Korean J. Org. Agric.
Volume 26, Number 2: 297-316, May 2018
http://dx.doi.org/10.11625/KJOA.2018.26.2.297

ISSN 1229-3571 (Print)
ISSN 2287-819X (Online)

왕우렁이(*Pomacea canaliculata*)의 생리·생태학적 특성 및 논 잡초방제용으로 투입된 왕우렁이의 집단패사 원인*

이상범** · 이상민*** · 고병구*** · 이초롱*** · 김진호***

The Physio-ecological Characteristics of Golden Apple Snails (*Pomacea canaliculata*) and the Cause of Their Massive Death used for Weed Control in Wet Rice Paddies

Lee, Sang-Beom · Lee, Sang-Min · Ko, Byong-Gu · Lee, Cho-Rong · Kim, Jin-Ho

The golden apple snail (GAS, *Pomacea canaliculata*) is an invasive freshwater snail. The GAS was introduced in Korea without prior studies on the possibility of crop damage or its impact on the natural ecosystem. The freshwater apple snails can be found typically in ponds, rice paddies, irrigation canals, roadside ditches or slower portions of streams. In this study, we were carried out to investigate the assessment of physiological and ecological characteristics, environmental characteristics inhabited area in winter season and cause of massive death at one time of golden apple snails used for weed control in wet rice paddies. The GAS was introduced from Japan to Korea for commercial production as a dietary protein supplement. The golden apple snail was also used a recently for weed control in wet rice cultivation. The species of freshwater *Pomacea* snails is belonging to the genus *Pomacea*, family ampulariidae, order mesogastropoda, subclass pulmonata, class gastropoda, phylum mollusca. The GAS spread into irrigation ditches and natural waterways. It is now distributed in ponds and canals near rice fields of southern parts of the country and has overwintered. It increases its cold hardiness before winter. However, the physiological mechanism of cold hardiness in molluscs is poorly understood, especially in freshwater molluscs. Our results on physio-ecological characteristics of the *Pomacea* apple snail showed that the ratio of males to females was 1: 1.99~2.33. The daily growth was 87.7 mg in weight, 0.31 mm in height and 0.33 mm in width of the their shell. On the other hand, the

* 본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발 사업(과제 번호 : PJ012684052017)의 연구비 지원으로 수행되었음.

** Corresponding author, 농촌진흥청 국립농업과학원 유기농업과(korealee@korea.kr)
*** 농촌진흥청 국립농업과학원 농업환경부 유기농업과

golden apple snails were very high to resistance on drying condition and survived rate about 80% up to 3 months. The inhabitation of GAS was no statistical significant impacts on the water quality. An important property of aqueous solutions is agricultural water quality because it affects chemical and biochemical properties such as chemical reactions, equilibrium conditions, and biological toxicity. The death rate of weed control apple snails by Ostracoda (*Stenocypris hislopi*) was only 2.86% and 5.71% depending on the density. Therefore, GAS was not a direct death caused by Ostracoda (*Stenocypris hislopi*).

Key words : *golden apple snail (Pomacea canaliculata), massive death, ostracoda (Stenocypris hislopi), overwintering, weed control*

Ⅰ. 서 론

왕우렁이(Golden apple snail)는 토양동물계(Soil animal) 연체동물문(Mollusca) 복족강(Gastropoda) 유폐아강(Pulmonata) 중복족목(Mesogastropoda) Ampulariidae (혹은 Pilidae)과에 속하며, 전 세계에 7~10속(屬, genera) 120여종의 토착종이 주로 열대지방을 중심으로 서식하고 있다(Berthold, 1991; Joshi and Sebastian. 2006). 왕우렁이는 중남미, 서인도제도, 미국의 남부지역에 *Asolene*속, *Felipponea*속, *Marisa*속, *Pomacea*속이, 아프리카대륙에 *Afropomus*속, *Lanistes*속, *Saulea*속이, 아프리카와 아시아대륙에 *Pila*속이 주로 분포하고 있다(Joshi et al., 2017).

Common name (일반명) : Golden apple snail (왕우렁이)
Kingdom (계, 界) : Soil animal (토양동물계)
Phylum (문, 門) : Mollusca (연체동물문)
Class (강, 綱) : Gastropoda (복족강)
Subclass (아강, 亞綱) : Pulmonata (유폐아강)
Order (목, 目) : Mesogastropoda (중복족목)
Family (과, 科) : Ampulariidae (sometimes Pilidae)
Genus (속, 屬) : 7~10 Genera
Species (종, 種) : ca. 120 Species

Fig. 1. Classification of golden apple snail.

우리나라에 유입된 왕우렁이(*Pomacea canaliculata*)는 남미의 아마존강 유역 등 열대지방이 원산지로 따뜻한 기후에 서식하는 생물이지만 국내의 겨울철 영하의 날씨에 적응하기까지 오랜 기간이 소요되었다(Lee et al., 2000). Lee 등(2002)의 보고에 의하면 국내 유입 35여

년이 지난 현재 논 잡초방제를 위하여 투입된 왕우렁이들이 관개수로를 통하여 자연생태계로 이동되어 물이 고여 있는 논과 수로에 서식하고 있으며, 작물에 피해를 주고 있다. 또한, 국내 환경조건에서 왕우렁이의 생리·생태학적 특성에 관한 과학적인 연구들이 미흡한 상태에서 끊임없이 위해성이 제기되고 있다. 일부에서는 왕우렁이와 토종의 논우렁이와의 교잡에 의한 새로운 종이 발생될 것이라는 우려도 있으나 왕우렁이의 번식방법은 알을 산란하여 부화되어 어린 새끼 우렁이가 태어나지만 토종 논우렁이는 직접 새끼를 낳아 번식하는 특성을 가지고 있기 때문에 변종의 가능성은 전혀 없다(Lee et al., 2002).

왕우렁이를 포함한 외래유입 생물 종(species)들이 우리에게 가하는 단순한 피해여부를 판정할 수는 있지만 환경에 미치는 위해성 평가는 장기간의 추정기간이 요구됨으로 복합적으로 자연생태계내의 위험성을 판단하거나 추정하기는 쉽지 않다(Sanico et al., 2002). 또한, 국내 환경조건에서 발생되는 연구결과들이 명확하지 않은 상태에서 환경생태계 교란 가능성 등 포괄적으로 위해성을 논하는 것은 바람직하지 않다. 반면, 일련의 연구에서 왕우렁이를 사료성분으로 잘 이용한다면 더 이상 우리에게 해롭기만 한 존재가 아니라 오히려 경제적 가치가 있는 자원으로 이해될 수도 있을 것이다(Bombeo-Tuburan et al., 1995). 외래 생물종들의 새로운 도입이나 유입은 흔히 생태계에 침입과정으로 간주되어 생태계를 변화시키고, 교란시킬 것으로 생각하지만(Turner, 2010), 잘 정착된 외래종은 새로운 환경생태계 변화의 원동력이 된다는 긍정적인 측면도 보고되었다(Gilioli et al., 2017). 따라서 자연생태계에 대한 외래 도입종들의 잠재적 영향력을 단순하게 예측하기 보다는 위해성과 편익성의 양면을 충분히 고려한 종합적인 검토가 이루어져야 할 것이다.

