# 사료 내 일인산칼륨(MKP) 수준이 Hybrid 바이오플락(BFT) 아쿠아포닉 시스템 내 메기(Silurus asotus) 및 엽채류 4종의 생산성과 수질변화에 미치는 영향

이동훈 · 김진영1 · 임성률 · 김달영 · 김주민2 · 신승준3 · 김정대3\*

경기도해양수산자원연구소, 1경기도농업기술원, 2세븐필라, 3강원대학교

# Effect of Dietary Monobasic Potassium Phosphate Levels on Water Quality and the Growth of Far Eastern Catfish Silurus asotus and Four Leafy Vegetables in a Hybrid Biofloc Technology Aquaponic System

Dong-Hoon Lee, Jin-Young Kim<sup>1</sup>, Seong-Ryul Lim, Dal-Young Kim, Joo-Min Kim<sup>2</sup>, Seung-Jun Shin<sup>3</sup> and Jeong-Dae Kim3\*

Gyeonggi Province Maritime and Fisheries Research Institute, Yangpyeong 12513, Korea

<sup>1</sup>Gyeonggi-do Agricultural Research and Extension Services, Hwaseong 18274, Korea

This study investigated the effects of dietary monobasic potassium phosphate (MKP) on the growth of the far eastern catfish Silurus asotus and four leafy vegetables in a hybrid biofloc technology aquaponic system. To an experimental diet containing 45% protein and 7% lipid, 1, 2, 3 or 4% MKP was added and was designated as MKP1, MKP2, MKP3, and MKP4, respectively. The optimum MKP levels were determined for the growth of fish and four leafy vegetables over 10 weeks. After the 10-week feeding trial, weight gain, feed efficiency, specific growth rate and protein efficiency ratio were higher in the fish groups fed MKP2 and MKP3 than in the other groups (P<0.05). The growth of the four leafy vegetables was also higher in the fish groups fed MKP2 and MKP3. Water quality [dissolved oxygen, pH, water temperature, electrical conductivity, turbidity, total ammonia nitrogen (TAN), NO,-N, NO,-N and PO,-P] was measured six times a week using a portable water quality meter and reagent measurements. The TAN (4.58-20.40 mg/L), NO<sub>3</sub>-N (24.12-52.40 mg/L) and PO<sub>4</sub>-P (20.38-48.48 mg/L) levels increased with time, while the NO<sub>2</sub>-N level remained below 0.1 mg/L throughout the study.

Key words: Silurus asotus, Monobasic potassium phosphate (MKP), Aquaponics, Vegetables, Hybrid biofloc technology (HBT)

#### 서 론

최근 어업에 의한 수산물 생산이 정체되고 있으나, 수산물 에 대한 국내·외 수요는 증대되고 있어 양식에 의한 대체 충족 이 필요하다. 또한 물의 희소성 증대와 영양염 및 오염 물질에 대한 환경의 수용능력 저감으로 엄격한 규제가 적용되고 있다 (NIFS, 2013). 이러한 환경에서 수산양식업에서 발생되는 환경

오염 문제와 양식 생산물의 식품 안전성 확보를 위한 생산 방법 으로 아쿠아포닉스(aquaponics)가 주목 받고 있다. 현재까지 수 산양식에서 사육수의 재순환을 통한 양식방법으로 RAS (recirculating aquaculture system)와 BFT (biofloc technology)가 대 표적이다(FAO, 1986; Avnimelech et al., 2015).

BFT 양식은 국내에서 2000년대 도입된 사육수의 재순환 양 식방법으로 양어장 내 수산생물에 의해 발생되는 오염물 중 하

\*Corresponding author: Tel: +82. 33. 250. 8634 Fax: +82. 33. 259. 5572

E-mail address: menzang@gmail.com

provided the original work is properly cited.



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial Licens (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium,

https://doi.org/10.5657/KFAS.2019.0159

Korean J Fish Aquat Sci 52(2), 159-172, April 2019

Received 2 January 2019; Revised 25 January 2019; Accepted 3 February 2019 저자 직위: 이동훈(연구사), 김진영(연구관), 임성률(연구사), 김달영(연구사), 김주인(대표이사), 신승준(연구원), 김정대(교수)

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Seven Pillars, Dangjin 31778, Korea

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>College of Animal Life Sciences, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

나인 NH,-N을 유기탄소(당밀, 포도당 등)의 사용(C:N비 조절) 을 통해 미생물을 증식시키고 미생물총(biofloc) 형성을 유도 한 후, 이를 수산생물(어류, 갑각류)이 다시 섭식하게 함으로 써 지속적으로 수질을 유지하는 기술이다. 또한 biofloc 형성 에는 광물질화, 질산화, 탈질화, 광합성화에 관여하는 미생물 을 포함하여, 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 생물사체, 사료찌꺼 기 등 다양한 생물적 요소들이 복합적으로 관여한다고 알려져 있다(Avnimelech et al., 2015). 현재까지 국내 순환여과식양식 (RAS)은 완전히 물을 재사용하는 것이 아니라 하루에 전체 순 화수의 10% 이하가 환수되고 보충되는 것이 일반적이다(Suh et al., 2001). Russo et al. (1981)은 RAS 생산방법은 용존산소 (dissolved oxygen, DO) 부족, 유기물 증가, NH,-N 등의 무기 질소 및 CO,의 축적 등에 의해 어류의 성장저해 및 질병발생 등의 문제가 야기될 수 있어 수질관리의 중요성을 언급하였고, RAS는 고형물과 NH,-N의 제거를 위해 여러 장치(침전조, 여 과기, 회전원판접촉기, 충전층 반응기, 유동층 반응기, 포말분 리기, 자외선살균기 등)가 필요한 것으로 알려져 있다(Losordo et al., 1994; Reyes and Lawson, 1995). 그러나, Scheider et al. (2006)의 보고에 의하면 RAS는 초기 자본의 투자가 높아 산업 적 확대의 진행이 느리다고 하였고, 이러한 이유로 국내 내수 면 육상수조식 양식에서는 유수식 양식방법에 의한 시설이 많 은 편으로 인근 하천수 및 지하수를 취수하여 사육수로 사용하 고 간단한 침전시설을 거쳐 배출되는 형태로 경영되고 있으며, RAS 시스템을 구축한 양식장은 뱀장어와 같은 고가의 어류양 식에 제한되고 있다.

아쿠아포닉스는 어업의 수산양식(aquaculture)과 농업의 수 경재배(hydroponics)가 결합된 복합재배 시스템으로, 수산양 식 생물의 성장과 생존을 위해 공급된 먹이(사료)가 종속 및 독 립영양미생물(heterotrophic and autotrophic microorganisms) 에 의해 각종 무기물과 질산염으로 분해 및 생성된 것을 식물이 성장 영양소로 흡수하면서 양어수질의 안정화와 식물성장을 이 루어지게 하여 사육수의 교환 없이 지속적으로 농·수산물을 생 산할 수 있는 친환경 생산방법이다(FAO, 2014). 어류 등 수산 생물이 섭취한 사료의 30%는 체내 동화되고 나머지 70%는 체 외로 배출되며, 미섭취된 사료는 양어 수조 내 잔류하게 된다 (Emerenciano et al., 2017). 아쿠아포닉스에서 식물생산을 위 해 제공되는 양어사료는 식물이 필요로 하는 13종류 영양소(N, P, K, S, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, B, Mo, Al) 중 10종류는 식물 이 성장할 수 있는 적정량을 제공하나, Ca, K, Fe는 아쿠아포닉 스 시스템 내에서 매우 부족할 정도로 존재하여 인위적으로 추 가 되어야 함을 보고 하였다(Rakocy, 2007). Bittsanszky et al. (2016)는 앞서 언급한 3종류 영양소 외 P 또한 너무 부족한 것 으로 보고하였고, 특히 K가 최대 부족한 영양소라 하였다. 인 (P)은 동물이나 식물의 성장, 번식 그리고 건강에 관련된 정상 적인 생명현상 유지를 위한 필수 영양소의 하나이다. 인은 인산 염의 형태로 호흡, 광합성, 근수축, 세포분할, 유전정보의 전달,

발효와 같은 근본적인 생화학 반응에 있어 중요한 역할을 한다 (Lall, 1991). 육상동물뿐 아니라 수중동물들은 동·식물성 원료 내 인을 효율적으로 이용할 수가 없기 때문에 그들의 최대 성장을 위해 일인산칼슘(monocalcium phosphate, MCP), 이인산 칼슘(dicalcium phosphate, DCP) 또는 삼인산칼슘(tricalcium phosphate, TCP)과 같은 인산 공급제가 사료에 첨가된다(Kim et al., 1998). 인회석(phosphate rock)이나 동물의 뼈에서 발견되는 TCP는 강산에만 녹는 관계로 위가 없는 잉어의 경우 이용성이 어려우나 송어의 경우 이용성이 높다(Ogino et al., 1979). 현재 국내에 판매되고 있는 상업용 배합사료는 어종에 따라 인첨가제(MCP, DCP 및 TCP)를 다양하게 혼합하여 제조하고 있다.

전세계적으로 보편화된 UVI (university of virgin islands) 아 쿠아포닉스 시스템에서도 식물성장을 위해서는 앞에서 언급한 부족한 영양소를 인위적으로 첨가하도록 제안하고 있다(Rakocy et al., 2006; Bailey and Ferrarezi, 2017). 이러한 UVI 아쿠아포닉스 시스템은 양식의 RAS 생산방법에 수경재배지를 결합한 것으로 시설비 문제와 시스템 운영의 복잡성을 가지고 있다. 본 연구의 목적은 아쿠아포닉스 생산의 효율성 증대를 위해 어류양식에 사용되는 배합사료 만으로 식물에 공급하는 영양소를 충당할 수 있도록 기존 상업용 사료에 사용되는 인 제재를 일인산칼륨(monobasic potassium phosphate, MKP)으로 대체하고, 더불어 종속 및 독립영양미생물이 혼합된 유용미생물을 활용한 hybrid BFT 생산 방식을 적용하여 현재의 시스템을 단순화하는 방향을 제시하고자 하였다.

