

폐쇄시스템 내에서 죽은 산호골격이 수질과 고착성 연체동물에 미치는 영향

이남현, 한경남

인하대학교 해양과학과

The effect of dead coral skeletons on the water quality and sessile mollusks in the closed system

Nam Hyeon Lee and Kyung Nam Han

Department of Ocean science, Inha university, Incheon 402-751, Korea

ABSTRACT

Recently, for the purpose of constructing artificial ecosystem, the public aquarium and experimental mesocosm systems are receiving attention. To design and establish an aquarium and mesocosm system, there is need of several materials for simulating the environment, such as sediments, rocks, and plants. Expecially for sessile mollusks, there must be proper materials to which sessile invertebrates can adhere. Nowadays, many aquariums and mesocosm systems are using dead coral skeletons for sessile mollusks. This study was proceeded to have data on the effect of dead coral skeletons on water qualities with the experiment on the environmental factors. For this purpose, I made glass tank for experiment, chose two types of dead coral skeletons imported from the Indonesia and observed the change of water qualities and decomposition efficiency of TAN (total ammonia-nitrogen), nitrite (NO_2^-) and nitrate (NO_3^-). As a result, the lager the surface area was, the more TAN, nitrite and nitrate decomposition rate increased. In addition, coral skeletons covered with crustose algae and bacteria in the tank showed faster TAN, nitrite and nitrate removal rate and stabilization. Accordingly, this experiment suggested that dead coral skeletons could be used as a sub filter for the closed system as well as an adhering plate

Key words: Mesocosm, Aquarium, Filtering system, Water quality, Sessile mollusks

서 론

수서생물을 인공적으로 사육하기위한 연구들을 통해 현재 다양한 수서생물종들이 양식되고 있으며 남획과 환경오염 등으로 인해 많은 수산자원들이 감소함으로써 양식 사업은 매우 중요한 미래 사업으로써 주목받아오고 있다 (Jeon *et al.*, 1997; Suh *et al.*, 2002). 또한 수산자원으로서의 대상 종들에 대한 증·양식연구와는 별도로 최근 교육과 관광을 위한 대형 전시용 수족관과 연구용 생물을 위한 사육시스템 연구도 많이 주목받고 있다. 기존의 양식대상 종들을 위한 시스템들이

대량 밀집사육을 통한 경제성 높은 성장과 생산에 초점을 맞추었다면 (Jang *et al.*, 2009), 전시용이나 연구용 사육시스템은 경제성과 생산성보다는 자연생태에 근접한 인공적인 수중생태를 재현하거나 수서환경을 구성하는 요소들에 대한 인공적인 조절능력에 중점을 두고 연구되고 있다 (Adey and Loveland, 1998). 수산자원을 위한 양식시설과는 달리 전시용 수족관이나 mesocosm system의 구축을 위해서는 필수적인 환경 구성요소들이 존재하며 수중환경을 재현하기 위한 바닥재, 고착성 생물들을 위한 암석, 해조류와 같은 자연적인 요소들과 생태환경에 적용할 인공적인 구성요소인 수조 디자인과 수류, 조명, 파도, 조석재현 장치 등이 여기에 포함된다. 하지만 이들 구성요소들에 대한 연구들이 다양하게 이루어지지 않고 있으며 기존의 연구 또한 생물과의 상호관계에 대한 연구들이 주를 이루고 있는 실정이다 (Kinzie *et al.*, 1984; Allan and Maguire, 1995; Yap, 2004; Schlacher *et al.*, 2007).

수조내부 환경구성을 위한 중요한 요소들 중 무척추동물 특

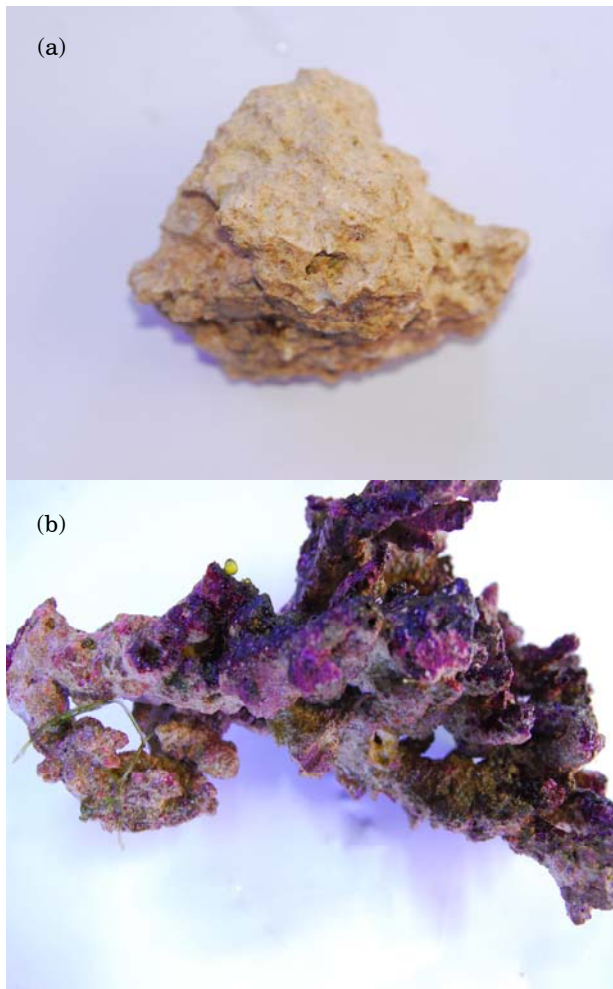


Fig. 1. The difference of the external surface between dead rock and live rock. (a) dead rock, (b) live rock.

히 고착성 연체동물 중심의 수서환경을 재현하고자 할 경우 고착성 연체동물들이 부착하여 생존할 수 있는 부착용 도구는 매우 중요한 요소다. 이를 위해 고착성 연체동물들의 사육을 위한 부착용 재료의 하나로써 죽은 산호골격을 수년전부터 이용해오고 있으며 live rock 또는 dead rock이라는 명칭으로 통용되고 있다 (Green and Shirley, 1999). 죽은 산호의 사체가 시간이 경과함에 따라 암석화 되고 공기 중에 장시간 노출되어 산호골격 내외부에 서식하던 박테리아나 고착성 생물들이 폐사한 채 방치된 경우 dead rock이라 부르며 연안 수중에 오랫동안 위치하여 다양한 생물들이 부착되어있을 경우 live rock이라 통용되고 있다 (Fig. 1). 고착성 생물 중에서도 특히 산호의 골격표면을 고착성 산호조류가 덮고 있는 것을 live rock의 중요한 기준으로 삼는다 (Yuen *et al.*, 2009). 이들의 명칭은 일반적으로 취급자들 사이에 불리 우는 하나의 명칭으로 아직까지 학술적으로 정해진 명칭이 아니다.