최근 들어 친환경 벼 재배에서 논 잡초방제에 없어서는 안 될 정도로 중요한 역할을 담당해 오던 왕우렁이가 입식된 후 2~3일 이내에 집단패사 현상이 발생되면서 경제적 추가비용과 함께 논 잡초방제에 어려움이 많아지고 있다. 왕우렁이 집단패사가 발생되고 있는 논에 많은 물벼룩과 참씨벌레라고 하는 생물들이 번성하여 마치 이들 생물들이 왕우렁이를 공격하여 일시에 집단패사를 일으키는 것으로 농가들은 이해하고 있다.

따라서 외래도입 생물의 새로운 환경조건에 적응되면서 발생되는 다양한 현상들을 이해하고, 올바로 대처하기 위해서는 왕우렁이에 대한 생리·생태적 특성에 관한 충분한 사전연구가 이루어져야 미래에 발생될 수도 있는 문제점이나 우려들을 해결할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 국내 환경조건에 적응되어 영하의 겨울철에도 생존하여 서식하고 있는 왕우렁이들의 생리·생태적 특성을 검토하였다. 또한 벼 이앙기에 잡초방제를 위하여 투입된 개체들이 집단 패사되는 원인을 구명하여 추가로 발생되는 종패 구입비 절감과 효율적인 잡초방제를 위하여 연구를 수행하였다.

Ⅱ. 재료 및 방법

1. 생리 · 생태적 특성

1) 번식생리 특성

*Pomacea*속 왕우렁이의 생장량 시험은 잡초방제용으로 투입되는 각고 15 mm 내외 크기로 양식한 성체를 서로간의 간섭이 최소화 되도록 45×30×20 cm의 플라스틱 용기에 2마리씩 넣고 실험을 실시하였다. 먹이는 시중에 판매되는 사료를 공급하지 않고, 논과 수로 등에서 자라는 잡초와 주변에서 자라는 식물체를 공급하면서 처리 25일후의 생장 상태를 측정하였다. 생장량은 버니어캘리퍼스(CD-20CPX, Mitutoyo Corp)를 사용하여 각고와 각경을 측정하였고, 무게는 디지털 전자저울(CAS RE-200)을 사용하여 평량하였다.

성비 조사는 월동지역인 강진, 고흥, 해남, 제주지역의 수로에 서식하고 있는 성분화가 확실한 크기인 25 mm 이상인 성체(Lee et al., 2002)를 잡아서 현장에서 직접 암수를 구분하였다. 암수의 구별은 1차적으로 덮개뚜껑과 껍질의 외부 형태를 가지고 확인하였고, 2차적으로 성체를 해부하여 알집형성 여부를 가지고 최종 결정하였다. 덮개뚜껑은 암컷이 concave이고, 수컷은 convex 형태를 가지며, 껍질 모양에 있어서는 암컷이 안쪽으로 굽어져 있는 반면 수컷은 바깥쪽으로 굽어 있다(PhilRice, 2001).

알의 월동 여부는 12월 이전에 콘크리트 벽이나 식물체 줄기에 산란되어 부착된 알들이 추운 겨울을 지나고 붉은색이 선명한 건강해 보이는 난괴들을 3월 말에 월동지역인 화성과 해남 및 월동 전 산란량이 가장 많았던 상주지역에서 채취하였다. 채취한 난괴들은 부서지지 않도록 조심스럽게 실험실로 가져와 온도 25±0.5℃, 습도 60~70%로 조절된 항온항습기(Sanyo MIR 253) 내에 난괴들을 부화 용기에 4주 동안 치상하면서 치패의 발생 여부를 관찰하였다.

2) 건조 저항성

기상 이상에 의한 가뭄이 지속될 경우 왕우렁이의 생존 저항성을 구명하기 위하여 실시한 건조시험은 실내 상온의 응달조건에서 실시하였다. 실험 개체는 자연 환경에 적응된 월동 왕우렁이를 증식시켜 왕성한 활력을 가진 15~25 mm 크기의 성체를 사용하였다. 실험기간동안 공기가 잘 통하도록 망사자루에 넣어 22리터의 플라스틱 용기에 치상하여 놓고, 1주일 후부터 21주까지 생존여부를 조사하였다. 조사는 1주에서 5주의 간격으로 15개체씩 꺼내어 25±1℃로 조절된 항온수조(비전과학 KMC-1205 SW1)의 물속에 넣어 재활동에 소요되는 시간과 생존율을 조사하였다.

2. 수질에 미치는 영향

왕우렁이 서식이 수질에 미치는 영향을 조사하기 위하여 밀도별 pH, 전기전도도(Electric conductivity, EC) 및 총용존고형물(Total dissolved solids, TDS)을 측정하였다. 왕우렁이 밀도는 농과원 시험포장에서 사용하고 있는 지하수를 채취하여 1주일 동안 안정화시킨 후 4리터 용기에 물 1.5리터 채우고 번식이 가능한 25 mm 크기의 성체를 1마리, 3마리, 5마리씩 각각 넣었다. 실험기간 동안 먹이공급은 3일 간격으로 왕우렁이를 실험용기에서 꺼내어 채소를 충분히 공급한 후 다시 시험용기에 넣어 먹이원 급여에 의한 수질 영향을 최소화하였다. 실험 밀도는 논에 10 cm 깊이로 담수하였다고 가정하였을 경우 1 m^2로 환산하면 70마리, 210마리 및 350마리가 서식하는 밀도와 같은 매우 높은 수준에 해당한다. 활동성이 낮은 토종 논우렁이는 왕우렁이와 비교하기 위하여 5마리 처리구만을 두었다. 왕우렁이 서식에 따른 수질 변동 측정은 5일 간격으로 30일간 pH, EC (μS/cm), TDS (mg/L)를 pH/EC/TDS/Temperature meter (Hanna HI 991300)를 사용하여 측정하였다. 측정 결과에 대한 통계처리는 Duncan's multiple range test 방법으로 유의성을 검정하여 상호 비교하였다.

3. 집단패사 원인구명

잡초방제를 위하여 벼 이앙 후 논에 투입된 왕우렁이들이 집단 패사되는 논에 다량으로 서식하는 미소생물들을 250 ml 유리병에 채집하였다. 채집된 생물들은 왕우렁이에 붙어 있거나 집단적으로 모여 공격하는 것처럼 행동하는 눈으로 겨우 관찰할 수 있는 작은 생물 개체들을 물과 함께 채집하였다. 논에서 채집된 생물들의 모양을 관찰하고, 종을 동정하기 위하여 해부현미경(Leica DM5500B, CMS GmbH)으로 확대하여 그 구조를 촬영하였다. 또한 왕우렁이를 공격하여 2~3일 이내에 집단패사 시키는지를 구명하기 위하여 실험에 충분한 양의 미소생물들을 현장에서 채집하여 국립농업과학원 유기농업 시험포장에서 실험을 실시하였다. 실험은 채집된 미소생물들을 물 1 ml에 100마리와 200마리 밀도로 조절하고, 잡초방제용으로 입식되고 있는 15 mm 크기 전후의 건강한 왕우렁이 개체를 각각 35마리씩 처리하였다. 처리 후 7일 간격으로 3주간 패사되는 왕우렁이 수를 조사하였다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 왕우렁이의 생리·생태적 특성

1) 국내 환경 적응성

필리핀미작연구소에서 보고한 왕우렁이의 생활사(PhilRice, 2001)를 보면 Fig. 2와 같다.