# 재료 및 방법

# 실험사료의 제조

실험에 사용된 4종류의 사료는 조단백질 함량이 45%, 조지방 함량이 7% 전후가 되도록 실험사료를 설계하였으며, 인 공급원으로 MKP를 각 1, 2, 3 및 4% 첨가하여 사료 내 P와 K 함량이 증가하도록 하였다(Table 1). 설계된 실험사료는 사조동아원㈜당진사료공장(충청남도 당진시)에서 직경 6 mm 내외 부상 EP (extruded pellet) 사료로 제작하였으며, 시판되는 상업용 배합사료와 같은 20 kg 단위로 포장 후 냉동(-20℃)보관하여 실험에 사용하였다.

#### 아쿠아포닉 시스템 설치

아쿠아포닉스 생산을 위한 실험 시스템은 Fig. 1와 같이 1개 시험구별 어류 사육수조(L 1.5 m×W 1.5 m×H 0.6 m) 2개, 식물베드(L 1.5 m×W 1.5 m×H 0.1 m) 2개, 펌프(0.5 HP) 1개 및 바이오헬릭스 여과기(Isan M Tech. Ltd., Korea) 1개로 구성되었으며, 4개조의 시험구가 야외에 설치되었다. 산소공급을 위해 에어공급관을 설치하여 6개의 유니분산기(30 cm)를 사용하였고, 식물베드지에 2개, 어류 사육지 4개로 분리하여 사용



Fig. 1. Compartments of the experimental design (left). (A) two vegetable beds(L  $1.5 \times W 1.5 \text{ m} \times H 0.6 \text{ m}$  per bed), (B) two fish rearing tanks(L  $1.5 \text{ m} \times W 1.5 \text{ m} \times H 0.6 \text{ m}$  per tank), (C) sump tank, (D) pump (0.5HP), (E) biohelix filter tank (80 L). Water flow, (A) $\rightarrow$ (B) $\rightarrow$ (C) $\rightarrow$ (D) $\rightarrow$ (E) $\rightarrow$ (A). Four experimental groups were composed of two replicates each (right).

Table 1. Ingredient composition of the experimental diets

Ingredient	MKP1	MKP2	MKP3	MKP4
Fish meal	37.00	37.00	37.00	37.00
Wheat flour	24.20	23.20	22.20	21.20
Soybean meal	15.00	15.00	15.00	15.00
Corn gluten meal	10.00	10.00	10.00	10.00
Blood meal	5.00	5.00	5.00	5.00
Fish oil	4.80	4.80	4.80	4.80
Dried yeast	1.00	1.00	1.00	1.00
MKP <sup>1</sup>	1.00	2.00	3.00	4.00
Vitamin. mix <sup>2</sup>	0.50	0.50	0.50	0.50
Methionine 100%	0.22	0.22	0.22	0.22
Salt	0.20	0.20	0.20	0.20
Choline-liquid (50%)	0.20	0.20	0.20	0.20
Taurine	0.20	0.20	0.20	0.20
Mineral. mix <sup>3</sup>	0.10	0.10	0.10	0.10
Antioxidant	0.05	0.05	0.05	0.05
Stay C	0.03	0.03	0.03	0.03
KCI	0.50	0.50	0.50	0.50

 $^{1}$ MKP, Monobasic potassium phosphate.  $^{2}$ Vitamin added to supply the following (per kg diet): vitamin A, 22,000 IU; vitamin D<sub>3</sub>, 4,400 IU; vitamin E, 320 IU; vitamin K<sub>3</sub>, 24 mg; thiamine HCl, 50 mg; riboflavin, 60 mg; D-Ca pantothenate, 120 mg; biotin, 2 mg; folic acid, 20 mg; vitamin B<sub>12</sub>, 100 mg; niacin, 300 mg; pyridoxine HCl, 30 mg; inositol, 600 mg; ethoxyquin, 67 mg.  $^{3}$ Mineral added to supply the following (per kg diet): copper sulfate (25.4% Cu), 10 mg; zinc sulfate (22.7% Zn), 60 mg; manganous sulfate (32.5% Mn), 50 mg; magnesium sulfate (24.3% Mg), cobalt chloride (24.8% Co), 2 mg; potassium iodide (76.4% I), 2.0 mg; sodium selenite (45.6% Se), 0.75 mg.

하였다. 시스템 내 사육수는 직경(외경) 50 mm PVC관을 통해 어류사육수조, 섬프수조와 여과기를 거쳐 직경(외경) 25 mm PVC관을 통해 식물베드지로 유입된 후 다시 어류 사육지로 순환되도록 하였다. 또한, 우천 시 대비하여 식물베드 위에 광이잘 투과되는 비닐을 설치하여 실험기간 동안 유지하였다.

### 실험사료의 성분분석

실험사료 4종의 수분(moisture), 조단백질(crude protein), 조 지방(crude lipid), 조회분(crude ash), 조섬유(crude fiber), Mg, Fe, Cu, Mn, Zn, K, Ca 및 P 성분분석은 부경대학교 사료영양 연구소에 의뢰하여 분석하였다.

#### 아쿠아포닉스 생산성 비교 시험

실험에 사용된 메기는 경기도에 위치한 세종수산(여주시)에서 1,000마리를 구입한 후, 150-210 g의 개체 480마리를 선별하여 사용하였다. 본 사육실험에 앞서 어류들은 제작된 MKP2 사료에 적응되었으며, 실험 전 24 h 절식한 후 어류의 체중 측정이 수행되었다. 어체 측정은 개별 측정하였으며, 2반복 4개시험구 8개 수조에 평균 186 g 내외 개체 60마리가 각각 수용되었다. 사료공급은 미섭취 사료에 의한 식물생산성의 오차 배제를 위해 어체중 당 0.5%로 제한하여 1일 2회 공급하였다. 실험은 10주간 진행되었으나 엽채류는 어류의 사료 적용 6주 후입식되어, 10주간의 어류성장 실험과 4주간의 엽채류 성장 시험이 진행되었다. 실험에 사용된 엽채류는 상추 4 품종 롤로로사(Lollo-rossa), 아바타(Avatar), 카이피라(Caipira), 흑로메인(Heuk-Romaine)이었으며, 경기도농업기술원 육묘용 온실에서 육묘한 개체를 입식하여 사용하였고, 각 시험구별 4종 엽채류 96개체가 사용되었다.

#### 시료측정

실험어의 사료절식 24 h 후, 어체중 측정은 어류마취제인 MS-222 (Wojin B&G Ltd., Korea)로 마취시킨 후 개별 무게로 측정하였다. 4종류의 엽채류는 각각 엽수, 엽중량, 뿌리, 엽체길이를 세분화하여 측정하였다.

#### 어체분석

실험에서 MKP의 사료 내 첨가가 어체의 성분변화에 어떠한 영향을 미치는지에 대해 알아보기 위해 실험 전 최초 메기 샘플 과 실험 후 샘플을 부경대학교 사료영양연구소에 분석 의뢰하 였다. 2마리를 1개 샘플로 하여 각 시험구 당 6점의 샘플을 분석 하여 결과에 사용하였다.

#### 수질관리

유용미생물 10종(Bacillus subtilis, B. amuloliquefaciens, B. licheniformis, Cellumomona sp., Cellulomanas biazotea, Pseudomonas stutzeri, P. denitrificans, Rhodopseudomonas palustris, Nitrobacter winogradskyi 및 Nitrosomonas europaea)의 혼합 시판 제품 BFT-ST (EgeeTech, Ltd., USA)를 활 용한 hybrid BFT 아쿠아포닉스 생산 수질관리는 어류입식 후 14일간은 Emerenciano et al. (2017)의 방법에 준하여 사료 공 급과 함께 유기탄소원인 정제 포도당을 계산하여 혼합미생물 과 함께 아쿠아포닉스 시스템 내 섬프수조에 투입한 후 BFT 양식방법을 적용하여 수질을 유지하였다. 이후 유기탄소의 공 급은 중단하고 무기탄소원으로 이산화탄소(탄산가스)를 pH가 6.0이하로 떨어질 때까지 지속적으로 사육수조에 투입하였다 (12톤 수량 기준 판매되는 탄산가스 1통을 10일간 사용). 2-3 일 간격으로 유용 미생물을 투입하였으나, pH 6.0 이하부터는 NO,-N이 증가할 때 유용미생물을 투입하였고, 안정적인 수질 유지 시 중단하였다.

#### 수질분석

수질측정은 1주 6회 용존산소(DO, mg/L), pH, 수온(℃), 전기전도도(electrical conductivity, EC; µs/cm), 탁도(NTU), TAN mg/L, NO₂-N mg/L, NO₃-N mg/L와 PO₄-P mg/L를 측정하였다. DO, pH, 수온, EC와 탁도는 현장 수질측정기인 YSI PRODSS (YSI Inc., USA)를 사용하였고, TAN, NO₂-N, NO₃-N와 PO₄-P는 분석시약(NitraVer®X Reagent Set 2605345-KR, Low Range Ammonia Reagent Set 2604545-KR, NitriVer®3 Reagent Set 2608345-KR, PhosVer®3 Phosphater Reagent, HACH Ltd., USA)과 다목적 수질측정기인 DR5000 (HACH Ltd., USA)을 이용한 비색법으로 분석하였다. 또한 식물생산 4주 실험 종료 후, 각 시험구의 미량원소인 K (mg/L), Ca (mg/L), Mg (mg/L), Na (mg/L), Fe (mg/L), Zn (mg/L), Mn (mg/L) 및 Cu (mg/L)는 유도결합플라즈마 분광광도계(ICP-OES Optima 8300, Perkin Elmer Co., USA)로, Cl

(mg/L) 및  $SO_4$  (mg/L)는 이온크로마토그래피 $(930\ Comact\ IC\ Flex,\ Metrohm\ Co.,\ USA)를 사용하여 분석하였다.$ 

#### 혈액분석

10주간 어류 사육실험 종료 후, 일인산칼륨(Monobasic potassium phosphate, MKP)이 첨가된 4개 시험구의 메기 혈액성 상 변화 조사를 위해 24 h 사료절식이 이루어졌다. 이 후 어류 마취제인 MS-222 (Wojin B&G Ltd., Korea)로 마취시킨 다음 헤파린(Heparin sodium salt from porcine intestinal mucosa, K3333-10KU, Sigma-Aldrich., Germany)을 처리한 1 cc 주사 기를 사용하여 미부정맥에서 시험구 별 6마리의 혈액을 샘플링 하였다. 전혈은 Hemoglobin (Hb, g/dL)과 PCV (Hematocrit, %) 분석에 사용하였고, 이 후 4℃, 12,000 rpm, 10 min의 조 건이 설정된 원심분리기(Centrifuge 5415 R, Eppendorf Ltd., Germany)를 이용하여 혈장(plasma) 분리 후 glutamic oxaloacetic transaminase (GOT, U/L), glutamic pyruvic transaminase (GPT, U/L), glucose (GLU, mg/dL), inorganic phosphorus (Pi, mg/dL), Na (mEq/L), K (mEq/L)와 Cl (mEq/L)을 분 석하였다. PCV는 HAEMATOKRIT 210 (Hettich Ltd., Germany)을 이용하여 분석하였으며, Hb 등 다른 혈액 요소는 시판 되는 임상진단키트(Fuji DRI-CHEM slide, Fuji photo film co. Ltd., Japan)와 함께 혈액분석기(DRI-CHEM 3500 I, Fujifilm Ltd., Japan)를 이용하여 분석하였다.