이 두 가지 종류의 산호골격들은 많은 수족관과 mesocosm 연구자들로부터 매우 중요한 구성요소로 인식되어 고착성 연체동물 생태를 재현하고자 하는 수족관이나 고착성 연체동물의 생태연구를 목적으로 하는 mesocosm에서 고착성 생물들의 부착도구로서 사용되고 있으며 사육시스템의 수질 안정화를 위한 보조 여과재로도 사용되고 있다 (Delbeek and Sprung, 1994). 보조 여과재로 사용되는 이유로 Brunty *et al.* (1997) 과 Lee and Song (1999) 은 폐쇄된 인공 환경에서 생물에 영향을 미치는 용존 물질 중 total ammonia-nitrogen (TAN), 아질산염 (NO_2) 및 질산염 (NO_3) 등은 직접적으로 생물들에게 악영향을 미치며 이러한 질소화합물의 생물학적 작용을 통한 빠른 분해가 폐쇄 수 환경에서 매우 중요한 문제라고 하였는데, 이들 두 종류의 산호골격들이 고착성 연체동물들의 부착용 도구로서의 역할뿐만 아니라 폐쇄 사육시스템 내에서 생물학적 분해과정에도 영향을 미친다고 여겨지기 때문이다. 하지만 이들 두 가지 종류의 산호골격들이 부착용 도구로서의 역할 이외에 사육시스템 내 수질에 정확하게 어떠한 영향을 미치는지에 대해서는 연구가 다양하게 이루어지지 않아 단순한 산호의 생존과 live rock과의 관계실험이나 산호 사육에서의 live rock의 암모니아분해에 대한 실험 등이 진행됐을 뿐이다 (Yuen *et al.*, 2009).

그러므로 본 연구에서는 크게 2가지 측면에서 live rock과 dead rock의 수질영향 실험을 통해 좀 더 정확하고 다양한 자료들을 확보하고자 하였다. 첫 번째는 여과재와 수조환경의 구성요소로서 주로 이용되고 있는 dead rock의 폐쇄 수 환경 내에서의 수질영향을 관찰하였으며 두 번째로 live rock이 수질에 미치는 영향에 대한 실험을 통해 두 종류에 대한 차이점을 관찰하였다. 이를 통해 다양한 고착성 연체동물을 위한 사육시스템 구축 시 생물과 환경에 미치는 요소들에 대한 정확한 자료들을 확보함으로써 더욱 정교하고 안정된 사육시스템을 구축하고 관리하는데 이용하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 실험 재료

dead rock은 인도네시아에서 수입된 것을 구입하여 전처리 과정을 거쳐 실험에 이용하였다. 물 세척 후 33% 과산화수소수 (H_2O_2) 를 이용하여 일정기간 유기물을 제거하였다. 산호사 또한 인도네시아 산으로 입자 크기 $3.52 \pm 1.16 \text{ mm}$ 로써 dead rock과 같은 전처리과정을 거친 후 실험에 사용하였으며 거름망을 이용하여 일정 크기를 벗어나는 것들은 제거 후 사용하였다. live rock은 수입된 즉시 증류수에 30초간 세척 후 표면에 부착된 말미잘이나 산호류 및 기타 대형생물을 제거하였다. 인공해수로 제작한 염분도 30‰, 수온 22°C , pH 8.12의 순치 수조에 간단한 여과시스템을 부착한 후 전처리한

Table 1. The specification of the treatment tank system for live rocks

Item	Specification
Tank volume (L)	200
Filtering system	external filter + protein skimmer
Temp. (°C)	22
Salinity (‰)	30
pH	8.12
DO (mg/L)	6.88
Flow rate (cycle/H)	3
Water treatment	artificial salt
Light	indirect lighting

live rock을 수조에 투입하여 일주일간 안정화 기간을 거쳐 실험에 사용하였다. live rock의 안정화를 위한 유지시스템은 Table 1과 같다.

실험에 사용된 rock들의 표면적 측정은 Marsh (1970) 와 Yuen *et al.* (2009) 이 이용한 aluminum foil method를 이용하여 측정하였으며 산호사의 표면적은 Jeon *et al.* (1997) 의 연구를 참고하여 실험에 이용하였다.

2. 실험 수조

실험에 사용된 수조는 30 cm × 25 cm × 25 cm의 유리 수조로 물 세척 후 ethanol로 소독한 후 사용하였다. 수조덮개는 아크릴 재질의 투명판을 사용하여 실험기간 동안 이물질의 유입과 증발을 최소화 하였다. 수류를 위하여 5 Watt 수중 펌프를 이용하여 3 cycle/hour로 수류를 수조 내에서 순환하도록 하였다. 수조의 위치를 실험실내 외부인의 출입이 없는 조용한 장소에 위치시켜 낮 동안 자연광이 직접적으로 영향을 덜 미치는 곳에 설치하였으며 실험수조를 위해 인공조명은 12 Watt 삼파장 등을 하루 8시간 동안 타이머를 이용하여 각각

의 수조에 균일하게 제공하도록 설치하였다.

3. 실험생물

실험에 이용된 생물은 굴 (*Crassostrea gigas*) 로 충청남도 태안군 일대에서 양식된 개체를 이용하였다. 평균 각장 67.35 ± 11.25 mm의 크기로서 100 L 사각 유리 수조에 인공해수를 이용하여 삼일 간 안정화 과정을 거친 후 실험에 이용하였다.

4. dead rock이 수질에 미치는 영향

실험은 상기에서 서술한 실험재료와 설치방법에 따라 설치 후 염화암모늄 (NH₄CL) 을 실험수조에 투입하여 수질변화를 관찰하였다. 살균소독 처리된 수조에 1 kg의 산호사로 구성된 Exp. 1과 1 kg의 dry weight dead rock 한 조각으로 구성된 Exp. 2, 330 g dry weight dead rock 3 조각으로 구성된 Exp. 3, 100 g dry weight dead rock 10 조각으로 구성된 Exp. 4 및 bare tank로 구성된 대조구 수조 Exp. 5로 나누어 구성하였다 (Table 2). 각각의 실험수조에는 15 L의

Table 2. Properties of materials in the dead rock experiment

	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 5*
Materials	coral sand	dead rock	dead rock	dead rock	-
Quantity (piece)	-	1	3	10	-
Unit weight (g)	1,005.4 ± 2.8	1,025.3 ± 35.5	335.2 ± 3.5	108.6 ± 9.7	-
Unit surface area (cm ²)	4,306 ± 285.6**	352.5 ± 33.5	207.5 ± 23	75.8 ± 11.5	-

* Exp. 5 is a bare tank as control.

