

## 반응표면분석을 이용한 패류의 부영양수 유기물 제어능 연구

최환석<sup>1</sup> · 남귀숙<sup>1</sup> · 김민섭<sup>2</sup> · 신현재 · 박명환<sup>3</sup> · 황순진<sup>3,\*</sup> · 김백호<sup>4,\*</sup>

조선대학교 생명화학고분자공학과, <sup>1</sup>한국농어촌공사 농어촌연구원,

<sup>2</sup>국립환경과학원 환경측정분석센터, <sup>3</sup>건국대학교 환경과학과, <sup>4</sup>한양대학교 생명과학과

**Response Surface Methodology for Optimization of the Removal of Organic Matters in Eutrophic Waters by Korean Freshwater Bivalves.** Choi, Hwan-Seok, Gwi-Sook Nam<sup>1</sup>, Min-Seob Kim<sup>2</sup>, Hyun-Jae Shin, Myung-Hwan Park<sup>3</sup>, Soon-Jin Hwang<sup>3,\*</sup> and Baik-Ho Kim<sup>4,\*</sup> (Department of Chemical & Biochemical Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea; <sup>1</sup>Rural Research Institute, Ansan 426-908, Korea; <sup>2</sup>National Institute of Environmental Research, Incheon 404-708, Korea; <sup>3</sup>Department of Environmental Health Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea; <sup>4</sup>Department of Life Science, Hanyang University, Seoul 123-791, Korea)

**Abstract** This study was conducted to establish models of filtrating rate and production of feces of a native freshwater bivalve, *Anodonta woodiana*, on removal organic matters in eutrophic waters. Among the applied shell size (4.3~15.5 cm), the filtrating rate and production of feces of *Anodonta woodiana* was 0.08~0.86 L g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> (average 0.24 L g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>), 0.00~11.10 mg g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> (average 0.94 mg g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>), respectively. In two different water current (high 48 Lh<sup>-1</sup>, low 24 Lh<sup>-1</sup>), the filtrating rate of Chl-*a* was 0.02~0.10 L g<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> (average 0.05 L g<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>), 0.02~0.11 L g<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> (average 0.07 L g<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>) and the removal rate was 65.4%, 82.1%, respectively. Response surface methodology, with a central composite design comprising 3 levels and 2 variables, was used to identify the optimal removal condition of shell length, water current and filtrating rate or feces production by bivalves. The optimum removal conditions were found that had optimized 6.21 L mussel<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> at shell length 14.3~15.6 and water current 22~30 Lh<sup>-1</sup>. The optimal conditions of production of feces (4.2 mg g<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>) by freshwater mussels were shell length 14.3~16.3 cm and water current 36~44 Lh<sup>-1</sup>.

**Key words:** freshwater bivalve, *Anodonta woodiana*, response surface methodology, mussel size, current, filtration rate

### 서 론

부영양화에 대한 생물학적 제어를 위한 담수 패류의 잠재적 이용 가능성은 Carpenter *et al.* (1985)에 의해 처음 제안되었다. Carpenter *et al.* (1985) 등은 영양염이 풍

부한 얇은 수심과 긴 체류시간 조건 하에서 패류 군집이 조류의 성장을 제한할 수 있음을 증명하기 위하여 패류에 의한 조류 제어 모델을 고안하였다. 그 후에 Reeders *et al.* (1989) 등은 네덜란드 호소 서식종인 *Dreissena polymorpha* 개체군의 여과율을 측정하여 앞선 모델과 유사한 결과를 평가하였다. 또한, Ogilvie and Mitchell (1995)은 뉴질랜드의 호소에서 *Hyridella menziesi*가 대변성한 식물플랑크톤의 밀도를 감소시킬 수 있도록 호소수를 여과할 수 있는 능력을 보유하고 있는 것으로

Manuscript received 23 November 2014, revised 20 December 2014,  
revision accepted 22 December 2014

\* Corresponding author: Tel: +82-2-2220-0960, Fax: +82-2-2220-0960,  
E-mail: tigerk@hanyang.ac.kr; sjhwang@konkuk.ac.kr

© The Korean Society of Limnology. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provide the original work is properly cited.

평가하였다. 이와 같은 연구들을 토대로 수계에 서식하는 패류 개체군이 조류 대발생 수계의 수생태 회복에 대한 중요한 생물소재로의 가능성을 가진 것으로 평가되었다 (Reeders and Bij de Vaate, 1991; Ogilvie and Mitchell, 1995).