#### 통계처리

어류의 성장실험에서 얻어진 모든 자료[개시어체중, 종료어체중, 증체율, 사료효율(feed efficiency, FE), 일간성장률(specific growth rate, SGR), 단백질이용효율(protein efficiency ratio, PER), 일간사료섭취율(daily feed intake, DFI), 생존율, 전어체]의 변수는 SPSS Version 10 (SPSS, 1999) 프로그램의 일원분산분석(one-way ANOVA)을 이용하여 분석하였다. 분석에 앞서 모든 자료의 변량의 동질성(homogeneity of variance)은 Cochran's test (Sokal and Rohlf, 1995)를 이용하여 확인하였다. 실험구별 각 변수에 대한 유의차가 발견되었을 시, 사후검정은 Duncan's multiple range test 분석을 이용하였다(Duncan, 1955). 메기의 증체율에 기반한 사료 내 최적 MKP 수준 분석은 2차 다항식 회귀분석을 이용하였으며, 모든 통계분석의 유의수준은 5% (P<0.05)에서 결정되었다.

#### 결 과

#### 실험사료 4종의 성분분석

실험사료 4종의 조단백질, 조지방, 조회분, 조섬유, Ca, P, Mg, Fe, Cu, Mn, Zn 및 K 함량은 Table 2에 제시된 바와 같다. 각실험사료의 조단백질 및 조지방 함량은 44.51% (MKP1)에서 46.46% (MKP3) 및 6.60% (MKP3)에서 7.20% (MKP2)의 값

을 보였다. MKP의 사료 내 첨가수준이 높아짐에 따라 P와 K의 값이 상승됨을 알 수 있으며, MKP1의 경우 P 함량은 1.58%, K 함량은 10,626 ppm로 가장 낮은 값을 나타내었고, MKP2는 P 함량 1.89%, K 함량 14,281 ppm, MKP3는 P 함량 2.13%, K 함량 16,499 ppm 그리고, MKP4는 P 함량 2.47%, K 함량 18,984 ppm으로 분석되었다.

실험 제작 사료 4종의 아쿠아포닉스 생산성 비교 시험 사료 내 MKP 농도를 달리한 실험사료를 10주간 메기에 급여

Table 2. Chemical composition of the experimental diets<sup>1</sup>

Composition (%)	MKP1	MKP2	MKP3	MKP4
Moisture	6.26	7.09	5.87	6.53
Crude protein	44.51	46.30	46.46	46.28
Crude lipid	6.60	7.20	6.69	6.68
Crude ash	9.78	10.72	11.55	12.13
Crude fiber	2.07	1.77	2.05	1.74
Ca	2.27	2.37	2.38	2.49
Р	1.58	1.89	2.13	2.47
Composition (ppm)	MKP1	MKP2	MKP3	MKP4
Mg	2,109.74	2,090.57	2,090.57	1,964.66
Fe	287.64	321.75	320.45	291.28
Cu	15.79	16.20	16.87	15.88
Mn	39.57	26.87	37.21	34.74
Zn	121.95	120.79	122.78	109.13
K	10,626	14,281	16,499	18,984

<sup>1</sup>Values are means of 2 determinations. MKP, Monobasic potassium phosphate.

한 결과는 Table 3과 같다. MKP2구가 WG 19.34±0.31%, FE 59.25±1.76%, SGR 0.27±0.00% 및 PER 1.19±0.04%로 모 든 시험구에서 유의적으로 높은 값을 나타내었으나(P<0.05), MKP3구와의 유의한 차이는 없었다(P>0.05). DFI는 모든 시 험구에서 유의한 차이를 보이지 않았으며 0.45% (MKP2, MKP3)에서 0.46% (MKP1, MKP4)의 값을 보였다. 4종류의 엽채류 생산 시험결과는 Table 4에 나타내었다. 시험구별 각 엽 채류 4종에 대하여 24개체씩 초기 입식 계획(시험구별 총 96 개체)이었으나, 초기 엽채류의 구분이 잘 되지 않은 관계로 시 험 종료 시 시험구별 엽채류 종류에 따른 개체수의 차이가 나 타났다. MKP2구와 MKP3구의 4종류 엽채류 생산성은 총중 량 9,461.80 g (엽중량 8,152.24 g), 총중량 9.407.88 g (엽중 량 8,096.94 g)으로 MKP1, MKP4에 비해 높은 값을 보였다. MKP1의 생산성은 총중량 3.569.23 g (엽중량 3,187.07 g)으 로 가장 낮은 값을 나타내어 3개 시험구에 비해 엽채류 생산성 이 저조하였다.

#### 어체분석

사료 내 MKP 농도를 달리한 실험사료를 10주간 메기에 급여한 후, 어체 분석한 결과는 Table 5와 같다. 수분, 조지방 및 조회분의 경우 최초 개시구를 포함하여 모든 시험구에서 유의한 차이를 나타내지 않았다(P>0.05). 조단백질의 경우 MKP1구에서  $15.30\pm0.56$ %의 값으로 다른 시험구에 비해 가장 낮았으 며(P<0.05), K의 경우도 MKP1구에서 $0.10\pm0.01$ %로 가장 낮게 나타났다(P<0.05). P의 경우는 MKP3구에서  $0.71\pm0.25$ %의 값을 나타내어 다른 시험구에 비해 가장 높은 경향을 보였다(P<0.05).

Table 3. Growth performance of far eastern catfish *Silurus asotus* fed diets with graded levels of monobasic potassium phosphate (MKP) for 10 weeks<sup>1</sup>

One of the second second	Diets						
Growth performance	MKP1	MKP2	MKP3	MKP4			
Initial average weight of total fish (g)	188.1±14.9 <sup>ns</sup>	187.9±16.8	186.5±17.0	187.1±15.5			
Final average weight of total fish (g)	225.5±14.3 <sup>ns</sup>	231.0±14.9	228.8±15.4	227.1±13.2			
WG (%) <sup>2</sup>	16.35±1.08°	19.34±0.31°	18.90±0.64°	18.16±0.03b			
FE (%) <sup>3</sup>	49.51±2.12 <sup>a</sup>	59.25±1.76°	58.01±1.34°	55.03±1.27 <sup>b</sup>			
SGR (%) <sup>4</sup>	0.23±0.01 <sup>a</sup>	0.27±0.00°	0.26±0.01bc	0.25±0.00 <sup>b</sup>			
PER⁵	1.04±0.04 <sup>a</sup>	1.19±0.04°	1.18±0.03°	1.11±0.03 <sup>b</sup>			
DFI <sup>6</sup>	0.46±0.01 <sup>ns</sup>	0.45±0.02	0.45±0.01	0.46±0.02			
Survival rate (%) <sup>7</sup>	100 <sup>ns</sup>	100	100	100			

<sup>1</sup>Values (means±SE of two replicates) with different superscripts in the same row are significantly different (P<0.05). <sup>2</sup>Weight gain (%)=[final weight (g)-initial weight (g)]×100/initial weight (g). <sup>3</sup>Feed efficiency (%)=wet weight gain (g)/dry feed intake×100. <sup>4</sup>Specific growth rate (%)=(Ln final weight (g)-Ln initial weight (g))/experimental days×100. <sup>5</sup>Protein efficiency ratio=wet weight gain (g)/protein intake. <sup>6</sup>Daily feed intake (%/av. wt/d)=dry feed intake (g/fish)/[(initial wt+final wt)/2]/experimental days×100. <sup>7</sup>Survival rate (%)=final fish number/initial fish number×100. ns, nonsignificant; MKP, Monobasic potassium phosphate.