** From Jeon *et al.* (1997).

Table 3. Properties of materials in the live rock experiment

	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4*
Materials	dead rock	live rock	live rock	-
Quantity (piece)	3	1	3	-
Unit weight (g)	332.5 ± 15.2	1.032.4 ± 32.8	338.7 ± 14.5	-
Unit Surface area (cm ²)	200.5 ± 28.4	368.3 ± 27.5	198.5 ± 19.6	-

* Exp. 4 is a bare tank as control.

Redsea사 해수염으로 제작한 인공해수를 투입하고 기기들을 설치하여 3일간 안정화 기간을 가졌다. 실험기간 동안 수온은 22℃를 유지하였고 염분도는 약 30‰로 유지하였다. 매일 1회 증발량만큼 증류수를 보충하였으며 사육수 교환은 하지 않았다. 3일간의 안정화 후 3 M 염화암모늄 (NH₄CL) 을 각각의 실험수조에 TAN이 6 mg/L이 되도록 투여 후 실험을 2회 실시하였다.

5. live rock이 수질에 미치는 영향

dead rock과 live rock의 수질변화를 관찰하기위해 4개의 실험군으로 구성하였다. Exp. 1은 dead rock 실험수조로 300 g dead rock 3 조각을 사용하였다. Exp. 2는 live rock 1 kg 1 조각을 투입하였으며 Exp. 3은 live rock 300 g 3 조각을 투입하였다 (Table 3). Exp. 4는 bare tank로 대조구로 이용하였다. 실험수조에는 15L의 인공해수를 투입하고 기기들을 세팅하여 3일간 안정화 기간을 가졌다. 실험기간 동안 수온은 22℃를 유지하였으며 염분도는 약 30‰로 유지하였다. 매일 1회 증발 량 만큼의 증류수를 보충하였으며 사육수 교환은 실시하지 않았다. 안정화 후 굴 (*Crassostrea gigas*) 을 각각의 수조에 12 개체씩 투입 후 실험을 2회 실시하였다. 배양된 녹조류와 규조류 농축액을 매일 한차례 3 ml씩 공급하였으며 잔존사료는 제거하지 않았다. 폐사생물은 즉시 제거 후 같은 크기의 굴을 재투입하였다.

6. 측정과 분석

실험기간 동안 수질분석은 기본적인 수질변화와 환경변화를 알아보기 위해 수온, 용존산소, pH, 염분도등을 하루에 1회 측정하였다. 측정은 micro sensor를 이용한 YSI사 water tester (YSI-150) 을 이용하여 측정하였다. 질소화합물의 농도변화를 관찰하기 위해 실험기간 동안 2일에 1회 같은 시각에 수조 내 사육수를 채취하여 0.5 μm의 크기의 filter를 이용하여 거른 후 암모니아 (TAN), 아질산염 (NO₂), 및 질산염 (NO₃) 을 Lamote사 Smart II colorimeter를 이용하여 파장 640 nm에서 흡광도를 측정하여 정량하여 변화량을 관

찰하였다. 통계분석은 각 연구 결과로부터 얻어진 자료 값 사이의 유의차 유무를 SPSS WIN Ver. 17.0을 이용하여 ANOVA 와 t-test를 통하여 유의성 (P < 0.05) 을 검정하였다.

결 과

1. dead rock이 수질에 미치는 영향

대조구를 제외한 모든 실험 군에서 실험기간 동안 일정한 pH 농도를 유지하였다. 1 kg dead rock 한 개로 구성된 Exp. 2가 다른 실험 군에 비해 변화가 적고 낮은 값을 유지하였으나 사육시스템 내에서 실제적인 영향을 미칠 수 있는 의미 있는 차이는 아니었다 (Fig. 2).

용존산소 또한 6.52 ± 0.48 mg/L을 보인 Exp. 5를 제외하고는 Exp. 1의 경우 7.09 ± 0.55 mg/L이었고 dead rock 실험 군인 Exp. 4가 7.07 ± 0.55 mg/L로 유의한 차이를 나타내지 않았으며 실험기간동안 의미 있는 변화를 보이지 않았다 (P > 0.05, Fig. 3).

TAN은 산호사로 구성된 Exp. 1이 제일 빠르고 안정적인

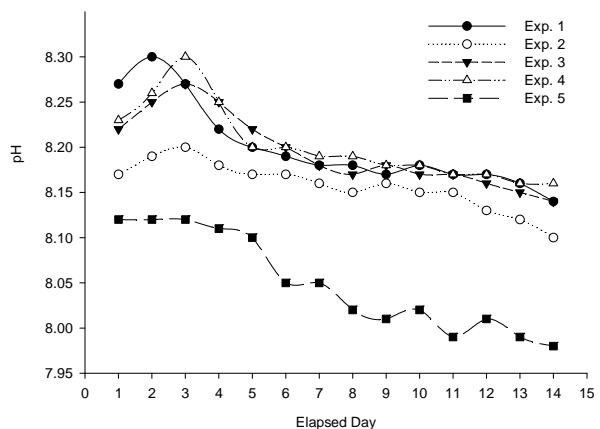


Fig. 2. Changes of pH concentration at various types of dead rocks.

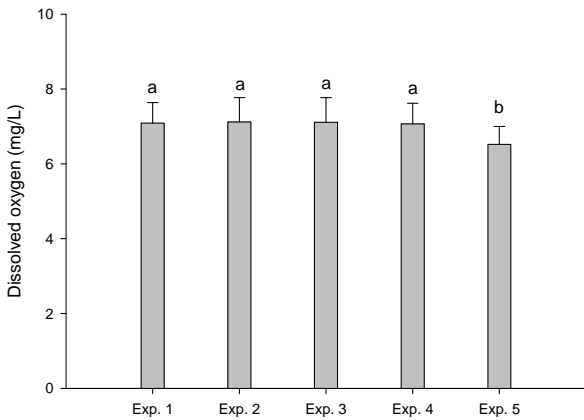


Fig. 3. Changes of dissolved oxygen (mg/L) at various types of dead rocks (mean \pm standard deviation, n = 4). Different superscript letters are significantly different at $P < 0.05$.

