



아쿠아포닉스의 국내 도입가능성에 관한 연구

하헌주 · 정관식†

(주)한국수산식품안전연구소 · †전남대학교)

A Study on the Application of Aquaponics in Korea

Heon-Ju HA · Gwan-Sik JEONG†

(Korea Seafood Safety Institute · †Chonnam National University)

Abstract

Conducting aquaculture while achieving the two objectives of maintaining a natural ecosystem and sustainable aquaculture can only be achieved when a production system with minimal ecological impact on the natural environment is used. aquaponics to achieve this goal can reduce the amount of water used in the aquaculture process and improve the recycling rate of abandoned materials and nutrients. This enables the combined production of a variety of fish and vegetables compatible with environmental sustainability. In this study, we aimed to examine the applicability of Aquaponics to contribute to the sustainability and environmental protection of the Korean aquaculture industry.

The development direction of aquaponics shows two trends that focus on improving RAS technology and recycling nutrients that produce a mixture of fish and agricultural products. Both trends contributed to environmental sustainability. The potential for future breakthroughs in waste production and removal in feed production can further improve the sustainability of fish and agricultural production in aquaponics. In this study, we have studied the changes in the growth of each species, the number of fish, the number of fishes, and the number of breeding, and it has been shown that various wastes(nutrients) derived from fish are a major component explaining the ecological effects of aquaponics. Based on these results, there was no significant difference in the growth of carp in the aquaponics cultivated in Korea, but the growth of lettuce absorbed the nutrients generated in carp cultivation and increased by more than 15% Respectively. Therefore, we expect to be able to utilize aquaponics industrially using various varieties in Korea.

Key words : Aquaponics, RAS, Sustainability aquaculture systems

I. 서론

현대의 수산 양식업은 지속 가능성에 대한 전 세계적인 우려와 관심을 받는 1차 산업 분야 중 하나이다(Martins. 2010). 주 사료 성분으로 사용되는 어분의 생산과 사용에 따른 오염문제(Naylor et al., 2000), 해양 가두리에서 이루어지는 자연환경으로의 무분별한 폐기물 방출(Boyd et al. 2005,

Buschmann et al., 2006)과 같은 환경오염과 관련된 다양한 문제가 제기되고 있다. 이러한 수산 양식업에서 발생하는 환경오염에 대한 우려는 지속가능한 양식(Sustainability aquaculture systems)의 요구를 증대시키고 있으며, 이러한 요구를 충족하기 위한 새로운 생산방법으로 아쿠아포닉스(Aquaponics)가 주목받고 있다.

아쿠아포닉스란 수산양식(Aquaculture)과 농업

† Corresponding author : 061-659-7162, ksjeong@jnu.ac.kr

방식 중 수경재배(Hydroponic)를 융합한 생산시스템으로, 수산양식과정에서 만들어진 사육수 내에 생성되는 각종 무기물질들을 식물이 성장 영양소로 흡수하면서 사육수질정화와 식물성장이 지속적으로 이루어지며 사육수를 계속 재사용하면서 수산양식과 농작물재배를 동시에 실시할 수 있는 생태계 물의 순환을 기반으로 한 유기생산법이다 (FAO, 2014).

어류 양식과정에서 공급하는 사료를 섭취한 어류는 여러 가지 대사활동을 통해 사육수 내로 다양한 무기물질을 배출하며, 이와 같은 사육수 내 용존 유기물들의 지속적인 축적은 사육수의 오염을 야기 시키며, 농도에 따라서 양식 어류에 치명적인 독성을 나타내기도 한다(Kang et al., 1982). 아쿠아포닉스는 양식과정에서 이용된 사육수를 식물에게 공급하여 식물의 뿌리에서 사육수 내에 존재하는 다양한 무기물질들을 영양소로 흡수하는 과정을 통해 사육수 내의 독성 물질들을 정화하게 되는 것이다.

아쿠아포닉스에서 가장 핵심적으로 작용되는 요소는 사육수 내 오염원을 제거 및 정화 처리한 후에 지속적으로 재사용하는 사육수 재순환 양식시스템(RAS)이다(Rosenthal et al., 1986). 양식장으로부터 기인하는 환경 부담을 줄일 수 있는 RAS의 산업적 확산은 높은 초기 자본의 요구 등으로 인해서 더디게 진행되고 있다(Schneider et al., 2006). 이로 인해 투자비용을 충당하기 위하여 높은 입식 밀도와 생산량이 요구되며, 결과적으로 양식 어류의 성장 저하 및 질병발생, 복지문제 등이 발생될 수 있다(Martins et al., 2005). 또한 Russo et al.(1974)에 의하면 RAS는 1일에 총 시설 내 물 수량의 10% 미만을 환수하기 때문에 산소부족과 유기물, 암모니아 등의 무기질소 및 CO₂의 축적 등으로 인하여 수질오염이 지속될 수 있기 때문에 수질 관리를 잘하지 않으면 성장저해, 질병발생 등으로 어류를 건강하게 키울 수 없는 것으로 주장하고 있다. 사육수의 지속적인 사육수의 재사용을 위해서는 양식과정에