Table 4. Growth of four leafy vegetables in aquaponic system for 23 days

Diet	Growth factor						
MKP1	Individual No.	Total weight (g)	Root weight (g)	Leaf No.	Stem weight (g)	Leaf weight (g)	Individual leaf length (No. 30)
Lollo-rossa	26	712.82	63.40	289	26.92	622.50	10.89±0.55
Avatar	22	910.34	65.45	402	33.83	811.06	12.61±1.16
Caipira	24	1,245.59	68.82	467	37.59	1,139.18	10.26±0.79
Heuk-Romaine	24	700.48	40.69	340	45.46	614.33	15.60±0.53
Sum	96	3,569.23	238.36	1,498	143.8	3,187.07	
MKP2	Individual No.	Total weight (g)	Root weight (g)	Leaf No.	Stem weight (g)	Leaf weight (g)	Individual leaf length (No. 30)
Lollo-rossa	22	1,203.33	188.74	262	28.57	986.02	12.76±0.54
Avatar	26	2,687.40	278.36	563	74.94	2,334.10	14.81±0.89
Caipira	25	2,785.64	220.00	544	58.68	2,506.96	12.76±0.54
Heuk-Romaine	23	2,785.43	316.17	405	144.10	2,325.16	20.82±1.40
Sum	96	9,461.80	1,003.27	1,774	306.29	8,152.24	
MKP3	Individual No.	Total weight (g)	Root weight (g)	Leaf No.	Stem weight (g)	Leaf weight (g)	Individual leaf length (No. 30)
Lollo-rossa	25	1,478.80	203.55	274	41.95	1,233.30	12.62±0.86
Avatar	24	2,576.89	245.18	560	76.96	2,254.75	15.52±1.03
Caipira	24	2,691.17	193.24	497	69.31	2,428.62	12.02±0.79
Heuk-Romaine	23	2,661.02	303.37	356	177.38	2,180.27	20.59±1.41
Sum	96	9,407.88	945.34	1,687	365.6	8,096.94	
MKP4	Individual No.	Total weight (g)	Root weight (g)	Leaf No.	Stem weight (g)	Leaf weight (g)	Individual leaf length (No. 30)
Lollo-rossa	31	1,596.33	219.80	342	41.06	1,335.47	12.32±0.84
Avatar	24	2,183.58	224.38	496	64.68	1,894.52	14.56±1.68
Caipira	17	1,843.36	152.15	319	51.56	1,639.65	11.93±0.66
Heuk-Romaine	24	2,653.92	263.16	363	143.40	2,247.36	21.82±1.48
Sum	96	8,277.19	859.49	1,520	300.7	7,117.00	

MKP, Monobasic potassium phosphate.

Table 5. Proximate composition (%, as-is basis) of whole body of far eastern catfish *Silurus asotus* fed diets with graded levels of monobasic potassium phosphate (MKP) for 10 weeks<sup>1</sup>

	Diet					
	Initial fish	MKP1	MKP2	MKP3	MKP4	
Moisture (%)	75.29±1.73 ns	77.50±1.39	76.87±2.79	75.66±2.28	76.79±1.09	
Crude protein (%)	17.10±1.07 <sup>b</sup>	15.30±0.56 <sup>a</sup>	15.60±1.47 <sup>ab</sup>	16.71±1.34 <sup>ab</sup>	16.51±1.19ab	
Crude lipid (%)	4.12±1.18 ns	3.26±1.06	3.82±1.69	3.44±0.99	2.83±0.71	
Crude ash (%)	3.80±0.60 <sup>ns</sup>	3.29±0.39	3.47±0.54	3.71±0.40	3.67±0.19	
K (%)	0.14±0.01 <sup>b</sup>	0.10±0.01 <sup>a</sup>	0.14±0.01 <sup>b</sup>	0.12±0.01b	0.17±0.02°	
P (%)	0.66±0.21a	0.45±0.09 <sup>a</sup>	0.52±0.10 <sup>a</sup>	0.71±0.25 <sup>b</sup>	0.58±0.10 <sup>a</sup>	

<sup>1</sup>Values (means±SD of six replicates) with different superscripts in the same row are significantly different (P<0.05). ns, nonsignificant; MKP, Monobasic potassium phosphate.

#### 수질분석

실험 10주 기간 동안 혼합미생물(종속영양세균 및 독립영양 세균)을 활용한 hybrid BFT 아쿠아포닉 시스템의 수질변화는 Table 6과 7에 제시되었다. DO의 경우 각 시험구별 7.22에서 8.36 mg/L, 수온은 25.0에서 30.8 ℃의 유사한 범위의 값을 보였 다. pH는 각 시험구별 실험 시작 4주 기간 동안 7.65에서 7.99의 값을 보였으나, 이 후 급속히 하강하기 시작하여 6.88에서 5.18 의 값을 나타내었다. 전기전도도(EC)의 경우 MKP1구는 실험 초기 132.8 μs/cm에서 실험 종료 시 630.6 μs/cm, MKP2구는 133.0에서 686.2 us/cm, MKP3구는 132.8에서 662.0 us/cm 그 리고 MKP4구는 132.5에서 619.4 us/cm의 값을 보여 MKP2 의 EC값이 실험 종료 시 가장 높았다. 탁도의 경우 MKP1구 는 0.2에서 2.2 NTU, MKP2구는 0.1에서 2.1 NTU, MKP3구 는 0.1에서 2.6 NTU 그리고 MKP4구는 0.1에서 2.8 NTU의 값 을 나타내었다. NO,-N의 경우 MKP1구는 실험 초기 3.30 mg/ L에서 실험 종료 시 49.22 mg/L 값의 범위를 보였고, MKP2 구는 3.33에서 52.40 mg/L, MKP3구는 3.63에서 48.00 mg/L 그리고 MKP4구는 3.60에서 49.60 mg/L의 값을 나타내었다. TAN의 경우 MKP1구는 실험 초기 0.10 mg/L에서 실험 종 료 시 19.12 mg/L 값의 범위를 보였고, MKP2구는 0.12에서 20.40 mg/L, MKP3구는 0.07에서 20.22 mg/L 그리고 MKP4 구는 0.08에서 18.62 mg/L로 실험 시작 6주부터 수치가 지속 적으로 상승하는 경향을 보였다. NO,-N의 경우 MKP1는 실 험 초기 0.216 mg/L에서 실험 종료 시 0.090 mg/L 값의 범위를 보였고, MKP2구는 0.245에서 0.055 mg/L, MKP3구는 0.322 에서 0.036 mg/L 그리고 MKP4구는 0.320에서 0.061 mg/L으 로 실험 시작 6주 후부터 모두 실험구에서 0.1 mg/L 이하의 값 을 나타내었다. PO,-P의 경우 MKP1는 실험 초기 0.48 mg/L에 서 실험 종료 시 44.54 mg/L 값의 범위를 보였고, MKP2구는 0.56에서 47.98 mg/L, MKP3구는 0.58에서 46.48 mg/L 그리 고 MKP4구는 0.56에서 48.48 mg/L으로, 실험 시작 후부터 모 든 시험구에서 지속적인 상승 경향을 나타내었다.

#### 혈액분석

10주간의 어류 사육실험 종료 후, 사료절식을 24 h한 다음 메기 혈액을 샘플하여 분석한 결과는 Table 8과 같다. PCV (%)는 45.33±2.94 (MKP4)에서 45.83±7.31 (MKP1), Hb (g/dL)는 14.03±1.41 (MKP2)에서 14.50±1.02 (MKP4), GOT (U/L)는 76.83±9.58 (MKP1)에서 88.33±18.26 (MKP2), GPT (U/L)는 15.50±5.09 (MKP4)에서 22.33±6.19 (MKP2), GLU (mg/dL)는 55.17±12.29 (MKP2)에서 70.17±17.45 (MKP3), Pi (mg/dL)는 14.12±0.65 (MKP4)에서 15.72±0.46 (MKP2), Na (mEq/L)는 140.00±1.10 (MKP4)에서 140.83±1.17 (MKP3), K (mEq/L)는 0.57±0.08 (MKP1)에서 0.92±0.19(MKP3) 그리고 CI (mEq/L)은 119.17±2.32 (MKP1)에서 120.67±1.51 (MKP4)의 값을 보였다. Pi와 K의 항목을 제외한 나머지 혈액

항목은 시험구별 유의성이 발견되지 않았으며(P>0.05), Pi와 K의 값은 MPK2와 MKP3구에서 유의성 있게 높게 나타났다 (P<0.05).

# 고 찰

본 연구에 적용된 아쿠아포닉 생산 방법은 기존 보편화된 UVI 아쿠아포닉 시스템과 달리 물리적 여과기, 생물학적 여과기, 침전조 및 탈질조를 단순화하여 여과기(물리적 생물학적 여과 동시 수행)와 유용 혼합미생물(종속영양세균 및 독립영양세균)만을 활용하여 semi-pilot 규모에서 성공적으로 시도된 첫 사례이다.

10 주간 어류 사양실험과 4주간의 엽채류 생산실험 후, MKP 수준(1, 2, 3, 4%) 별 메기 및 엽채류 성장은 MKP2와 MKP3구 에서 높은 생산성을 나타내었다. Yoon et al. (2017)은 어류의 최대성장을 위해 실용 사료 내 인 첨가제의 사용은 필수적인 것 으로 보고하였다. 어류의 인 요구량은 Na, HPO, 또는 KH, PO, 와 같은 시약급의 인 공급원을 첨가한 정제 또는 반정제사료를 이용하여 설정 되었는데, 반응척도로 WG, 전어체내 인, 척추내 인, 또는 혈청 내 인이 사용되었다(Antony et al., 2013). 또한, 어종 별 인 공급원 첨가 효과 실험 대다수는 사료 내 MCP, DCP 및 TCP첨가에 따른 인 이용성 평가 보고가 주를 이루고 있다 (Kim et al., 1988; Hernandez et al., 2005; Nwanna et al., 2009; Liu et al., 2012). Ogino et al. (1979)은 무지개송어(rainbow trout)에 있어 어느 인산염이 첨가된 사료를 급여해도 성장에는 차이가 거의 없는 반면, 잉어(common carp)의 경우에는 monobasic sodium phosphate, monobasic potassium phosphate 또 는 monobasic calcium phosphate를 급여한 쪽의 성장이 di- 또 는 tribasic calcium phosphate를 급여한 것보다 성장이 2배가 빠르다고 하였으며, Lampila (2013)은 현재 이용하고 있는 인 산염 종류에 있어 인산칼륨(potassium phosphates)이 인산칼슘 과 인산나트륨에 비해 용해도가 높다고 하였다.