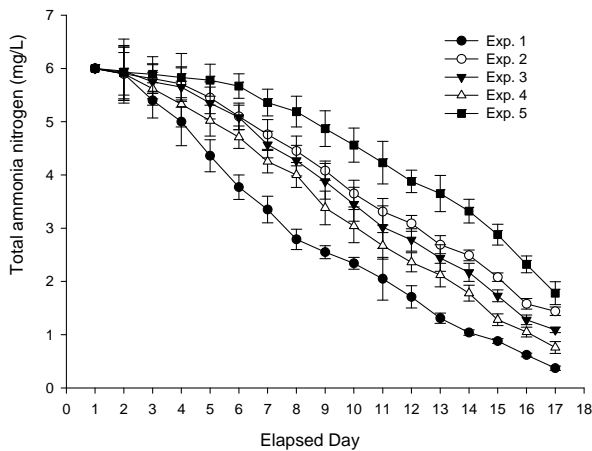


Fig. 4. Changes of total ammonia nitrogen (TAN) at various types of dead rocks (mean \pm standard deviation, n = 4).

감소를 보였으며 초기 3일간은 다른 실험군과 비교해 특별한 차이가 없었으나 이후 빠른 감소율을 보였다. 50% 농도로 감소하는 시점이 16일 경과 전에 나타남으로써 두 번째로 빠른 변화를 보인 Exp. 4와 비교해서도 4일 이상 빠른 결과를 보였으며 마지막 측정에서도 0.37 ± 0.04 mg/L로 가장 낮은 값을 나타냈다. dead rock 간의 비교에서는 Exp. 4가 제일 빠른 분해율을 보였으며 유의한 차이를 나타냈다 ($P < 0.05$, Fig. 4).

아질산염은 초기 증가시기에는 대조구 Exp. 5를 제외한 모든 실험 군에서 같은 비율로 증가하였다. 또한 대조구 Exp. 5를 제외하고는 최고값이 모두 비슷한 결과를 보였다. Exp. 1의 경우 최고값이 1.18 ± 0.18 mg/L이었으며 Exp. 2와 3도

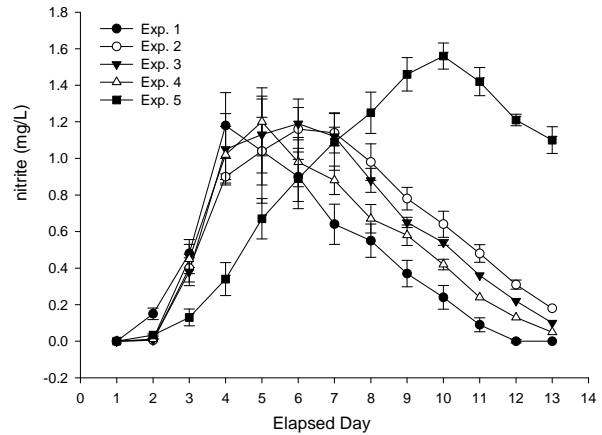


Fig. 5. Changes of nitrite (NO_2^-) at various types of dead rocks (mean \pm standard deviation, n = 4).

1.16 ± 0.11 mg/L과 1.19 ± 0.08 mg/L을 나타내 표면적에 따라 아질산염의 초기증가에는 큰 차이가 없음을 보였다. 최고값을 보인 이후 각 실험 군에 농도 차이가 나타나기 시작했으며 dead rock 사이에서 유의한 차이를 나타냈다 ($P < 0.05$). TAN과 마찬가지로 Exp. 1의 아질산염 농도가 감소하면서 2일 간격으로 Exp. 4가 뒤따랐고 이후 Exp. 3과 Exp. 2가 그 뒤를 따라 감소하는 결과를 보였다. 다만 감소하는 시점은 모두 달랐지만 Exp. 5를 제외한 모든 실험군의 감소경향은 유사하였다 (Fig. 5).

질산염의 경우 변화경향에서 아질산염과 차이를 나타냈다. 아질산염의 경우 초기 증가 시기는 같고 최고값 이후 감소시점이 달라졌으나 질산염의 경우에는 초기증가 시기에는 서로 다른 속도로 증가하다가 최고값 이후 안정화시기에 접어들면서 서로 비슷한 감소율을 보였다. 질산염에서의 가장 빠른 감소는 Exp. 1이었으며 대조구 Exp. 5를 제외한 가장 최고값은 Exp. 2로 20.05 ± 3.55 mg/L이었다. 또한 Exp. 1이 가장 빨리 최고값에 도달하고 다른 실험 군에 비해서 빠른 감소율을 나타냈으나 실험 마지막 측정에서는 오히려 Exp. 4가 가장 낮은 값인 1.09 ± 0.17 mg/L을 나타냈으며 제일 높은 Exp. 5의 15.87 ± 0.75 mg/L보다 약 1/15 정도 적은 값을 보였다. 그러나 대조구를 제외하고는 중반 이후 후반기에는 dead rock 사이에 유의한 차이를 보이지 않았다 ($P > 0.05$, Fig. 6).

2. live rock이 수질에 미치는 영향

pH의 경우 실험기간동안 수조 내 분해 작용을 통해 서서히 감소하는 경향을 보였다. 대조구인 Exp. 4를 제외하고는 dead rock이 투입된 Exp. 1이나 live rock이 투입된 Exp. 2

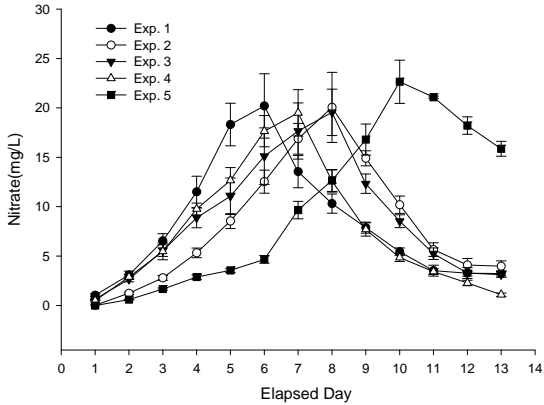


Fig. 6. Changes of nitrate (NO_3^-) at various types of dead rocks (mean \pm standard deviation, $n = 4$).

와 3 모두 수치상으론 차이를 보였지만 매우 미미한 차로 의미 있는 차이는 아니었다. 대조구 Exp. 4를 제외하고는 마지막 값의 경우 제일 높은 Exp. 1과 제일 낮은 Exp. 3간의 차이는 0.04로 실제적으로 수 환경에 영향을 줄 수 있는 차이는 아니었다 (Fig. 7).

용존산소의 경우에도 대조구인 Exp. 4의 값이 6.25 ± 0.25 mg/L로 제일 낮았고 Exp. 1이 7.12 ± 0.36 mg/L이었으며 Exp. 2가 7.06 ± 0.66 mg/L을 나타내고 Exp. 3이 7.01 ± 0.32 mg/L을 나타내 세 실험군 사이에 유의한 차이는 나타나지 않았다 ($P > 0.05$, Fig. 8).