서 이루어지는 양식 어류의 대사 작용과 소비되지 않고 남은 사료 등에 의해 발생하는 질산성 질소의 경우 어류에게 독성을 나타내기 때문에 비교적 무해한 질산염으로 산화를 유도하는 생물학적 여과과정이 필수적(Thomas et al., 1988, NRC, 1993)이며, 질산염 역시 농도가 높아지면 pH를 낮추고 어류 성장에도 영향을 주게 되므로 환수(Heinen et al., 1996)와 탈질산화(Van Rijn, 2006) 및 수생 식물 등을 이용하여 농도를 낮추고자 하는 연구들이 계속되고 있다. 하지만 국내 대다수의 육상수조식 양식장은 인근 지하수 및 하천수를 취수하여 사육수로서 사용하고 간단한 침전시설만 거친 후 배출하고 있으며, RAS구조를 가진 일부 양식장의 경우에도 기계적·화학적 작용을 통한 사육수질 개선이 이루어지고 있는 실정이다. 이로 인해 인근 하천 및 지하수의 수질이 악화되고 이 담수를 다시 사육 원수로 사용하고 있어 이들 수괴에서는 부영양화, 녹조, 적조 등의 발생과 이로 인한 피해가 속출하는 등의 악순환이 거듭되고 있다(Lee, 1994, Suh et al., 1997).

이러한 RAS의 단점을 개선하며 지속가능한 어류 및 농작물의 생산을 하기 위한 현대의 아쿠아포닉스 연구들은 아쿠아포닉스를 실시하고자 하는 지역에 따라 경제성이 있고 사회적 공감대가 높은 품종을 선택하고 조합하여 영양학적 분석을 통한 적용가능성을 검토하는 것이 우선되어야 한다(Leonard et al., 2000, 2002, Michaud et al., 2006, 2009, Schreier et al., 2010)고 알려져 있다. 이에 본 연구는 국내 친환경 농수산업의 지속가능성 및 발전을 위한 아쿠아포닉스의 국내 도입가능성을 검토하고자 실시되었다.

II. 재료 및 방법

1. 실험어 및 실험작물

본 연구에 대상 실험어는 충남 공주에 위치한

지수식 양식장에서 사육중인 양식산 잉어 (*Cyprinus carpio* L.) 중 어체중 101.4±17.1g의 개체들을 사용하였다. 실험 작물은 엽채류 품종인 아시아종묘 청하청치마 상추(*Lactuca sativa* L.)를 3x3cm 스펀지 트레이에 파종 하여 2주간 육묘 관리를 실시 한 후 사용하였다.

2. 실험사료

실험 사료는 잉어의 영양소 요구량을 고려한 배합사료를 제작하여 사용하였다(<Table 1>, <Table 2> 참조).

<Table 1> Ingredients composition of the experimental diets

Ingredient	g/100g
White Fish meal(Russia)	53
Soybean meal	12
Wheat flour	27
Feed oil (squid oil)	3
Vitami premix	2
Mineral Premix	2
Coline Chloride	1
Total	100
* Proximate analysis(%)	
Crude Protein	40.73
Crude Lipid	10.51
Crude Ash	8.59

* Dry matter

- 1) Vitamin premix(mg/g mixture) : retinol acetate, 0.81mg; cholecalciferol, 0.012mg; vitamin E, 22.5mg; vitamin K3, 2.5mg, thiamine, 5.5mg; riboflavin, 10mg; pyridoxine, 6mg; niacin, 37.5mg; folic acid, 2mg; biotin 0.05mg; inositol 50mg. All ingredients were diluted with alpha-cellulose to 1g.
- 2) Mineral premix(mg/g mixture) : Mn, 3.2mg; Zn, 3.2mg; Fe, 3.0mg; Cu, 0.36mg; MgSO₄, 100mg; KCl (47%), 60mg; Al(OH)₃, 1.06mg; Ca(IO₃)₂, 0.475mg; CoSO₄, 0.475mg. All ingredients were diluted with alpha-cellulose to 1g.

실험사료로 사용된 단백질 원으로는 백색어분을 사용하였으며, 지질 원으로는 대두분, 탄수화물 원으로는 전분을 사용하였다. 이외에도 Feed

oil(squid oil), Vitamin premix, Mineral Premix, Coline Chloride를 사용하였다.