Bittsanszky et al. (2016)는 일반적으로 아쿠아포닉 시스템에서는 양어 사육조 내 어류의 밀도에 따라 수치는 변화하나 질산염은 충분히 발생하며, P, Ca, Fe 및 K는 식물의 최적 성장을위해 많이 부족하다고 보고하였다. 현재 실험에서는 아쿠아포닉 시스템 내식물 성장에 최대 부족 요인으로 주목되는 K의 극복과 더불어 P의 농도도 상승시키기 위해 기존 상업용 사료에사용되고 있는 MCP, DCP 또는 TCP와 같은 인산염 제제를 일인산칼륨(MKP)으로 대체하였고, 추가적으로 KCI도 사료 내0.5% 첨가하였다. 사료 내 MKP 농도에 따른 10주간 메기 성장 결과 MKP2와 MKP3구는 유사한 성장 효과를 나타내었으나, MKP1 및 MKP4구는 성장 요인(WG, FE, PER, SGR)들이낮게 평가되었다. 따라서 사료 내 MKP를 첨가 시 적정 수준 이상의 농도는 어류 성장에 큰 도움이 되지 않음을 나타내며, 메기의 증체율에 기반한 2차 다항식 회귀분석을 통한 사료 내최적 MKP 첨가 수준은 2.77% 임을 알 수 있다(Fig. 2). 실험에서

Table 6. Change of water quality (DO, pH, Temperature, EC and Turbidity) of MKP1, MKP2, MKP3 and MKP4 groups in aquaponic system with hybrid BFT (biofloc tech) for 10 weeks<sup>1</sup>

Diet	Week	DO (mg/L)	pН	Temperature (°C)	EC (µs/cm)	Turbidity (NTU)
	1	8.35±0.21	7.87±0.09	25.1±1.3	132.8±5.4	0.6±0.2
	2	7.76±0.14	7.84±0.26	29.2±1.1	152.6±7.7	0.2±0.1
	3	7.47±0.18	7.99±0.14	30.6±0.3	171.8±4.3	0.2±0.1
	4	7.22±0.10	7.76±0.08	30.8±0.6	188.5±4.9	0.4±0.3
MKD1	5	7.24±0.16	6.81±0.77	30.3±0.8	240.4±35.7	0.6±0.2
MKP1	6	7.59±0.15	6.00±0.21	27.8±0.6	340.9±25.8	1.6±0.5
	7	7.78±0.04	5.60±0.15	27.2±0.4	405.1±11.4	1.5±0.1
	8	7.72±0.08	5.66±0.24	27.3±0.5	452.0±1.50	1.8±0.4
	9	7.95±0.07	5.76±0.21	26.9±0.1	512.4±13.3	1.9±0.1
	10 (3day)	8.11±0.25	5.77±0.11	25.8±1.5	630.6±55.6	2.2±0.6
	1	8.30±0.20	7.80±0.09	25.2±1.4	133.0±5.3	0.5±0.2
	2	7.77±0.14	7.56±0.21	29.0±1.0	151.3±7.2	0.1±0.1
	3	7.47±0.15	7.84±0.10	30.5±0.4	170.5±4.8	0.1±0.1
	4	7.23±0.08	7.65±0.06	30.7±0.6	189.9±6.0	0.2±0.1
NUCDO	5	7.23±0.14	6.69±0.79	30.3±0.8	245.6±36.0	0.6±0.3
MKP2	6	7.60±0.12	5.83±0.21	27.7±0.6	355.5±30.8	2.0±0.6
	7	7.76±0.06	5.40±0.16	27.4±0.6	442.4±18.9	2.1±0.1
	8	7.67±0.09	5.26±0.13	27.5±0.3	509.3±18.8	1.9±0.1
	9	7.87±0.08	5.30±0.19	27.0±0.3	563.6±11.3	1.9±0.1
	10 (3day)	8.09±0.28	5.23±0.04	25.5±1.8	686.2±55.9	1.5±0.1
	1	8.36±0.21	7.79±0.09	25.1±1.5	132.8±5.2	0.5±0.3
	2	7.79±0.17	7.57±0.20	28.9±1.1	151.4±7.1	0.1±0.1
	3	7.50±0.14	7.83±0.07	30.4±0.2	168.9±4.5	0.2±0.2
	4	7.33±0.27	7.74±0.06	30.6±0.5	184.8±3.5	0.3±0.2
	5	7.26±0.16	6.77±0.78	30.4±0.9	235.3±33.4	0.6±0.3
MKP3	6	7.67±0.12	5.86±0.22	27.6±0.8	336.5±27.7	1.4±0.3
	7	7.83±0.05	5.46±0.10	27.1±0.4	413.7±18.5	1.9±0.5
	8	7.74±0.09	5.37±0.15	27.2±0.4	476.6±17.5	2.0±0.2
	9	7.93±0.08	5.32±0.20	26.8±0.2	540.6±12.1	2.6±0.3
	10 (3day)	8.15±0.32	5.23±0.04	25.3±2.0	662.0±56.7	1.6±0.3
	1	8.34±0.22	7.78±0.09	25.0±1.5	132.5±5.8	0.8±0.4
	2	7.79±0.16	7.69±0.21	28.8±1.1	151.4±6.9	0.1±0.1
	3	7.45±0.13	7.90±0.08	30.4±0.4	168.8±4.3	0.1±0.1
	4	7.27±0.09	7.78±0.05	30.6±0.6	184.2±4.1	0.3±0.3
NATION A	5	7.28±0.17	6.74±0.94	30.1±0.1	233.6±26.5	1.1±0.8
MKP4	6	7.66±0.15	5.88±0.22	27.5±0.7	325.6±26.5	1.9±0.3
	7	7.82±0.05	5.49±0.10	27.1±0.6	407.9±17.4	2.2±0.5
	8	7.69±0.08	5.54±0.27	27.3±0.4	456.7±18.4	2.6±0.2
	9	7.89±0.09	5.48±0.32	26.8±0.3	499.0±13.5	2.8±0.5
	10 (3day)	8.11±0.30	5.18±0.06	25.4±1.9	619.4±57.6	1.6±0.2

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Values represent the mean±SD for 7 days. MKP, Monobasic potassium phosphate.

Table 7. Change of water quality (TAN,  $NO_2$ -N,  $NO_3$ -N and  $PO_4$ -P) of MKP1, MKP2, MKP3 and MKP4 groups in aquaponic system with hybrid BFT (biofloc tech) for 10 weeks<sup>1</sup>

Diet	Week	TAN (mg/L)	NO <sub>2</sub> -N (mg/L)	NO <sub>3</sub> -N (mg/L)	PO <sub>4</sub> -P (mg/L)
	1	0.10±0.06	0.216±0.130	3.30±0.37	0.48±0.23
	2	0.06±0.01	0.228±0.215	3.68±0.48	0.75±0.15
	3	0.08±0.04	0.047±0.041	4.38±0.76	0.93±0.08
	4	0.14±0.04	0.115±0.030	6.06±0.58	1.63±0.30
MZD4	5	0.91±0.93	0.118±0.072	13.92±4.62	6.20±2.97
IKP1	6	4.96±1.28	0.044±0.024	24.54±2.49	20.38±5.91
	7	8.28±0.75	0.033±0.003	31.22±3.00	32.38±2.07
	8	10.92±1.51	0.058±0.012	37.20±1.64	30.10±1.32
	9	13.80±0.34	0.070±0.005	38.20±1.48	35.44±0.81
	10 (3day)	19.12±2.77	0.090±0.034	49.22±5.59	44.54±3.80
	1	0.12±0.07	0.245±0.132	3.33±0.48	0.56±0.19
	2	0.04±0.01	0.397±0.146	3.20±0.80	0.46±0.07
	3	0.07±0.02	0.092±0.045	4.03±0.97	0.72±0.12
	4	0.13±0.04	0.099±0.016	6.22±0.70	1.69±0.37
## <b>#</b> D0	5	1.00±1.01	0.101±0.039	14.74±4.23	7.43±3.59
MKP2	6	5.34±1.49	0.046±0.017	24.12±2.10	26.00±5.69
	7	9.40±0.91	0.026±0.004	34.66±3.45	38.30±2.50
	8	12.82±0.97	0.032±0.008	41.20±1.48	38.92±3.48
	9	14.66±0.50	0.045±0.009	39.40±4.77	41.56±2.06
	10 (3day)	20.40±2.81	0.055±0.015	52.40±7.40	47.98±6.24
	1	0.07±0.04	0.322±0.199	3.63±0.20	0.58±0.32
	2	0.03±0.01	0.189±0.103	3.36±0.15	0.42±0.09
	3	0.07±0.02	0.035±0.018	3.83±0.54	0.61±0.05
	4	0.10±0.02	0.077±0.021	4.86±0.38	1.21±0.18
	5	0.70±0.85	0.144±0.038	13.62±5.04	6.34±3.58
1KP3	6	5.10±1.67	0.058±0.035	24.24±2.00	27.14±5.90
	7	8.56±1.02	0.034±0.010	31.70±3.99	38.42±2.20
	8	11.80±0.77	0.034±0.009	38.40±2.51	34.66±1.93
	9	14.42±0.54	0.032±0.008	39.20±3.27	42.92±1.61
	10 (3day)	20.22±3.66	0.036±0.011	48.00±4.74	46.48±4.37
	1	0.08±0.05	0.320±0.188	3.60±0.22	0.56±0.31
	2	0.04±0.01	0.269±0.104	3.16±0.38	0.39±0.07
	3	0.06±0.01	0.109±0.030	3.72±0.63	0.55±0.07
	4	0.11±0.03	0.102±0.023	4.42±0.83	1.13±0.22
U/D 4	5	0.56±0.63	0.123±0.057	13.26±4.28	8.29±6.52
MKP4	6	4.58±1.73	0.046±0.027	24.30±2.08	28.84±4.70
	7	8.06±1.06	0.027±0.006	33.48±6.94	37.28±2.67
	8	11.14±0.85	0.043±0.008	36.00±2.24	34.68±2.67
	9	12.82±0.62	0.045±0.010	35.80±1.30	40.58±1.48
	10 (3day)	18.62±3.54	0.061±0.030	49.60±9.66	48.48±5.13

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Values represent the mean±SD for 7 days. MKP, Monobasic potassium phosphate.

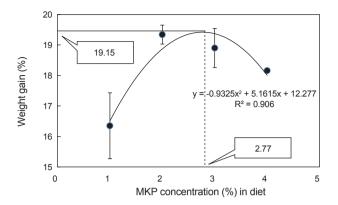


Fig. 2. Polynomial regression analysis on weight gain (WG, %) of far eastern catfish *Silurus asotus* by dietary monobasic potassium phosphate (MKP) levels.