국내 담수 패류 서식종은 재첩 (*Corbicula fluminea*), 말조개 (*Unio douglasiae*), 펄조개 (*Anodonta woodiana*), 칼조개 (*Lanceolaria grayana*), 민물담치 (*Limnoperna fortunei*) 및 귀이빨대칭이 (*Cristaria plicata*) 등이 있으며, 이들은 서식환경의 물리적 조건 (수온, 용존산소)과 생화학적 조건 (영양염 농도)에 상대적인 오염 내성범위가 크고, 단위시간당 여과율이 높아 (Hwang *et al.*, 2004), 최근에 국내에서 발생하는 수계 부영양화 및 조류 대발생을 조절할 수 있는 유용생물자원으로 연구되고 있다 (Lee *et al.*, 2008a; Kim *et al.*, 2009). 육상의 조류 대발생 문제에 대한 생물제어기술로 이러한 패류의 여과섭식특성을 활용한 모델의 개발은 고유하고 다양한 패류가 분포, 서식하고 있는 국내 담수 환경에 대한 적용 가능성이 높을 것으로 예상되고 있다.

이와 함께, 다양한 분야에서 실험에 대한 최적화를 위하여 다양한 통계적인 실험방법들이 적용되고 있다 (Jin *et al.*, 2014; Jeong *et al.*, 2014). 일반적으로 상용되는 통계적인 실험방법 중 반응표면 분석법 (response surface methodology)은 독립변수와 종속변수 간의 관계를 실험값으로부터 추정하여 독립변수의 변화에 따른 반응변수의 값과 이에 따른 최적값을 최소한의 비용과 시간으로 예측할 수 있는 장점이 있어 적절한 실험계획법을 찾기 위한 방법으로 이용되고 있다 (Lee *et al.*, 2008c).

따라서 본 연구는 부영양 호수에서 담수 패류를 이용한 조류 및 유기물 제거를 위한 공학적 모델을 설계하고자 반응표면 분석법을 적용하여 패류의 유기물 제거에 영향을 미치는 인자 (크기, 유속 및 여과율)들의 영향을 확인하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 대상종 패류의 채집 및 실험 장치의 구성

실험에 사용한 패류는 국내에서 서식하는 펄조개 (*Anodonta woodiana* Lea)로서 대상종의 채집은 금강 및 만경강의 지류에서 성체만을 채집하였으며 채집된 조개류는 곧바로 아이스박스에 넣어 실험실로 운반한 다음 탈염 수돗물로 2~3회 씻고 관리조에 넣어 3개월 이상 순

응시켰다.

대상 패류를 이용한 유기물 제거 실험에 사용한 장치는 Lee *et al.* (2009b)과 동일한 구조로, 처리조는 스테인레스강 재질 (80×80×145 cm)로서 처리용량은 총 500 L이다. 처리조의 내부에는 수표면 10 cm 아래에 격자형 패류 거치대 (75×75 cm)를 설치하고 그 위에 대상 패류 100 개체를 넣고 순치한 다음에, 유기물 제거 실험은 생육 상태가 양호한 30개체를 대상으로 하였다. 외부의 부영양 호수수를 장치 내부로 유입하는 유속은 0~72 Lh<sup>-1</sup>의 범위로 빠른 유속 (HC)는 48 Lh<sup>-1</sup>, 느린 유속 (LC)는 24 Lh<sup>-1</sup>의 속도로 통과시켰다. 실험에 사용한 실험수는 수온을 19±3°C로 조절하였고, 광주기는 12D : 12L로 유지시켰다.

### 2. 분석 항목

실험대상으로 선정된 패류의 유기물 여과에 따른 여과율 및 배설물 생산량을 측정하기 위하여 각각의 개체에 대하여 패각 길이를 직접 측정하고, 이에 따른 패류의 유기물량의 측정은 패각을 제외한 모든 부분을 미리 계측한 도가니에 담고 100°C 건조기에서 48시간 동안 건조시킨 후 도가니의 무게 (W<sub>1</sub>)를 측정하고, 이를 다시 500°C 회분로 (HY-8000S, YUYU SCIENTIFIC)에 넣고 30분간 다시 태운 다음, 100°C 건조기로 옮겨 48시간 방치시킨 후 무게 (W<sub>2</sub>)를 측정하여 패류의 건조량은 W<sub>1</sub>-W<sub>2</sub>로 계산하여 산정하였다. 여과율에 대하여 직접적인 분석항목인 클로로필 농도 (Chl-*a*)와 부유물질 (SS)은 수질공정시험법 (APHA, 1995)에 따라 각각 아세톤 추출법과 실험수를 여과한 후 여과지의 무게 차이를 이용하는 방법으로 측정하였다.