<Table 2> Nutrient mineral element composition in the experimental diets

Nutrient	ppm
N	70,795
P	13,450
K	3,611
Ca	21,930
Mg	3,181
S	-
Fe	444
Mn	114
Cu	156
Zn	236
Mo	4

3. 수온에 따른 사육수 내 영양소 분석

잉어사육 시 수온에 따른 사육수 내 영양소 변화를 분석하기 위하여 수온 20±1℃ 실험 구와, 25±1℃ 실험 구를 설정하여 각 실험 구에 잉어를 입식한 후 5주 간 실시하였고, 먹이공급은 실험 사료를 이용하여 어체 중의 1%를 5주 동안(2회/일, 사료공급 6일, 절식 1일/주) 실시하였다. 실험 종료 후 사육수 및 전어체, 고행 찌꺼기 등의 무기물질을 분석하여 사육수 내 영양소 분석을 실시하고자 하였다.

4. 아쿠아포닉스 장치 및 생산관리

아쿠아포닉스 장치는 3단 수직형 아쿠아포닉스 시스템을 활용하였다. 1단에는 잉어를 사육하기 위하여 200L 크기의 수조 1개를 설치하였고, 2단과 3단에는 식물 재배조를 각 1개씩 설치하였다. 식물 재배조는 Hydro-ball(3Ø)과 자동주기배수시스템을 적용한 고행 배지경 방식을 적용하여 다단 형으로 구성하였다. 재배조는 0.5m³(100cm x 50cm)크기의 사각 수조를 사용하였고, 광원은 LED(적:청=2:1)와 T5형광등을 복합 적용한 인공광을 자동시간조절기를 이용하여 14시간/일 조사

하였으며, 일평균 5,500lux이상 공급하였다. 사육수는 23±1℃, DO는 5.32±1.63mg/L를 유지하였다.

아쿠아포닉스 생산관리는 총 4주간 3회 반복 실시되었다. 아쿠아포닉스 내 먹이공급은 실험 사료를 어체중의 1%를 4주 동안(2회/일, 사료공급 6일, 절식 1일/주) 실시하였고, 사육수의 수량 보충은 실시하지 않았다.

사육수 내 유기물의 고른 분포를 위하여 수조 내 폭기를 실시하였고, 수중펌프를 활용한 저면 여과방식을 응용하여 사육수 순환을 실시하였다 ([Fig. 1] 참조). 사육 대조구는 같은 구조의 장치에서 수조에 잉어만 투입한 뒤 식물 재배조를 제거하여 실험구와 동일한 환경조건을 유지하여 일반적인 양식방법으로 사육하였으며, 재배 대조구의 경우 실험구와 같은 장치에서 사육수조에 잉어를 투입하지 않고 한국원시표준양액(상추)을 공급하였다.



[Fig. 1] The multistage type of aquaponics system

5. 수질 분석

아쿠아포닉스 내에서의 사육수 변화를 알아보기 위해 일 2회 수온, DO, EC, pH를 측정하였으며, 사육수 내 무기물질 분석은 실험 시작 시부터 종료 시까지 7일 간격으로 총 5회에 걸쳐 실시하였다. 수온 및 DO는 YSI-55기기를 이용한 격막전극법으로 측정하였다. EC는 Hanna HI 98312기기를 이용하여, pH는 pH Meter s20(Mettler toledo, Switzerland)로 측정하였다. 시료의 채취, 보관, 분석은 수질오염공정시험방법 (Ministry of Environment, 2010)에 따라 실시하였다.

6. 무기물질 분석

시료를 Microwave를 이용하여 전처리 후, 무기물질 중 N과 S는 원소분석기(Elemental Analyzer, Thermo Quest EA-1110, Italy)을 사용하였고, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, Mo는 유도결합플라즈마/질량분석기(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer, NexION®300X, USA)를 사용하였다. 무기물질 분석 시 어체 분석은 전어체를 분쇄하여 실시하였고, 침전된 고형 찌꺼기들 또한 수거하여 분석을 실시하였다.

7. 측정항목

어체 측정 항목은 실험 시작 직전과 종료 후에 실시되었으며, 측정 전 24시간 동안 실험어를 절식 시킨 후, 어류전용 진정·마취제(AQUI-S, New Zealand) 200ppm으로 진정시켜 각 실험수조 별 성장지표인 성장률, 사료효율 등의 산출을 위해 전장, 체장, 체고, 체중을 측정하였다.

식물체 측정 항목은 수분함량은 AOAC법(1995)에 따라 상압가열건조방식의 수분측정기(HR 73 halogen moisture analyzer, Switzerland)을 이용해 수분을 측정하였으며, 엽장, 엽폭, 엽수, 엽넓이 등은 農事試驗研究調査基準(Rural Development

Administration, 1974)에 명시된 방법으로 실시하였다.

