shepherdstown, West Virginia, USA. Aquaculture Engineering Society. pp. 117–129.
- Mishra, J. K., T. M. Samocha, S. Patnaik, M. Speed, R. L. Gandy and A. Ali, 2008. Performance of an intensive nursery system for the Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, under limited discharge condition. *Aquacult. Eng.*, 38, 2–15.
- Moss, S. M., 2000. Benefits of a microbially dominated intensive shrimp production system: a review of pond water studies at the Oceanic Institute. *Global Aquaculture Advocate*, 3(2), 53–55.
- Moss, S. M., 2002. Dietary importance of microbes and detritus in penaeid shrimp aquaculture. (in) C. S. Lee and P. O'Bryen (eds.), *Microbial approaches to aquatic nutrition within environmentally sound aquaculture production systems*. World Aquaculture Society, Baton Rouge, USA, pp. 1–18.
- Moss, S. M., W. J. Reynolds and L. E. Mahler, 1998. Design and

- economic analysis of a prototype biosecure shrimp growout facility. (in) S. M. Moss (ed.), U.S. Marine Shrimp Farming Program Biosecurity Workshop. Honolulu, Hawaii, USA. The Oceanic Institute. pp. 67-74.
- Moss, S. A., G. D. Pruder, and T. M. Samocha, 1999. Environmental management and control: controlled ecosystem and biosecure shrimp growout systems. (in) R. A. Bullis and G. D. Pruder (eds.), Controlled and biosecure production systems, Preliminary Proceedings of a Special Integration of Shrimp and Chicken Models, 27-30 April, Sydney, Australia, World Aquaculture Society, pp. 87-91.
- Reid, B. and C. R. Arnold, 1992. The intensive culture of the penaeid shrimp *Penaeus vannamei* Boone in a recirculating raceway system. J. World. Aquacult. Soc., 23, 146-153.
- Samocha, T. M., T. Blacher, J. Cordova and A. De Wind, 2000. Raceway nursery production increases shrimp survival and yields in Ecuador. Global Aquaculture Advocate, 3(6), 66-68.
- Samocha, T. M., L. Hamper, C. R. Emberson, A. D. Davis, D. McIntosh, A. L. Lawrence and P. van Wyk, 2002. Review of some recent developments in sustainable shrimp farming practices in Texas, Arizona and Florida. J. Appl. Aquacult., 12, 1-42.
- Samocha, T. M., S. Patnaik, M. Speed, A. M. Ali, J. M. Burger, R. V. Almeida, Z. Ayub, M. Harisanto, A. Horowitz and D. L. Brock, 2007. Use of molasses as carbon source in limited discharge nursery and grow-out systems for *Litopenaeus vannamei*. Aquacult. Eng., 36(2), 184-191.
- Sandifer, P. A., A. D. Stokes and J. S. Hopkins, 1991. Further intensification of pond shrimp culture in South Carolina. (in) P. A. Sandifer (ed.), Shrimp culture in North America and the Caribbean. Advances in World Aquaculture 4. The World Aquaculture Society, Baton Rouge, LA, pp. 84-95.
- Schneider, O., M. Chabrillon-Popelka, H. Smidt, O. Haenen, V. Sereti, H. Eding and J. A. J. Verreth, 2007. HRT and nutrients affects bacterial communities grown on recirculation aquaculture system effluents. FEMES Microbial Ecology, 60, 207-21
- Sich, H. and J. van Rijn, 1992. Distribution of bacteria in a bio-filter-equipped semi intensive fish culture unit. Special Publication in European Aquaculture Society, 17, 55-7
- Sowers, A., S. P. Young, P. Shawn, J. Isely, J. Jeffery, C. L. Browdy and J. R. Tomasso, 2004. Nitrite toxicity to *L. vannamei* in water containing low concentrations of sea salt or mixed salts. J. World Aquacult. Soc., 35(4), 445-451.
- Van Wyk, P. M., 1999. Harbor Branch Shrimp Production Systems. (in) B. Crawford (ed.), Production of marine shrimp in freshwater recirculating aquaculture systems. Florida Department of Agriculture and Consumer Services, Tallahassee, FL, USA, 222 pp.
- Van Wyk, P., 2000. Culture of *Penaeus vannamei* in single-phase and three-phase recirculating aquaculture systems. Global Aquaculture Advocate, 3, 41-43.
- Van Wyk, P., 2001. Designing efficient indoor shrimp production systems: a bioeconomic approach. (in) C. L. Browdy and D. E. Jory (eds.), The new wave, proceedings of the special session on sustainable shrimp culture, Aquaculture 2001. Baton Rouge, Louisiana, USA. The World Aquaculture Society, pp. 44-56.
- Wajsbrodt, N., A. Gasith, M. D. Krom and T. M. Samocha, 1990. Effect of dissolved oxygen and the molt stage on the acute toxicity of ammonia to juvenile green tiger prawn *Penaeus semisulcatus*. Environ. Toxicol. Chem., 9 (4), 497-504.
- Weirich, C. R., C. L. Browdy, D. Bratvold, B. J. McAbee and A. D. Stokes, 2002. Preliminary characterization of a prototype minimal exchange super-intensive shrimp production system. Proceedings of the IVth International Conference on Recirculating Aquaculture. Virginia Tech University, Blacksburg, Virginia, USA, pp. 255-270.
- Wasielky Jr., W., H. Atwood, A. Stokes and C. L. Browdy, 2006. Effect of natural production in a zero exchange suspended microbial floc based super-intensive culture system for white shrimp *Litopenaeus vannamei*. Aquaculture, 258, 396-403.

원고접수 : 2008년 10월 23일

심사완료 : 2008년 11월 19일

수정본 수리 : 2009년 1월 31일