알에서 부화하여 60일이면 번식이 가능한 성체가 된다. 수명은 보통 2~6년을 살아가게 되며, 성체의 교미 시간은 일년 동안 지속적으로 물이 공급된 식물들이 무성하게 밀생한 곳에서 하루 중 시각에 관계없이 3~4시간 이루어진다.

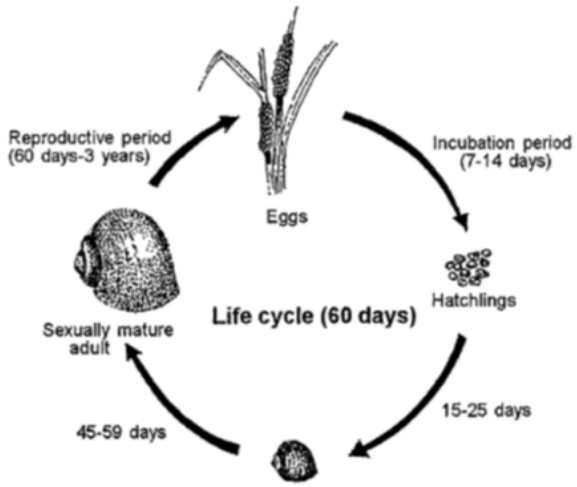

Fig. 2. Life cycle of golden apple snail (*Pomacea canaliculata*) in tropical zones.

왕우렁이는 번식이 빠르며, 한달에 1,000~1,400개의 알을 낳게 되는 데 어둠이 시작되면 수면위 식물체나 제방 뚝 및 나뭇가지, 말뚝, 돌 등 물이 잠기지 않는 곳에 산란하게 된다 (Lee et al., 2002). 산란된 왕우렁이 난괴들은 Table 1에서 보는바와 같다. 알이 산란된 직후에는 말랑말랑한 불투명의 연한 우유빛 연분홍색에서 3~4일이 경과되면 딱딱해지면서 선홍색으로 변화된다. 부화기에는 흐린 연보라색으로 산란에서 부화까지 알의 색깔과 경도가 변화된다. 왕우렁이 생존과 번식은 자연생태계의 환경변화에 의하여 크게 영향을 받게 된다(Gilioli et al., 2017). 산란 직후부터 보통 10~14일이 되면 새끼 우렁이가 부화된다.

Table 1. Changes in color and hardness of the golden apple snail (*Pomacea canaliculata*) eggs from spawning to hatching

Egg mass	Immediately after laid eggs	After 3-4 days laid eggs	Hatching period
Color	Milky light pink	Light pinkish-red	Light dark purple
Hardness	Soft	Hard	Hard

2) 1일 생장량

잡초방제용으로 사용하는 15 mm 내외의 소형 왕우렁이가 번식이 가능한 중형 크기로 성

장하는 동안 1일 생장량을 측정한 결과는 Table 2와 같다. 왕우렁이가 1일에 자라는 생장량은 평균 87.7 mg이었으며, 개체의 상태에 따라 차이가 있어 표준편차가 20.6 mg이었다. 외형의 껍질 크기는 각고가 0.31 mm, 각경이 0.33 mm씩 성장하였다.

왕우렁이(*Pomacea paludosa*)의 생장은 먹이원에 따라 차이가 있으며, 서식 밀도와의 관련하여 생장 초기에는 저밀도에서 다소 성장이 빠르지만 최종적으로는 성장률과 각고의 길이는 통계적으로 유의적인 차이가 없다고 보고하였다(Garr et al., 2011). 그러나 Garr 등(2011)은 양식에 가장 적합한 밀도를 100마리/m^2라고 추천하고 있으며, 이러한 밀도에서 1주에 3 mm씩 성장하여 3개월 후에는 25 mm 크기로 성장하였다고 보고하였다.

Table 2. The individual growth of small and mid-sized golden apple snail

Individual No.	Size of GAS (0 DAT*)			Size of GAS (25 DAT)			Increased weight (mg/day)
	Length (mm)	Width (mm)	weight (g)	Length (mm)	Width (mm)	weight (g)	
1	15.09	13.78	0.9	21.57	21.26	2.7	69
2	15.22	13.14	1.0	21.98	19.89	2.4	54
3	15.41	12.78	0.9	23.11	21.56	2.9	77
4	15.52	14.44	0.8	23.12	21.99	2.8	77
5	15.54	14.02	1.1	23.57	21.38	3.0	73
6	15.86	13.84	1.1	24.16	22.79	3.9	108
7	15.94	12.69	0.9	24.36	20.72	3.4	96
8	16.03	13.44	1.0	24.53	23.20	3.9	112
9	16.81	15.01	1.1	24.56	22.67	3.6	96
10	17.45	13.41	1.2	26.30	23.34	4.2	115
Means	15.9±0.74	13.7±0.72	0.9±0.12	23.7±1.38	21.9±1.12	3.3±0.61	87.7±20.6**

* DAT: day after treatment, ** Means ± Standard deviation

왕우렁이의 생장 차이는 온도, 수질 등의 환경조건, 먹이원 및 서식밀도에 따른 서로간의 경합과 같은 여러 요인들이 관여하기 때문이다. 그 외에도 왕우렁이의 종류에 따라서 1 m^2에 91~272마리 또는 0.5~1.5마리/L에서 수백마리까지 양식이 가능하다는 연구결과가 있지만(Dupont-Nivet et al., 2000; Alves et al., 2006), *Pomacea canaliculata*는 2마리/L 이상의 밀도에서는 생장에 부정적인 영향을 미친다는 결과가 있다(Tanaka et al., 1999).

3) 왕우렁이의 성비

왕우렁이의 성비 조사는 월동 지역인 강진, 고흥, 제주, 해남 지역의 수로에 서식하는 개

체를 대상으로 하였으며. 그 결과는 Table 3과 같다. 조사 개체는 월동 개체와 당년도에 투입된 개체가 모두 포함된 성분화가 뚜렷한 각고 기준 25 mm 이상의 개체를 대상으로 하였다. 조사 시기는 번식이 왕성한 7월과 월동 전 12월에 조사하였다. 왕우렁이의 성비는 번식이 왕성한 7월에는 암컷의 비율이 66.6%이고, 월동전 12월에는 70.0%로서 번식기에 다소 낮은 경향이었으나 연평균 수컷에 대한 암컷의 비율은 1:1.99~2.33으로 암컷이 높은 비율을 차지하고 있었다. 자연생태계에서의 왕우렁이 성비는 암컷이 약간 많지만 기본적으로는 1:1의 비율을 유지하고 있고, *Pomacea canaliculata* 종은 개별 집단 간에 성비의 차이가 있으나 전체적으로는 암수 동등한 성비를 가지고 있다고 보고한 결과와는 일치하지 않았다 (Yusa and Suzuki, 2003).