나타난 식물의 생산성 측면에서도 사료 내 최적 MKP 첨가 수준은 2-3% (MKP2, MKP3)임을 볼 수 있으며(Table 4), 특히 MKP1구의 경우 성장 저하와 더불어 엽채류의 채색도 연하게 변색되어 영양 결핍 증상을 시각적으로 볼 수 있다(Fig. 3). 일 반적으로 수경재배(hydroponics)의 양액 농도의 범위는  $PO_4^{-3}$   $36.9\pm6.2$  mg/L, Total N  $321\pm6.2$  mg/L, K  $340\pm101$  mg/L, Ca  $160\pm10$  mg/L, Mg  $40.9\pm3.3$  mg/L, SO $_4^{-2}$   $134\pm53$  mg/L, B  $0.573\pm0.134$  mg/L, Co 0.0065 mg/L, Cu  $0.0420\pm0.0174$  mg/L, Mn  $1.83\pm0.96$  mg/L, MO  $0.0872\pm0.0374$  mg/L 그리고, Zn  $0.455\pm0.374$  mg/L의 값을 보인다(Murashige and Skoog, 1962; Trejo-Téllez and Gomez-Merino, 2012). Ha and Jeong (2017)의 보고에 의하면 사료 내 P 1.34%, K 3,611 ppm을 포함하는 사료로 4주간 잉어( $Cyprinus\ carpio$ )와 상추

(Lactuca sativa L)의 아쿠아포닉스 생산 결과에서 실험 종료 시 사육수의 영양염 농도는 NO<sub>3</sub>-N 89.1 mg/L, PO<sub>4</sub>-P 0.1 mg/L 및 K 0.9 mg/L의 값을 보여 수경재배의 양액 대비 매우 낮은 P와 K의 값을 보였다. 본 연구의 10주간 실험 종료(엽채류 생산 기 간 23일) 후 사육수 분석결과(Table 9), PO,-P는 42.2 (MKP1) 에서 46.5 (MKP4) mg/L, K는 13.5 (MKP1)에서 16.4 (MKP4) mg/L의 값을 나타내었고, Ha and Jeong (2017)의 결과에 비해 사육수 내 P와 K 값은 향상되었으나, 양액 대비 K는 아직 낮은 결과를 보였다. MKP4구가 가장 높은 함량으로 사료 내 일인 산칼륨(MKP)이 첨가되었으며, 사육수 내 K함량도 높았으나 MKP2 및 MKP3에 비해 낮은 엽채류 생산성을 보인 것은 미량 원소인 Fe의 영향으로, Thorarinsdottir (2015)은 아쿠아포닉 시 스템 내에서 Fe는 엽록체와 전자전달 사슬에 이용되는 미량원 소로 광합성에 있어 매우 중요한 제한요소로 작용하며 Fe 부족 시 잎과 식물 전반에 황색으로 변하며 결국 괴사하게 되므로 인 위적인 첨가가 필요하다 하였다. 따라서, MKP2 및 MKP3 두 시험구에 비해 MKP4구는 사료 및 사육수 내 낮은 Fe값을 함유 한 결과에 기인하여 식물생산성이 낮은 것으로 추측할 수 있다. 또한 MKP1은 모든 시험구에서 가장 낮은 Fe 값(0.0092 mg/L) 을 보여 식물성장 저하와 더불어 엽채의 채색이 연하게 진행된 것으로 사료된다. 그러나, 20세기 동안 식물 영양분야에서는 가 장 부족한 영양소에 의해 식물성장은 통제된다는 리비히의 법 (Liebig's law)이 정설이었으나 현재는 개별 영양소의 상호작용 에 의한 복잡한 algorithms의 이론으로 대체 되고 있다(Parent et al., 2013; Baxter, 2015). 이는 한 요소에 의한 식물의 성장 저 해보다 영양소 상호간에 밀접한 관련이 있어 모든 영양소 요인 들을 고려해야 정확한 결과를 예측할 수 있다는 것으로 앞으로 과학적 접근이 더욱 요구되고 있다.

Table 8. Hematological analysis of far eastern catfish *Silurus asotus* fed graded levels of monobasic potassium phosphate (MKP) in aquaponic system with hybrid BFT (biofloc tech) for 10 weeks<sup>1</sup>

Discount of the second of the		Diets					
Blood parameters	MKP1	MKP2	MKP3	MKP4			
Average Fish weight (n=6)	203.1±26.6 <sup>ns</sup>	226.7±25.0	217.2±33.2	212.8±1.5			
PCV (%) <sup>2</sup>	45.83±7.31 <sup>ns</sup>	45.33±4.23	45.67±4.89	45.33±2.94			
Hb (g/dL) <sup>3</sup>	14.13±1.85 <sup>ns</sup>	14.03±1.41	14.47±1.99	14.50±1.02			
GOT (U/L)⁴	76.83±9.58 <sup>ns</sup>	88.33±18.26	81.17±15.32	81.83±8.21			
GPT (U/L)⁵	20.83±9.75 <sup>ns</sup>	22.33±6.19	19.00±6.99	15.50±5.09			
GLU (mg/dL) <sup>6</sup>	65.67±17.22 <sup>ns</sup>	55.17±12.29	70.17±17.45	62.33±11.48			
Pi (mg/dL) <sup>7</sup>	14.18±0.83ª	15.72±0.46 <sup>b</sup>	15.47±0.52b	14.12±0.65 <sup>a</sup>			
Na (mEq/L)	140.17±1.47 <sup>ns</sup>	140.33±1.03	140.83±1.17	141.00±1.10			
K (mEq/L)	0.57±0.08 <sup>a</sup>	0.80±0.11 <sup>b</sup>	0.92±0.19b	0.72±0.08 <sup>b</sup>			
CI (mEq/L)	119.17±2.32 <sup>ns</sup>	119.33±2.94	119.50±1.64	120.67±1.51			

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Values (means±SD of six individuals) with different superscripts in the same row are significantly different (P<0.05); ns=nonsignificant. 
<sup>2</sup>Hematocrit. <sup>3</sup>Hemoglobin. <sup>4</sup>Glutamic oxaloacetic transaminase. <sup>5</sup>Glutamic pyruvic transaminase. <sup>6</sup>Glucose. <sup>7</sup>Inorganic phosphorus. MKP, Monobasic potassium phosphate.

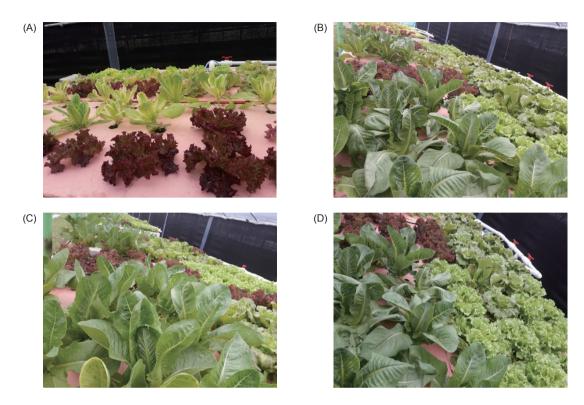


Fig. 3. Growth of four leafy vegetables in aquaponic system for 23 days. (A) MKP1, (B) MKP2, (C) MKP3, (D) MKP4. MKP, Monobasic potassium phosphate.

수산생물과 식물이 함께 양식 및 재배되는 아쿠아포닉 시스템에서는 양 쪽의 수질 환경을 생물학적 한계 내 적정 범위로유지하는 것은 중요하다(FAO, 2014). 특히 pH는 식물 성장에

Table 9. Nutrient concentrations in fish tank and vegetable bed of each experimental group for 10 weeks<sup>1</sup>

Water quality		Diet						
parameter	MKP1	MKP2	MKP3	MKP4				
NO <sub>3</sub> -N (mg/L)	49.0	51.4	47.5	44.9				
PO <sub>4</sub> -P (mg/L)	42.2	42.8	42.8	46.5				
K (mg/L)	13.5	14.2	14.6	16.4				
Ca (mg/L)	36.2	42.7	39.3	36.7				
Mg (mg/L)	6.7	7.5	7.2	6.7				
Na (mg/L)	25.5	26.1	24.0	24.1				
CI (mg/L)	26.0	24.0	25.0	19.0				
SO <sub>4</sub> (mg/L)	42.0	44.0	41.0	38.0				
Fe (mg/L)	0.0092	0.0148	0.0233	0.0129				
Zn (mg/L)	1.2918	1.4392	1.3226	1.4265				
Mn (mg/L)	0.0392	0.0270	0.0183	0.0161				
Cu (mg/L)	0.0705	0.1325	0.1337	0.0955				

Values are means of 2 determinations. MKP, Monobasic potassium phosphate.