담수 패류의 유기물 여과능 (FR; filtering rates)은 일정 시간 동안 대조군과 조개류 처리군의 클로로필-*a* (Chl-*a*) 농도 차이를 패류의 유기물량으로 나누어 계산하였다 (Coughlan, 1969). 패류의 여과율 (FR) (L g<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>)=V/M × ln (T/C)/t (V: 실험수의 부피 (L), M: 사용된 패류의 유기물량 (g), C, T: 대조군과 처리군의 클로로필-*a* 농도 (μg L<sup>-1</sup>), t: 실험시간).

담수 패류의 배설물 생산량 (PF, feces- and pseudo-feces production)은 일정시간 동안 대조군 및 처리군에서 생성된 바닥 침강물량의 차이를 유기물량으로 나누어 계산하였다 (Kim *et al.*, 2009). 패류의 배설물 생성능 (PF) (mg g<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>)=(V/M) (S<sub>2</sub>-S<sub>1</sub>)/t (V: 실험수의 부피 (L), M: 패류의 AFDW (Ash free dry weight, g), S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>: 대조군과 처리군의 침강물 무게 (mg), t: 실험시간)의 관

계식으로 직접 측정하였다. 또한, 패류의 유기물 제거활성(RA, Removal activities)은 대조군 및 처리군의 클로로필-*a*와 부유물질의 농도 차이를 구한 것으로  $RA(\%) = 1 - (C_t/C_o) * 100$ ,  $C_t$ 는 처리군의 클로로필-*a* 또는 부유물질 농도,  $C_o$ 는 대조군의 클로로필-*a* 또는 부유물질 농도의 관계식으로부터 측정하였다.

### 3. 반응표면분석

패류에 의한 유기물 여과 반응 조건의 최적화를 위한 실험설계는 통계학적 방법에 따른 운전 변수들의 경향과 상호 작용, 그리고 실험오차 등을 포함한 데이터를 반응표면 분석법(response surface methodology, RSM)의 방법에 따라 Minitab(MINITAB Release 14.12.1, Korea) 프로그램을 사용하여 분석하였다. 소프트웨어 내의 중심합성설계법(central composite design, CCD) 프로그램을 이용하여 패류의 크기, 유속, 여과율(FR) 및 배설물 생성능(PF)을 독립변수로 3수준 2인자의 블록을 설정하였다. 패류의 크기는 high level 20 cm, low level 4 cm, 유속은 high level  $72 L h^{-1}$ , low level  $0 L h^{-1}$ 으로 설정하였다. Table 1에 본 실험에서 설정한 실험설계를 나타내었다.

## 결과 및 고찰

### 1. 패각 크기에 따른 유기물 여과율 및 배설물 생성능

실험에 사용된 펄조개(*A. woodiana*)의 패각 크기는 4.3~15.5 cm(평균 9.54 cm)이었으며, 각 개체별 건중량(AFDW)은  $0.70 \sim 7.65 g \text{ indiv}^{-1}$ (평균  $2.53 g \text{ indiv}^{-1}$ )이었다. 패각 크기와 패류 건중량과의 상관관계는  $R^2$ 값이 0.95( $p < 0.0001$ ,  $n=30$ )으로 높은 상관성을 나타내었다(Fig. 1). 패각 크기가 클수록 건중량 또한 증가하는 양상을 나타내었는데, 이는 Lee *et al.* (2008b)의 결과와 일치하는 패턴을 나타내었다.

본 연구에서 사용된 펄조개(*A. woodiana*) 30개체를 대상으로 한 여과율(FR) 실험에서 패각 크기 4.3~15.5 cm(평균 9.54 cm)에 따른 유기물 여과율은  $0.08 \sim 0.86 L g^{-1} h^{-1}$ , (평균  $0.24 L g^{-1} h^{-1}$ )의 범위를 나타내었으며, 전체적으로 각 개체 크기에 따라 변동폭이 있었으나, 패각 크기에 따른 단위 건중량당 펄조개의 여과율은  $0.09 L g^{-1} h^{-1}$ 를 나타내었다. 패각 크기와 유기물 여과율의 상관관계는  $R^2$ 값이 0.33( $p > 0.05$ ,  $n=30$ )으로 패각 크기와 여과율은 약한 상관성을 나타내었다.