TAN의 경우 live rock으로 구성된 Exp. 2와 3이 초기 급격히 상승하였으며 dead rock인 Exp. 1에 비해 25%이상 높은 증가율을 보였다. 그러나 상승 이후 단기간에 빠르게 안정

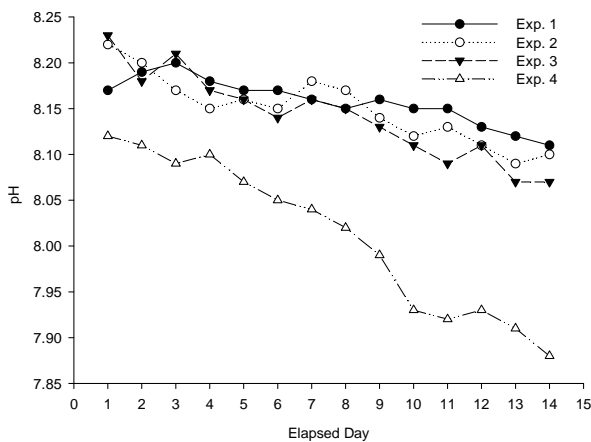


Fig. 7. Comparison of pH concentration between dead rock and live rock.

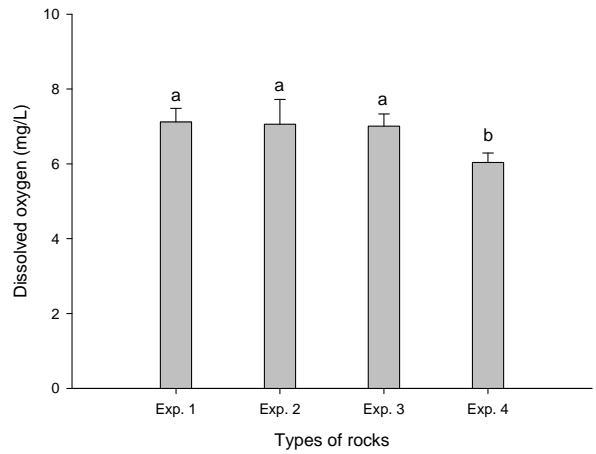


Fig. 8. Comparison of dissolved oxygen (mg/L) between dead rock and live rock (mean \pm standard deviation, $n = 4$). Different superscript letters are significantly different at $P < 0.05$.

화 단계로 접어들어 실제 감소시점은 Exp. 1과 비교해 Exp. 3의 경우 약 10일 가까이 빠른 경향을 보여 주었으며 Exp. 2도 5일 가까이 감소시점이 빨랐다. 후반기로 접어들면서 TAN 농도는 모두 1 mg/L 이하로 감소함으로써 대조구 Exp. 4를 제외하고는 안정기에 시간적인 차가 존재 할 뿐 후반기에는 live rock 사이에 유의한 차이가 나타나지 않았다 ($P > 0.05$, Fig. 9).

아질산염은 live rock인 Exp. 2와 3이 초기 상승기에 유사한 경향을 보였으며 감소시점에서도 수치상의 차이는 존재하지만 유의한 차이는 나타나지 않았다 ($P > 0.05$). dead rock

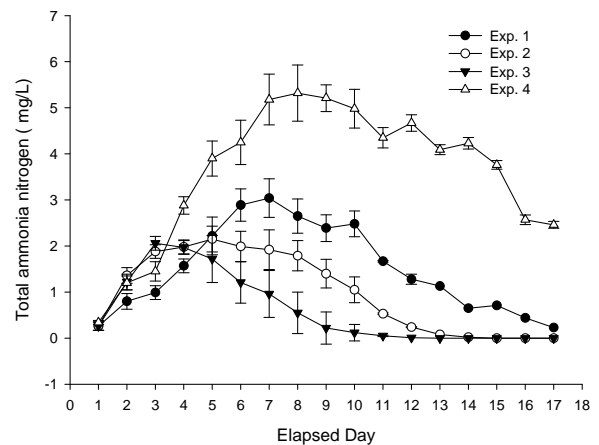


Fig. 9. Comparison of total ammonia nitrogen (TAN) between dead rock and live rock (mean \pm standard deviation, $n = 4$).

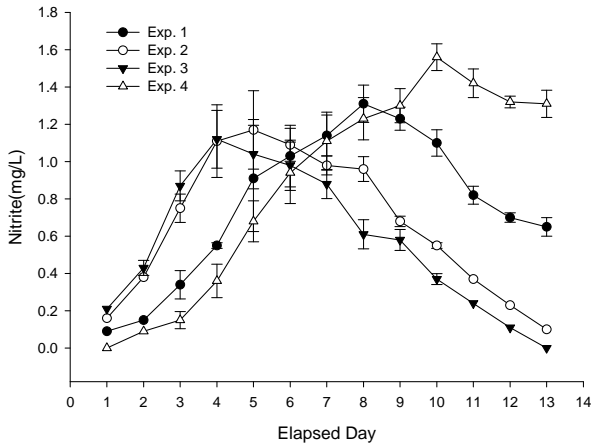


Fig. 10. Comparison of nitrite (NO₂⁻) between dead rock and live rock (mean ± standard deviation, n = 4).

Exp. 1의 경우 상승기엔 대조구 Exp. 4와 같은 경향으로 증가하다가 일정 시점에서 감소하는 경향을 보였으며 최고값에 도달했을 때 1.23 ± 0.06 mg/L로 live rock보다 약간 높은 수치를 보였다. 실험 후반 Exp. 2와 3은 불검출 단계로 접어들었으나 Exp. 1의 경우 Exp 2와 3과 같은 감소율로 감소하는 경향을 보여주었어도 감소시점이 늦어짐으로써 마지막 측정치가 0.65 ± 0.05 mg/L을 나타냈다 (Fig. 10).