또한, 토착종이 아닌 외래종으로 국내에 유입되어 35년 이상의 기간 동안 환경적응 과정에서 발생된 결과로 사려되지만 왕우렁이 *Pomacea canaliculata*의 성비는 실험실이나 포장조건에서 환경요인의 조절에 의하여 결정되는 것이 아니라 유전적 요인에 의하여 결정된다는 결과와도 차이가 있었다(Yusa, 2004). 국내 환경에 적응하여 월동된 왕우렁이가 자연생태계에 산란한 난괴를 대상으로 환경영향이 반영된 유전적 측면이 검토될 수 있도록 부화 후의 성비 관계를 세밀히 구명되어야 할 것이다.

Table 3. The sexual ratio of the golden apple snail inhabited in the overwintering area in the natural ecosystem

Region	Sexual rate					
	July		December		Female ratio (%)	
	Male (No.)	Female (No.)	Male (No.)	Female (No.)	July	December
Kangjin	36	75	19	48	67.6	71.6
Goheung	48	80	16	37	62.5	69.8
Haenam	24	56	22	52	70.0	70.2
Jeju	35	67	21	45	65.7	68.2
Means	35.8	69.5	19.5	45.5	66.6±3.2*	70.0±1.4

* Means±Standard deviation

왕우렁이(*Pomacea poludosa*)의 성비는 난괴당 산란수, 알의 크기, 부화율 등에 유의적인 차이가 없으나 암컷의 비율이 높으면 산란되는 난괴의 수와 정의 산관 관계가 있어 생물종 번식과 보전에 적합하다고 보고하였다(Garr et al., 2012).

4) 알의 월동여부

왕우렁이는 주로 밤에 수면 위로 기어 나와 식물체 줄기, 콘크리트 벽 및 물 위에 1개의

난괴에 보통 500~1,200개의 알을 산란하고(Lee et al., 2002), 부화율이 80%로 번식력이 매우 빠른 특성 등을 가지고 있어(Halwart, 1994; Bombeo-Tuburan et al., 1995) 국내에서는 식용과 논 잡초방제용으로 활용되고 있다. 왕우렁이의 알은 산란된 후 자연환경 조건에 따라 차이가 있을 수 있으나 정상적으로는 10~14일 이내에 평균 12.78 mg 무게의 알이 부화되어 약 3.32 mg의 새끼 왕우렁이가 태어나게 된다(Lee et al., 2002). 그러나 늦가을에 산란되어 미처 부화되지 못하고 겨울을 지난 알들은 겨울기간 동안 영하의 기온이 지역별로 다소 차이가 있을 지라도 Table 4에서 나타난바와 같이 100% 부화되지 못하였다. 따라서 *Pomacea canaliculata* 종의 왕우렁이는 알로 월동되지 않는다는 결론을 도출할 수 있었다.

Table 4. The hatching rate of overwintered eggs inhabited in natural ecosystem

Region of egg collection	Treated eggs (No.)	Hatching eggs (No.)	Hatching rate (%)
Gyeonggi Hwaseong	1,247	0	0
Jeonnam Haenam	1,758	0	0
Kyeongbuk Sangju	3,685	0	0

※ Hatching period from 2017.03.28 to 04.25 (4 weeks)

5) 왕우렁이의 건조 저항성

수분, 온도, 일사량 등 환경 스트레스는 식물 생장 및 생산성에 가장 제한적인 요소로서 심각한 경제적 손실의 위협이 되고 있다는 연구들은 많으나(Boyer, 1982; Debaeke and Aboudrare, 2004; Song et al,, 2017) 왕우렁이의 건조 저항성에 관한 연구는 이루어지지 않았다. 따라서 왕우렁이의 건조 저항성에 대한 영향을 담양과 해남지역에서 월동한 개체들을 대상으로 시험을 실시한 결과 Fig. 3 및 Table 5와 같다. *Pomacea canaliculata* 왕우렁이들은 겨울철 저온에서는 취약한 반응을 보이고 있으나 Fig. 3에서 보는바와 같이 건조 저항성은 매우 높은 것으로 나타났다. 응달조건에서 건조 스트레스에 대하여 12주(3개월)까지는 생존율이 약 80%에 달하였으나 그 이후 급격히 저하되어 15주에는 생존율이 17.6%, 21주에는 8.7%에 불과하였다. 또한 건조 상태에서 충분한 물이 공급되었을 때 재활동시까지 소요되는 시간은 2주~2개월까지는 월동지역에 관계없이 모든 개체가 1시간 이내에 먹이를 찾아 이동하였으며, 건조 기간이 길어지면 재활동에 소요되는 시간이 길어졌다.

건조기간 경과에 따른 재활동 소요기간을 Talbe 5에서 살펴보면 *Pomacea* 속 왕우렁이들은 1주일의 가뭄이 지속되어도 물이 공급되면 모든 개체가 정상적으로 활동이 가능하고, 3주까지는 60~64%가 재활동 하는데 20분의 시간이 소요되었으며, 30분이 경과하면 100%가 정상적인 활동을 하였다. 그러나 건조기간 즉, 가뭄이 5개월 이상 길어지면 왕우렁이의 상태에 따라 재활동 시간이 길어지거나 죽게 되었다. *Pomacea* 속 왕우렁이의 건조 스트레스

에 대한 저항성은 월동지역에 관계없이 유의적 차이가 없었으며, 겨울철 저온보다는 건조에 견디는 저항성이 훨씬 높다는 결론을 도출할 수 있었다.

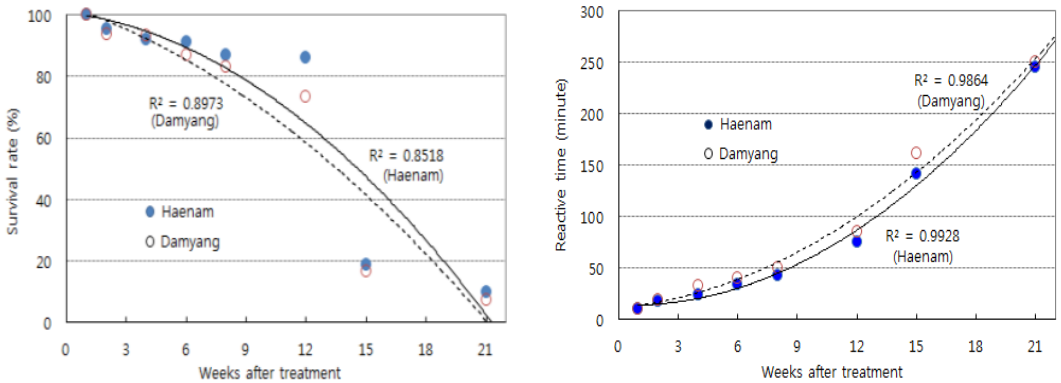

Fig. 3. Drought resistance of golden apple snails under room temperature conditions.