펄조개의 배설물 생산량(PF)은  $0.00 \sim 11.10 mg g^{-1} h^{-1}$

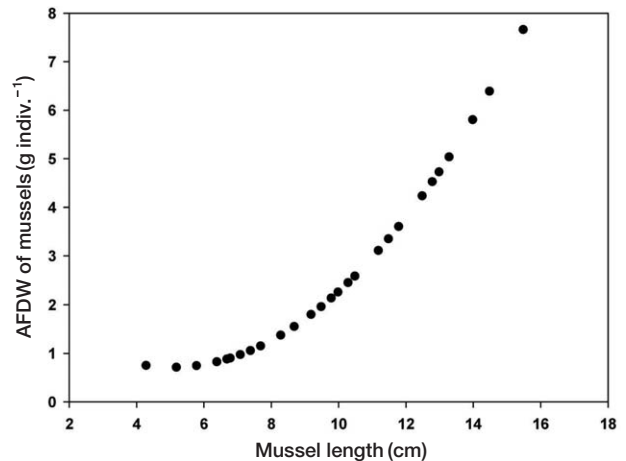


Fig. 1. Correlation of mussel's length and ash-free dry-weight (AFDW) of *Anodonta woodiana* ( $R^2=0.954238$ ,  $p < 0.0001$ ).

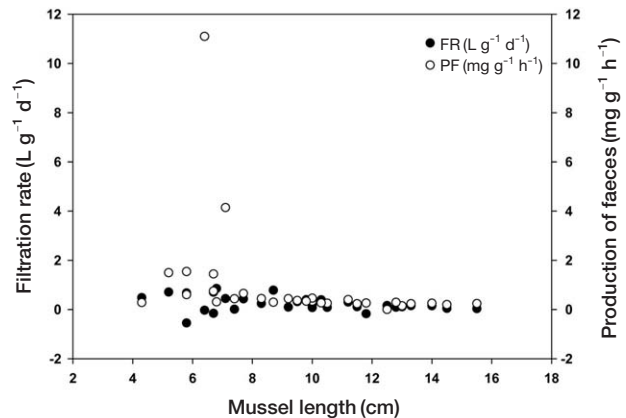


Fig. 2. Filtrating rate (FR) and production of feces (PF) of bivalve *Anodonta woodiana*.

(평균  $0.94 mg g^{-1} h^{-1}$ )의 범위를 나타내었으며, 앞선 여과율과 동일하게 단위 건중량당 배설물 생산량은  $0.37 mg g^{-1} h^{-1}$ 를 나타내었다(Fig. 2). 패각 크기에 따른 펄조개의 배설물 생산량과의 관계는  $R^2$ 값이 0.35( $p > 0.05$ ,  $n=30$ )로 여과율과 유사하게 약한 상관성을 나타내었다. 위의 결과는 Lee *et al.* (2008b)의 말조개(*U. douglasiae*) 크기에 따른 여과율과 배설물 생산 연구결과와 거의 유사하게 패각 길이에 따른 여과율과 배설물 생산 특성은 상관성이 낮으며, 이러한 결과는 대상 패류 개체 무게당 여과율이 동일한 종내에서 크기에 의존한다기보다 패류 개체의 여과능력과 연관된다는 보고(Fanslow *et al.*, 1995)와 관련성이 있다고 판단되었다.

또한, 패류의 여과 특성은 패류 종간 차이(Fanslow *et al.*, 1995), 먹이에 따른 차이(Dorgelo and Smeenk, 1988)

및 수온 변동에 따른 섭식을 저하(Fanslow *et al.*, 1995)에 의하여 영향을 받을 수 있다고 알려져 있으므로, 본 연구에서도 이와 같은 변동 요인들에 대한 추가적인 실험이 진행되어야 할 것으로 사료되었다.