질산염은 아질산염과 비교해 좀 더 큰 차이를 보였다. 아질산염과는 달리 Exp. 2와 3 사이에 변화경향에서 차이가 뚜렷하며 전반과 후반을 제외한 중반부에서 두 실험구간에 차이가 뚜렷하였다. 제일 안정된 변화를 보인 Exp. 3의 경우 최고 농도가 13.76 ± 0.98 mg/L이었으며 Exp. 2의 최고값 16.06 ± 1.25 mg/L과는 2.3 mg/L 정도의 차를 나타냈다. 후반기에서는 Exp. 2와 3 모두 3 mg/L이하의 농도로 안정되었다. dead rock Exp. 1의 경우 아질산염과 마찬가지로 대조구 Exp. 4와 같은 경향으로 증가하는 결과를 보여주었으며 live rock 인 Exp. 2와 3과는 유의한 차이를 나타냈다 ($P < 0.05$). 또한 Exp. 1의 경우 비록 최고 농도 값이나 감소시점이 대조구 보다 빠른 결과를 나타내며 최고값을 나타낸 이후 live rock 실험군과 비슷한 감소율을 보였으나 전반적으로

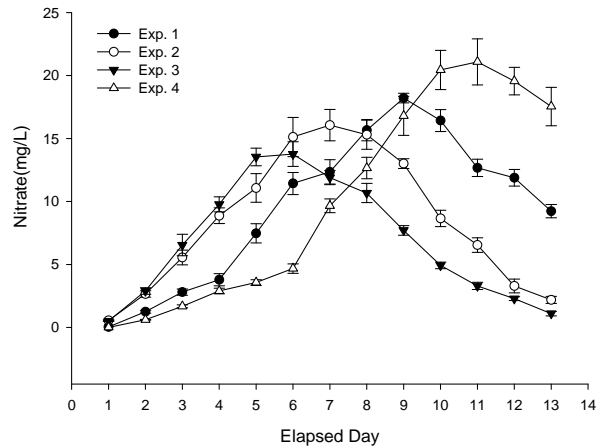


Fig. 11. Comparison of nitrate (NO₃⁻) between dead rock and live rock (mean ± standard deviation, n = 4).

live rock보다는 대조구와 비슷한 경향을 나타냈다 (Fig. 11).

질화 박테리아의 안정기 이후 일일 TAN 분해 량을 분석한 경우 live rock이 dead rock에 비해 거의 2배 가까운 분해 량을 보여 유의한 차이를 나타냈다. ($P < 0.05$, Table 4).

실험생물의 경우 모든 실험구에서 폐사가 관찰되었으며 대조구 Exp. 4를 제외하고는 대부분 실험초반부터 중반 사이에 질소화합물의 농도가 증가하는 시기에 발생하였다. Exp. 2와 3의 경우에는 차이가 없었지만 Exp. 1의 경우 상승기부터 감소하는 시점 전까지 폐사가 지속적으로 나타났다. 대조구의 경우에는 모든 실험에서 골고루 폐사가 나타났다 (Table 5).

고 찰

1. dead rock이 수질에 미치는 영향

dead rock이 수질에 미치는 영향을 알아보기 위해 한 실험에서 pH의 경우 큰 변화를 보이지 않았다. Lee and Song (1999)의 연구에서 폐각에 관한 결과와 같이 CaCO₃가 주성분인 dead rock의 경우 실험기간 동안 약간 감소하는 경향을 보였지만 실제 수 환경에서는 미미한 수치로 환경이나 생물에 영향을 미칠 수 있는 의미 있는 감소는 아니었다. 이러한 pH

Table 4. Comparison of TAN removal rate of two types of rocks during the stationary phase of nitrifying bacteria at the experiments

	Dead rock	Live rock
TAN (mg/kg/day)	1.95 ± 0.21^a	3.75 ± 0.52^b
TAN (mg/m ₂ /day)	19.60 ± 2.15^a	37.69 ± 5.26^b

Values (mean ± standard deviation, n = 4) with different superscripts in the same low are significantly different at $P < 0.05$.

Table 5. The mortality of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) during the experiments (first / second exp.)^{*}

Six quarters/30days	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4
1				
2	1/1	1/0	1/0	1/1
3	2/1		0/1	1/1
4	1/0	0/1		2/2
5	0/1			2/2
6	0			2/3

* The experiment was conducted two times. (first / second exp.) means the number of experiments.

의 안정은 Haug and McCarty (1972) 과 Grguric *et al.* (2000) 의 pH와 recirculating system에 대한 연구와 Srna and Baggaley (1975) 이 보고한 해산 질화박테리아에 의한 질산화과정에 적합한 pH의 범위는 7.0 - 8.2 라는 연구 결과와 같이 장기간의 폐쇄 환경 내에서 이러한 dead rock에 의한 pH 안정화는 전체적인 수질 안정화에 매우 큰 도움을 주는 부분이라 사료된다.

TAN 농도는 모든 실험 군에서 농도의 차는 있지만 시간에 따른 변화는 같은 경향을 보였다. 또한 산호사를 제외하고 dead rock의 표면적 증가가 같은 비율의 TAN 제거를 증가로 나타남을 보였다. 기존의 여과재의 경우 크기가 작을수록 표면적의 증가를 통한 여과효율 증가가 나타나더라도 각각의 여과재의 TSA (Total surface area) 와 실제적인 SSA (Specific surface area) 사이에 일정한 차가 존재함으로써 표면적과 여과효율 간에 차이가 존재한다 (Ki *et al.*, 2010). 즉 TSA를 모두 여과를 위한 면적으로 사용할 수 없음을 의미하는데 dead rock의 경우 표면적 증가와 같은 비율로 TAN 농도 감소가 나타남은 dead rock의 표면적이 TSA와 SSA 사이에 차이가 거의 없음을 알 수 있어 dead rock을 사용하는 데 있어서 매우 중요한 부분으로 사료된다.

아질산염의 경우 실험 초기 모든 실험군에서 아질산염 증가가 같은 경향으로 증가함을 보였는데 아질산염 분해박테리아의 생육에 있어서 시간적 차이가 크지 않음을 알 수 있으며 dead rock의 표면적 증가가 아질산염 분해에 있어서는 시스템초기 보다는 중반 이후가 더욱 중요하다고 사료된다. 질산염의 경우에는 아질산염과 반대로 초기에 증가를 차가 존재하나 감소율에 있어서는 차이가 크지 않은 결과를 보여주었다. dead rock 간의 표면적 차에 의해 감소 시점에 차이를 나타냈으나 중반 이후의 안정기에서 dead rock의 표면적 차는 본 실험에서는 질산염 분해에 큰 의미를 나타내지 않았다. 또한 대조구를 제외하고는 안정기로 접어들면서 각 실험군의 결과는 표면적에 따라 모두 안정적이고 일정한 분해율을 보여줌

으로써 실제 폐쇄 사육 시스템에서 dead rock을 고착성 연체동물의 부착용 도구로 적용할 경우 적정 용량의 여과시스템이 투입된다면 dead rock은 생물의 서식환경으로서 뿐만 아니라 Kim *et al.* (2011) 의 연구를 참고 할 경우 산호골격의 주요 성분인 CaCO₃로 인해 다른 무기질이 풍부한 재질의 여과재들에 비해 낮은 박테리아 생육효율을 갖고 있지만 실제적으로 수 공간에서의 buffer 작용과 보조여과 측면에서 효과적인 기능을 갖고 있는 것으로 사료된다.