Table 5. Required time for reactivity according to drying period of golden apple snails

Region	Reaction time	Reactive rate (%)					
		1 week	2 weeks	3 weeks	4 weeks	6 weeks	12 weeks
Haenam	within 10 minutes	100	-	-	-	-	-
	within 20 minutes	-	62	60	25	11	-
	within 30 minutes	-	38	40	58	17	-
	within 40 minutes	-	-	-	17	14	13
	within 50 minutes	-	-	-	-	29	23
	within 2 hours	-	-	-	-	28	31
	over 2 hours	-	-	-	-	-	33
Damyang	within 10 minutes	100	-	-	-	-	-
	within 20 minutes	-	64	63	36	7	-
	within 30 minutes	-	36	37	46	13	9
	within 40 minutes	-	-	-	18	28	17
	within 50 minutes	-	-	-	-	28	28
	within 2 hours	-	-	-	-	34	46
	over 2 hours	-	-	-	-	-	-

왕우렁이는 아가미 호흡과 폐호흡 기능을 모두 가지고 때문에 가뭄에 대하여 저항력이 높아 3개월까지는 80% 이상의 생존율을 보였던 것으로 판단된다(Seuffert and Martín, 2010; Gao et al., 2017). 그러나 햇빛이 비추는 조건이었더라면 수분 손실량과 호흡량이 높을 것으로 판단되어 왕우렁이의 건조 저항성은 응달 조건보다는 다소 낮았을 것이다. 생물들은 혹독한 환경조건에서는 안정적인 상태를 유지하려고 행동을 억제하는 조절능력을 가지고 있을 것으로 여겨진다. 왕우렁이를 비롯한 많은 생물들은 오랫동안 동작을 정지 또는 최소화하는 하면형태의 행동을 통하여 고온이나 가뭄을 견디어 생존할 수 있는 기작이 있어 종족 유지가 가능할 것이다.

2. 왕우렁이 서식이 수질에 미치는 영향

벼 재배면적은 지구면적의 10%에 이르는 161백만 ha에 달하는 것으로 추정되며, 쌀은 중국을 포함한 동남아시아에서 밀의 생산량을 훨씬 능가하는 가장 중요한 식량 작물이다(Biswas et al., 2017). 벼의 생육과 수량을 제한하는 다양한 생물학적 스트레스 중에서 무엇보다도 잡초에 의하여 제약을 가장 많이 받는다(Tshewang et al., 2016). 이러한 잡초의 위협으로부터 제초제를 사용하지 않고 완벽하게 줄일 수 있는 방법이 국내에서는 왕우렁이를 활용한 잡초관리 방법이다. 소위 왕우렁이 농법에 의한 이앙재배 벼논의 잡초관리 방법은 친환경 실천농가뿐만 아니라 관행 벼 재배 농가들로 점점 확대되어 가고 있다. 그러나 일부에서는 이들 왕우렁이가 환경생태계에 미치는 영향이 부정적일 것이라는 시각들이 존재하고 있다. 잡초방제용 왕우렁이가 자연생태계 내에서 월동과 관련하여 작물의 생산성과 수질 환경에 미치는 중요한 요인들 중에 pH, 전기전도도(EC) 및 총용존고형물(TDS)의 변동에 관하여 측정하였다.

1) pH 변동

벼의 생육과 수량은 무기물 흡수에 의하여 영향을 받으며, 무기물 흡수는 논 토양과 수질의 pH, EC 등의 특성에 의하여 영향을 받는다(Huang et al., 2017). pH는 작물 생육에 필요로 하는 다량원소와 미량원소들의 이용성을 좌우하고, 각종 화학반응, 평형조건 및 생물학적 독성들과 같은 화학적 및 생화학적 특성에 영향을 미치기 때문에 중요하다(Herczeg et al., 1985). pH의 변동에 미치는 요인들은 많지만 본 시험에서는 논 잡초방제용으로 활용되고 있는 왕우렁이 및 토종 논우렁이에 의한 수질의 pH에 미치는 영향을 평가하고자 밀도를 달리하여 투입기간별로 분석한 결과는 Table 6과 같다. 물의 pH 변화는 왕우렁이 처리구가 무처리구에 비하여 다소 낮아졌으나 통계적으로 유의적인 차이가 없었다. 왕우렁이의 밀도는 수질의 pH에 미치는 영향이 거의 없었다. 토종의 논우렁이는 처리 기간이 지날수록 pH가 약간 낮아졌으나 왕우렁이와 마찬가지로 유의적인 차이가 없었다. 이상의 결과를 종

합하면 잡초방제용으로 활용하고 있는 왕우렁이나 논에 서식하는 우렁이에 의한 수질 pH 변동에는 영향이 없다는 것이 판명되었다.

Table 6. Impact of golden apple snail *Pomacea canaliculata* on the water pH

Trial density (No. of GAS/1.5 L water)	pH value after golden apple snail treatment				
	0 DAT	5 DAT	10 DAT	15 DAT	30 DAT
0	7.60[a*]	7.70[a]	7.73[a]	7.67[a]	7.64[a]
1	7.74[a]	7.42[a]	6.67[a]	6.44[a]	7.06[a]
3	7.78[a]	7.59[a]	6.77[a]	6.71[a]	7.09[a]
5	7.77[a]	7.52[a]	6.67[a]	6.79[a]	7.07[a]
5 Domestic paddy snails	7.71[a]	7.36[a]	7.16[a]	7.00[a]	7.04[a]

* Significantly different at P<0.05

2) 전기전도도(Electric conductivity) 변동

전기전도도는 농경지 토양에서 중요한 의미를 가지고 있으며, EC값이 높으면 삼투압의 포텐셜이 낮아져 수분 이용효율이 떨어지게 되어 작물생육이 제한되는 경우가 발생하기도 한다. 국제농업식량기구 및 몇몇 연구자들은 토양과 관개 농업용수의 염류농도(EC_w)에 관한 가이드라인을 제시하였다(Maas & Hoffman, 1977; FAO, 1985). 우리나라에는 토양에 대한 적정범위의 EC 농도가 설정되어 있으나 농업용수 수질기준은 별도로 제정되어 있지 않으며, 다만 환경정책기본법과 먹는 물 관리법에 근거하여 수원관리의 목적으로서 농업용수 수질기준만을 제시하고 있다. 농업용수 수질기준에는 EC에 관한 항목은 없으나 왕우렁이 활동에 따른 배설물의 양분적 공급 가치를 간접적으로 평가하기 위하여 시험한 결과 Table 7과 같다.

Table 7. Impact of golden apple snail *Pomacea canaliculata* on the water EC

Trial density (No. of GAS/1.5 L water)	EC (μS/cm) after golden apple snail treatment				
	0 DAT	5 DAT	10 DAT	15 DAT	30 DAT
0	155[a*]	161[a]	164[a]	167[a]	175[a]
1	153[a]	175[a]	177[a]	176[a]	193[a]
3	154[a]	250[b]	298[b]	296[b]	336[b]
5	153[a]	287[b]	342[c]	398[c]	546[c]
5 Domestic paddy snails	155[a]	209[ab]	271[b]	268[b]	263[ab]

* Significantly different at P<0.05

*Pomacea*속 왕우렁이 서식은 시간의 경과와 밀도가 증가됨에 따라 EC 값이 높아졌다. 토종 논우렁이도 왕우렁이 처리구 보다는 낮았지만 시간이 경과됨에 따라 증가되었다. 시험에 처리한 왕우렁이의 밀도는 1 m^2에 서식하는 개체로 환산하면 70마리, 210마리 및 350마리의 높은 밀도로 잡초방제용으로 입식하는 밀도 1~2마리와는 차이가 있어 실제로는 수질에 미치는 영향이 미미할 것이다.