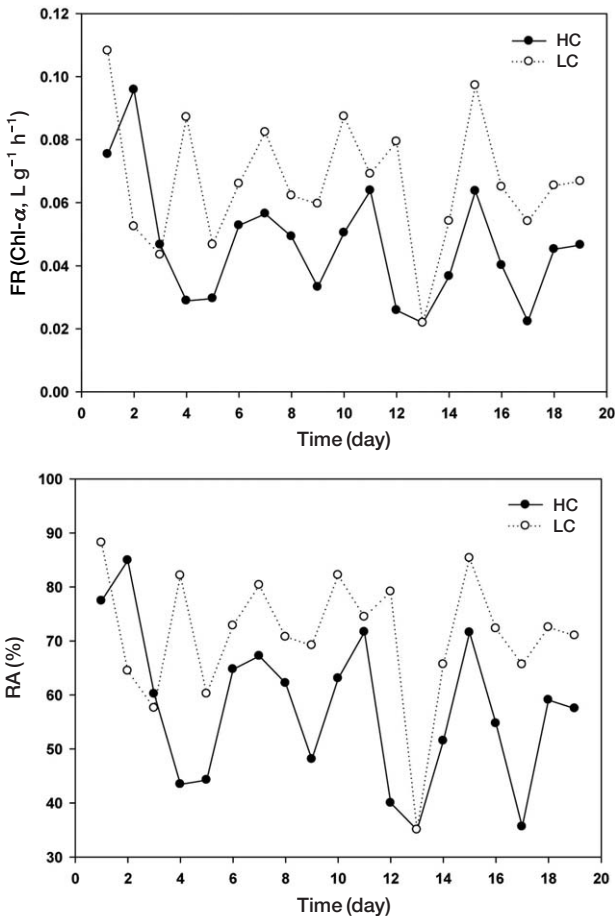
**2. 유속 변화에 따른 패류의 여과율 및 배설물 생성**

20일간 유속 변동에 따른 펄조개의 클로로필-*a*와 수중 부유물질에 대한 여과율과 제거율을 조사하였다. 클로로필-*a*에 대한 여과율은 빠른 유속(48 Lh<sup>-1</sup>)에서는 0.02~0.10 L g<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>(평균 0.046 L g<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>)의 범위를 나타내었고, 느린 유속(24 Lh<sup>-1</sup>)에서는 0.02~0.11 L g<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>(0.07 L g<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>)의 범위를 나타내어 빠른 유속 조건보다 느린 유속에서 클로로필-*a*에 대한 여과율이 50% 정도 높게 나타났다. 부유물질에 대한 여과율은 빠른 유속에서 0.01~0.08(평균 0.06)의 범위를 나타내었고, 느

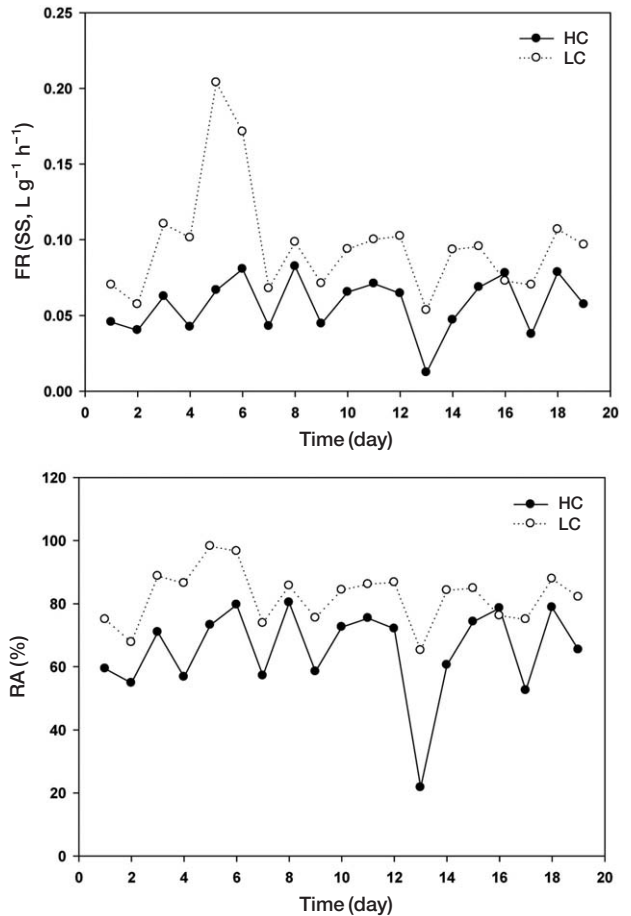
린 유속에서는 0.05~0.20(평균 0.10)의 값을 나타내어 클로로필-*a* 여과율과 유사하게 느린 유속에서 59.3% 높게 나타났다.

또한, 클로로필-*a* 제거율(RA, %)도 느린 유속에서는 평균 82.1%, 빠른 유속에서는 65.4%의 제거율을 나타냈고, 부유물질 제거율은 각각 71.0%, 57.5%의 값을 나타내어 전체적으로 느린 유속에서 클로로필-*a*와 부유물질에 대하여 더 높은 여과율과 제거율을 나타내는 것으로 확인되었다(Figs. 3, 4).

이와 같이 느린 유속에서 높은 여과율과 유기물 제거율을 나타내는 것은 Kirby-Smith and Barber(1974)가 빠른 유속에서는 패류가 수중의 입자성 물질을 여과하는 능력을 감소시킨다는 보고와 일치하는 경향을 나타낸 것이며, 또한 이러한 특성을 패류 장치의 체류시간을 통해 동일종에 대한 이전 Lee *et al.*(2009b)의 연구와 비교했을 때 동일한 유속(24 Lh<sup>-1</sup>)과 크기(10.6~11.4



**Fig. 3.** The filtering rate of chlorophyll-*a* and removal activity of freshwater bivalve *Anodonta woodiana* in two different water current. LC: low water current (24 Lh<sup>-1</sup>), HC: high water current (48 Lh<sup>-1</sup>).