2. live rock이 수질에 미치는 영향

pH의 경우 대조구인 Exp. 4를 제외하고는 Haug and McCarty (1972) 의 연구결과를 참고할 때 폐쇄 사육시스템 내에서의 안정 범위에서 모두 머무르는 결과를 보여 주었다. pH는 안정 범위를 일정 초과하거나 미만이더라도 그것이 폐쇄 시스템내의 균형이 무너짐을 의미하지는 않으며 오히려 pH에 있어서 장기간의 변동 보다는 단기적인 변동이 더 수환경에 영향을 끼치는 것으로 알려져 있다 (Adey and Loveland, 1998; Grguric *et al.*, 2000). 실험기간 동안 작은 수치가긴 하지만 초기 Exp. 2와 3에서 나타나는 pH의 짧은 변동은 live rock에 부착되어 있던 제거되지 않은 생물들의 폐사로 인한 결과로 Jeon *et al.* (1997) 이 폐쇄시스템 내에서 질산화과정이 일어나면 pH가 지속적으로 감소되며 암모니아의 산화가 저해된다고 보고한 것처럼 급격하고 순간적인 pH의 저하는 수질에 민감한 고착성 연체동물 사육시스템을 구축 할 경우나 안정화 기간이 짧은 live rock을 대규모로 사용할 경우 초기 시스템구축 시 위험 요소로 작용하며 이 위험성에 대한 고려가 필요하다고 사료된다.

질소화합물의 경우 Exp. 2와 3이 초기에 Exp. 1과 비교해 급격히 상승한 것은 pH의 경우처럼 수입 후 비록 간단한 안정화 기간을 거쳤지만 이식하는 과정에서 일부 생물의 폐사나 live rock의 틈에서 제거되지 않은 유기물의 일부가 분해를 일으키면서 TAN과 아질산염 농도가 급격히 증가한 것으로 판

단된다. 이러한 급격한 상승이후 live rock 실험 군의 경우 빠르게 안정되고 곧 감소기로 넘어간 것은 dead rock인 Exp. 1이 질화 박테리아의 생육과정이 진행되는 시점에서 live rock으로 구성된 Exp. 2와 3은 이미 서식하던 질화 박테리아에 의해 빠른 분해과정이 진행된 것에 기인하는 것으로 판단되며 dead rock을 이용하는 시스템 구축 시 초기 안정화 기간의 산정에 충분한 여유가 있어야 문제가 발생하지 않을 것으로 사료된다.

live rock의 경우에는 초기 위험 감소를 위해 안정화 기간도 중요하지만 live rock에 부착 되어있거나 이동 과정에서 함께 온 생물의 처리가 초기 투입 시 위험제거를 위해 더욱 중요하다고 판단되며 비슷한 표면적을 갖고 있더라도 live rock에 부착된 생물상에 따라 수질에 더 큰 영향을 끼칠 수 있다고 판단된다. 또한 미처 제거되지 못한 생물의 유입으로 인한 시스템 내 환경교란도 중요한 고려 사항이라 사료된다 (Luckett *et al.*, 1996). 또한 고착성 조류의 영향도 본 실험에서 중요한 질소화합물의 분해요인으로 판단되는데 Yuen *et al.* (2009)의 연구에서 박테리아와 고착성 조류에 의한 질소화합물 분해가 함께 이루어짐으로써 live rock의 효율성이 매우 높다고 보고한 결과와도 일치한다고 사료된다.

두 종류 rock의 질화 박테리아의 안정기 이후 일일 TAN 제거량을 측정 비교해 본 결과 Table 4의 결과와 같이 뚜렷한 분해효율 차이를 나타냈다. dead rock의 경우 일일 TAN 분해량이 $19.60 \pm 2.15 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ 이었고 live rock의 경우 $37.69 \pm 5.26 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ 으로써 Remmerswaal (1993) 과 Jeon *et al.* (1997) 의 여과 시스템과 여과재에 관한 연구 결과를 참고할 경우 dead rock 과 live rock 1 kg 당 일일 TAN 분해율은 산호사나 모래를 이용한 침전식 여과시스템에서의 모래나 산호사 1 L 당 일일 TAN 분해율에 비해 각각 약 10%와 20%의 효율을 갖는 것으로 판단되며 이러한 수치는 본격적인 여과시스템의 효율에 비해 낮은 수치이지만 사육 시스템에서 고착성 연체동물의 부착 도구로 이들 두 종류의 rock들을 이용할 경우 사육수 100리터 당 약 10 kg에서 30 kg 가까이 이용됨으로 두 종류의 rock들이 사육시스템 내에서 충분한 여과효율을 갖는 것으로 판단된다. 즉 전시용 사육 시스템에서 여과재의 양을 총 사육수의 3%에서 5%를 기준할 경우 필요 여과재량에 대해 dead rock의 경우 최대 약 20%, live rock의 경우 약 40% 가까운 여과재 대체효과를 가질 수 있을 것으로 사료된다. 이를 통해 사육시스템 구축 시 여과시스템의 규모를 줄일 수 있으며 시스템 운영 시 좀 더 안정적인 운영과 돌발적인 수질 악화에 보조 여과시스템으로서의 역할을 충분히 할 수 있을 것으로 사료된다.

생물 폐사의 경우 대부분의 발생이 초반부터 중반부에 집중된 것은 초반 Exp. 2와 3에서의 급격한 TAN 농도상승과

Exp. 1에서의 지속적인 TAN 농도증가에 따라 굴이 폐사한 것으로 판단된다. 안정화로 접어들면서 폐사율이 급격히 준 것이 그 예라고 할 수 있다. Exp. 4의 경우에는 질소화합물의 수치가 매우 높게 유지되어 지속적인 폐사가 발생한 것으로 판단된다. 그러므로 live rock과 dead rock 사이에 수치나 전체적인 변화 경향은 큰 차이가 없었지만 초기 박테리아의 생육 차이는 중요한 요소로써 시스템구축 시 초기 안정화 계획은 매우 중요한 사항이라 사료된다.

특히 수질에 민감한 고착성 연체동물을 live rock이나 dead rock에 부착하여 새 사육 시스템에 이식할 경우 이식에 의한 환경 변화에 의해 스트레스를 받아 매우 작은 수질 변화에도 문제가 발생하므로 사육시스템 구축 시 환경 구성 요소의 올바른 선택과 전처리를 통한 수질에 미치는 영향의 최소화는 시스템의 빠른 안정과 생물의 생존을 위한 매우 중요한 요소라고 사료된다. 또한 live rock의 경우 박테리아이외에 부착되어 있는 다양한 생물들에 의한 수질에 대한 영향이 나타나므로 사육시스템에 투입하기 전 live rock의 관리와 상태유지를 위한 treatment system의 운영은 시스템의 안정화를 위해 매우 중요한 고려사항이라 사료된다.