8. 통계처리

본 연구 결과의 통계처리는 SPSS(SPSS ver. 17) program을 사용하여 Compare means analyze를 실시하였으며, 각 결과별 Descriptive를 분석하였으며, One way ANOVA test를 통하여 평균 간의 유의성을 Duncan's multiple range test(Duncan, 1995)로 검정하였다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

아쿠아포닉스를 구성하는데 있어 다양한 요소 중에서 가장 중요시되는 것이 수온으로 알려져 있다. Rakocy & Hargreaves(1993)에 의하면 어류 양식과정에서 발생하는 다량원소와 미량원소의 용출량 차이가 나타나고, Chughtai(1995)의 연구에 의하면 수온에 따라 농산물의 성장 및 영양소 흡수가 변화하는 현상이 나타나는 것으로 보고되어 있다. 이러한 연구들을 바탕으로 Jones & Benton (1997)나 Simonne et al.(2001) 등은 아쿠아포닉스를 안정화하기 위해서는 수온에 따른 양식 어류의 대사산물 분석을 통하여 사육수 내에 농산물 재배에 필요한 영양소들의 종류 분석과 양적 평가가 우선 되어야 한다고 주장하고 있다. 이에 본 연구에서도 아쿠아포닉스에 적용될 잉어의 사육수를 분석한 결과 수온에 따라 다량원소와 미량원소의 용출량의 차이를 나타내고 있었으며, 농작물 재배에 필요한 주요 영양소는 대부분 포함되어 있었다(<Table 3> 참조). 이는 수온에 따라 사육수 내의 영양소의 양적 변화가 발생되며, 이에 따라 재배할 수 있는 작물의 개수와 밀도의 차이가 발생할 수 있음을 시사한다. 또한, 수온이 높아짐에 따라 사육수 내 P, Ca 및 Mn 등이 증가하는 경향을 나타내었고, Ca, Fe, Cu 및 Zn은 분을 통한 배출이 증가하였다.

<Table 3> Changes in *Cyprinus carpio* L. breeding water nutrient position when the water temperature

Water temp.	20℃			25℃			
	Position	¹ AB	² SE	³ EW	¹ AB	² SE	³ EW
Nutrients (%)	N	14.6	4.3	81.1	13.9	5.3	80.8
	P	57.8	0.1	42.2	49.6	0.1	50.3
	K	52.1	0.8	47.2	55.3	1.0	43.8
	Ca	40.3	38.6	21.1	40.2	31.8	28.0
	Mg	11.3	6.2	82.5	10.5	7.7	81.8
	Fe	1.9	15.2	82.9	1.6	27.2	71.2
	Mn	1.7	82.7	15.6	1.6	77.7	20.7
	Cu	1.2	14.1	84.7	1.0	16.6	82.4
	Zn	18.0	42.9	39.2	17.9	46.4	35.7
	Mo	12.5	0.8	86.7	13.3	1.0	85.8

¹Accumulate in the Body, ²Solid Emissions, ³Elution in Water

이처럼 수온에 따라서 위치에 따른 영양소 분포가 달라짐으로 재배하고자 하는 농작물의 종류에 따라서 영양소의 위치에 따른 이용방법을 적절히 고려해야 할 것이다.

아쿠아포닉스는 식물성장 및 발색, 과육, 당도 등을 결정하는 11대 원소 중 농산물 품종에 따라 양적 변화를 추적하는 것이 중요하다. 엽채류를 대상으로 한 경우 주로 N, P 및 K의 변화에 대해서(Rakocy et al., 1992, 1993, 2004, Gonnella et al., 2004, Daniel C. et al., 2010), 과채류나 화훼류를 대상으로 한 연구에서는 사료 내에 포함되지 않는 경우가 대부분인 S를 제외한 N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn 및 Mo 등 나머지 10개의 원소에 대한 연구보고가 이루어지고 있다 (Seawright et al., 1998, Singh & Uehara, 1999, Choi & Lee, 2001, Prakash et al., 2003, Karimaei et al., 2004). 본 연구는 다양한 농산물에 대한 적용가능성 또한 검토하기 위하여 10가지 원소에 대하여 분석하여 제시하였다.

<Table 4> *Cyprinus carpio* L. growth of a 4 week changes in the aquaponics and general breeding

Growth factor	Start	4 weeks after	
		Aquaponics	General breeding
Total length(mm)	206.1 ±12.1	212.8±14.4a	212.3±10.4a
Body length(mm)	171.9 ±11.4	175.3±11.6a	173.3±10.6a
Body height(mm)	46.5 ±8.7	51.9±3.9a	51.6±2.9a
Body width(mm)	28.7 ±3.9	30.1±2.8a	29.1±2.8a
Total weight(g)	101.4 ±17.1	121.1±22.2a	121.5±8.2a
Disease	No	No	No
SR(%) ¹	100	100a	100a
WG(%) ²	-	19.43a	19.82a
LG(%) ³	-	3.26a	3.01a
SRG ⁴	-	0.82a	0.84a
FI(g) ⁵	-	62.04a	64.69a
FE(%) ⁶	-	31.76a	31.07a

Data are mean±SD. Values with different superscripts are significantly different ($P<0.05$).