있어 가장 중요한 요소 중 하나로 식물의 영양염 흡수와 직결 되며, 수경재배에서 생산되는 식물의 경우 대다수 다량광물질 (N, P, K, Ca, S 및 Mg)은 pH 6.5에서 7.0 범위에서 잘 흡수되 는 반면 미량광물질(Fe, B, Cu, Zn, Mn 및 Mo)는 pH 6.5 이 하에서 흡수가 잘 되므로 적절 pH 범위를 6.5 이내로 설정하 고 있다(FAO, 2014; Thorarinsdottir RI, 2015). 또한 어류의 경 우 pH 4.0 이하에서는 생존하지 못하며 pH 4.0에서 5.0 범위 에서는 성장이 일어나지 않아 생산성이 없고, pH 9.0에서 11.0 은 성장이 늦고, pH 11 이상에서는 폐사개체가 출현한다고 하 였다(Thorarinsdottir RI, 2015). pH는 질산화 과정과 매우 연 관성이 높은 것으로, 암모니아에서 아질산 및 질산염으로 전환 되는 질산화 과정에서 수소이온(H+)이 생성되면서 pH 가 낮아 지고 물이 산성화된다. 이러한 질산화 과정에 참여하는 미생물 중 암모니아를 아질산으로 전환하는 세균은 Nitrosomonas, Nitrosococcus 와 Nitrosospira가 있고, 아질산을 질산염으로 산화 하는 세균은 Nitrobacter, Nitrospina, Nitrococcus와 Nitrospira 속들(genera)이 대표적이다. 일반적으로Nitrosomonas 및 Nitrobacter의 질산화 과정을 수행하는 pH 범위는 6.0에서 8.5로 알려져 있으며, 이러한 질산화 세균은 독립영양세균(autotrophic microorganism)으로 무기 탄소원이 필요하다(Delwiche and Finstein, 1965; AWWA, 2002; FAO, 2014). Lee and Lee (2014)의 보고에 의하면 1972년 종속영양성 질산화과정을 수

행하는 Arthrobacter sp.가 발견된 이후, 많은 연구가 진행되어 Alcaligenes faecalis, Bacillus sp., Diaphorobacteria sp., Acinetobacter calcoaceticus, Agrobacterium sp., Pseudomonas putida, P. stutzeri, Microvirgula aerodenitrificans 등이 발견되 었다고 하였다. 종속영양성 질산화 및 호기적 탈질과정은 유기 물과 산소를 이용할 수 있는 조건이 동일하여 동시에 질산화와 탈질화가 한 반응기 내에서 일어날 수 있으며, 탈질과정이 진행 되는 동안 반응기 내의 pH의 변화를 균형있게 유지하여 질산 화 과정에 일어나는 산성화 과정을 억제해 줄 수 있고, 종속영 양성 질산화의 최종 생성물 및 기질이 다양하여 여러 종류의 미 생물 혼합배양과 응용 범위도 넓게 확대될 수 있는 장점이 있다 (Marazioti et al., 2003). 또한, Kim et al. (2015)의 보고에 의하 면 Bacillus strains은 주로 오염된 물을 처리하는 시스템에 우점 적으로 서식하며, 질소와 인 외 유기물을 효과적으로 제거한다 고 하였다. 현재 아쿠아포닉 생산 시스템에 BFT를 적용한 연구 가 시도되고 있으나, BFT 과정에서 형성된 많은 미생물들이 식 물 뿌리에 붙게 되어 biofilm을 형성하게 되고 이는 식물의 성 장을 저해하는 큰 요인으로 지적되어 오고 있으며, 이를 보완하 기 위해 여과기 및 고형물 침전장치가 필수적임이 알려져 있다 (Emerenciano et al., 2013).

본 실험의 경우, pH는 유기탄소를 중단한 2주 후 지속적으로 감소하여 실험 6주 부터는 모든 시험구에서 6.0 이하의 값을 보였는데, 기존 아쿠아포닉 생산에서 추천하는(Rakocy et al., 2006; Rakocy, 2007) pH (6.5에서 7.0)보다 저 pH상태(5.18에 서 6.00)에서 식물생산과 어류생산이 진행되었으나 양측 생산 성에는 문제가 없었다. Hybrid BFT 방식을 적용한 실험의 가장 큰 특징은 질산화 과정에 따른 TAN, NO,-N 및 NO,-N의 변화 이다. 유기탄소 투입 중단 후, 실험 3주부터 지속적으로 무기탄 소인 CO,를 공급하여 독립영양세균의 질산화 과정 활성을 증 대시켰으며, 이에 따라 pH도 감소하였다. NO,-N은 실험 6주 후부터 어류에게 전혀 독성을 유발할 수 없는 낮은 농도로 일정 하게 유지되었으나, NO,-N와 TAN은 동시에 증가하였다. Kim et al. (2015)은 종속영양세균의 질산화는 독립영양세균에 비해 활성이 떨어진다고 하였으며, 독립영양세균은 pH 6.0 이하에서 는 활성이 저해되어 질산화 과정 중 암모니아를 아질산으로 전 환이 어렵다고 했고, 이에 따라 질산염의 수치도 더 이상 증가하 지 않는다고 하였다(Thorarinsdottir RI, 2015). 그러나 본 실험 에서 결과는 기존 이론과는 상이하게 암모니아와 질산염이 동 시에 상승하였는데 이는 실험에서 사용된 종속영양세균인 3종 의 Bacillus에 의한 질산화 과정 수행의 결과로 추측된다. 물에 서 NH, (암모니아)와 NH, + (암모늄)은 pH와 온도에 따라 평형 을 이룬다. 두 가지 형태의 합계를 총 암모니아성 질소(TAN)라 고 한다(Purwono et al., 2017). NH,와 NH,+가 모두 어류에 독 성을 가질 수 있지만, 비 이온화 된 암모니아(NH,)가 더 독성이 강한 형태인데 이는 전하를 띠지 않고 지용성이라서 이온화되 어 전화를 띠는  $\mathrm{NH_4}^+$ 이온보다 쉽게 생물막을 통과하기 때문이

다. 상업적으로 양식하는 어류에 있어 대부분의 경우 암모니아 성 질소는 1.5 mg/L 이상의 농도에 독성을 지니는 것으로 인지되고 있으나, 대부분의 경우 이온화 되지 않은 암모니아의 허용수준은 0.025 mg/L에 불과하며, 독성 임계 값은 종, 크기, 미세한 고형물, 내화성 유기물, 표면 활성 화합물, 금속, 질산염, 염분 및 pH에 따라 크게 다를 수 있다(Avnimelech et al., 2015). 현재 실험의 모든 시험구에서 실험 종료 후 높은 암모니아 농도에서도 메기가 생존 및 성장할수 있었던 것은 대다수 암모니아가 저 pH상태에서 비이온화된 암모니아 보다 이온화된 암모늄  $(NH_4^+-N)$  형태로 전환(Purwono et al., 2017)되어 암모니아의 독성이 억제됐기 때문이라 사료된다. EC도 지속적으로 상승되어 실험 종류 후 시점에는 수경재배(hydroponics)에서 사용되는 범위(0.5에서 1.2 s/cm)에 도달하였고, 탁도도 일정하게 유지되어 식물 뿌리에 biofilm 현상도 관찰되지 않았다.

Lee et al. (2018)의 연구결과에 의하면 BFT 양식방법을 적용한 아쿠아포닉스 생산에서 식물생산은 수경재배 대비 생산성이 50% 정도로 낮은 문제점이 있었다. 그러나 아쿠아포닉 생산방법에서 권장하는 pH보다 저pH 상태로 유지하면서 hybrid BFT 방법을 적용 시 엽채류 4종은 초기 종묘 입식 후 23일 경과하여 포기 수확이 가능할 정도로 성장하여, 어류의 배합사료내 MKP첨가 효과뿐만 아니라 수질환경 조성도 아쿠아포닉스의 중요한 요소임을 나타내고 있다.

Hybrid BFT 아쿠아포닉스 생산에서 성장한 메기의 혈액 성 상 분석 결과, Yoon et al. (2014)이 보고한 메기(far eastern catfish)의 혈장 내 PCV (35.3에서 37.7%), Hb (9.0에서 10.4 g/ dL), GPT (6.2에서 8.0 IU/L) 그리고. Pi (11.4에서 13.6 mg/ dL)보다 높은 수치를 보였고, GOT (67.2에서 98.3 IU/L)는 유 사하였다. Leard et al. (1998)은 노지 양식장에서 사육된 channel catfish의 PCV 평균 값은 21%, GLU 26.9 mg/dL, Na 134 mEq/L, K 4.43 mEq/L 그리고 Cl은 120 mEq/L라 보고하였 다. Adedeji et al. (2010)은 African catfish (Clarias gariepinus) 의 PCV 평균 수치는 37.25%, Hb는 10.10 g/dL의 값을 나타 낸다고 하였으며, Yelwa and Solomon (2016)은 African catfish 90마리의 전해질 분석 평균 수치는 Na 120 mEg/L, K 4.01 mEq/L 그리고 CI은 85.14 mEq/L의 값을 가진다고 하였다. 순 환여과식 양식에서 사육된 African catfish의 평균 PCV 및 Hb 는 각각 36.21에서 41.31%와 14.86에서 16.99 g/dL의 값을 보 였다(Akinrotimi et al., 2011). 현재 실험에서 가장 큰 혈액학적 특징은 PCV와 Hb의 두 항목으로 이들은 주로 어체 내 산소 운 반능력과 영양학적 빈혈의 판단이 되는 지표이다. 앞서 언급한 여러 연구자들에 비해 이 두 항목의 값이 높은 것은 폐쇄된 환경 의 저 pH 상태에서 메기의 생체 대사과정에 필요한 산소운반 능 력을 증대시키기 위해 환경에 적응된 결과라 사료되며 향후 지 속적 연구가 수반되어야 할 것이다. 또한 K의 경우 Leard et al. (1998)가 보고한 수치보다 현저히 낮게 나타난 것은 현 실험의 아쿠아포닉 시스템 내 사육수 농도가 높아 체내 삼투현상 유지 를 위해 혈액 내 K 농도를 낮게 유지한 것으로 사료된다.

현재 농가에서 수경재배로 이뤄지는 엽채류의 경우 포기수확기간은 종묘 입식 후 25-30일 정도 기간이 필요하다. 본 실험결과에서 엽채류 4종은 초기 종묘 입식 후 23일 경과하여 포기수확이 가능할 정도로 성장하였다. 이는 어류의 배합사료 내MKP첨가가 아쿠아포닉스 사육수 내 P와 K의 수치를 상승시켜 수경재배와 유사한 엽채류 생산성이 가능함을 제시하는 것으로, 향후 사육수 내 Fe 증가를 배합사료로 극복한다면 더욱 완벽한 아쿠아포닉스 사료 개발이 가능할 것으로 사료된다. 아울러 세계에서 처음으로 시도된 hybrid BFT를 적용한 저 pH 아쿠아포닉스 생산방법은 RAS 기반에 운영되는 아쿠아포닉스시스템의 시설비 및 운영의 복잡성 문제를 보완할 수 있는 해결책으로 대두될 것이며, 향후 지속적인 연구를 통해 매뉴얼화한후 아쿠아포닉스를 희망하는 농어가에 확대 보급할 수 있을 것으로 예상된다.

### 사 사

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획 평가원의 농생명산업 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(과제번호: 118049-03-1-HD020).