**Fig. 4.** The filtering rate of SS and removal activity of freshwater bivalve *Anodonta woodiana* in two different water current. LC: low water current (24 Lh<sup>-1</sup>), HC: high water current (48 Lh<sup>-1</sup>).

**Table 1.** Factors and their levels for response surface analysis.

RunOrder	PtType	Block	Length	Current	FR
1	1	1	0	0	-0.154323
2	-1	1	0	4	-0.960614
3	0	1	3	12	0.536026
4	1	1	3	16	0.841482
5	1	1	3	20	1.040782
6	1	1	5	36	1.518741
7	-1	1	5	40	1.219448
8	0	1	10	24	3.533042
9	-1	1	10	28	3.681253
10	1	1	10	32	3.723296
11	-1	1	10	36	3.659184
12	1	1	12	54	2.641646
13	1	1	12	60	2.005068
14	-1	1	16	54	3.363164
15	0	1	16	60	2.823326
16	1	1	16	72	2.177327
17	0	1	20	52	3.469552
18	0	1	20	54	3.164852
19	0	1	20	60	2.753994
20	-1	1	20	72	2.236974

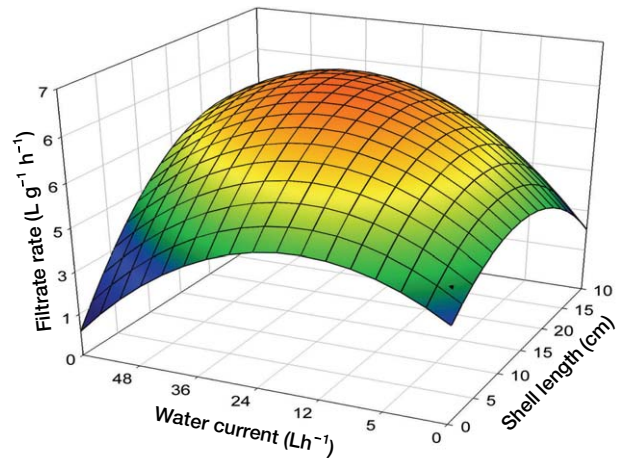
cm)일 경우 체류시간이 22.7 hr로 가장 길었던 실험에서 가장 높은 여과율을 나타내었던 결과와 유사한 경향을 나타내었다.

이상의 결과에서 지나치게 빠른 유속은 여과율 감소를 야기시키며, 이러한 여과율 감소에 장치 내 체류시간도 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 결과를 토대로 부영양수의 패류를 이용한 유기물 제어 시스템 및 모델의 설계에 있어 제거 장치 전단부에 유입원수의 유량과 유속을 조절할 수 있도록 저류 장치의 추가와 같은 유속과 체류 시간에 대한 상호 인자의 관계를 확립한다면 우수한 유기물 제어 효율을 나타낼 것으로 기대되며, 이에 따른 추가 연구가 필요할 것으로 판단되었다.

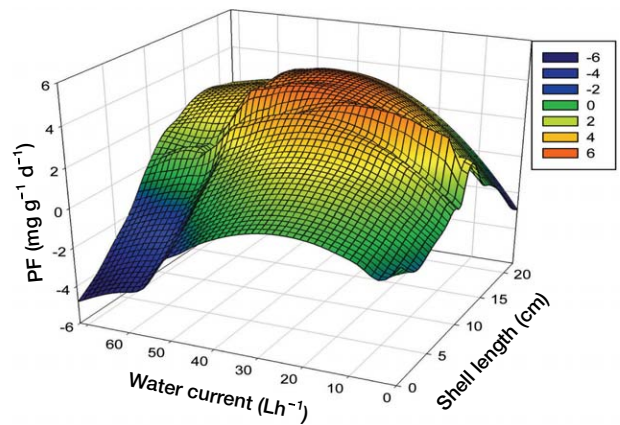
**3. 반응표면분석**

반응표면분석법에 의한 패류 크기와 유속에 따른 유기물 제어 반응의 최적조건의 결정은 중심합성 설계법을 이용하여 2인자 수준으로 설계하여 패류의 유기물 제어반응을 수행하여 얻은 유기물 여과율과 배설물 생산능을 종속변수로 하여 얻은 결과를 Table 1에 나타내었다. 설계된 실험조건에 따라 패류의 크기는 high level 20 cm, low level 2 cm, 유속은 high level 72 Lh<sup>-1</sup>, low level 0 Lh<sup>-1</sup>으로 설정하였다.