¹ Survival rate, ² Weight gain, ³ Leanth gain, ⁴ Specific Growth Rate, ⁵ Feed Intake, ⁶ Feed Efficiency rate

사육방식에 따른 잉어의 성장변화 및 질병 유무를 알아보기 위하여 아쿠아포닉스와 일반적인 사육방법과의 비교를 실시하였고(<Table 4> 참조), 본 연구결과, 잉어의 성장변화 및 질병 유무는 아쿠아포닉스와 관행양식방법과의 차이는 유의적으로 나타나지 않았다($p<0.05$). 재배방식에 따른 청하청치마 상추의 성장변화 및 질병 유무를 알아보기 위하여 아쿠아포닉스와 고품 배지식수경재배와의 비교를 실시한 결과(<Table 5> 참조), 아쿠아포닉스에서의 재배한 청하청치마 상추가 수경재배에 비해 생산량과 직접적인 관련이 있는 엽수, 엽폭, 엽넓이, 엽중량 등이 유의적으로 높게 나타났다($p<0.05$). 엽장과 수분함량의 경우 아쿠아포닉스에서의 상추가 유의적으로 낮게 나타났다($p<0.05$).

<Table 5> *Lactuca sativa* L. growth of a 4 week changes in the aquaponics and hydroponics

Growth factor	Start	4 weeks after	
		Aquaponics (<i>Cyprinus carpio</i> L. + <i>Lactuca sativa</i> L.)	Hydroponic (<i>Lactuca sativa</i> L.)
Leaf number	7.5±0.7	23.2±2.8 ^a	19.5±0.7 ^b
Leaf length (mm)	107.7 ±10.7	250.9±1.6 ^a	261.1±2.0 ^b
Leaf width (mm)	60.2 ±20.7	133.8±0.4 ^a	127.7±6.0 ^b
Leaf area (mm ²)	6,535.7 ±2,578.4	34,004.2 ±964.5 ^a	33,646.5 ±837.9 ^b
Total weight (g)	-	5.5±0.5 ^a	4.9±0.0 ^b
Moisture content (%)	-	89.1±0.4 ^a	92.7±0.3 ^b

Data are mean±SD. Values with different superscripts are significantly different ($P<0.05$).

실험 시작 후 양식용 사료를 공급하면서 생성된 사육수 내 용존 되어 있는 다양한 무기물질들이 청하청치마 상추의 성장 영양소로서의 활용되면서 양적 변화가 종류별로 각각 다르게 나타났다(<Table 6> 참조). NO₂-N과 NH₄-N은 실험 시작 7일 후부터 0.2mg/L 이내로 유지되고 있었으나, NO₃-N의 경우 2주 간격으로 증감 현상을 나타냈으며, 점차적으로 사육수 내에 용존 되어있는 양이 증가하는 추세($y=16.551x+2.953$, $R^2=0.7952$)를 나타내었다. PO₄-P의 경우 실험 시작 후 실험 종료 시까지 0.2mg/L 이내로 유지되고 있었으며, K는 실험 시작 후 2주차까지 증가하다가 3주차부터 용존 양이 감소하는 경향을 나타내었다. Ca는

2주 간격으로 증감 현상을 나타냈으며, 점차적으로 사육수 내에 용존 되어있는 양이 증가하는 추세($y=17.059x+14.717$, $R^2=0.6352$)를 나타내었다. Mg 또한 2주 간격으로 증감현상을 나타냈으나, 점차적인 증가추세($y=3.701x+ 5.413$, $R^2=0.5638$)를 나타내었다.

<Table 6> Changes of nutrients in aquaculture water in aquaponics for 4 weeks combined with *Cyprinus carpio* L. and *Lactuca sativa* L.

Nutrients (mg/L)	Experiment period (Days)				
	Start	7	14	21	28
NO2-N	3.4	0.1	0.2	0.0	0.1
NO3-N	12.2	39.8	70.4	51.6	89.1
NH4-N	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2
PO4-P	0.0	0.1	0.2	0.2	0.1
K	2.5	5.0	7.5	1.9	0.9
Ca	20.3	52.6	95.8	58.0	102.9
Mg	5.7	14.3	24.1	14.3	24.2
Fe	20.0	84.8	71.5	55.7	166.6
Cu	2.3	4.8	4.1	3.7	3.3
Mn	9.0	19.2	76.1	25.6	140.7
Zn	7.6	6.1	6.2	12.1	11.3
Mo	3.6	2.4	0.7	0.5	0.3