3) 총용존 고형물(TDS, Total dissolved solids) 변동

용해성 고형물질의 총량 또는 총용존 고형물(TDS)은 물속에 녹아 있는 광물질, 염 등 양이온과 음이온을 포함하고 있으며, 침적토, 유기물 등에 의하여 용존 고형물이 생성되는 데 본 실험에서는 왕우렁이에 의한 총용존 고형물 생성에 미치는 영향을 측정하였다. 시험결과(Table 8) 왕우렁이 처리기간과 밀도에 따라 TDS 농도는 증가하였고, 처리 5일후부터 3마리 처리구에서 통계적으로 유의적인 차이를 나타내었다. 토종 논우렁이 처리구에서도 왕우렁이 처리구와 마찬가지로 시간이 경과됨에 따라 TDS가 증가되었으나 처리 30일후에는 왕우렁이 처리구에 비하여 약 50% 낮았다. 이러한 원인들은 왕우렁이가 토종의 논우렁이에 비하여 활동성이 높고, 먹이 섭식특성이 왕성하여 배설물이 많기 때문이다.

농업용 관개용수의 총용존 고형물 농도는 작물에 따라 차이가 있으나 보통 450~2,000 범위에 있어야 최적의 작물 생육상태를 기대할 수 있다고 제언하고 있다(Ayers and Westcot, 1994). 총용존 고형물은 부유물질과는 달리 물에 모두 녹아있는 상태로 오염물질로 볼 수 없으므로 TDS가 높다고 오염도가 높은 것이 아니라 오히려 작물을 위하여 적정한 농도가 요구된다고 할 수 있다.

Table 8. Impact of golden apple snail *Pomacea canaliculata* on the water TDS

Trial density (No. of GAS/1.5 L water)	TDS (mg/L) after golden apple snail treatment				
	0 DAT	5 DAT	10 DAT	15 DAT	30 DAT
0	88[a*]	80[a]	82[a]	83[a]	87[a]
1	76[a]	87[a]	88[a]	88[a]	96[a]
3	76[a]	125[b]	149[b]	148[b]	168[b]
5	76[a]	142[b]	171[b]	199[c]	273[c]
5 Domestic paddy snails	77[a]	104[a]	135[b]	134[b]	138[b]

[*] Significantly different at $P<0.05$

3. 잡초방제를 위하여 입식한 왕우렁이의 집단패사 원인

관행농업에서 잡초관리는 제초제나 비닐피복에 크게 의존하고 있어 생태계에 미치는 영

향 및 잡초가 작물생산성에 심각한 위협이 되고 있음을 지적하고 있다(Islam and Molla, 2001). 아시아 지역의 주요 식량으로서 벼 재배에 있어서도 잡초는 작물 생산성을 감소시키며, 품질에도 나쁜 영향을 미치기 때문에 유기농업에서는 심수 관수(Antralina et al., 2015), 유기물 피복(Ranaivoson et al., 2018)이나 오리와 왕우렁이 등 생물을 이용하여 잡초방제를 실천하고(Islam et al., 2005; Li et al., 2012) 있다.

국내에서 논 잡초방제는 주로 오리와 왕우렁이를 활용하여 효과적으로 수행하였으나 2008년도 조류 AI 바이러스 확산으로 인하여 전국적으로 왕우렁이에 의한 제초로 대체되었다. 이와 더불어 많은 친환경농업 실천단지에서 잡초방제를 위하여 입식한 왕우렁이들이 집단으로 패사하는 현상들이 곳곳에서 관찰되었다(Table 9). 잡초방제용으로 투입된 왕우렁이의 집단패사는 2008년 태안, 홍성, 양양 지역의 농가 포장에서 처음으로 관찰되었으며, 발생정도가 매우 심각하였다. 2017년도에는 예산, 부여 등 10여개 시군을 비롯한 전국 각지에서 왕우렁이 투입 후 2~3일 이내에 다량의 집단패사가 발생하여 반복하여 재투입하게 되어 농가의 종패비용 부담이 증가되었다. 또한 논 잡초방제 적기가 지나 효과가 저하되어 농가들의 노동력의 투입이 늘고, 벼의 수량 감소가 예상되어 농가소득에 많은 영향을 주고 있다.

Table 9. Massive death region of golden apple snails (GAS) used for weed control in wet rice field

Observed year	Massive death region of golden apple snails	
2008	Gangwon	Yangyang
	Chungnam	Hongseong, Taean
2017	Gyeonggi	Hwaseong, Siheung, Yangpyeong
	Chungnam	Buyeo, Dangjin, Hongseong, Nonsan, Taean, Yesan
	Chungbuk	Chungju
	Jeonnam	Hampyeong, Goheung
	Gyeongnam	Gimhae

왕우렁이들이 죽어가는 장소에는 이앙하면서 생긴 발자국이나 써레질 과정에서 생긴 다소 깊이 들어간 곳에 미세한 크기의 생물들도 많이 서식하고 있었다. 발자국이나 다른 곳보다 움푹 들어간 곳은 주위보다는 수온이 0.5℃ 높았다. 심한 일교차에 의하여 미소 수중생물과 연약한 왕우렁이들이 주위보다 온도가 높은 물이 깊은 곳으로 모여들었다. 농가와 왕우렁이 공급업자들은 왕우렁이와 함께 모여 있는 미세한 수중생물들이 왕우렁이를 공격하는 것으로 비춰질 여지가 충분하였다. 왕우렁이 주변에 무수히 많은 이들 수중생물들을

채집하여 해부현미경으로 관찰한 결과 Fig. 4 및 Fig. 5와 같다.

왕우렁이농법 실천농가와 왕우렁이 공급업자들이 왕우렁이를 공격하여 패사시킨다고 이해하고 있는 미소생물은 물벼룩과 패충류(참씨벌레)로 동정되었다. 왕우렁이 내외부에 부착되어 있거나 공격하는 것 같은 생물은 물벼룩이 아니라 패충류로 몸체 아래쪽에 날카로운 3개의 매 발톱모양이 부착되어 있었다. 패충류와 왕우렁이는 심한 일교차로 인하여 기온이 떨어지면 조금이라도 온도가 높은 곳으로 모여들었다. 패충류는 논에서 모내기할 때 만들어진 수온이 0.5℃ 높은 발자국 안으로 들어온 활력이 떨어져 죽어가는 연약한 왕우렁이의 몸체에 부착하나 껍질안쪽으로 들어가는 과정에서 날카로운 매 발톱 모양이 왕우렁이를 자극함으로서 일어나는 반응이 마치 공격하여 집단 패사시키는 것으로 농가들에게 비춰지고 있었다.

Fig. 4. Ostracoda (*Stenocypris hislopi*) and the microscopic picture attached on the golden apple snail.