2개의 독립변수인 패류의 크기 (10 cm)와 유속 (36 Lh<sup>-1</sup>)으로 설정하여 분석한 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 반응표면분석 결과, 패각 크기는 14.3~15.6 cm,



**Fig. 5.** Response surface plots representing the effect of mussel's length and water current on filtrating rate of organic matter by freshwater mussels.



**Fig. 6.** Response surface plots representing the effect of mussel's length and water current on feces production of organic matter by freshwater mussels.

유속은 22~30 Lh<sup>-1</sup> 구간에서 여과율 6.21 L mussel<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>의 최적값을 나타내었다. 또한, 배설물 생산능은 패각 크기는 14.3~16.3 cm, 유속은 36~44 Lh<sup>-1</sup> 구간에서 배설물 생산이 4.2 mg g<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>의 최적값을 나타내었다.

Yoon *et al.* (2012)의 연구에서 반응표면분석을 이용하여 아스타잔틴 추출최적조건 확립 시 모델의 결정계수 즉 R<sup>2</sup>값이 0.97이고 0.0003의 확률 값 *p*는 본 회귀 모델이 높은 유의한 결과라는 평가와 비추어 볼 때, 본 연구의 R<sup>2</sup>값은 0.91로서, 유용한 모델이 될 수 있을 것으로 판단되었다.

그러나, 패류에 의한 배설물 생성이 다소 불규칙적인 경향을 나타내는 것은 패류의 활동에 수은 변화에 따

라, 패류의 산소소비량, 섭식율 및 활동성 변동과 연관 있다고 한 Buddensiek (1993)의 연구결과와 유사한 경향을 나타내는 것이다. 따라서, 이와 같은 불안정한 경향을 완화시키기 위해서는 패류 서식장치 내에서 수온 변동폭을 조절할 수 있는 장치적 구성이 필요하다는 것을 시사해 주었다. 비슷한 패류의 크기에도 불구하고 유속이 증가하면 패류에 의한 유기물 제어능은 감소하는 것으로 보아 패류의 유기물량, 유속 등이 모두 유기물 제어 반응에 중요한 인자로서 작용하는 것으로 판단되었다. 따라서, 패류를 이용한 유기물 제거 활성을 안정적으로 증대시키기 위해서는 적절한 패류 종 선택을 위한 종별 또는 중간 혼합 실험과 적당한 패류 개체의 유기물량과 유속 및 체류 시간뿐만 아니라 패류의 서식 활동에 영향을 미치는 외부환경요인들에 대한 안정화 방법도 함께 고려되어야 할 것으로 판단되었다.

적 요

부영양화 호소수에 대한 국내 서식 펄조개 (*A. woodiana*)의 유기물 제어 실험 결과, 펄조개 30개체를 대상으로 패각 크기 4.3~15.5 cm (평균 9.54 cm)에 따른 유기물 여과율은 0.08~0.86 L g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>, 단위 건중량당 펄조개의 여과율은 0.09 L g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>를 나타내었다. 펄조개의 배설물 생산량 (PF)은 0.00~11.10 mg g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>, 단위 건중량당 배설물 생산량은 0.37 mg g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>를 나타내었다. 또한, 클로로필-*a*와 부유물질 제거율 (RA, %)은 느린 유속에서 82.1%, 71.0% 빠른 유속에서는 65.4%, 57.5%의 제거율을 나타냈고, 반응표면분석 결과, 패각 크기는 14.3~15.6 cm, 유속은 22~30 Lh<sup>-1</sup> 구간에서 여과율 6.21 L mussel<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>의 최적값을 나타내었다. 또한, 배설물 생산능은 패각 크기는 14.3~16.3 cm, 유속은 36~44 Lh<sup>-1</sup> 구간에서 배설물 생산이 4.2 mg g<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>의 최적값을 나타내었다.

사 사

본 연구는 2014년 한국농어촌공사 기획연구과제로 수행되었으며, 이에 감사사를 표하는 바입니다.

REFERENCES

APHA, 1995. Standards methods of the examination of water

and wastewater (19th ED). American Public Health Association, Washington, D.C.

Buddensiek, E.H., H. Engel, H. Fleischauer-Rossing and K. Wachtler. 1993. Studies on the sediments of bivalve habitats in several northern German lowland Water II: Microhabitats of margaritifera L., *Unio crassus* Philipsson and *Unio tumidus* Philipsson. *Arch. Hydrobiol.* **127**: 170-180.