Fe의 경우 실험 시작 후 실험 종료 시까지 사육수 내의 용존 양이 꾸준히 증가($y=26.421x+0.445$, $R^2=0.5919$)하는 추세를 나타내었으며, Cu는 실험 시작 후 실험 종료 시 까지 $3.64\pm 0.96\text{mg/L}$ 나타내었다. Mn은 2주 간격으로 증감 현상을 나타냈으며, 점차적으로 사육수 내에 용존 되어있는 양이 증가하는 추세($y=26.982x-26.82$, $R^2=0.6038$)를 나타내었다. Zn은 실험 시작 2주 후 부터 사육수 내 용존 양이 증가하고 있었으며, Mo는 실험 시작 후 감소하는 추세($y=-0.867x+4.101$, $R^2=0.8698$)를 나타내었다.

이와 같은 경향은 다량원소에 비해 미량원소를 적게 활용하는 청하청치마 상추의 성장 특성으로 인한 것으로 판단된다.

IV. 종합 고찰

RAS기반의 현대의 아쿠아포닉스 연구들에서는 아쿠아포닉스 시스템 내 품종과 환경조건에 따른 각종 영양소의 생성과 감소가 전체적인 생산 균형을 유지하는 데에 가장 큰 요소로 작용하는 것으로 보고하고 있다(Leonard et al. 2000, 2002, Gonnella et al. 2004, Wilson et al. 2004, 2006, Michaud et al. 2006, 2009, Martins et al. 2010, Schreier et al. 2010).

본 연구에서 잉어 사육수 내에는 수온에 따라 양적 차이가 있었지만 식물이 필요한 11대 원소 중 S를 제외한 10종류의 무기물들이 모두 용존 되어 있었다. 특히, 용존 양이 가장 많았던 N과 P는 사육수 내에서 농도가 높아질수록 어류에게 독성으로 작용하나(Naegel. 1977, Rakocy. 1989, 1995, Mackay & Tover. 1981), 농산물이 성장하는데 필수 영양소로 이용되고, 양적으로도 가장 많이 요구하기 때문에 어류사육 과정에서 가장 많이 발생하는 N과 P의 생성과 감소에 대한 분석 결과를 활용한다면 이를 이용한 아쿠아포닉스에서의 지속적인 농산물의 생산, 특히, 업체류의 대량 생산을 도모할 수 있다.

아쿠아포닉스에서는 고밀도의 양식을 실시하기 어렵기 때문에 수산양식분야만 놓고 본다면 생산 효율이 떨어질 수도 있다. 그러나 관행의 양식보다 성장도가 낮지 않으며, 생물복지와 지속적인 자연친화적 수질정화를 통해 건강한 양식 수산물을 지속적으로 획득할 수 있다는 장점이 있다(Graves CJ. 1993, Morin, R. 2004). Morin, R. (2004)과 Banas et al.(2008) 등의 연구에 따르면 아쿠아포닉스의 부족한 생산력과 경제성은 복합적으로 실시하는 농산물 재배, 특히 업체류를 재

배하면서 상쇄할 수 있다고 주장하고 있다. 본 연구에서도 어류의 성장도의 경우 잉어만 사육했을 때와 전장 및 체장, 체중 등의 성장지표의 유의적인 차이를 보이지 않았다($P < 0.05$). 그러나 재배 농작물이었던 청하청치마 상추는 수경재배 시보다 아쿠아포닉스에서 엽수는 17%, 엽중량은 12%이상 증가하여 일반적인 수경재배를 통한 방식보다 유의적으로($p < 0.05$) 높은 생산력을 나타내었다. 이러한 결과는 엽채류의 경우 수경재배에 비해 아쿠아포닉스를 이용하여 재배하였을 경우 엽수 및 엽중량이 증가하기 때문에 아쿠아포닉스의 경제성 확보를 위해서는 엽채류가 가장 적합하다는 보고된 연구결과들(Knight & Mitchell, 1983, Karimaei et al., 2004)과 유사한 것으로 판단된다.

아쿠아포닉스에 국내산 품종을 적용한 본 연구에서 품종별 생산력이 동종 산업분야와 비교하였을 때 비슷하거나 유의적으로 높은 결과를 나타낸 것으로 보아 국내에서도 아쿠아포닉스의 지속 가능한 생산의 장점을 유지하면서 충분히 산업적으로 도입하여 활용할 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다. 추후에도 국내에서 사육 및 재배가 가능한 다양한 품종들을 이용한 아쿠아포닉스와 국내 실정에 알맞은 형태의 시설 및 관리기술의 개발 등이 지속적으로 연구되어야 할 것이다.