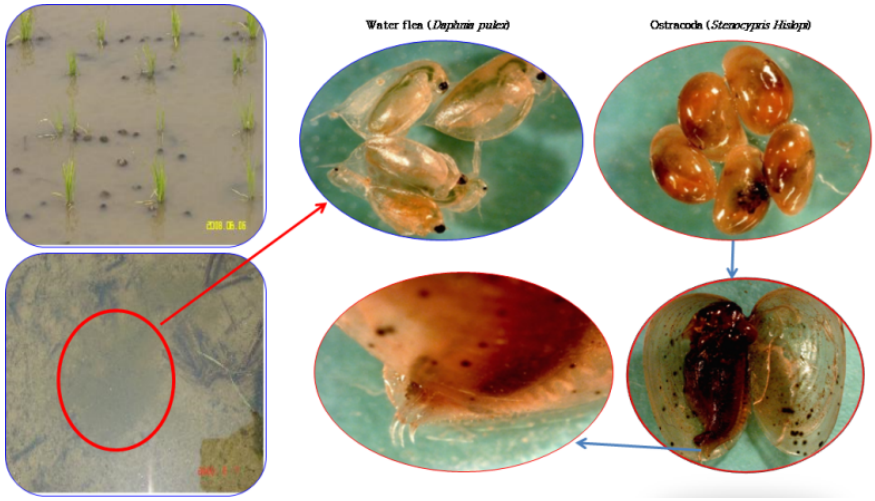

Fig. 5. The anatomy of the water flea (*Daphnia pulex*) and ostracoda (*Stenocypris hislopi*) attached to the golden apple snails.

패충류가 왕우렁이 패사에 어느 정도 영향을 미치는지에 대한 실험을 농가의 논에서 발생되는 것보다 높은 밀도인 1 ml당 패충류(참씨벌레)를 100마리와 200마리의 밀도로 조절한 후 건강한 왕우렁이를 넣고 패사여부를 시험한 결과는 Table 10과 같다.

Table 10. Lethality ratio of golden apple snails according to the treatment period and density of Ostracoda (*Stenocypris Hislopi*)

Trial density of Ostracoda (No./1ml)	Individuals of survival GAS after Ostracoda treatment				Lethality ratio of 21 DAT (%)
	0 DAT (6.8)	7 DAT (6.15)	14 DAT (6.22)	21 DAT (6.29)	
Control	35	35	35	34	2.86[a*]
100	35	35	34	33	5.71[a]
200	35	35	34	32	8.57[a]

* Significantly different at $P<0.05$

건강한 왕우렁이가 논 환경조건에서 3주일 동안 자연적으로 왕우렁이가 패사되는 비율은 2.86%에 불과하였다. 또한 패충류에 의한 왕우렁이의 패사는 밀도가 높아도 7일까지는 전혀 죽지 않았으며, 14일후에는 패충류의 밀도와 관계없이 2.86%가 패사되었다. 처리 3주후에는 패충류 100마리 밀도에서 5.71%, 200마리 밀도에서는 8.57%가 패사되었으나 무처리의 패사율을 반영하여 환산하면 각각 2.86%와 5.71%만이 패충류의 영향에 의하여 왕우렁이가 패사되는 결과로 나타났다. 이상의 시험결과 패충류(참씨벌레)에 의한 왕우렁이의 패사에 미치는 직접적인 영향은 미미하며, 잡초방제를 위하여 입식 후 2~3일내의 단기간에 다량의 집단패사의 원인을 일으키지 못하였다.

한편, 집단 패사되었다는 패충류(참씨벌레)가 많이 번성한 농가현장 논을 조사한 결과 죽은 왕우렁이 개체수가 많이 발견되지 않았다. 그 원인을 구명하기 위하여 건강한 개체와 활력이 떨어진 왕우렁이 개체를 기온과 수온이 낮은 이른 아침에 논에 투입한 결과 얼마 지나지 않아 건강한 개체는 논 흙속으로 자기 크기의 약 3배 깊이로 파고들어 갔다. 그러나 건강하지 못한 일부 개체들은 이동하지 못하고 투입한 곳에서 죽어 새들의 먹이가 되거나 발자국안의 흙속으로 이동하여 미소생물과 공존하면서 다소 간섭을 받기도 하였다.

이상의 연구와 관찰 결과들을 종합하여 보면 왕우렁이의 집단패사 원인은 1차적으로 논잡초방제 농가에 공급하기 위하여 양식장에서 왕우렁이 채취 및 이동에 따른 가스피해, 논에 투입 시 종패의 생장점 손상으로 발생될 것으로 판단된다. 2차적으로는 왕우렁이가 살아는 있지만 건강하지 못하여 입식당시 10~12℃의 심한 일교차(오전 7시 온도 14℃ 이하)로 인한 저온의 영향으로 땅속으로 들어가 죽거나 조류의 피해 등에 의하여 사라지는 것을 패사되는 것으로 오인하였다. 따라서 잡초방제용으로 투입된 왕우렁이의 단시간 내에 집단

패사 원인은 근본적으로 왕우렁이가 환경변화와 자체의 활력에 따른 문제이고, 참씨벌레라고 하는 패충류의 공격에 의한 영향은 미미한 것으로 결론을 내릴 수 있다.

Ⅳ. 적 요

본 연구는 왕우렁이의 생리·생태적 특성 및 논 잡초방제를 위하여 투입된 왕우렁이들의 집단패사 원인을 구명하기 위하여 수행하였다. 1983년 국내에 도입되어 양식과 논 잡초방제를 위하여 활용되고 있는 왕우렁이의 종(species)은 연체동물문(Mollusca), 복족강(Gastropoda), 중복족목(Mesogastropoda), Ampulariidae과, *Pomacea*속에 속하는 *Pomacea canaliculata* Lamarck이다. 왕우렁이의 생리·생태적 특성조사 결과 왕우렁이 성체들이 국내에서 월동되고 있으나 왕우렁이 알로는 월동되지 못하고 있다. 수컷과 암컷의 비율은 1:1.99~2.33배로 암컷의 구성비가 높았다. 생장량은 1일에 87.7 mg이었으며, 껍질은 각고가 0.31 mm, 각경이 0.33 mm씩 자랐다. 왕우렁이의 생장은 먹이의 조건 등에 따라서 차이가 있을 수 있으며, 매우 빠른 생장량을 나타내었다. 한편, 건조에 대한 저항성은 매우 강하여 3개월까지 생존율이 약 80%에 달하였다. 왕우렁이 서식에 따른 수질에 미치는 영향을 평가한 결과 다량의 서식 밀도에서는 약간의 영향을 줄 수는 있겠으나, 잡초방제를 위하여 투입되는 밀도에서는 전혀 영향이 없었다. 논 잡초방제를 위하여 벼 이앙초기에 투입되는 왕우렁이가 2~3일 이내에 일시에 집단 패사되는 직접적인 원인은 미소생물인 패충류(참씨벌레)에 의하여 발생되지 않는 것으로 판명되었다. 다만 패충류 (참씨벌레)에 의하여 패사되는 비율은 밀도에 따라 2.86%와 5.71%로 매우 미미하였고, 통계적인 유의적인 차이가 없었다. 논 잡초방제를 위하여 투입된 왕우렁이들은 벼 이앙시기가 빨라지고, 일교차가 커지면서 추운 저온의 날씨로 인하여 논의 흙속으로 들어가서 죽거나 일부는 새의 먹이가 되어 사라지기 때문에 다량이 죽은 것으로 오해되었다.