Carpenter, S.R., J.F. Kitchell and J.R. Hodgson. 1985. Cascading trophic interactions and lake productivity. *Bio-Science* **35**: 634-639.

Coughlan, J. 1969. The estimation of filtration rates from the clearance of suspensions. *Marine Biology* **29**: 170-180.

Dorgelo, J. and J.W. Smeenk. 1988. Contribution to the eco-physiology of *Dreissena polymorpha* (Palls) (Mollusca: Bivalvia): Growth, filtration rate and respiration. *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie* **23**: 2202-2208.

Fanslow, D.L., T.F. Nalepa and G.A. Lang. 1995. Filtration rates of the zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) on natural seston from Saginaw Bay, Lake Huron. *Journal of Great Lakes Research* **21**: 489-500.

Hwang, S.J., H.S. Kim, J.K. Shin, J.M. Oh and D.S. Kong. 2004. Grazing effects of a freshwater bivalve (*Corbicula leana* PRIME) and large zooplankton on Phytoplankton communities in two Korean lakes. *Hydrobiologia* **515**: 161-179.

Jeong, Y.S., J.W. Kim, E.S. Lee, Y.G. Na, S.S. Kim and S.T. Hong. 2014. Optimization of alkali extraction for preparing oat protein concentrates from oat groat by response surface methodology. *Journal of Korean Society Food Science and Nutrition* **43**(9): 1462-1466.

Jin, S.Y., E.J. Lee and M.H. Kim. 2014. Quality characteristics and optimization of rice cookies with nuts by response surface methodology. *Journal of East Asian Society of Dietary Life* **24**(2): 208-216.

Kim, B.H., S.K. Baik, S.O. Hwang and S.J. Hwang. 2009. Operation of CROM System and its Effects of on the Removal of Seston in a Eutrophic Reservoir Using a Native Freshwater Bivalve (*Anodonta woodiana*) in Korea. *Korean Journal of Limnology* **42**(2): 161-171.

Kirby-Smith, W. and R. Barber. 1974. Suspension-feeding aquaculture systems: effects of phytoplankton concentration and temperature on growth of the bay scallop. *Aquaculture* **3**: 135-145.

Lee, J.H., S.J. Hwang, S.G. Park, S.O. Hwang, C.M. Yu and B.H. Kim. 2009b. Continuous removal of organic matters of eutrophic lake using freshwater bivalves: Inter-specific and intra-specific differences. *Korean Journal of Limnology* **42**(3): 350-363.

Lee, S.H., S.J. Hwang and B.H. Kim. 2008a. Combined effects of biological control agent two native shellfish on the hibernial diatom bloom of eutrophic water. *Korean Journal of Limnology* **41**(3): 402-411.

- Lee, S.H., S.K. Baik, S.J. Hwang and B.H. Kim. 2009a. Comparison of grazing characteristics of a freshwater bivalve *Unio douglasiae* (Unionidae) on the cold and warm phytoplankton communities in eutrophic lake. *Korean Journal of Limnology* **42**(1): 115-123
- Lee, Y.J., B.H. Kim, N.Y. Kim, H.Y. Um and S.J. Hwang. 2008b. Effects of temperature, food concentration and shell size on filtering rate and pseudo-feces production of *Unio douglasiae* on *Microcystis aeruginosa*. *Korean Journal of Limnology* **41**: 61-67.
- Lee, Y.S., J.K. Ha and E.S. Lee. 2008c. Optimization of peel adhesion of acrylic pressure sensitive adhesive using design of experiments. *Journal of Adhesion and Interface* **9**: 22-27.
- Ogilvie, S.C. and S.F. Mitchell. 1995. A model of mussel filtration in a shallow New Zealand lake, with reference to eutrophication control. *Archive fur Hydrobiologia* **133**(4): 471-482.
- Reeders, H.H., A.B. Bij de Vaate and F.J. Slim. 1989. The filtration rate of *Dreissena polymorpha* (Bivalvia) in three Dutch lakes with reference to biological water quality management. *Freshwater Biology* **22**: 133-141.
- Reeder, H.H. and A.B. Bij de Vaate. 1991. Zebra mussel (*Dreissena polymorpha*): a new perspective for water quality management. *Hydrobiologia* **200/201**: 437-450.
- Yoon, C.H., H.S. Bok, D.K. Choi and K.H. Row. 2012. Optimization condition of astaxanthin extract from shrimp waste using response surface methodology. *Journal of Korean Chemical Engineering Research* **50**(3): 545-550.