References

- Banas, D · Masson, G · Leglize, L · Usseglio-Polatera, P. & Boyd, C. E.(2008). Assessment of sediment concentration and nutrient loads in effluents drained from extensively managed fish ponds in France, *Environmental Pollution* 152(3), 679~685.
- Boyd, C. E. · McNevin, A. A. · Clay, J. & Johnson, H. M.(2005). Certification issues for some common aquaculture species, *Rev. Fish. Sci.* 13, 231~279.
- Buschmann, A. H. · Riquelme, V. A. · Hernandez-Gonzalez, M. C. · Varela, D. · Jimenez, J. E. · Henriquez, L. A. · Vergara, P. A. · Guiñez, R. & Filun, L.(2006). A review of the impacts of salmonid farming on marine coastal ecosystems in the southeast Pacific, *ICES J. Mar. Sci.* 63, 1338~1345.
- Martins, C. I. M. · Eding, E. H. · Verdegem, M. C. J. · Heinsbroek, L. T. N. · Schneider, O. · Blancheton, J. P. · Roque d'Orbcastel, E. & Verreth, J. A. J.(2010). New developments in recirculating aquaculture systems in Europe : A perspective on environmental sustainability, *Aquacultural Engineering* 43, 83.
- Choi, K. Y. & Lee, Y. B.(2001). Effect of salinity of nutrient solution on growth, trans location and accumulation of Ca in butterhead lettuce, *Acta Horticulture(ISHS)* 548, 575~580.
- Chughtai, M. A.(1995). Effect of water spinach (*Ipomoea aquatica*) on nutrient regime and fish growth, MSc Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, 70.
- Daniel C. Sikawa & Amararatne Yakupitiyage(2010), The hydroponic production of lettuce(*Lactuca sativa L*) by using hybrid catfish(*Clarias macrocephalus* × *C.gariepinus*) pond water : Potentials and constraints, *Agricultural Water Management* 97, 1317~1325.
- FAO(2014), Fisheries and aquaculture technical paper, Small-scale aquaponic food production.
- Gonnella, M. · Serio, F. · Conversa, G. & Santamaria, P.(2004). Production and nitrate content in lamb's lettuce grown in floating system, *Acta Horticulture (ISHS)* 644, 61~68.
- Graves, C. J.(1993). The nutrient film technique, *Horticult Rev.* 5, 1~4.
- Heinen, J. M. · Hankins, J. A. & Adler, P. R.(1996) Water quality and waste production in a recirculating trout - culture system with feeding of a higher-energy or a lower energy diet, *Aquacult. Res.* 27, 699~710.
- Jones, J. & Benton, J(1997). Hydroponics, A practical Guide for the Soilless Grower, Boca Raton, St Lucie Press, Florida.
- Karimaei, M. S. · Massiha, S. & Mogaddam, M.(2004). Comparison of two nutrient Solutions : effect on growth and nutrient levels of Lettuce, *Lactuca sativa L. cultivars*, *Acta Horticulture(ISHS)* 644, 69~76.
- Khang, Seok-joong and In-Bae Kim(1982) The