비록 본 연구에서는 이들 두 가지의 산호 골격들에 대한 기초 연구만 수행되었지만 좀 더 다양한 연구들을 통해 dead rock이나 live rock을 고착성 연체동물이나 기타 고착성 무척추동물의 부착 도구로 이용할 경우 부착용 도구로서의 높은 유용성뿐만 아니라 보조 여과 기능이 가능한 매우 좋은 환경 구성요소로써 더욱 효율적인 이용이 가능하다고 사료된다. 그러나 Luckett *et al.* (1996) 과 Calfo (2001) 의 보고처럼 live rock과 dead rock의 무분별한 채집과 이용은 또 다른 환경 파괴 문제로 나타날 수 있으며 인공 dead rock의 개발은 이에 대한 대안으로 중요성을 갖고 있다고 사료된다.

요 약

폐쇄 사육 시스템에서 고착성 무척추동물 특히 연체동물의 부착용 재료로서 이용되고 있는 dead rock과 live rock이 수질에 부가적으로 미치는 영향을 파악하고자 인도네시아로부터 수입된 dead rock과 live rock을 인공해수를 이용한 실험수조에 투입 한 후 수질변화를 관찰하였다. 두 종류의 rock들은 모두 pH 안정에 영향을 주었으며 질소화합물의 분해에도 일정한 영향을 주는 것으로 나타났다. dead rock의 경우 사용 전 충분한 안정화 기간을 거침으로써 부착용 도구로서 뿐만 아니라 훌륭한 보조여과 기능을 담당할 수 있는 것으로 사료된다. live rock의 경우에는 이미 부착되어 서식하고 있는 조류나 박테리아에 의해 dead rock에 비해 더욱 높은 질소화합물 분해 능력을 나타냈으며 초기 투입 시 부착되어 있는 생물의 폐사나 해적생물의 유입에 따른 위험성을 제거 할 경우 사육시

스택 내에서 단순한 부착용 재료로서 뿐만 아니라 다양한 목적에 이용가능 할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 인하대학교 교내 연구비 지원에 의하여 연구 되었습니다.

참고문헌

- Adey, H.W. and Loveland, K. (1998) Dynamic Aquaria: Building Living Ecosystems. second Edition. pp. 123-126, Academic press. Washington
- Allan, G. and Maguire, G.B. (1995) Effect of sediment on growth and acute ammonia toxicity for the school prawn, *Metapenaeus macleayi* (Haswell). *Aquaculture*, **131**: 59-71.
- Brunty, J.L., Bucklin, A., Davis, J., Baird, C.D. and Nordstedt, R.A. (1997) The influence of feed protein intake on tilapia ammonia production. *Aquacultural Engineering*, **16**: 161-166.
- Calfo, A. (2001) Book of Coral Propagation. Volume one. pp. 96-101, Reading Tree Publication. Pennsylvania
- Delbeek, J.C. and Sprung, J. (1994) The Reef Aquarium. A Comprehensive Guide to the Identification and Care of Tropical Marine Invertebrates. vol. 1. pp. 142-147, Ricordea Publishing. Florida
- Green, E. and Shirley, F. (1999) The Global Trade in Corals. WCMC Biodiversity Series, vol. 10. pp. 70, World Conservation Monitoring Centre. Cambridge
- Grguric, G., Wetmore, S.S. and Fournier, R.W. (2000) Biological denitrification in a closed seawater system. *Chemosphere*, **40**: 549-555.
- Haug, R.T. and Mccarty, P. I. (1972) Nitrification with submerged filters. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, **44**: 472-486.
- Jang, I.K., Kim, J.S., Seo, H.C. and Cho, K.J. (2009) Intensive culture of the Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*, under limited water exchange II. indoor post-nursery culture of juvenile shrimp. *Journal of Aquaculture*, **22**(1): 42-50.
- Jeon, I.G., Son, M.H., Jo, J.Y. and Lee, J.M. (1997) Ammonia removal capabilities of several filter media in a seawater recirculating Aquaculture system. *Journal of Aquaculture*, **10**(3): 261-271.
- Ki, D.W., Cho, K.W., Won, S.Y., Song, K.G. and Ahn, K.H. (2010) Characteristics of soil and eco-friendly media for improving the filter ability and water quality in soil filtration. *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, **24**: 453-462.
- Kim, A.R., Kim, H.C., Seo, D.C., Park, J.H., Kim, S.H., Lee, S.T., Jeong, T.U., Choi, J.H., Kim, H.O., Cho, J.S. and Heo, J.S. (2011) Selection of Optimum Filter Media in Small-Scale Livestock Wastewater treatment Apparatus by Natural Purification Method. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, **44**: 285-292.
- Kinzie, R.A., Jokiel, P.L. and York, R. (1984) Effect of light of altered spectral composition on coral zooxanthellae associations and zooxanthellae in vitro. *Marine Biology*, **78**: 239-248.
- Lee, J.Y. and Song, M.J. (1999) The ammonia removal efficiency for some biological filter media. *Fish Science research*, **15**: 1-17.
- Luckett, C., Adey, W.H. and Morrissey, J. (1996) Coral reef mesocosms and microcosms-successes, problems, and the future of laboratory models. *Ecological Engineering*, **6**: 57-72.
- Marsh, J.A. (1970) Primary productivity of reef-building calcareous red algae. *Ecology*, **51**: 255-263.
- Remmerswaal, R.A.M. (1993) Recirculating Aquaculture Systems. INFOFISH Technical Handbook 8. pp. 150, Dutch Aquacultural Engineering. The Netherlands
- Schlacher, T.A., Stark, J. and Fischer, A.B.P. (2007) Evaluation of artificial light regimes and substrate types for aquaria propagation of the staghorn coral *Acropora solitaryensis*. *Aquaculture*, **269**: 278-289.
- Srna, R.F. and Baggaley, A. (1975) Kinetic response of perturbed marine nitrification systems. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, **47**: 472-486.
- Suh, K.H., Kim, B.J. and Jo, J.Y. (2002) Culture of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) in recirculating system. *Journal of Korean Fisheries Society*, **35**(1): 27-34.
- Yap, H.T. (2004) Differential survival of coral transplants on various substrates under elevated water temperatures. *Marine Pollution Bulletin*, **49**: 306-312.
- Yuen, Y.S., Yamazaki, S.S., Nakamura, T., Tokuda, G. and Yamasaki H. (2009) Effects of live rock on the reef-building coral *Acropora digitifera* cultured with high levels of nitrogenous compounds. *Aquacultural Engineering*, **41**: 35-43.