[Submitted, April. 5, 2018 ; Revised, May. 9, 2018 ; Accepted, May. 11, 2018]

References

1. Alves, T., P. Lima, S. F. B. Lima, A. G. Ferri, J. C. Barros, and J. Machado. 2006. Growth of Pomacea lineata and Pomacea bridgesi in different stock densities. Thalassas 22: 55-64.
2. Antralina, M., I. N. Istina, Y. Yuwariah, and T. Simarmata. 2015. Effect of difference weed

control methods to yield of lowland rice in the SOBARI. Procedia Food Science 3: 323-329.
3. Ayers, R. and D. Westcot. 1994. Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 29 Rev. 1. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
4. Berthold, T. 1991. Vergleichende Anatomie, Phylogenie und historische Biogeographie der Ampullaridae (Mollusca, Gastropda). Abhandlungen des naturwissenschaftlichen Vereins in Hamburg 29: 1-256.
5. Biswas, S., G. C. Hazra, T. J. Purakayastha, N. Saha, T. Mitran, S. S. Roy, N. Basak, and B. Mandal. 2017. Establishment of critical limits of indicators and indices of soil quality in rice-rice cropping systems under different soil orders. Geoderma 292: 34-48.
6. Bombeo-Tuburan, I., S. Fukumoto, and E. M. Rodriguez. 1995. Use of the golden apple snail, cassava, and maize as feeds for the tiger shrimp, *Penaeus monodon*, in ponds. Aquaculture 131: 91-100.
7. Boyer, J. S. 1982. Plant productivity and environment. Science 218: 443-448.
8. Debaeke, P. and A. Aboudrare. 2004. Adaptation of crop management to water limited environments. Eur. J. Agron. 21: 433-446.
9. Dupont-Nivet, M., V. Coste, P. Coinon, J. C. Bonnet, and J. M. Blanc. 2000. Rearing density effect on the production performance of the edible snail Helix aspera Müller in indoor rearing. Ann. Zootechnol. 49: 447-456.
10. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 1985. Agricultural drainage water management in arid and semi-arid areas. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29.
11. Gao, L., H. Doan, B. Nidumolu, A. Kumar, and D. Gonzago. 2017. Effects of copper on the survival, hatching, and reproduction of a pulmonate snail (*Physa acuta*). Chemosphere. 185: 1208-1216.
12. Garr, A. L., H. Lopez, R. Pierce, and M. Davis. 2011. The effect of stocking density and diet on the growth and survival of cultured Florida apple snails, *Pomacea paludosa*. Aquaculture. 311: 139-145.
13. Garr, A. L., H. Posch, M, McQuillan, and M. Davis. 2012. Development of a captive breeding program for the Florida apple snail, Pomacea paludosa: Relaxation and sex ratio recommendations. Aquaculture. 370-371: 166-171.
14. Gilioli G., G. Schrader, N. Carlsson, E. V. Donk, C. H. A. V. Leeuwen, P. R. Martín, S. Pasquali, M. Vilà, and S. Vos. 2017. Environmental risk assessment for invasive alien species: A case study of apple snails affecting ecosystem services in Europe. Environmental Impact Assessment Review. 65: 1-11.
15. Halwart, M. 1994. The golden apple snail *Pomacea canaliculata* in Asian rice farming

systems: present impact and future threat. Int. J. Pest Manage. 40: 199-206.

16. Herczeg, A. L., W. S. Broecker, R. F. Anderson, S. L. Schiff, and D. W. Schindler. 1985. A new method for monitoring temporal trends in the acidity of fresh waters. Nature. 315: 133-135.
17. Huang, L., X. Liu, Z. Wang, Z. Liang, M. Wang, M. Liu, and D. L. Suarez. 2017. Interactive effects of pH, EC and nitrogen on yields and nutrient absorption of rice (*Oryza sativa* L.). Agricultural Water Management. 194: 48-57.
18. Islam, M. J. and H. H. Molla. 2001. Economic weeding method for irrigated rice production in Bangladesh. Agricultural Water Management. 46: 268-276.
19. Islam, M. R., G. J. U. Ahmed, S. T. Hossain, A. Salahuddin, and M. A. Hasan. 2005. Impact of integrated riceeduck farming on the farm productivity and livelihood improvement of farmers. Int. J. Sustain. Agric. Technol. 1: 65-71.
20. Joshi R. C. and L. S. Sebastian. 2006. Global advances in ecology and management of golden apple snails. Philippine Rice Research Institute.
21. Joshi, R. C., R. H. Cowie, and L. S. Sebastian. 2017. Biology and management of invasive apple snails, The Philippine Rice Research Institute.
22. Lee, S. B., J. H. Kim, Y. E. Na, and M. H. Koh. 2000. A study on the ecology of golden apple snails(Final report). National Institute of Agricultural Science and Technology.
23. Lee, S. B., M. H. Koh, Y. E. Na, and J. H. Kim 2002. Physiological and ecological characteristics of the apple snails. Korean J. Environ. Agriculture. 21(1): 50-56.
24. Li, S. S., S. H. Wei, R. L. Zuo, J. G. Wei, and S. Qiang. 2012. Changes in the weed seed bank over 9 consecutive years of riceeduck farming. Crop Protection. 37: 42-50.
25. Maas, E. V. and G. J. Hoffman. 1977. Crop salt tolerance - current assessment. J. Irrigation and Drainage Division, ASCE. 103(IR2): 115-134.
26. PhilRice. 2001. Management options for the golden apple snail. Philippine Rice Institute, Rice technology bulletin No.33.
27. Ranaivoson, L., K. Naudin, A. Ripoche, L. Rabeharisoa, and M. Corbeels. 2018. Is mulching an efficient way to control weeds? Effects of type and amount of crop residue in rainfed rice based cropping systems in Madagascar. Field Crops Research. 217: 20-31.
28. Sanico, A. L., S. Peng, R. C. Laza, and R. M. Visperas. 2002. Effect of seedling age and seedling number per hill on snail damage in irrigated rice. Crop Protection. 21: 137-143.
29. Seuffert, M. E. and P. R. Martín. 2010. Dependence on aerial respiration and its influence on microdistribution in the invasive freshwater snail *Pomacea canaliculata* (Caenogastropoda, Ampullariidae). Biol. Invasions. 12: 1695-1708.

30. Song, Q., C. Liu, D. G. Bachir, L. Chen, and Y. G. Hu. 2017. Drought resistance of new synthetic hexaploid wheat accessions evaluated by multiple traits and antioxidant enzyme activity. Field Crops Research. 210: 91-103.
31. Tanaka, K., T. Watanabe, H. Higuchi, K. Miyamoto, Y. Yusa, T. Kiyonaga, H. Kiyota, Y. Suzuki, and T. Wada. 1999. Density-dependent growth and reproduction of the apple snail, Pomacea canaliculata: a density manipulation experiment in a paddy field. Res. Pop. Ecol. 41: 253-262.
32. Tshewang, S., M. M. Sindel, M. Ghimiray, and B. S. Chauhan. 2016. Weed management challenges in rice (*Oryza sativa* L) for food security in Bhutan: A review. Crop Protection. 90: 117-124.
33. Turner, M. G. 2010. Disturbance and landscape dynamics in a changing world. Ecology. 91(10): 2833-2849.
34. Yusa, Y. 2004. Brood sex ratio in the apple snail Pomacea canaliculata (Gastropoda: Ampullariidae) is determined genetically and not by environmental factors. Journal of Molluscan Studies. 70: 268-275.
35. Yusa, Y. and Y. Suzuki. 2003. A snail with unbiased population sex ratios but highly biased brood sex ratios. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences. 270: 283-288.