- Growth of Tilapia in a Closed Water Recirculating System without Filter Bed, *kfas*, vol. 15, January, No.1, 47~51.
- Knight, S. L. & Mitchell, C. A.(1983). Enhancement of lettuce yield by manipulation of light and nitrogen nutrition, *Hort Science* 108, 750~754.
- Lee, Jong-Sup(1994). Hydraulic studies on recirculating aquaculture basin, *Journal of the Korean Fisheries Society*, Vol.27(2).
- Leonard, N. · Blancheton, J. P. & Guiraud, J. P.(2000). Populations of heterotrophic bacteria in an experimental recirculating aquaculture system. *Aquacult. Eng.* 22.
- Mackay, K. P. & Tover, W.(1981). An ecological approaches to water re-circulating for salmonids : preliminary experience. *Bioengineering Symp. For Fish Culture*, FCS Publication, vol. 1, 249~258.
- Martins, C. I. M. · Eding, E. H. · Schneider, O. · Rasmussen, R. · Olesen, B. · Plesner, L. & Verreth, J. A. J.(2005). Recirculation aquaculture systems in Europe, *Consensus. Oostende, Belgium, Consensus Working Group. Eur. Aquacult. Soc.* 31.
- Michaud, L. · Blancheton, J. P. · Bruni, V. & Piedrahita, R.(2006). Effect of particulate organic carbon on heterotrophic bacterial populations and nitrification efficiency in biological filters., *Aquacult. Eng.* 34, 224~233.
- Michaud, L. · Lo Giudice, A. · Troussellier, M. · Smedile, F. · Bruni, V. & Blancheton, J. P.(2009). Phylogenetic characterization of the heterotrophic bacterial communities inhabiting a marine recirculating aquaculture system, *J. Appl. Microbiol.* 107, 1935~1946.
- Morin, R.(2004). La production piscicole au Quebec. Document d'information, *Ministere de l'Agriculture, des Pecheries et de l'Alimentation, Quebec.*
- Naegel, L. C. A.(1977). Combined production of fish and plants in recirculating water, *Aquaculture* 10, 17~24.
- Naylor, R. L. · Goldburg, R. J. · Primavera, J. H. · Kautsky, N. · Beveridge, M. C. M. · Clay, J. · Folke, C. · Lubchenco, J. · Mooney, H. & Troell, M.(2000). Effect of aquaculture on world fish supplies, *Nature* 405, 1017~1024.
- NRC(1993). *Nutrient Requirements of Fish*, National Academy Press, Washington, DC, 114.
- Prakash, B. · Veeregowda, B. & Krishnappa, G.(2003). Biofilms : a survival strategy of bacteria, *Current Science* 85, 1299~1307.
- Rakocy, J. E.(1989). Hydroponic lettuce production in a recirculating fish culture system, *Univ. Virgin Islands Agric. Exp. Station, Island Perspect* 3, 4~10.
- Rakocy, J. E. · Losordo, T. M. & Masser, M.(1992). *Recirculating Aquaculture Tank Production Systems; Integrating Fish and Plant Culture*, SRAC Publ. No. 454. Southern Regional Aquaculture Center, 7.
- Rakocy, J. E. & Hargreaves, J. A.(1993). Integration of vegetable hydroponics with fish culture: A Review. In: Wang, J.K.(Ed.), *Techniques for Modern Aquaculture*, American Society of Agricultural Engineers, Michigan, USA, 112~136.
- Rakocy, J. E.(1995). The roles of plant crop production in aquacultural waste water. *Aquacultural Engineering and waste management, proceedings from the aquaculture Expo VIII and Aquaculture in the Mid-Atlantic Conference*, Washington, DC. June 24~28.
- Rakocy, J. E. · Shultz, R. C. · Bailey, D. S. & Thoman, E. S.(2004). Aquaponic production of tilapia and basil : comparing a batch and staggered cropping system, *Acta Horticulture(ISHS)* 648, 63~69.
- Rosenthal, H. · Castell, J. D. · Chiba, K. · Forster, J. R. M. · Hilge, V. · Hogendoorn, H. · Mayo, R. D. · Muir, J. F. · Murray, K. R. · Petit, J. · Wedemeyer, G. A. · Wheaton, F. & Wickins, J.(1986). Flow - through and recirculation systems, *EIFAC*, 100.
- Russo. R. C. · Smith, C. E. & Thurston, R. V.(1974). Acute toxicity of nitrite to rainbow trout(*Salmo gairdneri*), *J.Fish. Res Bd. Can.* 31, 1653~1655.
- Schneider, O. · Blancheton, J. P. · Varadi, L. · Eding, E. H. & Verreth, J. A. J.(2006). Cost price and production strategies in European recirculation systems. *Linking Tradition & Technology Highest Quality for the Consumer*. WAS, Firenze, Italy.
- Schneider, O. · Schram, E. · Poelman, M. · Rothuis, A. · Van Duijn, A. & Van der Mheen, H. (2010). *Practices in managing finfish aquaculture using ras technologies, the dutch example*. OECD Workshop on Advancing the Aquaculture Agenda, OECD,

- Paris, France.
- Seawright, D. E. · Stickney, R. R. & Walker, R. B.(1998). Nutrient dynamics in integrated aquaculture - hydroponics systems, *Aquaculture*. 160, 215~237.
- Simonne, E. · Somonne, A. & Wells, L.(2001). Nitrogen source affects crunchiness, but not lettuce yield. *Journal of Plant Nutrition*, 24, 743~751.
- Singh, P. & Uehara, G.(1999). Electrochemistry of the double layer : principles and application to soils. In: Sparks, D.L.(Ed.), *Soil Physical Chemistry*, CRS Press, 1~6.
- Suh, Kuen-Hack · Kim, Byong-Jin · Bong, Se-Hwan · Lim, Jun-heok · Kim, Yang-Ha & Kim, Sung-Koo (2000), The removal of aquaculture wastes by foam separator from sea water I. the effect of initial protein concentration, *journal of the korean institute of chemical engineers*, vol. 38, 5.
- Thomas, S. L. & R. H. Piedrahita(1998). Apparent ammonia-nitrogen production rates of white sturgeon(*Acipenser transmontanus*) in commercial aquaculture system, *Aquacult. Eng.* 17, 45~55.
- Van Rijn, J. · Tal, Y. & Schreier, H. J.(2006). Denitrification in recirculating systems : theory and applications, *Aquacult. Eng.* 34, 364~376.
- Wilson A, Lennard, & Brian V. Leonard(2006). A comparison of three different hydroponic sub-systems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in an Aquaponic test system, *Aquacult Int.* 14, 539~550.
-
- Received : 31 May, 2017
 - Revised : 15 June, 2017
 - Accepted : 20 June, 2017