#### References

- Adedeji OB. 2009. Effect of diazinon on blood parameters in the African catfish (*Clarias gariepinus*). Afr J Biotechnol 8, 3940-3946.
- Akinrotimi OA, Bekibele DO and Orokotan OO. 2011. Select hematological values of the African catfish (*Clarias gariepimus*) raised in a water recirculating aquaculture system. Int J Rec Aquaculture 12, 1-12. https://doi.org/10.21061/ijra.v12i1.1351.
- Antony Jesu Prabhu P, Schrama JW and Kaushik SJ. 2013. Quantifying dietary phosphorus requirement of fish-a meta-analytic approach. Aquac Nutr 19, 233-249. https://doi.org/10.1111/anu.12042.
- Avnimelech Y, De-Schryver P, Emmereciano M, Kuhn D, Ray A and Taw N. 2015. Overview of aquaculture systems. In: Biofloc Technology. Tomasso J. ed. The world Aquaculture Society Press, Louisiana, U.S.A., 9-20.
- AWWA (American Water Works Association). 2002. Nitrification. United States Environmental protection agency, Washington DC, U.S.A., 3-13.
- Bailey DS and Ferrarezi RS. 2017. Valuation of vegetable crops produced in the UVI commercial aquaponic system. Aquaculture Reports 7, 77-82. http://dx.doi.org/10.1016/j.aqrep.2017.06.002.
- Baxter I. 2015. Should we treat the ionome as a combination of individual elements, or should we be deriving novel combined traits. J Exp Bot 66, 2127-2131. http://dx.doi.

- org/10.1093/jxb/erv040.
- Bittsanszky A, Uzinger N, Gyulai G, Mathis A, Junge Ranka, Morris V, Kotzen B and Komives T. 2016. Nutrient supply of plants in aquaponics systems. Ecocycles 2, 17-20. https://doi.org/10.19040/ecocycles.v2i2.57.
- Delwiche CC and Finstein MS. 1965. Carbon and energy sources for the nitrifying autotroph *Nitrobacter*. J Bacteriol 90, 102-107. https://jb.asm.org/content/jb/90/1/102.full.pdf.
- Duncan DB. 1955. Multiple range and multiple 'F' tests. Biometrics 11, 1-42. http://garfield.library.upenn.edu/classics1977/A1977DM02600001.pdf.
- Emerenciano MGC, Martínez-Córdova LR, Martínez-Porchas M and Miranda-Baeza A. 2017. Biofoc technology(BFT): A tool for water quality management in aquaculture. INTECH, 91-109. http://dx.doi.org/10.5772/66416.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 1986. Flow-through and recirculation systems. Report of the working group on terminology, format and units of measurement. EIFAC Technical paper 49, 1-27.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2014. Small-scale aquaponic food production integrated fish and plant farming. FAO Fisheries and aquaculture technical paper 589, 1-19.
- Ha HJ and Jeong GS. 2017. A study on the application of aquaponics in Korea. JFMSE 29, 1225-1234. http://dx.doi.org/10.13000/JFMSE.2017.29.4.1225.
- Hernandez A, Satoh S and Kiron V. 2005. Effect of monocal-cium phosphate supplementation in a low fish meal diet for rainbow trout based on growth, feed utilization, and total phosphorus loading. Fish Sci 71, 817-822. https://doi.org/10.1111/j.1444-2906.2005.01032.x.
- Kim JD, Kim KS, Song JS, Lee JY and Jeong KS. 1998. Optimum level of dietary monocalcium phosphate based on growth and phosphorus excretion of mirror carp, *Cyprinus carpio*. Aquaculture 161, 337-344. https://doi.org/10.1016/S0044-8486(97)00281-0.
- Kim JK, Park KJ, Cho KS, Nam SW, Park TJ and Bajpai R. 2015. Aerobic nitrification-denitrification by heterotrophic *Bacillus* strains. Bioresour Technol 96, 1897-1906. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.01.040.
- Lall SP. 1991. Digestibility, metabolism and excretion of dietary phosphorus in fish. In: Nutritional strategies and aquaculture wastes. Cowey CB and Cho CY, eds. University of Guelph, Ontario, Canada, 21-36.
- Lampila LE. 2013. Applications and functions of food-grade phosphates. Ann NY Acad Sci 1301, 37-44. https://doi.org/10.1111/nyas.12230.
- Leard AT, Wagnerr BA, Camp KL, Wise DJ and Gao XD. 1998. Seasonal values of selected blood parameters of farm-raised channel catfish (*Ictalurus punctatus*) in the Mississippi Delta. J Vet Diagn Invest 10, 344-349.
- Lee EY and Lee CW. 2014. Isolation and nitrogen removal

- characteristics of heterotrophic nitrification-aerobic denitrifying bacteria, *Stenotrophomonas* sp. CW-4Y. Korean Soc Biotechnol Bioeng J 29, 72-80. http://dx.doi.org/10.7841/ksbbj.2014.29.1.72.
- Lee DH, Kim JY, Lim SY and Kim SG. 2018. Environment-friendly complex aquaculture technology study. In: 2017 Test research project report. Dongyang printing office. Incheon, Korea, 135-150.
- Liu LW, Su J and Luo Y. 2012. Effect of partial replacement of dietary monocalcium phosphate with neutral phytase on growth performance and phosphorus digestibility in gibel carp, *Carassius auratus gibelio* (Bloch). Aquac Res 43, 1404-1413. https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2011.02944.x.
- Losordo TM, Westerman PW and Liehr SK. 1994. Water treatment and wastewater generation in intensive recirculating fish production systems. Bull Natl Res Inst Aquaculture Suppl 1, 27-36.
- Marazioti C, Kornarons M and Lyberatos G. 2003. Kinetic modeling of a mixed culture of Pseudomonas denitrificans and Bacillus subtilis under aerobic and anoxic operating conditions. Water Res 37, 1239-1251. https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00463-3.
- Murashige T and Skoog F. 1962. A Revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. Physiol Plant15,473-497. https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962. tb08052.x.
- NIFS (National Institute of Fisheries Science). 2013. 2012 FAO world fisheries trends. In: Myeong JI, Min BH, Park NB, Park MS, Park JJ, Shin YK, Lee KA, Lee JH, Jeon JC and Hwang HG. eds. Koran Grapefice, Busan, Korea, 194-205.
- Nwanna LC, Adebayo IA and Omitoyin BO. 2009. Phosphorus requirements of African catfish, *Clarias gariepinus*, based on broken-line regression analysis methods. Science Asia 35, 227-233. https://doi.org/10.2306/scienceasial513-1874.2009.35.227.
- Ogino C, Takeuchi L Takeda H and Watanbe T. 1979. Availability of dietary phosphorus in carp and rainbow trout. Bull Jap Soc Sci Fish 45, 1527-1532. https://doi.org/10.2331/suisan.45.1527.
- Parent SÉ, Parent LE, Egozcue JJ, Rozane DE, Hernandes A, Lapointe L, Hébert-Gentile V, Naess K, Marchand S, Lafond J, Mattos D, Barlow P and Natale W. 2013. The plant ionome revisited by the nutrient balance concept. Front Plant Sci 22, 4-39. https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00039.
- Purwono, Rezagama A, Hibbaan M and Budihardjo AB. 2017. Ammonia-nitrogen (NH3-N) and ammonium-nitrogen (NH4+N) equilibrium on the process of removing nitrogen by using tubular plastic media. J Mater Environ Sci 8, 4915-4922.
- Rakocy JE. 2007. Ten guidelines for aquaponics systems. 10<sup>th</sup> Anniversary Issue. Aquaponics J 46, 14-17.
- Rakocy JE, Masser MP and Losordo TM. 2006. Recirculating

- aquaculture tank production systems: aquaponics-integrating fish and plant culture. Retrieved from http://www.gemstone.umd.edu/team-sites/classof2014/mega/documents/Rakocy RAS.PDF on May 16, 2018.
- Reyes AAD and Lawson TB. 1995. Combination of a bead filter and rotating biological contactor in a recirculating fish culture system. Aquacult Eng 15, 27-39. https://doi.org/10.1016/0144-8609(95)00005-Y.
- Russo RC, Thurston RV and Emerson K. 1981. Acute toxicity of nitrate to rainbow trout (*Salmo gairdneri*). Canadian J Fish Aqua Sci 38, 387-393. https://doi.org/10.1139/f81-054.
- Schneider O, Blancheton JP, Varadi L, Eding EH and Verreth JAJ. 2006. Cost price and production strategies in European recirculation systems. Linking Tradition & Technology Highest Quality for the Consumer. WAS, Firenze, Italy.
- Sokal RR and Rohlf FJ. 1995. Nested analysis of variance. In: Biometry. Freeman WH. 3<sup>rd</sup> ed. New York, NY, U.S.A., 272-342
- Suh KH, Kim BJ and Jeon IG. 2001. Design and development of intergrated recirculating aquaculture system. J Korean Fish Soc 34, 70-76.
- Trejo-Tellez LI and Gomez-Merino FC. 2012. Nutrient solutions for hydroponic systems. In: Hydroponics-A standard methodology for plant biological researches. Asao T, ed. In-Tech, Croatia, 1-22. http://dx.doi.org/10.5772/2215.
- Thorarinsdottir RI. 2015. Aquaponics guidelines. Haskolaprent, Reykjavik, Iceland, 33-39.
- Yelwa ST and Solomon RJ. 2016. Effect of weight and length on electrolyte of catfish (*Clarias gariepinus*). Intl J Farm Alli Sci 5, 295-307.
- Yoon TH, Lee DH, Won SG, Ra CS and Kim JD. 2014. Optimal incorporation level of dietary alternative phosphate (MgH-PO<sub>4</sub>) and requirement for phosphorus in juvenile Far eastern catfish (*Silurus asotus*). Asian Australas J Anim Sci 28, 111-119. https://doi.org/10.5713/ajas.14.0378.
- Yoon TH, Won SG, Lee DH, Jeong GS, Choi JW, Ra CS and Kim JD. 2017. Phosphorus requirement and optimum level of dietary supplementation with magnesium hydrogen phosphate (MgHPO4) recovered from swine manure for juvenile carp *Cyprinus carpio*. Korean J Fish Aquat Sci 50, 146-152. https://doi.org/10.5657/KFAS.2017.0146.